

绪论

能源是人类生存和文明进步的基础，能源的发展离不开科技进步和科技创新的支撑。本章将从国际能源形势、能源的基本概念、多种多样的能源形式介绍聚变研究的能源大背景。

1.1 备受关注的聚变能

几十年来，关于聚变的新闻总会引起社会极大的关注。这种关注和人们对于天体物理（诸如黑洞、引力波）或者基本粒子物理（诸如希格斯子）的关注有所不同，后者更大程度源自人类对于未知世界的兴趣，而人类对于聚变的关注则是因为它可能从根本上解决人类社会所面临的能源问题。

为什么能源问题这么重要？从历史的维度，每一次新能源的发现，都伴随着人类社会的巨大进步。燧人氏钻木取火，人类告别了茹毛饮血的时代；瓦特发明蒸汽机，拉开了工业革命的大幕；法拉第电磁感应定律的发现，开启了恢宏的电气时代；核武器以一种前所未有的方式展示了核能的巨大威力，随后和平利用的核电为人类提供了一种高效绿色的新能源。从生活的微观角度来看，经济的发展、生活水平的提高都是和能源消耗量密切联系的，这都可以在各种国际组织或者各种委员会等提供的研究报告中找到明确的关系。然而，与能源的旺盛需求矛盾的是，能源的供应并不是那么充足和均衡，能源的价格并不是那么便宜，因此能源问题被尖锐地作为一个“问题”被提出来。在进入“低碳社会”的呼声下，提倡能源集约型经济增长，只能是降低由于单位生产总值或者生活水平提高而产生的能源消耗量，而不能改变二者正相关的关系。

更进一步，并不是充足和便宜的能源就一定能解决问题。能源问题还和其他问题有密切的联系，比如最突出的是环境问题。化石能源带来的空气污染已经是大家的共识，而越来越多的证据表明温室气体的排放对环境有明显的副作用，因此在能源生产和使用过程中，环境友好的概念得到越来越多的重视。

需要特别注意的是，能源消耗在全世界是极其不平衡的。发达国家和地区要保持现有生活方式和持续提高生活水平，而欠发达国家和地区则要努力达到发达国家的生活方式和水平，能源的总消耗量和消耗的地域分布势必会引起巨大的变化。而在这样一个全球

追求充足、便宜、清洁能源的过程中，政治、军事等因素的介入也不可避免。回顾历史和观察时事，多次国际局势动荡背后无不有能源问题的影子。

在这样的背景下，聚变能作为一种具备丰富、高效、清洁、安全特点的能源，作为一种可能一劳永逸地解决人类能源问题的方案闪亮登场，理所当然地受到人们的极大关注。也正是聚变能几乎具备理想能源的所有优点，吸引着一代又一代追梦人，在聚变涉及的复杂的科学和工程领域艰苦探索，为实现聚变能源的开发利用而不懈努力。

1.2 何为能源

让我们回到基本问题上来。第一个问题就是什么是能源？答案似乎很简单，能源就是能够提供能量的资源。那么，什么是能量呢？这其实是个很难定义的概念。从生活的经验或者物理学的知识，我们可以理解能量具有多种存在形式，比如动能、势能、内能、化学能、核能、电能等。能量在不同的形式之间可以转化，但是其总量保持守恒。通常教科书上的一种定义是能量是做功的能力，另外一种定义是能量是最终可以转化成热的物质形态。这两个定义其实是从人类利用的角度上，即能量存在形式的转化来定义能量。事实上，从人类社会能源消耗的最终途径来看，能量的绝大部分都转化为动力（机械能）和热能，当然也有少量用于光能（电磁能）。

图 1.1 给出了 2020 年中国从能源生产到消费的能量流动全过程，图 1.2 则是 2021 年美国能源系统的能量流动图。可以注意到，尽管两个国家在具体能源结构上有着较明显的不同，但能量的最底层来源和主要转换形式是一致的。能量的最底层来源包括石油、煤炭、天然气、生物质、水能、核能，这些被称为“一次能源”，即自然界中以原有形式存在的、未经加工转换的能量资源，又称天然能源。而应用最广泛的电能属于“二次能源”，它不是直接取自自然界，只能由一次能源加工转换以后得到，因此并不是严格意义上的能源。

按照爱因斯坦的质能关系，能量和质量相互联系。但是我们并不把所有有质量的物质都称作能源，因为能源的利用依赖于人类可以掌握的转化过程。例如，人类只是在核能的利用中才开始初窥质量亏损的威力。而作为一个反例，由于正反物质的本征不对称性，利用物质湮灭作为能源在目前看起来并不是一条现实可行的途径。

如果站在宇宙演化的背景下来看，各种“一次能源”之间也是相互联系的，如图 1.3 所示。它们“最终”可以归于大爆炸后物质间的引力。当引力坍塌形成太阳后，聚变能成为恒星的主要能量来源。太阳内的聚变能通过光照进一步转化为地球人类可以利用的化石能源、风能、水能、太阳热能及光能。同时，重核元素的形成为核裂变能及核衰变能（如地热）提供了可能。而潮汐是我们在地球上还可以利用的引力能。因此，一个需要做的明确界定是，我们所关心的能源是在较短的人类文明周期里，可以被人类掌握利用的资源。

认知到能源的利用就是可控制的能量转化过程，就很容易理解不同能源其实对应不同的转化过程，而不同的转化过程决定了不同能源所能提供的能量值，或者更准确地说，储能密度。表 1.1 给出了一些常见储能物质的能量密度。农耕时代，人们只会利用人力畜力、

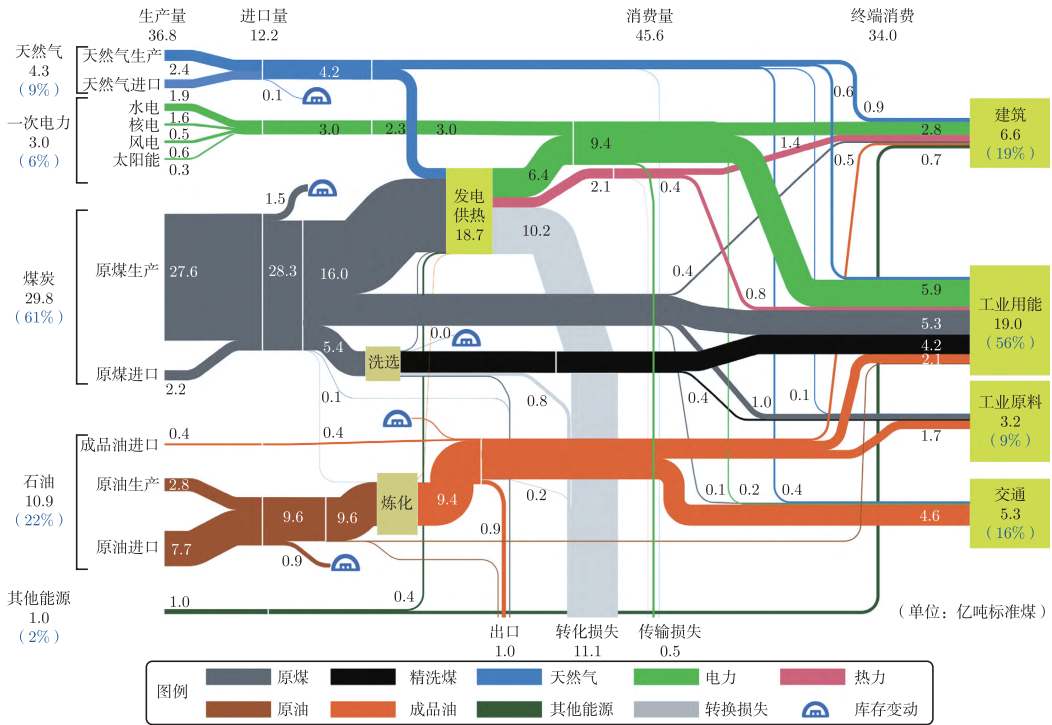


图 1.1 中国 2020 年从能源生产到消费的能量流动全过程

(资料来源: 何京东, 曹大泉, 段晓男, 等. 发挥国家战略科技力量作用, 为“双碳”目标提供有力科技支撑 [J/OL]. 中国科学院院刊 (202204)[2024-08-27]. DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.20220324004. 图 1.)

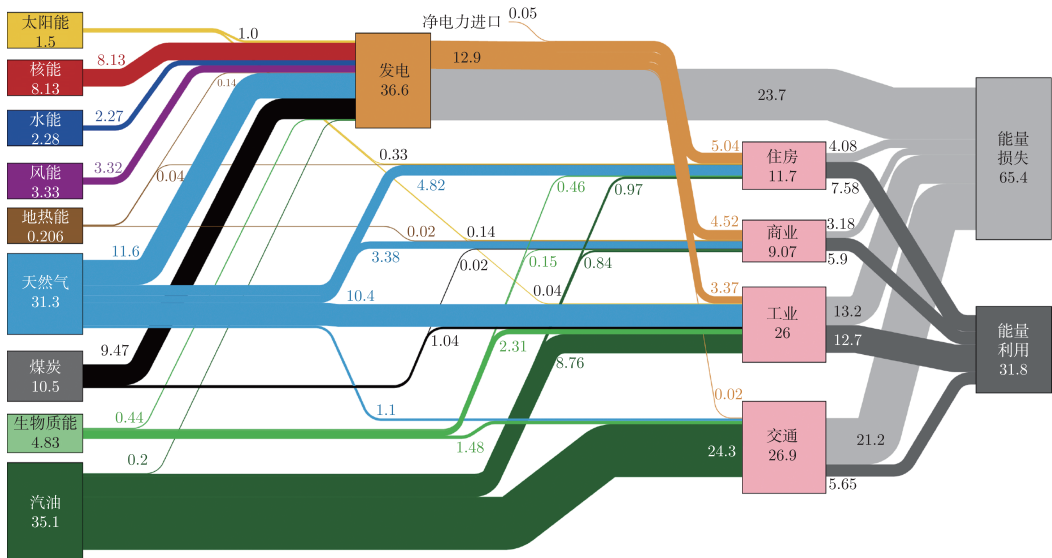


图 1.2 美国 2021 年从能源生产到消费的能量流动全过程

(资料来源: <https://flowcharts.llnl.gov>.)

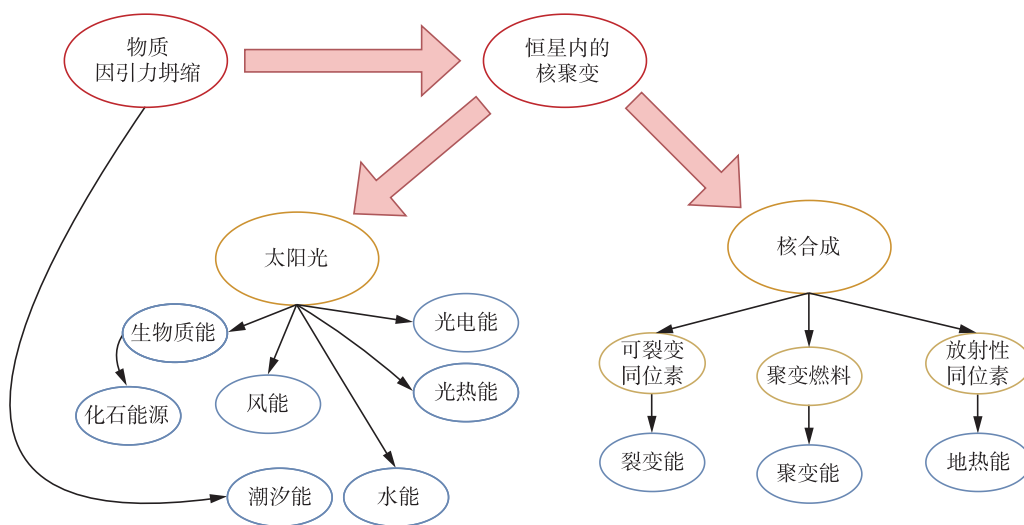


图 1.3 能源所蕴含能量的物理来源

表 1.1 常见储能物质的能量密度

储能物质	单位质量可提供的能量 (J/kg)
飞行的物体 (340 m/s)	5.8×10^4
提升到 10 m 高度的水	9.8×10^4
TNT 炸药	4.3×10^6
木柴 (+ O ₂)	1.2×10^7
煤 (+ O ₂)	2.7×10^7
汽油 (+ O ₂)	4.2×10^7
天然气 (+ O ₂)	5.4×10^7
氢气 (+ O ₂)	1.1×10^8
铀-235	8.2×10^{13}
氘 (D-T 聚变)	3.3×10^{14}

水的势能，以及最粗放的生物质燃烧；在工业革命时代，人们通过对化石能源的利用，系统地掌握了化学能的释放；而在原子时代，人们开始掌握核能释放的奥秘。简单的物理知识告诉我们，化学能释放是核外电子结合能的改变，一次化学反应能量转化是电子伏量级；而核能释放的是核子结合能的改变，一次核反应能量转化是兆电子伏量级。因此，很容易理解单位质量的核燃料可以提供比单位质量的化石燃料高 6 个量级的能量。核燃料具有更高的储能密度，是更高效的能源形式，因此可以作为人类社会的基础供应能源。

1.3 多种多样的能源

人类在社会发展中逐渐掌握了多种能源。习惯上，按照技术成熟度，把石油、天然气、煤炭等化石能源和水能称为常规能源，而把太阳能、地热能、风能、潮汐能、生物质能、核

能等称为新能源；按照短期内的可再生性，把化石能源称为不可再生能源，而把水能、风能、潮汐能、生物质能等称为可再生能源。更细致地，我们可以进一步考察能源的物理属性（如储能密度、放能效率与速率等）以及能源的社会属性（如资源丰富性、环境友好性、安全性、经济性等），这些属性从不同角度决定了能源的品质。

化石能源，即煤炭、石油、天然气，具有较高的储能密度，在转化为机械能、热能和电能上有非常成熟的技术，因此具有最广泛的应用，是现代文明的基础。但大量使用化石能源的缺点也逐渐显现。首先，化石能源是储量有限、短期不可再生的。石油和天然气，乐观地估计，可使用年限在 200 年左右，煤炭则可能达到数百年直至千年，但伴随着易开采化石能源的不断消耗，新的油气资源的开采技术难度和开采成本会不断提升。不过，目前看起来，环境问题是制约化石能源使用的最大因素。不加控制的化石能源燃烧释放的硫化物、氮化物对空气的污染已经在历史上酿成几次环境危机，中国现在面临的雾霾治理问题提醒我们决不可掉以轻心。碳排放在最近十余年成为热点。尽管人类活动的碳排放仅仅是自然界碳排放的 5% 以下，但工业革命以来二氧化碳浓度的显著提升与气温上升的相关性越来越受到重视。如果把环境治理的成本也考虑进来，化石能源的使用成本将变得异常昂贵。此外，化石能源的储存和消费在全球也存在着明显的地域性差别。对于我国而言，能源供给不足但需求不断增长，石油和天然气资源显著不足，以燃煤为主的能源结构会带来严重的环境污染，这是我国能源面临的三大矛盾。要想缓解这一问题，真正做到能源安全，需要积极开发化石能源外的替代能源。

水能（水电）是一种技术成熟度高、高效低成本、可再生的清洁能源。但水电受到地域、季节的显著影响，因此通常作为基础能源供应的辅助部分存在。此外，对水力资源的过度利用是否会对环境产生潜在影响的问题在最近几十年里日益受到关注。另外一个事实是，世界上水力资源的已开发量占可开发量的比例已经不低。

风能（风电）也是一种可再生的清洁能源。它在发电技术中成本上接近常规能源，因此产业发展也很迅猛。但是，风力发电同样存在季节性和地域性的特点，技术的限制也对风速窗口提出了苛刻的要求。风力发电同样存在噪声、电磁辐射、生态影响等环境问题，因此适合在相对偏远地区发展。据估算全世界的风能总量约 1300 亿 kW，中国的风能总量约 16 亿 kW。如果可开发风能占 10%，即可以开发 1.6 亿 kW，平均每人大约 0.1 kW 或每天 2.4 kW·h 的能量。由此可见，风能只能起到补充作用，不可能独立解决未来的能源需求。

太阳能是另一项发展很快的新能源领域。原则上来讲，化石能、水能、风能都来自广义的太阳能（而第 2 章我们将会了解太阳能来自聚变能），狭义的太阳能一般是指太阳光的辐射能量。太阳能技术分为无源（被动式）及有源（主动式）两种。一个典型的无源应用的例子是在建筑物引入太阳光实现照明，从而在白天无须由外部提供光源。而有源的例子则包括太阳能光伏及光热转换，使用热力或者电力设备对太阳能进行收集。太阳能最大的优点是太阳是个天然的、巨大的能源供应者，但其缺点也很明显，那就是能源的密度非常低。一个简单的测算（思考题 1.2）可以表明完全依赖太阳能满足社会能源需求是不现实的。不过总体而言，太阳能仍是一个拥有巨大潜力的可利用资源。尤其是，随着光伏技术的发展，

太阳能发电效率有望进一步提高，成本有望继续降低。太阳能发电在最需要的地域、最需要的时间点（冬天和夜晚）可用性最差，迫切需要通过储能技术和智能能源调配技术来解决。此外，太阳能电池生产和退役过程中的耗能和污染转移问题也开始受到重视。

从大规模、长期、便捷、低成本应用的角度全面考虑，太阳能、风能、潮汐能、地热能等替代能源，可能很难满足社会发展所需的能源需求水平。此外，对于替代能源而言，大规模应用下可能带来的潜在的、未知的环境或污染问题仍然存在。因此这些替代能源将会成为未来能源供应体系中非常重要的组成部分，但很难单独作为基础供应能源存在。

作为对比，作为新能源的一种，核能无疑是极其高效（高储能密度）的能源，单位质量核燃料提供的能量是化石能源的百万倍。就目前成熟的裂变核电站而言，一个 1000 MW 的电站一年所需要燃料约为 40 t 低浓缩铀，而同样规模的火电站则需要约 300 万 t 煤，同样规模的光伏电站需要约 100 km² 电池板（不考虑昼夜波动带来的电网消纳问题）。同时，核电站是清洁的能源，没有直接的二氧化碳排放。因此核电完全可以作为基础供应能源，对于一个大国而言更是如此。当然，裂变核能并不是可再生能源。目前，全球探明的铀储量大致为 500 万 t。如果只使用热中子堆技术，则铀的总储量可以使用大约 80 年。而采用快堆技术，使铀的使用从 0.7% 增加到 30%~40%，从而可以使得裂变核能的利用提高到千年级。

但必须承认的是，国际核电的发展目前进入一个相对瓶颈的时期。尽管中国等发展中国家开始大力发展核电，但欧美等发达国家则对核电持保守态度，有些国家甚至有明确放弃核电的计划。安全是反核人士反核电的唯一理由，这个观点往往容易被公众接受。从技术上来讲，裂变核能所面临的安全问题主要有两类，一是事故停堆的危险，二是核废料处理。从原理上，裂变反应停止后，裂变产物衰变放出大量热量。如果停堆后冷却系统失效，则可能造成一系列后果，诸如慢化水氢解、容器爆炸，甚至燃料熔化等。但在新的反应堆设计中，通过非能动、燃料安全包覆、更大安全冗余等措施，已经极大地降低了该类事故的发生概率。此外，裂变产物基本上都是放射性的，半衰期从秒到数万年甚至更长，总体而言，需要大约一万年降低到天然铀的放射水平。考虑到在反应堆关机后，裂变产物的放射性会继续放出大量的热量，并持续很长的时间，因此对核废料的处理需要非常小心。目前，核废料大都储存在核电站附近，需要有更进一步的处置措施，这个问题在技术上并不存在原则性困难。实际上，核电的安全问题更多的是一种恐慌意识，并在某些场合下转化为政治问题，使得核电的安全问题和公众接受度成为一件错综复杂的事情。核电安全冗余不断提高导致核电站造价不断上涨，核电经济性受到极大影响。高技术门槛和高造价门槛，使得核电在发展中国家的发展受到了极大的制约。

最后，让我们回到聚变能源。从能量转化的角度，除非反物质湮灭、暗能量利用、曲率驱动具备现实可能性，聚变可以说是目前人类可能利用的终极能源：聚变能作为核能利用的一种方式，具有高效低碳的特点；与极高的储能密度相联系，聚变能量的燃料储备的充足性也不成问题。如果实现了氘氚聚变，海水中的氘足够我们使用千百年。即使只实现了氘氘反应，氘需要由中子和锂反应产生，地球上的锂也够我们使用亿年。考虑得更长远一

点，如果人类要进行星际旅行，聚变能可能是唯一可行的能源。在本书的后续章节中，我们还会陆续看到聚变具有本征的安全性、环境友好性等理想能源的特点。但是，聚变能源面临的最大问题是它还处于开发研究阶段，目前已经基本完成科学可行性验证，正在为开展工程可行性验证进行努力。因此，从本章前面的观点来看，我们还不能称聚变能为严格意义上的能源，还需要对聚变能进行更深入的了解和掌握。

思考题

1.1 通过调研，分析主要能源（煤/石油/天然气/光伏/水电/风电/核电）的全周期碳排放系数，并尝试从其碳排放的来源分析如何降低各种能源的碳排放。

1.2 在地球表面，太阳直射时每平方米辐射功率约为 1400 W，请：

(1) 考虑太阳每天的照射时间、角度、天气因素、转换效率，估计一个合理的太阳能的使用效率；

(2) 按照目前每人每天消耗 52 kW·h 能量计算，估算每人需要多大面积的太阳能提供才能满足要求。

1.3 假设可以实现氘氘聚变，估算海水中的氘可以提供的聚变能量。

太阳中的聚变

聚变研究常常被冠以“人造太阳”的说法，那么太阳中的聚变又是怎样的呢？本章将从科学史出发，介绍人们是如何逐步认识到聚变是太阳能量来源的历程，进而简要介绍太阳中的聚变反应过程和反应条件。在充分感受科学进步在能源发展中的重要意义的同时，初步感受聚变研究中的关键物理原理及其实现困难所在。

2.1 太阳中的能量从何而来

当人们提到聚变研究时，总喜欢用“人造太阳”来形容，这是因为大家已经熟知太阳的能量来自核聚变。然而，回顾历史，这个认识的过程并不是一帆风顺的，其历程可以给我们以丰富的启示。

19世纪，热力学的发展使得能量守恒的概念深入人心。太阳一直持续释放光和热，它的能量究竟来自哪里呢？不需要太丰富的想象力，人们首先会猜想太阳是不是一个燃烧的大煤球。但是经过简单计算就可以知道，如果太阳真是一个大煤球的话，它在几千年内就全部烧掉了。这远远低于当时科学界对地球年龄的判断。当时最杰出的物理学家之一威廉·汤姆孙（William Thomson，即开尔文勋爵）假设地球从初始融化状态冷却到目前的温度，估算出地球的寿命大约是几千万年。根据大家的认识，太阳和地球应该具有相同的来源，因此应该有着接近的年龄，只能燃烧几千年的“太阳”显然是不可能的。

“煤球假说”被抛弃后，科学家又在19世纪中叶提出了“陨星假说”和“引力假说”。“陨星假说”非常直接，把太阳的能量来源归于太阳上不断有陨星的坠落撞击。显然，必须有足够巨大的陨星坠落才能弥补太阳释放的巨大能量，但没有任何证据观测到太阳质量增大带来的行星轨道的改变，“陨星假说”很快也被排除了。相比而言，“引力假说”就显得颇具吸引力，它把太阳能量来源归结于太阳自身持续的引力收缩。计算表明，太阳要维持光度，只需要每年收缩几十米即可。这样的收缩相对于太阳目前的直径（约为140万km）是微不足道的。而且更重要的是，这样的收缩可以维持几千万年。这恰好和汤姆孙对地球年龄的估计相吻合。

然而，1896年，贝克勒尔（Henri Becquerel）发现了天然放射性现象。20世纪初，卢瑟福（Ernest Rutherford）认识到地球并不是一直冷却的行星，事实上放射性为地球提供了

一个持续的内部热源，因此汤姆孙对地球年龄的估计是严重偏短的。修正后的估计是地球至少已经存在几十亿年。这与进化论对地球年龄的估计相符，也和后来更精确地利用放射性核素对地球年龄的估计相吻合。这一点宣判了曾经风靡一时的“引力假说”的死刑。那么太阳的能量到底来自哪里呢？人们需要寻求新的物理原理。

历史把这个机会给了英国著名天体物理学家爱丁顿 (Arthur Stanley Eddington)。1905年，爱因斯坦 (Albert Einstein) 提出了领先时代的物理原理——狭义相对论，并从狭义相对论出发，得到质能关系 $E = mc^2$ ，将质量和能量联系起来。但人们并没有立刻把这个关系和太阳联系起来，因为人们还缺乏足够精确的测量原子质量的工具。直到1919年，英国科学家阿斯顿 (Francis William Aston) 发明了可用于科学测量的质谱仪。利用质谱仪，阿斯顿发现了两百多种同位素，并提出了原子质量的整数法则，即所有元素的原子质量都接近氢原子质量的整数倍，并由此获得了诺贝尔化学奖。需要特别指出的是，阿斯顿质谱仪的精度极高，可达到原子质量的 $1/1000$ 。正是依据这样的精度，1920年，阿斯顿发现 He 原子质量并不是 H 原子质量的严格 4 倍，而是 3.97 倍。这一点点偏差立刻被爱丁顿敏锐地捕捉到。爱丁顿可以说是爱因斯坦的忠实拥趸，大家熟知的爱丁顿利用光线的引力偏折效应验证广义相对论发生在 1919 年。1920 年，爱丁顿又基于爱因斯坦的质能关系 $E = mc^2$ 提出了太阳能源的质能转换假说：“如果一个恒星的初始质量的 5% 由氢组成，而这些氢逐渐结合成更复杂的元素，释放出的总热量超过我们的期望，那么我们就需要进一步寻求这个星球能量的来源”“太阳可以把氢转化成氦，释放出与其 0.7% 质量等价的能量。原则上，这个过程能让太阳照耀一千亿年。”

应该说，爱丁顿的假说在当时是相当大胆的。事实上，几乎在同时，赫赫有名的物理学家卢瑟福 (Ernest Rutherford) 利用打靶方法实现了人工核嬗变。1932 年，卢瑟福的学生奥利芬特 (Mark Oliphant) 在实验室实现首次人工 D-D 核聚变反应。但在 1933 年，在海森堡 (W. Heisenberg) 记录的他与玻尔 (N. Bohr) 及卢瑟福的一次关于是否有可能利用原子核产生能量的对话中，卢瑟福还坚持“那些试图从原子转换中获取能量的人无疑是在白日做梦”。另外，尽管氦元素的确首先从太阳光谱中被发现 (He 的名称来自希腊语的太阳神 Helios)，但氦和氢在太阳中占绝大部分 (H 占 71% 质量，He 占 27% 质量) 的事实是在 1925 年才由英国女科学家佩恩 (Cecilia Payne-Gaposchkin) 研究发现。更关键的是，由于缺乏对核世界的深入了解，爱丁顿完全无法给出所谓的“聚变反应”的细节。很快一个致命的挑战就被提了出来，那就是太阳的温度问题。

爱丁顿的假说需要质子聚合成氦核，而两个质子只有在他们足够靠近时才有可能发生反应。虽然核力的奥秘要在十几年后才能被揭晓，但在此之前，两个质子需要克服库仑势垒才能靠近到核力有效的半径以内。假设核半径为 1.5×10^{-15} m，则两个核靠近需克服的库仑势垒高度约为 0.5 MeV，如图 2.1 所示的尖峰。如果这个能量由太阳温度所代表的随机动能提供，即 $1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$ ，那就意味着太阳要有几十亿度的高温。

人们可以根据辐射强度估算出太阳表面的温度，然后假设太阳芯部的热源通过对流及辐射向外传热，进而估算出太阳芯部的温度。爱丁顿当时的估计为 4000 万 K，而我们目

前知道太阳芯部温度约为 1400 万 K。尽管爱丁顿已经高估了太阳芯部温度，但仍距离几十亿度有两个量级的差别。

爱丁顿的假说似乎也被逼上了绝路，但峰回路转的是，20 世纪 30 年代前后一系列量子力学和核物理的成就成功地把爱丁顿的聚变假说挽救了。首先，量子力学指出，即使反应物相对能量（在热平衡下，可以用温度表示）小于库仑势垒高度，也有一定概率发生相当数量的反应，这被称为量子力学中的隧穿效应，如图 2.1 所示。1928 年，伽莫夫（George Gamow）计算了聚变反应中的量子隧穿效应，他指出当能量 w 小于势垒高度时，由于隧穿效应的截面为

$$\sigma(w) = \frac{C_0}{w} \exp \left[-\frac{\pi M^{1/2} Z_1 Z_2 e^2}{2^{1/2} \epsilon_0 h w^{1/2}} \right]$$

式中， C_0 是由实验决定的参数； Z_1 、 Z_2 为两种粒子的电荷数； M 为约化质量。

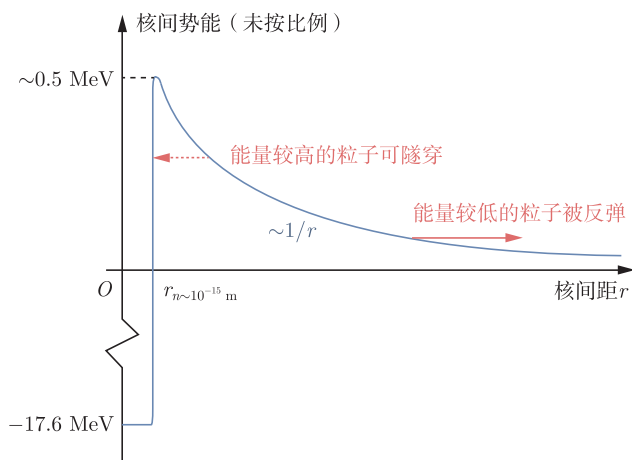


图 2.1 氢原子核间作用力示意图

此后，1932 年，查德威克（James Chadwick）发现中子，搞清楚了核子世界的组成奥秘。1934 年，费米（Enrico Fermi）提出弱相互作用理论，可以解释核反应中质子和中子的相互转化。1935 年，汤川秀树（Yukawa Hideki）提出核子的介子理论，描述了核尺度上的强相互作用，为核反应中的融合过程提供了基础。

在这一系列杰出成就的助攻下，1939 年，贝特（Hans Bethe）成为最后的集大成者，他成功地揭示了太阳以及其他恒星中的核反应链，对恒星的能量产生机制进行了完整的阐述。贝特的理论不仅成功地和当时的观测吻合，而且和之后中微子等观测相符，得到了科学界的认可，最终解决了太阳的能量来源之谜。1967 年，贝特因为此项成就获得诺贝尔物理学奖。

2.2 太阳中的聚变反应

在描述太阳和恒星中的聚变反应之前，我们将质量亏损的概念再明确一下，因为它是整个核能（包括聚变能和裂变能）利用的基础。