

“人造太阳”：能源自由的愿景

■瞰前沿·大国重器

地球上的石油、煤等化石能源耗尽后，人类靠什么生活？一种被称为“托卡马克”的“人造太阳”实验装置，承载起人类迈向能源自由的梦想。近期，我国托卡马克核聚变实验装置取得重大成果：新一代“人造太阳”中国环流三号（HL—3）实现等离子体电流1.6兆安，达到国际领先水平，等离子体电流、聚变“三乘积”等核心参数再上新台阶；东方超环（EAST）首次实现1066秒长脉冲高约束模等离子体运行，再次创造了托卡马克装置新的世界纪录。本期“瞰前沿”聚焦国内外“人造太阳”的最新研究进展，看看人类距离可控核聚变还有多远。

——编者

“一团耀眼的白光从山脉尽头升起……”在科幻小说《三体》中，太空飞船核聚变发动机发出的光芒如同太阳。利用核聚变等技术，人类走出地球家园，走向广袤宇宙。

万物生长靠太阳。太阳之所以能发光发热，是因为内部的核聚变反应。核聚变具有资源丰富、环境友好、固有安全等突出优势，是人类理想的未来能源。如果能造一个“太阳”来发电，人类有望实现能源自由。

2024年，科技部、工业和信息化部、国务院国资委等七部门联合发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》，指出加强推进以核聚变为代表的未来能源关键核心技术攻关。实现聚变能源应用是我国核能发展“热堆—快堆—聚变堆”三步走战略的最终目标。

可控核聚变作为典型的前沿性、颠覆性技术，未来一旦实现应用，将彻底改变世界能源格局，保障我国未来能源安全。

“人造太阳”从“核”而来 用1升水“释放”燃烧300升汽油的能量

核聚变是将较轻的原子核聚合反应后生成较重的原子核，并释放出巨大能量。

1952年，世界上第一颗氢弹成功试爆，让人类认识到氘氚核聚变反应的巨大能量。但氢弹爆炸是不可控的核聚变反应，不能提供稳定的能源输出。从此，人类便致力于在地球上实现人工控制下的核聚变反应（即可控核聚变），希望利用太阳发光发热的原理，为人类铺展能源自由之路。因此，人们也将可控核聚变研究的实验装置称为“人造太阳”。

氘氚聚变作为能源，具有明显优势。首先，氘氚聚变所需燃料在地球上的储量极为丰富。氘大量存在于水中，每升水可提取出约0.035克氘，通过聚变反应可释放相当于燃烧300升汽油的能量；氚可通过中子轰击锂来制备，在地壳、盐湖和海水中，锂大量存在。其次，氘氚聚变反应不产生有害气体，无高放射性活化物，对环境友好。

然而，“人造太阳”维持自身燃烧的条件非常苛刻。英国科学家劳逊在20世纪50年代研究了这一条件的门槛——也被称为聚变点火条件。据计算，实现可观的氘氚聚变等离子体离子温度要大于1亿摄氏度，等离子体密度、温度和等离子体能量约束时间的乘积（“三乘积”）大于 5×10^{21} 千电子伏特·秒/立方米。

数十年来，国际上探索了众多核聚变路线。目前，实现核聚变反应主要有引力约束、磁约束、惯性约束3种方式。太阳因本身质量巨大，可通过巨大引力，在极端高温高压的环境下发生引力约束核聚变反应。而在地球上，实现可控核聚变主要有磁约束核聚变、激光惯性约束核聚变两种方式。激光惯性约束核聚变可以采用激光作为驱动器压缩氘氚燃料靶丸，在高密度燃料等离子体的惯性约束时间内实现核聚变点火燃烧。采用强磁场约束等离子体的方法把核聚变反应物质控制在“磁笼子”里面，就是磁约束核聚变。

道路依旧充满挑战 “稳态自持燃烧”是源源不断获取聚变能的关键

在众多技术途径中，托卡马克是通过等离子体电流和外部磁体线圈产生的螺旋磁场约束聚变燃料离子，被认为有望率先实现聚变能源的应用，也是目前全球研发投入最大、最接近核聚变点火条件、技术发展最成熟的途径。

托卡马克最初是由苏联库尔恰托夫研究所的阿齐莫维奇等人在20世纪50年代发明的，

■链接



中国环流三号

中国环流三号（左图）是目前我国规模最大、参数最高的托卡马克装置，由中核集团核工业西南物理研究院自主设计、建设和运行，装置总高8.39米，直径8米，等离子体离子温度可达1.5亿摄氏度。

中国环流三号2020年建成后，多次刷新我国可控核聚变装置运行新纪录。2023年12月，中核集团核工业西南物理研究院与国际热核聚变实验堆（ITER）总部签署协议，宣布中国环流三号作为ITER卫星装置面向全球开放。

是一种利用磁场约束带电粒子来实现可控核聚变的环形容器。当前，世界上建成并运行了超过50个不同规模的托卡马克装置，不同托卡马克装置的几何尺寸、等离子体约束性能等也各有不同。目前中国运行的托卡马克主要包括常规托卡马克和球形托卡马克。

自托卡马克开展实验以来，等离子体综合参数不断提升，“三乘积”提升了几个数量级，逐渐趋近点火条件。欧洲的JET与美国的TFTR装置上获得氘氚聚变功率输出，揭示了托卡马克磁约束可控核聚变路线的原理可行性。2021—2023年，JET创造了69兆焦耳聚变能输出的世界纪录。

托卡马克磁约束核聚变研究虽然不断取得突破，但前方的道路依旧充满挑战。堆芯等离子体“稳态自持燃烧”是源源不断获取聚变能的关键，实现该目标主要有五大问题需要解决。

一是等离子体非感应电流驱动问题。等离子体电流由欧姆驱动电流和非感应驱动的电流组成。欧姆驱动电流是基于变压器原理，通过等离子体外部线圈电流变化感应而来的。对于非感应电流驱动，一部分可以通过外部的高功率微波和中性粒子束注入来驱动，另一部分则来自等离子体自身压强梯度产生的“自举电流”，实验上希望等离子体自己提供的这部分电流份额越高越好。

二是加料与排灰问题。聚变等离子体被约束在真空室内，形成一种类似“甜甜圈”的形状。

在“甜甜圈”环向轴中心位置附近的等离子体密度和温度最高，越往边界参数越低。传统加料方式注入的中性气体氦和氖，难以深入等离子体芯部，其燃烧效率难以提高。同时堆芯等离子体聚变反应，会产生大量的氦，也被称为氦灰。氦灰容易堆积在芯部，导致等离子体性能退化，甚至引发等离子体熄灭。

三是等离子体与材料相互作用问题。聚变堆运行期间，一些携带高能量的粒子可能突破磁场的约束，撞击在聚变装置的内部部件上，对这些部件材料造成威胁。同时，如果聚变堆运行期间发生的粒子与材料相互作用在等离子体边缘产生大量杂质，这些杂质会稀释燃料离子的浓度，使聚变等离子体性能显著下降，聚变功率难以稳定维持。

四是阿尔法粒子物理问题。阿尔法粒子是氘氚聚变的带电粒子产物氦（携带3.5百万电子伏特能量）的别称。目前，由于长期缺乏合适的实验平台开展相关实验，燃烧等离子体阿尔法粒子物理研究深度还不够，相关的科学问题还需要在氘氚聚变实验装置上进一步验证。

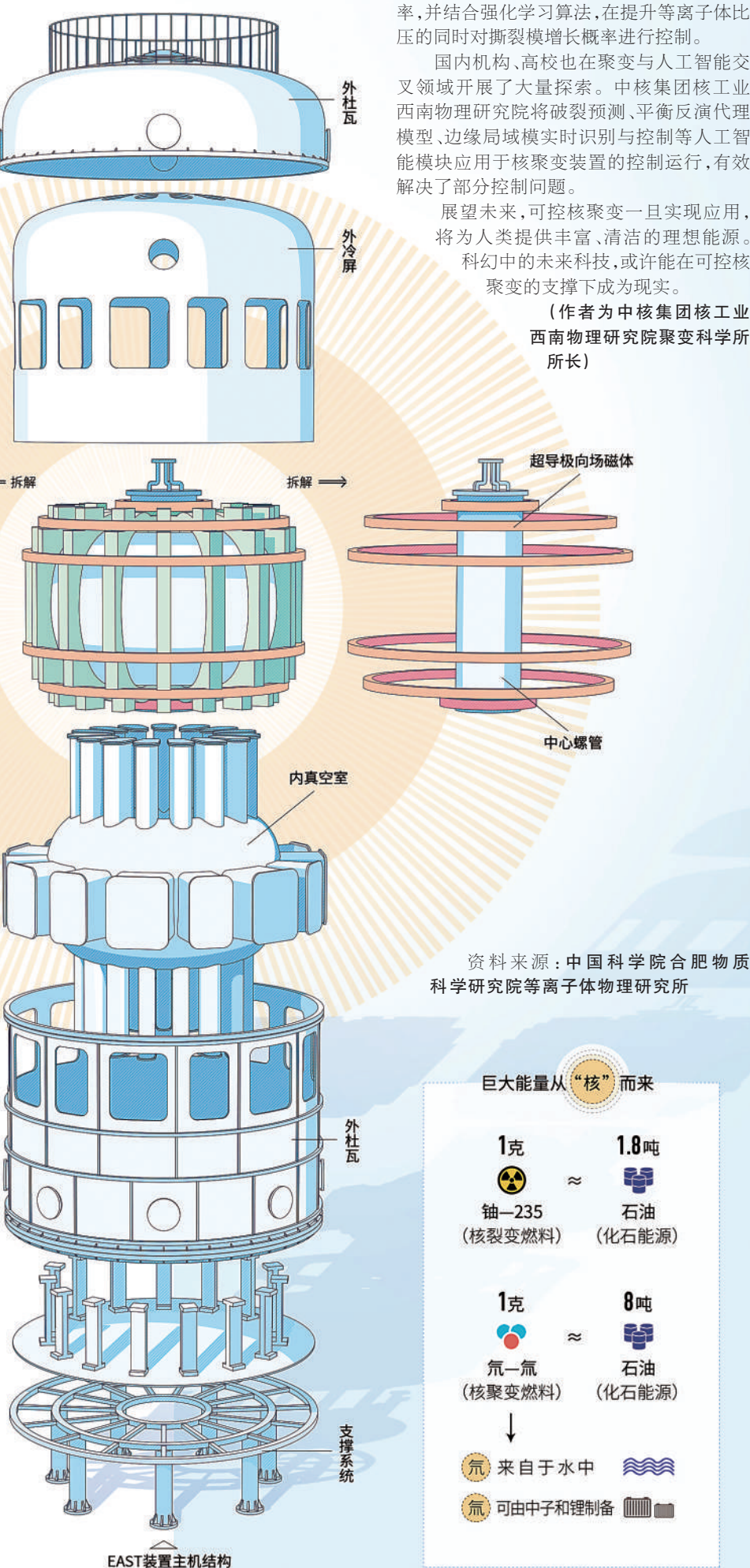
五是大幅度磁流体不稳定性和大破裂控制问题。聚变等离子体中还存在大量的



不稳定性，这些“不稳定性因素”会在不同程度上破坏核聚变反应的安全稳定运行。

探索交叉领域 人工智能崭露头角

近年来，为开展“稳态自持燃烧”问题的研究，国际上各大装置实验向着更高参数迈进。我国的中国环流系列、东方超环等可控核聚变装置运行不断取得突破，如国内当前规模最大、参数能力最高的中国环流三号首次实现100万安培等离子体电流高约束模运行，创造我国磁约束聚变装置运行纪录。2023年在欧盟与日本合建的当前规模最大托卡马克JT—60SA上也实现了100万安培等离子体放电。2025年1月，



东方超环

东方超环（右图）是我国自主研发的世界上首个全超导托卡马克核聚变实验装置。该装置由中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所自主设计、研制，拥有完全知识产权。

东方超环基于磁约束核聚变原理工作。近年来，东方超环在等离子体的参数如温度、密度、持续放电时间上不断取得突破。东方超环的建设和投入运行为世界稳态燃烧物理和工程研究搭建起一个重要的实验平台，使我国成为世界上第一个掌握新一代先进全超导托卡马克技术的国家。



■唠『科』

“遇事不决，量子力学”，一句网络流行语的调侃，侧面反映出近年来量子科技的突飞猛进。从前沿研究到日常生活，越来越多的人对量子产生了兴趣。那么，量子到底是什么？

量子不是一种粒子，而是一种性质。具体而言，当一种事物是不连续变化的，我们就说这种事物是量子的，把它的最小单元称为量子。例如，在日常生活中常见的上台阶，我们只能上一个台阶、两个台阶，而不能上半个台阶。

量子化是微观世界的本质特征。在宏观世界里连续变化是大多数，但在微观世界里，不连续变化才是默认值。

例如，光是由一个光子组成的，可以有一个光子、两个光子，但不可能有半个光子。原子中电子的能量只能取某些特定的值，不能连续变化，所以这些可取的能量值叫作能级。此外，粒子的电荷、角动量、磁矩等物理量，在大多数情况下也都是量子化的。

因此，描述微观世界物理规律的科学就叫作量子力学。这是由德国物理学家普朗克在1900年开创的，后来经过爱因斯坦、德布罗意、海森堡、薛定谔、狄拉克等许多科学家的努力，成为物理学的两大基础理论之一。

世界上，几乎找不到与量子力学无关的地方。世界的存在，即原子的稳定性。观察原子结构可以发现，原子是由带正电的原子核与带负电的电子组成的。电子为什么不落到原子核上去？实际上，按照传统的物理学，电子必然会落到原子核上，如果这样，原子就不可能稳定存在，我们所知的世界也就不可能存在。量子力学“拯救”了原子，量子力学决定了原子中电子的能级有个最小值，电子最低只能在这个能级上，不能再往下掉。因此，电子不会落到原子核上。

除此以外，量子力学还解释了物质所有的宏观宏观性质，如硬度、磁性、导电性，由此催生了大量现代信息技术，如激光、核能、半导体、发光二极管。计算机、手机等的出现都与此相关。

既然量子科技已经应用得如此广泛，为什么现在人们又把它视作新兴技术呢？

这是因为近年来量子科技有了全新的内涵。20世纪80年代以来，科学家们开始主动调控和操纵单个粒子，充分挖掘它们的量子特性。例如粒子状态的远程传送、不可破译的信息传输、前所未有的计算能力和测量能力等。这就是新兴的量子信息科学，被称为第二次量子革命。具体而言，它分为量子通信、量子计算、量子精密测量三大部分。

说到量子通信，中国走在世界前列。例如，2016年发射的“墨子号”量子科学实验卫星，是世界首创；量子计算是目前全世界最热门的科研领域之一，我国科学家研发的“九章”系列量子计算原型机，在光量子计算方面国际领先；量子精密测量离大家的生活最近，例如卫星导航，其中的核心技术就是原子钟——人类目前最精确的计时装置，是一种典型的量子精密测量技术。

虽然目前产业规模还不是很大，但量子科技拥有广阔的发展空间。或许，当将来的人看到我们还没有大规模使用量子通信、量子计算机，就会像我们现在看到没有学会用电的古人一样。跨越百年的量子科技，还将源源不断创造更多惊喜。

（作者为中国科学技术大学副研究员，本报记者徐靖采访整理）

■学术眼

新研究确认一颗位于宜居带上的“超级地球”

据新华社伦敦电 英国牛津大学近日发布公报说，一个国际研究小组已证实在一颗类太阳恒星的宜居带附近存在“超级地球”。这一成果为未来寻找可能适合生命生存的类地系外行星提供了更多线索。

“超级地球”也被称为超级类地行星，是一类巨大的类地行星，通常由气体和岩石组成，其质量可达地球的数倍以上。

这颗新发现的行星被命名为HD 20794 d，质量是地球的6倍，距离地球约20光年，围绕一颗类似太阳的恒星运行。它的轨道位于该星系的宜居带内，这意味着它与恒星的距离合适，其表面能维持液态水存在。研究人员认为，该行星将为未来探测太阳系外生命迹象的太空项目提供宝贵的测试案例。

研究报告发表于国际期刊《天文和天体物理学》杂志。

研究发现增强有机太阳能电池耐辐射能力的方法

据新华社纽约电 美国密歇根大学的研究人员发现，用小分子有机物制成的太阳能电池耐辐射性较强，可望在太空和其他高能辐射环境下长时间稳定运行。

研究还显示，有机聚合物材料制成的太阳能电池遭受辐射后性能下降严重，但加热到100摄氏度左右就可以修复。在太空中，电池板朝向太阳时能够达到这个温度。

与传统的硅太阳能电池相比，有机太阳能电池具有重量轻、柔性强、日常环境中稳定性强等优点。但以往的有机太阳能电池对辐射非常不耐受，不适合充满高能粒子的太空环境。

研究人员在能源研究期刊《焦耳》上发表论文说，他们在实验室中模拟太空辐射环境，用质子轰击有机物太阳能电池。在遭受相当于近地轨道3年剂量的辐射后，分子结构更复杂的聚合物电池性能下降了50%，而小分子有机物电池的性能依然保持稳定。

研究显示，质子撞击会通过破坏化学键造成一些聚合物大分子侧链断裂，形成困住电子的陷阱，妨碍电子流动。将聚合物加热到100摄氏度能修复断裂的化学键，从而解除陷阱，恢复电池性能。

学术支持：中国科学技术协会、中国能源研究会
本版统筹：智春丽 肖 遥
本版责编：陈圆圆 曹雪盟 陈世涵 董映雪
版式设计：田兴洲（人民日报媒体技术公司）