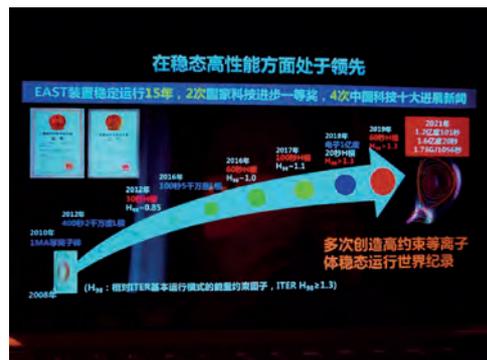


李建刚指出，原子核只有在极高温度（1 亿摄氏度以上）下才具有足够的能量克服彼此间的静电能量壁垒，以启动和维持核聚变反应；而且必须保持一定的密度（粒子浓度）才能提高原子核的碰撞效率，以获得足够的有效反应；此外，还需要大于 1 秒钟的约束时间，高能量约束时间意味着良好的隔热性能，以保持反应物高温。

满足这三个条件，才仅仅是能够触发核聚变反应，更为困难的是让上述核聚变反应可控和持续。“反应物在极高温下会完全电离，变为一团由裸露原子核和自由电子组成的电离气体，即等离子体。只有让这些等离子体运动起来，才能实现持续的核聚变反应。”李建刚说，约束这些等离子体有三种方式，太阳的核聚变是靠重力约束实现的，另外两种就是以高功率激光作为驱动器的惯性约束和磁约束。

过去 70 年，美国一直尝试用高能激光轰击核聚变材料，借助激光产生的高温高压实现核聚变。2022 年 12 月 5 日，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）的国家点火装置（NIF）将 2.05 兆焦的激光聚焦到核聚变材料上，产生了 3.15 兆焦的能量，能量增益首次大于 1，达到了“点火”标准。

尽管单从数据上看，这次实验产生的能量“只够烧开 10 壶水”，但它的意义非常重大。根据核聚变反应的劳森准则，当核聚变的能量产出率大于能量损耗率，并且有足够的能量被系统捕获和利用，就可以被称为“点火成功”。但在过去几十年中，这一直是科学家们未能实现的梦想。NIF 从 2010 年开始正



式的点火实验，用了 10 多年时间才梦想成真。

李建刚说，NIF 设置了一个“小靶子”，“靶子”中有热核材料，然后利用高能激光照射“小靶子”，点燃里面的热核材料产生核聚变，最后输出的能量就是核聚变能。“用美国能源部的话说，这是 70 年来美国科学中最伟大的突破之一。”

美国国家点火装置 NIF 是世界上最大的激光装置，造价高达 35 亿美元，可以动用近 200 台激光器产生的高能激光集中轰击一个微小的核聚变材料靶标，以启动核聚变反应。李建刚透露，中国也有类似的高能激光装置。中科院与中物院联合研制的“神光 II”型高能量聚变激光器已于 2000 年建成投入运行。

下面再来说说另外一条技术路径——磁约束聚变。

磁约束，顾名思义，就是让核聚变产生的等离子体置身于有磁场的空间，带电的原子核与电子在垂直于磁场的方向上不再自由，受到磁场作用力的带电粒子只能沿着磁场方向做螺旋运动。这种磁场看不见、摸不着，也不接触有形的物体，可以把炙热的等离子体托举在空中。

20 世纪 50 年代，苏联科学家提

出一种名为“托卡马克”的环形磁约束聚变装置，这是一种形如面包圈的环流器，依靠等离子体电流和环形线圈产生的强磁场，将极高温等离子体状态的聚变物质约束在环形容器内，以此实现核聚变反应。在俄文中，托卡马克一词由环形、真空室、磁、线圈的前几个字母组成。学界的主流认识认为，托卡马克装置离实现商用级可控核聚变更有希望。因此，磁约束核聚变就成为了人类实现“人造太阳”梦想的途径之一。

即便有了这样的装置，“点火”和“持续燃烧”依然是人类必须攻克的两座山头。

## 东方超环横空出世

李建刚说，约束等离子体的磁场，虽然不怕高温，却很不稳定，且等离子体在加热过程中能力也不断损失，这给托卡马克实际应用带来了重重挑战。

1985 年，时任苏共中央总书记戈尔巴乔夫在日内瓦峰会上，与时任美国总统里根的会面中提出一项倡议——由多国联合开发核聚变装置，以减少因争夺能源可能引发的