

· 学部委员钱临照教授主持 ·



编者按：有位教授来信言道：“其它书刊中或有涉及，然皆简而又简，尤缺定量描述，求教于同仁，昏同此感”。其它读者，和者甚众，希望本刊能辟数页之地，系统地介绍诸如受控核聚变、超弦理论、超引力理论、现代 $K-K$ 理论、弯曲空间量子场论等涉及到物理前沿领域中的一些问题。为此，本刊新辟《物理前沿》栏目，并请中国科技大学副校长、中科院数学学部委员钱临照教授主持。本期发表由朱士尧先生撰写的《受控核聚变》一文，内容翔实，文笔流畅，可谓开篇之大作。全文分八个部分：一、创造人间小太阳；二、核聚变研究的发展历史；三、劳逊判据和热核点火；四、磁约束原理与磁约束装置；五、如何达到聚变点火温度；六、多种形式的等离子体诊断技术；七、令人鼓舞的重要进展和当代聚变研究的前沿课题；八、21 世纪的新能源。本刊分六期刊出，请读者注意。

受控核聚变研究是现代物理学的一个重要前沿领域，也是正在蓬勃发展的当代等离子体物理学的主要研究内容之一。近年来，受控核聚变研究取得了十分令人鼓舞的重大进展，尤其是目前世界上最大的几个托卡马克装置如美国的 TFTR、欧洲的 JET 以及日本的 JT-60，在 80 年代后期的最新实验结果基本上验证了受控核聚变的科学可行性，使人们看到了核聚变作为人类取之不尽、用之不竭的理想新能源的曙光。因此，核聚变研究在世界范围内受到了广泛重视。

一、创造人间小太阳

1. 从普罗米修斯的神话谈起

这是一个古老而美丽的希腊神话。普罗米修斯 (Prometheus) 为了造福人类，他用茴香管盗来了太阳上的火种，给人类带来了光明，使人类从藏身的洞穴中走出来，开始了新的生活。此事触怒了天神宙斯，他把普罗米修斯绑在高加索山崖上，每天让恶鹰啄吃他的肝脏。啄伤的肝脏夜间恢复原状，白天恶鹰再来啄吃，使他在痛苦中煎熬了三万年。这是古希腊人对于原始社会中火的发明的艰苦历程的一种不自觉的艺术加工。在希腊的文学作品中他便成了一个为了人类文明而不畏强暴受到宙斯残酷迫害的英雄。马克思也在《〈博士论文〉序》中称之为“哲学的日历中最高尚的圣者和殉道者”。

在现代文明社会里，阳光普照大地，万物生机盎然。人类虽然无须再为寻觅火种而操劳，却不得不为

将来面临的能源枯竭而忧虑。随着科学技术和社会生产力的不断发展，能源问题显得越来越重要，人类也在不断扩大能源的利用范围。众所周知，远古时代人类只能利用人畜的肌肉力量作为动力，用钻木取火的方法产生热量。后来，除了利用风力、水力等自然动力之外，还开发了煤、石油、天然气等化石燃料。本世纪 50 年代初期人类进入了利用原子核能的新时代。但是总的来看，全世界目前的能源仍以煤、石油、天然气等化石燃料为主。然而，这些化石燃料又是极其宝贵的化工原料，可以提炼加工各种化学纤维、塑料、尼龙、橡胶、化肥等化工产品。将这样好的化工原料化作一团熊熊大火，仅仅利用燃烧时放出的一部分热量，实在可惜。另一方面，随着社会生产力的发展和人类生活水平的提高，世界能源消耗量愈来愈大。近几十年来，几乎每十年增加一倍。估计全世界煤、石油、天然气的储量只能供人类再使用 100 年左右。因此，摆在人类面前一项紧迫的战略任务就是探索新能源。

目前正在开发利用的地热能、潮汐能、太阳能等新能源各有特色，都有实用价值。但是，这几种能源只能作为某种辅助能源，不可能作为整个社会生产和人类生活所需的基本动力来源。从 50 年代开始登上世界能源舞台的核电站显示了巨大的威力。只要燃烧极少的燃料便可获得巨大的能量。一座 50 万千瓦的火力发电站每年耗煤 150 万吨，而规模相当的核电站每年又需要 0.6 吨核燃料。核能在总的世界能源结构中占的比重越来越大，今后还会有较大的发展。但是，这种

核电站是以原子核的裂变反应为基础的，产生的放射性废物处理比较困难，而且主要的核燃料铀的储量相对其它元素来说并不丰富，尤其是从贫铀矿中开采和提炼核燃料相当困难，成本亦高。因此原子核的裂变能源并不是人类最理想的新能源。然而，它揭开了核能释放之谜，为我们探索理想的新能源提供了有益的启迪。

2. 揭开核能释放之谜

这要从原子核的结合能谈起。众所周知，原子核是由一定数目的质子和中子结合而成的。然而，该原子核的质量却并不正好等于构成该核的所有质子与中子的质量之和。例如，一个中子质量为 $1.0086652u$ （其中 u 是原子质量单位，国际上统一规定用碳同位素 ^{12}C 为基准），一个氢原子质量为 $1.0078252u$ ，两者之和为 $2.0164904u$ ，这比氦的原子量 $2.0141022u$ 大出 $0.0023882u$ 。这是什么道理呢？一个中子加一个质子，再加一个核外电子，不就形成一个氦原子吗？怎么质量会减少，发生“亏损”呢？原来，中子接近质子时将要发生强烈的相互作用，在被俘获的同时要放出一个光子。这个过程叫做中子被质子的“辐射俘获”，这个光子的能量经测定为 2.225MeV 。按照相对论，任何能量都与一定的质量相联系，这就是质能关系式： $E = Mc^2$ 。或者说，任何能量转移 ΔE 必定伴随着相应的质量转移 ΔM ：

$$\Delta E = \Delta Mc^2$$

这里， $c = 2.99792 \times 10^{10}$ 厘米/秒，是光速； M （或 ΔM ）单位用克，则 E （或 ΔE ）用尔格做单位。可以算出，1克的质量转移必定伴随着 9×10^{10} 尔格的能量转移，即 $1u$ 的质量亏损对应于 931.50MeV 的能量释放。刚才的例子中一个质子与一个中子形成氦核时出现的质量“亏损”为 $\Delta M = 0.0023882u$ ，按照质能关系计算出相应的能量为

$$\Delta E = 0.0023882 \times 931.50 = 2.225\text{MeV},$$

这正好与上面说的实验测量到的 γ 光子能量符合。这个能量就叫做氦核的“结合能”。

一般地，我们对于一个核素的结合能 B 可以作两种理解：第一种理解，把 Z 个质子和 N 个中子从相隔非常远的地方一个一个地移近，无论中子与中子、中子与质子、质子与质子之间，当它们接近到 10^{-12} 厘米以内的距离时，彼此间都会发生强大的吸引力。这种吸引力足以克服质子之间的静电库仑斥力，这样就能够形成一个原子核。这时的质子、中子被称之为“核子”。在这过程中，陆续以 γ 辐射的形式释放能量，这些能量的总和便是核的结合能 B 。另一种理解，从这个核中一个一个地取出中子或质子，直至最后的那个核子也被分离到无限远去，即把原子核分裂成单独的核子。在这过程中，我们必须对每个质子和中子作功，即提供能量以克服它们彼此间的相互吸引作用，这些能量的

总和也就等于核的结合能 B 。显然， B 越大，表示这个核越不易拆散成单独的核子。

原子核的结合能 B 与该核的质量数 A 的比值 B/A 称为比结合能。图 1 是根据实验测得的原子量画出的 B/A 随 A 而变化的曲线。此图十分重要，我们可以从中得到许多有用的结论和启示。

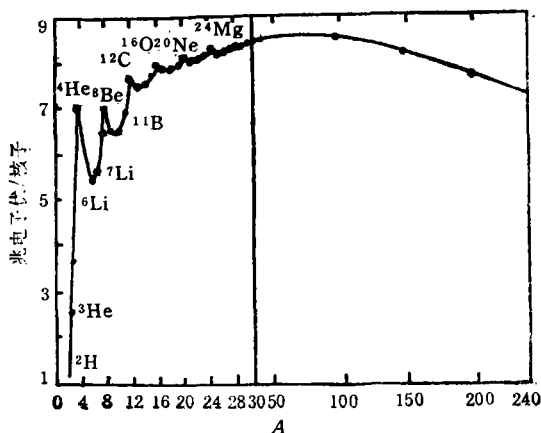


图 1 每核子的平均结合能

（横坐标左右两半的比例是不一样的）

首先，我们可以从曲线中看到比结合能 B/A 有某种饱和现象。这就是说，对于中等质量的原子核（从铁 Fe 到锡 Sn，质量数 A 从 55 到 120）， B/A 近似地等于一个常数，约为 8.6MeV ；在两侧的比结合能都比它小，在重核方向渐降至 $A = 238$ 的铀，其 $B/A = 7.57\text{MeV}$ ；向轻核方向的降落较快，但出现几个峰，对应于 ^4He 、 ^{12}C 、 ^{16}O 等核。

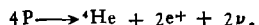
所谓核能实际上是原子核结合能变化时释放出来的那一部分能量。从图 1 中可以得到启示：核能的利用有两种途径：一是当重核分裂成中等质量的核，在分裂的过程中 B/A 增大，就会有能量释放出来。这就是目前以核裂变反应为基础的核电站中的能量来源。另一种途径就是使轻核聚合为较重的核，在这过程中同样可以释放能量。例如，氦核是结合得很松的核，两个很松的氦核一碰上便会聚合成结合得很紧的氦核，同时释放出很大的能量。这便是人们正在探索中的聚变能。

3. 理想的新能源

早在人类发现聚变能之前，自然界就为自己选择了最理想的能源！众所周知，地球上的所有生命，包括今天已经成为能源（煤和石油）的古代生命都仰赖着太阳的光和热能。在人类有史可查的悠久岁月中，太阳的光和热都未见有丝毫的减弱，这既使人高兴，又令人感到困惑不解，太阳中如此巨大而持久的能量究竟是从何而来的呢？

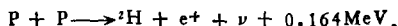
从 19 世纪末放射性发现之后，太阳能之谜就逐渐

揭开了。1903年,居里等人测出每克镭每小时能自动释放出100多卡的热量,镭的半衰期为2600多年。这样,用几公斤镭做的“炉子”实际上就是经久不熄的了。然而,天然存在的镭太少了。1911年原子核发现后,人们开始猜测太阳能也是从原子核内部放出来的能量。根据光谱分析,人们早就知道太阳中含有丰富的氢,还有不少的氦(事实上,氦的谱线最早在太阳光谱的暗线(吸收谱)中发现,“氦”这个字就是太阳元素的意思)。这两种元素一定同太阳能有密切的关系。到20年代各核素的质量得到精密测量之后,人们立即恍然大悟,原来氢就是太阳中的燃料,氦则是它燃烧后的余烬(相当于“煤灰”)。太阳中4个氢的核(即质子)通过某些核反应,最后合成一个氦,反应过程中放出20MeV以上的能量。也许有人会问,氦原子核是由两个质子和两个中子组成的,而太阳中只有质子,这怎么行呢?原来,质子在一定条件下它会失去所带的正电荷变成中子,在这过程中还释放出一个中微子。4个质子聚合成氦核的反应式可以写为:

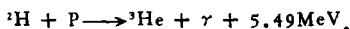


这是一系列核反应的最终结果。具体的聚变过程有两种解释,一种认为是质子-质子反应,另一种认为是碳循环反应。

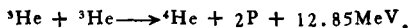
质子-质子反应过程是这样的,两个质子相碰撞变成氘并放出一个正电子和中微子:



正电子寿命很短,它会马上同附近的负电子相结合而变成两个光子。氘跟另一个质子相碰撞聚合成氦的同位素 ${}^3\text{He}$:

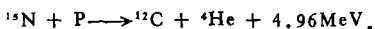
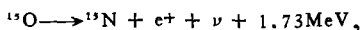
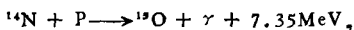
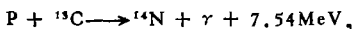
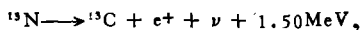
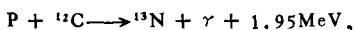


两个 ${}^3\text{He}$ 再碰撞聚合成 ${}^4\text{He}$ 并放出两个质子:

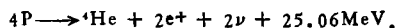


以上三个核反应的总效果便是4个质子聚合成一个氦核,释放出24.16MeV的能量,平均每个核子放出6.04MeV的聚变能。

碳循环反应的次序是这样的:



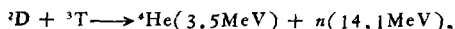
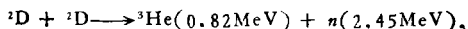
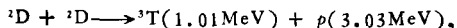
将上述六个反应式两边分别相加所得总反应式仍然是:



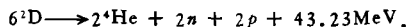
平均每个核子放出6.26MeV的聚变能。在这一系列反应中 ${}^{12}\text{C}$ 依次变为氮、碳、氧的同位素,最后依然还回到 ${}^{12}\text{C}$ 。可见碳在质子聚变成氦的过程中只是起了接触剂的作用。在太阳的能量释放过程中基本上是质

子-质子循环,在比太阳温度高的恒星中可能主要是碳循环。

如果在地球上能够用科学的方法创造出人间小太阳,以此获得巨大的聚变能量,这将是一件十分美妙的伟大创举。当然,在地球上通过氢(质子的)聚变来获得能量是不现实的,因为这个反应进行得非常缓慢,以致在实验室里迄今还没有观察到这种聚合反应。从获取能量的观点,在实验室里可以实现的聚变反应主要有如下几种:



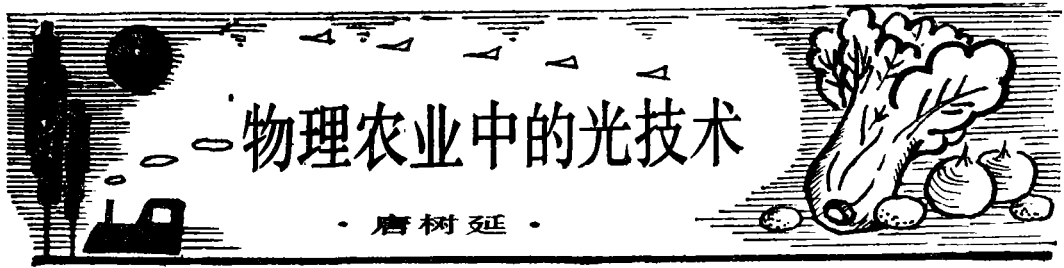
上述前面两个反应的几率各为50%。第一个反应的产物 ${}^3\text{T}$ 恰好是第3个反应中的原料,第2个反应的产物 ${}^3\text{He}$ 也是第4个反应的原料。所以这4个反应联合起来就只需要 ${}^2\text{D}$ 作原料便可以了。将这4个式子相加可得到:



这表明只要消耗6个 ${}^2\text{D}$ 便可释放出43.23MeV的能量,平均每个氘核放出7.2MeV的能量,单位质量的氘放出能量3.6MeV,相当于单位质量的铀-235裂变放出的能量的4倍!自然界中的氘以重水的形式大量存在于海水之中。按重量计,重水占海水的1/6700。如果将一升海水中的氘提取出来(这种技术业已成熟)使它发生聚变反应,放出的能量相当于燃烧300升汽油的能量!地球上氘的储量极为丰富,这是潜在的聚变能源又一个诱人的优点。地球表面海水储存量大约 10^{18} 吨,含氘 10^{14} 吨。目前世界上能源消耗水平大约 2×10^{20} 焦耳/每年。就是说全世界一年只需消耗 5.6×10^3 吨氘就够了。考虑到能源消耗水平的逐年增加,地球上的氘也够用 10^{11} 年,即几百亿年;而地球诞生以来才45亿年。可见,聚变能源一旦实现的话,可以说它的资源是无穷无尽的,真是取之不尽,用之不竭。而且它并无严重的放射性污染问题。因此,聚变核反应是人类最理想的潜在的新能源。它引起了科学界的极大兴趣,受到了世界各国的广泛重视。

4.核聚变与等离子体物理的关系

氘核都带正电,要使它们发生聚变反应,必须克服库仑斥力,彼此接近到原子核内核子与核子之间的距离即 10^{-13} 厘米。经过计算表明,氘核必须具有10keV以上的动能才有可能克服静电斥力而发生聚变反应,组成新的原子核。早期有人曾想利用加速器将氘核加速到所需的能量,再去轰击含氘的靶材料。但是很快便证明这种方法是行不通的。因为将加速的氘核打到含氘的固体靶上时,由理论推算可知大部分能量将消耗在同电子的碰撞而发生散射,例如用50keV的氘核轰击固体靶时,它同靶中电子碰撞的能量损失



农业在我国国民经济中占有举足轻重的地位。发展农业,对于解决十亿多人的温饱问题,进而促进我国社会主义现代化建设的稳步发展,具有十分显著的意义。然而,传统的增产技术却过多地依赖于使用化学肥料,其结果必然导致生态环境破坏加剧、农产品品质降低。因此,寻找一种既经济实用,又有助于作物增产和品质改善,减弱甚至完全消除对生态环境的破坏的新技术是摆在各国农业专家面前的亟待解决的问题。

我们依据多年来对高等植物光合作用原初过程中光能的吸收、传递及俘获机制,不同作物的需光规律和光形态建成过程、光谱光质选通对作物有效成份形成的作用和磁场对作物生长发育过程的影响等深入研究的基础上,提出了包括光生物学在内的物理农业新技术,它为了解决传统农业存在的问题找到了一把钥匙。因为用光、磁、电三大要素支撑的农业物理技术,它所研究和开发的对象不仅是建立在生物资源可循环的生物体及太阳能资源的利用上,而且还因为它在解决粮食、环境和健康等人类困扰的问题上能够发挥重要的作用。几年来的实践证明,该技术已经展现出诱人的

截面是 7.5×10^{-21} 厘米²,而发生聚变反应的截面仅是 10^{-26} 厘米²。两者的比值大约为 10^{-6} ,这就是说,100 万粒氦核打到靶上只有 1 粒氦核发生了聚变反应。那么能否用两束加速了的氦核对撞的办法实现核聚变反应呢?若用两束氦核对撞,由于多次的小角库仑散射累积的偏转角将有可能达到 90° 。例如两束 50keV 的氦核累积偏转角为 90° 的截面大约是 5×10^{-22} 厘米²,而聚变反应截面仅为 10^{-26} 厘米²。氦核经过多次散射,一旦偏离原方向 90° ,就离开了离子束,以后就不会再有机会碰到对撞的氦核了,也就是说对聚变反应没有贡献,所以这种方法也是行不通的。

要实现作为潜在新能源的核聚变反应,只能通过高温等离子体的方法。在高温等离子体中氦核和电子都具有相当大的动能,都进行无规热运动,彼此不断地碰撞着。因此在这种情况下氦核有足够多的几率发生聚变反应。这就是说,实现聚变反应,首先必须要产生

应用前景。

顾名思义,物理农业是指借助物理手段促进作物增产和品质改善的实用技术,主要包括旨在提高作物光能利用效率的高光效与高吸收功能互促的新型农肥——光助素、农用调光膜和光转换膜,以及用于提高作物生理活性的激光育种的光磁互促技术。

众所周知,作物的生长发育过程就是经过光合作用将光能转变成化学能,进而推动其生化反应,产生物质积累的过程。其中,光作为一种物理因子起着决定性的作用。现已发现,植物的正常发育过程,是一个光形态建成的过程,一个需光调控的过程,从种子萌发、幼苗生长、叶片展开及叶绿体发育乃至开花、结实都离不开光的参与和调节。不同光照强度和不同波段的光,对植物生长和成分形成有着不同的影响。实验发现,在作物栽培过程中若增加红光照射量,会抑制侧根发生,但却能提高作物的含糖量;增加蓝色光,会抑制叶柄生长,但作物的蛋白质含量增加。此外,光还影响着形态结构、器官发生和代谢活动。利用彩色薄膜对蔬菜等作物试验,发现紫色薄膜对茄子有明显的增产

高温等离子体。核聚变能源的成功与否取决于高温等离子体物理学的发展,这话是颇有道理的。50 年代初期,科学家们曾制订了宏伟计划,满有信心地认为不久将会实现受控核聚变。然而很快就遭到了巨大的甚至一度被认为是不可克服的困难。例如等离子体中出现了各种各样的不稳定性以及致命的“玻姆扩散”,高温等离子体刚刚产生便消失得无影无踪!等离子体的存在时间仅仅是百万分之几秒!从 50 年代后期开始便不得不转向高温等离子体物理学的基础性研究。在理论和实验的严密配合下,对高温等离子体的特性和运动规律有了更为深入更为全面的了解,因此从 70 年代以来核聚变研究不断取得重要进展。尤其是近 10 年来,在提高等离子体温度和改善等离子体约束性能方面取得的成就十分令人鼓舞。当然,核聚变研究的大规模开展并不断取得重要进展对于等离子体物理学的蓬勃发展也起到了巨大的推动作用。 (待续)