

惯性约束聚变简介

(近代物理专题)

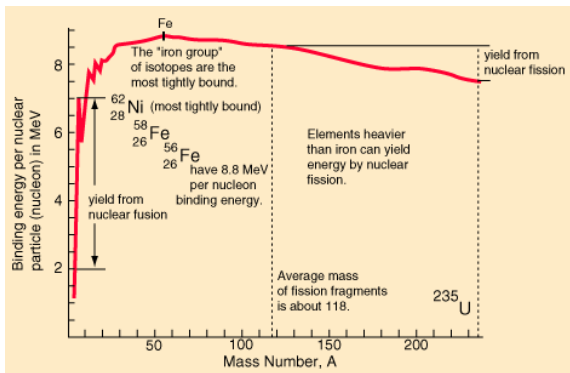
郑 坚

中国科学技术大学核科学技术学院

2021年12月9日

提要

- 1 什么是核聚变
- 2 劳逊判据与受控聚变的途径
- 3 惯性约束聚变的基本条件
- 4 惯性约束聚变的驱动方式
- 5 小结



原子核的结合能

轻核聚变或重核裂变都会释放能量，而且单位质量的轻核聚变能释放出更多的能量：单位质量的 D 聚变释放的能量是 ${}^{235}\text{U}$ 裂变释放能量的4倍以上。

原子弹



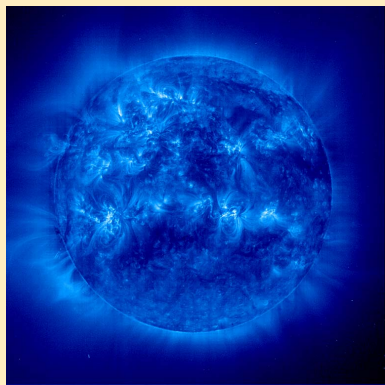
核电站



裂变能的利用

1945年7月16日，第一颗原子弹在美国试验成功；第一个核电站于1954年6月在苏联建成。

太阳

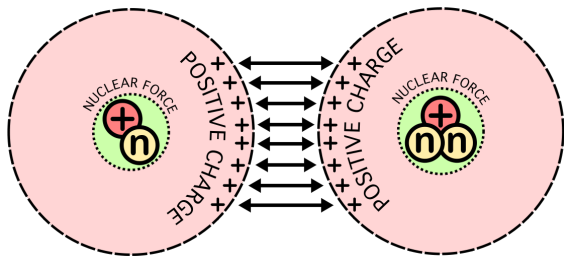


氢弹



自然界和人工聚变

在自然界，聚变是恒星的能量来源。美国于1952年11月1日试爆了第一个热核武器(氢弹)；但聚变电站建成确切时间依然未知。人类探索和平利用聚变能的时间超过了60年！



核聚变的困难根源

聚变反应需要原子核之间的距离接近核力起作用的尺度 r_n 。为此需要首先克服巨大的库伦势垒，

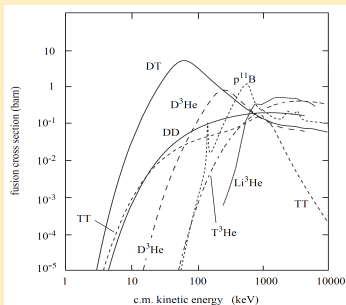
$$V = e^2/r_n.$$

取 $r_n = 1.5 \times 10^{-13}$ cm，有 $V = 1$ MeV。固体物质原子核的数密度约为 $10^{22}/\text{cm}^3$ ，这意味着物质的能量密度需要达到 10^9 J/cm³。

几种聚变反应

- $D + T \Rightarrow \alpha + n$;
- $D + D \Rightarrow He^3 + n$;
- $D + D \Rightarrow T + p$;
- $D + He^3 \Rightarrow \alpha + p$;
- $T + T \Rightarrow \alpha + 2n$;
- $p + Li^6 \Rightarrow \alpha + He^3$;
- $p + B^{11} \Rightarrow 3\alpha$.

聚变反应截面



当核子的质心能量 $\epsilon < 100$ keV, 聚变反应 $D + T \Rightarrow \alpha$ (3.52 MeV) + n (14.06 MeV) 的截面远高于其他反应。

假定燃料温度为 $T = 60 \text{ keV}$ ，密度为 $10^{22}/\text{cm}^3$ ，氘氚粒子发生弹性碰撞的截面大致为

$$\sigma_{\text{Ru}} \sim 7 \times 10^{-12} \text{ cm}^2.$$

氘氚发生聚变反应的截面为

$$\sigma^{\text{max}} \sim 7 \times 10^{-24} \text{ cm}^2.$$

聚变能源难以利用的物理原因之二

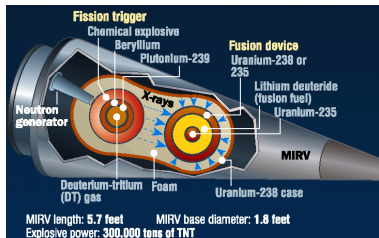
氘氚离子碰撞时，发生聚变反应是一个小概率事件，原子核之间以弹性散射为主。

$$P_{\text{fusion}} = \frac{\sigma_{\text{fusion}}}{\sigma_{\text{fusion}} + \sigma_{\text{Ru}}} \ll 1.$$

大量无效碰撞限制了开发利用聚变能源所能采取的方法。

已实现的聚变燃烧途径

- 聚变燃烧的一个最基本要求就是燃料的温度要达到几千万度(几个keV)，这样的高温不可能通过化学反应来获得；
- 在已经实现聚变燃烧的技术路线(氢弹)中，聚变燃料是通过裂变释放的能量来加热至燃烧温度的；
- 受控核聚变研究的目标就是实现**无裂变驱动的聚变燃烧**，从而大规模利用聚变能源。



美国先进热核战斗部 W87 的结构示意图。与武器不同，受控核聚变研究就是要实现无核裂变参与的聚变燃烧，从而和平利用聚变能源。

燃料的自持燃烧

当聚变产生的 α 粒子对燃料的加热足以补偿燃料通过各种途径损失的能量时，不需要外部加热，燃料就可以维持聚变反应所需要的高温，发生自持燃烧。

单位体积的氘氚燃料在单位时间内的聚变反应次数为

$$n_D n_T \langle \sigma v \rangle = \frac{1}{4} n_e^2 \langle \sigma v \rangle.$$

假定聚变产生的 α 粒子能够在燃料中沉积全部的能量，那么单位时间内单位体积燃料因聚变获得的能量为

$$\frac{1}{4} n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha.$$

这里 $E_\alpha = 3.52 \text{ MeV}$ 是 α 粒子的能量。

另一方面，单位体积燃料的能量为

$$\frac{3}{2}n_e T + \frac{3}{2}n_D T + \frac{3}{2}n_T T = 3n_e T,$$

单位体积的高温燃料因为各种物理过程的能量损失率记为

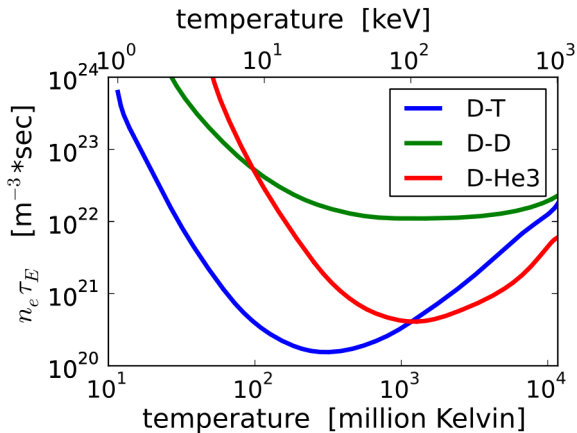
$$\frac{3n_e T}{\tau_E},$$

这里 τ_E 是燃料的**能量约束时间**。由自持燃烧条件

$$\frac{1}{4}n_e^2 \langle \sigma v \rangle_{DT} E_\alpha > \frac{3n_e T}{\tau_E},$$

我们得到著名的劳逊判据(Lawson's criterion)

$$n_e \tau_E > L \equiv \frac{12T}{E_\alpha \langle \sigma v \rangle_{DT}}. \quad (1)$$



$n_e \tau_E$ 值与温度的关系。

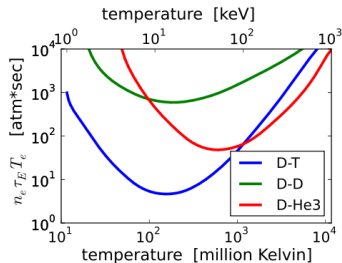
三乘积

劳逊判据也经常表示为密度、能量约束时间与燃料温度的三乘积，

$$n_e \tau_E T > \frac{12T^2}{E_\alpha \langle \sigma v \rangle_{DT}}. \quad (2)$$

对于 DT 聚变，三乘积的最小值出现在 $T = 14 \text{ keV}$ 附近。因此，

$$n_e \tau_E T > 3 \times 10^{21} \text{ keV s/m}^3.$$



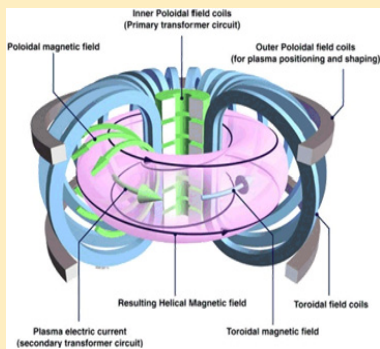
三乘积 $n_e T \tau_E$ 值与温度的关系。

聚变能源难以利用的物理原因之三

难以制造一个适当的“容器”，不仅能够长时间维持燃料的温度，同时还要保持一定的燃料密度：劳逊判据是一个在实验室中难以达到的目标。

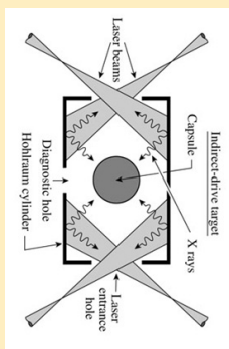
目前受控聚变的主要途径为磁约束和惯性约束，它们是达到劳逊判据的两种极限方法：前者尽力提高能量约束时间，但燃料密度低；后者尽力提高燃料密度，但能量约束时间短。但燃料温度都必须达到5 – 10 keV。

磁约束



利用强磁场提高能量约束时间

惯性约束



利用高功率驱动器提高燃料密度

DT等离子体的热压强为

$$p = n_e T + n_D T + n_T T = 2n_e T,$$

三乘积形式的劳逊判据(2)可以改写为

聚变等离子体的热压强与能量约束时间

$$p\tau_E > 4.8 \text{ bar} \cdot \text{s}. \quad (3)$$

惯性约束聚变

惯性约束的能量约束时间通常在 10^{-11} s, 燃料的压强很高

$$p_{ICF} > 4.8 \times 10^{11} \text{ bar}.$$

惯性约束主要困难在于实现燃料的高压强。

磁约束聚变

当磁场为4T, 燃料压强约为磁场能量密度的10%, 磁约束聚变的能量约束时间很长

$$\tau_{MCF} > 0.75 \text{ s}.$$

磁约束的主要困难在于提高燃料的能量约束时间。

惯性约束聚变只能以脉冲方式运行，其劳逊判据通常采用燃料面密度来刻画。

单位时间单位体积内热核聚变反应发生次数为

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{n_0}{2} - n\right)^2 \langle \sigma v \rangle, \quad (4)$$

n_0 是初始时刻总粒子数密度（假定 DT 粒子数密度相同）。定义燃烧率 $\phi = 2n/n_0$ ，那么有

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{n_0}{2} (1 - \phi)^2 \langle \sigma v \rangle.$$

在给定温度的条件下，对方程从 $t = 0$ 到 τ_E 积分一次，

$$\frac{\phi}{1 - \phi} = \frac{n_0}{2} \tau_E \langle \sigma v \rangle. \quad (5)$$

惯性约束与约束时间

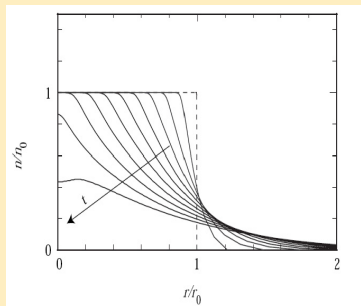
无约束的燃料会由于热膨胀(稀疏波)而解体。燃料解体的特征时间为

$$\tau_c = \frac{R_f}{c_s}$$

$c_T = (2T/2.5m_p)^{1/2}$ 是等温声速。认为稀疏波经过的区域不再发生聚变，由此定义惯性约束时间

$$\tau_E = \int_0^{\tau_c} (1 - c_T t / R_f)^3 dt = \frac{R_f}{4c_T}. \quad (6)$$

燃料的飞散



无约束高温聚变燃料以稀疏波的形式飞散掉。

燃烧效率与面密度和燃烧参数之间的关系

将惯性约束时间(6)代入方程(5)，燃烧效率可以表示为

$$\phi = \frac{\rho R_f}{\rho R_f + H_B}. \quad (7)$$

燃烧参数

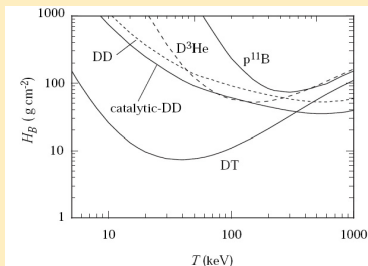
H_B 称为燃烧参数，是温度的函数

$$H_B(T) = \frac{20m_p c_T}{\langle \sigma v \rangle_{DT}} \quad (8)$$

燃烧参数 H_B 在 $T = 30$ keV 附近达到极小。通常，燃烧参数取为

$$H_B = 7 \text{ g/cm}^2.$$

燃烧参数与温度的关系



惯性约束聚变对面密度的要求

为了获得 30% 的燃烧效率，燃料的面密度必须达到

$$\rho R_f = 3 \text{ g/cm}^2.$$

在惯性约束聚变中， ρR_f 是一个基本参数，相当于磁约束聚变中的 $n\tau_E$ ^a：

- 燃料密度 ρ 与燃料数密度 n 相对应；
- 燃料半径 R_f 与能量约束时间 τ_E 相对应。

^a目前达到的最好结果是 $\rho R_f = 1.2 \text{ g/cm}^2$ 。

给定燃烧效率 ϕ ，质量为 M 的燃料所释放的中子能量为

$$E_n(\text{MJ}) = 2.7 \times 10^5 \phi M(\text{g}),$$

一次所需的燃料质量与密度和面密度有如下关系

$$M = \frac{4\pi(\rho R_f)^3}{3\rho^2}.$$

保持燃料效率不变，提高燃料密度可以减少燃料的总质量。

聚变发电对燃料密度的要求

百万千瓦(GW)的聚变电站：聚变频率为 10 次/秒，电能为 100 MJ/次。若中子能量转换为电能的效率为 25%，燃烧效率为 30%，那么每次需投入 5mg 燃料，可产生的 400MJ 的中子。此时燃料的密度为 260 g/cc。

点火 (ignition)

- 先将少部分燃料加热至聚变反应能够显著发生的温度，再利用聚变反应释放的能量加热剩余的冷燃料；
- 一对氘氚粒子聚变可释放 3.52 MeV 的 α 粒子；平均而言， α 粒子通过库伦散射，可将 50 对氘氚粒子的能量由 0 提高至 35 keV，从而使更多的燃料发生聚变：点火燃料的质量可以仅为总燃料的 1/50。

将 5.1mg 燃料中的 0.1mg 加热至 5 keV，将 5.0 mg 燃料近绝热地压缩至 149 g/cm³ 的高密度，那么加热/压缩燃料的总能量为

$$E = 104 \text{ (kJ)}.$$

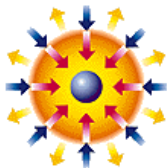
若驱动器-燃料耦合效率为 5%，那么所需驱动器能量为 2.1 MJ。

表: 惯性约束聚变若干关键参数要求

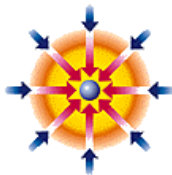
参数名称	参数条件	物理因素
主燃料面密度(ρr)	3 g/cm^2	燃烧效率达到 30%
主燃料密度(ρ/ρ_0)	10^3	一次聚变装药量限制
主燃料熵增(Δs)	< 4	主燃料达到高密度
主燃料内爆速度(u_{im})	$> 1.1 \times 10^7 \text{ cm/s}$	点火燃料内能由压强做功 转变为聚变加热
热斑燃料质量(m_H/m)	0.02	α 粒子加热冷燃料至聚变 温度
热斑燃料温度(T_H)	5 keV	点火燃料发生显著聚变
热斑面密度($\rho_H r_H$)	0.3 g/cm^2	α 粒子在热斑充分沉积能 量



(a)



(b)



(c)

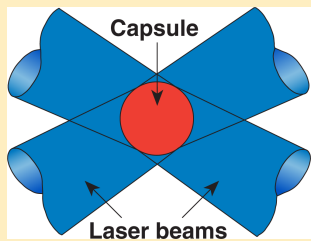


(d)

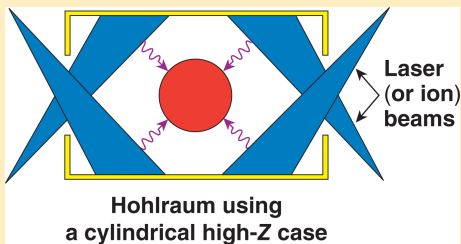
惯性约束聚变基本过程

- (a) 高功率辐射场(激光或x射线)辐照靶丸;
- (b) 靶丸外部烧蚀, 燃料向心聚爆;
- (c) 燃料密度被压缩到最高, 发生滞止;
- (d) 燃料点火, 发生燃烧。

直接驱动



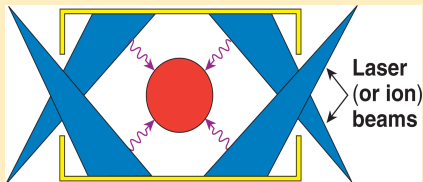
间接驱动



激光聚变

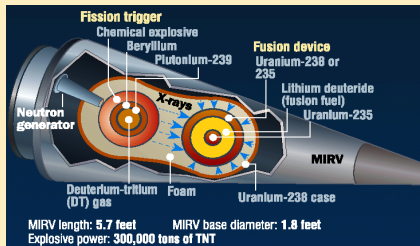
激光聚变有两种驱动方式，两种驱动方式各有千秋，但目前的研究以间接驱动为主：间接驱动与热核武器有密切联系。

间接驱动



Hohlraum using
a cylindrical high-Z case

氢弹



惯性约束聚变与热核武器之间的关系

- 热核武器的初级使用DT燃料助爆，以提高裂变燃料的燃烧效率：DT燃料发生聚变类似中心点火；
- 热核武器的初级和次级之间通过辐射场耦合，类似间接驱动；
- 热核武器的次级需要形成热核燃烧波才能大量释放能量，类似惯性约束聚变产生能量增益。

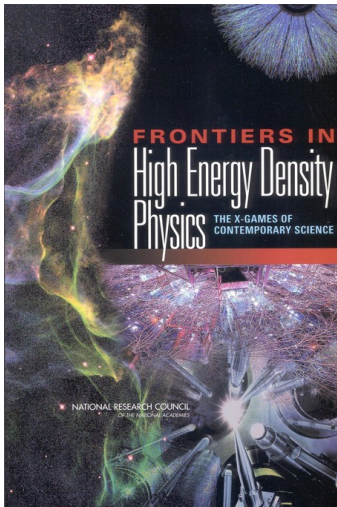


“两弹元勋”、国家最高科技奖获得者于敏先生评价惯性约束聚变与核武器之间的内在联系：

性质相同，量上逼近

惯性约束聚变面临的主要科学技术挑战

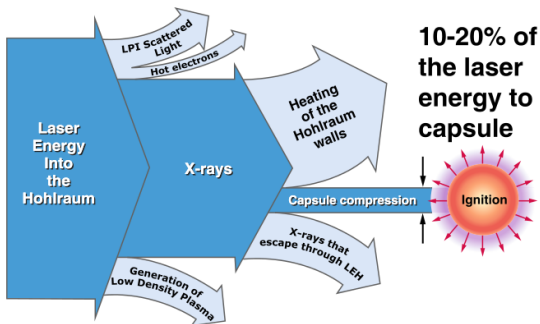
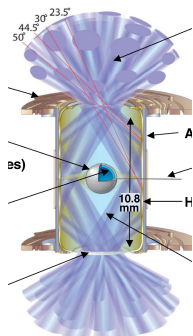
- 极端条件下的物性；
- 高温稠密环境中的原子过程和辐射；
- 高温辐射流体力学及其不稳定性；
- 动理学过程；
- 核燃烧过程；
- 高功率脉冲激光技术；
- 精密制靶技术；
- 精密诊断技术；
- 超大规模数值模拟方法；
- ...



惯性约束聚变有很强的辐射带动作用，催生了新学科

高能量密度物理

- 新型加速器物理
- 核物理
- 宇宙学
- 非线性量子电动力学
- 广义相对论
- 实验室天体物理
- ...



激光聚变间接驱动的缺点

- 激光能量仅有 10 – 20% 左右能耦合到靶丸，仅有 1% 的能量耦合到聚变燃料，能量耦合效率低下。
- 间接驱动靶的结构极为复杂，造价昂贵。
- 高功率脉冲激光器的运行频率很低，仅若干次/天。

激光聚变的间接驱动途径不适合能源研究。

Table 1 | Measured and derived implosion performance metrics

Quantity	N131119 ^{425 TW} _{1.9 MJ}	N130927 ^{390 TW} _{1.8 MJ}	N130927 ²⁵	N130927 ²⁶	N130927 (sim.)
Y_{13-15} (neutron)	$(5.2 \pm 0.097) \times 10^{15}$	$(4.4 \pm 0.11) \times 10^{15}$	—	—	7.6×10^{15}
T_{ion} (keV) D-T	5.0 ± 0.2	4.63 ± 0.31	—	—	4.2
T_{ion} (keV) D-D	4.3 ± 0.2	3.77 ± 0.2	—	—	3.9
DSR (%)	4.0 ± 0.4	3.85 ± 0.41	—	—	4.1
τ_x (ps)	152.0 ± 33.0	161.0 ± 33.0	—	—	137
PO_x, PO_n (μm)	$35.8 \pm 1.0, 34 \pm 4$	$35.3 \pm 1.1, 32 \pm 4$	—	—	32
$P2/PO_x$	-0.34 ± 0.039	-0.143 ± 0.044	—	—	—
$P3/PO_x$	0.015 ± 0.027	-0.004 ± 0.023	—	—	—
$P4/PO_x$	-0.009 ± 0.039	-0.05 ± 0.023	—	—	—
Y_{total} (neutron)	6.1×10^{15}	5.1×10^{15}	—	—	8.9×10^{15}
E_{fusion} (kJ)	17.3	14.4	—	—	25.1
r_{fs} (μm)	36.6	35.5	34.4-42.3	35.7-36.0	32.2
$(\rho r)_{\text{fs}}$ (g cm^{-2})	0.12-0.15	0.12-0.18	0.13-0.19	0.1-0.14	0.15
E_{fs} (kJ)	3.9-4.4	3.5-4.2	3.7-5.5	3.71-4.56	4.1
E_x (kJ)	2.2-2.6	2.0-2.4	2.0-2.4	2.0-2.5	2.8
$E_{\text{DT,total}}$ (kJ)	8.5-9.4	10.2-12.0	10.0-13.9	10.92-11.19	13.4
G_{fuel}	1.8-2.0	1.2-1.4	1.04-1.44	1.28-1.31	1.9

美国NIF装置上的点火实验表明，目前的激光—燃料能量耦合效率仅 1%。^a

^aO. A. Hurricane *et al.*, Nature **506**, 343 (2014).

提高驱动器—燃料能量耦合效率

提高驱动器-燃料之间的能量耦合效率，可有效降低驱动器的能量输出要求，降低驱动器的工程造价，提高惯性约束聚变能源的经济性。

中国惯性约束聚变研究简史

- 1964年，王淦昌先生独立提出激光核聚变的概念；
- 1974年，中国采用一路激光驱动聚氘乙烯靶发生核反应，观察到氘氘反应产生的中子；
- 1986年，“神光I”激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $2 \times 1 \text{ kJ}/1\text{ns}@1053\text{nm}$ ；
- 1993年，国家高技术863计划惯性约束聚变主题立项；
- 2000年，“神光II”激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $8 \times 0.26 \text{ kJ}/1\text{ns}@1053\text{nm}$ ；
- 2006年，“神光III”原型激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $8 \times 1 \text{ kJ}/1\text{ns}@351\text{nm}$ ；
- 2014年，“神光IIU”激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $8 \times 1 \text{ kJ}/1\text{ns}@351\text{nm} + 1 \text{ kJ}/1\text{ps}@1053\text{nm}$ ；
- 2016年，“神光III”激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $48 \times 3 \text{ kJ}/3\text{ns}@351\text{nm}$ ；
- 2016年，贺贤土院士提出混合驱动非等压点火方案；
- 2020年，张杰院士提出双锥对撞点火方案。

中国ICF事业的倡导者和领导者



王淦昌



于敏



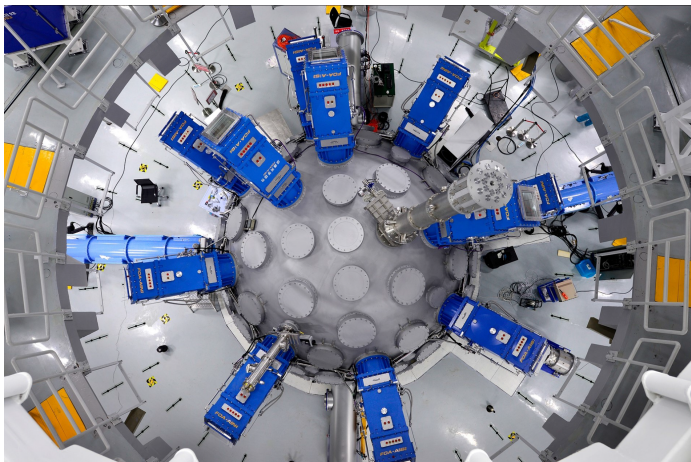
贺贤士



张维岩



张杰



“神光III”装置是目前世界上第三大激光聚变研究装置，基本运行参数为 48×3 kJ/3ns@351nm，是中国实现惯性约束聚变点火之前的关键实验研究装置。

美国惯性约束聚变研究简史

- 1957年, J. H. Nuckolls提出利用辐射场将1毫克DT燃料密度压缩1千倍, 5MJ驱动能量可产生50MJ聚变能: 腔靶的概念。
- 1960年, J. H. Nuckolls提出脉冲整形和薄壳靶概念, 驱动能量可降低至1MJ;
- 1960年, T. Maiman发明激光器, 美国核武器科学家意识到激光器可以作为惯性约束聚变的驱动;
- 1962年, R. Kidder提出激光直接驱动的概念;
- 1972年, H. J. Nuckolls等人发表了惯性约束聚变的关键概念: 内爆压缩;
- 1978年, LLNL建造10kJ@1053nm激光器Shiva试图点火, 失败;
- 1980年代, 美国通过地下核试验验证了中心点火概念;
- 1984年, LLNL建造30kJ@351nm激光器NOVA, 采用了三倍频技术;
- 2009年, LLNL建造1.8MJ激光器NIF试图点火。到2021年8月8日, 接近点火目标。

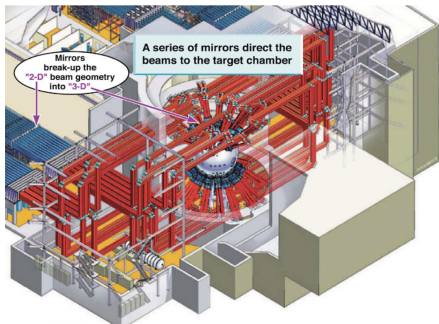
美国ICF事业的早期倡导者和领导者



Edward Teller

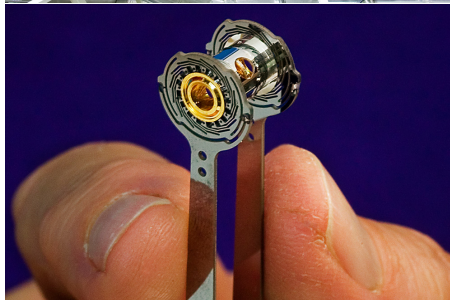
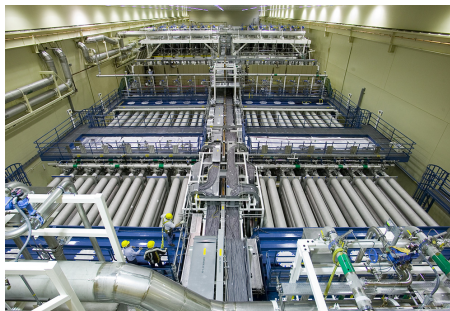
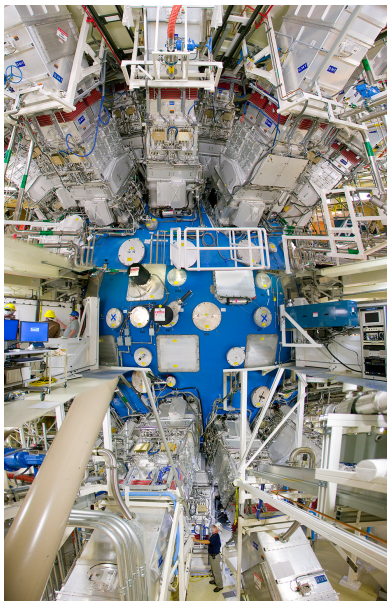


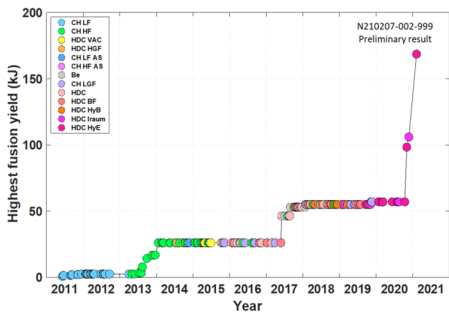
John Nuckolls



国家点火装置

国家点火装置(National Ignition Facility, NIF) 是目前世界上最大的激光聚变实验装置，于2009年3月31日宣布建成。NIF 共有 192 路激光束，分为 48 个集束。最大输出能量可达 $2 \text{ MJ}/20\text{ns}@351\text{nm}$ 。





2011—2021年，NIF装置上的“点火”实验大约每3年有一个显著的进步。^a
 2021年8月8日，NIF装置实现了1.3 MJ的聚变能，基本实现点火目标。^b

^aJ. G. Di Nicola et al., The National Ignition Facility Laser Performance Status, Proc. SPIE 11666, High Power Lasers for Fusion Research VI, 1166604 (5 March 2021); <https://doi.org/10.1117/12.2586868>

^b<https://www.nature.com/articles/d41586-021-02338-4>

小结

- 惯性约束聚变是实现受控聚变的途径之一；
- 惯性约束聚变就是微型核爆炸，因而与国防研究密切相关；
- 人类距离实现惯性约束聚变点火的宏伟目标近在咫尺。