

2023-2024 第二学期

提要

惯性约束聚
变研究简史

引言

惯性约束聚变
起源

激光聚变早期
历史

NIF 点火之路

中国惯性约束
聚变研究简史

劳逊判据与
惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚
变的基本参
数

聚变可控与燃
料密度

驱动能量与点
火

高密度压缩与
熵增

α 粒子的能量
沉积效率与热
斑面密度

惯性约束聚变
若干关键参数
要求

① 惯性约束聚变研究简史

② 劳逊判据与惯性约束

③ 惯性约束聚变的基本参数

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

聚变可控与燃料密度

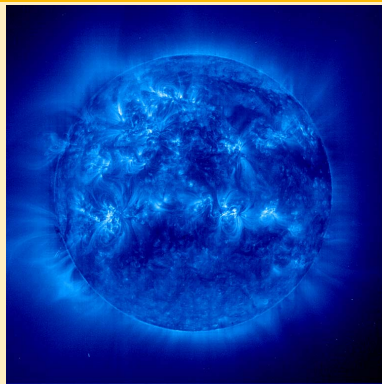
驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求

太阳



氢弹



聚变能的利用

太阳是天然的聚变反应堆，是引力场约束；氢弹是人类首先实现的热核聚变，本质上是惯性约束。

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

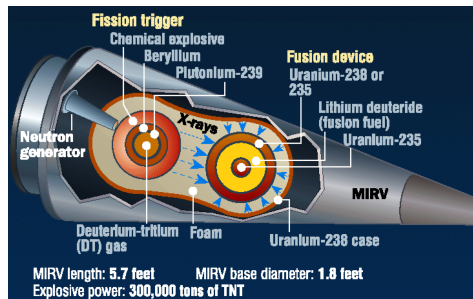
高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求

已实现的惯性约束聚变燃烧途径

- 聚变燃烧的一个最基本要求就是燃料的温度不能低于理想点火温度 4.3 keV，这样的高温不可能通过化学反应来获得；
- 最早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。



Edward Teller



John Nuckolls

美国 ICF 研究起源

1957年, E. Teller 就和平利用聚变能向他的研究生 J. Nuckolls 提出了 2 个问题, 后者通过研究给出了回答^a。

Two key questions and answers (1958-1960)

1. What is smallest possible high gain fusion explosion?

Answer:

- less than 10^{-3} g of DT; 10^6 J to implode/ignite
- compress 1000 fold via mini radiation implosion

2. How to drive radiation implosion without fission primary?

Answer: develop "non-nuclear primary" with stand-off, repetitive, pulse shaping potential

^a J. Nuckolls, Early Steps Toward Inertial Fusion Energy (IFE) 1952-1962, UCRL-ID-131075 (1998)

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

聚变可控与燃料密度

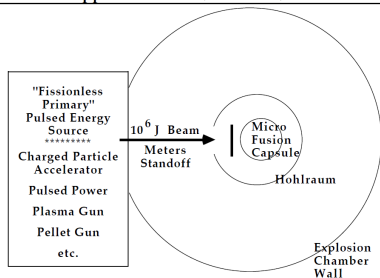
驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

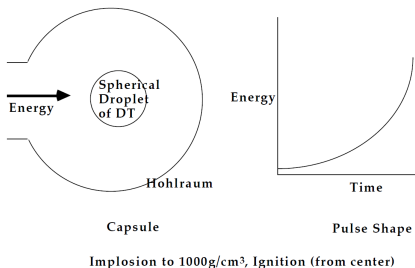
α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求

Micro-fusion approach to IFE (1959-1960)



Low cost high gain fusion capsule design (1961)



Calculation of radiation implosion of 10^{-3} g DT (1960)

Low initial DT density (0.01g/cm^3)

DT contained by thin dense shell

Hohlraum temperature 240 eV

Compression of DT to $> 50\text{g/cm}^3$

Burn efficiency $> 50\%$

Gain ~ 10 (5 MJ input, 50 MJ fusion)

Nuckolls 与中心点火方案

J. Nuckolls 的研究结果逐步演化为**中心点火方案**，该方案是美国惯性约束聚变研究的主要点火方案。尽管是 60 多年前的研究结果，J. Nuckolls得到的主要结论没有根本性的改变，与美国的国家点火装置(NIF)上的实验结论基本一致。惯性约束聚变研究，关键是驱动器与聚变燃料之间能量耦合的研究。

T. Maiman 于1960年发明激光器之后，各国科学家纷纷意识到高功率激光器是实现聚变的有力手段，开始了或秘密、或公开的研究。

- 1961-1962年，美国的 R. Kidder 等人开始秘密模拟激光辐照聚变靶丸；
- 1963年，苏联的 N. G. Basov and O. N. Krokhin 在第三届国际量子电子学大会上首次公开报告了利用激光实现聚变的思想；
- 1964年，美国的 J. M. Dawson 发表了关于利用激光实现高温聚变的论文；同年，中国的王淦昌以内部报告的形式提出激光聚变的建议；
- 1966年，美国的 J. W. Daiber 等人公开发表了激光辐照驱动内爆的论文；
- 1968年，苏联的 N. G. Basov 等人报道了激光辐照聚变材料产生中子的实验结果；同年，美国的 R. Kidder 发表了激光烧蚀压缩氘气体球靶内爆并产生聚变中子的模拟结果；
- 1971年，苏联的 N. G. Basov 在激光等离子体相互作用国际会议上指出，利用球形内爆可实现 100-1000 倍的燃料密度压缩，并给出了激光能量与压缩密度之间的关系 $E \rho^{-2}$ ；同年，N. G. Basov 利用激光烧蚀压缩碳氘靶，获得了 10^3 的聚变中子；

On the Production of Plasma by Giant Pulse Lasers

JOHN M. DAWSON
Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, New Jersey
 (Received 10 October 1992; final manuscript received 10 March 1993)

Calculations are presented which show that a laser pulse delivering powers of the order of 10^{10} W to a liquid or solid particle with dimensions of the order of 10^{-7} cm can produce a hot plasma with temperatures in the range of several hundred eV. To a large extent the plasma temperature is held down by its rapid expansion and cooling. This converts much of the energy supplied into ordered energy of expansion. This ordered expansion energy can amount to several keV per ion. If the expanding plasma can be caught in a magnetic field and its ordered motion converted to random motion this might be utilized as a means for filling controlled thermonuclear fusion devices with hot plasma. Further, it should also be possible to do many interesting plasma experiments on such plasmas.

Laser-Generated Implosions

J. W. DAIBER, A. HERTZBERG, AND C. E. WITTLIFF
Cornell Aeronautical Laboratory, Inc., Buffalo, New York
(Received 22 December 1965)

By using a weak spherical blast wave to shape the initial density distribution, the laser energy can be preferentially coupled to the periphery of this sphere. This energy addition to the shell of high density gas then produces an imploding plasma.

编者按：王淦昌教授是我国激光核聚变研究的主要倡导者之一。最近在中国科学院上海光源所技术档案中找到了他于1964年10月6日写成的第一篇未曾正式发表的论文。这篇论文不仅在当时对激光核聚变研究有开拓性的指导意义，而且在现在也不失其重要的参考价值。为回顾他长期指导这个领域所作出的重大贡献，在他八十大寿之际，特予发表。

为了尊重历史,我们对论文中的观点未作任何修改和补充,除几处明显笔误作了订正外,其中一些不够规范的词语亦保留其原样。

利用大能量大功率的光激光器产生中子的建议

三、金

(中国原子能科学研究院)

摘要: 本文提出了用光激射方法产生中子的具体建议。叙述了以氟化铍作靶较为有利的理由,并且估计了入射光能 E 、靶光范围 r_0 与中子产额 N 的关系。本文叙述了氟化铍靶应该怎样制备;如何用实验方法验证有无中子的存在;验证有无 X 光的存在;以及讨论了如何深入到极少量的测量。最后还建议利用化学药品代替电容器,以使产生中子的整个装置减小体积。

Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications

JOHN NUCKOLLS, LOWELL WOOD,
ALBERT THIESSEN & GEORGE ZIMMERMAN
University of California Lawrence Livermore Laboratory

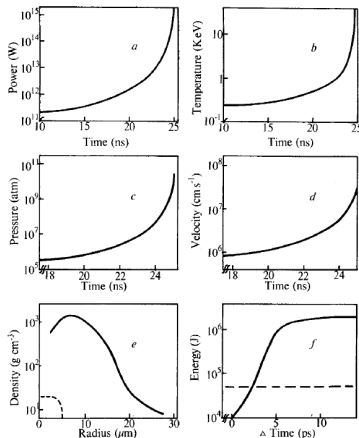


Fig. 1 Computer calculations of microexplosion resulting from 10,000-fold compression of a fusion pellet. A 60 kJ, 1 μm , laser is assumed to implode a 0.4 mm radius sphere of equimolar deuterium/tritium. *a*, Laser power. *b*, Electron temperature. *c*, Pressure. *d*, Velocity of shell. *e*, Density (—) and ion temperature (---) during thermonuclear ignition. *f*, Energy production; —, fusion; ---, laser.

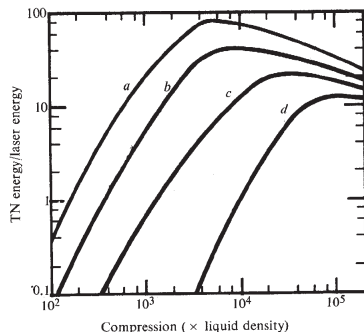
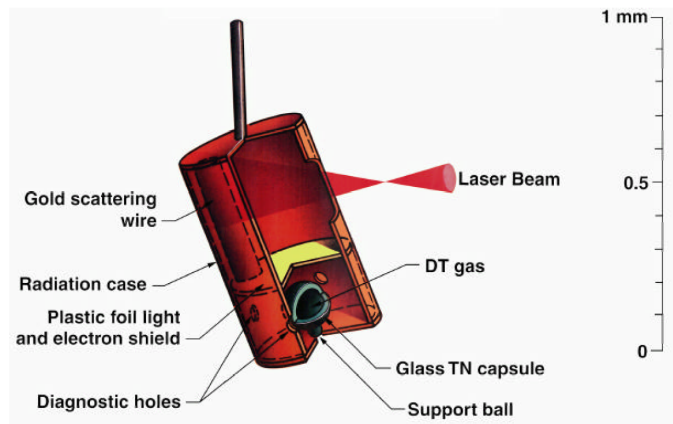


Fig. 2 Energy gain plotted against compression: *a*, 10^6 J; *b*, 10^5 J; *c*, 10^4 J; *d*, 10^3 J.

1972年, J. Nockolls 等人公开发表了激光聚变的中心点火概念以及主要计算结果, 标志着激光直接驱动 ICF 研究逐步公开化。

First laser driven radiation implosion experiment (1976)



1975年, J. Lindl 和 M.C. Mead 通过模拟发现直接驱动的瑞利-泰勒不稳定性增长率远高于 J. Nuckolls 等人的估计^a, 这促使美国将激光聚变研究重点从直接驱动转向间接驱动。1976年, 美国首次进行了间接驱动激光聚变实验^b。1978-1988年, 美国通过一系列地下核试验验证了间接驱动高增益中心点火方案^c。

^a J. Lindl and W. C. Mead, Phys. Rev. Lett. 34, 1273 (1975);

^b J. Nuckolls, Early Steps Toward Inertial Fusion Energy (IFE) 1952-1962, UCRL-ID-131075 (1998);

^c J. Lindl, Phys. Plasmas 2, 2933 (1995).

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

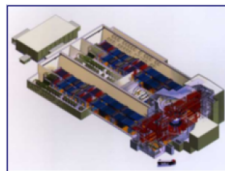
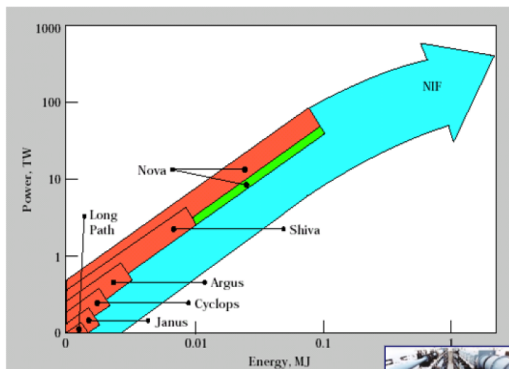
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



2009, NIF



1993, Omega-up



1984, Nova



1980, Omega



~1970s, Shiva



~1970s, Argus



二十世纪七十年代至今，美国在ICF研究上投入巨额经费，取得了一系列重大进展，先后建成多台不同档次的高功率钕玻璃固体激光装置，激光输出能量从不足百焦耳逐渐提高到百万焦耳以上。

提要

惯性约束聚
变研究简史

引言

惯性约束聚
变起源

激光聚变早期
历史

NIF 点火之路

中国惯性约束
聚变研究简史

劳逊判据与
惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚
变的基本参
数

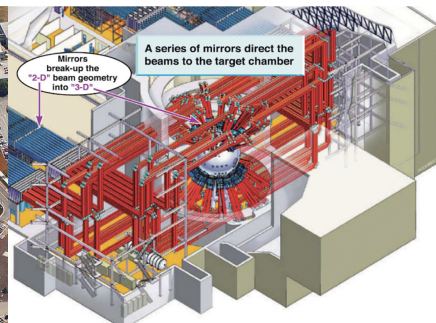
聚变可控与燃
料密度

驱动能量与点
火

高密度压缩与
熵增

α 粒子的能量
沉积效率与热
斑面密度

惯性约束聚变
若干关键参数
要求



为了实现点火，美国于1993年提出建造国家点火装置 (NIF)，并于2009年3月31日宣布建成。NIF 是目前世界上最大的激光聚变实验装置，共有192路激光束，分为48个集束，最大输出能量可达 2 MJ/20ns@351nm。

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

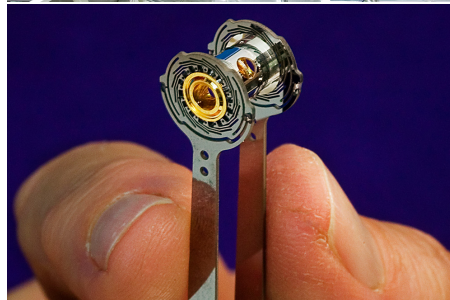
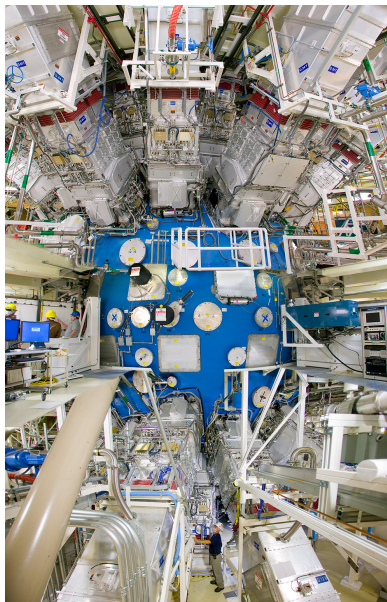
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与

惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

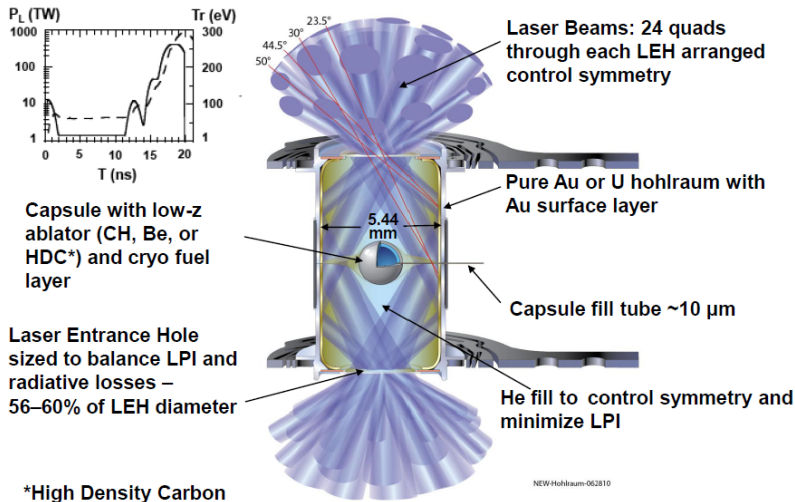
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



2010-2012年，美国以 NIF 为研究平台实施了国家点火攻关行动(NIC)，试图实现聚变点火，但没有达到预期目标。上图是NIC实施期间，点火腔靶的几何尺寸以及激光注入腔靶的方式。

摘要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

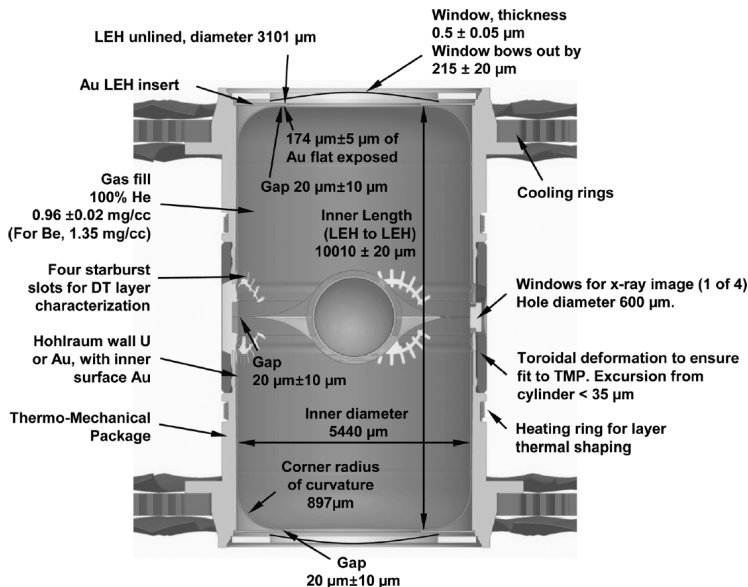
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



NIC 实施期间，点火腔靶的细致结构。

Final Review of the National Ignition Campaign

December 27, 2012

The NNSA convened the seventh and final review of the National Ignition Campaign (NIC) on November 13 and 14, 2012 chaired by Prof. Dan Meiron. This document is a summary of comments submitted by individual reviewers and is authored by the meeting chair and the federal convener. The external reviewers have served since Dr. Steven E. Koonin, then Under Secretary for Science, initiated this review series in October 2010. For this review, Dr. Don Cook, the deputy administrator for Defense Programs at NNSA tasked the reviewers to:

- Summarize the final status of the NIC,
- Assess current impediments to ignition,
- Assess the likelihood of ignition in the future using indirect drive, and
- Identify priority research directions.

Reviewers interacted with the LLNL staff during presentations on technical progress and program plans, and reviewed and discussed drafts of the Congressionally-mandated path forward report now issued by NNSA, as well as a governance plan for the future utilization of National Ignition Facility (NIF). This review covered only the indirect drive approach to laser driven ignition.

Summary:

The National Ignition Campaign¹ was completed on September 30, 2012, having achieved all project goals with the exception of the grand challenge scientific goal of demonstrating ignition. In addition to designing and executing ignition experiments, the scope of the NIC

在 NIC 实施期间, 美国没有实现预定的点火目标, 甚至没有实现显著的 α 粒子的加热。

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变

起源

激光聚变早期

历史

NIF 点火之路

中国惯性约束

聚变研究简史

劳逊判据与

惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变

的基本参数

数

聚变可控与燃

料密度

驱动能量与点

火

高密度压缩与

坍塌

α 粒子的能量

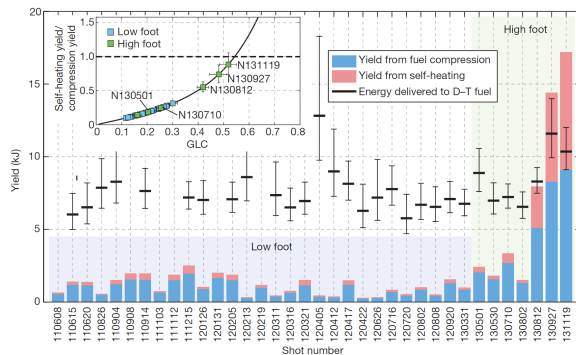
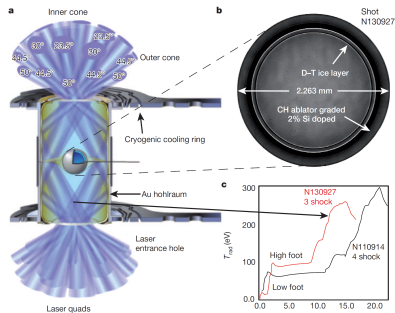
沉积效率与热

斑面密度

惯性约束聚变

若干关键参数

要求



2013 年，美国科学家采用 high foot 激光脉冲，聚变产生的 α 粒子对燃料有显著的加热，向“点火”目标迈进了一步^a。

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

提要

惯性约束聚
变研究简史

引言

惯性约束聚变
起源激光聚变早期
历史

NIF 点火之路

中国惯性约束
聚变研究简史劳逊判据与
惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚
变的基本参
数聚变可控与燃
料密度驱动能量与点
火高密度压缩与
熵增 α 粒子的能量
沉积效率与热
斑面密度惯性约束聚变
若干关键参数
要求**NNSA**
National Nuclear Security Administration

OFFICE OF DEFENSE PROGRAMS

2015 Review of the Inertial Confinement Fusion and High Energy Density Science Portfolio: Volume I

May 2016

Barring an unforeseen technical breakthrough and given today's configuration of the NIF laser, achieving ignition on the NIF in the near term (one to two years) is unlikely and is uncertain over the next five years. Although performance of NIF ignition targets continues to improve and simultaneously making contributions to the SSP, currently there is no known configuration, specific target design, or approach that will guarantee ignition on the NIF.

2016年，美国国家核安全局(NNSA)对在NIF上实现点火进行了评估，结论是“1-2年内实现点火是不可能的，在更远的5年内实现点火是不确定的”。

摘要

惯性约束聚变研究简史
引言
惯性约束聚变起源
激光聚变早期历史
NIF 点火之路
中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束
劳逊判据
惯性约束
惯性约束聚变的基本参数

聚变可控与燃料密度
驱动能量与点火
高密度压缩与熵增
 α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度
惯性约束聚变若干关键参数要求

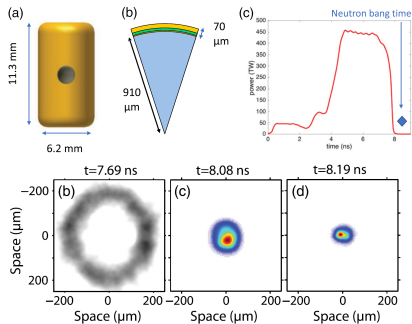


TABLE I. Summary of experimental data from cryogenic DT layer implosions at 6.20 scale (N170601, N170827) and for a high performance high foot experiment (N140304).

	N170601 data	N170827 data	N140304 data
Total neutron yield	$1.7e16 \pm 2.4e14$	$1.9e16 \pm 3e14$	$9.3e15 \pm 1.7e14$
Fusion yield (kJ)	48	53	26
DT Tion (keV)	4.5 ± 0.12	4.5 ± 0.15	5.5 ± 0.12
DSR (%)	3.27 ± 0.2	3.24 ± 0.2	3.4 ± 0.20
Velocity (km/s)	381	395	380
Pstag (Gbar)	320 ± 40	360 ± 45	222 ± 15
Nuclear burn width (ps)	160 ± 30	154 ± 30	163 ± 30
Hot spot $\rho * r$ (g/cm^2)	0.26 ± 0.032	0.30 ± 0.034	0.13 ± 0.021
α deposited fraction f_a	0.81	0.87	0.58
Hot spot energy (kJ)	4.3 ± 1.17	4.7 ± 1.7	3.6 ± 1.03
Shell max kinetic energy (kJ)	22 ± 5	21 ± 5	25 ± 7
Alpha deposited energy (kJ)	8 ± 1.36	9.3 ± 1.6	3.3 ± 0.58

2017 年，美国科学家通过改变腔靶尺寸、聚变靶丸的烧蚀层材料，以及激光脉冲等参数，改善了内爆压缩对称性，再次提高了聚变中子产额，并将热斑的面密度提高到 0.3 g/cm^2 。

^a S. Le Pape et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 245003 (2018).

LLNL-TR-810573



Laser Indirect Drive input to NNSA 2020 Report

May 20, 2020

2020 年，在给 NNSA 提交的报告中，
LANL 对在 NIF 装置上实现点火持高度
怀疑态度，LLNL 则持不确定态度。

LANL Assessment:

- The scientific opinion at LANL on the question of ignition on NIF as currently configured is highly skeptical. The experimental track record for controlling the low-adiabat implosions that are almost certainly needed to achieve ignition at NIF's current energy and power levels is not promising. Implosion stability can be improved by increasing the adiabat, but doing so also raises the energy requirement for ignition. Unfortunately, the codes lack the predictive capability in this regime needed to reliably assess these tradeoffs, making ignition high risk.

LLNL assessment:

- Closing the gap to ignition on the NIF presents a significant scientific and technological challenge. Theory and detailed 3D simulations of the experimental data suggest that if no further improvements in capsule fabrication, laser precision, implosion control and laser energy to capsule coupling can be achieved, larger capsules that absorb a factor of 2.5-3 more energy are needed. This would require a laser of at least 5MJ, which is beyond NIF's capability.
- With enhancement, the NIF could deliver approximately 1.5x more energy than available today, up to 2.6-3MJ to target. Closing the remaining ~2X energy gap would require an additional ~1.5X improvement from both increased coupling efficiency of laser energy to the capsule and a similar ~1.5X improvement from better implosion control to enable lower adiabat implosions, producing densities approximately 1.25x higher than the best performing implosions to date.
- Based on experimental data to date and steadily improving understanding of target physics as diagnostics and simulation tools have advanced, the program is poised to make strong progress in understanding the obstacles to effective lower adiabat implosions. Recent results also indicate that the coupling of laser energy to the capsule can be increased further. However, it is not possible at this time to assess whether these advances will be sufficient to achieve ignition at NIF.

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

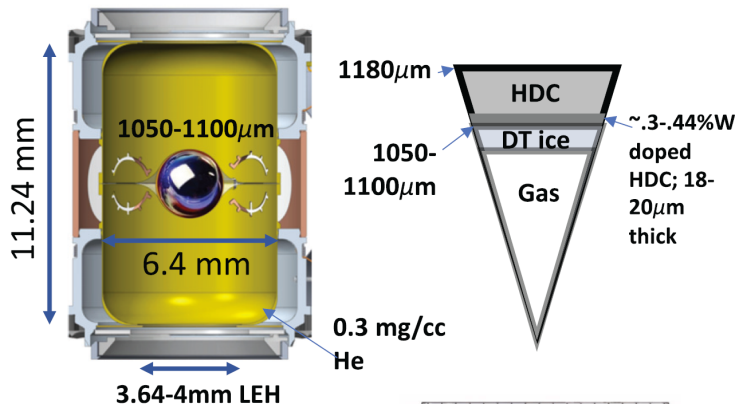
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



2021年初，美国科学家采取了增加聚变靶丸尺寸、减小激光注入口等措施，改善了激光—靶丸能量耦合效率，将聚变能提高到了 170 kJ^a。

^a A. L. Kritcher et al., Phys. Plasmas **28**, 072706 (2021).

摘要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

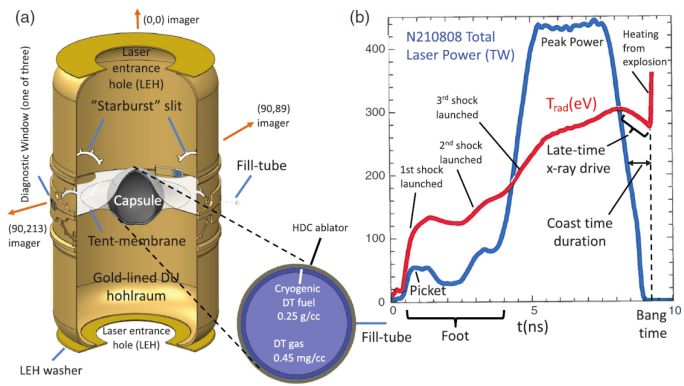
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与塌缩

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



Quantity	N210207Data	N210307Data	N210808Data				
P_{laser} (TW)	470	487	441	V ($10^5 \mu m^3$)	3.3 ± 0.3	2.7 ± 0.3	6.4 ± 0.75
E_{laser} (MJ)	1.93	1.909	1.917	τ_{BW} (ps)	103 ± 25	138 ± 20	89 ± 5
Peak T_{rad} (eV)	302	294	307	p_{HS} (Gbar)	351 ± 23	353 ± 23	569 ± 61
t_{coast} (ns)	1.09	1.26	0.83	E_{HS} (kJ)	17.4 ± 1.1	14.6 ± 0.9	55 ± 6.0
Y_{total} (MJ)	0.170	0.145	1.37	ρR_{HS} (g/cm ²)	0.37 ± 0.4	0.38 ± 0.02	0.44 ± 0.05
T_{DT} (keV)	5.66 ± 0.13	5.55 ± 0.11	10.9 ± 0.4	G_{fuel}	$7.5^{+0.54}_{-0.82}$	$7.77^{+0.55}_{-0.82}$	$75.6^{+3.6}_{-5.6}$
T_{DD} (keV)	5.23 ± 0.16	4.87 ± 0.14	8.94 ± 0.4	$G_{capsule}$	0.75 ± 0.05	0.69 ± 0.05	5.8
DSR (%)	3.16 ± 0.16	3.49 ± 0.16	2.87 ± 0.24	G_{target}	0.089	0.075	0.72

2021年8月8日，美国获得了 1.35 MJ 的聚变能量，接近实现了点火^a。

^a H. Abu-Shawareb et al., Phys. Rev. Lett. **129**, 075001 (2022).

摘要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

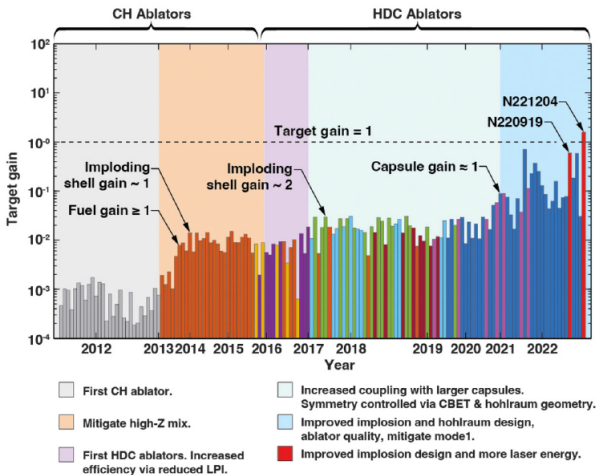
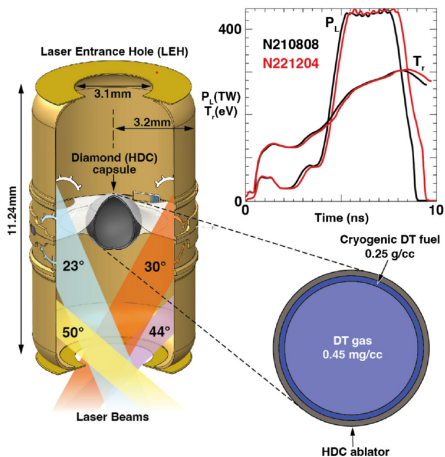
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与坍塌

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



2022年12月4日，美国获得了 3.05 MJ 的聚变能量。NIC 结束之后，经过 10 年的不懈努力，美国终于在 NIF 上实现了间接驱动点火^a。

^a H. Abu-Shawareb et al., Phys. Rev. Lett. **132**, 065102 (2024).

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源
激光聚变早期历史

NIF 点火之路
中国惯性约束聚变研究简史

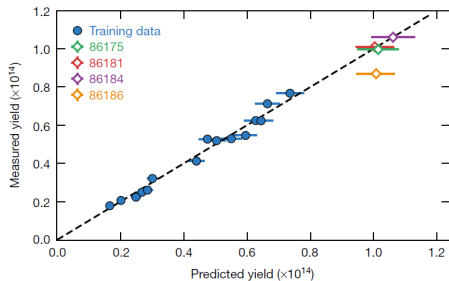
劳逊判据与惯性约束
劳逊判据

惯性约束
惯性约束聚变的基本参数

聚变可控与燃料密度
驱动能量与点火

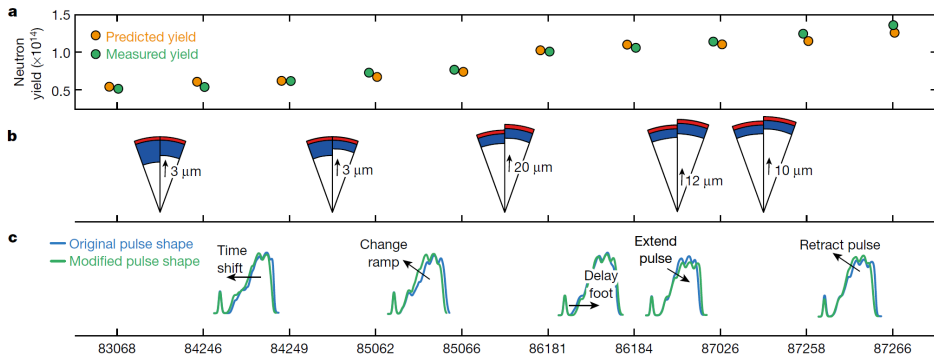
高密度压缩与熵增
 α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

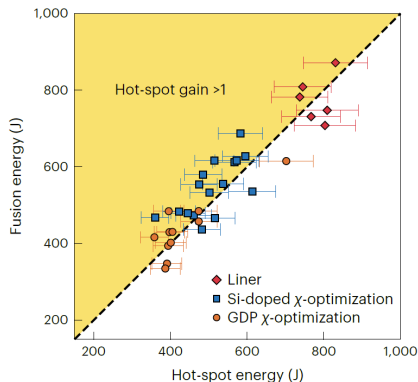
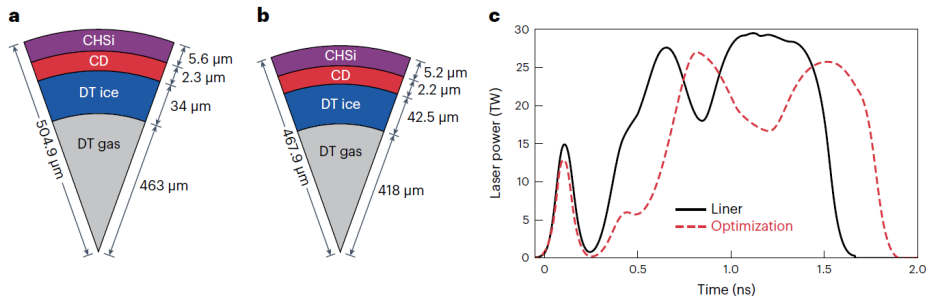
惯性约束聚变若干关键参数要求



美国在直接驱动方面也取得显著的进展。2019年，美国罗彻斯特大学研究团队借助机器学习的思想，采用统计模型分析方法进行实验设计，在15次内将聚变中子产额提高了3倍^a。

^a V. Gopalswamy et al., Nature **565**, 581 (2019).





2024年，美国罗彻斯特大学研究团队优化了靶丸和激光脉冲波形，在驱动激光能量仅有 29 kJ 的情况下，靶丸的热斑聚变增益达到 1^a 。与之相比，NIF上的间接驱动达到这一指标时，激光能量为 1.9 MJ^b。

^a C. A. Williams et al., Nature Physics (2024), DOI: 10.1038/s41567-023-02363-2.

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

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与

惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与增益

 α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求

- 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 $2 \times 1 \text{ kJ}/1\text{ns}@1053\text{nm}$ 。该装置建成，标志中国激光聚变研究进入世界先进行列；
- 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 $8 \times 0.26 \text{ kJ}/1\text{ns}@351\text{nm}$ 。这是中国首个千焦耳紫外激光聚变装置；
- 2006年，“神光III” 原型激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $8 \times 1 \text{ kJ}/1\text{ns}@351\text{nm}$ 。这是中国首个万焦耳级紫外激光聚变装置；
- 2014年，“神光IIU” 激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $8 \times 1 \text{ kJ}/1\text{ns}@351\text{nm} + 1 \text{ kJ}/1\text{ps}@1053\text{nm}$ 。中国首个皮秒拍瓦激光束投入运行；
- 2016年，“神光III” 激光聚变装置建成运行，基本运行参数为 $48 \times 3 \text{ kJ}/3\text{ns}@351\text{nm}$ 。中国首个十万焦耳级紫外激光聚变装置，建成时是世界第二大激光聚变实验装置，中国激光聚变研究位于世界前列；
- 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。

提要

惯性约束聚
变研究简史

引言

惯性约束聚变
起源

激光聚变早期
历史

NIF 点火之路

中国惯性约束
聚变研究简史

劳逊判据与
惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚
变的基本参
数

聚变可控与燃
料密度

驱动能量与点
火

高密度压缩与
熵增

α 粒子的能量
沉积效率与热
斑面密度

惯性约束聚变
若干关键参数
要求



王淦昌



于 敏



贺贤土



张 杰



张维岩

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

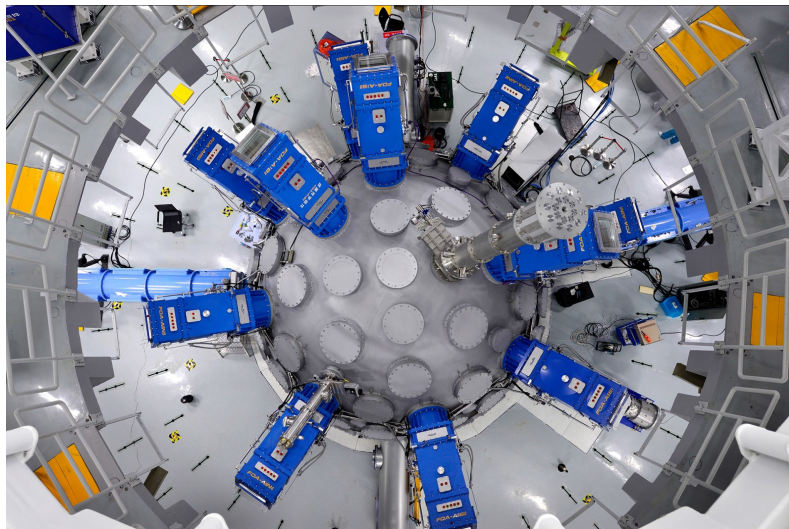
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



“神光III”装置是目前世界上第二大激光聚变研究装置，基本运行参数为 $48 \times 3 \text{ kJ/3ns@351nm}$ ，是中国实现惯性约束聚变点火之前的关键实验研究装置。中国将建造更大的激光装置，早日实现点火的中国方案。

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变

起源

激光聚变早期

历史

NIF 点火之路

中国惯性约束

聚变研究简史

劳逊判据与

惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变

的基本参数

数

聚变可控与燃

料密度

驱动能量与点

火

高密度压缩与

熵增

α 粒子的能量

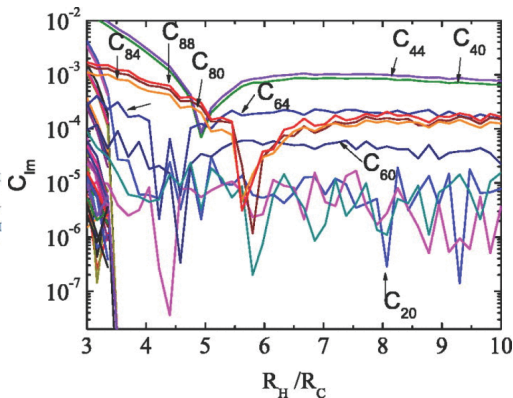
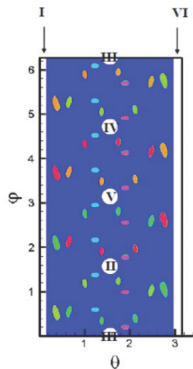
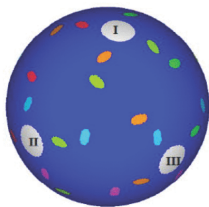
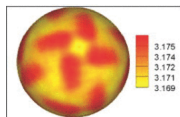
沉积效率与热

斑面密度

惯性约束聚变

若干关键参数

要求



为了改善腔靶辐射场的对称性，中国学者蓝可等人提出**六孔球腔靶**^a。

^a K. Lan et al., Phys. Plasmas **21**, 010704 (2014)

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

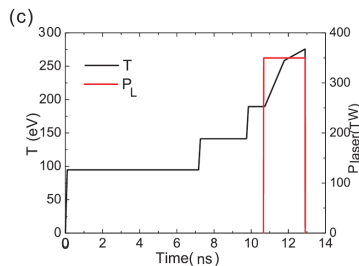
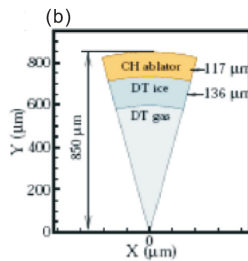
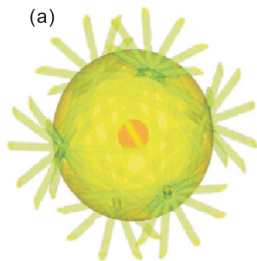
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

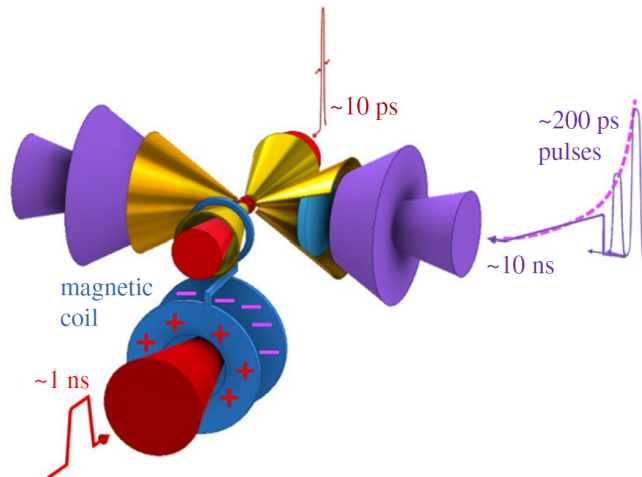
α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



为了提高热斑压强，中国学者贺贤士等人提出采用辐射场以及激光场共同内爆压缩燃料的方法实现聚变燃料的非等压点火，即**混合驱动非等压点火**方案。采用混合驱动，可有效降低流体力学不稳定性带来的风险^a

^a X. T. He et al, Phys. Plasmas **23**, 082706 (2016).



为了降低对激光驱动器的要求，张杰等人提出**双锥对撞点火方案**：采用金锥引导燃料压缩和对撞，使燃料达到高密度状态；再采用超热电子加热燃料，使之点火燃烧。该方案能够降低驱动器的能量输出需求，部分避开流体力学不稳定性带来的风险^a。

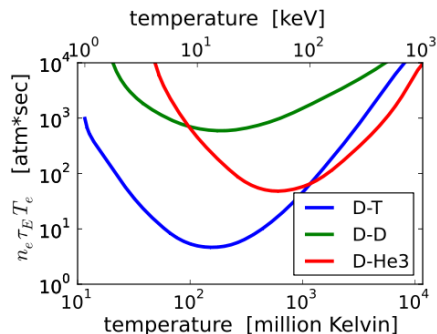
^a J. Zhang et al, Phil. Trans. R. Soc. A 378: 20200015 (2020).

聚变能够自持，需要达到劳逊判据。劳逊判据经常表示为密度、能量约束时间与燃料温度的三乘积，

$$n_e \tau_E T > \frac{12T^2}{E_\alpha \langle \sigma v \rangle_{DT}}. \quad (1)$$

对于 DT 燃料，三乘积的最小值出现在 $T = 14$ keV 附近。因此，

$$n_e \tau_E T > 3 \times 10^{21} \text{ keV s/m}^3. \quad (2)$$



DT 燃料的热压强为

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

三乘积形式的劳逊判据(1)可以改写为

聚变等离子体的热压强与能量约束时间

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

聚变反应速率系数

$$\langle \sigma v \rangle = \iint \sigma |\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2| F_1(\mathbf{v}_1) F_2(\mathbf{v}_2) d^3 v_1 d^3 v_2.$$

其中 $F_{1,2}$ 是聚变核子的速度分布函数。

当参加聚变反应的粒子满足麦克斯韦分布，聚变反应的速率系数 $\langle \sigma v \rangle$ 仅依赖于温度，并有如下形式的拟合公式^a，

$$\langle \sigma v \rangle = C_1 \zeta^{-5/6} \xi^2 \exp(-3\zeta^{1/3} \xi), \quad (4)$$

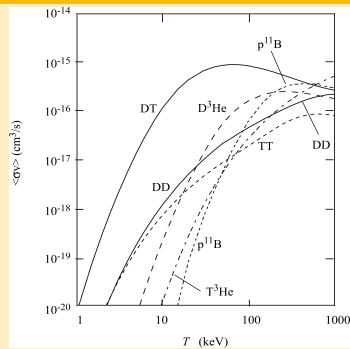
$$\xi = C_0 / T^{1/3},$$

$$\zeta = 1 - \frac{C_2 T + C_4 T^2 + C_6 T^3}{1 + C_3 T + C_5 T^2 + C_7 T^3},$$

这里温度的单位为 keV。

^a S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion* (Clarendon Press, Oxford, 2004)

速率系数与温度



若干聚变反应速率的拟合系数

Reaction		T(d, n) α	D(d, p)T	D(d, n) ^3He	^3He (d, p) α
Fit (eqn number)		1.62	1.62	1.62	1.62
C_0	keV $^{1/3}$	6.6610	6.2696	6.2696	10.572
$C_1 \times 10^{16}$	cm 3 /s	643.41	3.7212	3.5741	151.16
$C_2 \times 10^3$	keV $^{-1}$	15.136	3.4127	5.8577	6.4192
$C_3 \times 10^3$	keV $^{-1}$	75.189	1.9917	7.6822	-2.0290
$C_4 \times 10^3$	keV $^{-2}$	4.6064	0	0	-0.019108
$C_5 \times 10^3$	keV $^{-2}$	13.500	0.010506	-0.002964	0.13578
$C_6 \times 10^3$	keV $^{-3}$	-0.10675	0	0	0
$C_7 \times 10^3$	keV $^{-3}$	0.01366	0	0	0
T range	keV	0.2-100	0.2-100	0.2-100	0.5-190
Error		<0.25%	<0.35%	<0.3%	<2.5%

理想点火温度

在理想情况下，聚变产生的 α 粒子在燃料中完全沉积的能量 Q_{α}^{\max} 就足以抵消聚变燃料因轫致辐射而损失的能量 Q_b 。由不等式

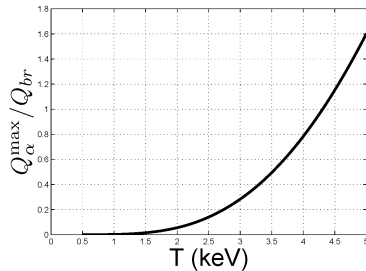
$$\frac{Q_{\alpha}^{\max}}{Q_b} > 1,$$

有

$$T \gtrsim 4.3 \text{ keV}. \quad (5)$$

若不对热斑燃料采用任何辐射保温措施，热斑燃料的温度不能低于 4.3 keV，这个温度也称**理想点火温度**。

α 粒子加热功率与轫致辐射损失功率的比值随温度的变化关系。



聚变温度要求

由于燃料还有其他损失途径，一般要求燃料温度超过 5 keV。

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与

惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

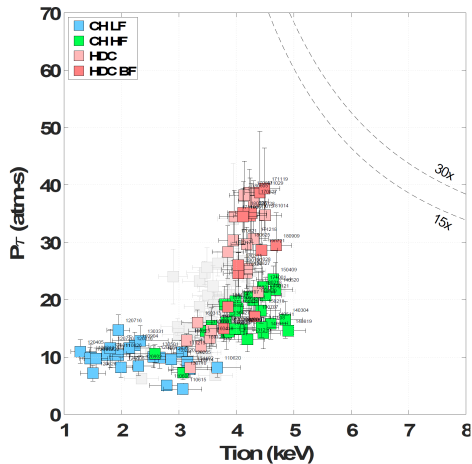
聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与增益

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求



惯性约束聚变实验中，燃料温度超过 5 keV 有相当难度。美国 NIF 上的点火实验，热斑中的燃料温度长期止步于 5 keV^a。

^a 摘自 Laser Indirect Drive input to NNSA 2020 Report (May 20, 2020).

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

$$\frac{dn}{dt} = \left(\frac{n_0}{2} - n \right)^2 \langle \sigma v \rangle, \quad (6)$$

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，

$$\frac{\phi}{1 - \phi} = \frac{n_0}{2} \tau_E \langle \sigma v \rangle. \quad (7)$$

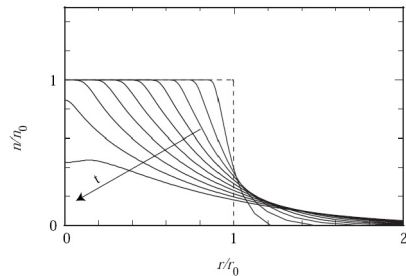
惯性约束与约束时间

燃料会由于热膨胀(稀疏波)而解体, 其特征时间为

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

其中 $c_s = (2T/2.5m_p)^{1/2}$ 是燃料的等温声速。假定稀疏的区域不再发生聚变, 由此有惯性约束的能量约束时间

$$\tau_E = \int_0^{\tau_c} (1 - c_s t / R_f)^3 dt = \frac{R_f}{4c_s}. \quad (8)$$



惯性约束聚变的特征时间尺度和燃料压强

燃料的半径为 $70 \mu\text{m}$, 温度为 10 keV , 那么燃料的解体时间近似为

$$\tau_c = 8.0 \times 10^{-11} \text{ s}.$$

惯约聚变的能量约束时间近似为

$$\tau_E = 2.0 \times 10^{-11} \text{ s}.$$

聚变燃烧的特征时间与 τ_E 相当, 约 10^{-11} s , 因此惯性约束聚变就是一次核爆炸。由方程(3), 惯性约束聚变的燃料压强很高

$$p_{ICF} > 2.4 \times 10^{11} \text{ bar}.$$

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(8) 代入方程(7), 燃烧效率可以表示为

$$\phi = \frac{\rho R_f}{\rho R_f + H_B}. \quad (9)$$

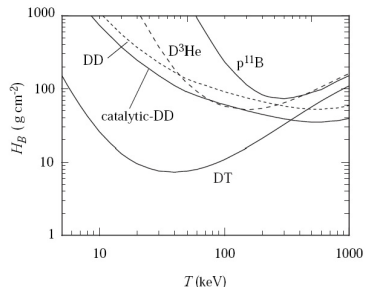
燃烧参数

H_B 称为燃烧参数, 是温度的函数

$$H_B(T) = \frac{20m_p c_s}{\langle \sigma v \rangle_{DT}} \quad (10)$$

燃烧参数 H_B 在 $T = 30 \text{ keV}$ 附近达到极小, 为

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



为了经济地利用聚变能源，必须使燃料充分燃烧，即 ϕ 尽量大。通常认为 30% 的燃烧效率是一个比较经济的指标，于是我们得到惯性约束聚变领域常用的劳逊判据，

惯性约束聚变的劳逊判据

为了获得 30% 的燃烧效率，燃料的面密度必须达到

$$\rho R_f = 3 \text{ g/cm}^2. \quad (11)$$

在 NIF 上，已经实现 $\rho R_f = 1.2 \text{ g/cm}^2$ 。

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 $n\tau_E$ ：

- 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。

给定燃烧效率 ϕ ，质量为 M 的燃料所释放的中子能量为 ^a

$$E_n[\text{MJ}] = 2.72 \times 10^5 \phi M,$$

一次所需的燃料质量与燃料的密度和面密度之间的关系为

$$M = 4\pi(\rho R_f)^3 / 3\rho^2.$$

因此给定燃烧效率 ϕ 时，聚变释放出的中子能量为

$$E_n(\text{MJ}) = 1.14 \times 10^6 \frac{(\rho R_f)^3 \phi}{\rho^2}, \quad (12)$$

其中 M 、 ρ 、 R_f 的单位分别为 g、g/cc、cm。利用燃烧效率与面密度的关系式(9)，聚变中子总能量为

$$E_n(\text{MJ}) = 3.91 \times 10^8 \frac{\phi^4}{(1 - \phi)^3 \rho^2}, \quad (13)$$

这里我们已经取 $H_B = 7 \text{ g/cm}^2$ 。

^a 在本课程中，聚变燃料默认为 1 : 1 的氘氚。氘氚聚变产生的中子能量为 14.1 MeV。

和平利用聚变能需要兼顾**经济性**与**可控性**，前者对燃烧效率 ϕ 提出要求，后者对燃料密度有限制。

- 采用未压缩燃料：保持 30% 的燃烧效率，且燃料密度为 $\rho = 0.225 \text{ g/cc}^a$ ，那么需要 2.24 kg 的燃料，释放的中子能量为 $1.82 \times 10^{14} \text{ J}$ ，释放的总聚变能为 $2.28 \times 10^{14} \text{ J}$ ，约合 5.45 万吨 TNT 当量^b；
- 采用高度压缩的燃料：保持 30% 的燃烧效率，将燃料密度压缩至 $\rho = 152 \text{ g/cc}$ ，那么需要 4.90 mg 的燃料，释放的中子能量为 400 MJ，总聚变能为 500 MJ，相当于 120 kg 的 TNT 当量，在实验室条件下可安全地吸收和转化。

受控聚变与燃料密度

保持燃烧效率不变，提高燃料密度可以减少每次聚变所投放的燃料质量，降低每次聚变所释放的能量，从而达到和平利用聚变能源的目的。

^a 氘冰的质量密度。

^b 1 kg TNT 当量 = 4.184 MJ。

^b 在 NIF 上的间接驱动实验中, 激光器与聚变燃料之间的能量耦合效率仅有 1% 左右。

点火

- 一对氘氘粒子聚变可释放能量为 3.52 MeV 的 α 粒子；平均而言，聚变产生的 α 粒子通过库伦散射，可将 50 对氘氘粒子和 100 个电子的能量由 0 提高至 17.6 keV，等效温度为 11.7 keV，从而使更多的燃料发生聚变； \rightarrow 点火燃料的质量可以仅为总燃料的 1/50；
- 先将小部分(2%)燃料加热至聚变反应显著发生的温度(高于 5 keV)，利用聚变反应释放的 α 粒子加热剩余的冷燃料至聚变温度，释放更多的聚变能，获得能量增益；

惯性约束聚变**点火**的概念要求将聚变燃料分成状态参数不同的两个部分：少部分能够发生剧烈燃烧的高温**热斑** (hot spot)，提供燃料发生聚变的火花；大部分处于低温高密度状态的**主燃料** (main fuel)，提供惯性约束时间以及聚变能量增益。

将 4.90 mg 燃料中的 0.1mg 加热至 5 keV，将 4.8 mg 燃料近绝热地压缩至 152 g/cm^3 的高密度，那么加热以及压缩燃料的总能量为

$$E = 57.9 + 44.7 = 103 \text{ (kJ)}.$$

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。

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_{hs} (μm)	36.6	35.5	34.4–42.3	35.7–36.0	32.2
$(\rho\rho)_{\text{hs}}$ (g cm^{-2})	0.12–0.15	0.12–0.18	0.13–0.19	0.1–0.14	0.15
E_{hs} (kJ)	3.9–4.4	3.5–4.2	3.7–5.5	3.71–4.56	4.1
E_n (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 上的点火实验表明, 间接驱动方案的激光-燃料能量耦合效率不到 1%, 与热斑的能量耦合效率不到 0.3%^a。

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。

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

物质的密度是压强和熵的函数 $\rho = \rho(p, s)$ 。以经典理想气体为例，假定气体的比热是个常数，那么单位质量理想气体的熵为

$$s = -\frac{1}{m} \ln p + \frac{c_p}{m} \ln T + \frac{1}{m} (c_p + \xi), \quad (14)$$

这里 c_p 是气体的等压比热， m 是气体分子质量， ξ 是一个与气体性质有关的常数。另一方面，经典理想气体的状态方程为，

$$p = nT = \frac{\rho T}{m}, \quad (15)$$

这里 n 是分子的数密度。由方程(14)和(15)，有

$$p\rho^{-\gamma} = \text{常数} \times e^{ms/(c_p-1)}.$$

或者

$$\frac{\rho(p, s)}{\rho(p_0, s_0)} = (p/p_0)^{1/\gamma} e^{-m(s-s_0)/c_p} \quad (16)$$

其中 $\gamma = c_p/(c_p - 1) = c_p/c_v$ 是等压比热与等容比热之比。

要把燃料压缩到高密度，不仅需要提高燃料的压强，还需要控制燃料的熵增 $\Delta s = m(s - s_0)$ 。

燃料在压缩过程中会因为各种不可逆热力学过程而出现熵增，如激波加热、超热电子加热、硬x射线加热，这些过程会导致燃料的熵增加，

$$\Delta s = \frac{\Delta Q}{T},$$

这里 ΔQ 是燃料获得的热量。

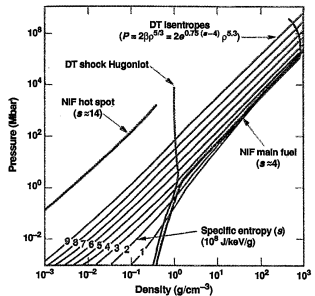
绝热因子

燃料内部的实际压强与费米压强 p_F 的比值称为绝热因子(adiabatic index),
$$\alpha = \frac{p}{p_F}.$$
(17)

绝热因子是熵的函数

$$\alpha = e^{0.75(\Delta s - 4)}.$$
(18)

当熵增 $\Delta s < 4$ 时，在 10^4 Mbar 的压强下，DT 燃料密度基本相同。因此，为了实现主燃料的高密度压缩，需要将主燃料的熵增控制在 $\Delta s < 4$ 。



DT 燃料的状态方程

为燃料聚变提供“火花”的热斑，需要 α 首先在其中有效沉积能量，才可能维持聚变所需要的高温。 α 粒子在热斑中运动时，优先将能量传递给电子，这是因为聚变产生的 α 粒子的速度大小与电子热速度接近，而远远大于 DT 粒子的热速度。在计算 α 粒子的平均自由程时，可只考虑 α 粒子与电子之间的库伦碰撞，

$$\lambda_{\alpha} \approx 0.107 \frac{T_{\text{keV}}^{3/2}}{\rho \ln \Lambda_{\alpha e}} [\text{cm}], \quad (19)$$

其中 $\ln \Lambda_{\alpha e}$ 是 α 粒子与热电子碰撞的库伦对数，

$$\ln \Lambda_{\alpha e} \approx \ln \Lambda.$$

这里 $\ln \Lambda$ 是热斑燃料的库伦对数。

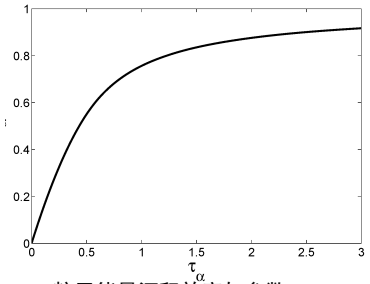
α 粒子的能量沉积效率 f_{α} 可表示为分段函数，

$$f_{\alpha} = \begin{cases} \frac{3}{2} \tau_{\alpha} - \frac{4}{5} \tau_{\alpha}^2, & \tau_{\alpha} \leq \frac{1}{2} \\ 1 - \frac{1}{4 \tau_{\alpha}} + \frac{1}{160 \tau_{\alpha}^3}, & \tau_{\alpha} > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$\tau_{\alpha} = \frac{r}{\lambda_{\alpha}} \approx 9 \ln \Lambda_{\alpha e} \frac{\rho r}{T_{\text{keV}}^{3/2}}.$$

热斑燃料必须有一定的面密度才能保证 α 粒子有效地沉积能量。



α 粒子能量沉积效率与参数 τ_{α} 。

提要

惯性约束聚变研究简史

引言

惯性约束聚变起源

激光聚变早期历史

NIF 点火之路

中国惯性约束聚变研究简史

劳逊判据与惯性约束

劳逊判据

惯性约束

惯性约束聚变的基本参数

聚变可控与燃料密度

驱动能量与点火

高密度压缩与熵增

α 粒子的能量沉积效率与热斑面密度

惯性约束聚变若干关键参数要求

特征参数下 α 粒子的平均自由程、 τ_α 以及能量沉积率

$T(\text{keV})$	4	5	6	7	8	9	10
$\rho(\text{g/cc})$	60	60	60	60	60	60	60
$\rho r(\text{g/cm}^2)$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$\lambda_\alpha(10^{-3}\text{cm})$	2.0	2.8	3.7	4.7	5.8	6.9	8.1
τ_α	2.4	1.7	1.3	1.0	0.84	0.70	0.60
f_α	0.90	0.85	0.81	0.77	0.71	0.66	0.61

热斑面密度

通常要求热斑燃料的面密度要高于 0.3 g/cm^2 .

参数名称	参数条件	制约因素
主燃料面密度(ρr)	3 g/cm ²	经济性要求燃烧效率达到 30%
主燃料密度(ρ/ρ_0)	10 ³	聚变可控对装药量的限制
主燃料熵增(Δs)	< 4	主燃料达到高密度
热斑燃料质量(m_h/m)	0.02-0.1	驱动器的能量限制
热斑燃料温度(T_h)	5 keV	热斑燃料发生显著聚变
热斑面密度($\rho r)_h$	0.3 g/cm ²	α 粒子在热斑充分沉积能量

TABLE I. Experimental parameters.

NIF shot	N210207	N210307	N210808	N220919	N221204
P_{laser} (TW)	470	487	441	440	440
E_{laser} (MJ)	1.93	1.91	1.89	2.05	2.05
Drive T_{rad} (eV)	304	306	307 ^a	313	313
t_{coast} (ns)	1.09	1.26	0.93	0.89	0.78
Y_{total} (MJ)	0.17 ± 0.01	0.14 ± 0.01	1.3 ± 0.07	1.2 ± 0.06	3.1 ± 0.16
T_{DT} (keV)	5.66 ± 0.13	5.55 ± 0.11	10.9 ± 0.4	10.1 ± 0.2	13.1 ± 0.7
T_{DD} (keV)	5.23 ± 0.16	4.87 ± 0.14	8.94 ± 0.4	8.7 ± 0.2	12 ± 1
DSR (%)	3.02 ± 0.16	3.39 ± 0.14	2.72 ± 0.24	3.06 ± 0.14	2.83 ± 0.17
V ($10^5 \mu\text{m}^3$)	3.3 ± 0.3	2.7 ± 0.3	6.4 ± 0.75	6.7 ± 0.9	12.9 ± 1.5
t_{BW} (ps)	137 ± 25	138 ± 20	89 ± 15	92 ± 20	75 ± 15
p_{HS} (Gbar)	304^{+39}_{-30}	323^{+33}_{-28}	561^{+61}_{-53}	518^{+76}_{-59}	608^{+56}_{-59}
E_{HS} (kJ)	$15.1^{+1.9}_{-1.5}$	$13.5^{+1.3}_{-1.1}$	54^{+6}_{-5}	53^{+8}_{-6}	118^{+14}_{-12}
$(\rho R)_{\text{HS}}$ (g/cm ²)	$0.32^{+0.05}_{-0.04}$	$0.35^{+0.04}_{-0.03}$	$0.44^{+0.05}_{-0.04}$	$0.42^{+0.06}_{-0.04}$	$0.44^{+0.06}_{-0.05}$
Burn-up fraction (%)	0.24	0.20	1.77	1.60	4.33
G_{fuel}	$9.8^{+0.6}_{-0.9}$	$8.1^{+0.5}_{-0.7}$	$73.4^{+4.2}_{-6.6}$	$65.8^{+3.8}_{-5.8}$	$172.8^{+10.1}_{-15.3}$
G_{capsule}	0.75 ± 0.05	0.69 ± 0.05	5.8	~ 5	12
G_{target}	0.09	0.07	0.7	0.57	1.5
GLC_H	0.32–0.36	0.18–0.22	2.8	2.5	3.7
ITFX_α^b	1.8 ± 0.2	1.9 ± 0.2	11 ± 2.2	12.6 ± 1.3	28.2 ± 3.7

NIF 点火发次的靶丸状态测量值^a。

^a H. Abu-Shawareb et al., Phys. Rev. Lett. **132**, 065102 (2024).