



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

等离子体物理及磁约束聚变简介

2014年12月2日

郑 坚

物理学院近代物理系

1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

3

等离子体物理的应用

4

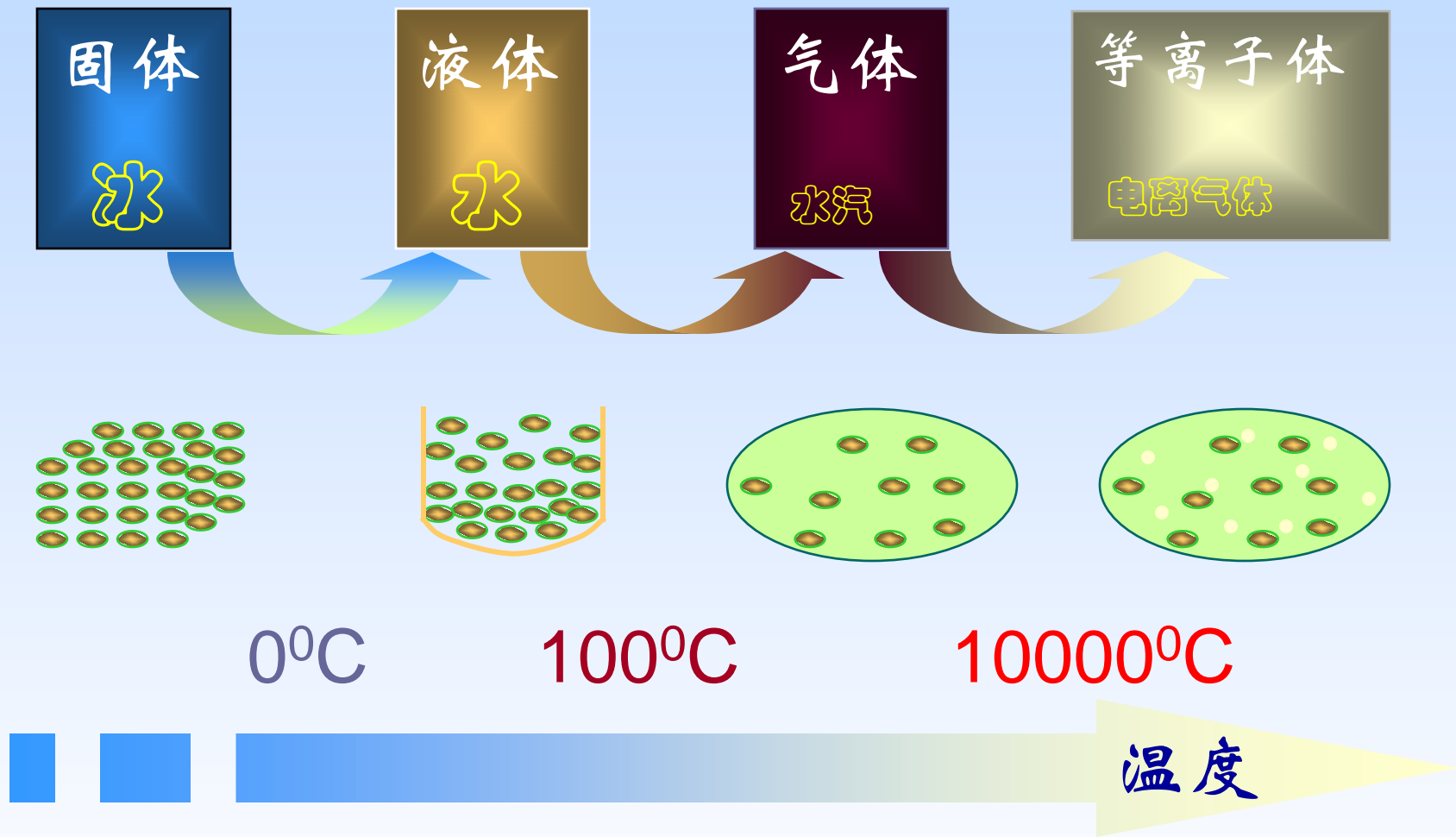
磁约束聚变简介

- 1 等离子体的定义与分类
- 2 等离子体物理发展简史
- 3 等离子体物理的应用
- 4 磁约束聚变简介

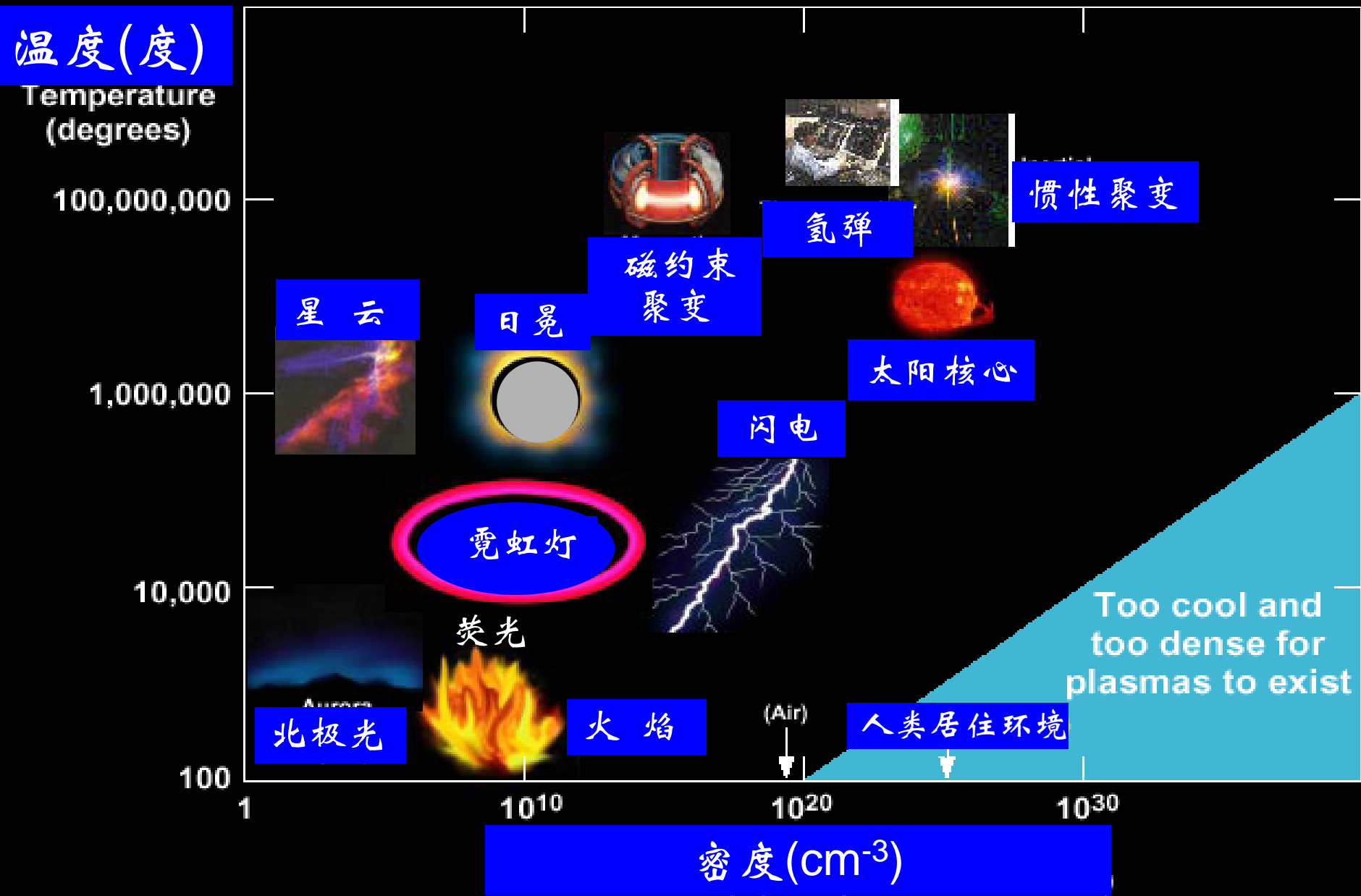
等离子体的定义

- 由大量的自由带电粒子组成的宏观体系
 - 电荷的自由性：异类带电粒子之间相互“自由”，等离子体的基本粒子元是正负电荷的粒子（电子、离子），而不是其结合体。
 - 电荷与电磁场的不可分割性：等离子体中粒子的运动与电磁场（外场及粒子产生的自洽场）的运动紧密耦合，不可分割。
 - 集体效应起主导作用：等离子体中相互作用的电磁力是长程的，每个粒子均与周围许多粒子同时发生作用。

等离子体是物质的第四态



宇宙中充满了等离子体



等离子体的分类

极光、日光灯

电弧、碘钨灯

冷等离子体

$$T_e \neq T_i, T_a$$

热等离子体

$$T_e = T_i, T_a$$

■ 热：热平衡

■ 冷：非热平衡

低温
等离子体

高温
等离子体

聚变、太阳核心

10000⁰C

电子温度

1eV



1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

3

等离子体物理的应用

4

磁约束聚变简介

等离子体科学发展简史

- 19世纪30年代起
 - 放电管中电离气体，现象认识
 - 建立等离子体物理基本理论框架
- 20世纪50年代起
 - 受控热核聚变
 - 空间技术
 - 等离子体物理成为独立的分支学科
- 20世纪80年代起
 - 气体放电和电弧技术发展应用
 - 低温等离子体物理发展

等离子体物理发展的里程碑(I)

- 1835年，法拉第（M. Faraday），气体放电基本现象，发现辉光放电管中发光亮与暗的特征区域
- 1879年，克鲁克斯（W. Crookes），用“物质第四态”来描述气体放电产生的电离气体
- 1902年，克尼理（A. E. Kennelly）和赫维塞德（O. Heaviside），电离层假设，解释短波无线电在天空反射的现象
- 1923年，德拜（P. Debye），等离子体屏蔽概念
- 1925年，阿普勒顿（E. V. Appleton），电磁波在电离层中传播理论，并划分电离层
- 1928年，朗缪尔（I. Langmuir），等离子体集体振荡等重要概念
- 1929年，朗缪尔与汤克斯（L. Tonks）首次提出“Plasma”一词

等离子体物理发展的里程碑(II)

- 1937年，阿尔芬（H. Alfvén），等离子体与磁场的相互作用在空间和天文物理学中起重要作用
- 1946年，朗道（L. Landau）理论预言等离子体中存在无碰撞阻尼，即朗道阻尼
- 1952年，美国受控热核聚变的“Sherwood”计划开始，英国、法国、苏联也开展了相应的计划
- 1958年，人们发现等离子体物理是受控热核聚变研究的关键，开展广泛的国际合作
- 1950-1980年代，受控热核聚变研究和空间等离子体的研究使现代等离子体物理学建立起来
- 1980年起，低温等离子体的广泛应用使等离子体物理与科学达到新的高潮

等离子体物理及应用领域研究热点

- 等离子体相关的生物技术
 - 生物相容聚合物、灭菌、等离子体辅助手术
- 等离子体相关的工业技术
 - 等离子体刻蚀、表面处理、特殊材料
- 等离子体粒子加速器
 - 10GeV/10cm
- 磁约束燃烧聚变等离子体
 - ITER
- 磁场重联及自组织
 - 空间等离子体
- 弹丸聚变点火
 - NIF, 惯性约束聚变
-

等离子体离我们并不遥远

- 19 等离子体处理的保鲜膜
- 20 等离子体溅射太阳膜
- 21 等离子体荧光灯

- 01 等离子体电视
- 02 等离子体镀涡轮扇叶
- 03 等离子体造平面LED
- 04 等离子体CVD类金刚石镀膜眼镜
- 05 等离子体离子注入人工髋骨
- 06 等离子体激光切割衣服



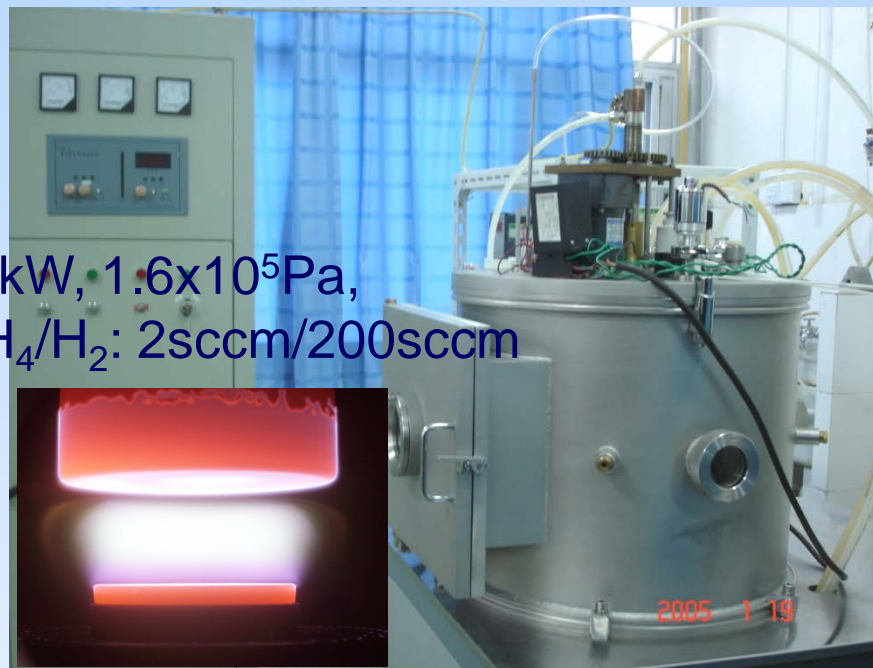
- 07 等离子体HID大灯
- 08 等离子体生产氢燃料
- 09 等离子体辅助燃烧
- 10 等离子体尾气处理器
- 11 等离子体臭氧水净化器
- 12 等离子体淀积LCD显示屏

- 13 等离子体淀积硅太阳能电池
- 14 等离子体加工微电子器件
- 15 等离子体制药过程中的灭菌
- 16 等离子体处理的聚合物
- 17 等离子体处理的纺织品
- 18 等离子体处理的肝脏起搏器

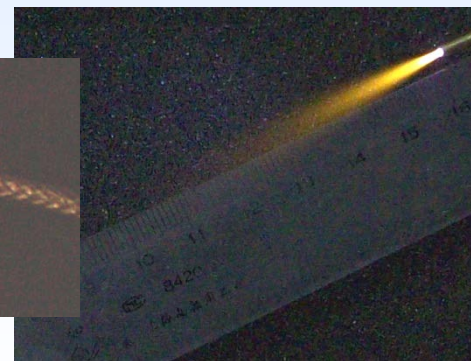
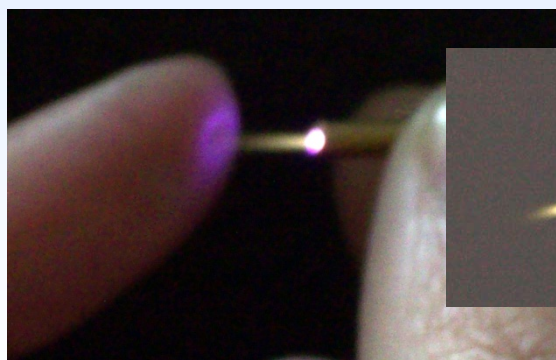
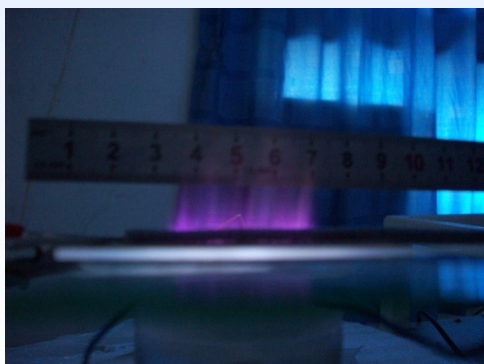
低温等离子体装置



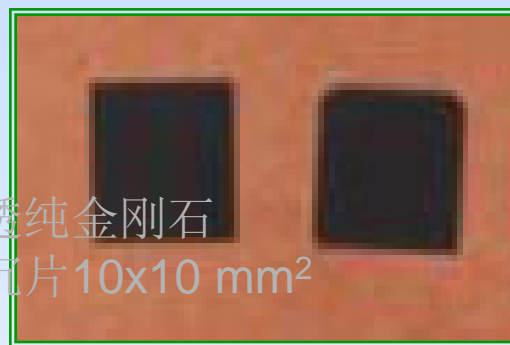
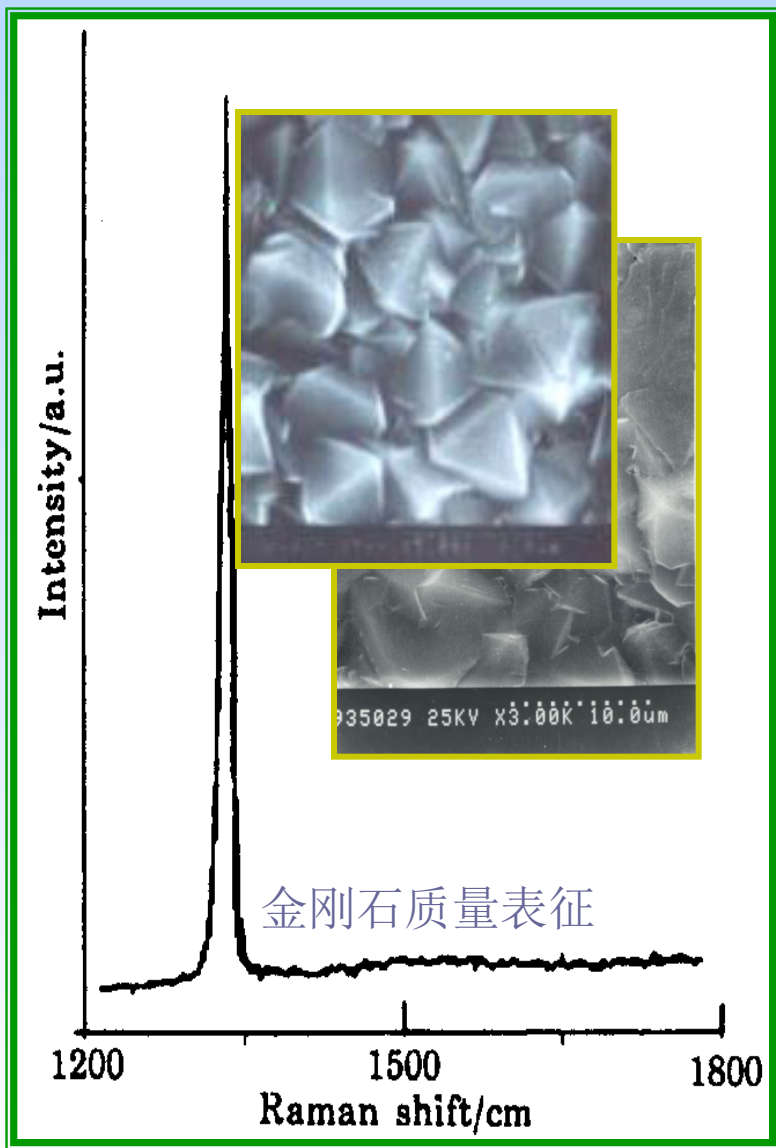
12kW, 1.6×10^5 Pa,
CH₄/H₂: 2sccm/200sccm



微波ECR装置、大功率高气压脉冲直流放电装置、大气压等离子体射流



利用低温等离子体生长金刚石材料



应用等离子体化学气相沉积方法开展可生长金刚石薄膜等材料。金刚石膜加工成金刚石电子热沉片，热导率高达7.6W/(k·cm)，可用于大功率电子器件。

热等离子体的应用

- ✍ 热平衡等离子体，电子、离子、原子同样的温度，热量大
- ✍ 通常是高压（1个大气压左右或更高的气压）
- ✍ 电弧、等离子体炬

- **高温加热**

- 冶金、焊接、切割

- **材料合成、加工**

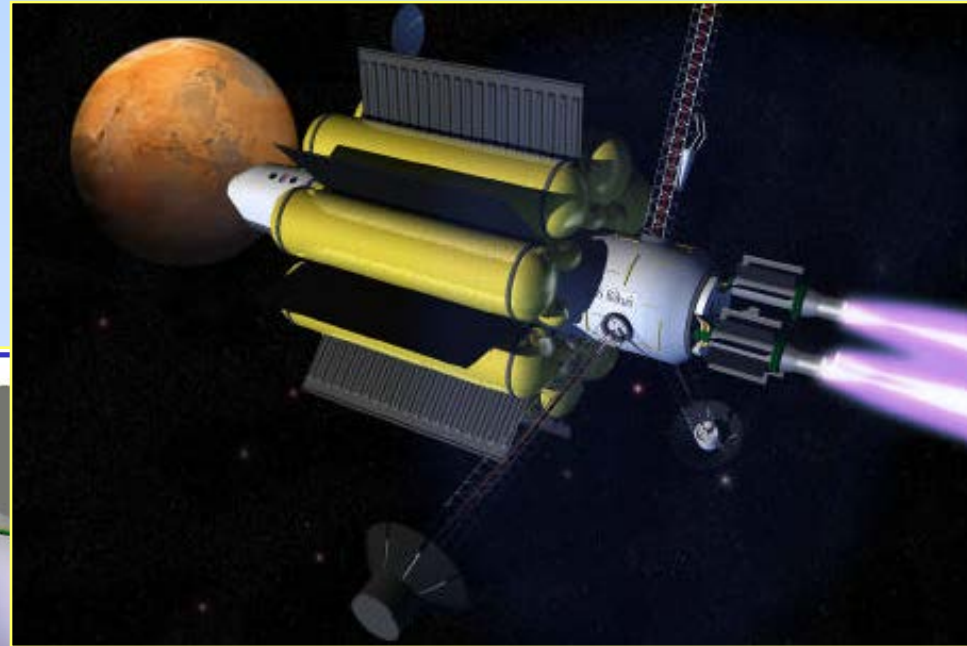
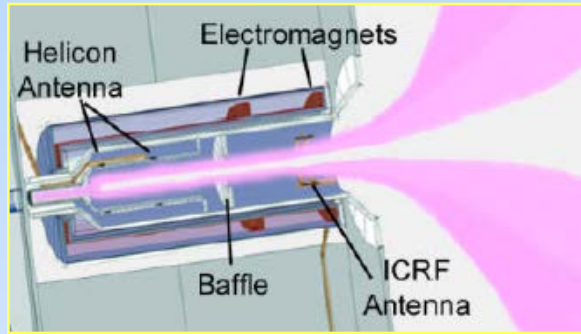
- 陶瓷烧结、喷涂、三废处理

- **光源**

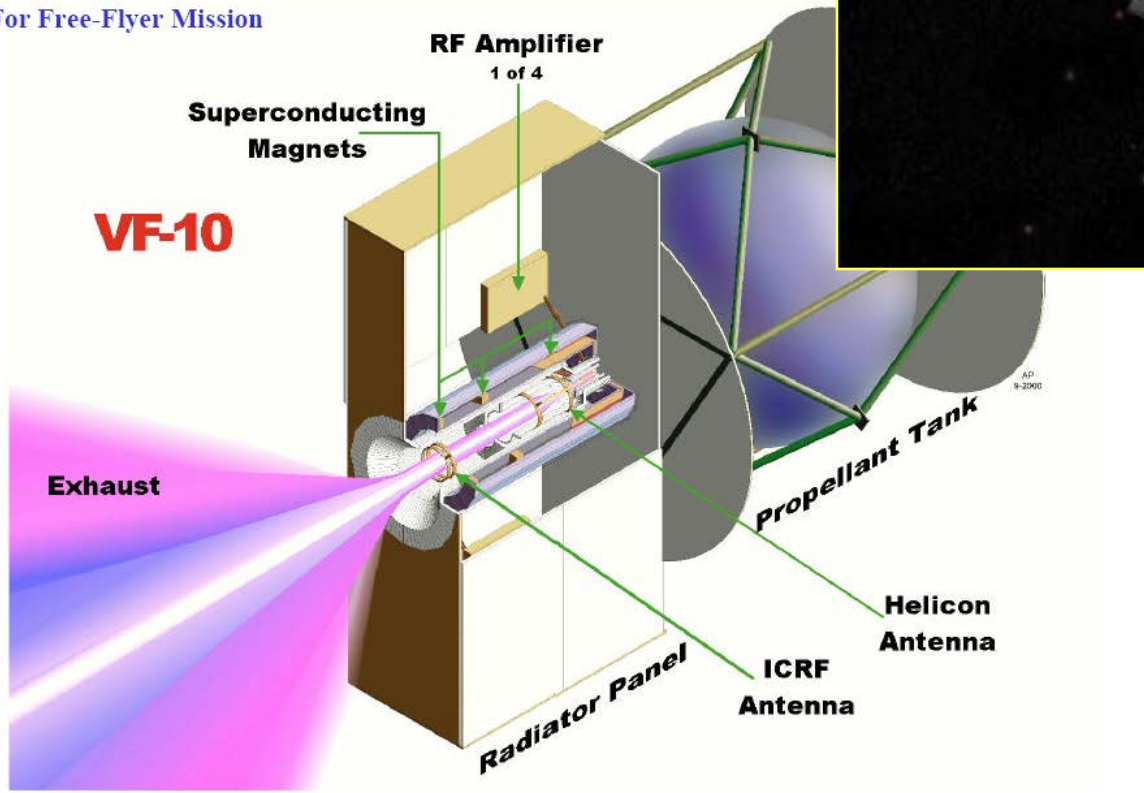
- 强光源（近黑体连续辐射）



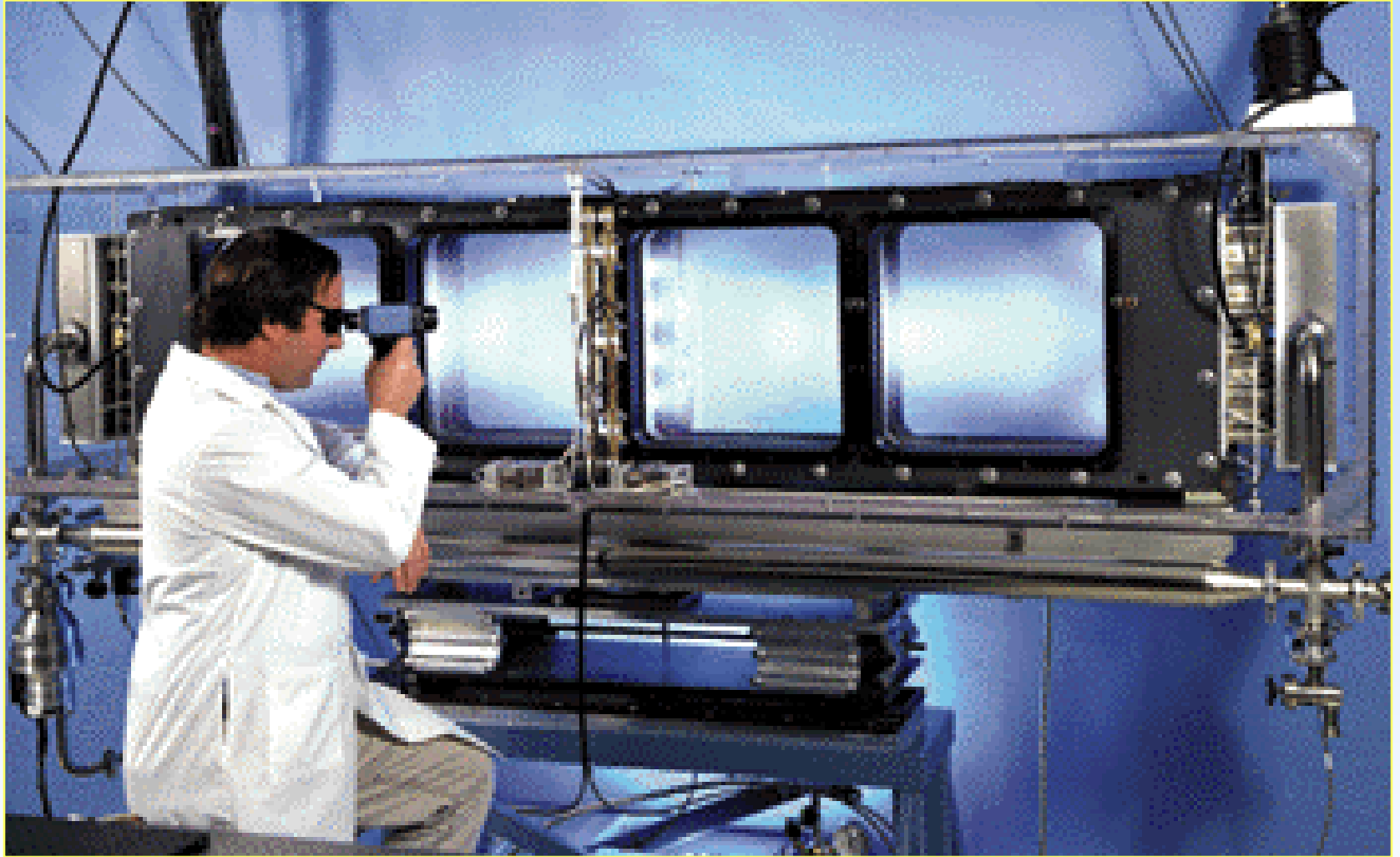
等离子体推进技术



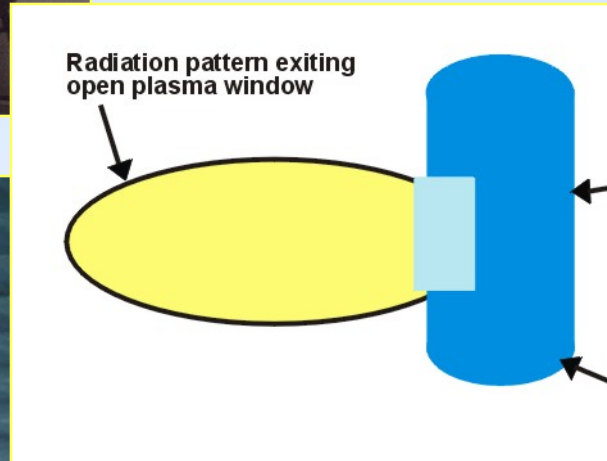
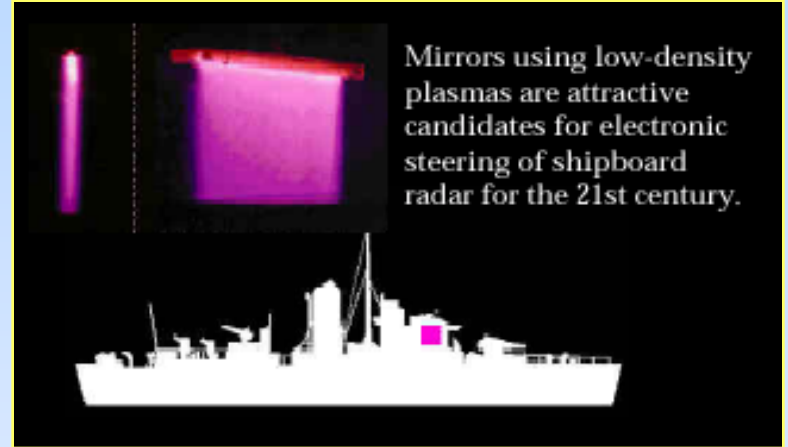
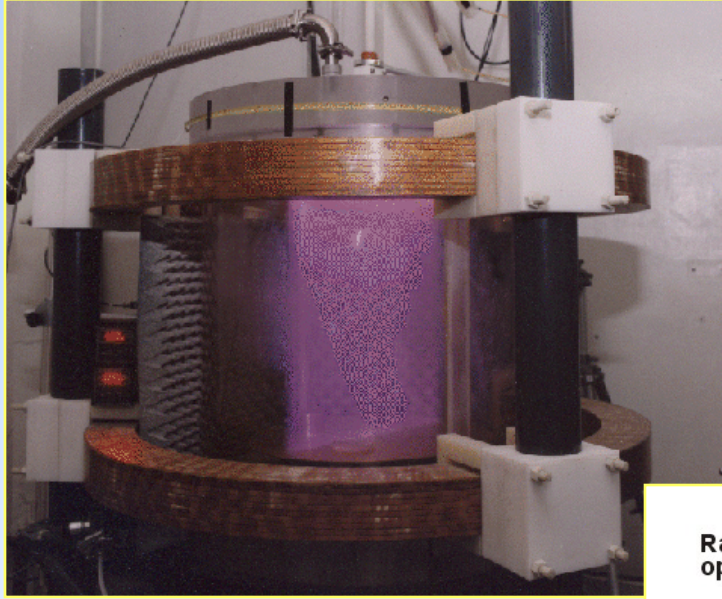
For Free-Flyer Mission



大口径等离子体光学开关



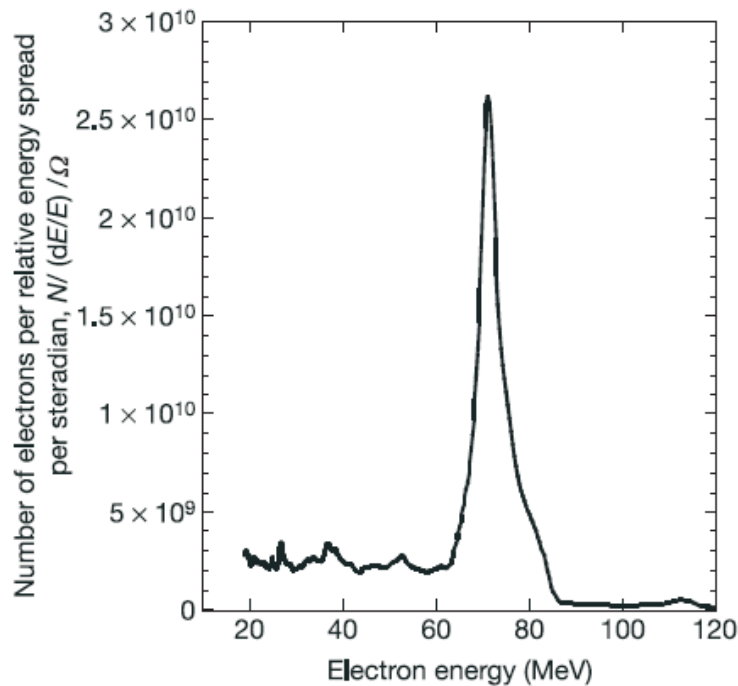
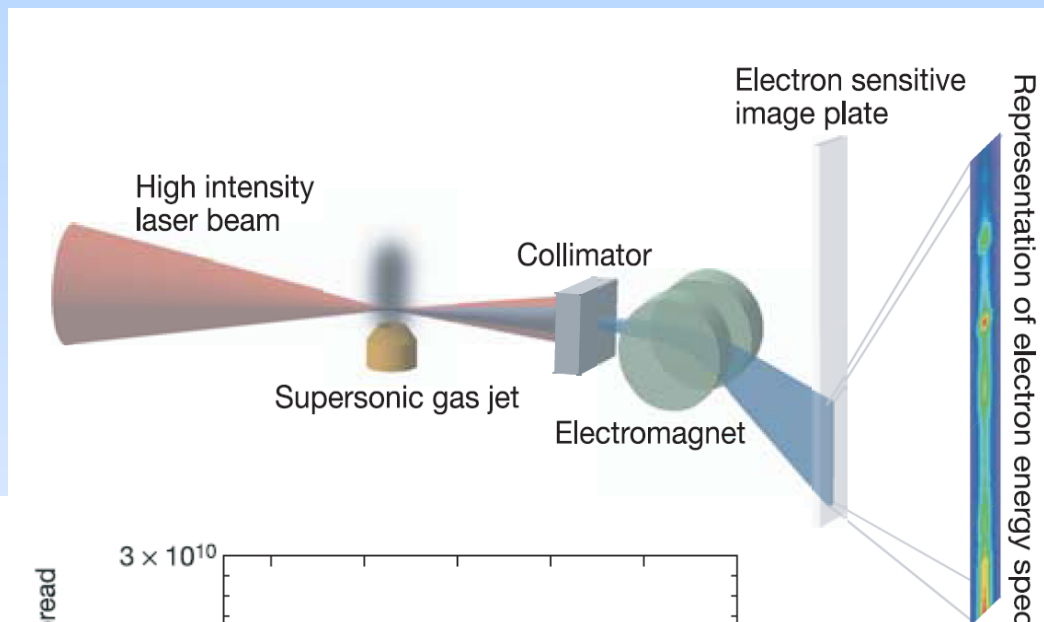
等离子体天线



激光等离子体加速器

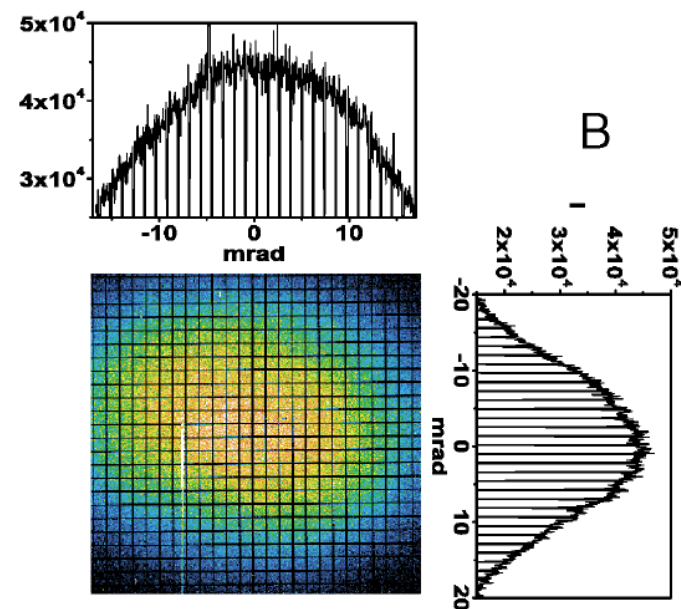
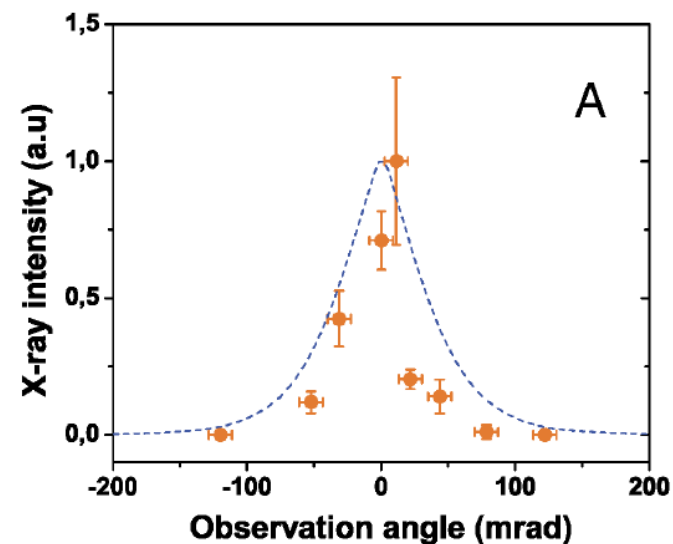
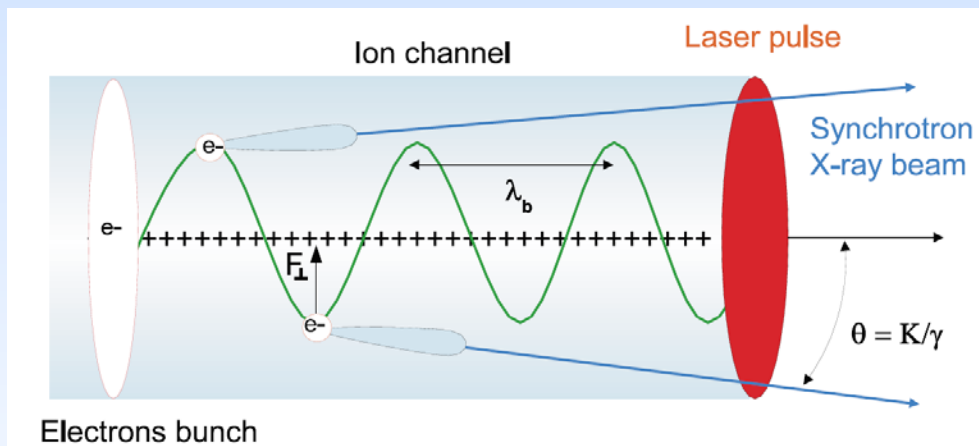


2004年在激光等离子体加速方面取得重要进展



激光等离子体同步辐射

激光脉冲加速电子的同时，可产生高质量同步辐射



1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

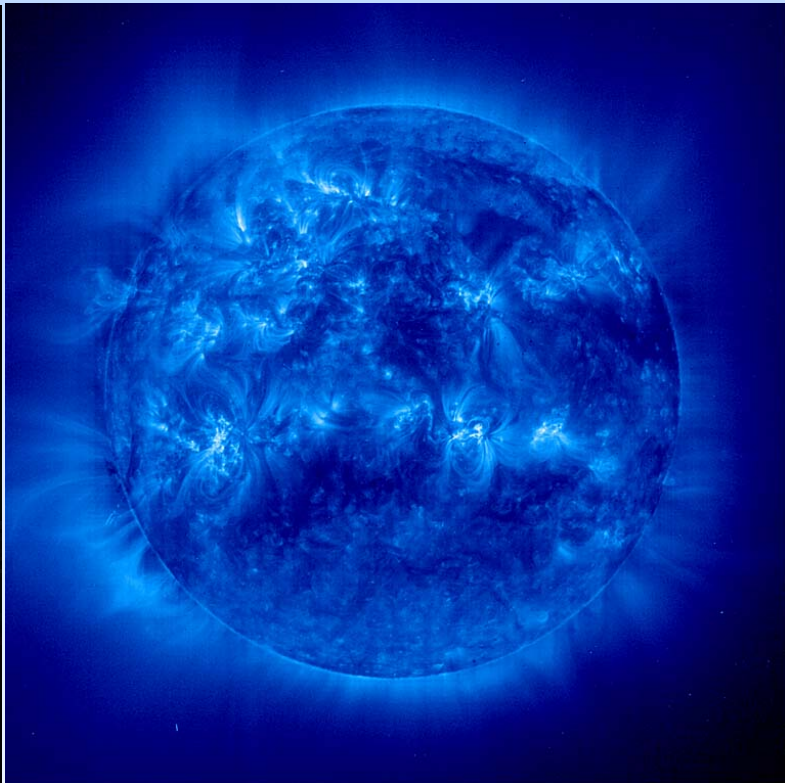
3

等离子体物理的应用

4

磁约束聚变简介

聚变是宇宙中的常见现象



宇宙中可见物质的主要能量来源是聚变。

人类也早已实现聚变



人类已经实现聚变，却不是用于造福人类而是相互威胁与恐吓！

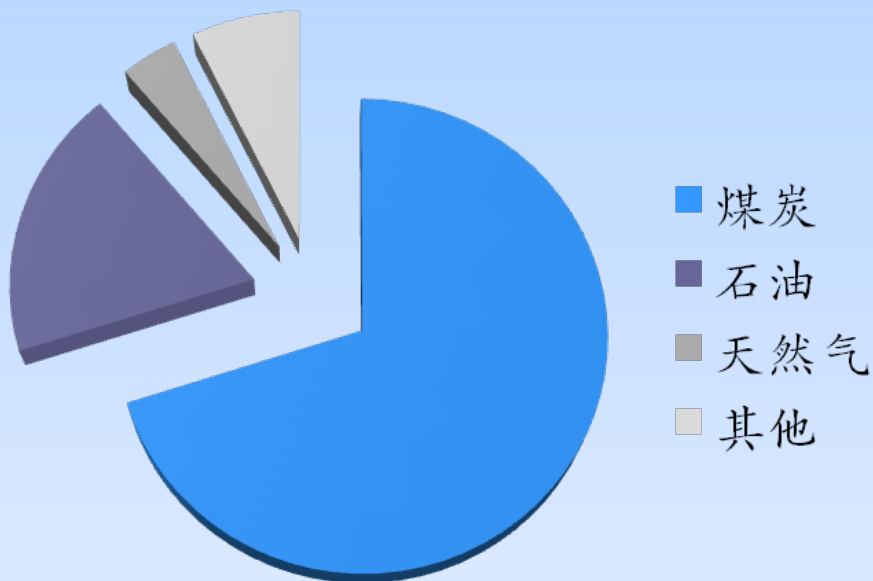
Producing a self-sustaining fusion-heated plasma is a grand challenge

USBPO



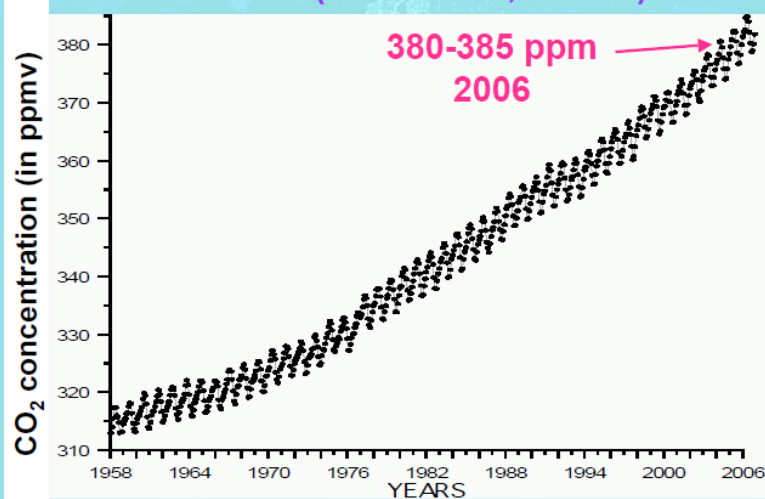
- 1928** Fusion reactions explain energy radiated by stars [Atkinson & Houtermans]
 - 1932** Fusion reactions discovered in laboratory [Oliphant]
 - 1935** Fusion reactions understood as Coulomb barrier tunneling [Gamow]
 - 1939** Theory of fusion power cycle for stars [Bethe–Nobel Prize 1967]
 - 1950** Use of fusion for military objective
 - 1950's** Invention of tokamak, helical system, mirror, etc.
 - 1958** 2nd UN Atoms for Peace Conference (Geneva): magnetic fusion research was de-classified
 - 1968** Russian results on high-temperature plasmas presented at IAEA Fusion Energy Conference
- Since then:** Worldwide explosion in toroidal plasma research, leading to the attainment of fusion-grade plasma parameters

开发聚变能源的紧迫性



DAILY FUEL CONSUMPTION DAILY WASTE PRODUCTION 1,000 MEGAWATTS		
	COAL PLANT	D-T FUSION PLANT
FUEL	9,000 T. COAL	1.0 LB D ₂ 3.0 LB Li ⁶ (1.5 LB T ₂)
WASTE	30,000 T. CO ₂ 600 T. SO ₂ 80 T. NO ₂	4.0 LB He ⁴

Latest Observations of the atmospheric CO₂ concentration (Mauna Loa, Hawaii)



In 200 years an increase of 33%.....

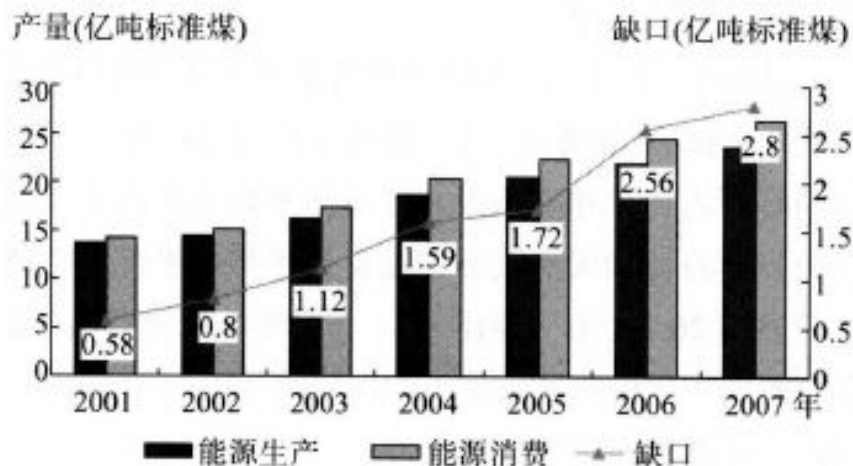


图1 2001~2007年中国一次能源生产和消费

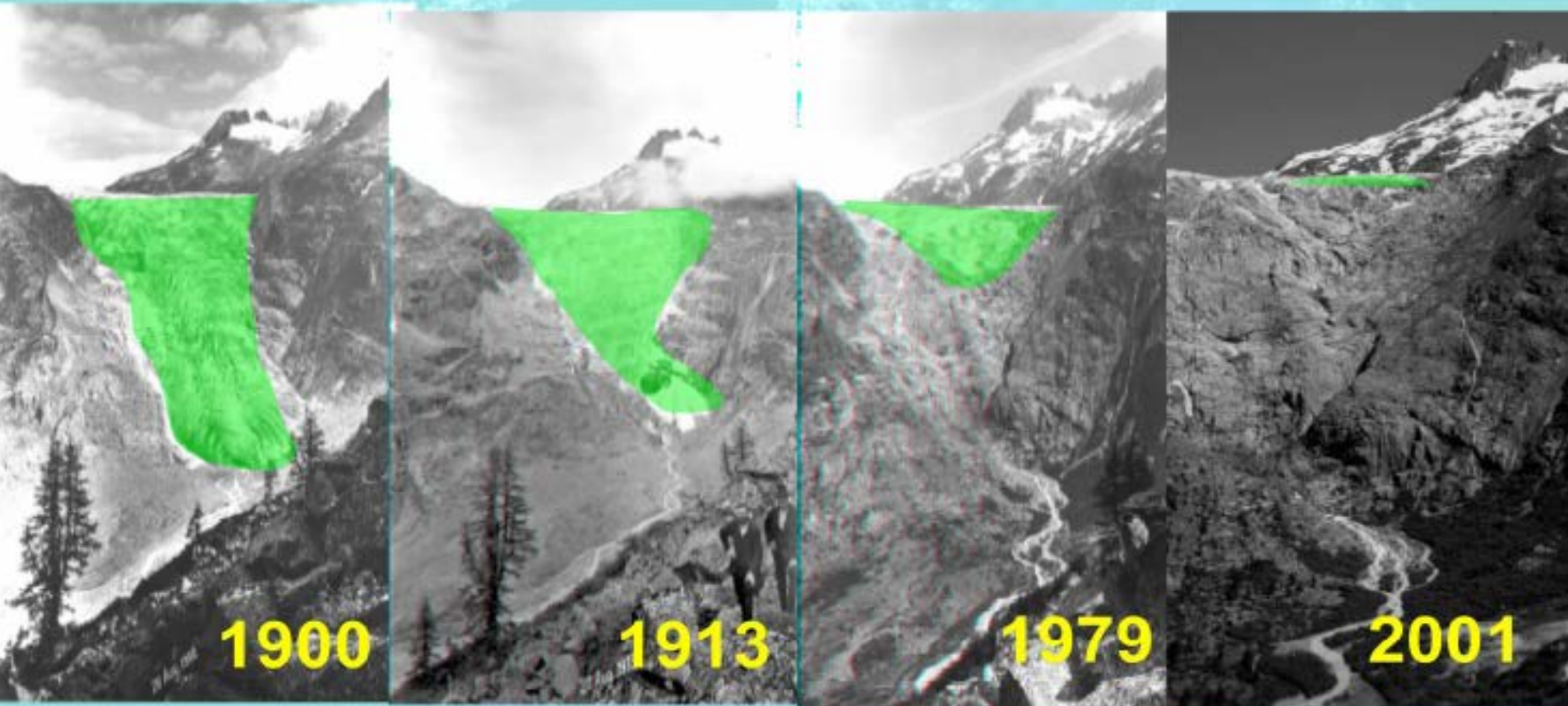
(数据来源:中国统计年鉴2007)

开发聚变能源的紧迫性

Climate Change

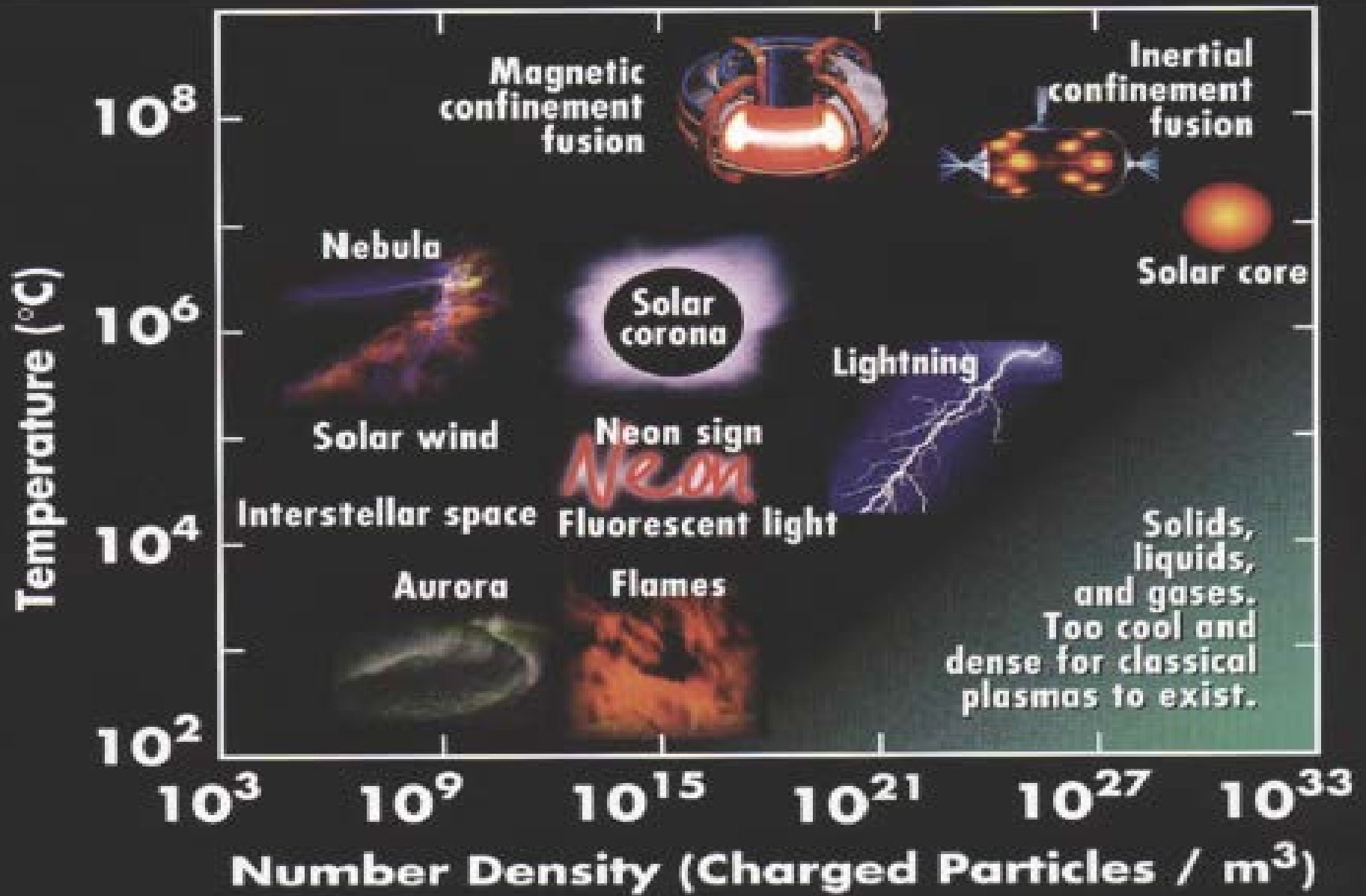
Effects are visible now !

1. Rhone Glacier in Switzerland



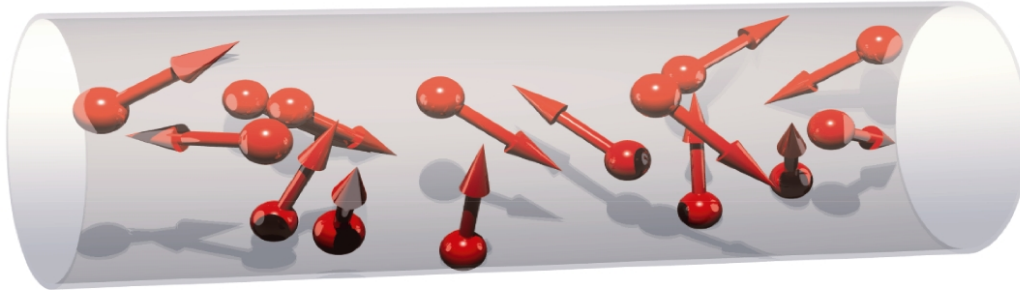
.... it is melting away

等离子体物理是聚变的学科基础

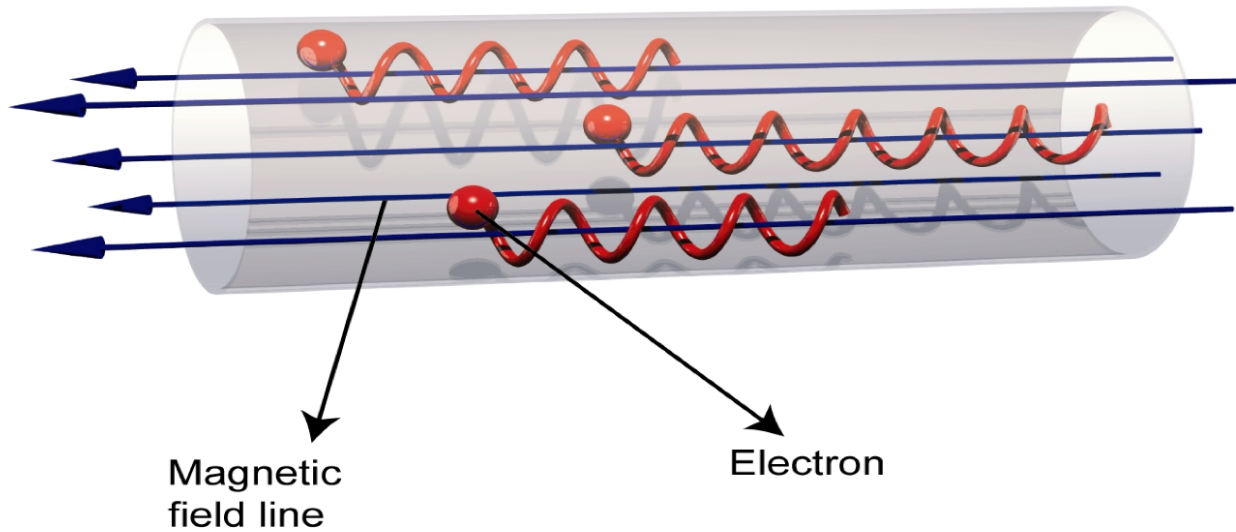


磁约束聚变的基本原理

No magnetic field

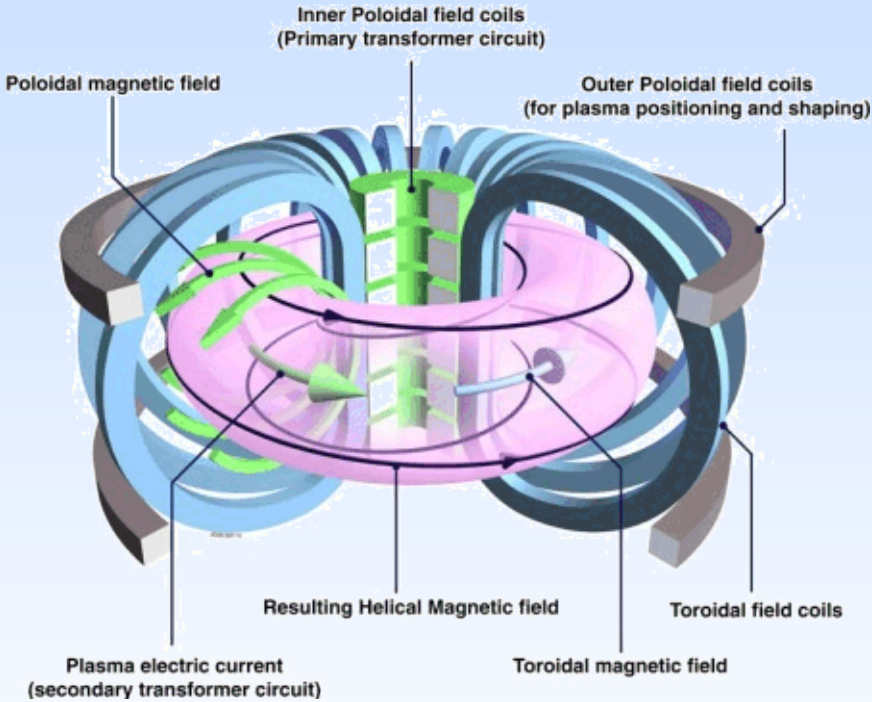
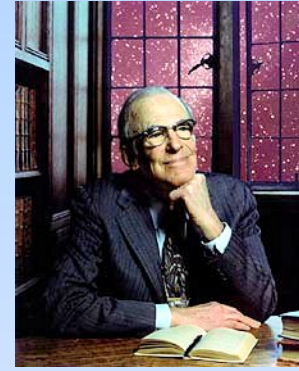


With magnetic field

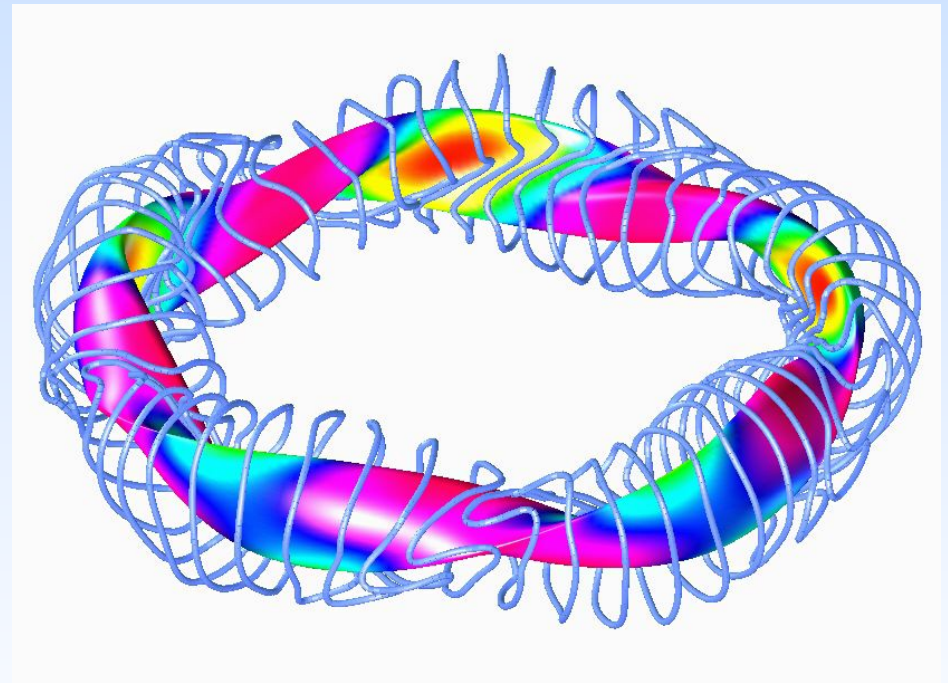


强磁场将能够电荷的运动限制在磁场方向。

封闭的磁场位形可长时间约束等离子体

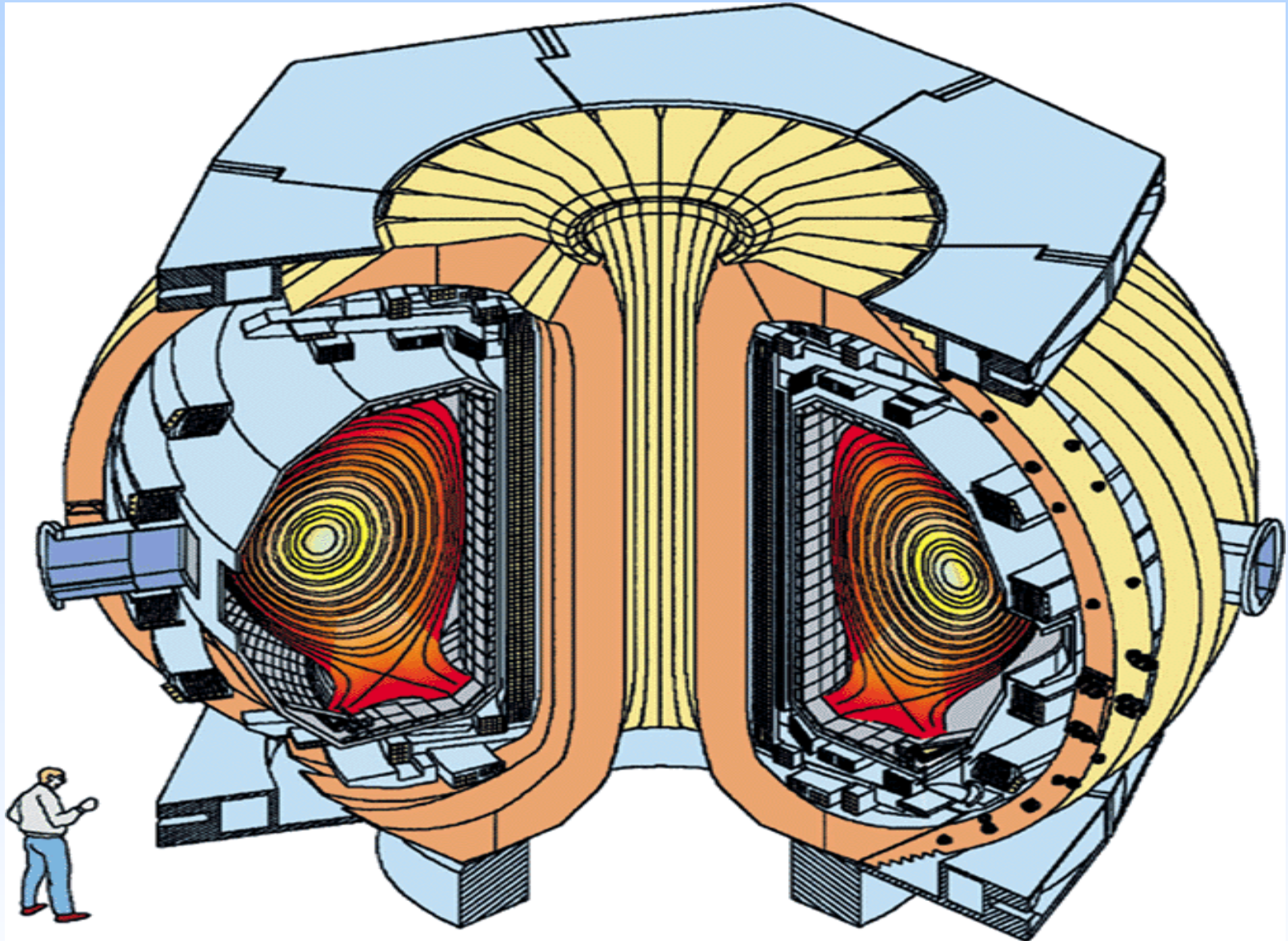


托卡马克磁场位形



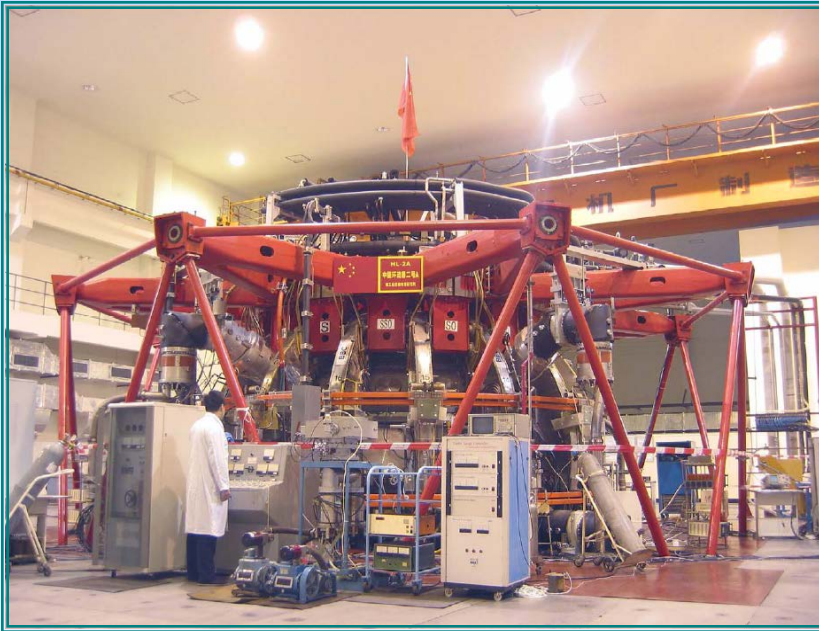
仿星器磁场位形

托卡马克磁场位形

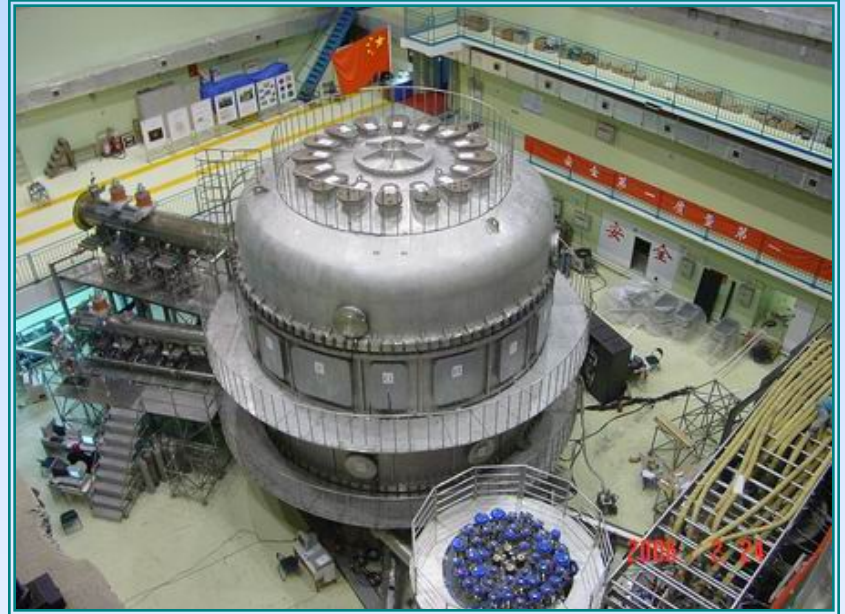


托卡马克的磁力线可形成磁笼结构。其中环向磁场由外场线圈产生；极限磁场由等离子体电流产生

中国的主要磁约束聚变装置

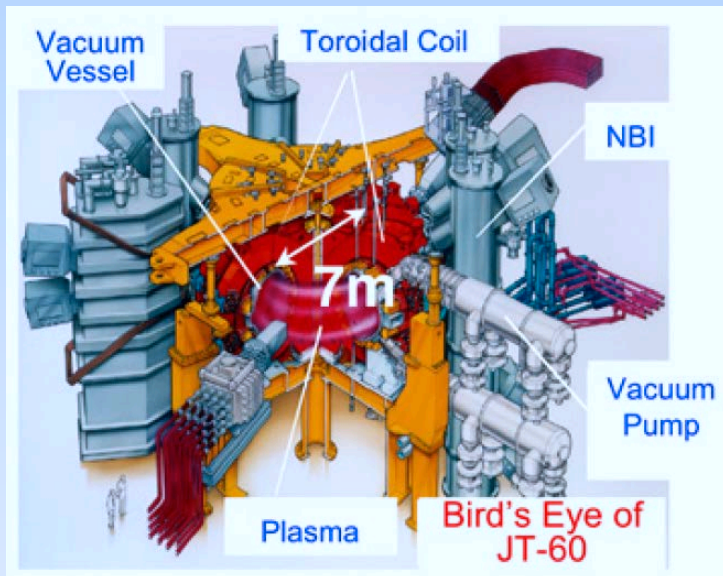


HL-2A@西南物理研究院

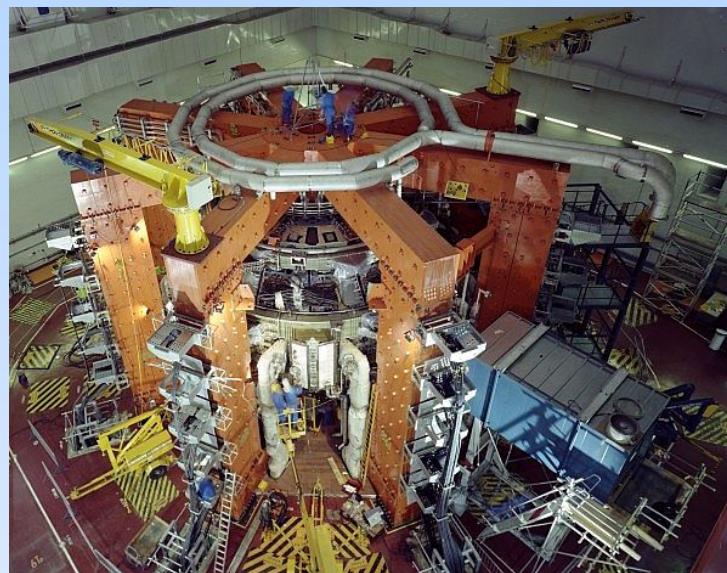


EAST@等离子体物理研究所

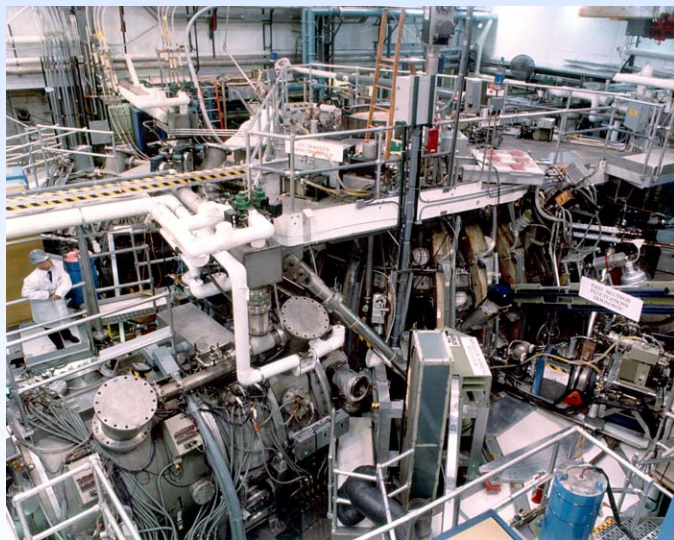
国外主要磁约束聚变装置



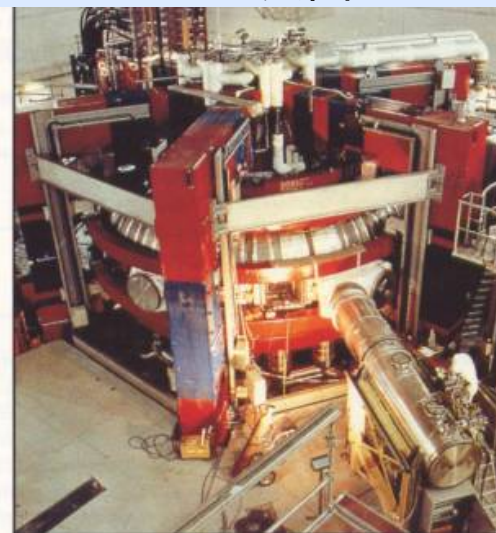
JT-60@日本



JET@英国

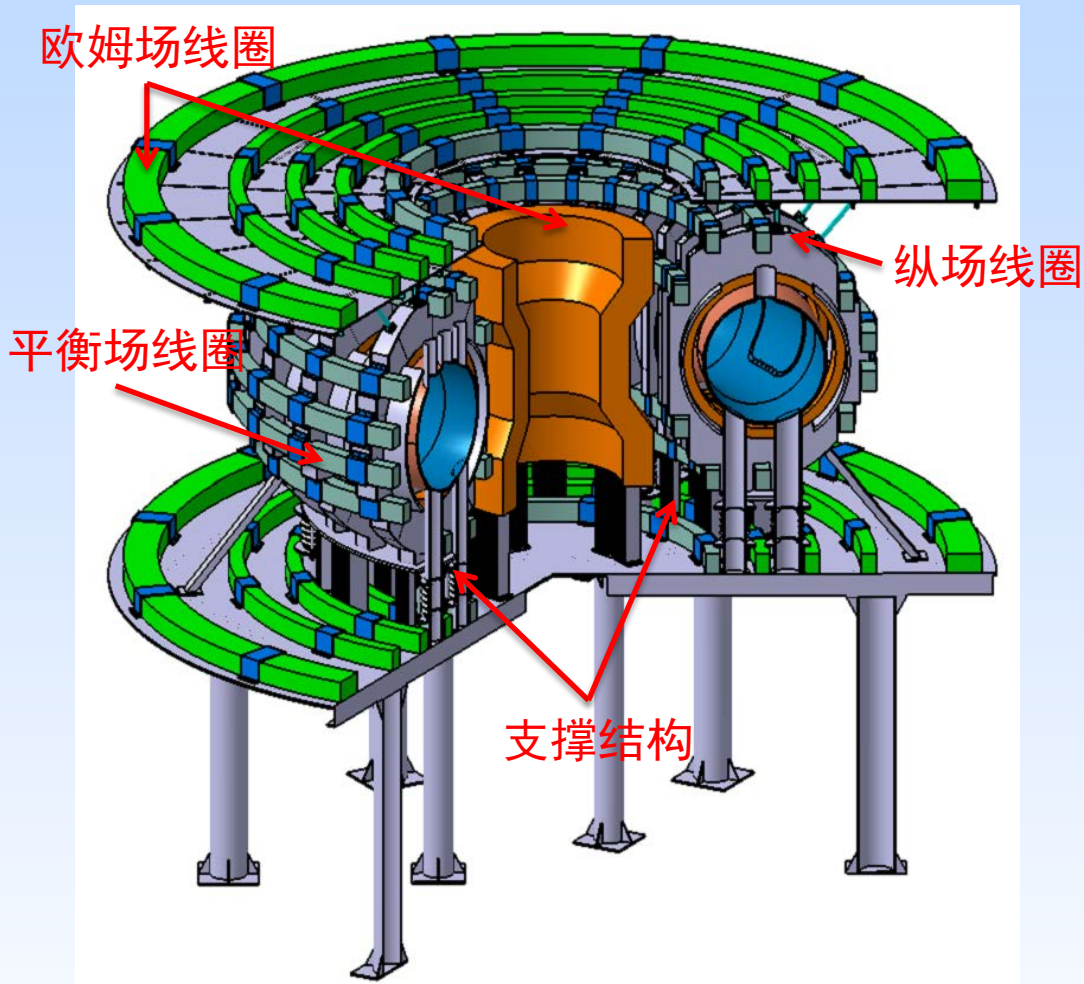


DIII-D@美国



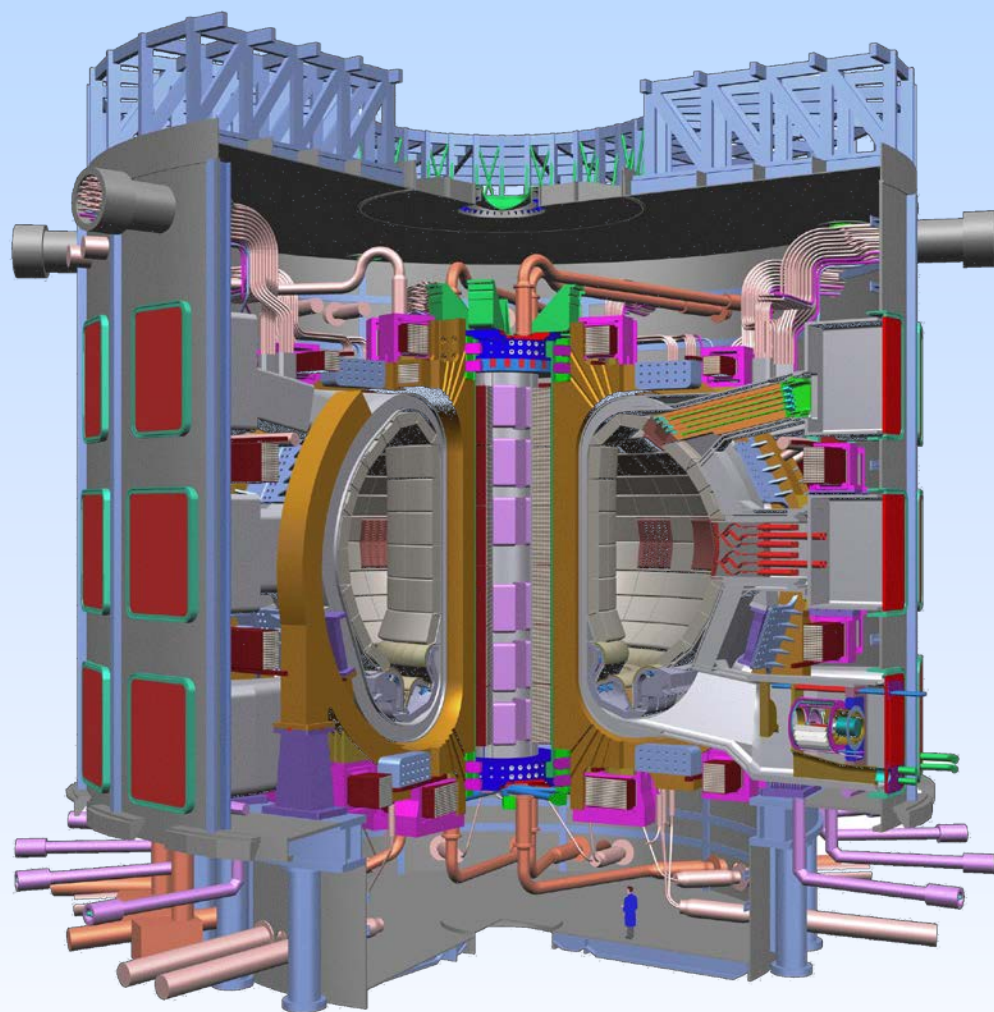
Tore Supra@法国

科大环形实验装置(KTX)



大半径:	1.4 m
小半径:	0.4 m
导体壁 (铜) 厚:	1.5 mm
等离子体电流:	0.1~0.5 MA
脉冲宽度:	10~30 ms
环电压:	10~50 V
等离子体电感:	$\sim 4 \mu\text{H}$
极向磁通:	3 V·S
电子温度:	600 ~ 800 eV
等离子体密度	$\sim 10^{19}\text{m}^{-3}$

国际热核反应堆(ITER)



主要参数

$$P_f = 500 \text{ MW}$$

$$Q > 10$$

$$T = 500 \text{ s}$$

$$R = 6.2 \text{ m}$$

$$A = 2.0 \text{ m}$$

$$I_p = 15 \text{ MA}$$

$$B = 5.3 \text{ T}$$

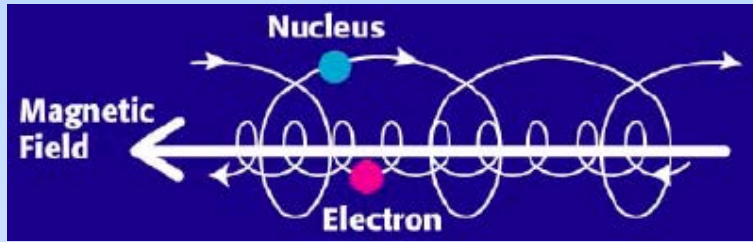
$$V = 837 \text{ m}^3$$

$$S = 678 \text{ m}^2$$

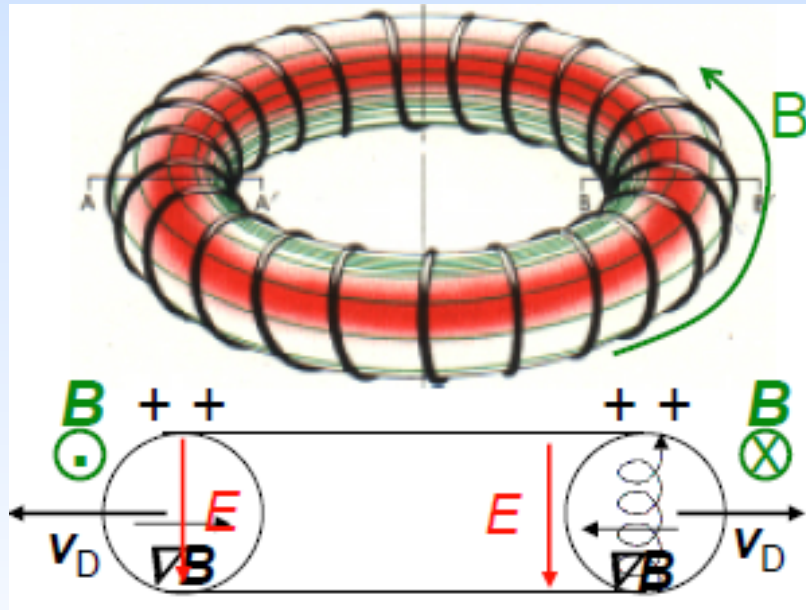
$$P_{in} = 73 \text{ MW}$$

ITER是国际最大的聚变研究计划。

简单环形磁场：不能约束等离子体



- 可避免带电粒子沿磁力线的终端损失
- 磁场梯度和曲率漂移引起电荷分离



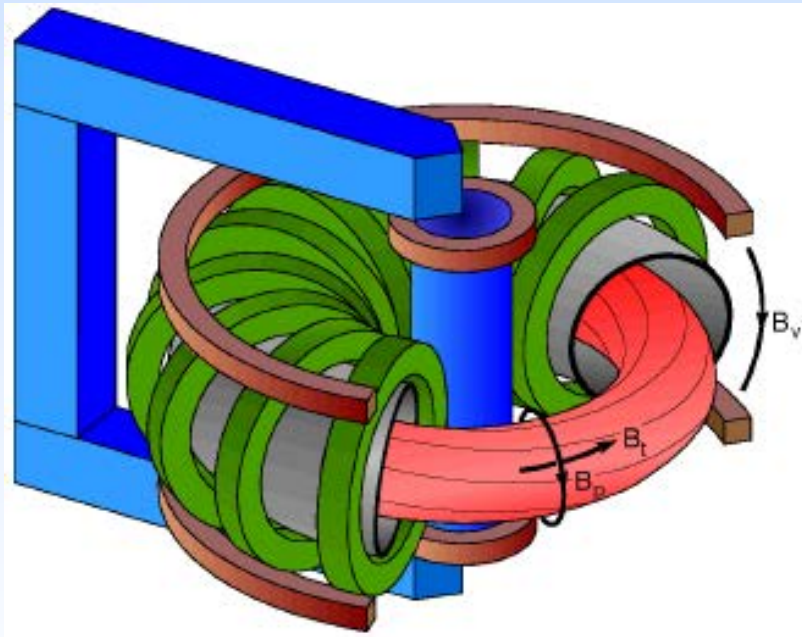
$$V_{\nabla B + R_c} = \frac{m(V_{\parallel}^2 + V_{\perp}^2/2)}{qB^3} (B \times \nabla B)$$

- 电漂移引起粒子横越磁场损失

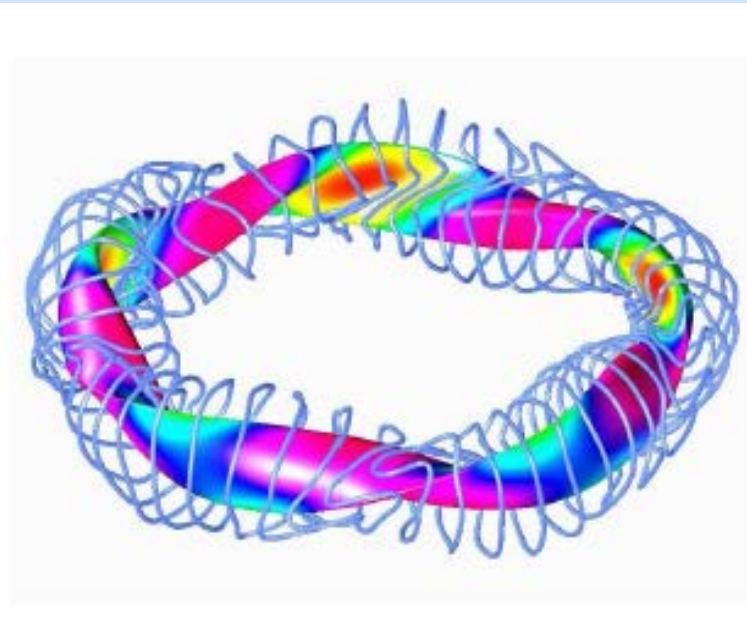
$$V_D = \frac{E \times B}{B^2}$$

螺旋变换环形磁场：形成“磁笼”

- 可消除带电粒子的径向漂移损失
 - 托卡马克：环向等离子体电流产生极向磁场
 - 仿星器：外部复杂的线圈产生极向磁场



托卡马克



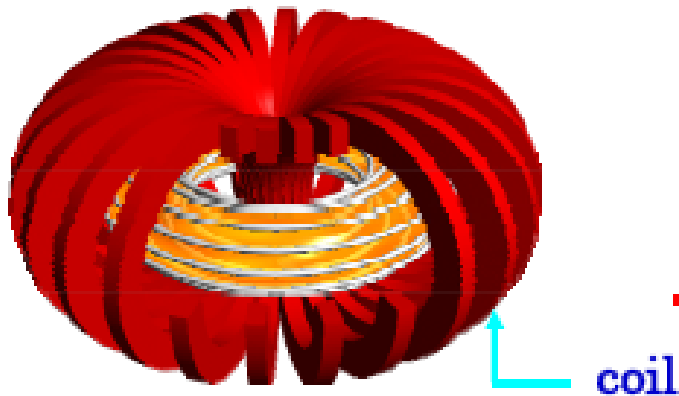
仿星器

托卡马克磁位形

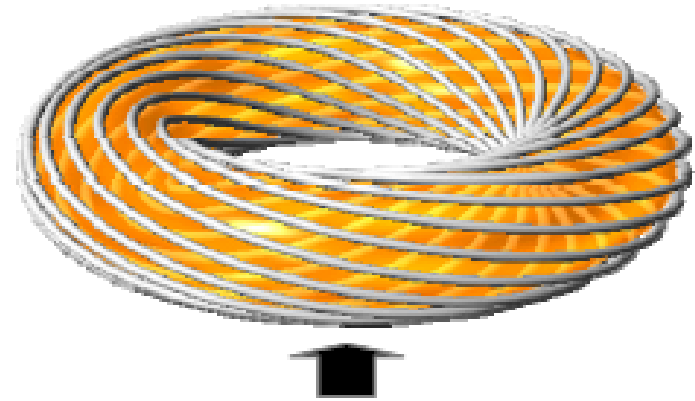
Current in plasma



Current in coils

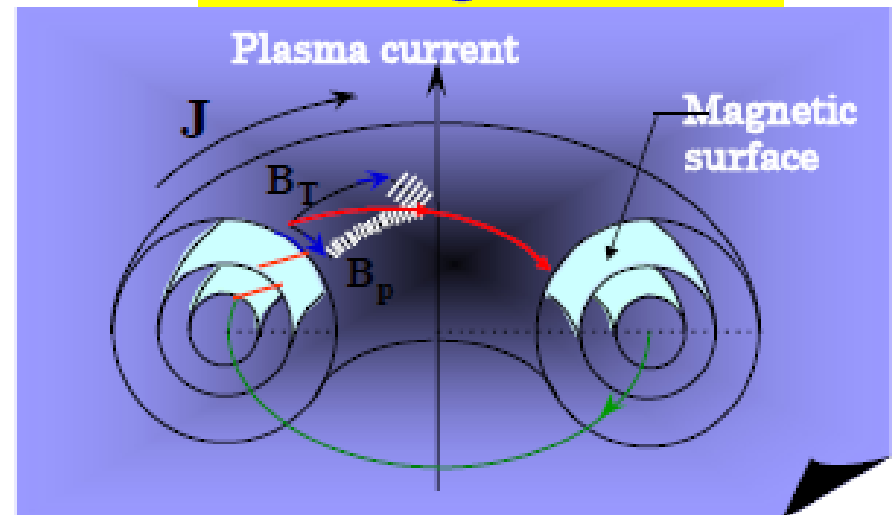


Tokamak concept



Magnetic line nest

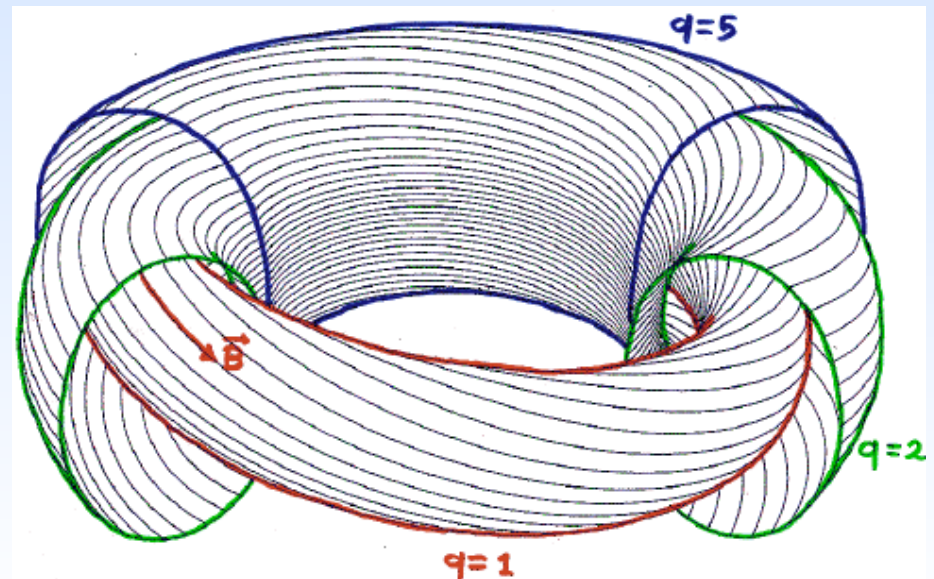
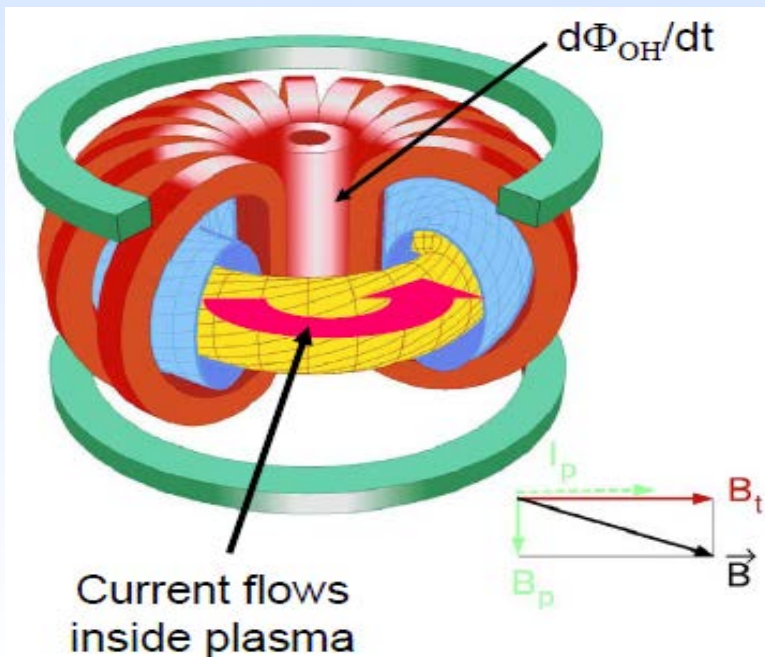
Closed magnetic surface



托卡马克

- 等离子体电流用于形成螺旋变换环形磁场位形
- 闭合磁面与安全因子 $q(r) = rB_T / (R_0 B_P)$
- 等离子体电流用于加热等离子体（欧姆加热）

$$P_W = \eta j^2, \quad \eta \approx 8 \times 10^{-8} Z_{\text{eff}} T_{e, \text{keV}}^{-3/2} [\text{ohm.m}]$$



托卡马克的主要物理问题

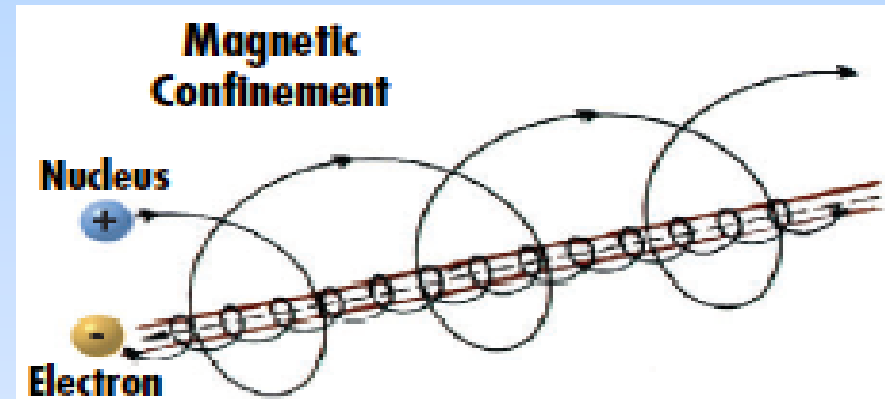
- 运输与等离子体约束
- 磁流体平衡与不稳定性
- 辅助加热与电流驱动
- 等离子体与器壁相互作用
- 快粒子物理
- 集成运行方案与等离子体控制

- **横越磁场扩散系数**

$$D \approx v_{ei} \rho_{ce}^2$$

$$\chi_e \approx D$$

$$\chi_i \approx v_{ii} \rho_{ci}^2 \approx (m_i / m_e)^{1/2} \chi_e$$



其中 v, ρ_c 分别为碰撞频率和回旋半径

- 输运步长（或退相关长度）为回旋半径
- 退相关时间为碰撞时间 $\tau = v^{-1}$

磁约束聚变的能量约束时间

$$\frac{dW}{dt} = P - \frac{W}{\tau_E}$$

W 等离子体总内能

P 等离子体总加热功率

τ_E 等离子体总能量约束时间

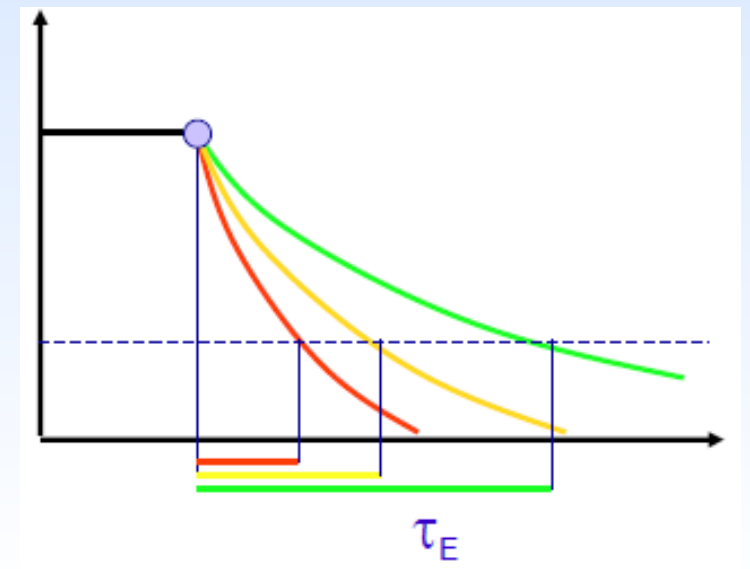
$$W = \int \frac{3}{2} n_e (T_i + T_e) dV$$

$$\tau_E = \frac{\int \frac{3}{2} n_e (T_i + T_e) dV}{P}$$

(当 $dW/dt = 0$ 时)

- 能量约束时间与扩散系数

$$\tau_E = \frac{W}{P} = \frac{VnT}{S\chi n\nabla T} \sim \frac{a^2}{\chi} \propto B^2$$



环形磁场对运输的影响

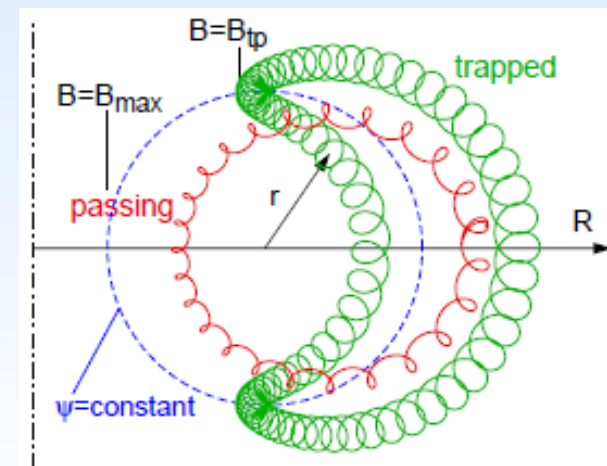
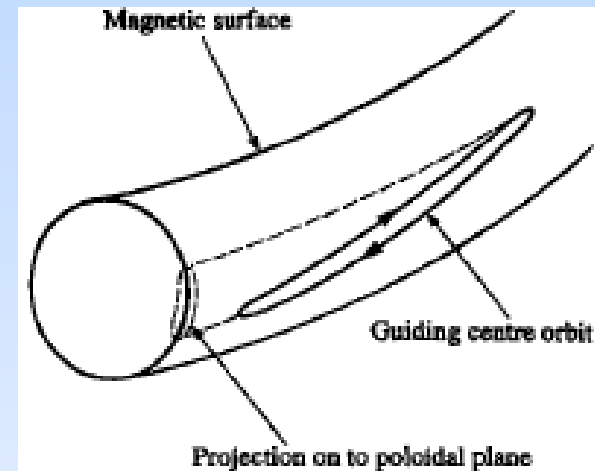
- 飞行粒子：
不被局域磁镜捕获，但磁场曲率和梯度漂移使漂移面中心偏离磁面中心，其距离为：

$$\Delta r_{ps} \sim q\rho_c$$

- 捕获（香蕉）粒子：
被局域磁镜捕获而形成香蕉轨道，其轨道宽度为：

$$\Delta r_b \sim 2q\rho_c / \sqrt{\varepsilon}, \quad \varepsilon \equiv r/R$$

- 两种粒子的运输步长都变大了



新经典输运

- 香蕉区

$$v_{eff} < v_b \text{ 或 } v < \frac{\epsilon^{3/2} v_t}{qR}$$

$$D^{NC} \sim \epsilon^{-3/2} q^2 D^C$$

- 碰撞区

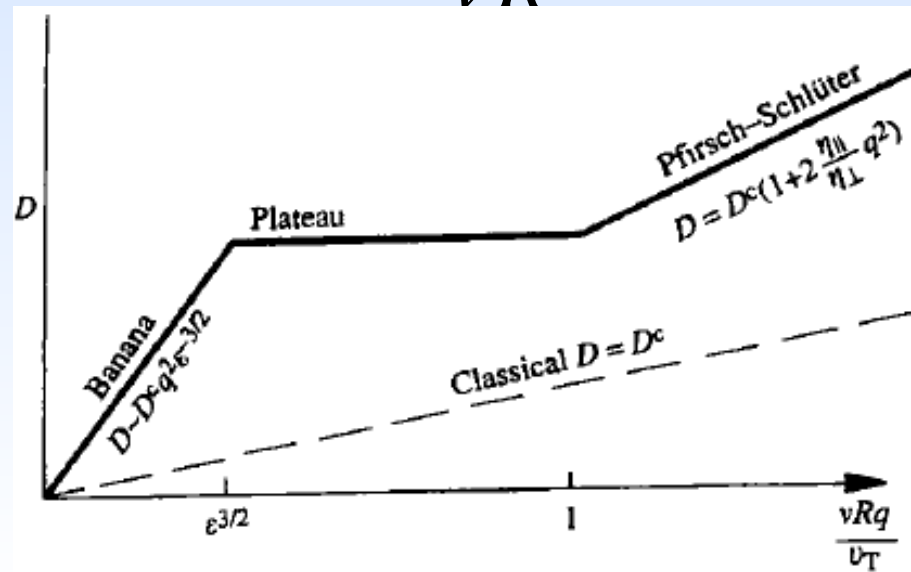
$$v \geq \frac{\epsilon^{3/2} v_t}{qR}$$

$$D^{NC} \sim (1 + 2q^2) D^C$$

- 平台区

$$\frac{\epsilon^{3/2} v_t}{qR} \leq v \leq \frac{v_t}{qR}$$

$$D^{NC} \sim \frac{v_t q}{v R} D^C$$



Bohm扩散

- 在1946年，Bohm等人在磁弧实验观察到反常扩散现象，获得一个半经验的扩散系数公式：

$$D_B \simeq T/16eB \sim \omega_c \rho_c^2, \tau_B \sim a^2/D_B \propto B$$

- 上世纪60年代，在C型仿星器上实验发现，等离子体约束时间遵从Bohm扩散定标律：

$$\tau_E [ms] = 3.6 \times 10^{-1} a^2 [cm^2] B_0 [T] / T_e [eV]$$

- Bohm扩散的随机游走估计

$$\frac{\Delta x}{\tau} = V_E = \frac{-\nabla \tilde{\Phi}}{B} \sim \frac{\tilde{\Phi}_{rms}}{\Delta x B}$$

$$D_B = \frac{\Delta x^2}{\tau} \simeq \frac{\tilde{\Phi}_{rms}}{B} \simeq \frac{T}{16eB}, \quad \text{当取 } \frac{e\tilde{\Phi}_{rms}}{T} = \frac{1}{16} \text{ 时}$$

反常输运

- 实验测定的输运系数

$$\chi_i \approx \chi_e \approx (1-10) m^2 s^{-1}$$

$$D \approx D_Z \approx \chi_e$$

$$\chi_i \approx (1 \sim 10) \chi_i^{NC}$$

$$\chi_e \approx 10^2 \chi_e^{NC}$$

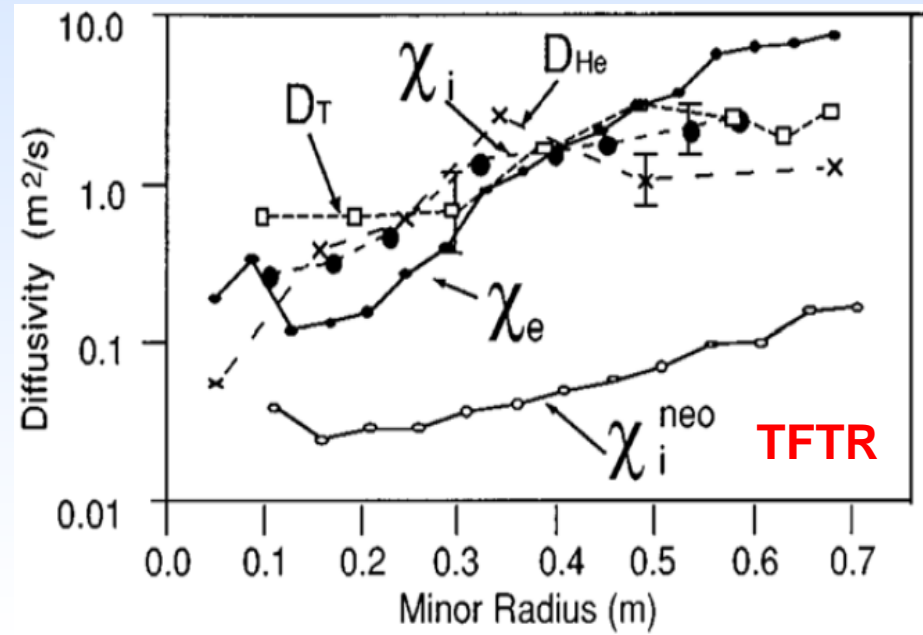
- 它比新经典理论预言的大一到二个量级，称为反常输运。它可能是由等离子体湍流驱动的。

- 新经典输运系数

$$\chi_i^{NC} \approx (0.1-1) m^2 s^{-1}$$

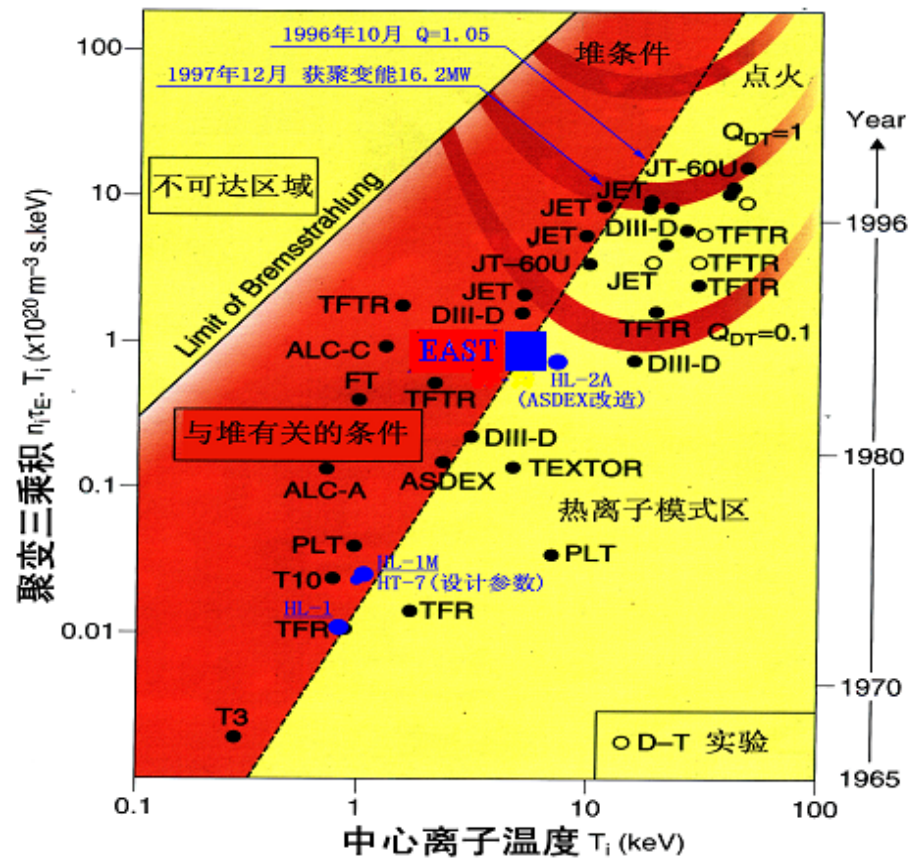
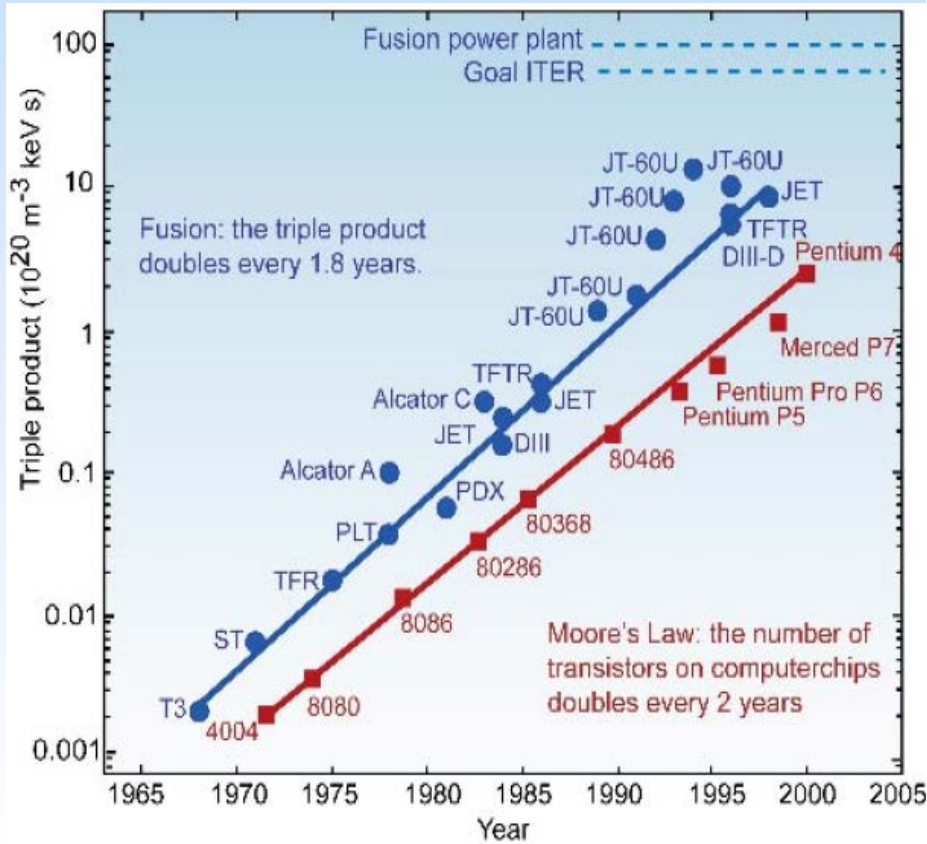
$$\chi_e^{NC} \approx D^{NC} \approx \sqrt{m_e/m_i} \chi_i^{NC}$$

$$D_Z^{NC} \approx (10^{-2} - 10^{-1}) m^2 s^{-1}$$



磁约束聚变研究进展

- 聚变三乘积每1.8年增长一倍
- 等效的D-T聚变反应功率增益因子已达1



结语

- 等离子体科学涵盖了受控热核聚变、低温等离子体物理及应用、国防和高技术应用、天体和空间等离子体物理等分支领域。
- 等离子体科学在能源、材料、信息、环保、国防、微电子、半导体、航空、航天、冶金、生物医学、造纸、化工、纺织、通讯等领域有广泛的应用。
- 等离子体研究领域对人类面临的能源、材料、信息、环保等许多全局性问题的解决具有重大意义。

A traditional Chinese pavilion with a dark, multi-tiered roof and light-colored pillars stands on a small island in a pond. To the left, a stone bridge with a low railing extends across the water. A vibrant red maple tree is positioned near the pavilion. The surrounding landscape is lush with green trees and foliage. The scene is reflected in the calm water of the pond. The Chinese characters "谢谢!" (Thank you!) are overlaid in the center in a bright yellow, stylized font.

谢谢!