



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

磁约束聚变物理简介

2017年11月14日

物理学院近代物理系

- 联系方式：庄革
 - 教学行政楼（悦群楼）403室
 - 电话：63601576
 - Email：gezhuang@ustc.edu.cn
- 欢迎对讲座提出意见和建议，以便于下一次更好地介绍磁约束聚变物理。
- 将开设《磁约束聚变物理》课程。

提纲



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

3

磁约束聚变简介

4

磁约束聚变中的一些物理问题

提纲



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

3

磁约束聚变简介

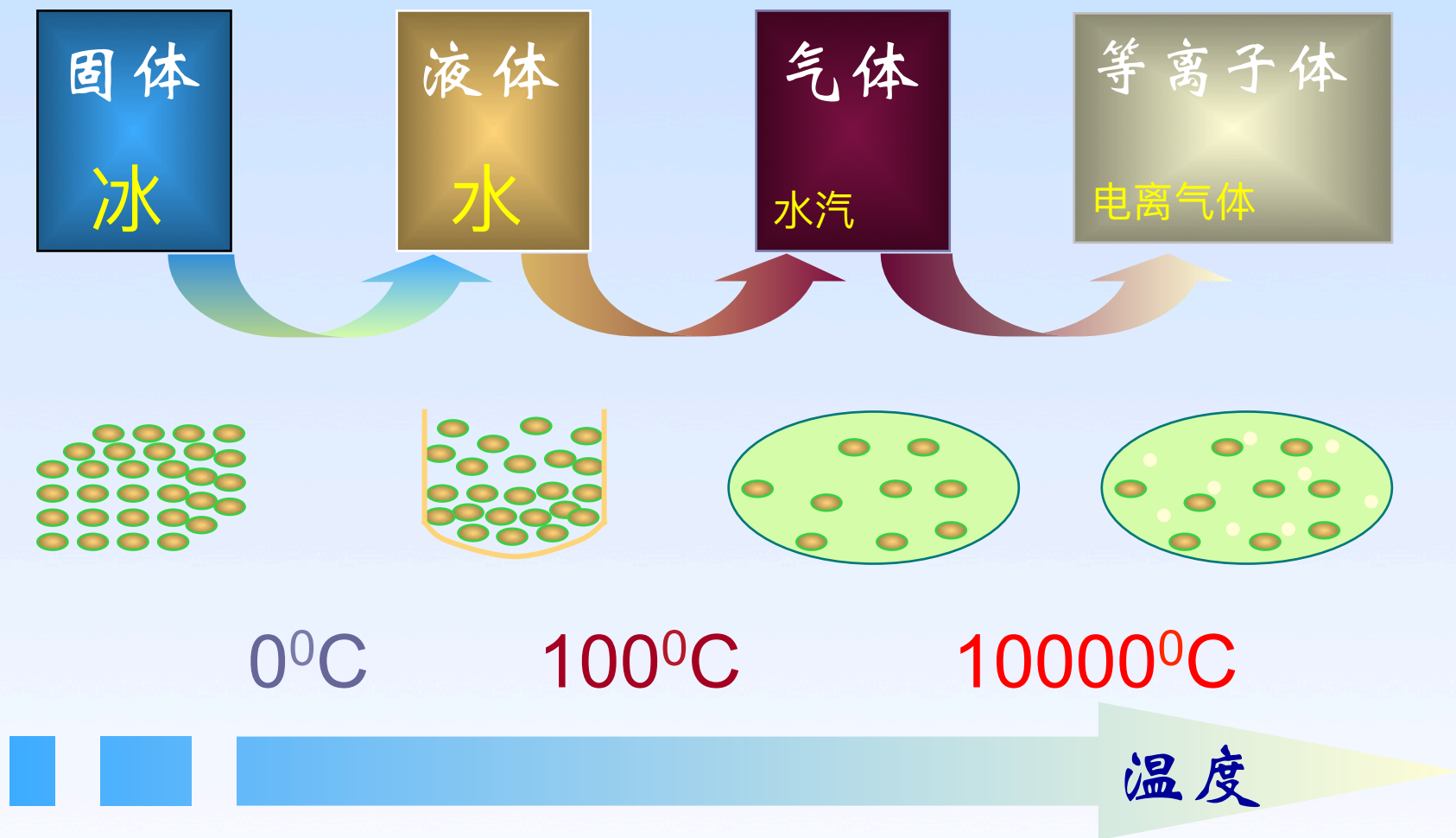
4

磁约束聚变中的一些物理问题

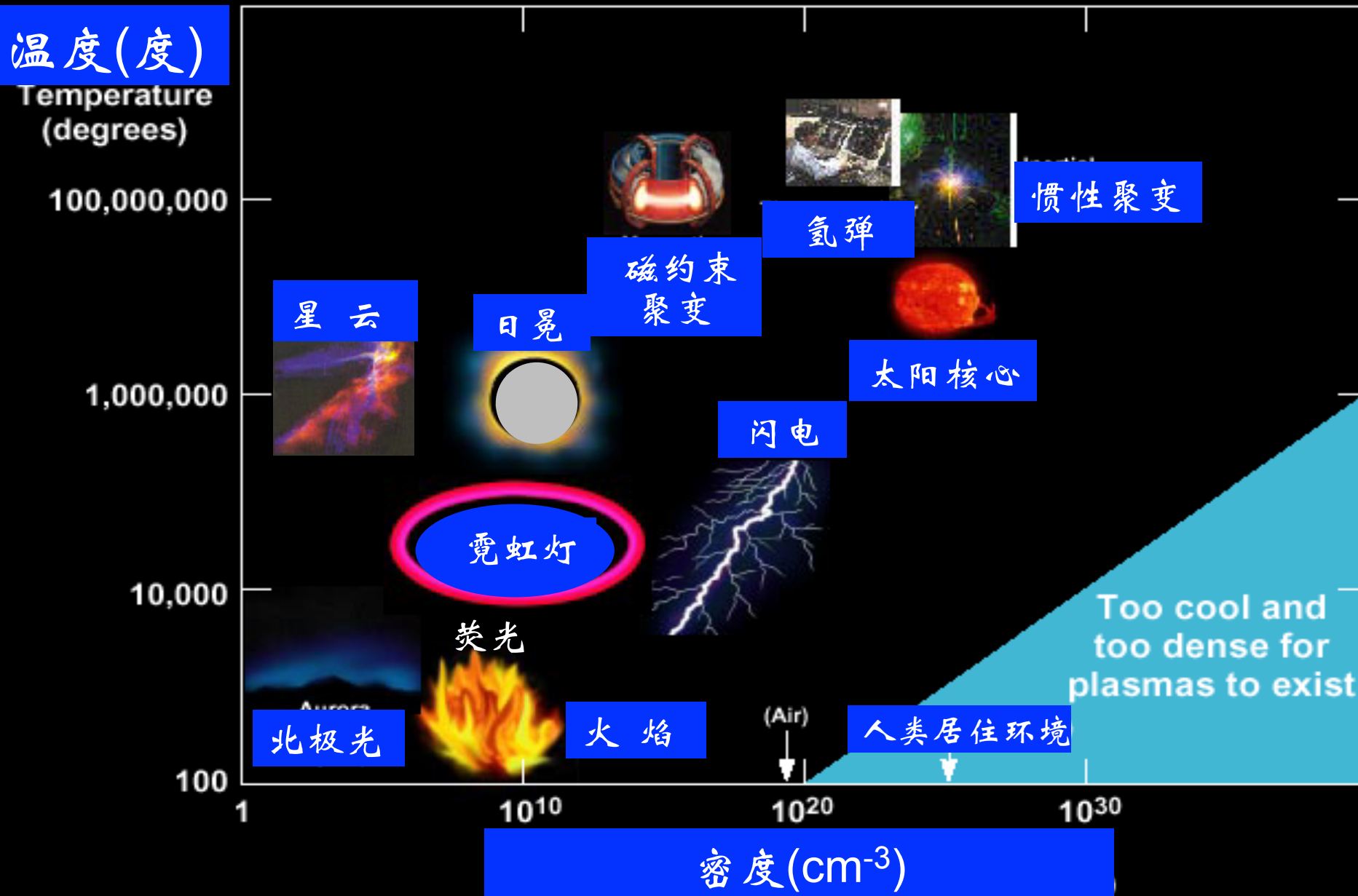
等离子体的定义

- 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。
 - 可以借用热力学-统计物理和电磁学-电动力学来描述；“流体力学”。

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

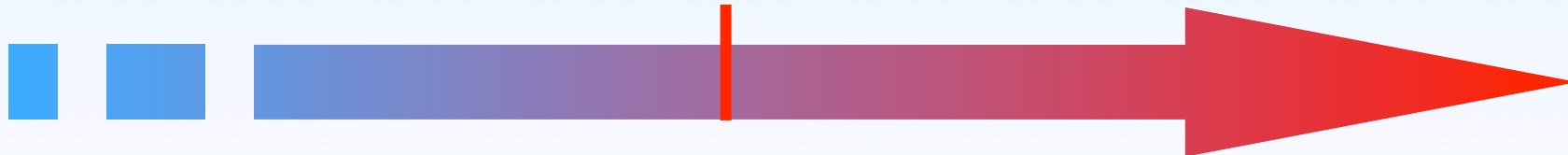
高温
等离子体

聚变、太阳核心

10000⁰C

电子温度

1eV



提纲



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

3

磁约束聚变简介

4

磁约束聚变中的一些物理问题

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
- 1985年，美苏两国首脑在日内瓦达成共同和平开发可控聚变能的协议，国际热核聚变实验堆（ITER）计划由此诞生

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
- 磁约束燃烧等离子体
 - ITER, CFETR
- 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
-

提纲



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

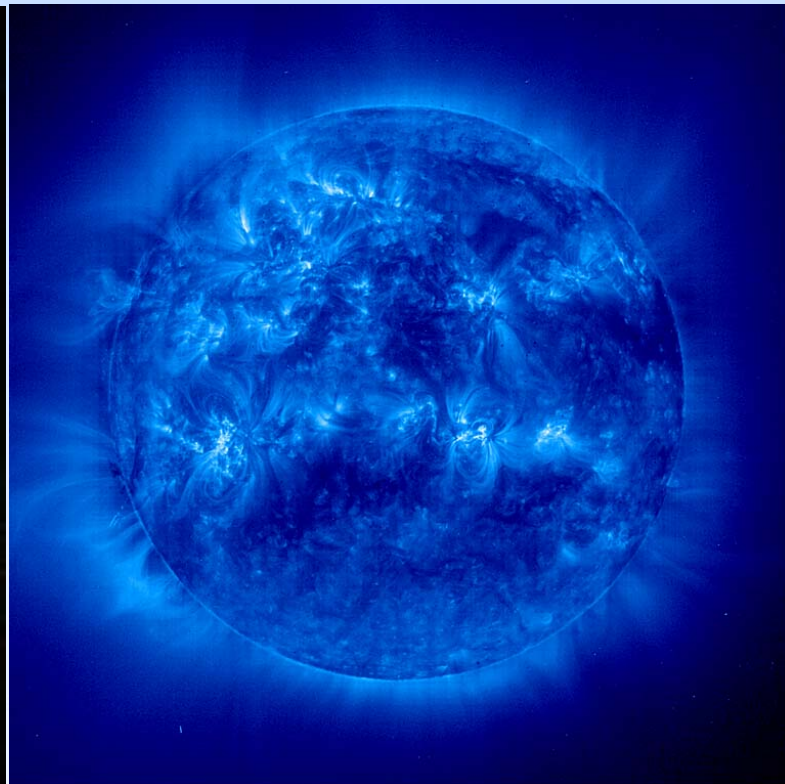
3

磁约束聚变简介

4

磁约束聚变中的一些物理问题

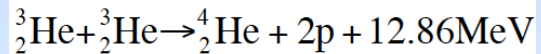
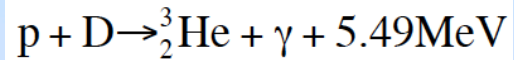
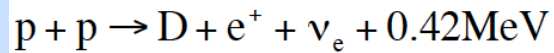
聚变是宇宙中的常见现象



宇宙中可见物质的主要能量来源于聚变。

聚变是宇宙中的常见现象

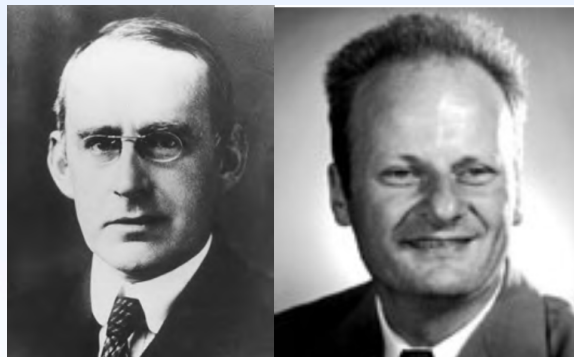
太阳上正在进行的聚变



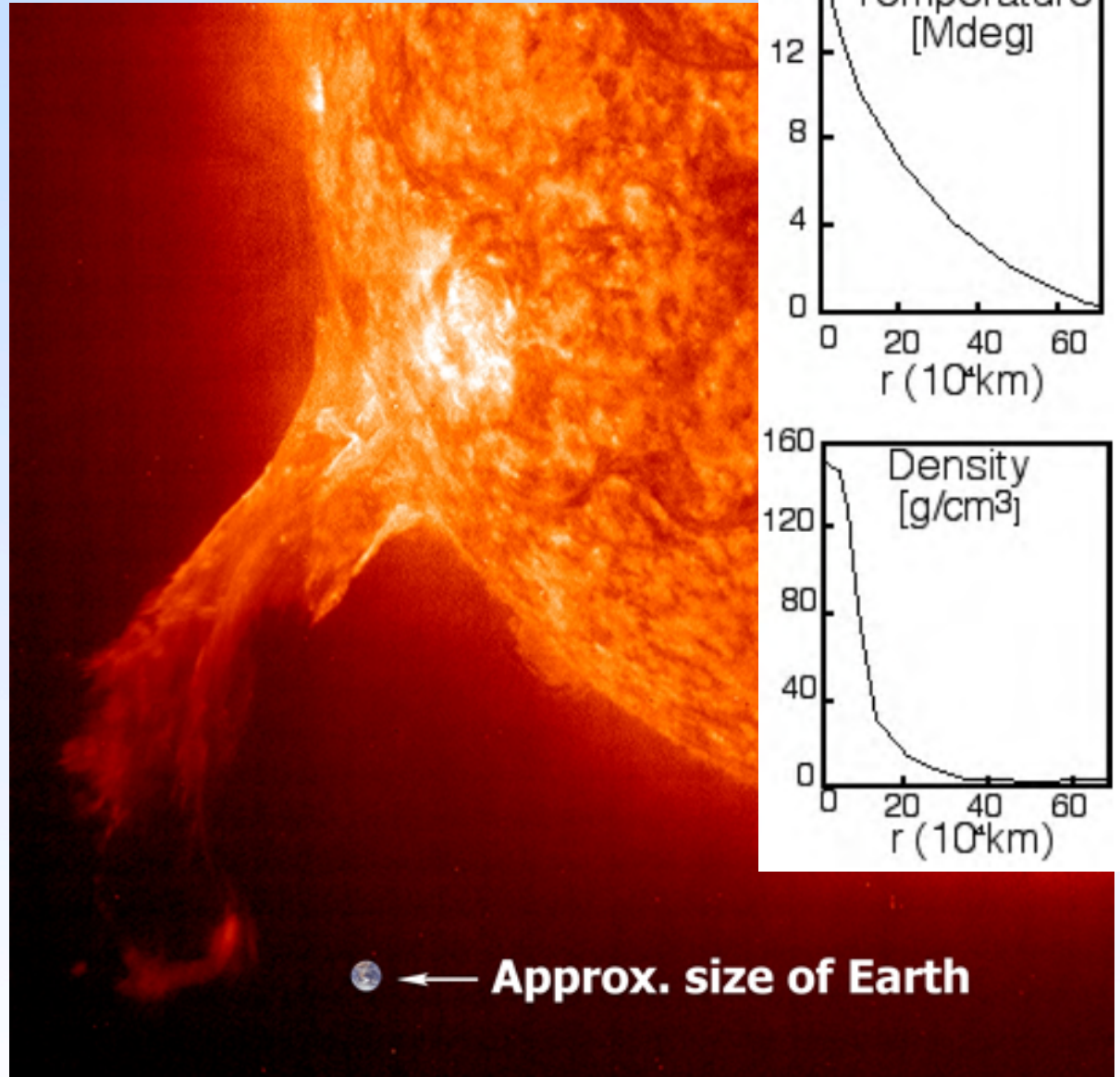
- 每个氢离子产能为6.55 MeV;
- 1克氢产能相当于15吨石油;
- 每秒有62亿吨氢离子发生聚变反应。

恒星 > 太阳 :

CNO cycle (H. Bethe)



A. Eddington and H. Bethe



人类也早已实现聚变



人类已经实现聚变，目前仅在军事用途，还无法用于造福人类。

开发聚变能源的漫长道路

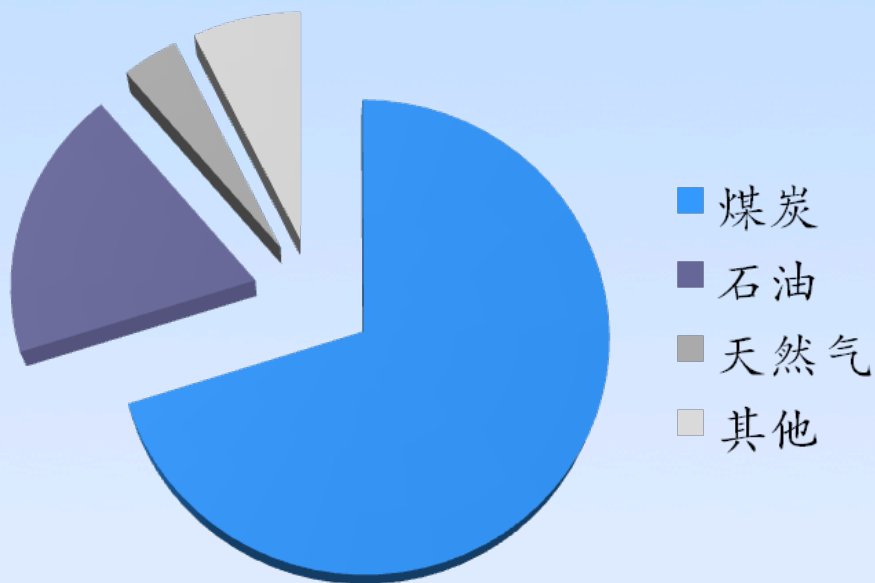
Producing a self-sustaining fusion-heated plasma is a grand challenge

USBPO



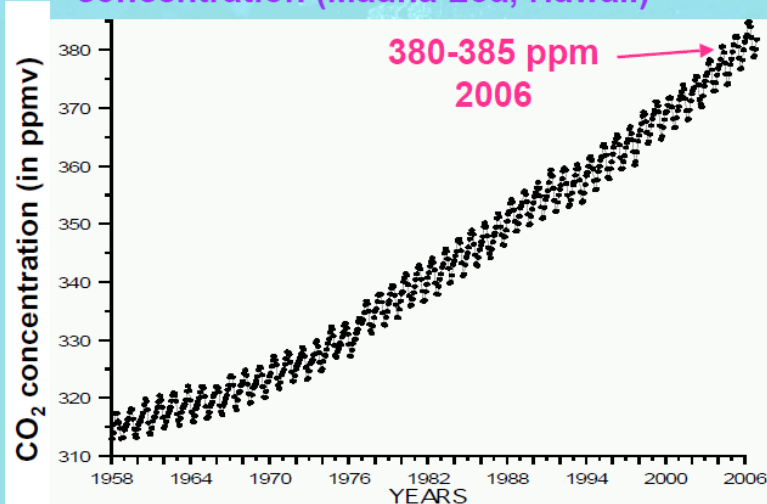
- 1928 Fusion reactions explain energy radiated by stars [Atkinson & Houtermans]
 - 1932 Fusion reactions discovered in laboratory [Oliphant]
 - 1935 Fusion reactions understood as Coulomb barrier tunneling [Gamow]
 - 1939 Theory of fusion power cycle for stars [Bethe–Nobel Prize 1967]
 - 1950 Use of 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%.....

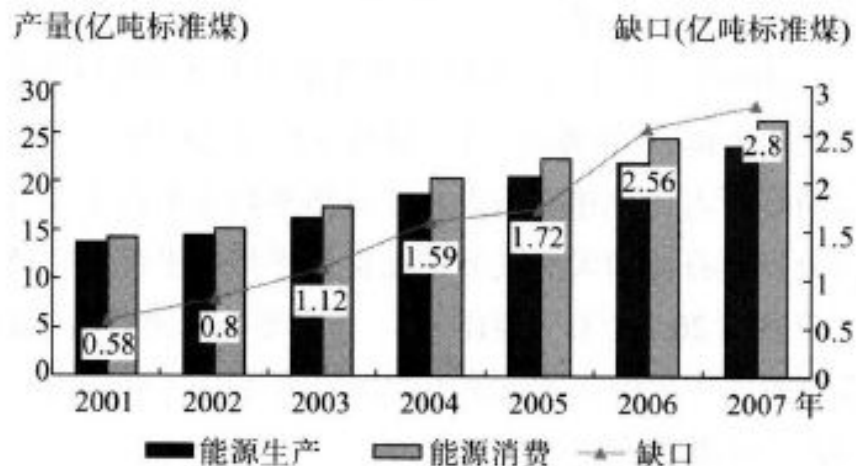
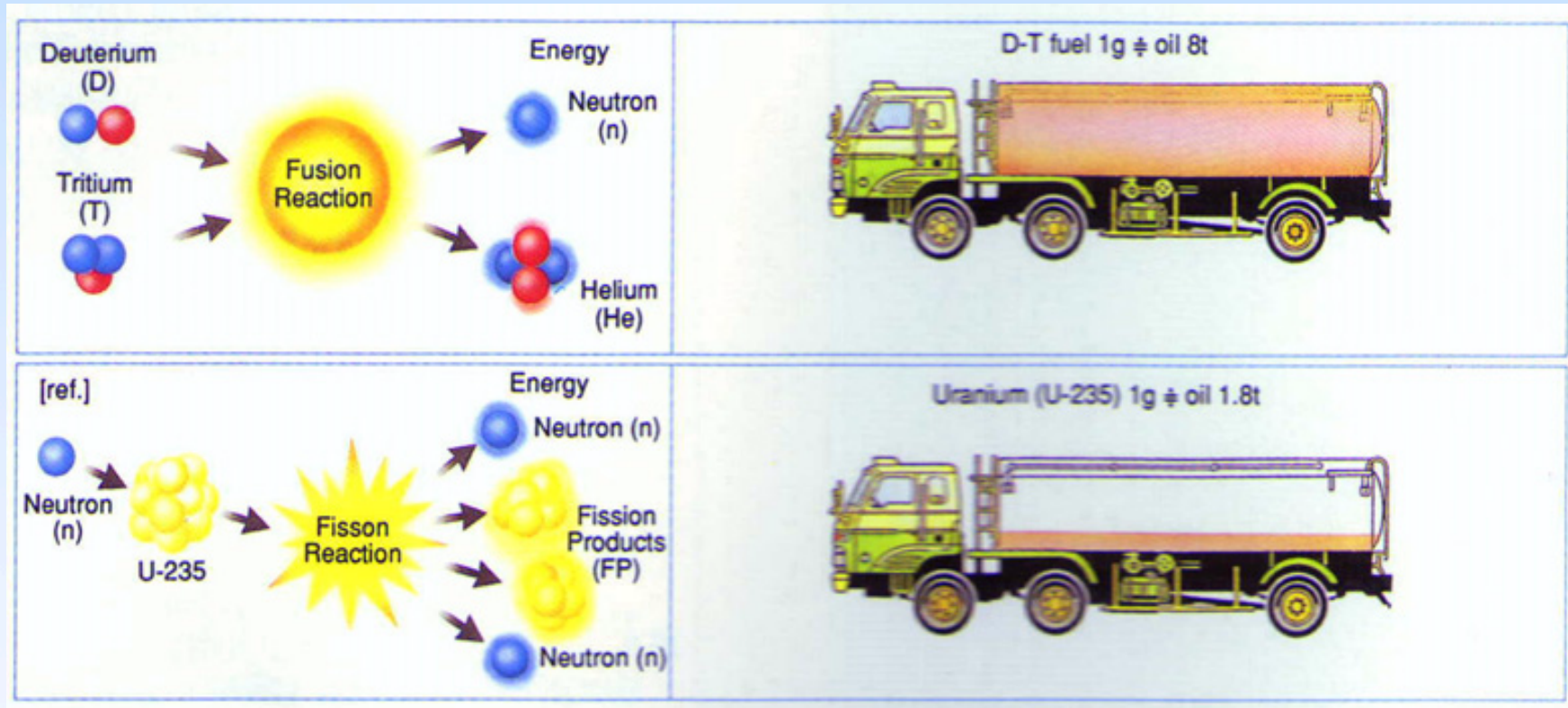


图1 2001~2007年中国一次能源生产和消费

(数据来源:中国统计年鉴2007)

核聚变能为高效能源

核聚变能：二个轻核合成一个重一点的核，可以产生额外能量



核裂变能：重核分裂变成轻一点的核，也可以产生额外能量

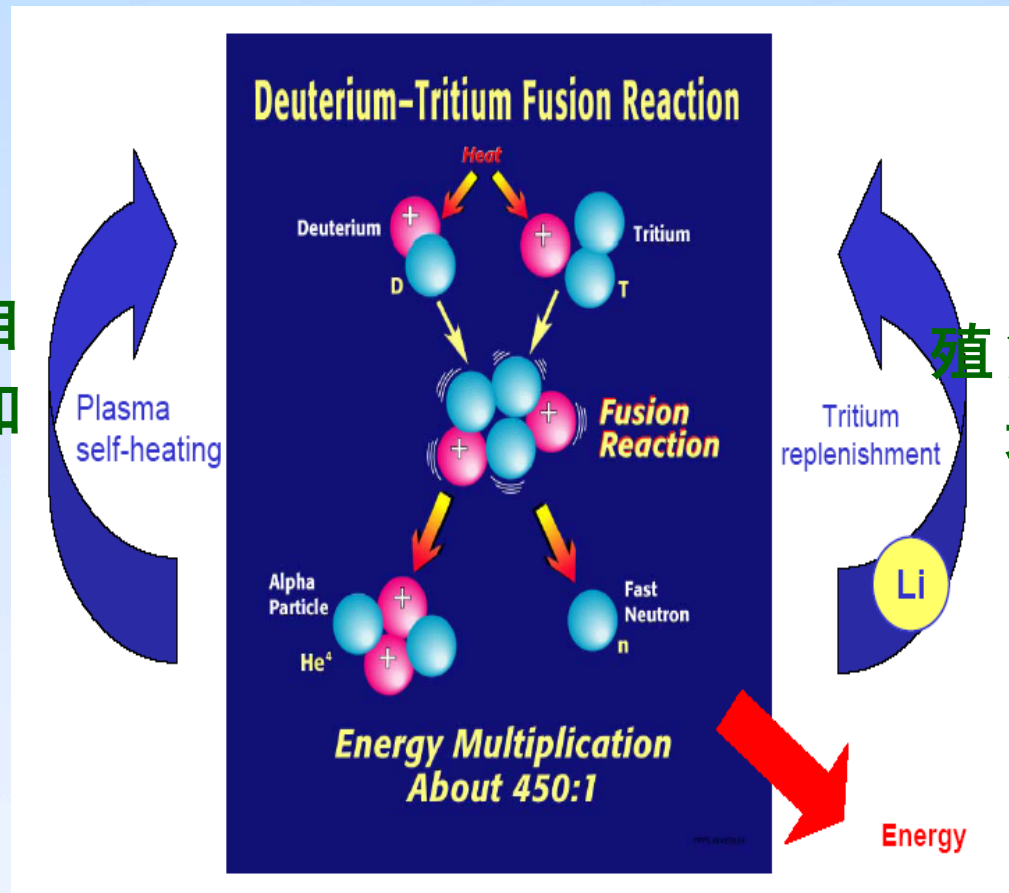
氘 (D) 氚 (T) 聚变反应

| | 占氢的比例 | 半衰期 |
|---|-----------------|-------|
| 氘 | $\sim 10^{-15}$ | 12.5年 |
| 氚 | $\sim 10^{-4}$ | |

- 氘在自然界中少之又少。单纯燃烧将无以为继；
- 幸运的是我们有丰富的Li，聚变产生的中子和Li进行核反应，可以产氘；适当情况下，能够增殖。

**氘氚反应：
自持燃烧且氘增殖**

热自加



增殖氘

- 自加热过程是核聚变反应中最重要的过程，利用氦粒子来加热燃料粒子并催生下一个反应；
- 这个过程能量放大倍数为450倍。

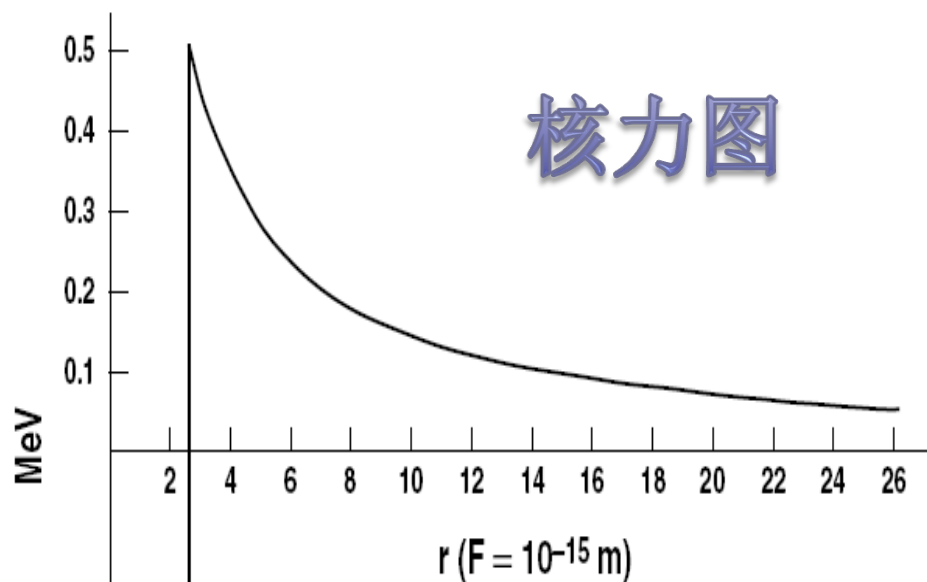
丰富的核聚变能源

| 资源种类 | 探明储量 | 开采年限 |
|--------------------------------|-------------------|------|
| 核裂变 | | |
| 铀235(裂变堆) | $\sim 10^{13}$ GJ | 30年 |
| 铀238(增殖堆) | $\sim 10^{16}$ GJ | 3万年 |
| 核聚变 (锂, 用于生产D-T聚变堆中的 T) | | |
| 陆地储量 | $\sim 10^{16}$ GJ | 3万年 |
| 海水储量 | $\sim 10^{19}$ GJ | 3千万年 |
| 核聚变 (氘, 用于D-D聚变反应) | | |
| 氘 | | 百亿年 |

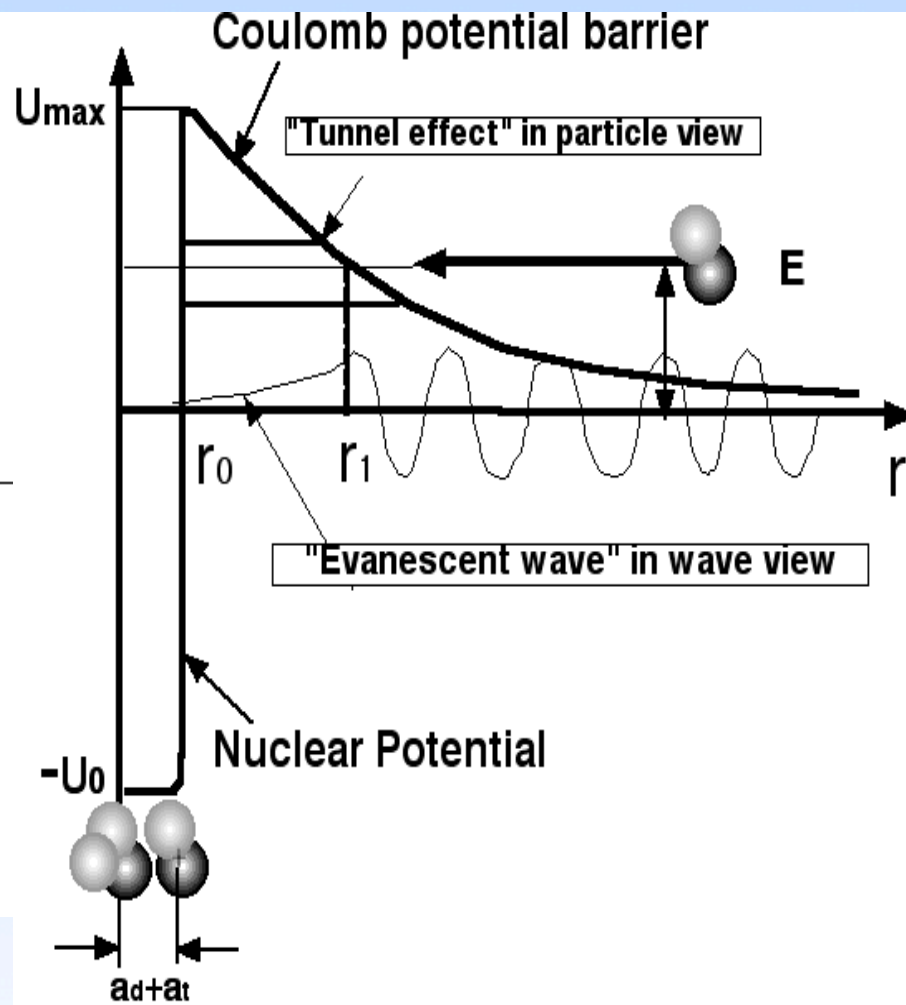
核聚变能：几乎是取之不尽的能源！

注：1km³的海水相当于全球石油总储量

核聚变反应的困难

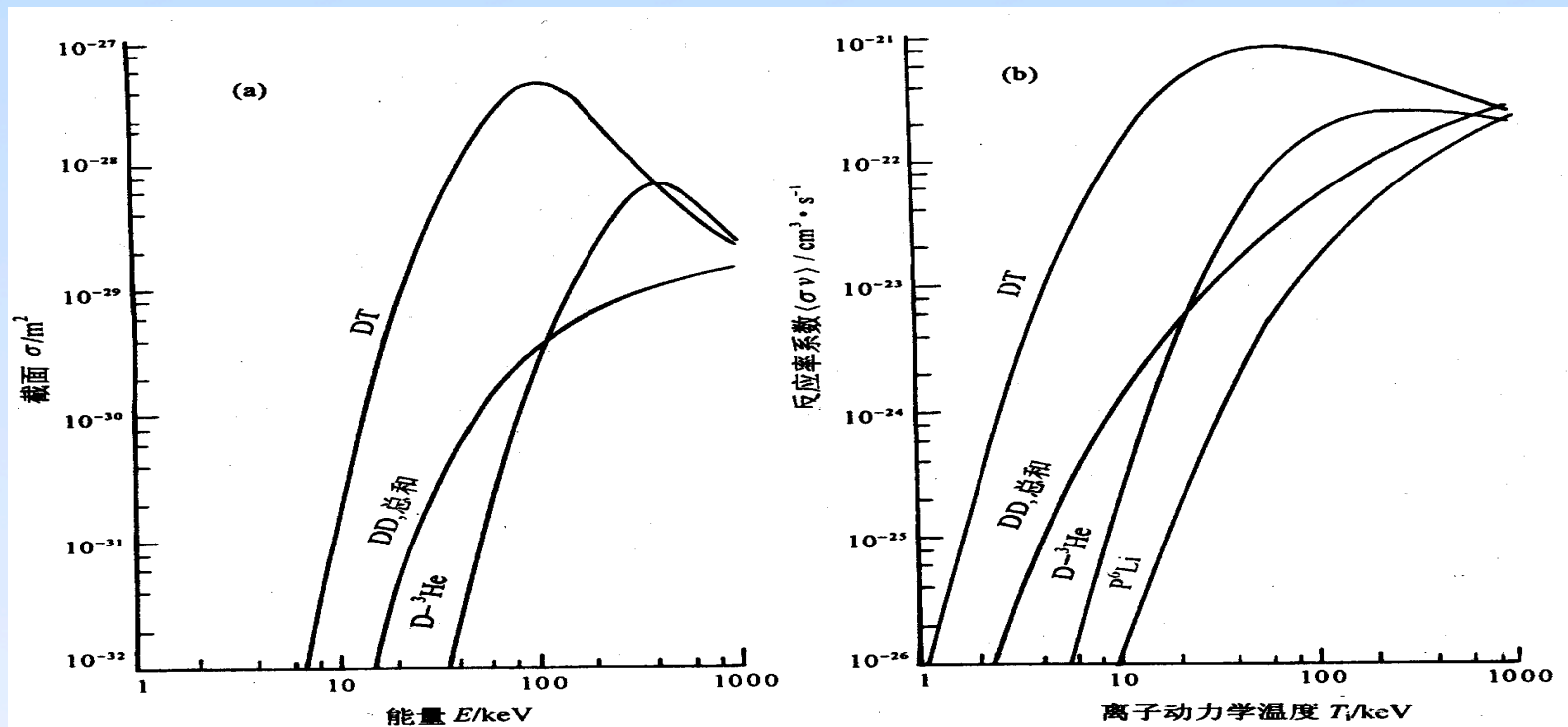


- 每一氘、氚粒子需要动能是**0.48MeV**;
- 半径在大约 **10^{-12} m**量级，精确对撞可能性实在太低，几乎不可能。



$$U_{\max} = e^2 / (4\pi\epsilon_0 r) = 0.48 \text{ MeV}$$

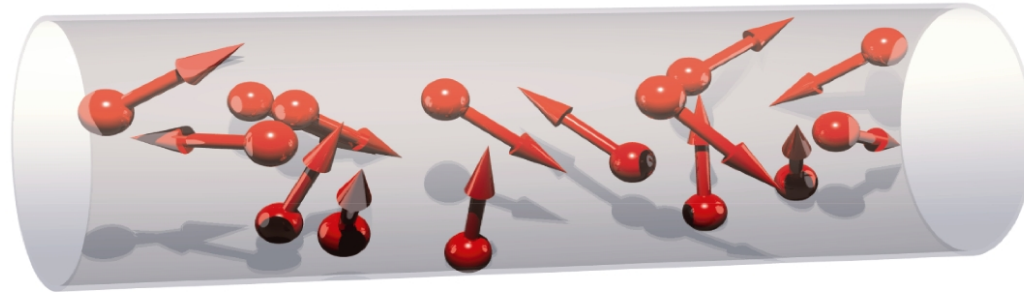
常用的核聚变反应的反应截面



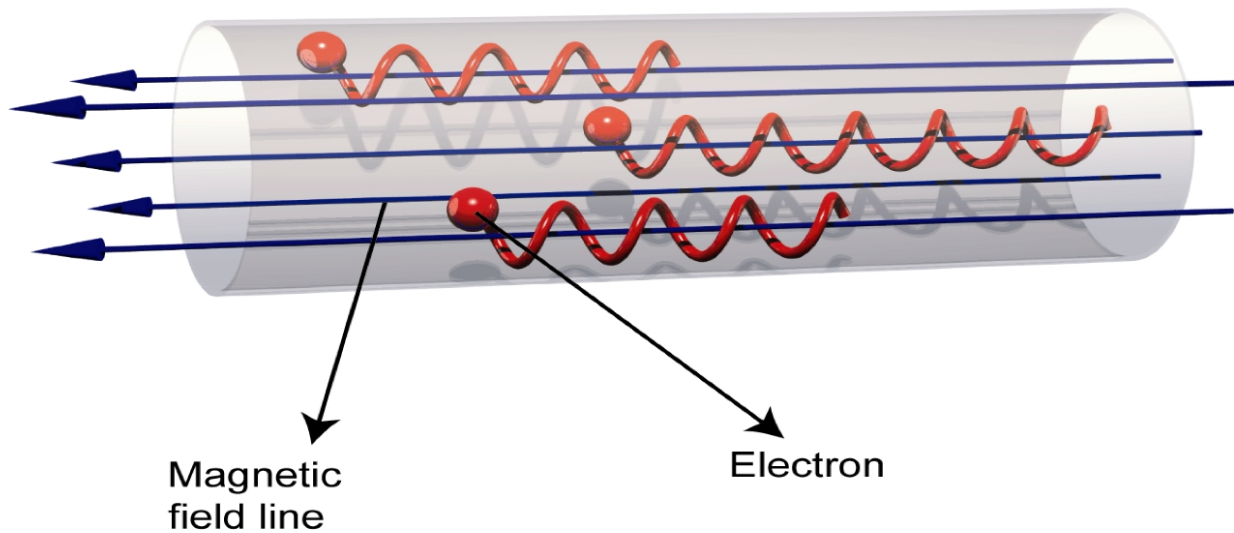
- 当动能达到几十 keV时，所有的聚变反应的反应截面和反应速率就非常可观；
- 氘氚离子的温度在大约10 keV时，反应速率在 10^{-22} 量级。是地球上最容易产生的聚变反应。

磁约束聚变的基本原理

No magnetic field

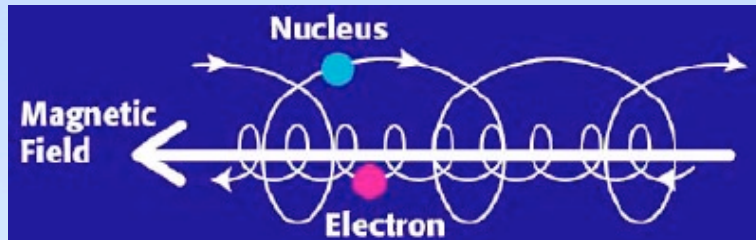


With magnetic field

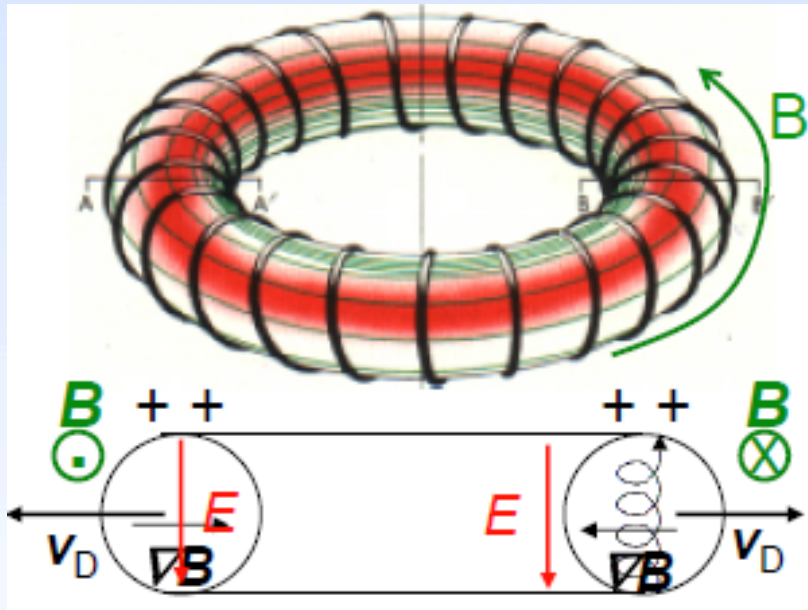


强磁场将能够电荷的运动限制在磁场方向。

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

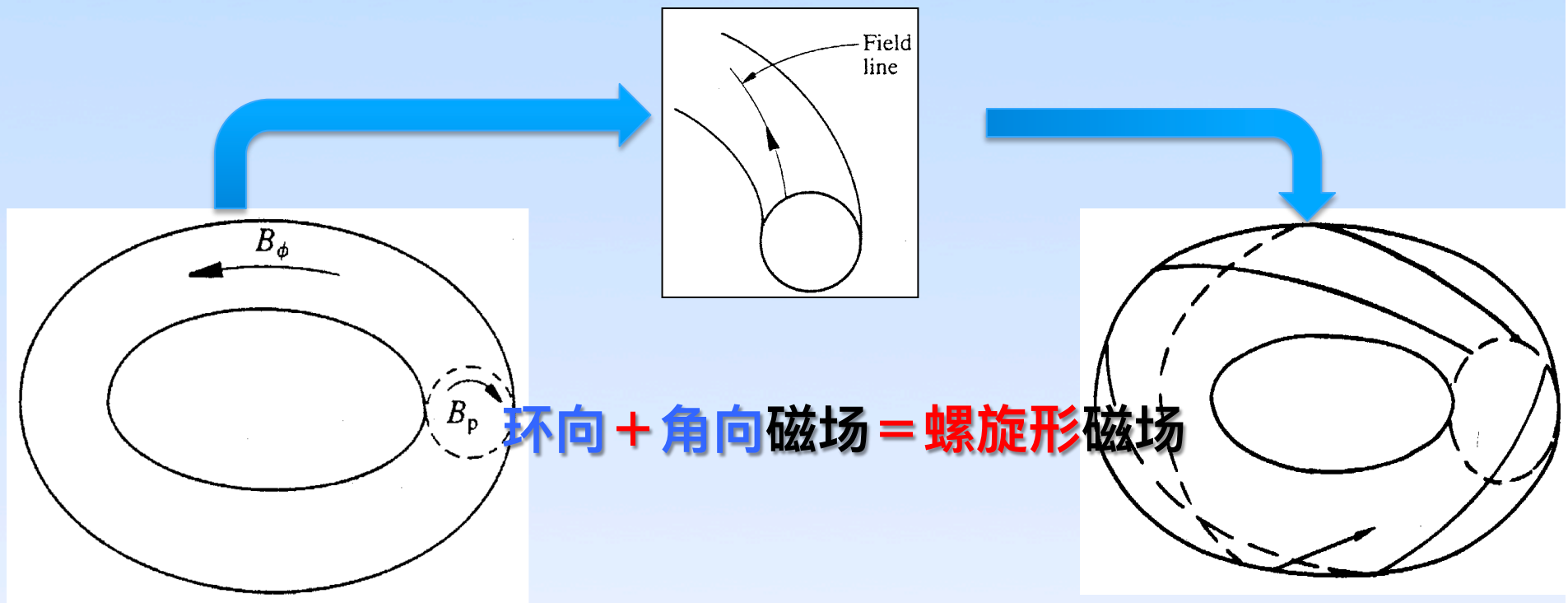


$$V_{\nabla B + R_c} = \frac{m(V_p^2 + V_{\perp}^2/2)}{qB^3} (B \times \nabla B)$$

- 电漂移引起粒子横越磁场损失

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

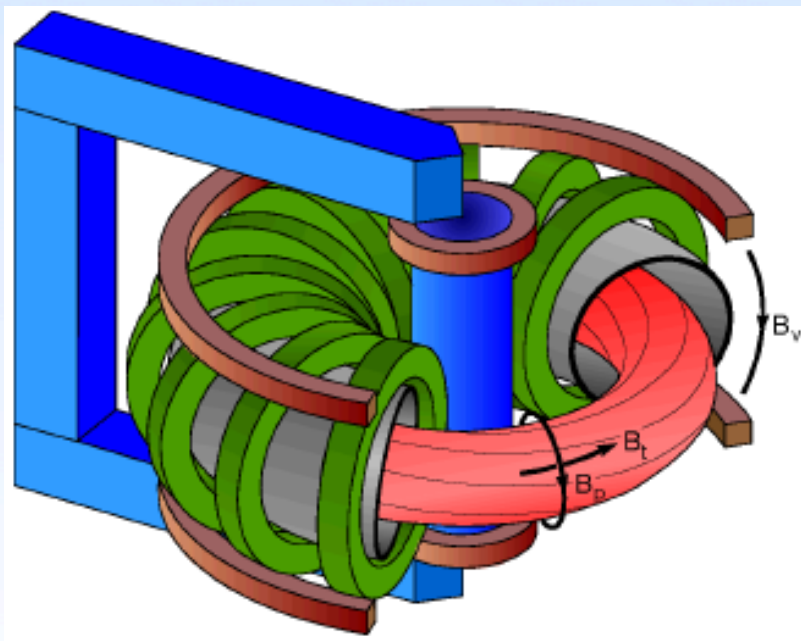
简单环形磁场：不能约束等离子体



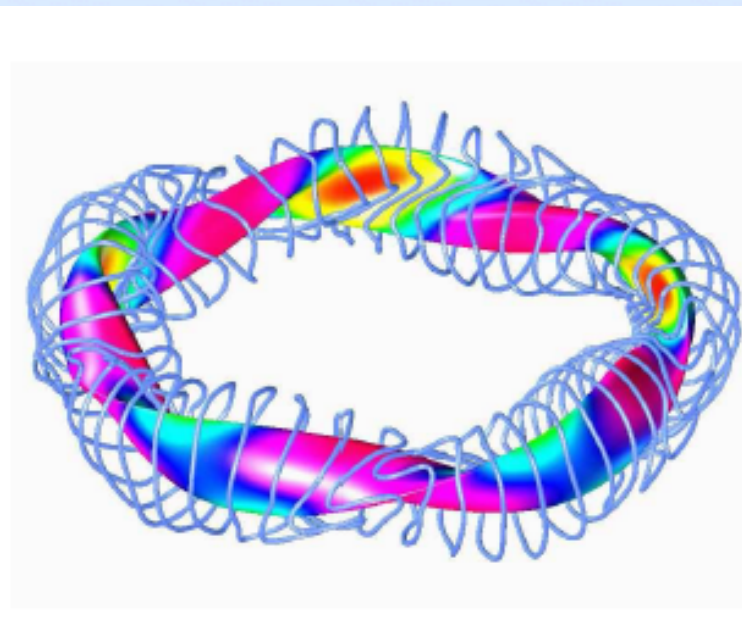
- 这就要求产生一个角向的磁场，一个沿着“圆环面”的磁场，在这个场的作用下，电子和离子也会沿着圆环面运动，这样电子和离子又回复到“中性化”的等离子体状态，电场就被消除了，往外漂移的力也就不存在了；
- 这种方式，也称为“螺旋变换”，两个场的迭加形成了一个螺旋形的磁场。

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（角）向磁场
 - 仿星器：外部复杂的线圈产生极角）向磁场



托卡马克

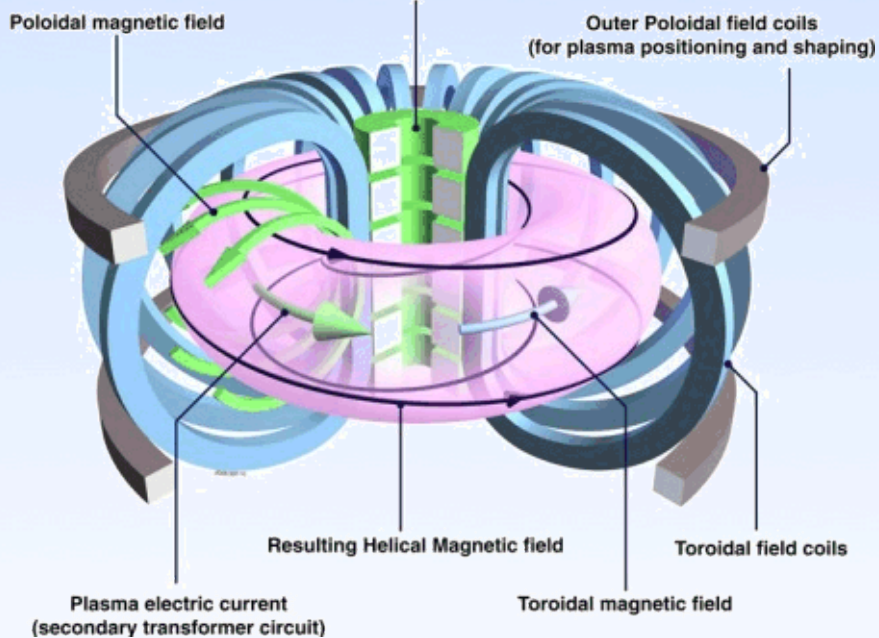
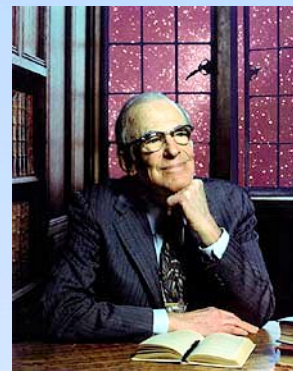


仿星器

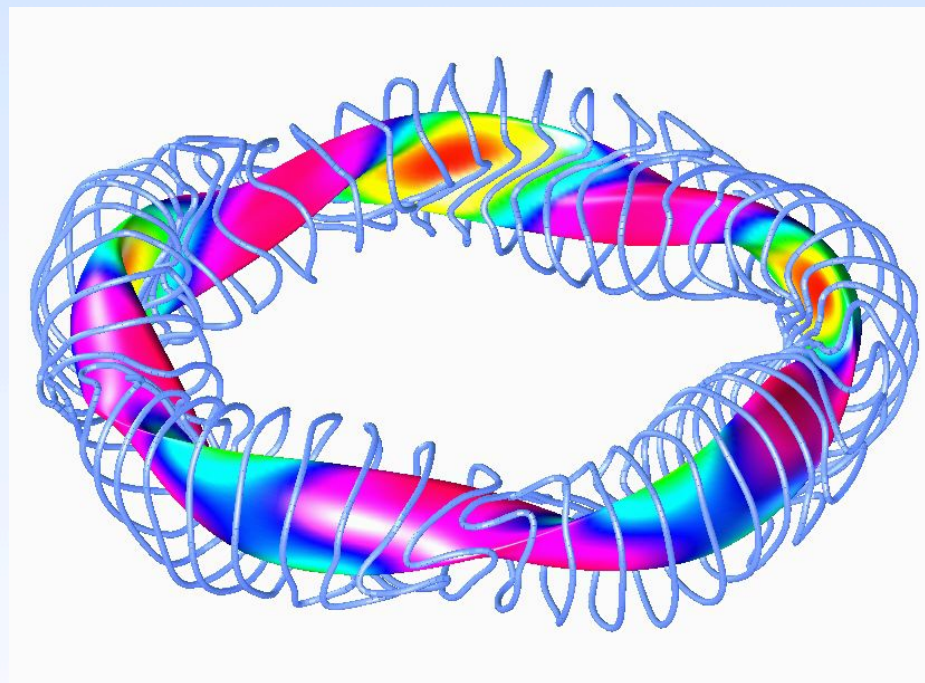
封闭的磁场位形可长时间约束等离子体



Inner Poloidal field coils
(Primary transformer circuit)



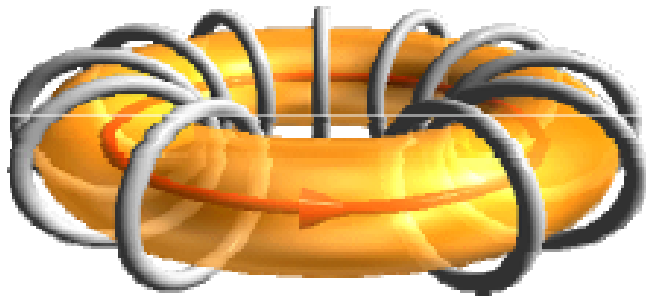
托卡马克磁场位形



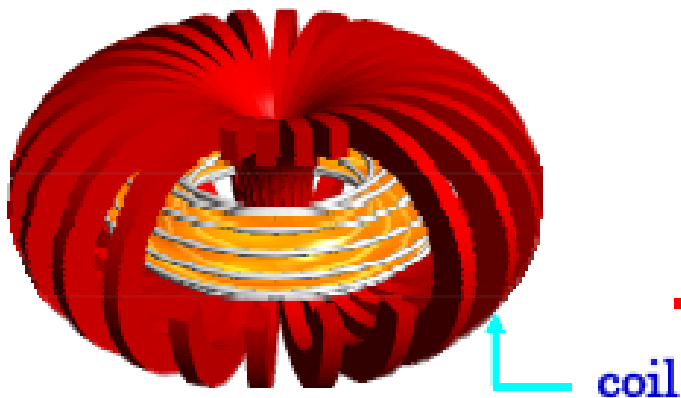
仿星器磁场位形

托卡马克磁位形

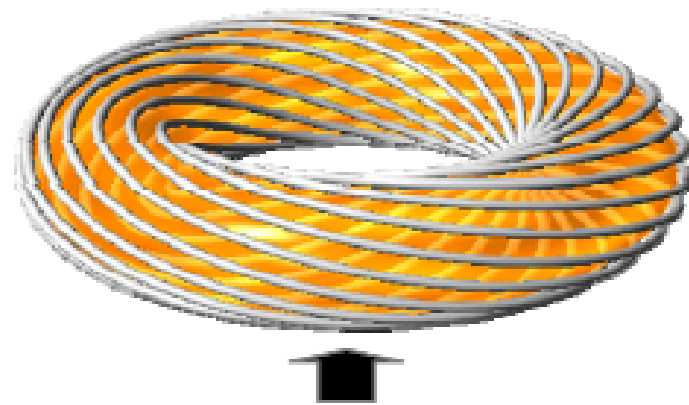
Current in plasma



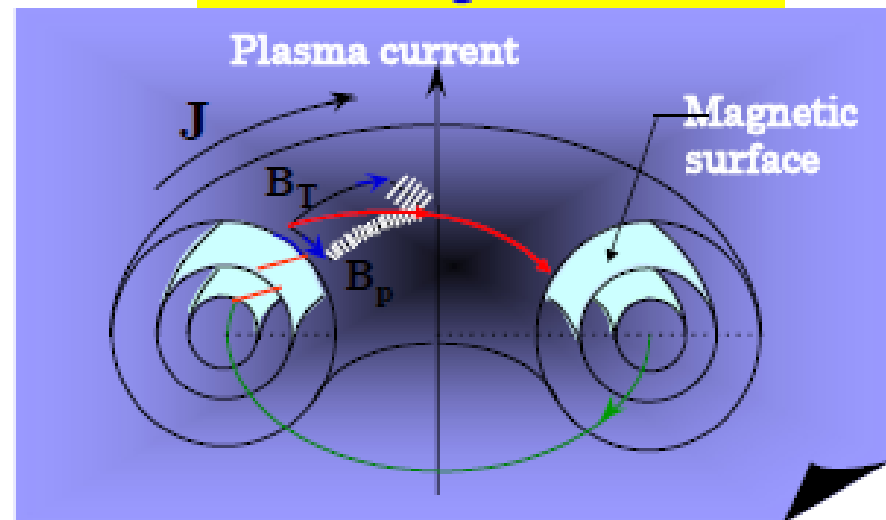
Current in coils



Tokamak concept

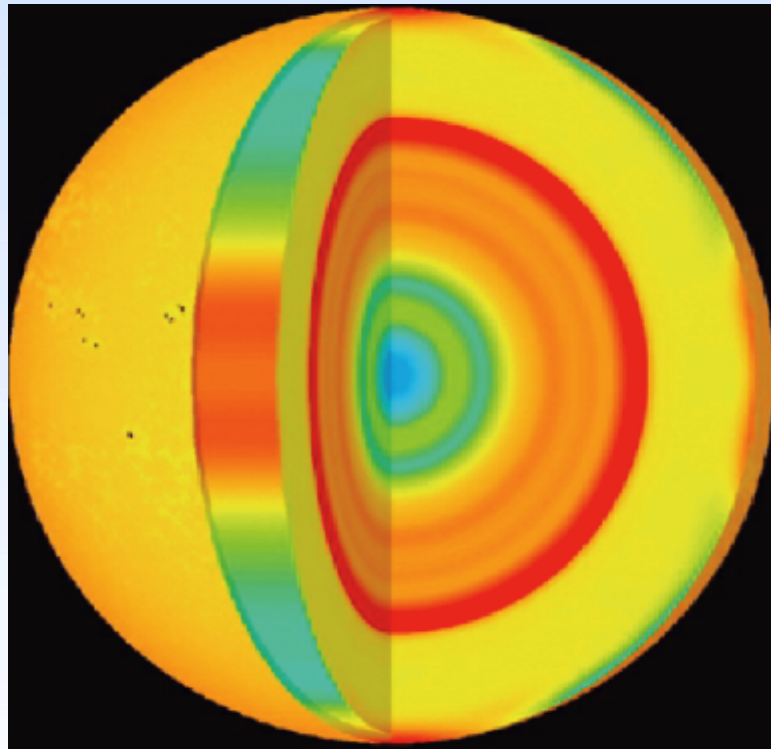


Magnetic line nest
Closed magnetic surface



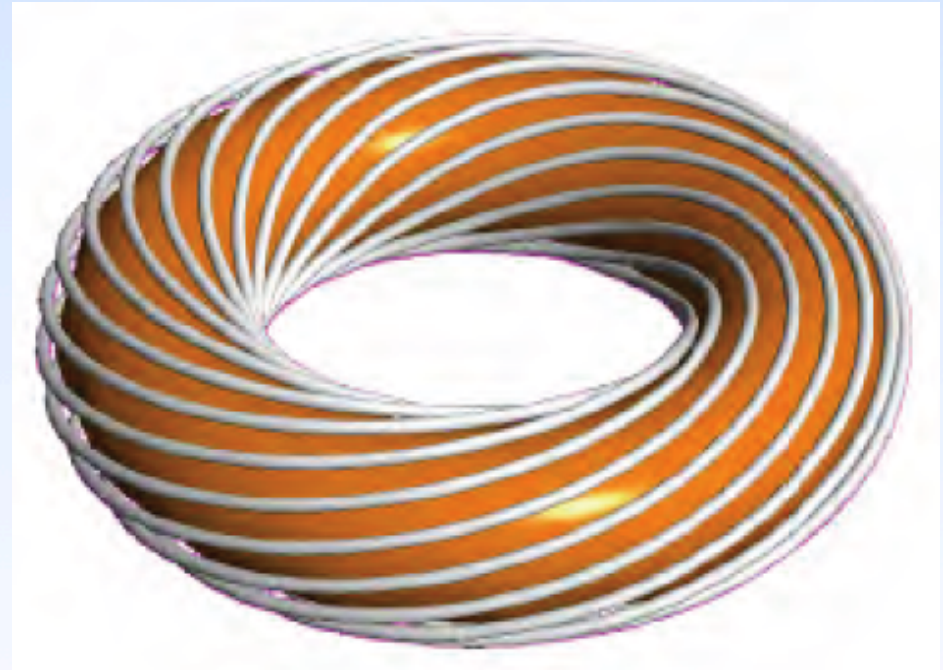
托卡马克磁位形：为什么需要这种位形？

太阳是靠引力场进行约束的，这个力指向球心，粒子受力就是力线方向，更重要的一点是粒子是否带电荷，基本上不影响受力情况，这是与磁约束根本区别的地方。这种约束状态是“球形”



受力沿场方向

在磁约束情况下，就必须考虑到等离子体是带电粒子体系，在磁场中受到了洛伦兹力的作用，这个力是垂直于磁场。在这种情况下，约束状态是“圆环面”，简单形象一点来说是“轮胎”。



受力垂直于场方向

托卡马克磁位形：为什么需要这种位形？

数学依据：

法国数学家庞加莱 (1854-1912)证明的一个定理“能够被向量场所覆盖且没有任何定点的封闭面将仅限于圆环面。 [Closed surface that can be covered with vector field without fixed point is restricted to a torus.] ”

因此对于磁约束聚变而言，等离子体必须被约束在这种封闭位形内，任何的零点（定点）的存在，都会使得等离子体漏出

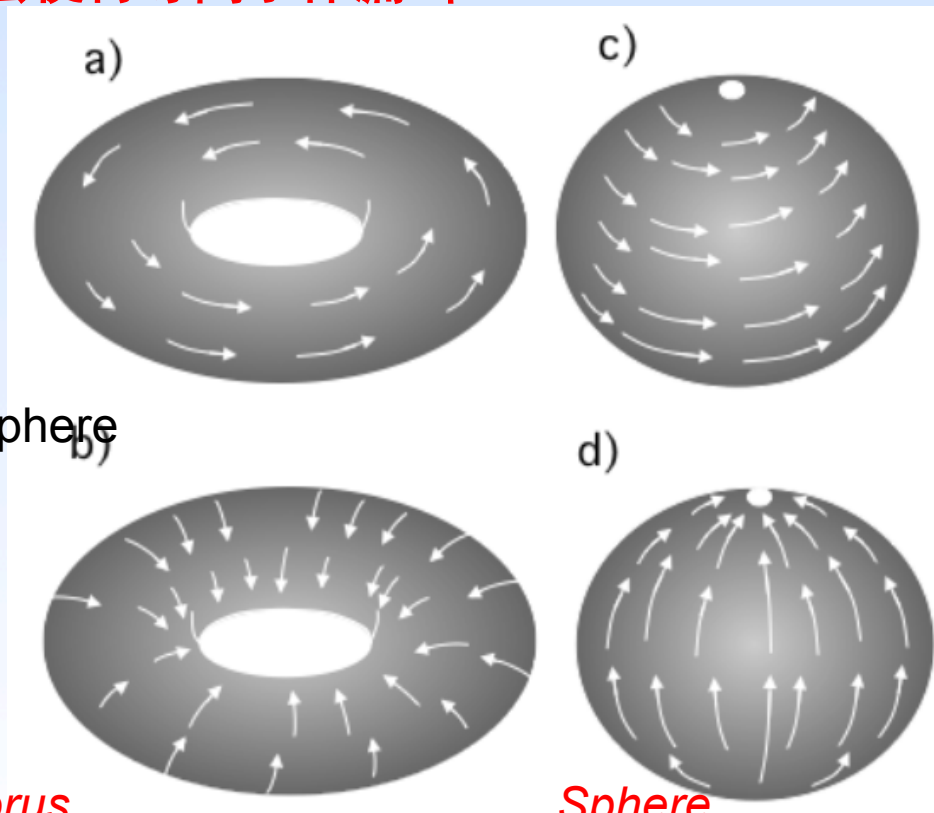


庞加莱

Magnetosphere

Torus

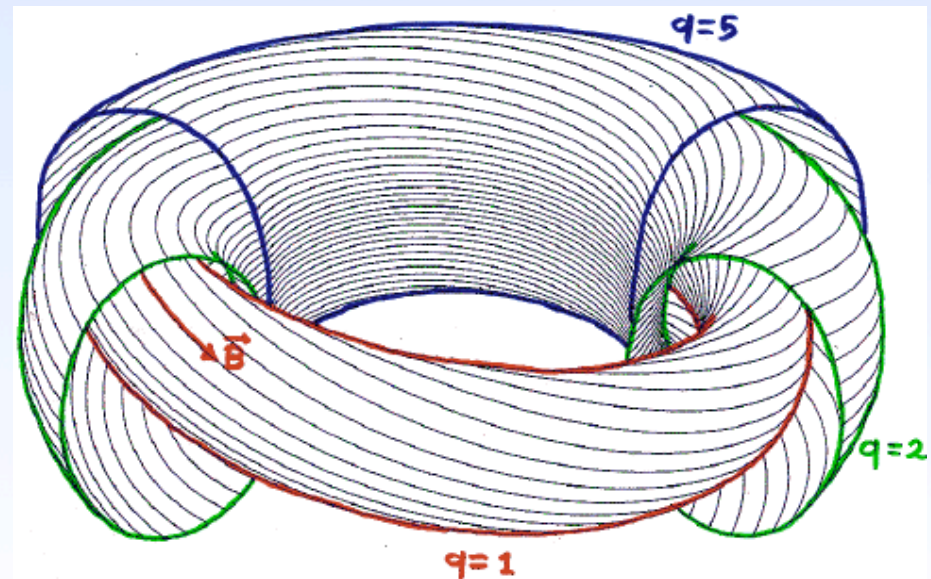
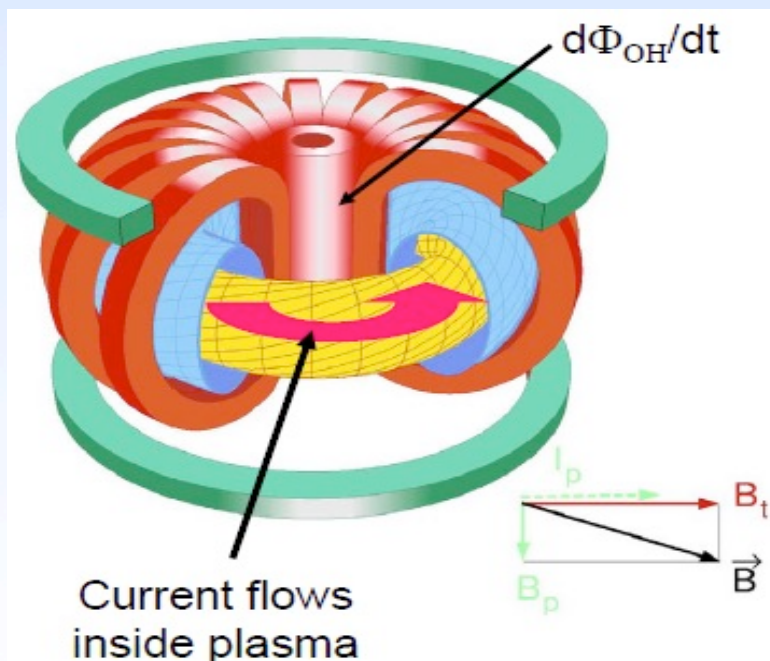
Sphere



托卡马克

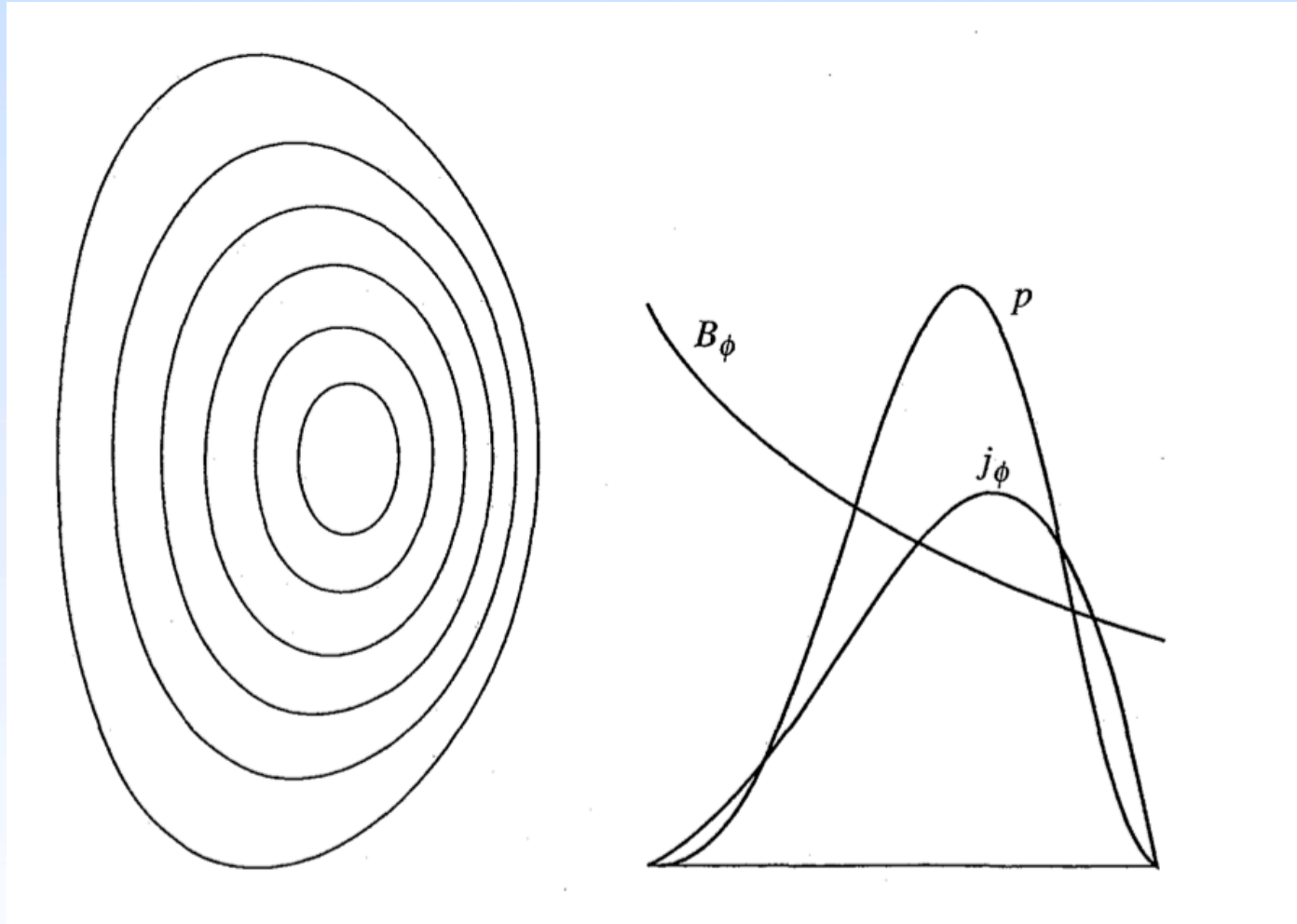
- 等离子体电流用于形成螺旋变换环形磁场位形
- 闭合磁面与安全因子 $q(r) = rB_T / (R_0 B_P)$
- 等离子体电流用于加热等离子体（欧姆加热）

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

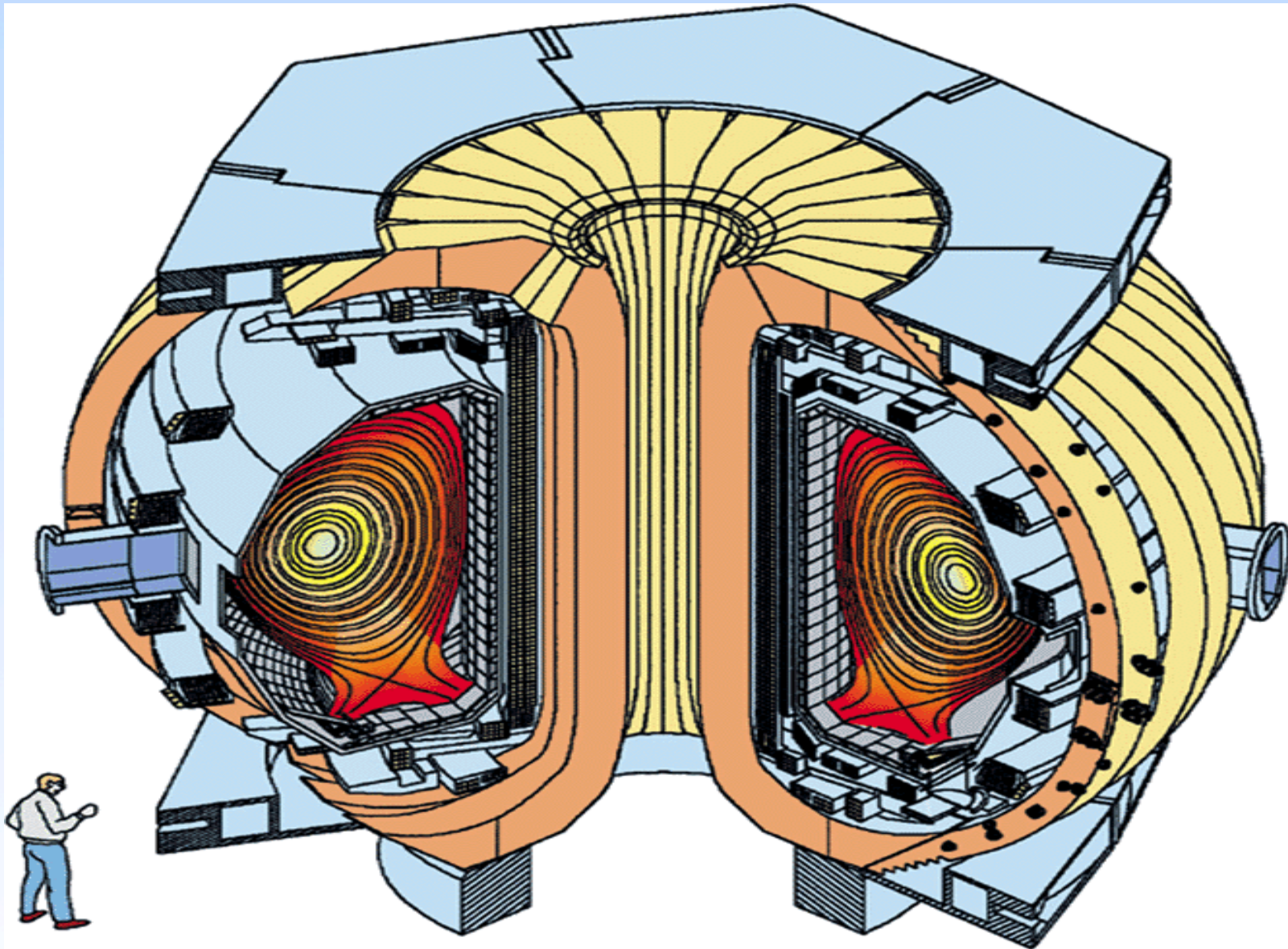


托卡马克

典型的等离子体参数分布

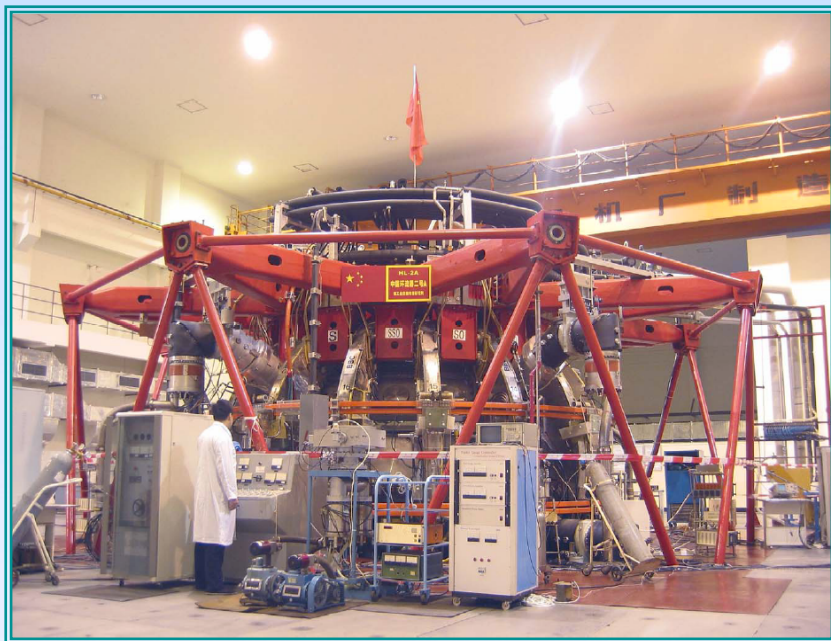


托卡马克磁场位形

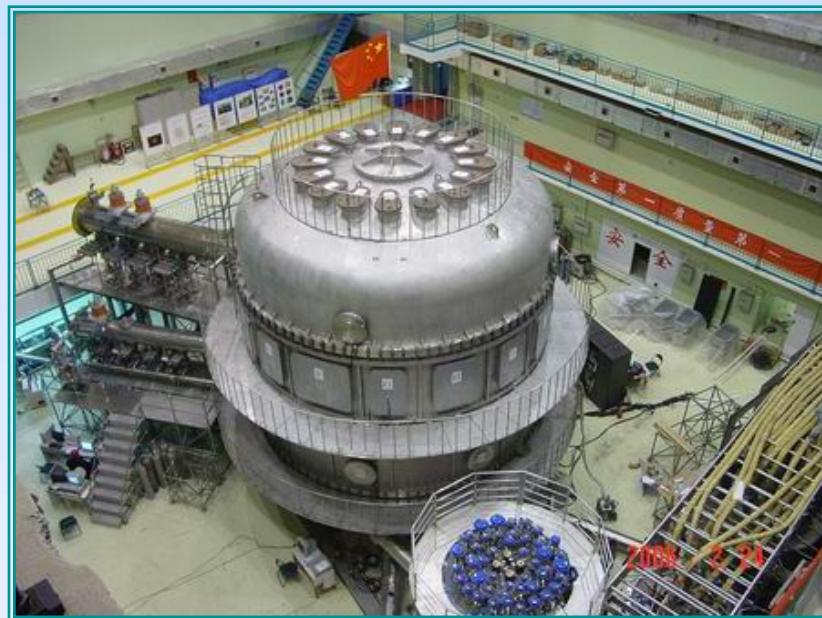


托卡马克的磁力线可形成磁笼结构。其中环向磁场由外场线圈产生；极向磁场由等离子体电流产生

中国的主要磁约束聚变装置

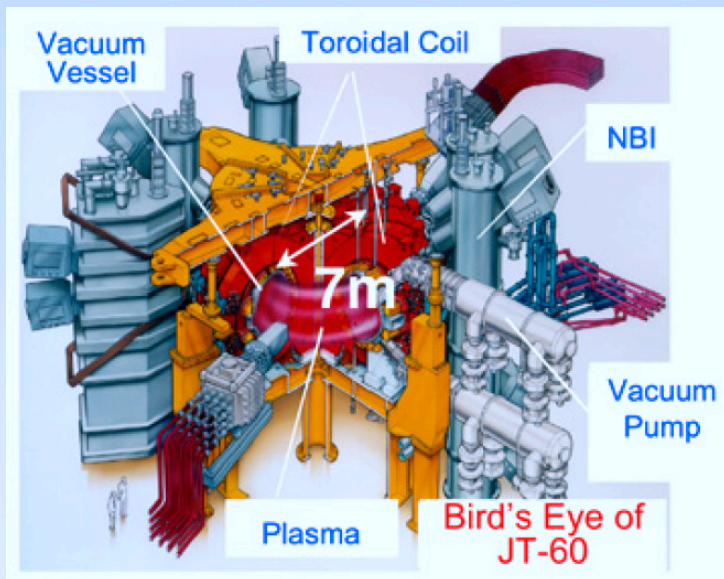


HL-2A@西南物理研究院

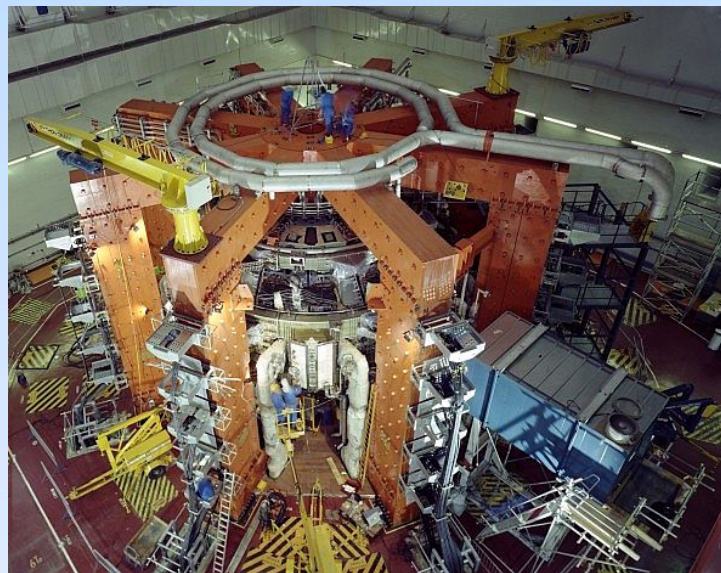


EAST@等离子体物理研究所

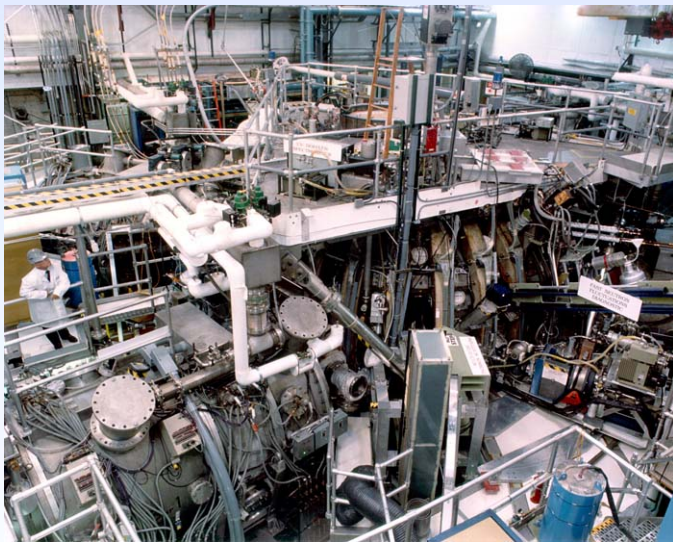
国外主要磁约束聚变装置



JT-60@日本



JET@英国

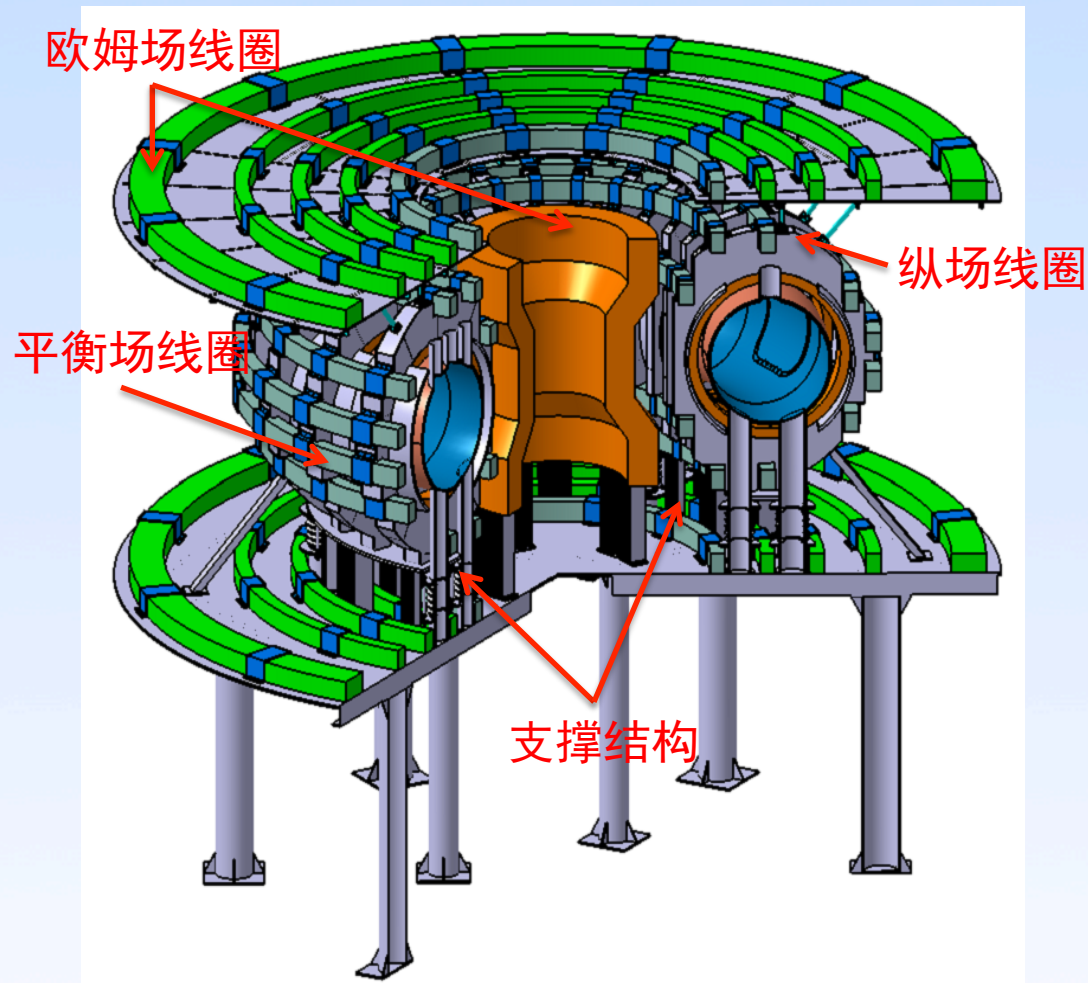


DIII-D@美国



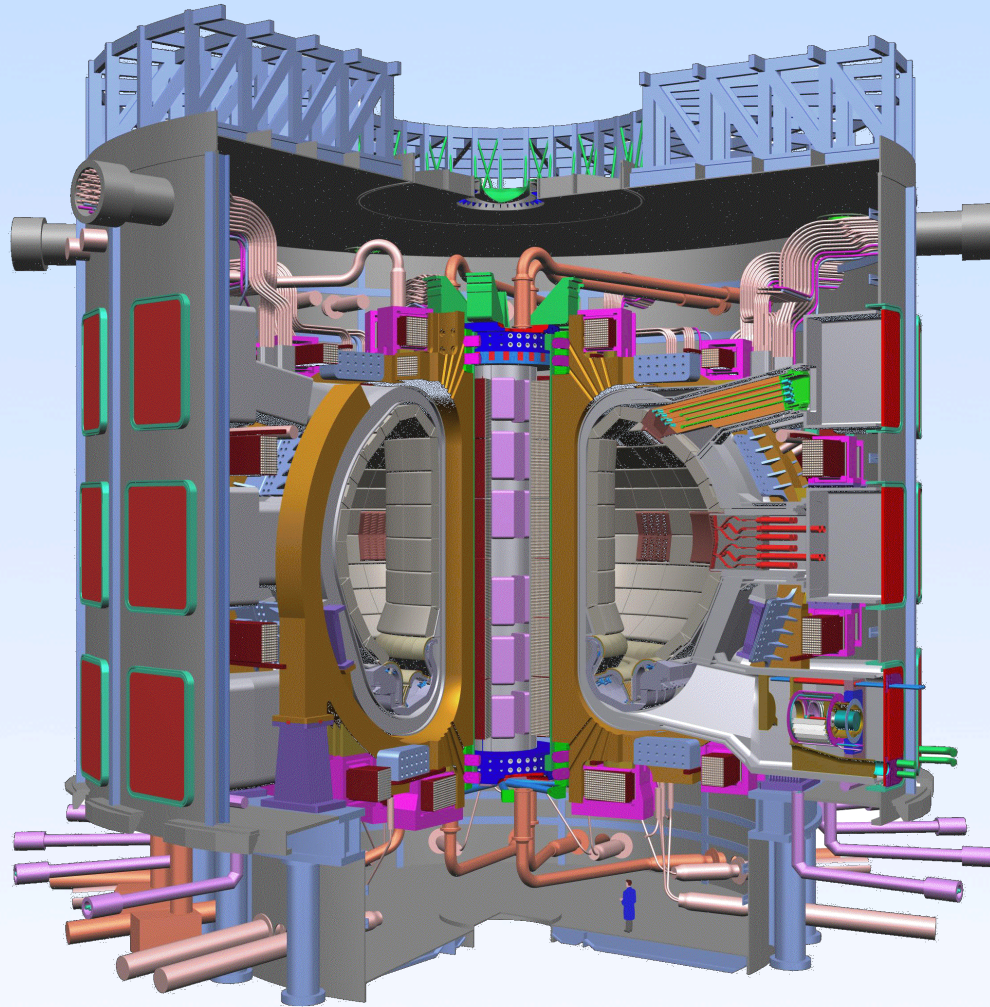
Tore Supra@法国

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

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

$$Q > 10$$

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

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

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

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

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

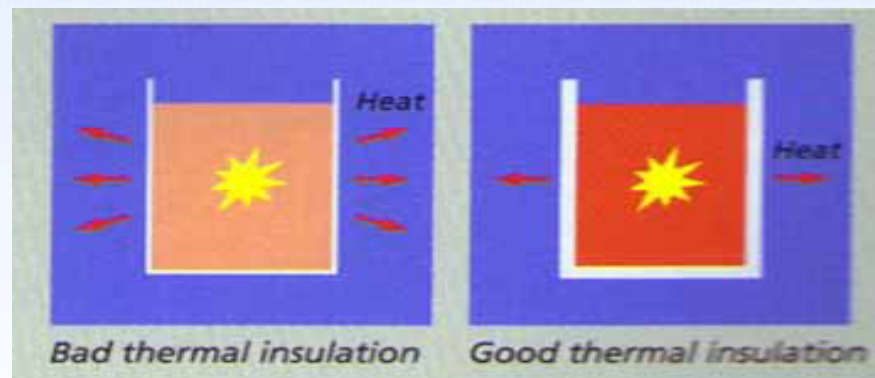
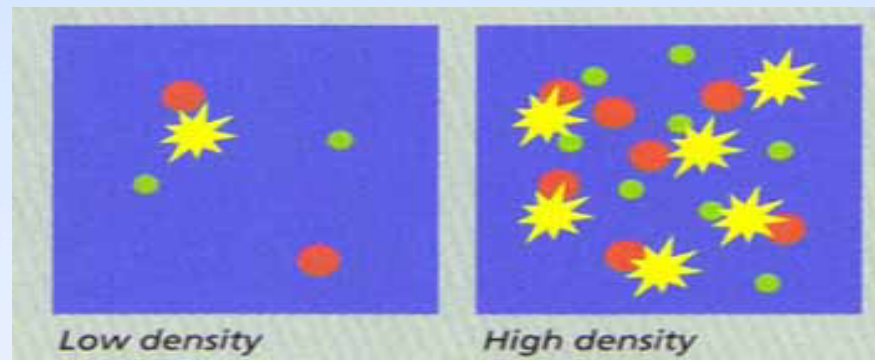
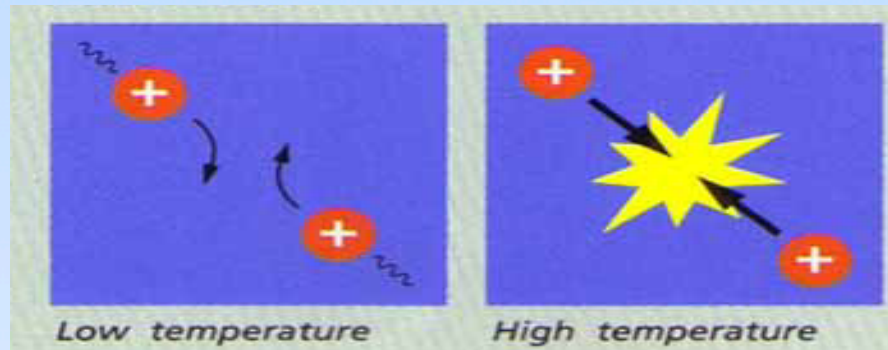
$$V = 837 \text{ m}^3$$

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

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

ITER是国际最大的聚变研究计划。

聚变反应的要求



- 温度：必须将等离子体加热和维持在高温状态，以利于启动和维持聚变反应；
- 密度（粒子数）：维持足够高的等离子体密度使得聚变反应高效；
- 约束性质：保持能量约束（容器的绝热性）以维持高温

聚变反应的要求（聚变三重积）

- 温度 T (keV = 千万度)
- 密度 n (m^{-3})
- 能量约束时间 τ_E (s)

聚变燃料已可被加热到**2 – 4 亿度**的高温。

在日本最大的托卡马克JT-60U上表征聚变反应率的最重要参数：**温度 × 密度 × 能量约束时间** (即聚变三重积) 已达到

$$n T \tau = 1.5 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$$

(点火条件 $> 5 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$)

我们已取得的进展

- 聚变三重积（**温度X密度X能量约束时间**）在过去的几十年间提高了近**10000**倍；
- 在最大一代普通托卡马克（JET、TFTR）上实现了脉冲和可以控制的氘氘聚变反应，JET最大**聚变输出功率已达到 16.1兆瓦**；
- Q 值在 D - T 反应下 **已接近1**；在 JT-60U 上，等效的 Q 值已达到 **1.25**。

$$Q = \text{聚变输出功率} / \text{输入加热功率}$$

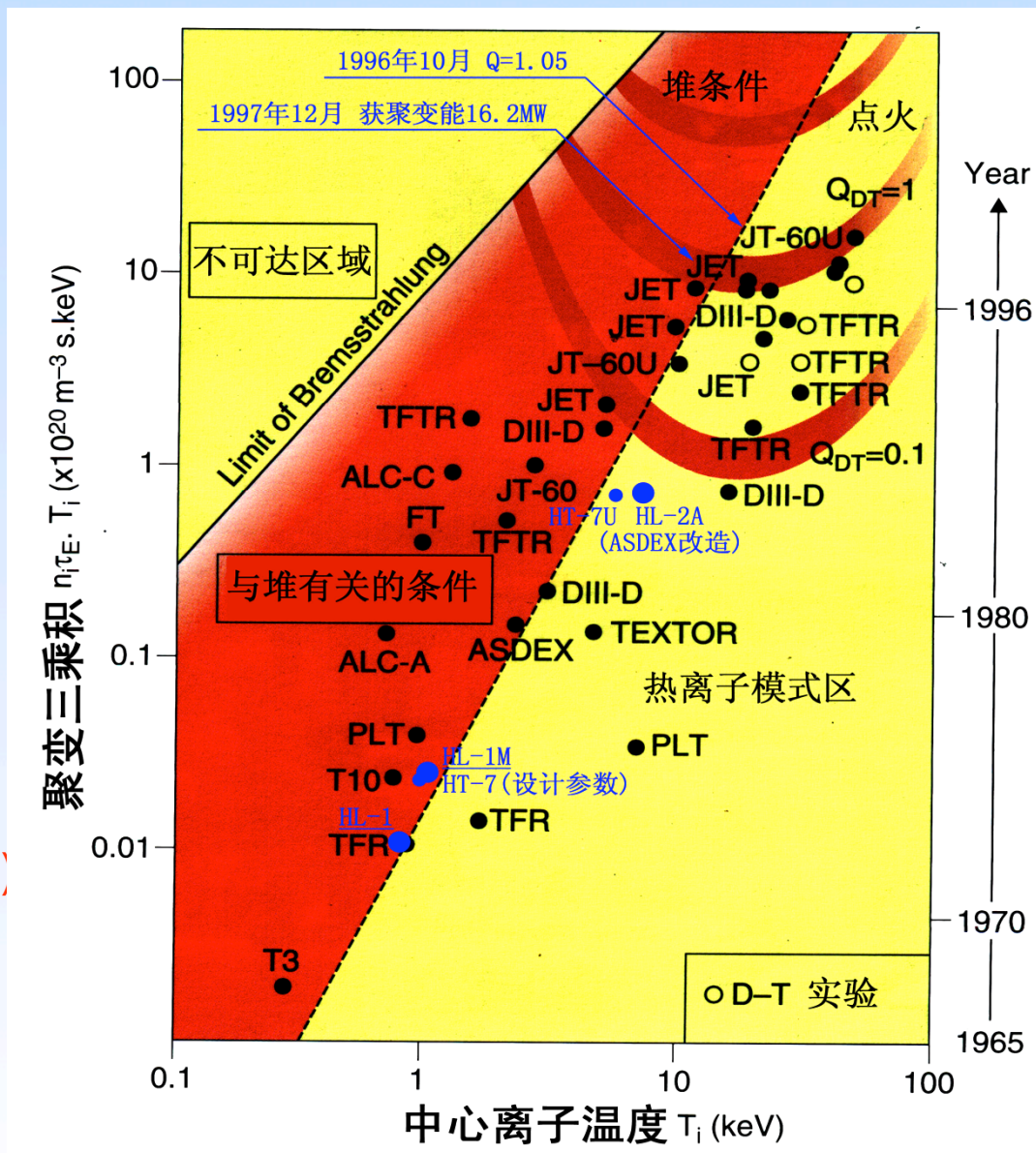
我们已取得的进展

Q = 1, 得失相当 (Break-Even)

即加热等离子体所用的功率=聚变输出的功率

Q > 1, 自持燃烧 (Ignition)

聚变生成的氦离子 (α 粒子, 3.5 MeV) 把能量交给等离子体, 代替了原来外加加热功率, 维持热核聚变 (即持续地“燃烧”)



建堆必须解决的重大科学问题

物理问题：

- 燃烧等离子体的约束和输运
- 宏观磁流体的不稳定性、运行极限、破裂
- 燃烧等离子体与壁相互作用
- 高能粒子物理
- 功率和粒子控制
- 稳态运行
- 燃烧等离子体的诊断
- 等离子体动理学控制

提纲



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

1

等离子体的定义与分类

2

等离子体物理发展简史

3

磁约束聚变简介

4

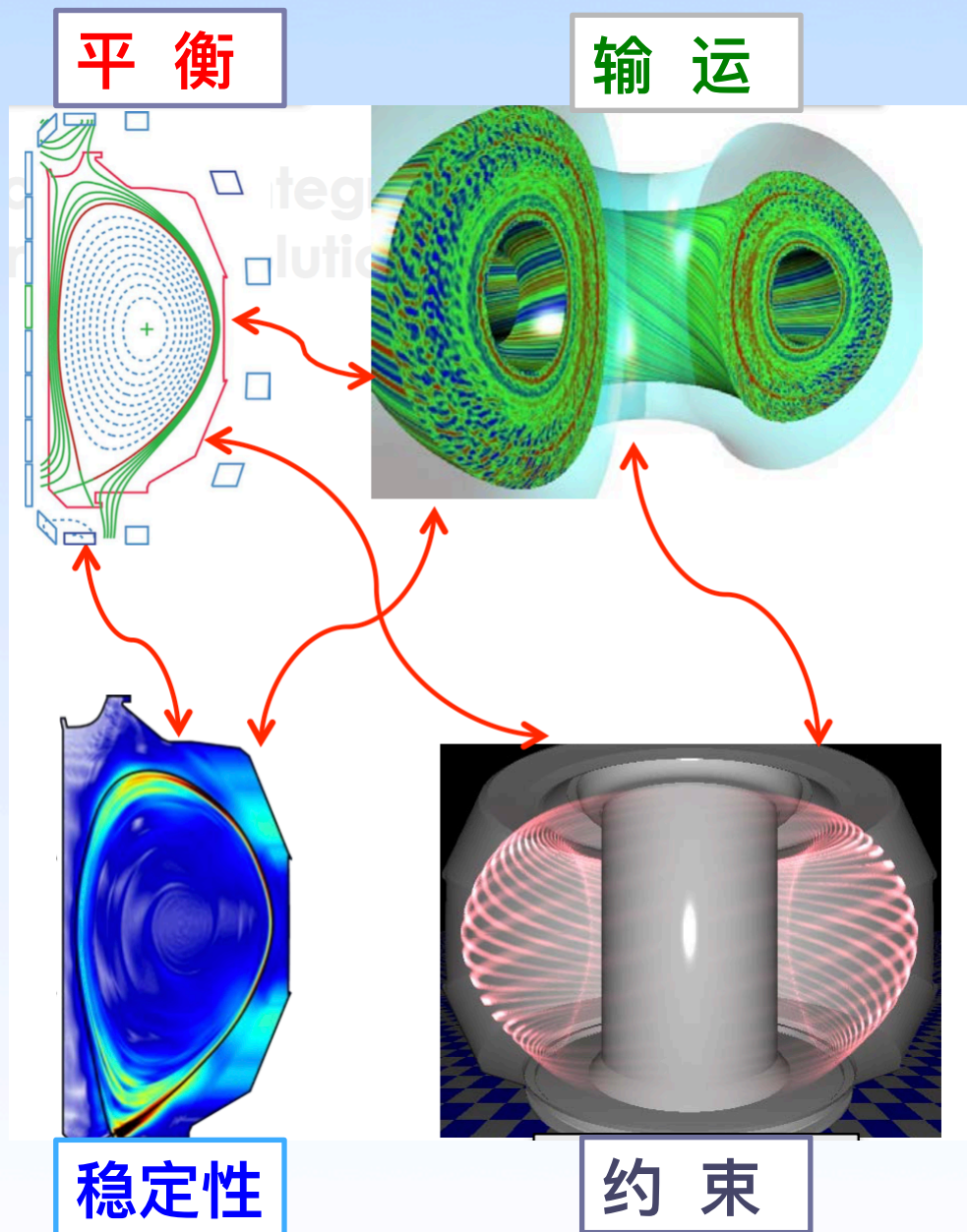
磁约束聚变中的一些物理问题

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

托卡马克的主要物理问题

- 托卡马克中的平衡与稳定性、约束与运输是最为根本和重要的问题，它们之间还存在有很强的相互作用，各种问题之间的耦合程度相当高
- 在托卡马克中，等离子体的形状、等离子体电流和等离子体压强剖面怎样才合适，怎样才能产生和控制？
- 在托卡马克中，什么样的约束、稳定性如何才能达成聚变增益的目标？



平衡和稳定性问题

磁流体平衡

磁流体平衡:

- Grad-Shafranov 方程是托卡马克中力平衡的描述

$$\Delta^* \psi = -\mu_0 R J_\varphi(R, \psi) \quad \leftarrow \text{Ampere's Equation}$$

$$J_\varphi = RP'(\psi) + \frac{\mu_0 FF'(\psi)}{4\pi^2 R} \quad \leftarrow \text{Radial Force Balance}$$

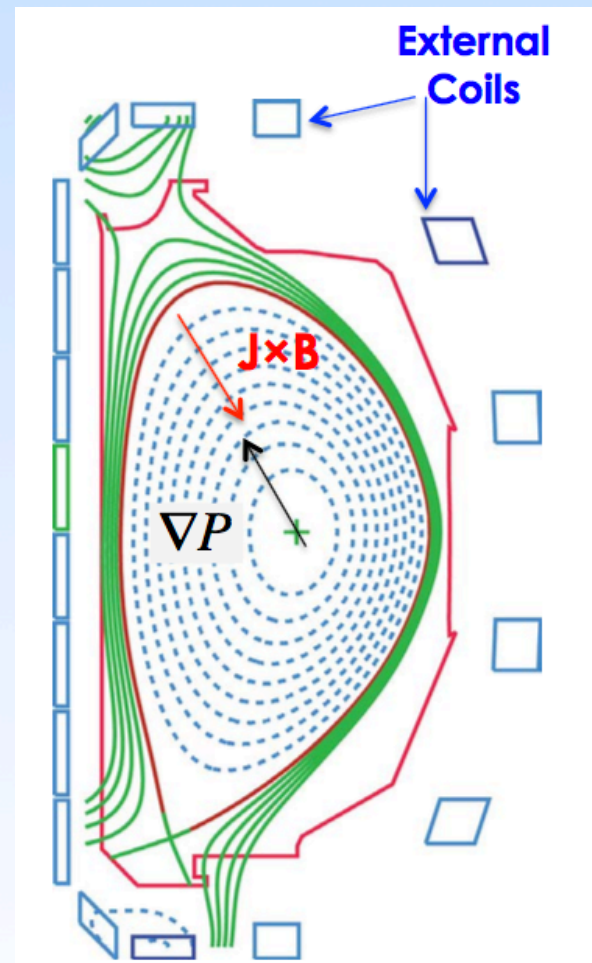
Stream Functions

$$\Delta^* \psi = -\mu_0 R \left(RP'(\psi) + \frac{\mu_0 FF'(\psi)}{4\pi^2 R} \right)$$

- 产生嵌套的磁面方程，磁面上等离子体的温度、密度、电流密度恒定；
- 平衡将提供等离子体形状、电流分布、等离子体储能等关键参量，是运行和实验分析的基本出发点。

$$\nabla P = J \times B$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J$$



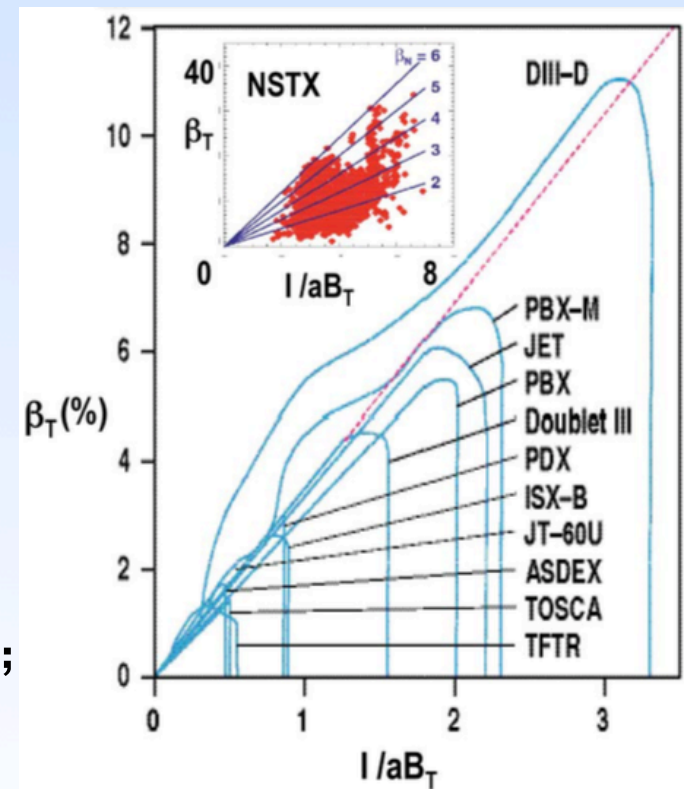
磁流体平衡

磁流体平衡：Grad-Shafranov 方程 + 托卡马克中实测的电流分布、压强剖面分布等关键参量，经过迭代重建 → 真实的托卡马克平衡描述

- 托卡马克得以稳定运行的关键；
- 分析物理实验数据和物理建模的根本；
 - 平衡情况等离子体性质的统计分析 → 一些重要的规律和定标律，是托卡马克物理实验设计和未来聚变堆物理设计的基本出发点，如比压定标律、运行方案的预测等；
 - 对于偏离平衡的扰动，可以研究它的的宏观磁流体稳定性质；

$$\beta_T \propto nT / B_T^2$$

$$\beta_N = \beta_T / (I_P / aB_T)$$



宏观磁流体稳定性

宏观磁流体 (MHD) 不稳定性:

- 偏离平衡的扰动, 也可以说是位移不稳定性 → 磁流体 (MHD) 不稳定性;
- 线性磁流体方程描述 → 任何一个小扰动可展开为独立的 Fourier 分量;
- 扰动模式的稳定性决定于 ω 的虚部的符号。如果 $\omega_i > 0$, 扰动的不稳定的; 如果 $\omega_i < 0$, 扰动是稳定的。

$$F(\vec{r}, t) = F(\vec{r})e^{-i\omega t}$$

$$\omega = \omega_r + i\omega_i$$

磁流体稳定的Kruskal-Shafranov判据: 处处 $q(r) > 1$ 。只须 $q(a) > 3$, 条件可满足。

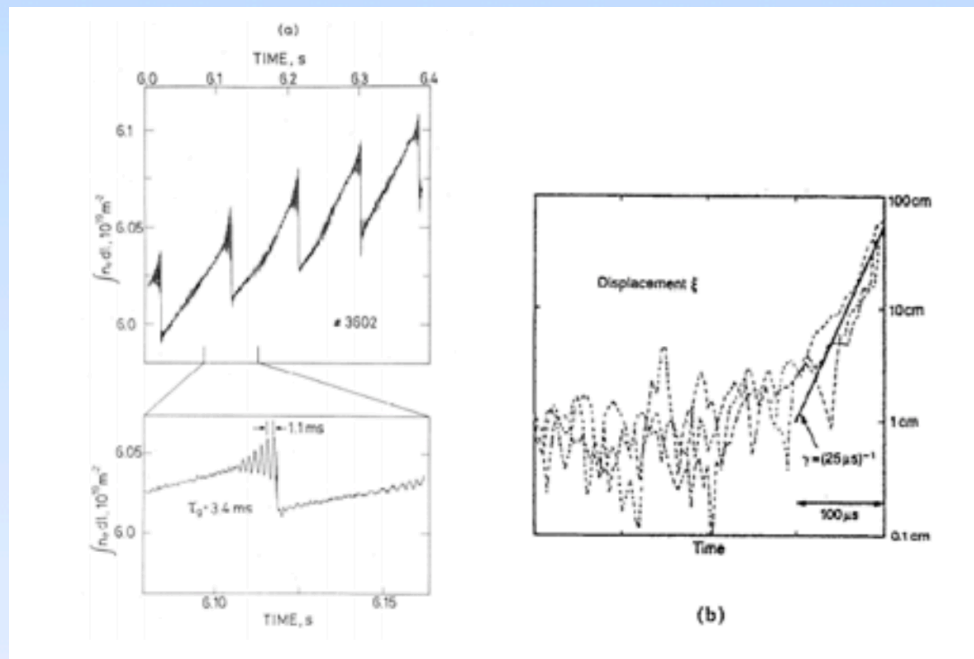
托卡马克中MHD不稳定性的模式的特征模数为 m (极向) 和 n (环向), 一般发生在 $m/n = q$, m 、 n 较小的共振面上。其驱动源可以是等离子体电流产生的磁能 (如撕裂模、低扭曲模), 也可以是压强梯度 (如交换模)。

| 名称 | 性质 | 形态 | 驱动源 |
|--------|----|-----|-----------|
| 扭曲不稳定性 | 理想 | 低m | 电流梯度/压强梯度 |
| 撕裂模 | 电阻 | 低m | 电流梯度 |
| 内扭曲模 | 理想 | m=1 | 压强梯度 |
| 气球模 | 电阻 | 高n | 压强梯度 |

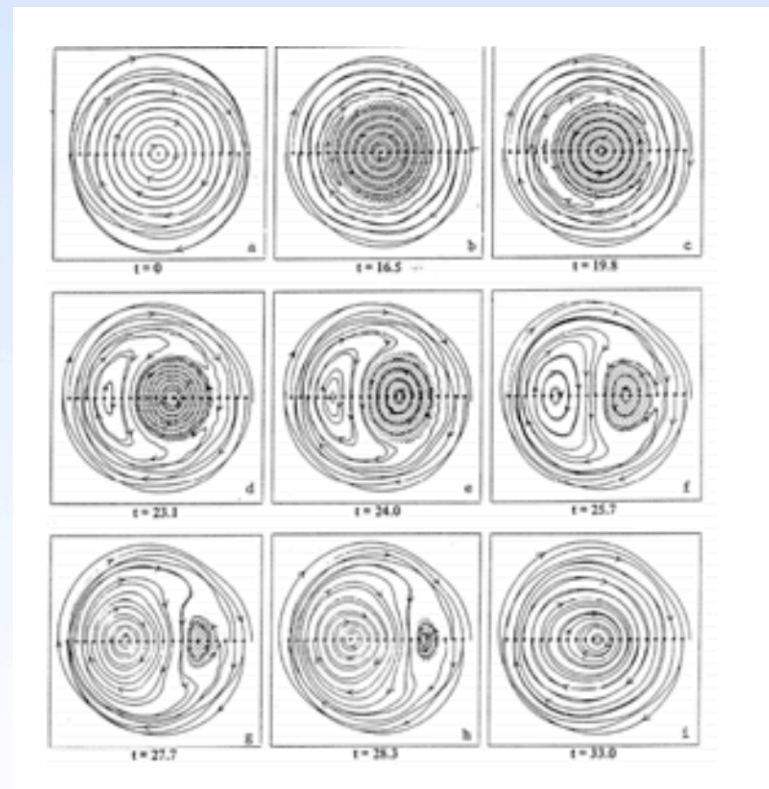
宏观磁流体稳定性及平衡

- 决定了**托卡马克基本运行区间**
 - 比压极限、密度极限及能量约束
 - 最大等离子体电流、比压和压强梯度
 - 接近极限以及不稳定性均引发破裂
- **研究内容**：触发机制、基本分类、实验观测和理论模拟
- 建堆必须考虑的**几种MHD不稳定性**：
 - 锯齿振荡、（新）经典撕裂模、电阻壁模、误差场锁模
 - 先进运行方案下的宏观磁流体稳定性
- 可预见的最大的危险：**等离子体大破裂**
 - 破裂的特征、原因及频率
 - 热淬灭阶段的能量损失和沉积
 - 电流淬灭阶段的动力学
 - 逃逸电子和逃逸电流
 - 模型和模拟
 - 破裂的抑制、预测及缓解

宏观磁流体不稳定性：锯齿振荡

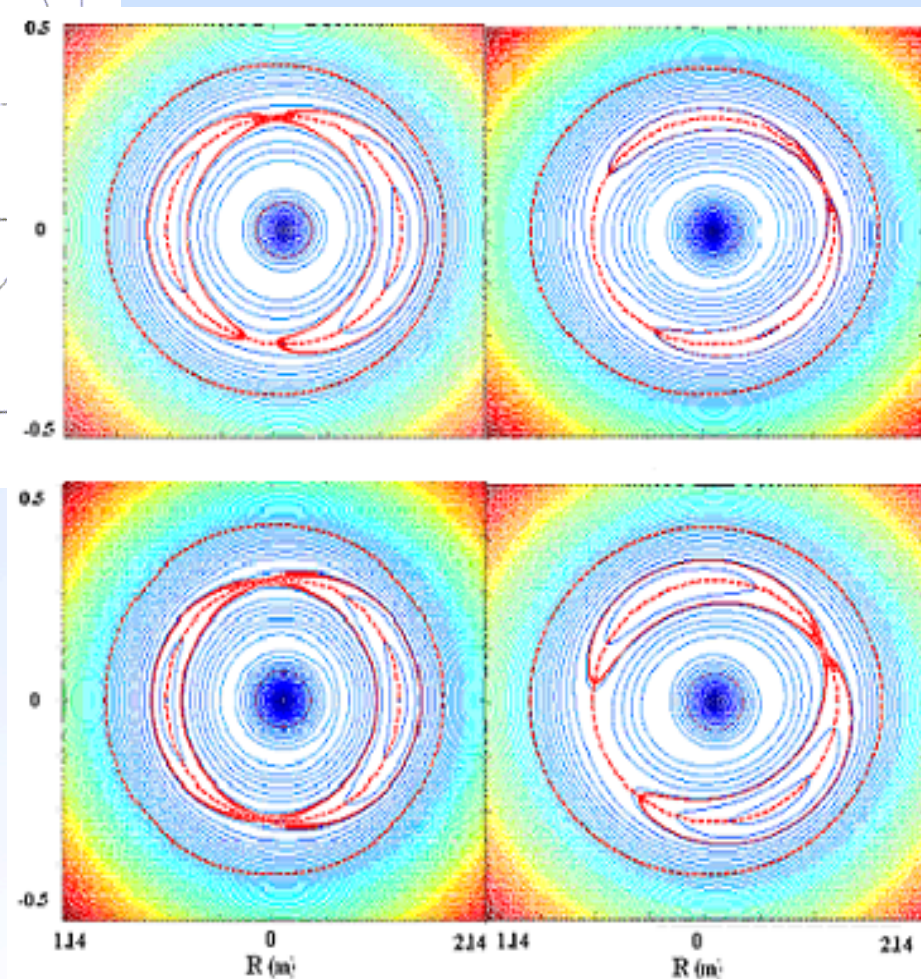
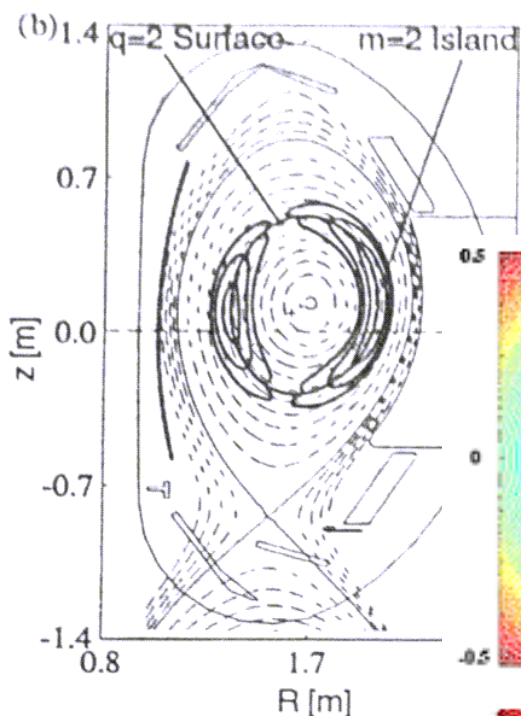
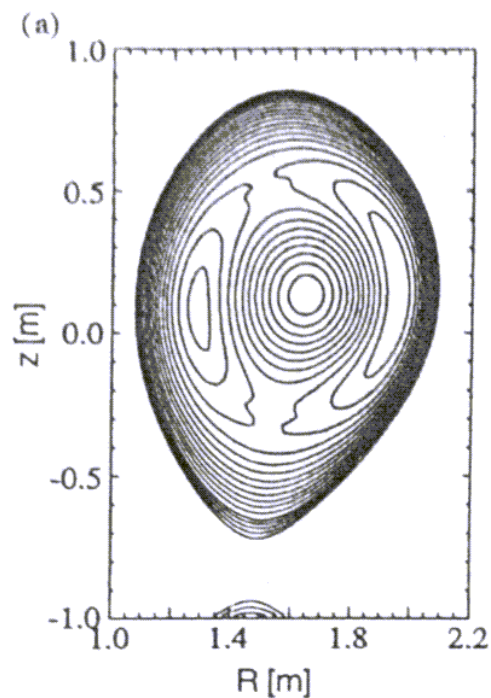


JET上观测的实验结果



Kadomtsev的解释-快速磁重联

宏观磁流体不稳定性：新经典撕裂模



新撕裂模发生在 $q = m/n$ 为有理数的有理面上，在这个（这些）有理面上会产生一个小的扰动电流

宏观磁流体不稳定性：电阻壁模

➤ 基本描述及成因：

- 高自举电流份额使得长波长的外kink模失稳
- 导体壁可以致稳， β 大于no-wall β 极限
- 有限电导率的壁，增长率仍正→慢增长的电阻壁模
- 存在临界旋转速度，当速度高于此，致稳
- 拖动致稳机制：阿尔芬continuum阻尼，离子朗道阻尼
- 旋转致稳：在wall β 极限，旋转速度大于由 β 和 q_{95} 决定的临界值
- 共振场放大（RFA）随转动等离子体压强增大，接近no-wall β 极限

➤ 控制方法：

- 主动控制线圈：非轴对称、闭环传递函数、Sensor的选择
- 旋转驱动：旋转共振场或NBI等

宏观磁流体不稳定性：误差场锁模

➤ 基本描述及成因

- 约束场线圈不完美和安装失准，铁素体材料存在，还有连接、接头等
- $B_r/B_T \sim 10^{-4}$ 可以导致低 m/n 锁模 → 非旋转电阻性MHD不稳定性，存在锁模阈值。停止旋转后，模式幅度增长 → 破裂

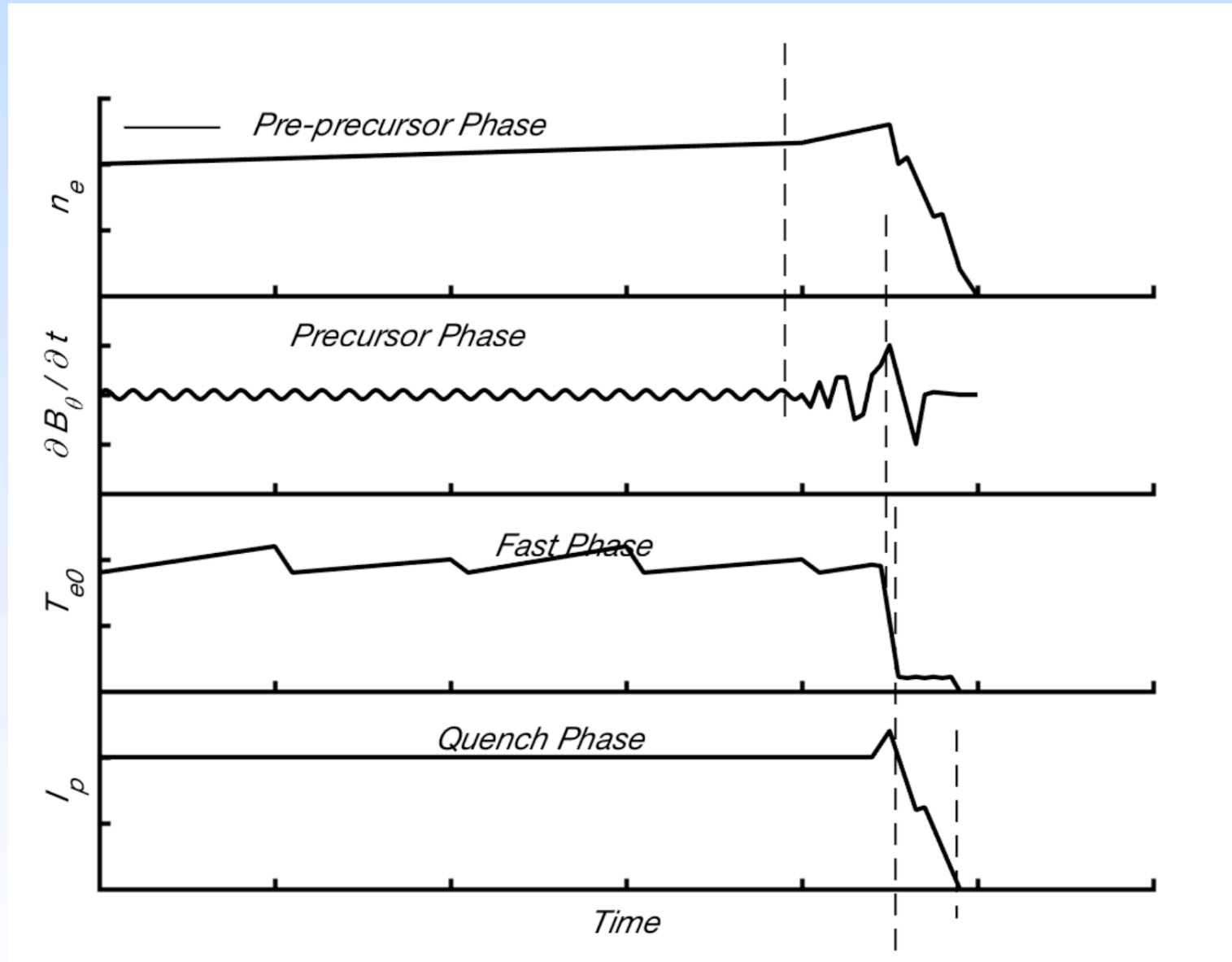
➤ 控制方法：

- Braking effect EM torque 垂直粘滞项
- 谐波分量的效应 设计校正场
- 旋转效应 动量注入 (NBI) 或是旋转共振扰动场

➤ 遗留问题：

- 误差场驱动锁模阈值同2/1新经典撕裂模极限的关系 → 提供种子磁岛？
- β 上升锁模阈值下降(不同的加热模式不同)？

宏观磁流体不稳定性：破裂



约束和运输问题

约束和输运发展历史

- **1960s:** 库伦碰撞输运决定了欧姆加热的温度较低的等离子体
 - 温度越高，约束越好
- **1970s-80s:** 发现在NBI加热下的无碰撞等离子体在高温情况下约束变差，输运加大
 - 湍流输运主导 输运系数~100倍经典输运
- **1980s-90s:** 发现从低约束模式向高约束模式转化
 - 局域的湍流被剪切流所抑制 → 输运位垒；
 - 分叉被外部加热或旋转控制所激发；
- **1990s-2000s:** 由于大规模集成模拟的成功进行，对湍流的物理理解进入一个快车道
- 将目前的物理理解外推到大尺度、自持燃烧和稳态运行的等离子体是目前的主要挑战

经典输运

- 横越磁场扩散系数

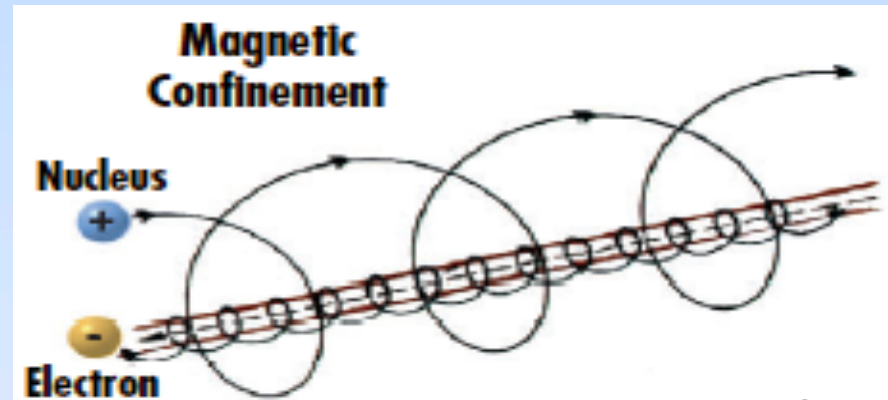
$$D \approx v_{ei} \rho_{ce}^2$$

$$\chi_e \approx D$$

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

其中 ν , 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 $\tau = \nu^{-1}$



磁约束聚变的能量约束时间

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

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

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

W 等离子体总内能

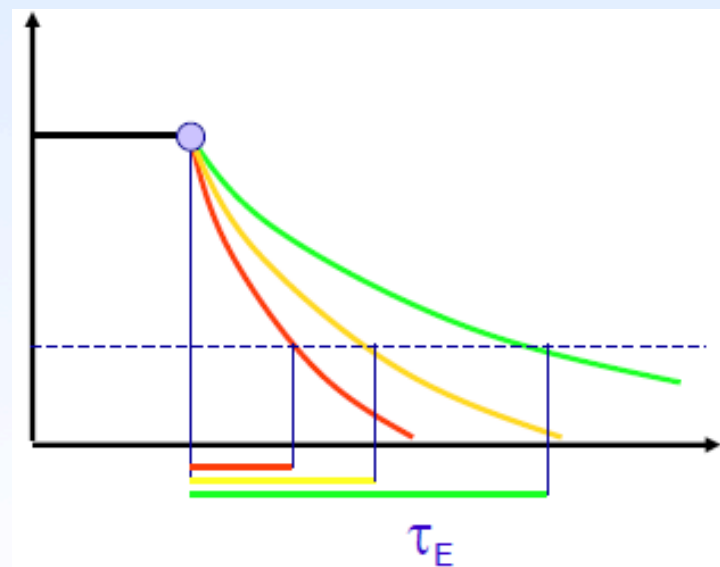
P 等离子体总加热功率

τ_E 等离子体总能量约束时间

(当 $dW/dt = 0$ 时)

- 能量约束时间与扩散系数

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



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：

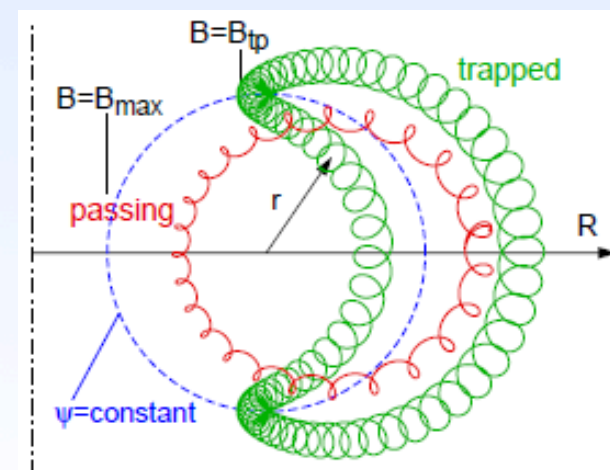
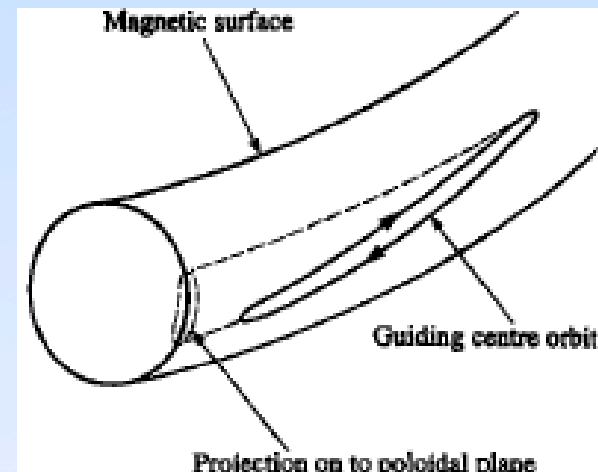
$$\Delta r_{ps} : q\rho_c$$

- 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

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

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

- 碰撞区

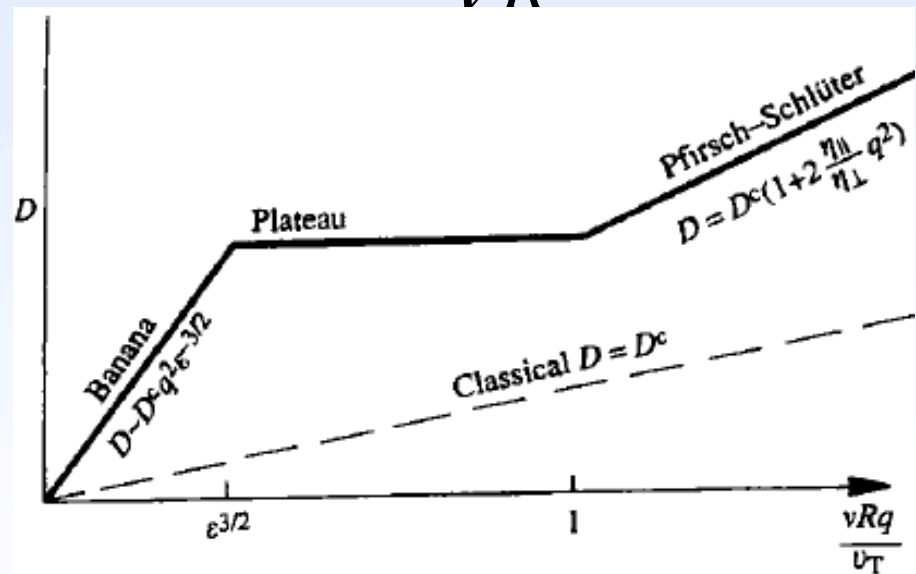
$$v \geq \frac{\varepsilon^{3/2} v_t}{qR}$$

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

- 平台区

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

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



湍流涨落

- Bohm扩散

在四十年代, Bohm等人首先在实验上观察到磁约束等离子体的反常扩散现象,获得一个半经验的扩散系数公式:

$$D_B = T/16eB : \omega_c \rho^2$$

$$\tau_B = a^2/D_B \propto B$$

- 湍流涨落驱动Bohm扩散
随机游走径向速度

$$V_{\perp} = \langle \tilde{E} \times B \rangle / B^2 = -\langle \nabla \tilde{\Phi} \rangle / B \sim \tilde{\Phi}_{rms} / \Delta x B \quad (V_{\perp} = \Delta x / \tau)$$

扩散系数

$$D = \Delta x^2 / \tau = \tilde{\Phi}_{rms} / B = T/16eB$$

(当取饱和幅度为 $e\tilde{\Phi}_{rms}/T = 1/16$ 时)

碰撞输运 → 湍动输运

反常输运

- 实验测定的输运系数

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

$$D ; D_Z ; \chi_e$$

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

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

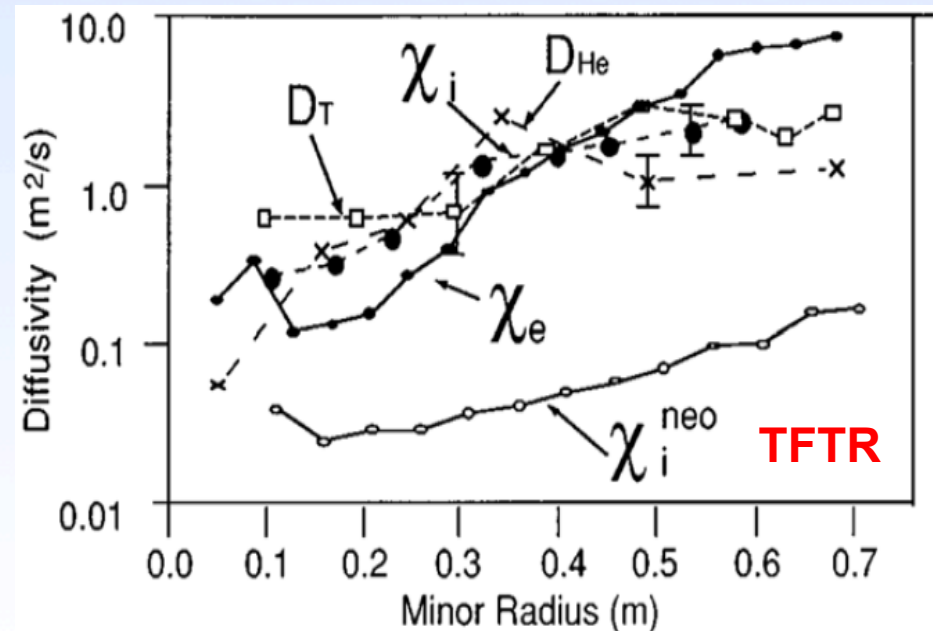
- 它比新经典理论预言的大一到二个量级，称为反常输运。它可能是由等离子体湍流驱动的。

- 新经典输运系数

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

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

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



湍流涨落：静电涨落引起的输运通量

- 静电涨落

$$\Gamma = \frac{\langle \tilde{E}_\theta \tilde{n} \rangle}{B_\phi}$$

$$\Gamma = \frac{1}{B_\phi} \tilde{n}_{rms}(\omega) \tilde{\phi}_{rms}(\omega) |\gamma_{n\phi}(\omega)| k_\theta(\omega) \sin[\alpha_{n\phi}(\omega)]$$

$$Q = \frac{3}{2} \frac{n \langle \tilde{E}_\theta \tilde{T} \rangle}{B_\phi} + \frac{3}{2} T \Gamma$$

- 其中， $\gamma_{n\phi}$, $\alpha_{n\phi}$ 分别为 \tilde{n} 与 $\tilde{\phi}$ 之间的相干系数和互相角

湍流涨落：磁涨落引起的输运通量

- 磁涨落

$$\Gamma = - \frac{\langle \tilde{j}_{\parallel} \tilde{B}_r \rangle}{eB_{\phi}}$$

$$Q = g \left(\tilde{B}_r / B_{\phi} \right) \nabla T$$

$$g \left(\tilde{B}_r / B_{\phi} \right) \approx \pi a v_{the} \left(\tilde{B}_r / B_{\phi} \right)^2 \quad (\text{无碰撞等离子体})$$

子体)

$$g \left(\tilde{B}_r / B_{\phi} \right) \approx \chi_{ell} \left(\tilde{B}_r / B_{\phi} \right)^2$$

a

(碰撞等离子体)

子体)

χ_{ell}

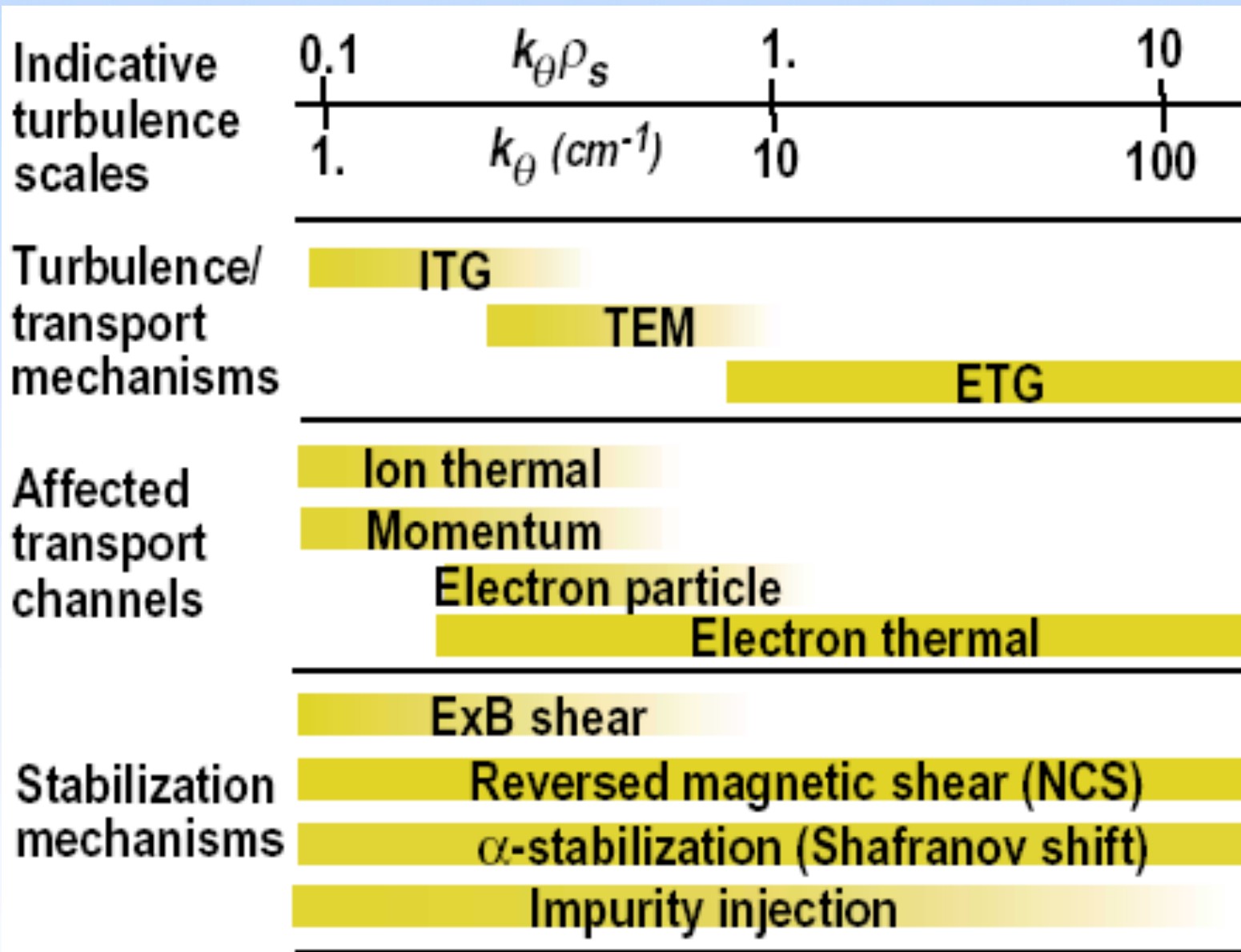
为等离子体小半径

为经典的电子平行热扩散系数

湍流涨落：主要的微湍流模式

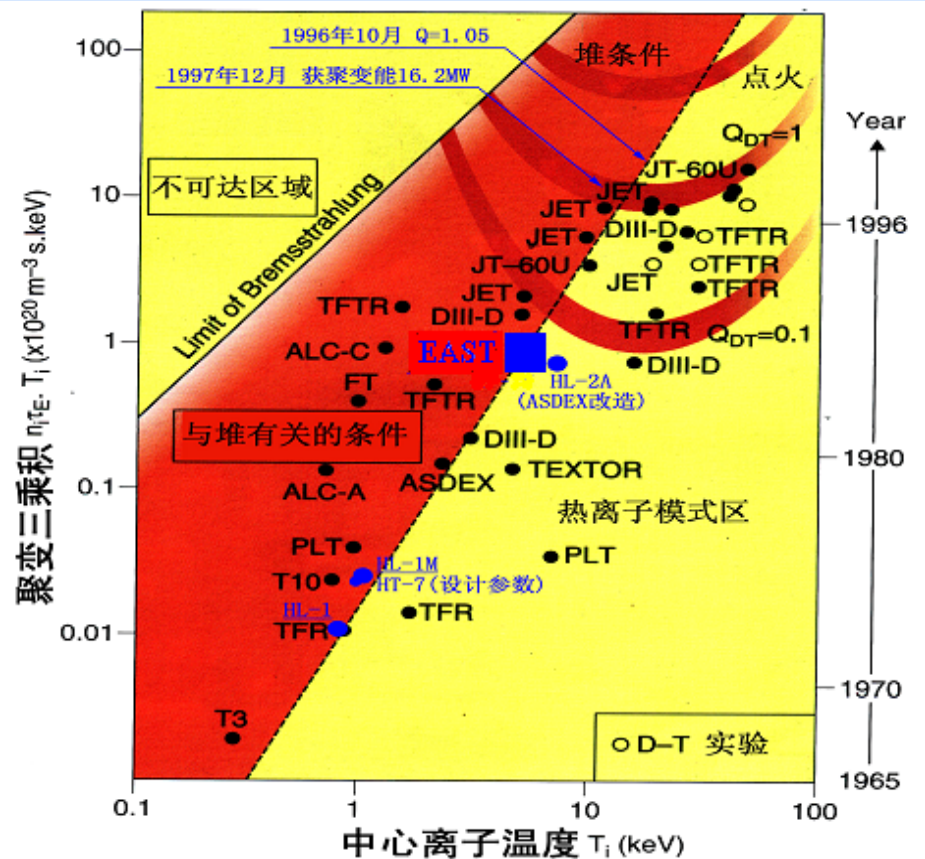
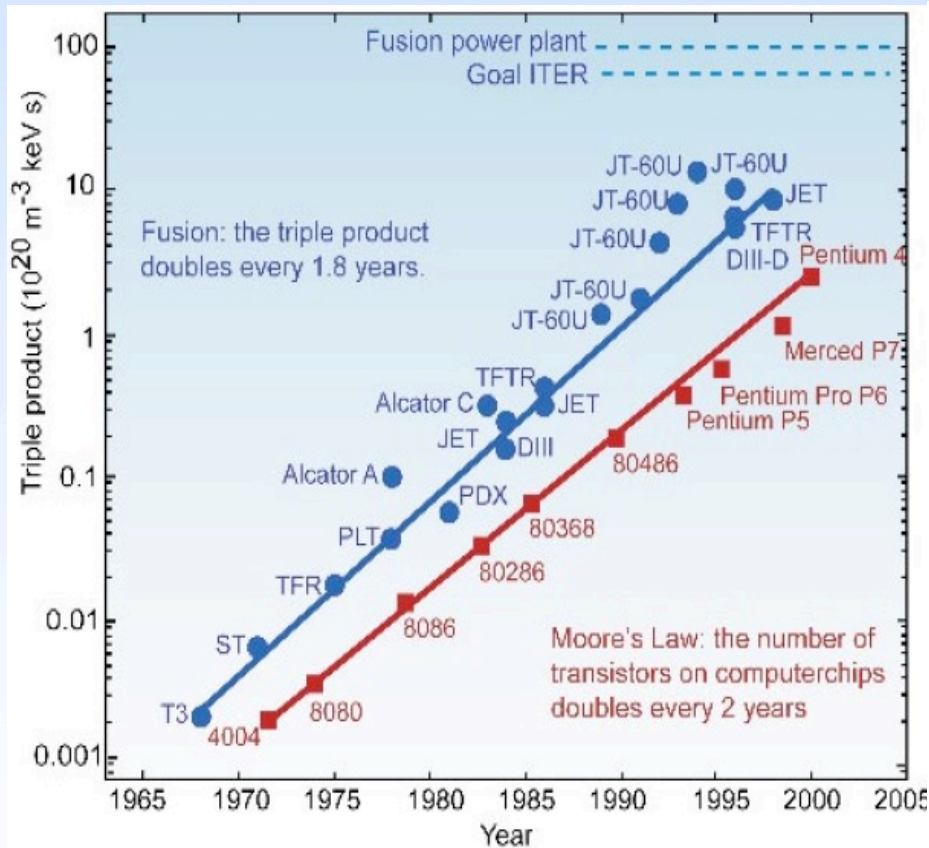
| Group | Instability | Source of free energy | Subspecies | Properties |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---|--|
| Ion Instabilities | η_i modes | ∇T_i | Slab modes Toroidal modes Trapped ion modes | $\omega \leq \omega_{*i}$ $\eta_i > \eta_{ic}$ $L_{Ti}/R < (L_{Ti}/R)_{crit}$ |
| | Electron Drift Waves | ∇n_e | Slab modes Toroidal modes | $\omega \approx \omega_{*e}$ |
| Electron instabilities | Dissipative trapped electron modes | ∇T_e | | $\varepsilon\omega < \nu_e \leq \varepsilon^{3/2} V_{the}/qR$ $\varepsilon_n q < k_{\perp} \rho_s \leq \nu_e L_n / \varepsilon c_s$ |
| | Collisionless trapped electron modes | ∇T_e | | $\nu_e < \varepsilon\omega \leq \varepsilon^{3/2} V_{the}/qR$ $\varepsilon_n q < k_{\perp} \rho_s \leq 1$ |
| | η_e modes | ∇T_e | Slab modes Toroidal modes | $\omega_{pe}/c < k_{\perp} < \rho_e^{-1}$ $k_{\parallel} V_{the}, \omega_{be} < \omega < \omega_{*e}$ |
| | EM drift waves | ∇n_e | | $\omega \approx \omega_{*e}, k_{\perp} \rho_s \leq 1$ |
| Fluid like instabilities | Resistive ballooning modes | ∇P | Fast modes Slow modes | $\omega \approx \omega_{*e}$ $k_{\parallel} V_{the} < \omega$ |
| | Current diffusive ballooning modes | ∇P | | $k_{\parallel} V_{the} < \omega$ |

湍流涨落：主要的微湍流模式



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
- 在建的ITER及拟议中的CFETR可推动聚变能的最终利用



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。
- 磁约束聚变研究已经进入到聚变能开发和利用的前期。许多高温等离子体的物理问题已经得到初步的解决。
- 如何获得燃烧等离子体及如何认知燃烧等离子体，是磁约束聚变研究的前进方向，其涉及到的等离子体物理前沿问题富有挑战性，需要年青一代下大力气去研究解决。

