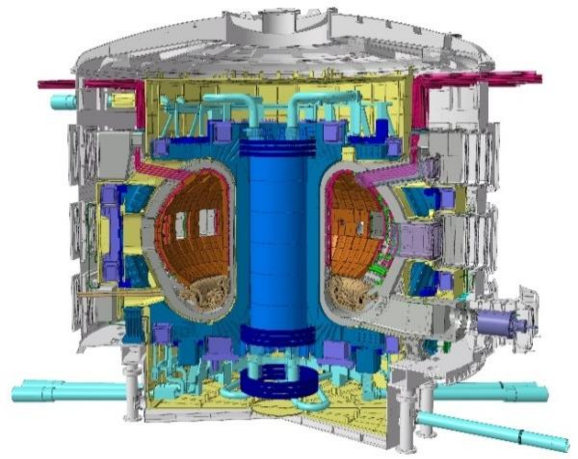
燃烧等离子体实验面临的重要物理问题



Wei Chen 陳偉

Southwestern Institute of Physics (SWIP)

Email： chenw@swip.ac.cn

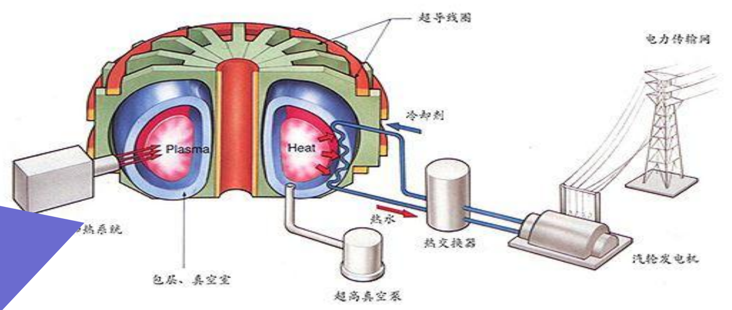
极端等离子体：从夸克-胶子到聚变能，上海，2025年8月11-13日

核聚变能:国家重大战略需求

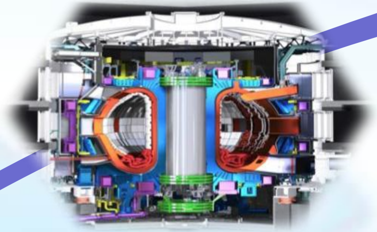
国家确立核能发展 “热堆、快堆、**聚变堆**”三步走战略

磁约束核聚变： 战略性前沿重大科学问题

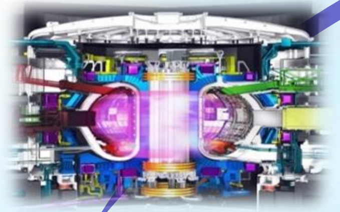
核聚变能是国家重大战略需求!



清洁 + 安全 + 丰富



中国聚变工程试验堆
CFETR，工程物理设计



ITER, 国际热核聚变实验堆

聚变点火条件： $n\tau T_i > 3\times10^{21} m^{-3}\cdot keV\cdot s$

科学难题

- ➔如何提高三乘积?
- ➔如何避免大破裂?
- ➔如何解决阿尔法粒子问题?
- ……

- 核聚变研究本质几乎都是围绕**提高温度、密度和约束时间**展开的!

核聚变能:面临的重大物理问题

高密度、高温度、高约束、高比压等离子体稳态运行(国际性难题)

$$E_{fusion} \propto (n \times T_i \times \tau_E) \times t_{燃烧}$$

$$n \times T_i \times \tau_E \propto \frac{H * \beta_N}{q_{95}^2} a^3 B^3 \propto H * \beta_N ABRI_p^2$$

$$f_{bs} \propto \frac{\beta_p}{\sqrt{A}} \propto \sqrt{A} * \beta_N q_{95}$$

$$< P_{fus} > \propto \beta^2{}_N B^4$$

$$Q \propto nT_i\tau_E \propto \kappa(1+\kappa^2)^2$$

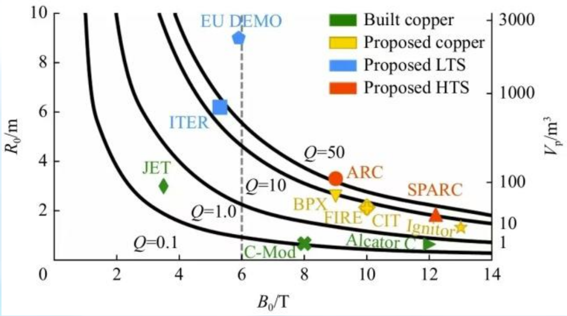
$$\frac{I_{cd,A}}{P_{cd,W}} \propto \frac{R}{A^3} \frac{1}{f_{GW}^2} * \beta_N q_{95}$$

重大科学问题

-高性能等离子体获得、提升与维持

-复杂非线性多尺度物理的宏观效应

-芯部-边界耦合、兼容和集成控制



$$P_{fus} \propto n_i T_i \tau_E \propto I^2 B^4 R^3$$

关键技术问题

-大功率等离子体加热与非感应驱动

-杂质、热流、粒子流及不稳定性控制

-高时空分辨诊断与等离子体精确控制

核聚变物理研究的主要方向

Tokomak Physics

- Integrated scenario development
- Heating & Current drive
- Transport & confinement
- MHD and disruption
- Energetic particle
- Edge pedestal
- Divertor &PWI
- Diagnostics

先进运行模式

-发展高约束、高比压运行模式
-探索电流分布调控的有效手段

磁流体不稳定性

-芯部边界不稳定性集成控制
-破裂预测与缓解集成方案

输运与约束

-杂质聚芯和同位素效应
-高Z杂质输运和控制

台基物理

-辐射偏滤器和芯部的兼容
-高密度、高约束下台基物理

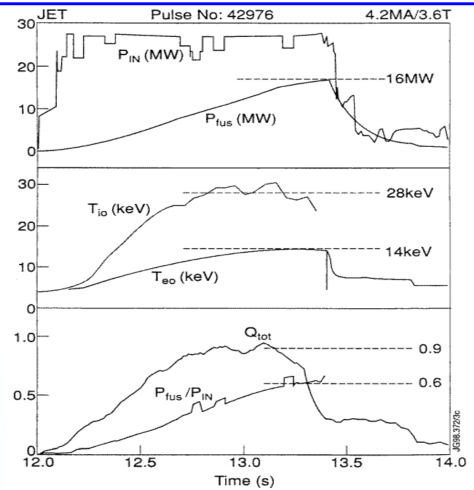
快粒子物理

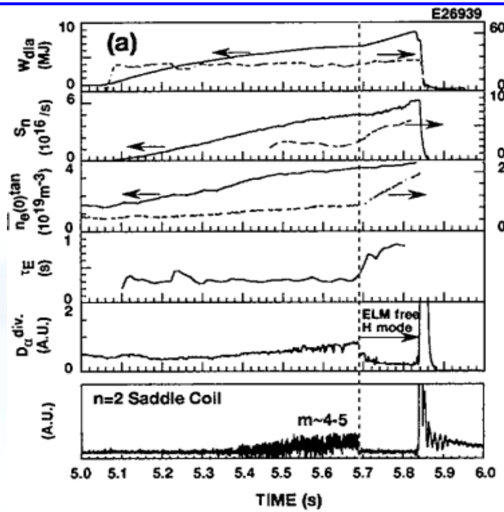
-阿尔法粒子物理
-快离子输运和损失及控制

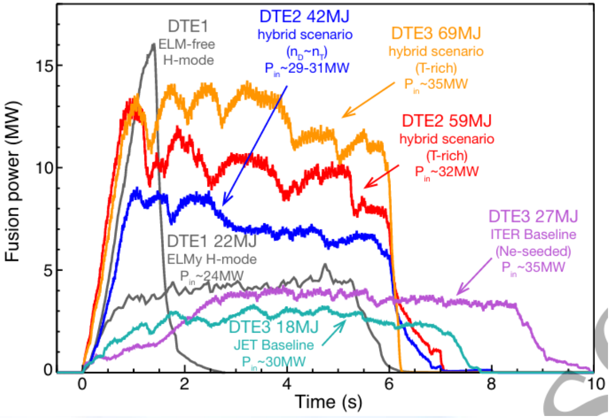
偏滤器物理

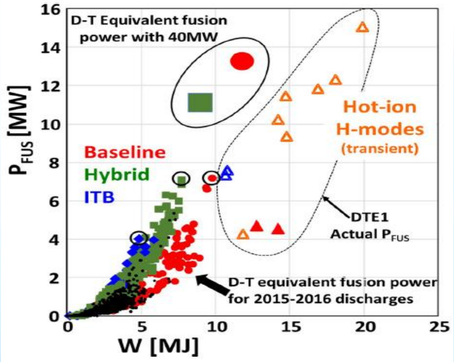
-金属壁及壁处理物理研究
-脱靶物理及反馈控制技术

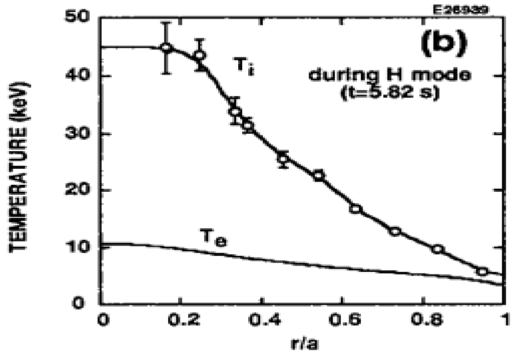
聚变能发展即将迈入反应堆燃烧等离子体时代









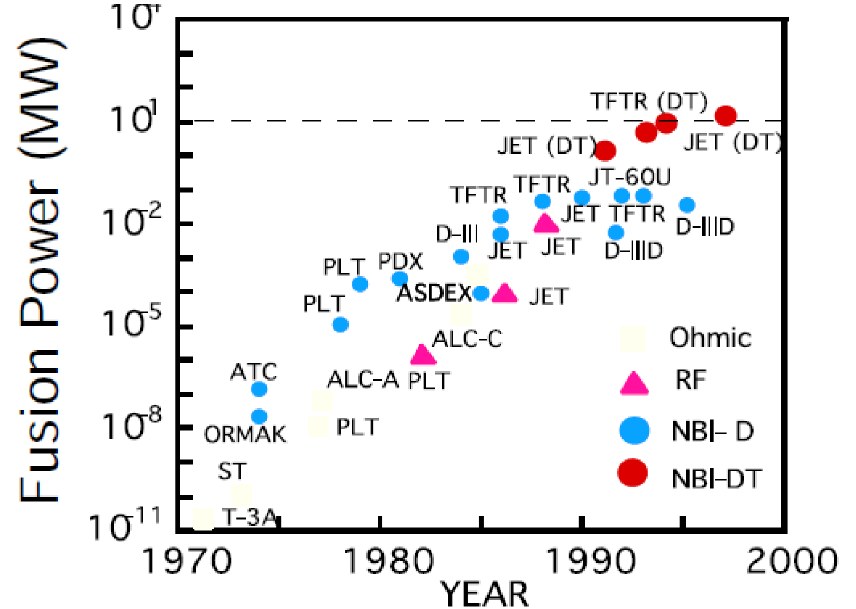


燃烧和高性能等离子体

燃烧等离子体（含有高能阿尔法粒子）:Q>5

Q=产出/输入，聚变增益

JET: Q_{max}~0.67；JT-60U: Q_{eq}=1.25；
NIF: Q~1.5; ITER：Q~10



高性能品质因子：

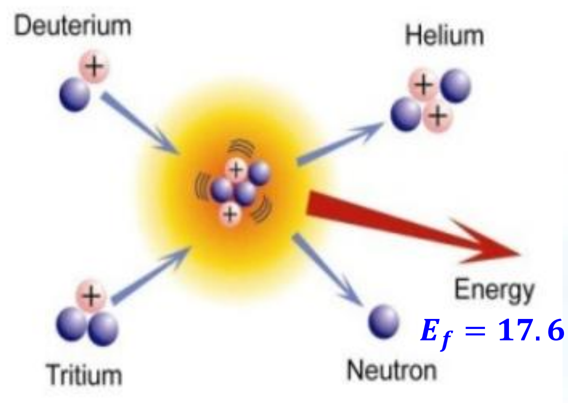
$$G=H_{89}\beta_N/q_{95}^{\,2}$$

H_{89}：约束因子；
β_N：归一化环向比压；

ITER(混杂位形)：G~0.4

✓ **聚变能发展即将迈入反应堆燃烧等离子体时代**

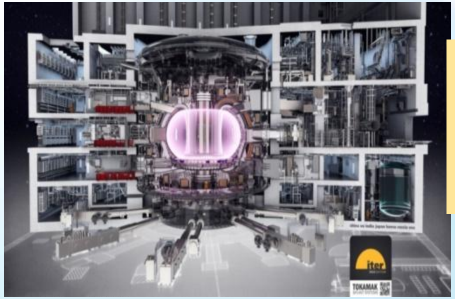
燃烧等离子体和阿尔法粒子



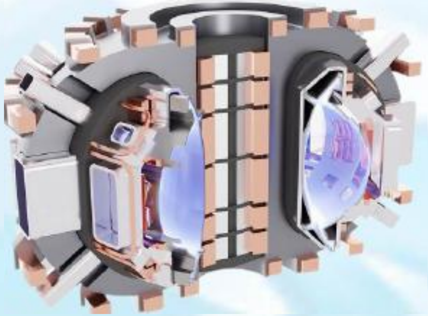
$E_f = 17.6\ MeV$

	$Q = \frac{P_{fusion}}{P_{heat}} = \frac{5P_{alpha}}{P_{heat}}$	$f_{alpha} = \frac{P_{alpha}}{P_{alpha} + P_{heat}} = \frac{Q}{Q+5}$
得失相当	1	17%
燃烧等离子体区	5	50%
	10	67%
	20	80%
	∞	100%

■ 燃烧等离子体：DT热核聚变产生的高能阿尔法粒子加热占主导



ITER：
Q~10
f_α~67%

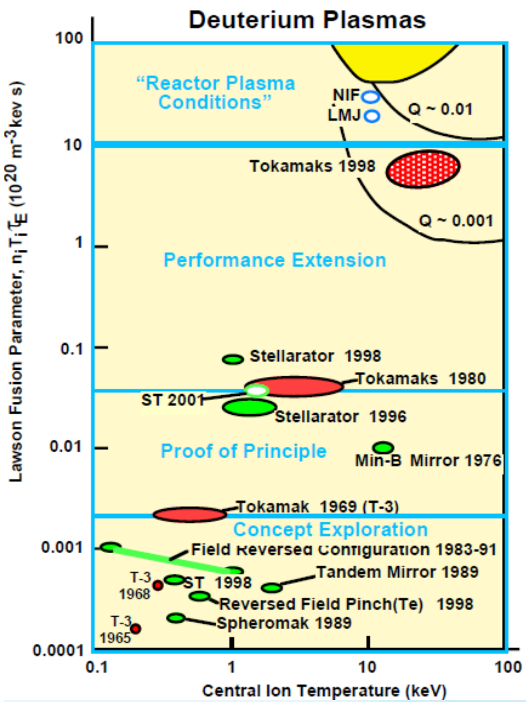


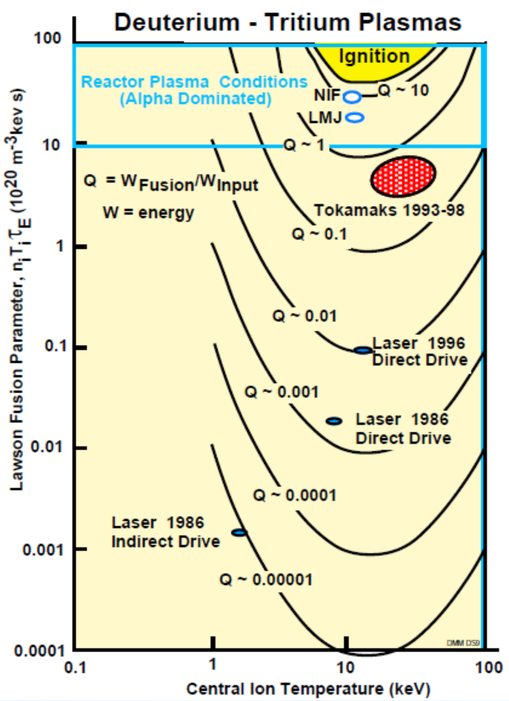
SPARC：
Q~11
f_α~70%

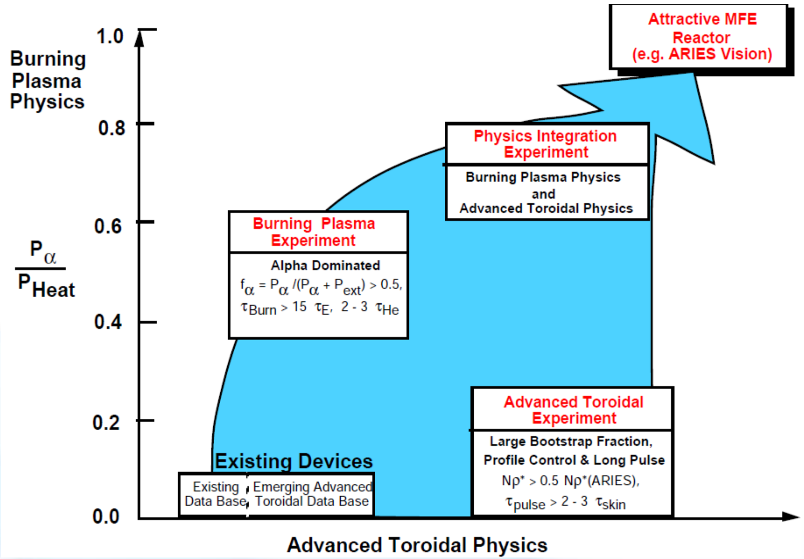
CFETR：
Q~25
f_α~85%

ITER和未来聚变堆巨大挑战：高参数等离子体稳态燃烧！！！

燃烧等离子体和聚变增益





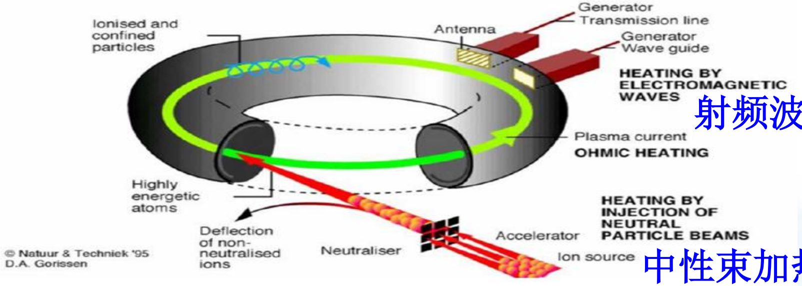


	Q	η_α	Heating power	Devices
weakly burning plasma below break-even	$0 \ll Q < 1$	$0 \ll \eta_\alpha < 17\%$	$0 \ll P_{fus} < P_{aux}$	JET, TFTR
weakly burning plasma above break-even	$1 < Q < 5$	$17\% < \eta_\alpha < 50\%$	$P_\alpha < P_{aux} < P_{fus}$	ITER, STEP, BEST, SPARC, CFETR
burning plasma	$Q > 5$	$\eta_\alpha > 50\%$	$P_\alpha > P_{aux}$	ITER, STEP, BEST, SPARC, CFETR
reactor-grade burning plasma	$Q \gg 5$	$\eta_\alpha \gg 50\%$	$P_\alpha \gg P_{aux}$	DEMO, CFETR, STEP
ideal ignited plasma	$Q \to \infty$	$\eta_\alpha = 100\%$	$P_\alpha \gg P_{aux} = 0$	

阿尔法粒子加热主导时，定标率是否适用?

高能量/快(包括α)粒子物理

NBI/ICRH: 快离子, **E~100keV-3MeV**
ECRH/LHW: 快电子, **E~10keV-10MeV**



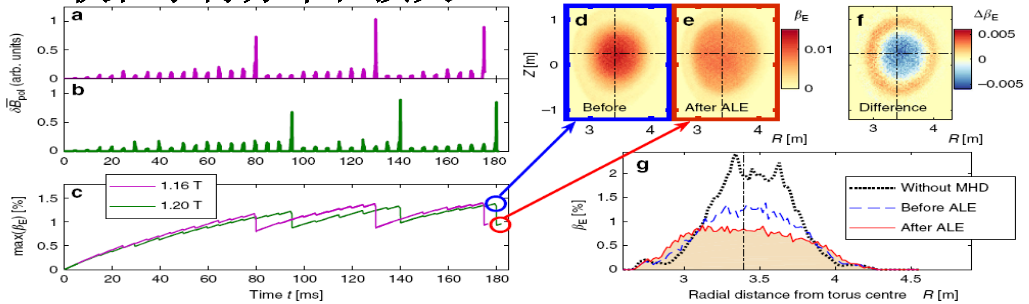
射频波加热

中性束加热

DT核聚变产生高能量阿尔法粒子E~3.5MeV

- 快粒子激发不稳定性
- 快粒子再分布和损失

➡ 损毁堆部件甚至熄灭!

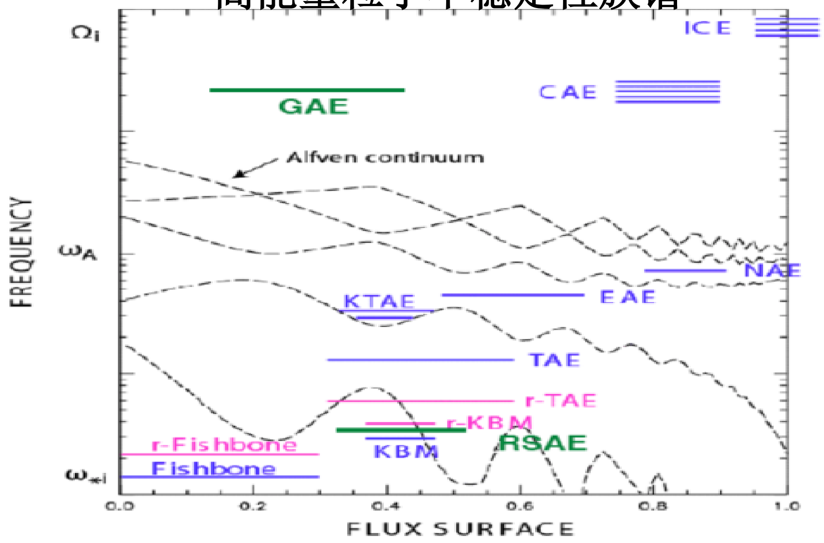


Bierwage, et al Nat. Comm. 2018

✓ **高能量粒子物理问题是聚变能实现的重要挑战之一。**

问题难点: 多时空尺度，复杂非线性

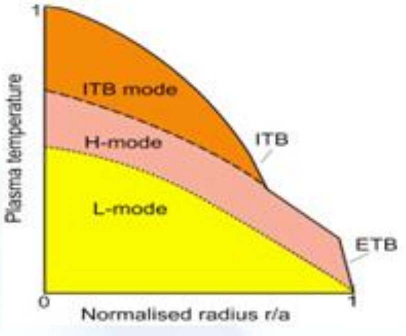
高能量粒子不稳定性族谱



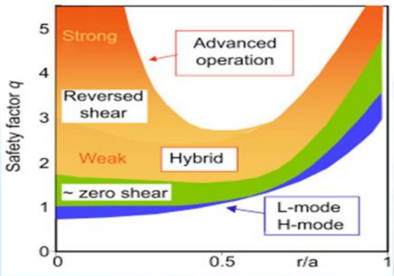
实验等离子体运行模式研究

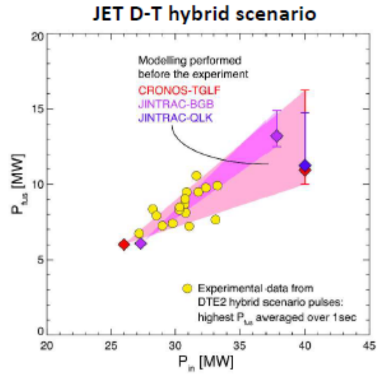
高参数等离子体运行模式

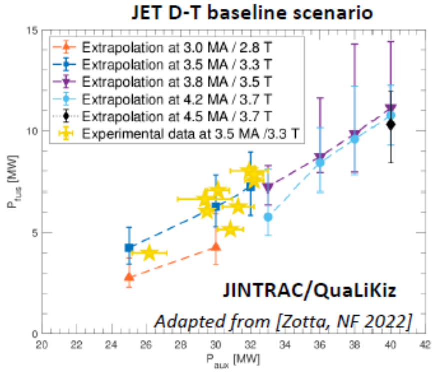
- **-高约束（H_{98}）**
- **-高比压（ β_N / β_p ）**
- -高内感（l_i）
- -高自举电流（f_{bs}）
- **-高密度（n_e）**
- **-高离子温度（T_i）**



- -感应运行模式
- **-混杂运行模式**
- -反剪切运行模式
- **-先进运行模式**

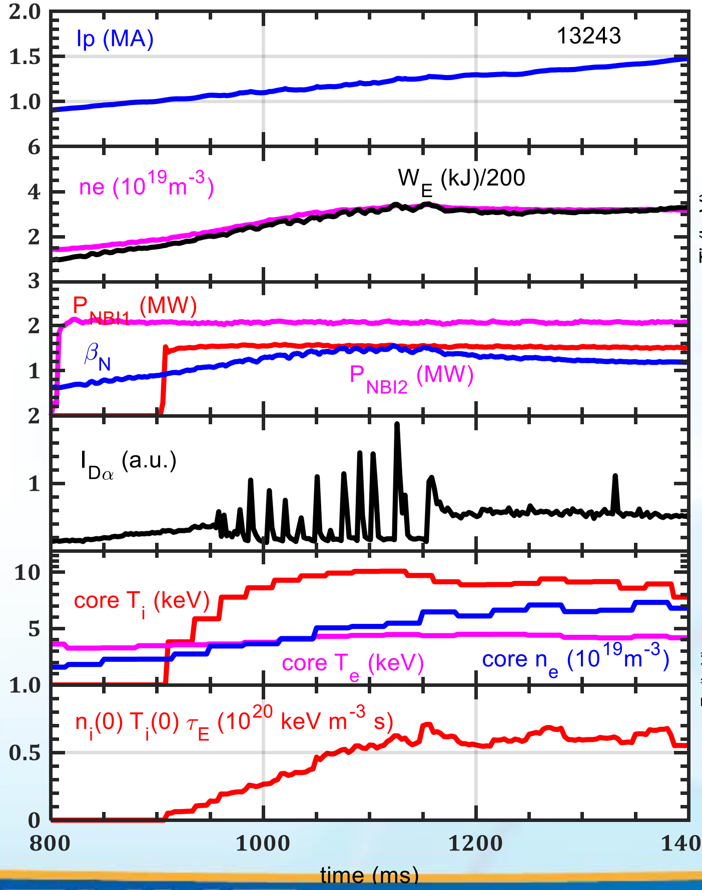


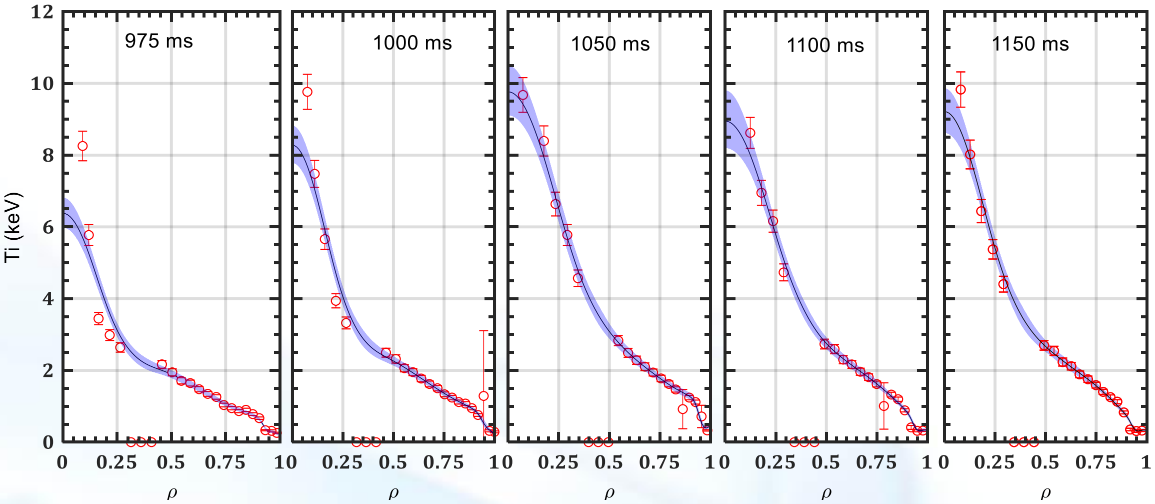


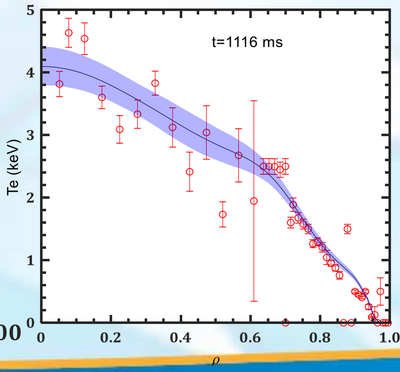


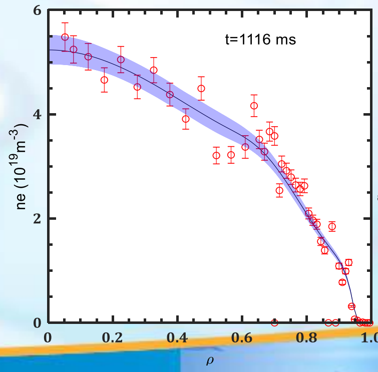
- **选择不同的运行模式，可更容易实现不同的参数指标**
- **不同的运行模式下存在不同的物理**

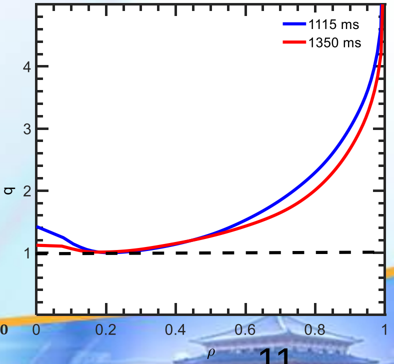
Hot-ion mode scenarios (H&L)：High-Ti&high triple product





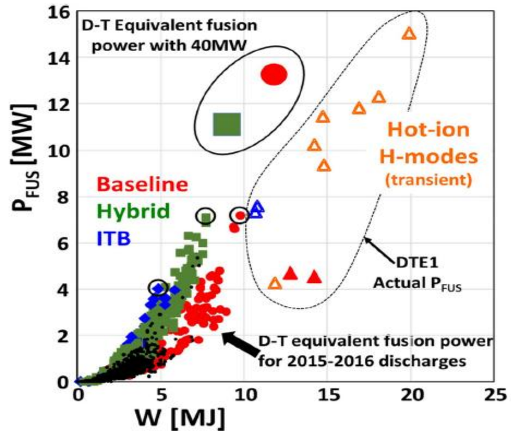


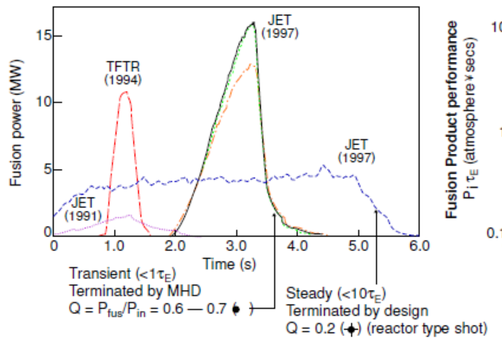


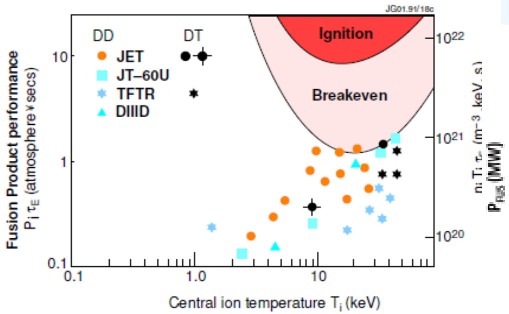


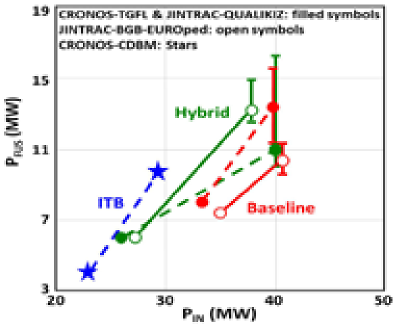
聚变功率实现和评估

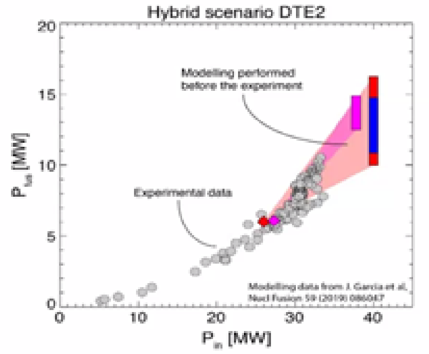
Parameter	TFTR-DTE(1994)	JET-DTE1(1997)	JET-DTE2(2021)
NBI power	40MW	24MW	34MW
ICRH power	30MW	17MW	6-8MW
Tritium usage	100g	100g	~1000g
Fusion energy	6.5MJ	21.7MJ/4s	59MJ/5s
Fusion power	10.7MW	4MW(16.1MW)	<10MW
Fusion gain Q (steady-state)	0.27	0.2/5s (Q_{max}=0.65)	0.33/5s











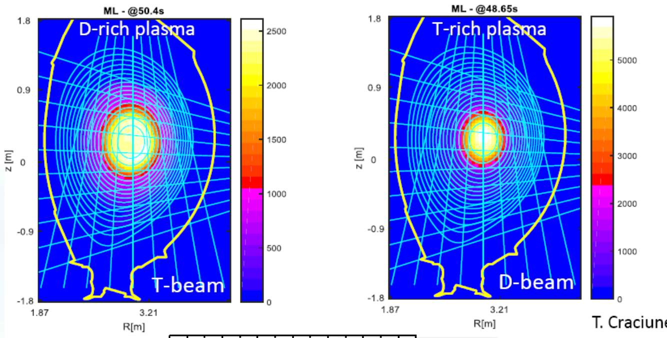
获得高聚变功率， 装置采用怎样的运行模式?

阿尔法粒子物理研究（1/2）

■ α粒子物理：燃烧等离子体物理研究的核心问题

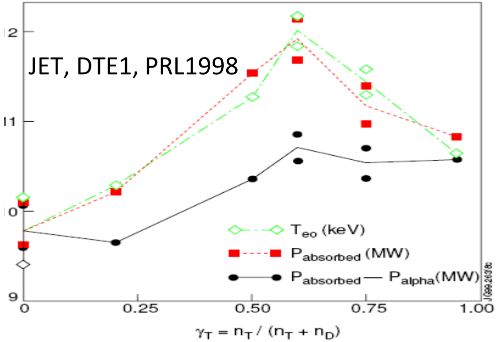
- α粒子热化控制
- α粒子加热效率
- α粒子约束与输运
- α粒子损失与控制
- α粒子与不稳定性相互作用
- α粒子与射频波相互作用
- 氦灰输运与排除
- 聚变中子产额评估与测量
- 燃烧率评估与影响因素
- ……

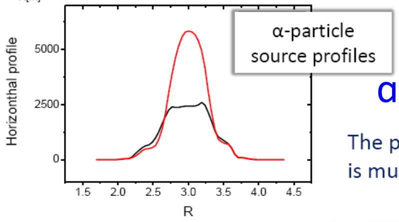
Fasoli，PRL 2023; Kiptily，et al. PRL 2023



T. Craciunescu

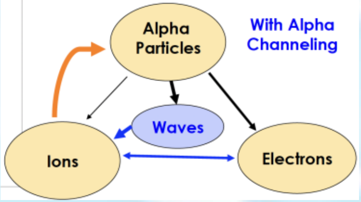
α粒子加热效果





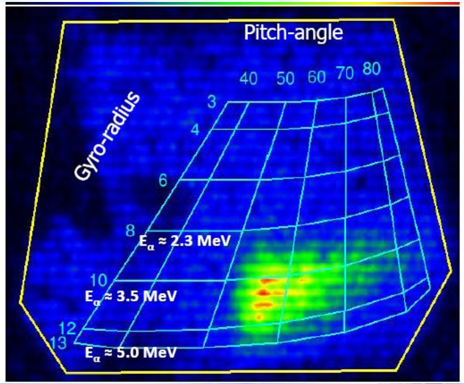
α粒子分布

The profile with T-beam is much broader



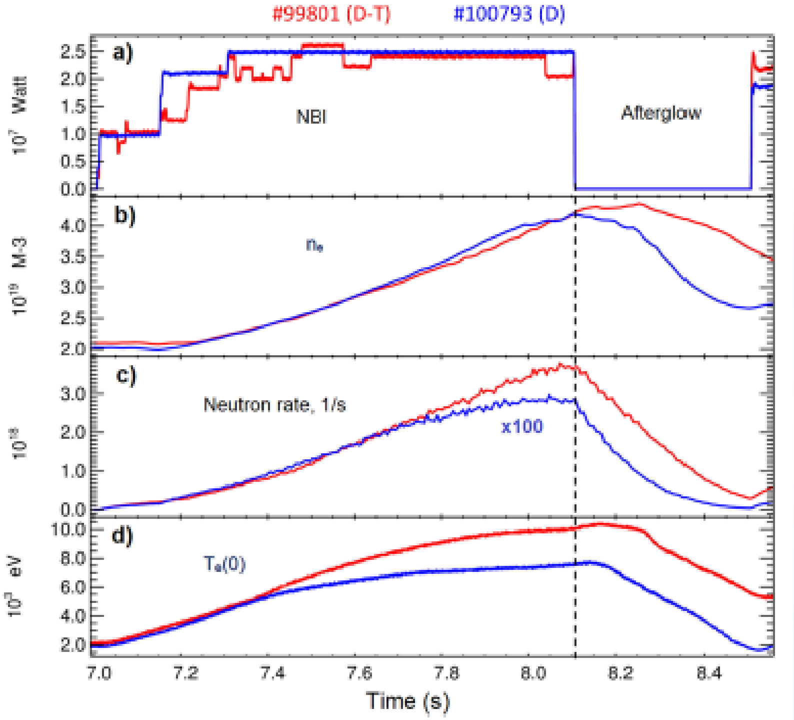
α粒子 Channeling

α粒子损失



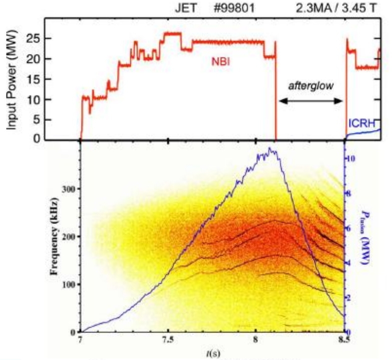
阿尔法粒子物理研究（2/2）

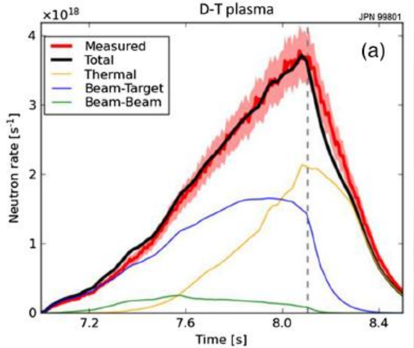
■ JET装置氘氚实验结果



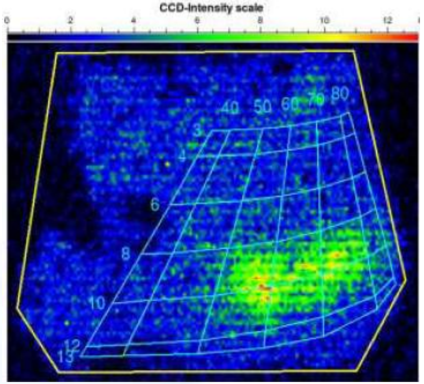
Kiptily，et al. PRL 2023

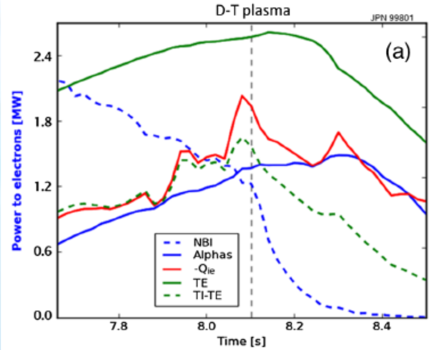
■ 阿尔法粒子驱动快粒子不稳定性





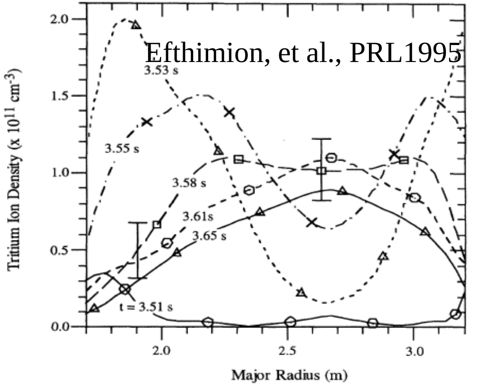
■ 阿尔法粒子损失



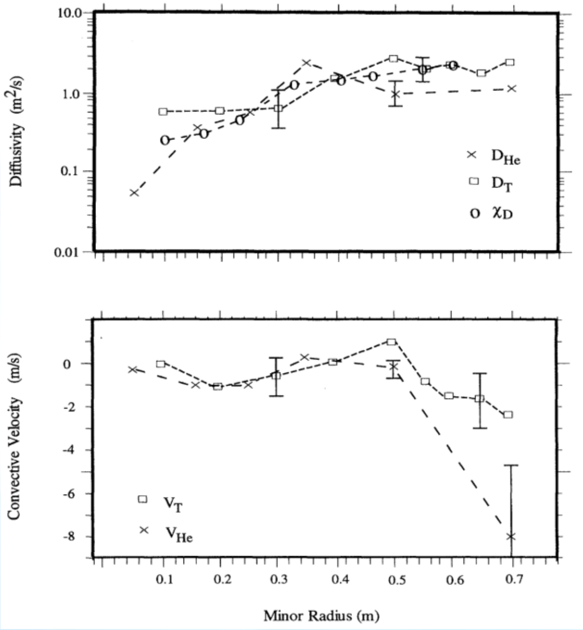


氚粒子物理研究

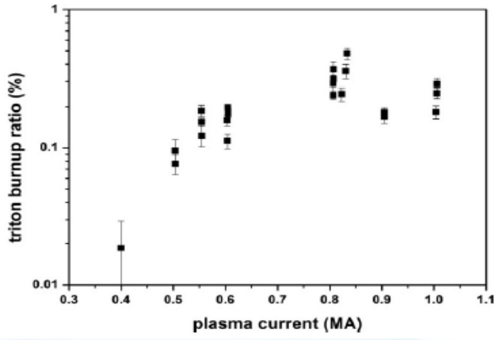
■ 氚离子分布测量

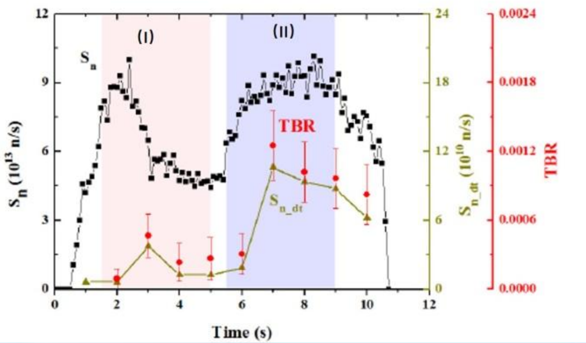


■ 氚离子输运

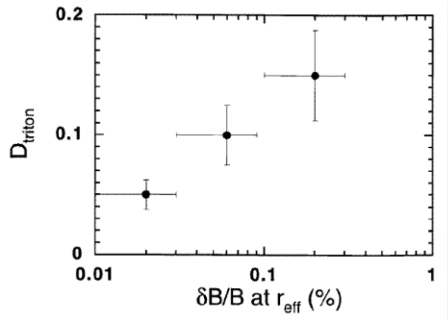


■ 氚燃耗





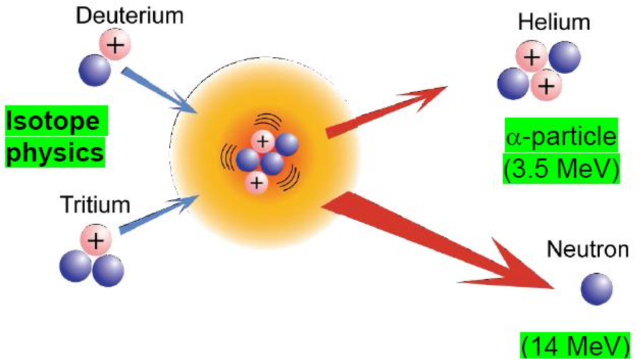
■ 氚离子损失

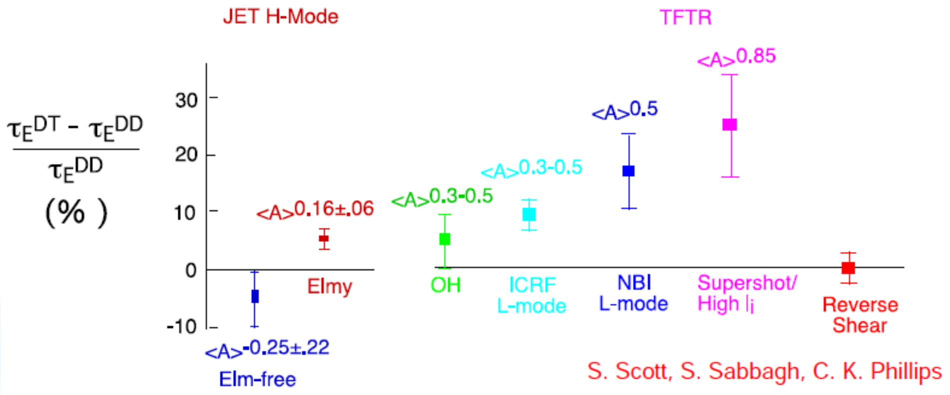


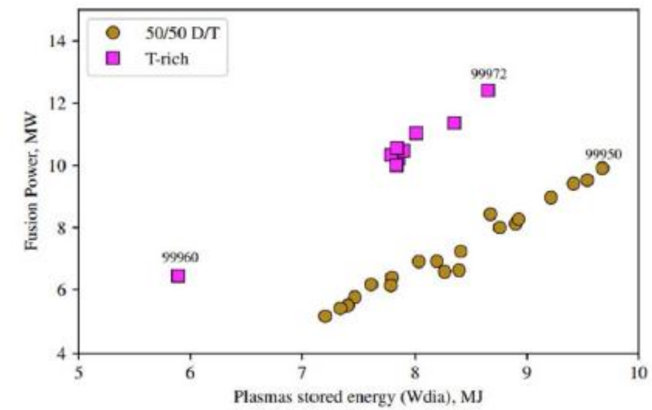
准确测量和精确评估存在挑战性！

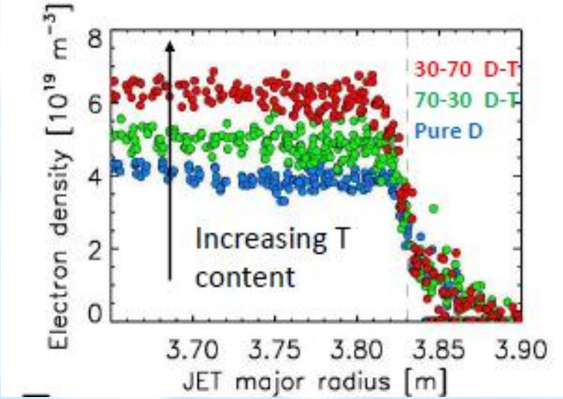
同位素效应的研究

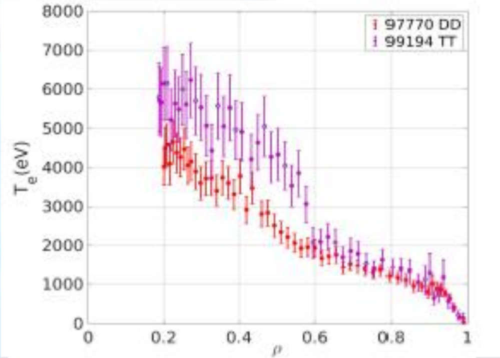
同位素效应的物理机制研究





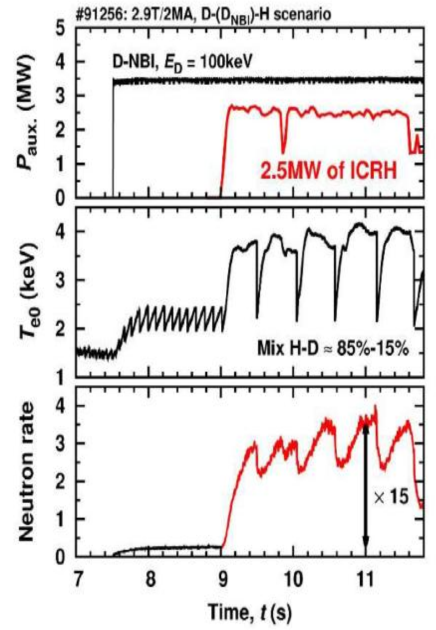


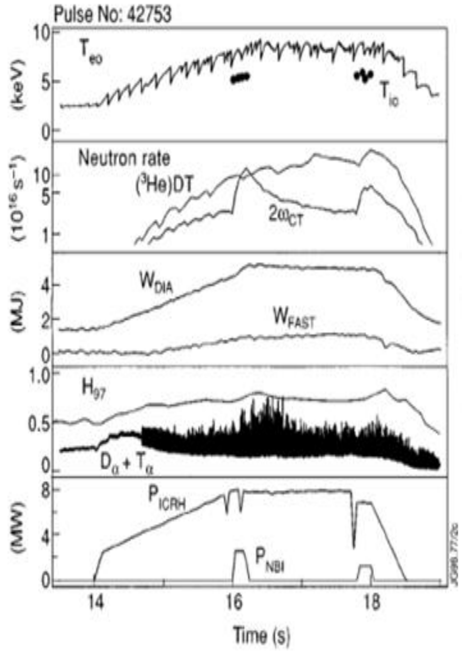


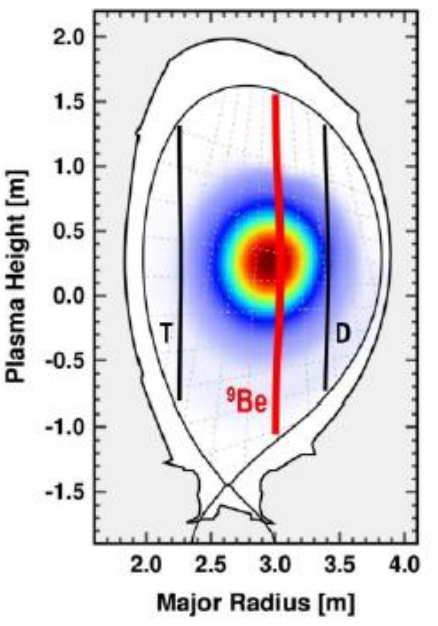


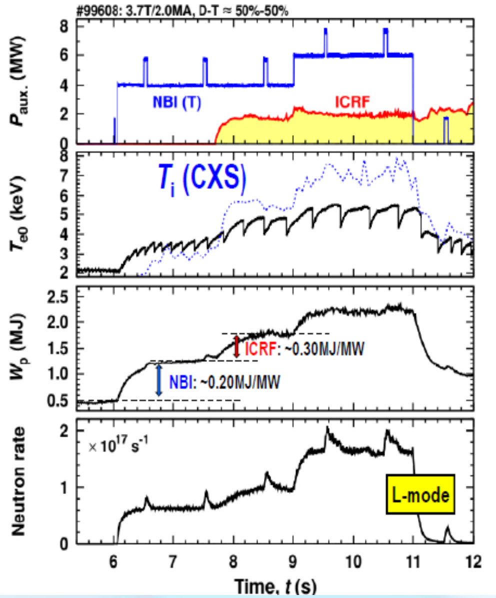
射频波加热方案和物理

■ 氘二次谐波加热：$\omega = 2\omega_{cT}$；■ 氘氚实验^{3}He少子加热(^{3}He)DT；■ (Be)DT少子加热







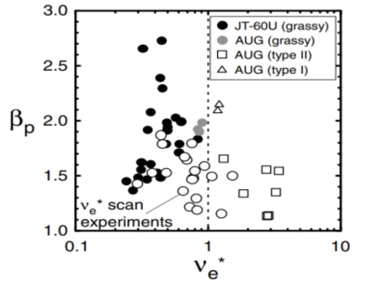


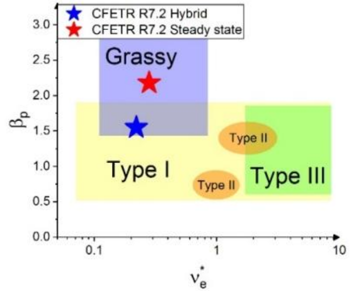
E. Joffrin *et al* 2019 *Nucl. Fusion 59* 112021

D.F.H. Start et al 1999 Nucl. Fusion 39 321

杂质和宏观MHD不稳定性控制研究

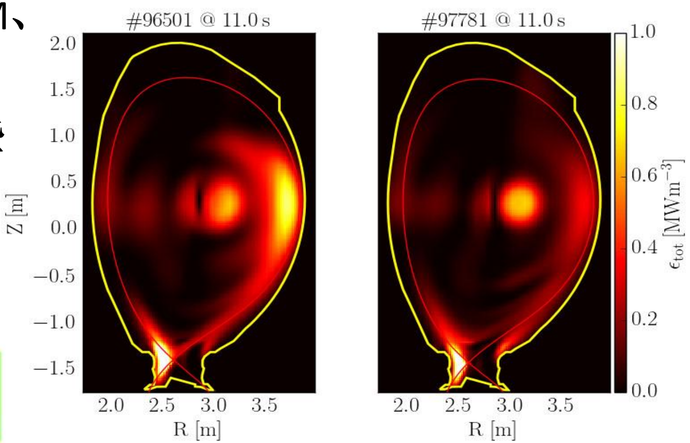
高性能等离子体中会把伴随giant-ELM、NTM和RWM等宏观MHD不稳定性激发，也会导致杂质聚芯。杂质和这些不稳定性缓解控制面临挑战。

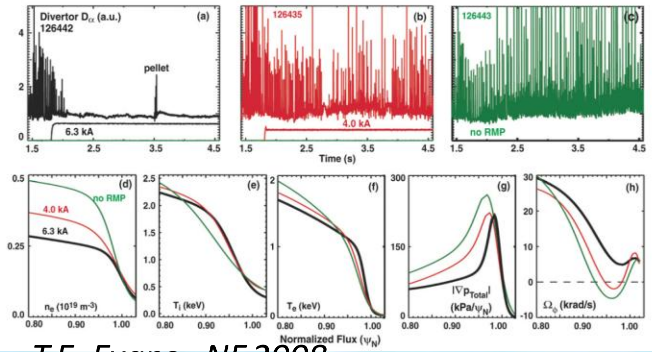




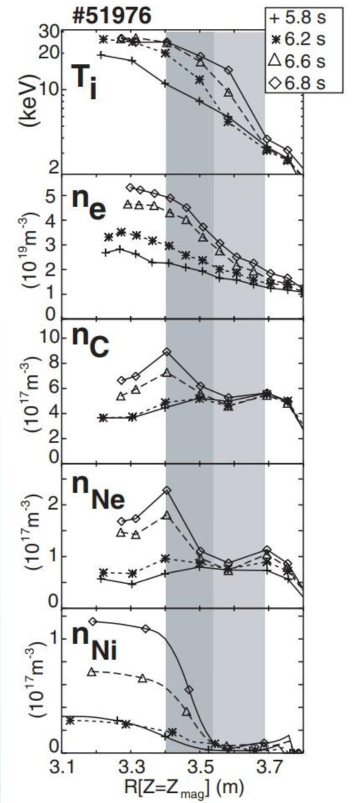
- -加料效率提升
- -Grassy-ELM和no-ELM获得
- -杂质（氦灰）控制（排杂排灰）
- -Giant-ELM、NTM和RWM的控制（PI, RMP, ECRH/LHW等）

Field NF 2023





T.E. Evans , NF,2008



R. Dux NF 2004

MA级电流下大破裂和不稳定性控制

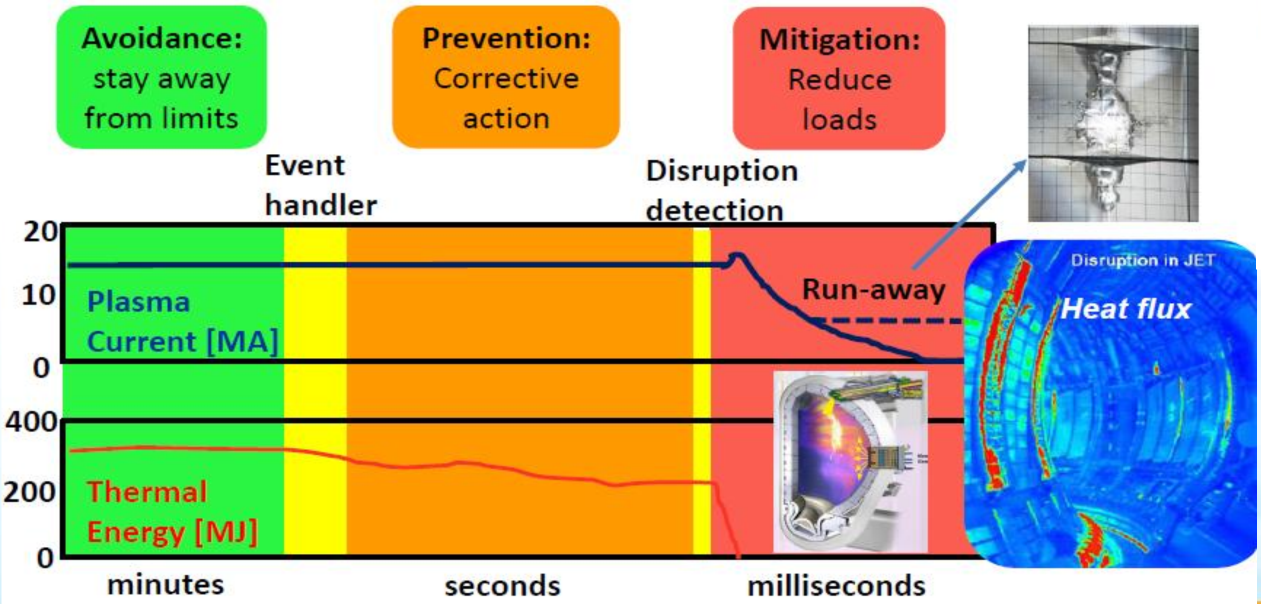
- **大破裂：ITER和未来聚变堆最优先问题、危险性最高**

– 在最高电流下，破裂率<5%

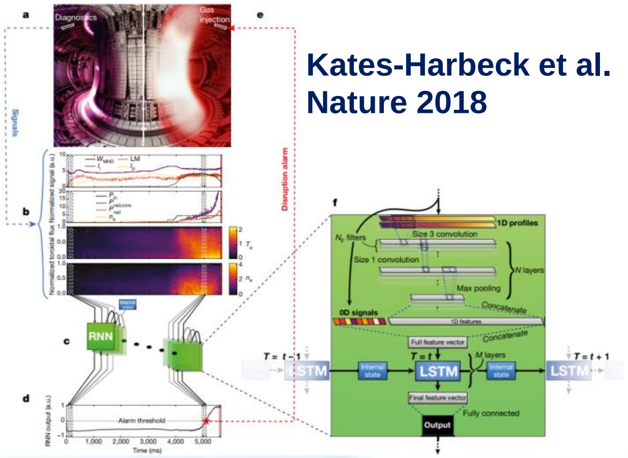
– 需要预测、缓解和避免

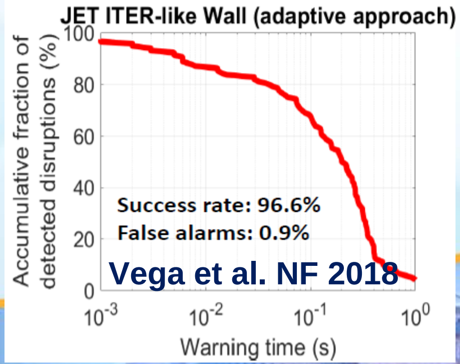
AI和人工智能

M. Lehnen et al SOFE 2015



Kates-Harbeck et al.
Nature 2018





Vega et al. NF 2018

MA级电流下热负荷和粒子控制研究

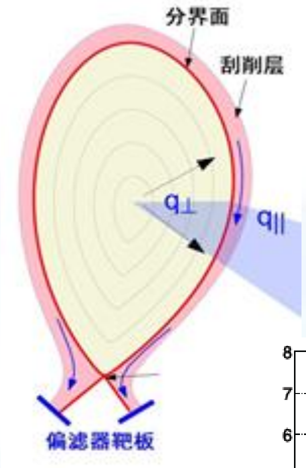
- **热负荷：ITER和未来聚变堆热流宽度更窄，挑战性增大**

– 偏滤器送气

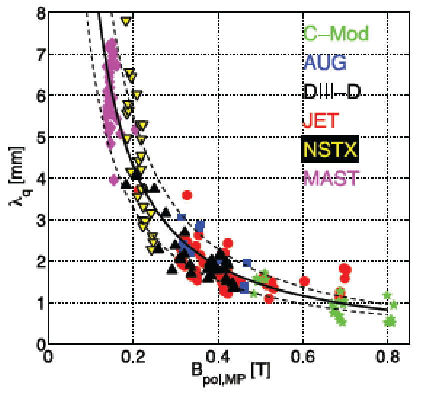
– 脱靶条件

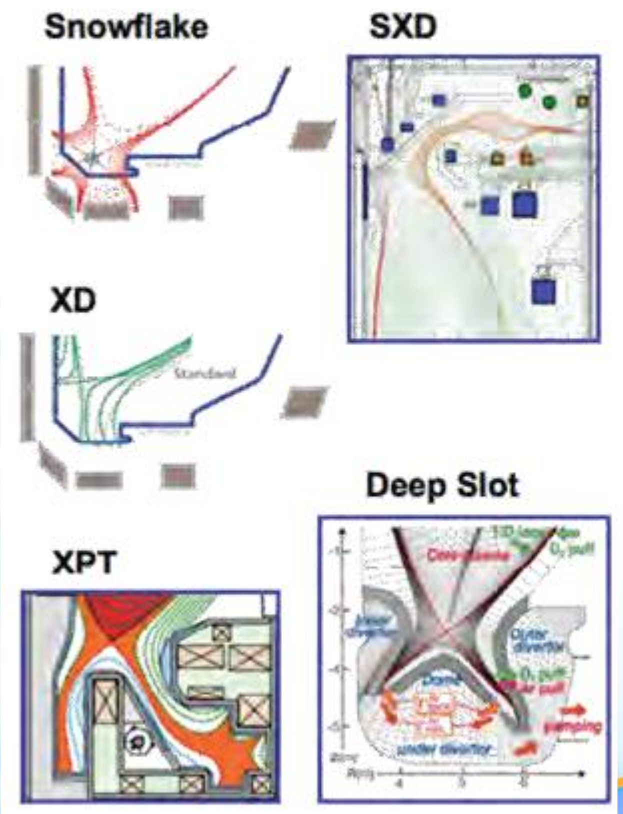
– 芯-边耦合

– 实验和模拟验证



$$Q_{\parallel} = \frac{P_{sol} B_0}{R_0}$$





- **粒子控制：**

– 先进偏滤器位形

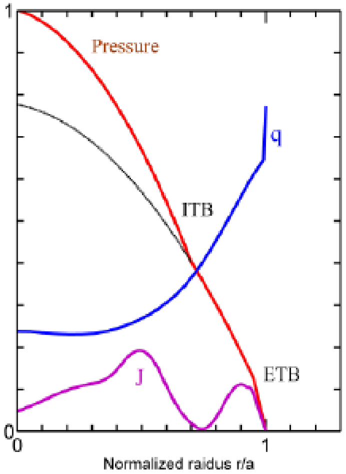
– 实验测试与位形优化

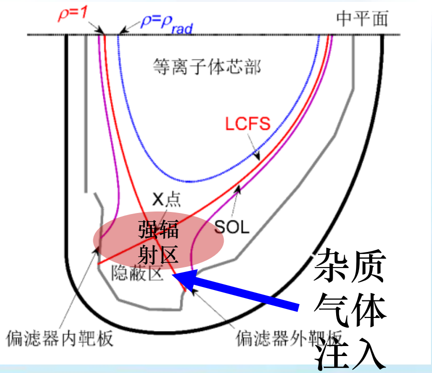
– 边-芯兼容

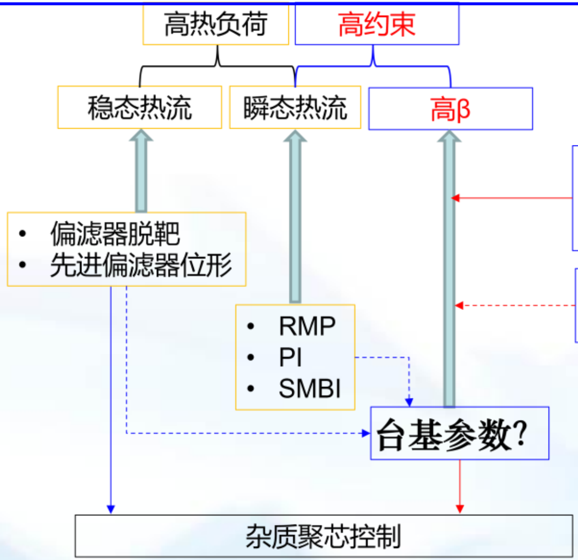
– 模型验证

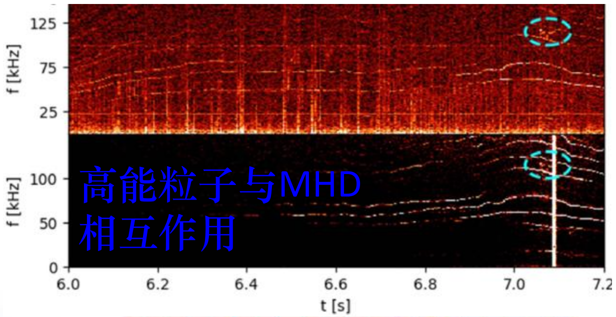
Charles M. Greenfield, National Academies Burning Plasma Committee June 5, 2017

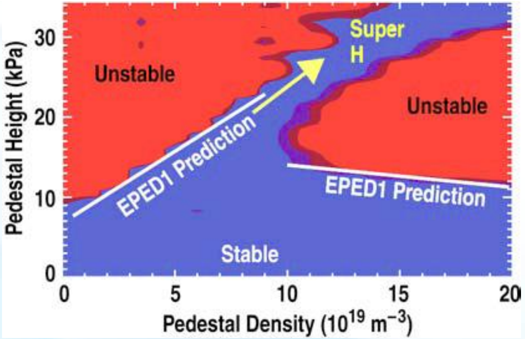
MA级电流下高热负荷和芯部兼容性

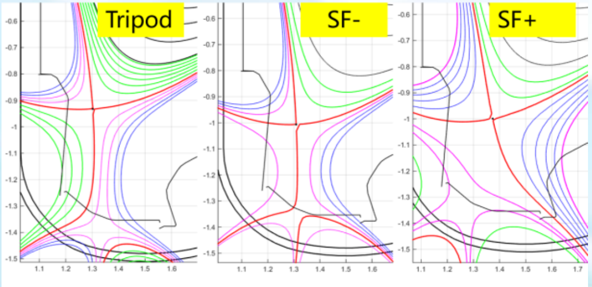












拓宽高约束的运行区间

-反馈控制技术
-优化台基结构
-先进偏滤器位形下的高热负荷控制与芯部高约束的集成运行模式

聚变核产物诊断研发和应用

1 聚变堆能量输出与氚燃料自持

- 氘氚聚变反应能量80%由聚变中子携带，中子能量的转化利用是聚变能开发研究的一个重要方面。
- 稀有的氚燃料自持，需要依赖聚变堆内中子与锂的核反应产生。

2 等离子体参数测量与堆运行控制

- 聚变产物中子不带电荷、不受磁场约束，且具有强的穿透性，对其进行测量可以获得聚变反应率、燃料离子温度、浓度等信息。
- 聚变堆运行的功率控制需要使用到中子产额诊断测量结果。

3 辐射防护与装置运行安全保护

- DT运行时中子是主要的辐射源，停机维护堆内的伽马辐射主要由中子活化产生。
- 聚变装置的主机磁体、诊断及监控设备的各种探测器与传感器，及电子学器件均需要进行严格的中子辐射防护。

DT聚变能80%由DT中子携带

$$\mathrm{D+D} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He}\ (0.82\ \mathrm{MeV}) + \mathrm{n}\ (2.45\ \mathrm{MeV}) \qquad Q = 3.27\ \mathrm{MeV}$$

$$\mathrm{D+D} \rightarrow \mathrm{T}\ (1.01\mathrm{MeV}) + \mathrm{p}\ (3.02\ \mathrm{MeV}) \qquad Q = 4.03\ \mathrm{MeV}$$

$$\mathrm{D+T} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He}\ (3.52\mathrm{MeV}) + \mathrm{n}\ (14.06\ \mathrm{MeV}) \qquad Q = 17.59\ \mathrm{MeV}$$

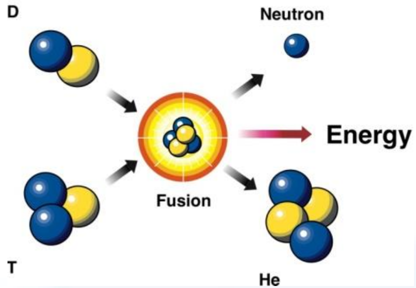
核聚变标志 | 物理诊断 | 能源利用 | 氚增殖 | 辐射防护

中子诊断

中子产额诊断	发射率剖面诊断	中子能谱诊断

测量对象	诊断参数	研究对象	诊断方法	测量技术
中子产额	S_n, P_f, T_i, τ_s…	聚变反应率及氚燃烧率、辅助加热、快离子约束及慢化、MHD …	注量诊断	电离室(^{235}U, ^{238}U, ^{3}He, ^{10}B …)
			活化测量	活化片(^{115}In, ^{58}Ni, ^{27}Al, ^{28}Si…)
中子发射率分布	$S_{n(r)}$, $P_{f(r)}$, $S_{b\alpha(r)}$…	聚变反应率及原生α粒子分布、芯部快离子输运、辅助加热…	中子相机 (RNC, VNC)	闪烁体(液闪, 芪,塑闪…)
中子能谱	V_{fi}, n_T/n_D, T_i, u_{rot}…	快离子速度分布、芯部氚氘浓度、辅助加热、等离子体动量输运…	快中子谱仪	核反应(Si,C,^{3}He) 反冲质子(有机,望远镜) 飞行时间(塑闪,有机) 磁分析谱仪…

聚变核产物诊断测量



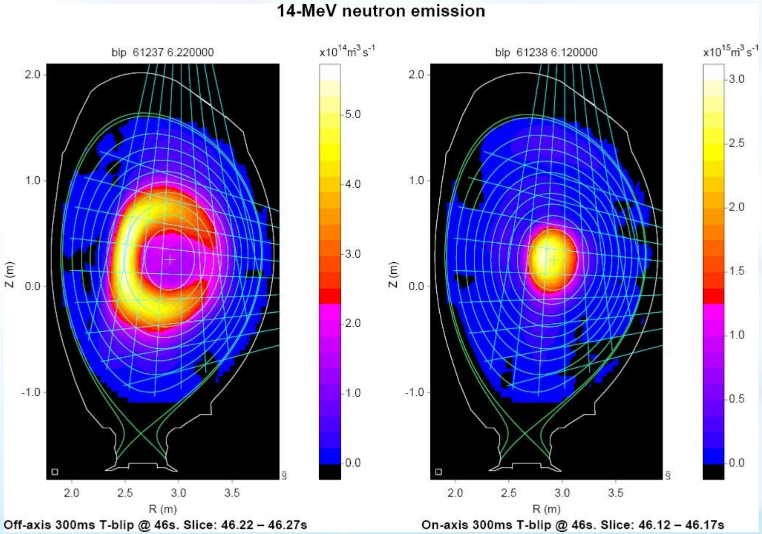
D+D $\rightarrow$ p(3MeV)+T(1MeV)

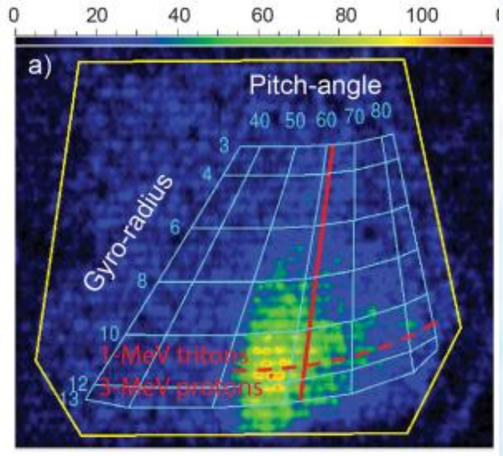
D+D $\rightarrow$ n(2.5MeV)+^{3}He(0.82MeV)

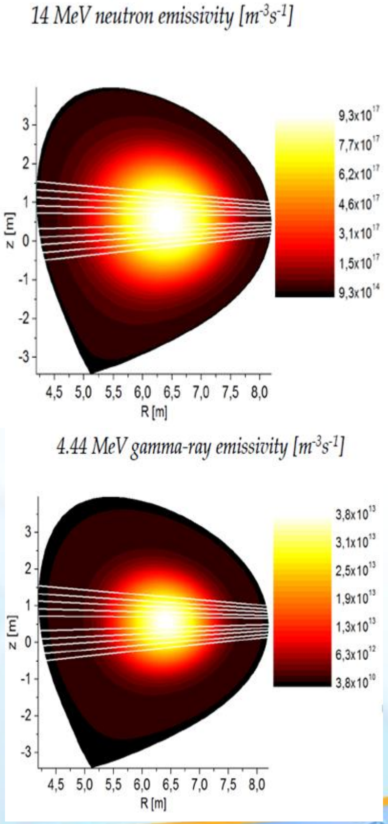
D+T $\rightarrow$ n(14.1MeV)+^{4}He(3.5MeV)

D+T $\rightarrow$ ^{5}He +γ (~16.7 MeV)

D+^{3}He $\rightarrow$p(14.7MeV)+^{4}He(3.6MeV)







谢谢垂听！

敬请批评指正！