

聚变能源概论

高 喆

gaozhe@tsinghua.edu.cn

2022-23春季学期

第三讲：

热核聚变与聚变功率产生

上节回顾：聚变反应

名称	聚变反应式	缩写形式	能量产出	
			MeV	Joule
DT:	$D + T \rightarrow {}^4_2\text{He} (3.52) + {}^1_0\text{n} (14.1)$	$T(d,n){}^4\text{He}$	17.59	2.818×10^{-12}
DDn:	$D + D \rightarrow {}^3_2\text{He} (.82) + {}^1_0\text{n} (2.45)$	$D(d,n){}^3\text{He}$	3.27	5.24×10^{-13}
DDp:	$T(1.01) + p(3.02)$	$D(d,p)T$	4.03	6.46×10^{-13}
D- ${}^3\text{He}$:	$D + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He}(3.66) + p(14.6)$	${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$	18.3	2.93×10^{-12}
p- ${}^6\text{Li}$:	$p + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_2\text{He}$	${}^6\text{Li}(p,\alpha){}^3\text{He}$	4.02	6.44×10^{-13}
p- ${}^{11}\text{B}$:	$p + {}^{11}_5\text{B} \rightarrow 3({}^4_2\text{He})$	${}^{11}\text{B}(p,2\alpha){}^4\text{He}$	8.68	1.39×10^{-12}

增殖氚的反应 (天然锂为 7.5% ${}^6\text{Li}$, 92.5% ${}^7\text{Li}$.)

n- ${}^6\text{Li}$:	${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n}(\text{热}) \rightarrow {}^4_2\text{He}(2.05) + T(2.73)$	${}^6\text{Li}(n,\alpha)T$	4.78	7.66×10^{-13}
n- ${}^7\text{Li}$:	${}^7_3\text{Li} + {}^1_0\text{n}(\text{快}) \rightarrow T + {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$	${}^7\text{Li}(n,n',\alpha)T$	-2.47	-3.96×10^{-13} (吸能反应)

从反应性考虑，适合应用于受控聚变的反应是

- ☐ A DD反应
- ☒ B DT反应
- ☐ C DHe3反应
- ☐ D p-B11反应

提交

从燃料丰富性考虑，适合应用于受控聚变的反应是

- ☒ A DD反应
- ☐ B DT反应
- ☐ C DHe3反应
- ☐ D p-B11反应

提交

从产能发电效率考虑，适合应用于受控聚变的反应是

A

DD反应

B

DT反应

C

DHe3反应

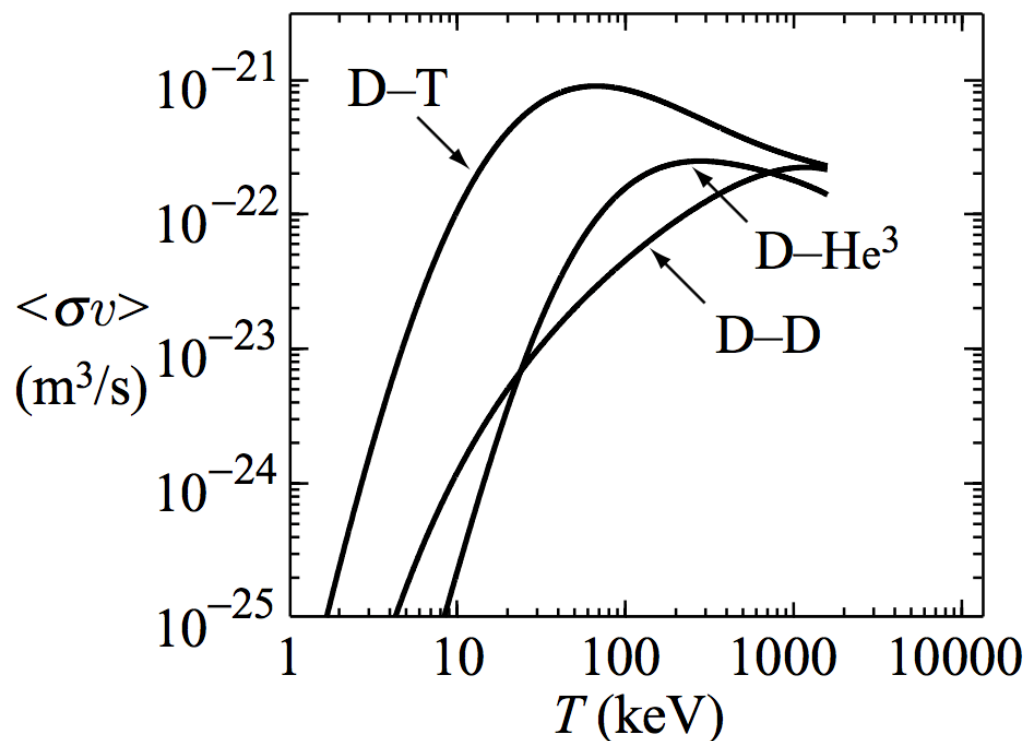
D

p-B11反应

提交

聚变反应评估

- 反应性
- 产能
- 燃料易获取性
- 燃料和产物放射性
- 产物电性



目前，反应性是最被关注的因素，因此D-T反应被最优先考虑

聚变反应 \neq 聚变能源

- 能源最基本的要求：**反应体系释放的功率（称为产出或者所得）** >> **维持反应体系运行所需的功率（称为投入或者损失）**
 - 化石能源 easy till now
 - 裂变能 easy in science (why?)
 - 聚变能 hard at extreme (why?)

很难吗？

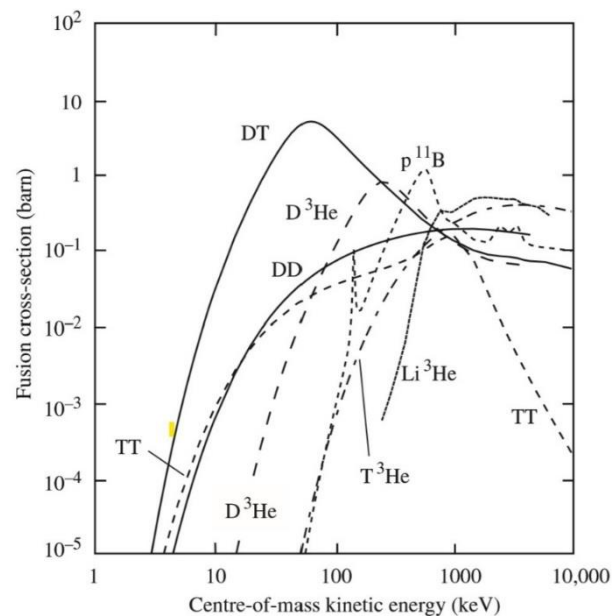


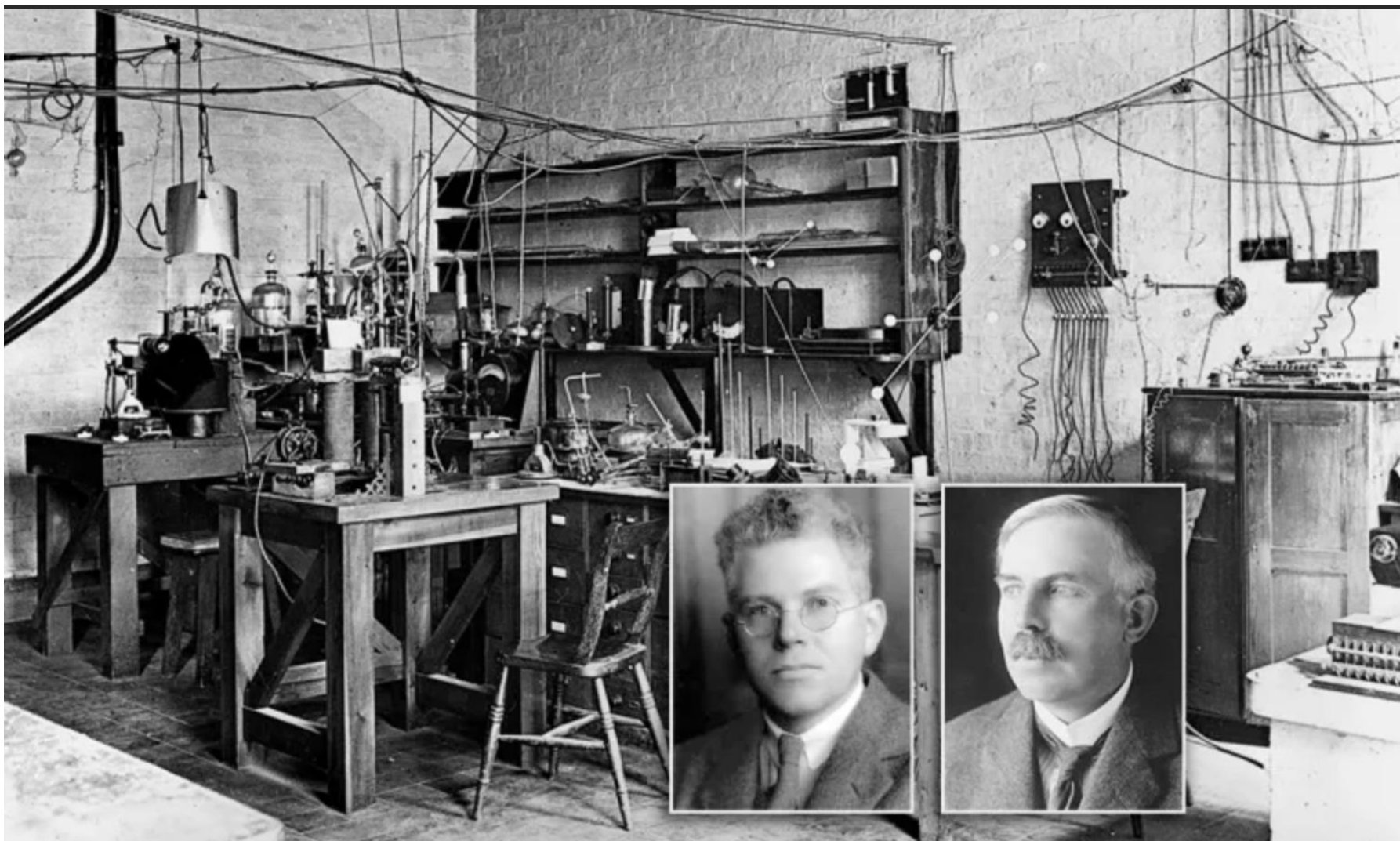
电压等级一般划分：

- 1、安全电压（通常36V以下）
- 2、低压（又分220V和380V）。
- 3、高压（10KV-220KV）。
- 4、超高压330KV-750KV。
- 5、特高压1000KV交流、 ± 800 KV直流以上。



显像管电子束
30keV

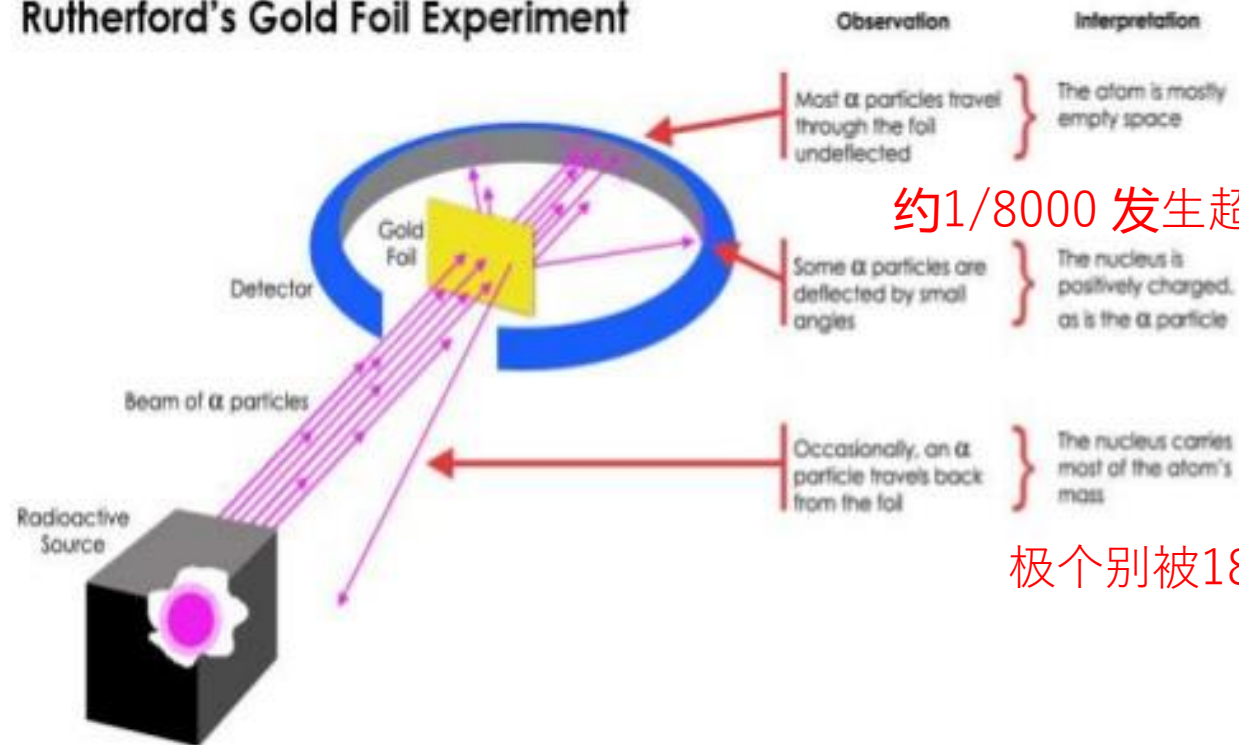




- 1932年：Mark Oliphant实现首次人工核聚变 $D+D \rightarrow T+p$



Rutherford's Gold Foil Experiment

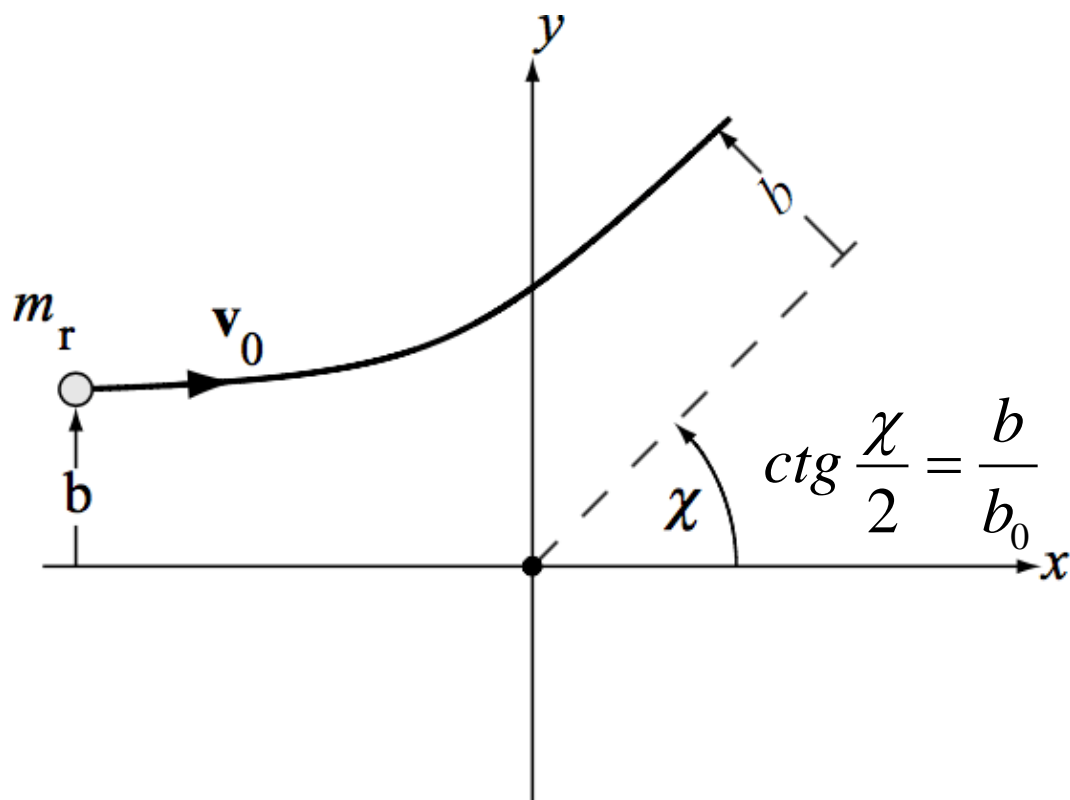


大多数散射角很小

约1/8000 发生超过90度散射

极个别被180度弹回

让我们考虑一下散射截面...



$$mv^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 b_0}$$

$$\sigma_{90} = \pi b_0^2 = \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{16\pi\epsilon_0^2 m_s^2 v^4}$$

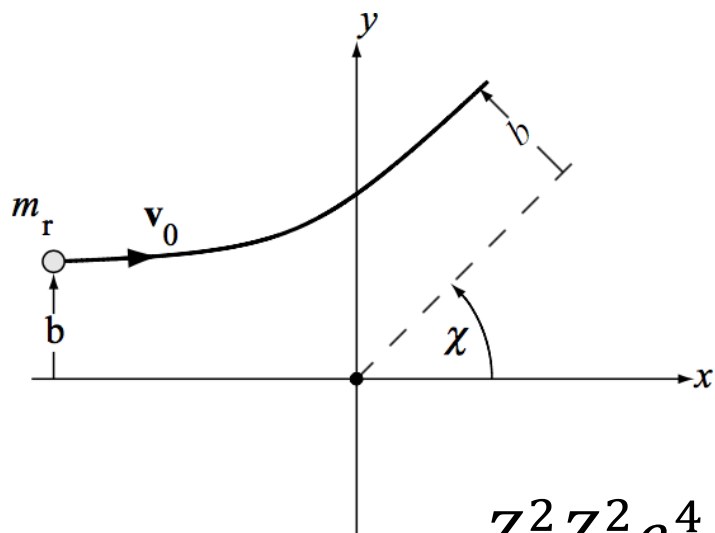
classical distance of
minimum approach

$$e^2/kT = 1.44 \times 10^{-7} T^{-1} \text{ cm} \\ (\text{T in eV})$$

$$T \sim 10 \text{ keV}, b_0 = 1.44 \times 10^{-13} \text{ m}$$

$$T \sim 1 \text{ MeV}, b_0 \sim 10^{-15} \text{ m} \quad ? \quad (\text{需要考虑量子效应})$$

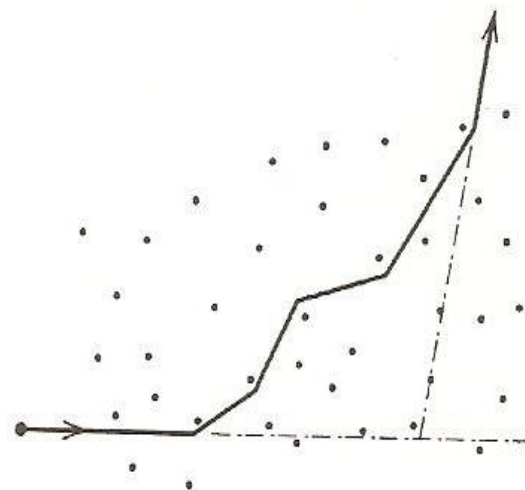
让我们考虑一下散射截面...



$$\sigma_{90} = \pi b_0^2 = \frac{Z_1^2 Z_2^2 e^4}{16\pi \epsilon_0^2 m_s^2 v^4}$$

@10keV, $b_0 \sim 10^{-13}\text{m}$

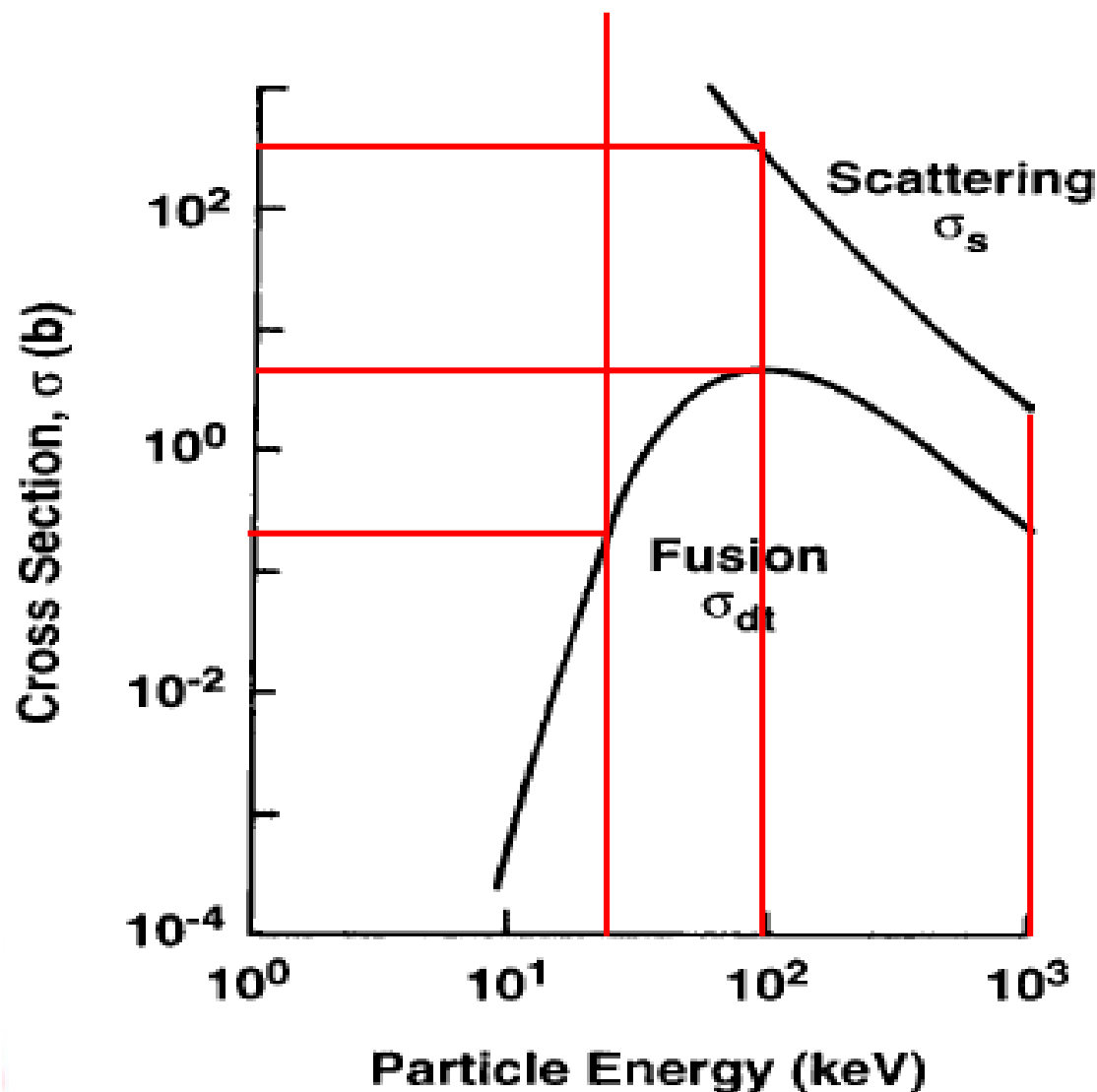
$\sigma_{90} \sim 100\text{-}1000 \text{ barn}$



$$\sigma_s = \sigma_{90} \times 2 \ln \Lambda \sim 40 \sigma_{90}$$

$$\ln \Lambda = \ln \frac{l_d}{b_0}$$

束靶反应可以作为聚变能的可行形式吗？



当我们用20keV的D束轰击T靶，大约 10^5 – 10^6 个D离子被散射达90度，只有1个发生聚变。

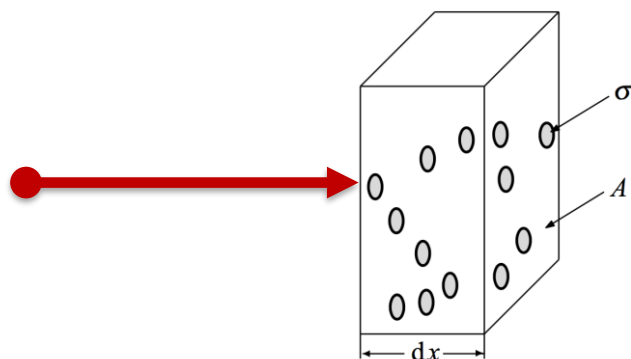
投入 $\gg 20\text{keV} \times 10^5$

产出 $\sim 17\text{MeV}$

束靶反应可以作为聚变能的可行形式吗？



束对撞：束横向动量很快大于纵向动量



气体靶（等离子体靶）：大量聚变反应发生前，粒子能量将会被迅速热化而失去其束流的特征，少量的聚变释放的能量远不足以补偿加速粒子产生的能量

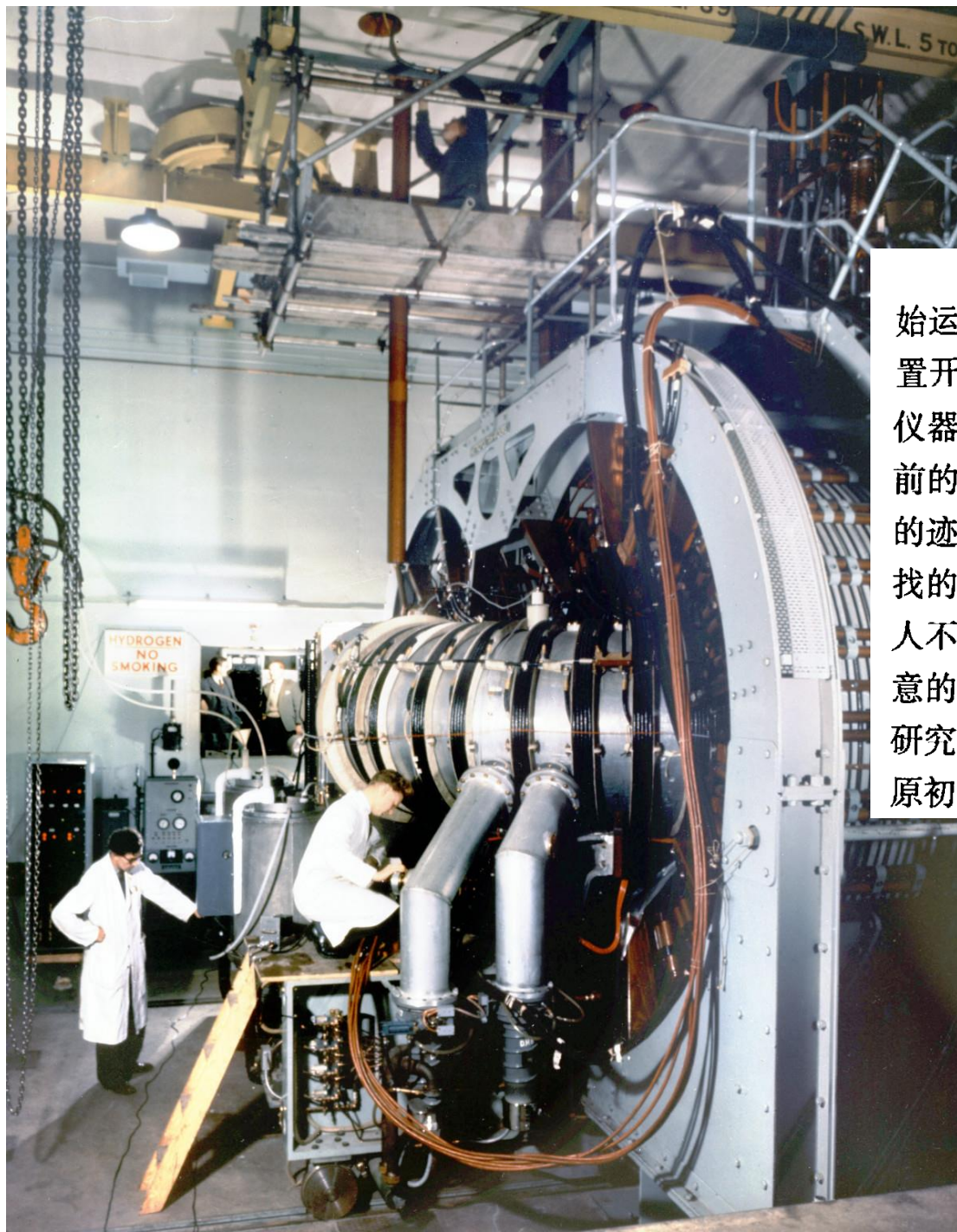
固体靶：电子散射更是会消耗几乎全部的束能量（与电子相互作用将占主导：
 $r_e \sim 10^{-10} \text{ m}$ ， $\pi r_e^2 \sim 10^8 \text{ b}$ ）

- 因此，束靶反应可以在实验室产生聚变反应，但不太可能作为聚变能源的可行形式。

ZETA

ZETA 于 1957 年 8 月中旬在牛津附近的哈韦尔实验室开始运行,没过多久它就引起了轰动。8 月 30 日深夜,ZETA 装置开始产生中子。科学家急忙做了检查以确定没有任何一种仪器发生故障,中子是真实的。箍缩,中子;箍缩,中子。与之前的美国同行一样,英国物理学家认为这些中子就是核聚变的迹象;归根结底中子就是在这么长时间里大家都一直在寻找的确凿证据。在 ZETA 研究组中也存在一些疑虑——一些人不能肯定 ZETA 装置是否真的实现了聚合——但是自鸣得意的齐声欢呼淹没了怀疑的声音,气氛是欢欣鼓舞的。ZETA 研究组的大多数成员认为他们终于做到了,他们开发了首个原初的人造太阳。在场的物理学家拿出了啤酒进行庆祝。⁹

***束靶反应产生的聚变中子不是各项同性的,这也可以作为判据也区分束靶反应和我们即将要提到的热核反应**



安全无辐射的核聚变技术来了？

2020-03-10 13:29 来源：澎湃新闻 · 澎湃号 · 湃客

字号

返朴 | + 关注

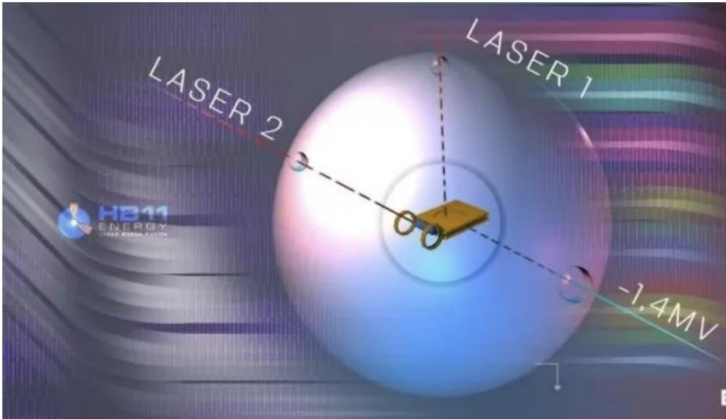
原创 林泉 返朴

点击上方蓝字“返朴”关注我们，查看更多历史文章

近日，澳大利亚HB11能源公司表示，他们在不需要超高温，也不产生放射性核废料的情况下，使得氢硼核聚变的反应速率比预期水平高出10亿倍。那么，安全无辐射的核聚变技术真的来临了吗？

HB11能源公司的常务董事Warren McKenzie博士解释说，许多核聚变实验都是用激光将燃料加热到极端高温，但HB11公司的方法则具有根本的不同。他们是用激光通过非线性力大规模地加速氢原子核，使之穿过硼样品，这就像是用氢作为标枪，希望击中硼原子，如果击中一个，就可以启动聚变反应。从物理学角度来看，温度与原子运动的速度相关，利用高温来实现聚变本质上相当于希望随机运动的原子能够彼此碰撞。与之相比，HB11公司的方法要精确得多。McKenzie博士说：

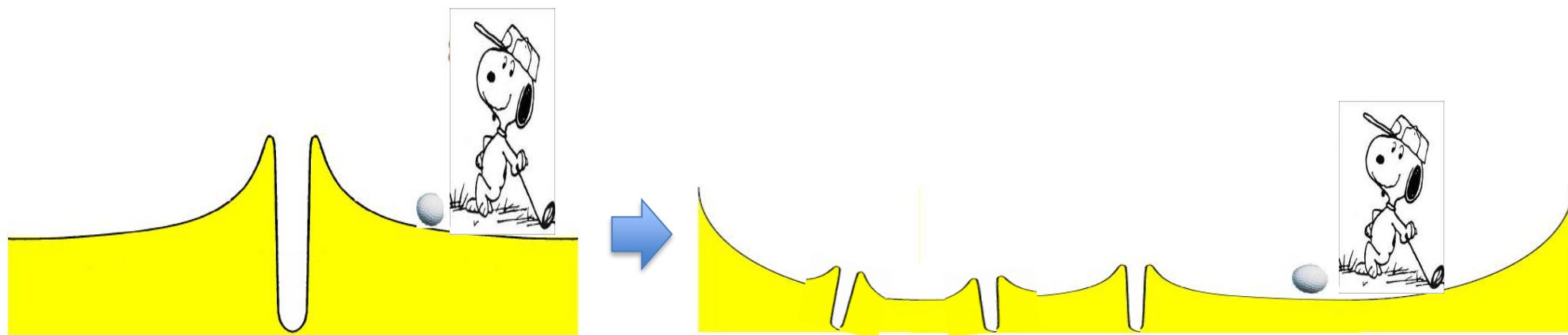
“我们并没有试图把燃料加热到不可思议的高温，而是回避了半个多世纪以来一直阻碍聚变能发展的所有科学挑战。这意味着我们的开发路径将比任何其他聚变方法都要快得多，也便宜得多。”



实验装置是一个几近中空的金属球，中心放置着HB11燃料球，两束激光同时从不同方向射向燃料球。| 图片来源：hb11.energy

因此...

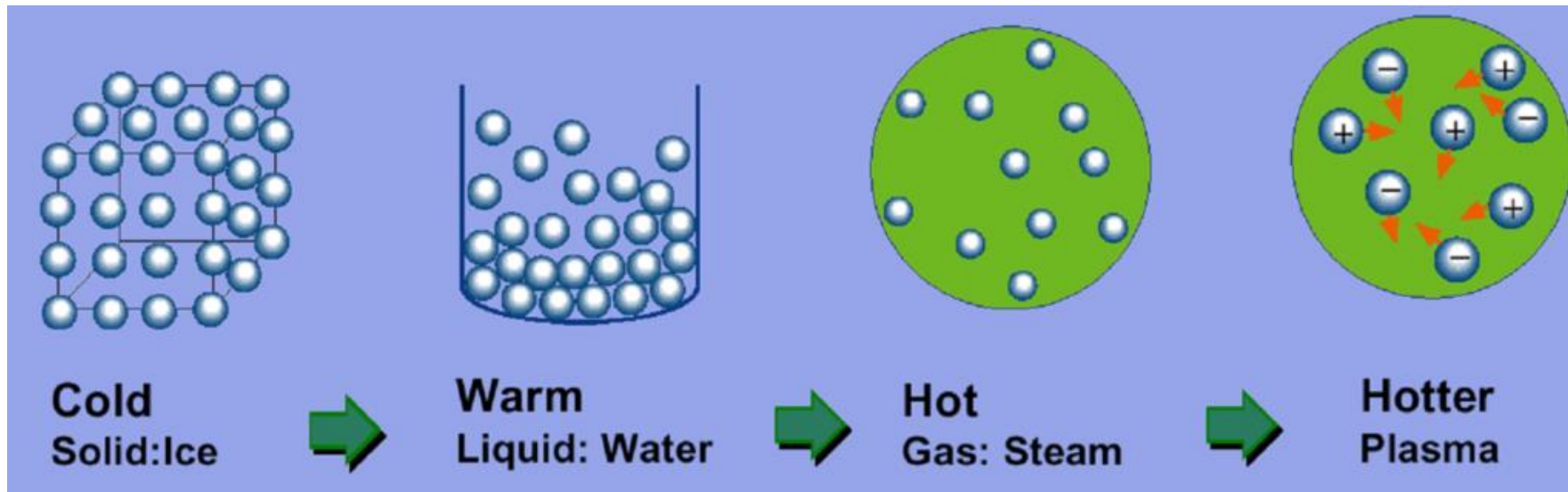
- 可能需要热运动→热核聚变



热核聚变

- 热核聚变 **Thermonuclear** Fusion
- 热 is NOT high temperature (even it is),
BUT **Thermal**
- 热→随机性（方向）& 高能尾巴（大小）
- 聚变能量要求进一步降低：温度10-20keV
（或者说其反应率峰值高于同等能量下束靶聚变反应率）

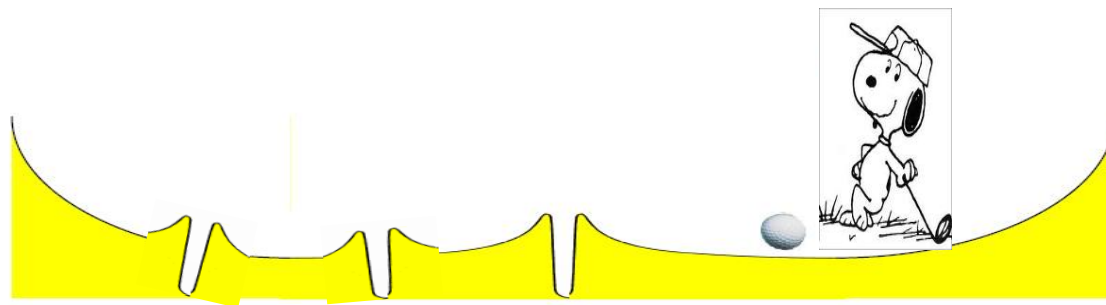
热核聚变等离子体：高温等离子体



Plasma State: the fourth state of the matter

但是...

- 除了温度外，我们对等离子体体系还有什么要求？
 - 直观想象一下？



但是...

- 除了温度外，我们对等离子体体系还有什么要求？
 - 直观想象一下？
 - 需要对一个聚变反应体系释放的功率 P_{out} 和损失的功率 P_{in} 进行更细致的考虑

聚变反应功率密度

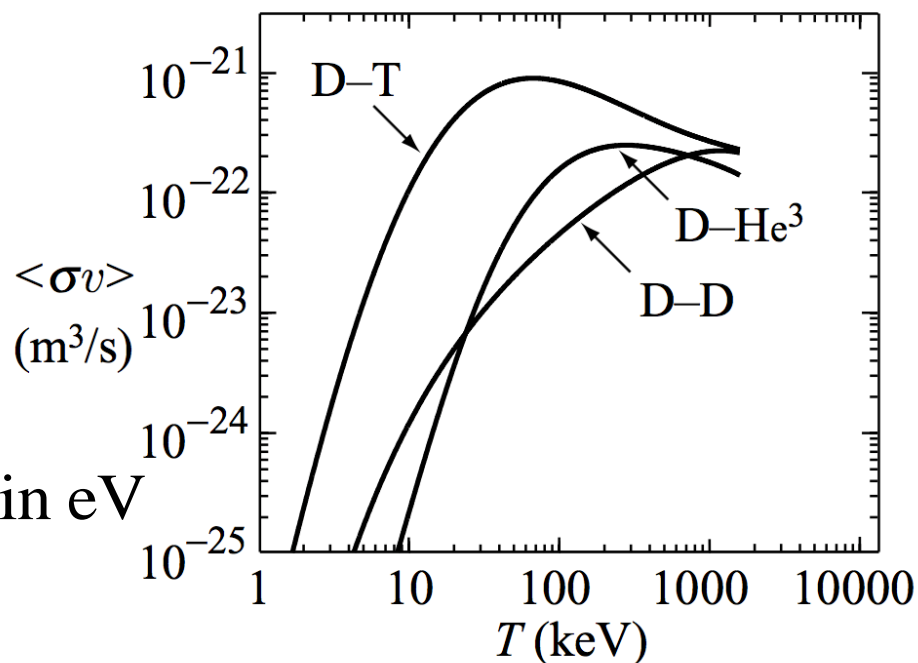
$$S_f = E_f n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_f$$

典型磁约束反应堆：
 $T=10\text{keV}$, $n=10^{20}\text{ m}^{-3}$
 $S_f=0.8\text{ MW m}^{-3}$

- 单次反应产能： $E_f = 17.6\text{ MeV}$
- 密度（平方）
- 反应率系数：温度的函数

当温度处于 8—25 keV 时

$$\langle \sigma v \rangle \gg 1.1 \times 10^{-30} T^2 \quad [\text{m}^3\text{s}^{-1}], \quad T \text{ in eV}$$



热量传递的途径有哪些？

A

热对流

B

热辐射

C

热传导

D

热交换

提交

体系功率损失

- 对流
- 辐射
- 传导

体系功率损失

- 对流：一般不允许有直接流出体系外的流速

体系功率损失

- 传导：对约束等离子体是普遍存在的

热通量：单位时间单位面积的能量流 $[W \cdot m^{-2}]$ ： $\mathbf{q} = -\kappa \nabla T$

其机制被称为输运理论

热传导损失功率密度： $S_{\kappa} = \frac{1}{V} \oint \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S}$

唯象地，我们可以定义一个宏观的能量约束时间 τ_E

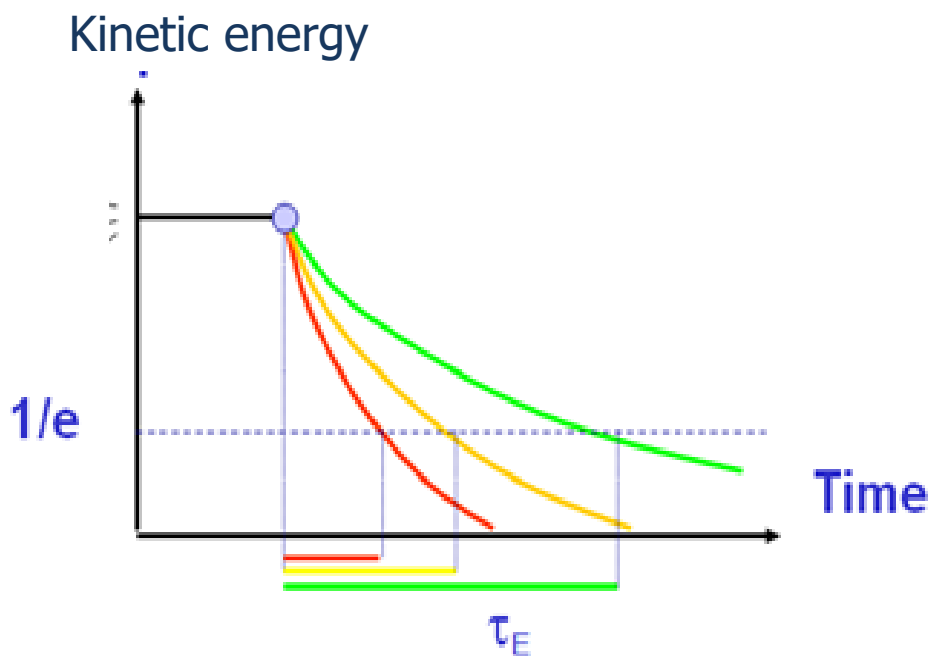
$$S_{\kappa} = \frac{1}{V} \oint \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} = \frac{W}{\tau_E}$$

典型磁约束反应堆 ($T=10\text{keV}$, $n=10^{20} \text{ m}^{-3}$)： $W=0.24 \text{ MJ m}^{-3}$

如果 $\tau \sim 1s$, 则 $S_f=0.24 \text{ MW m}^{-3}$

能量约束时间 τ_E :

- 无外部加热，只有热传导损失时，内能随时间指数衰减的时间常数
- 由外部加热维持体系内能恒定时，内能与加热功率之比



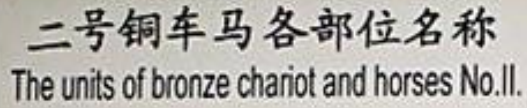
你觉着能量约束时间和什么有关系呢？

体系功率损失

- 辐射：轫致辐射、回旋辐射、线辐射、黑体辐射...

轆致辐射

Bremsstrahlung radiation

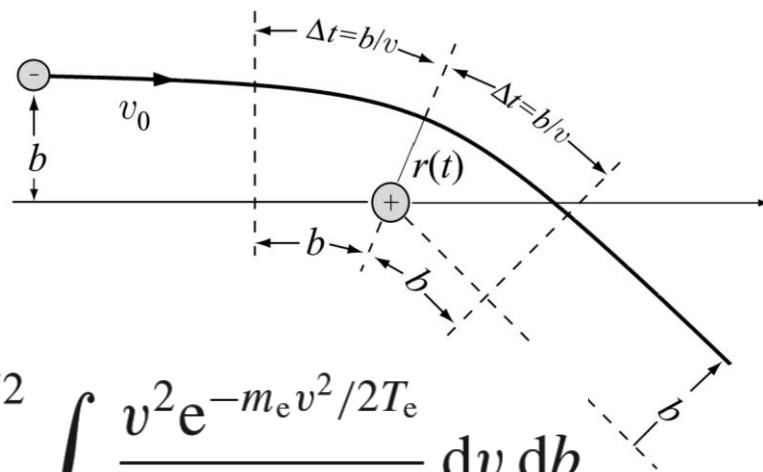


The units of bronze chariot and horses No.II.

轫致辐射

非相对论电子辐射功率 $P = \frac{\mu_0 e^2 \dot{v}^2}{6\pi c}$ W $\dot{v} = \frac{F_C}{m_e} \approx \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e b^2}$

$$W \approx P \Delta t \approx \left(\frac{Z^2 e^6}{48\pi^3 \epsilon_0^3 c^3 m_e^2} \right) \frac{1}{vb^3} \text{ J}$$



$$S_B = 8\pi^2 n_i n_e \left(\frac{Z^2 e^6}{48\pi^3 \epsilon_0^3 c^3 m_e^2} \right) \left(\frac{m_e}{2\pi T_e} \right)^{3/2} \int \frac{v^2 e^{-m_e v^2 / 2T_e}}{b^2} dv db$$



$$\int_{b_{\min}}^{\infty} \frac{db}{b^2} = \frac{1}{b_{\min}} = \frac{2\pi m_e v}{h}$$

$$S_B = \left(\frac{2^{1/2}}{6\pi^{3/2}} \right) \left(\frac{e^6}{\epsilon_0^3 c^3 h m_e^{3/2}} \right) Z^2 n_i n_e T_e^{1/2} \text{ W/m}^3$$

轫致辐射

Bremsstrahlung radiation

$$S_B = \left(\frac{2^{1/2}}{3\pi^{5/2}} \right) \left(\frac{e^6}{\epsilon_0^3 c^3 h m_e^{3/2}} \right) Z_{\text{eff}} n_e^2 T_e^{1/2} \text{ W/m}^3$$

$$S_B [\text{W/m}^3] = 1.625 \times 10^{-38} Z_{\text{eff}} n_e^2 \sqrt{T_e [\text{eV}]} \quad Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_j Z_j^2 n_j}{n_e}$$

典型磁约束反应堆 ($T=10\text{keV}$, $n=10^{20} \text{ m}^{-3}$): 0.016 MW m^{-3}

- 与密度平方成正比，但与温度依赖关系较弱（高温时增长不快）
- 频率上是连续谱，最大能量接近电子动能。对于聚变等离子体，基本在X波段。轫致辐射对于热核聚变等离子体是光学透明的

回旋辐射（同步辐射）

$$S_c = \frac{e^4}{3\pi\epsilon_0 m_e^3 c^3} B^2 n_e T_e$$

$$S_c[\text{W/m}^3] = 6.21 \times 10^{-20} B^2 n_e T_e [\text{eV}]$$

典型磁约束反应堆 ($T=10\text{keV}$, $n=10^{20} \text{ m}^{-3}$, $B=6\text{T}$): 2 MW m^{-3}

- 回旋辐射强依赖于磁场，相比于轫致辐射，密度依赖弱而温度依赖强
- 通常处于微波频段 $f = \frac{n\omega_c}{2\pi} = \frac{neB}{2\pi m_e}$
- 因此等离子体对回旋辐射是光学厚的，会被等离子体再次吸收。并且由于器壁的反射，可以多次穿过等离子体

黑体辐射

- 假设聚变等离子体可以当作黑体，其黑体辐射面功率：

$$S_{bb}[\text{W}/\text{m}^2] = 1.03 \times 10^9 T^4[\text{eV}]$$

For $T=10\text{keV}$, $S_{bb}=10^{19} \text{ MW m}^{-2}!!$

- 但在在受控聚变研究中，黑体辐射完全不需要考虑。
为什么？

（与之对比，太阳聚变中，轫致辐射是被等离子体完全吸收的，能量只能以黑体辐射的形式从表面发射出去）

线辐射（杂质辐射）

- 线辐射：核外电子跃迁产生的具有特征谱线的辐射
 - 在聚变条件下，核外电子接近于完全剥离，因此线辐射通常只在边界区有一定强度。
 - 对于高Z杂质，可能仍然有部分内层电子未剥离
- 但杂质同时影响有效电荷数，而韧致辐射功率随 Z_{eff} 而增加

$$Z_{eff} = \sum_i Z_i^2 \frac{n_i}{n_e}$$

功率产生和损失小结

- 聚变反应功率密度 $S_f = E_f n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_f$
- 功率损失（最小）
 - 辐射 $S_B = \left(\frac{2^{1/2}}{3\pi^{5/2}} \right) \left(\frac{e^6}{\varepsilon_0^3 c^3 h m_e^{3/2}} \right) Z_{\text{eff}} n_e^2 T_e^{1/2} \text{ W/m}^3$
 - 传导 $S_\kappa = \frac{1}{V} \oint \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} = \frac{W}{\tau_E}$

所以，聚变能源的条件是 $S_f \geq S_B + S_\kappa$?

你觉得聚变能源的条件是 $S_f \geq S_B + S_K$

A 是

B 否

提交

功率产生和损失小结

- 聚变反应功率密度 $S_f = E_f n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_f$
- 功率损失（最小）
 - 辐射 $S_B = \left(\frac{2^{1/2}}{3\pi^{5/2}} \right) \left(\frac{e^6}{\epsilon_0^3 c^3 h m_e^{3/2}} \right) Z_{\text{eff}} n_e^2 T_e^{1/2} \text{ W/m}^3$
 - 传导 $S_\kappa = \frac{1}{V} \oint \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} = \frac{W}{\tau_E}$

所以，聚变能源的条件是 $S_f \geq S_B + S_\kappa$ ？

- ✓ 聚变产生功率并不一定能直接留在体系内（比如中子携带的）
- ✓ 损失的功率是可用的还是不可用的？效率如何？
- ✓ 外部的加热功率是允许存在的

现在，你觉着聚变能源的条件是 $S_f \geq S_B + S_K$

A 是

B 否

提交

可以从两个层面看

- 从聚变体系的稳态运行考虑
- 从聚变得到的净功率考虑

下节课：稳态零维功率平衡模型

“**稳态**”：各种成分的燃料粒子均处于平衡态（即既达到力学平衡，也达到热力学平衡）。

“**零维**”：描述平衡的方程是一个标量方程（**体积平均**！）

$$\frac{3}{2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{3}{2} \nabla \cdot p \mathbf{v} + p \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{q} = S$$



$$\frac{1}{V} \int \left[\frac{3}{2} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot p \mathbf{v} \right) + p \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{q} - S \right] d\mathbf{r} = 0$$

作业（网络学堂）

- 1. 在下列两组参数下计算聚变反应功率、轫致辐射功率、回旋辐射功率
 - (1) D-T, $n=10^{20}\text{m}^{-3}$, $B=6\text{T}$, $T=10\text{keV}$
 - (2) D-He3, $n=10^{20}\text{m}^{-3}$, $B=6\text{T}$, $T=100\text{keV}$
- 2. 补充阅读（选作）：阅读“K-F Liu and A. W. Chao, Accelerator based fusion reactor, Nuclear Fusion 57, 084002 (2017)”及相关文献，对于加速器驱动聚变方案给出你的评价