

聚变能源概论

高喆

gaozhe@tsinghua.edu.cn

2022-23春季学期

第二讲：

可用的聚变反应

上节回顾

- 能源问题让我们把目光投向太阳
- 太阳的故事告诉我们核聚变可以提供能量
(事实上地球上的大部分能源都来自于太阳的能量)
 - ✓ 也给我们一些启示：温度和反应截面对聚变的重要性
 - ✓ 但太阳中的聚变反应不能直接在地球上实现，**我们需要寻找地球上可用的聚变反应...**
 - 主要原因是太阳上的p-p聚变反应率系数太小，导致反应太慢，功率密度太低

- 反应截面 σ : 设每个靶粒子有一个截面 σ , 凡落入这个范围的入射粒子与靶粒子发生反应, 表征了一个入射粒子和靶上一个靶核发生反应的几率 ---- $[l^2]$
- 反应率 $R = n_1 n_2 \sigma v$: 指单位时间单位体积内发生的碰撞数 ---- $[l^{-3}t^{-1}]$
- 反应率系数 σv : 入射粒子在单位时间单位靶粒子密度下发生的碰撞数 ---- $[l^3t^{-1}]$
- 碰撞频率 $n_2 \sigma v$: 入射粒子单位时间内遭遇的碰撞数, 即碰撞频率 ---- $[t^{-1}]$



反应率系数： $2 \times 10^{-49} \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ ($T \sim 10^7 \text{ K}$)

反应截面： $1 \times 10^{-54} \text{ m}^2$

碰撞频率 ($n=10^{32} \text{ m}^{-3}$) : $2 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$

反应率 ($n=10^{32} \text{ m}^{-3}$) : $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3} \text{s}^{-1}$

功率密度 (每两次反应26.7MeV) : 200 Wm^{-3}

问题：为什么这么小的截面？

[核子尺寸： $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}$]

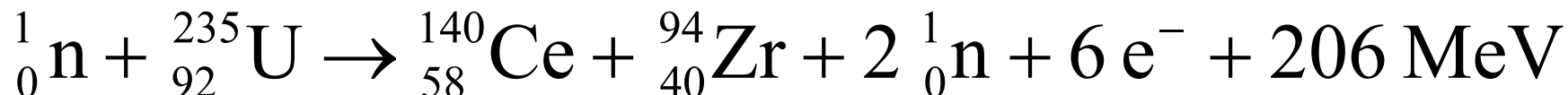
物理上的理解

- 质子-质子反应涉及弱相互作用，是个截面极小的慢过程



- 地球上的受控聚变需要新的聚变反应（只涉及质子和中子重新分布）
 - 从中子出发？
 - 质子+稍重原子？
 - 从氦出发？

与裂变比较



铀 235 的每个核子释放出 0.88 MeV 的能量。

裂变反应能够转变成**实用电能**的原因有两个

- (1) 触发裂变反应只需要一个中子，而反应产物中则包含两个中子——**中子增殖**使反应可自持。
- (2) 中子的**电中性**使得它可以轻易地穿过包围在原子周围的电子云从而近距离接触到原子核本身。因此燃料可以**低温固体**形式存在。

中子驱动下的轻核裂变和聚变

考察两种**假设性**的核反应：

- **氘核 + 中子裂变：** ${}_0^1\text{n} + {}_1^2\text{D} \rightarrow {}_1^1\text{H} + 2 {}_0^1\text{n} - 2.23 \text{ MeV}$

这个反应产生了所希望的中子增殖，但它是吸热反应，不能作为能源。

- **氘核 + 中子聚变：** ${}_0^1\text{n} + {}_1^2\text{D} \rightarrow {}_2^3\text{He} + \text{e}^- + 6.27 \text{ MeV}$

这个反应属于放能反应，但它中子不能保持增殖，故无法自持，因此也不能（独立）作为能源。

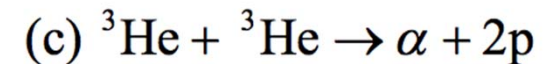
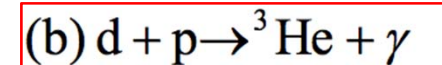
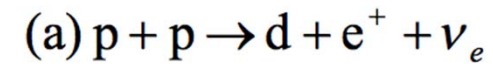
所有轻核-中子反应都具这两个特征，因此，

轻核 + 中子不是现实的能源产生途径

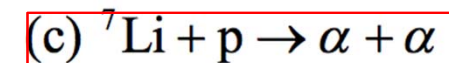
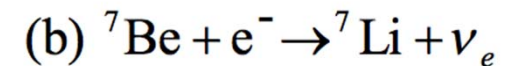
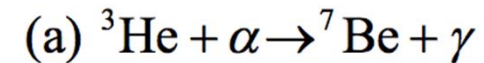
- 受控聚变需要新的聚变反应（只涉及质子和中子重新分布）

- 从中子出发？ **X**
- 质子+稍重原子？ \checkmark
- 从氦出发？ \checkmark

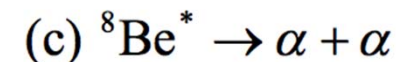
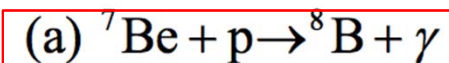
ppI: (~85%)



ppII (alternative to ppIc)



ppIII (alternative to ppIIb)

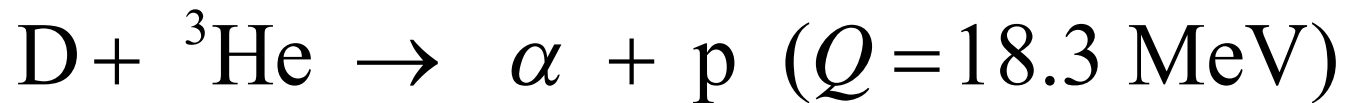
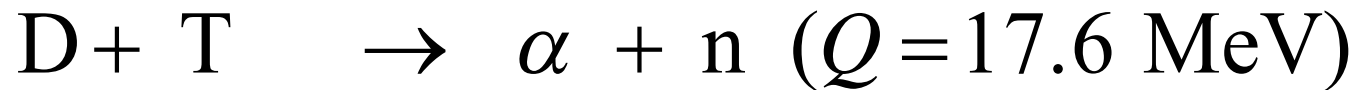
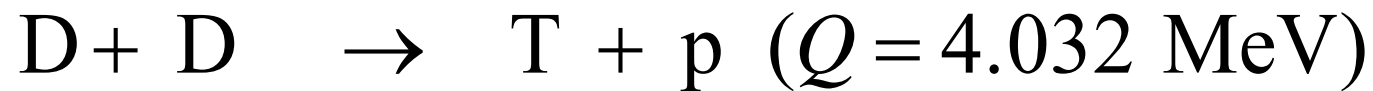
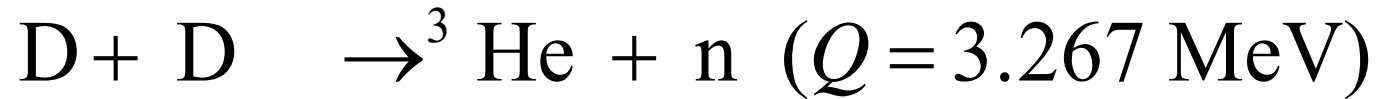


质子驱动的聚变反应

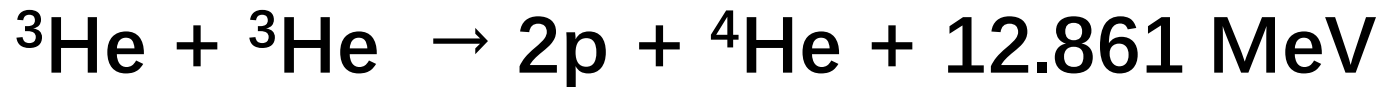
其中反应截面较大的有

- $p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He} + 4.022 \text{ MeV}$
- $p + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^6\text{Li} + 2.125 \text{ MeV}$
- $p + {}^9\text{Be} \rightarrow \text{D} + 2 {}^4\text{He} + 0.652 \text{ MeV}$
- $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + 8.664 \text{ MeV}$
- ...

从氘出发的聚变反应



更重元素的聚变（宇宙重元素的产生）



一般而言，随着聚变元素质量增加，需要聚变温度是更高呢还是更低？

- ☒ A 更高
- ☐ B 更低
- ☐ C 不确定

提交

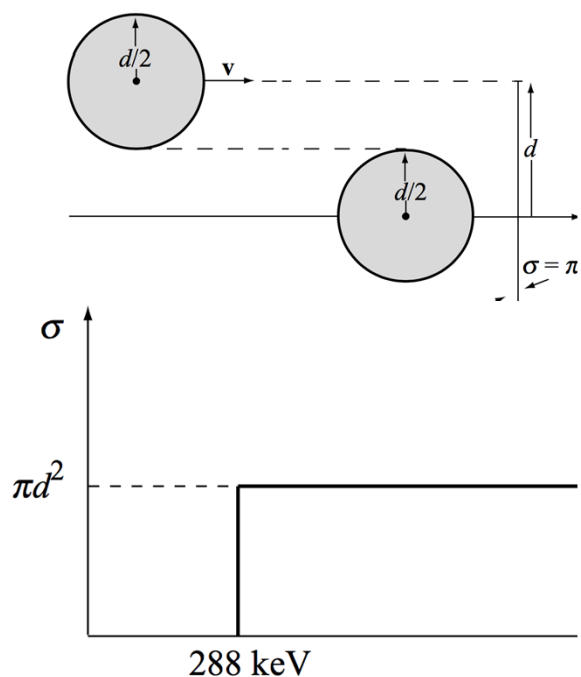
聚变反应的评价

- 聚变反应产能（功率密度）： $S_f = n_1 n_2 \sigma v E_f$
 - 反应性（反应率系数）
 - 单次反应放能
 - 需要投入的功率
- 燃料：天然性、冷凝性、放射性
- 产物：放射性、电性

反应截面

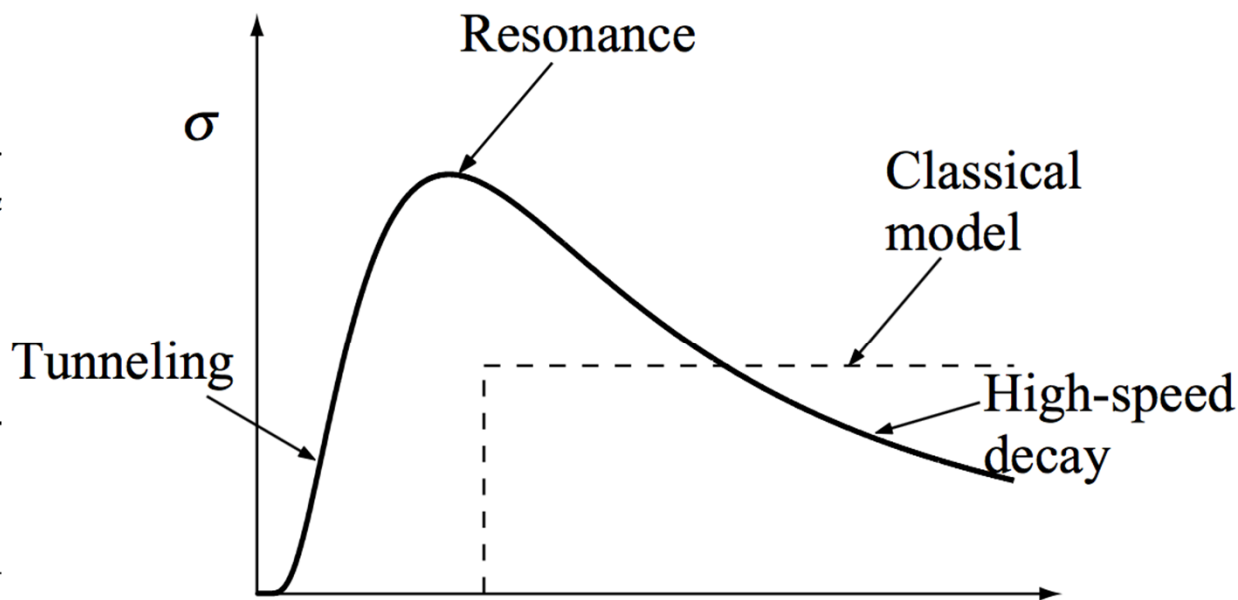
硬球模型→量子模型

常用单位: barn - 10^{-28} m^2



$$E_{\max} = 0.28 Z_1 Z_2 \text{ [MeV]}$$

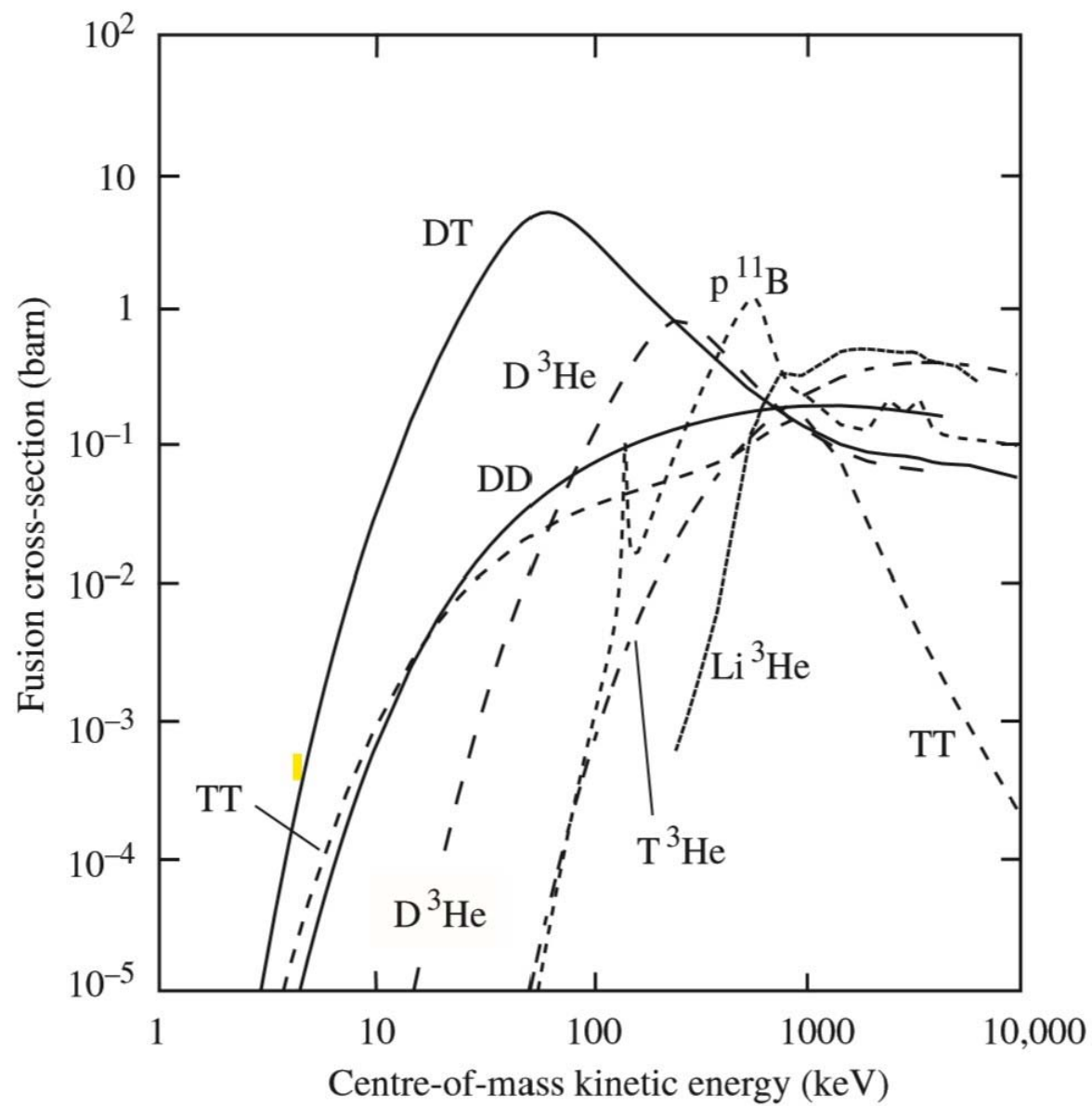
$$\sigma = \pi d^2 \sim 0.1 \text{ barn}$$



$$\sigma(w) = \frac{C_0}{w} \exp \left[- \frac{\pi M^{1/2} Z_1 Z_2 e^2}{2^{1/2} \epsilon_0 \hbar w^{1/2}} \right]$$

这里 C_0 是由实验决定的常数, $M = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$

----Gamov 1938

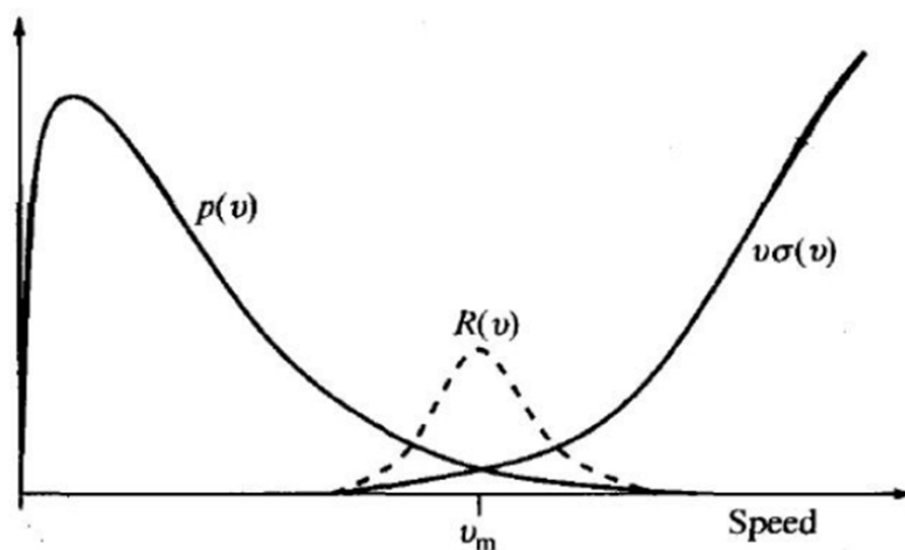


质子-质子 (1000K) : 10^{-26} barns (弱相互作用)
热中子 (25eV) +U235: 600 barns (共振)

反应率系数（考虑速度分布）

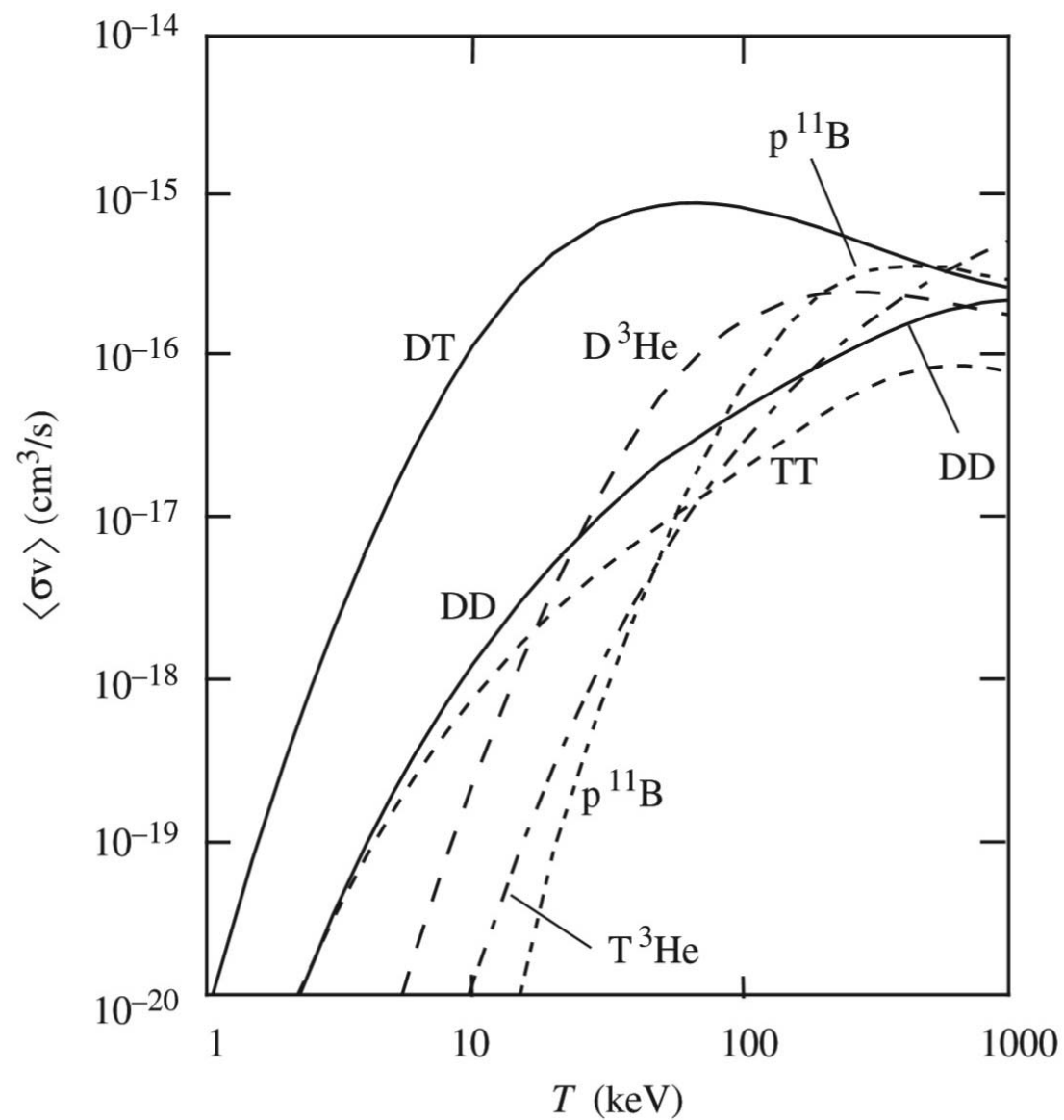
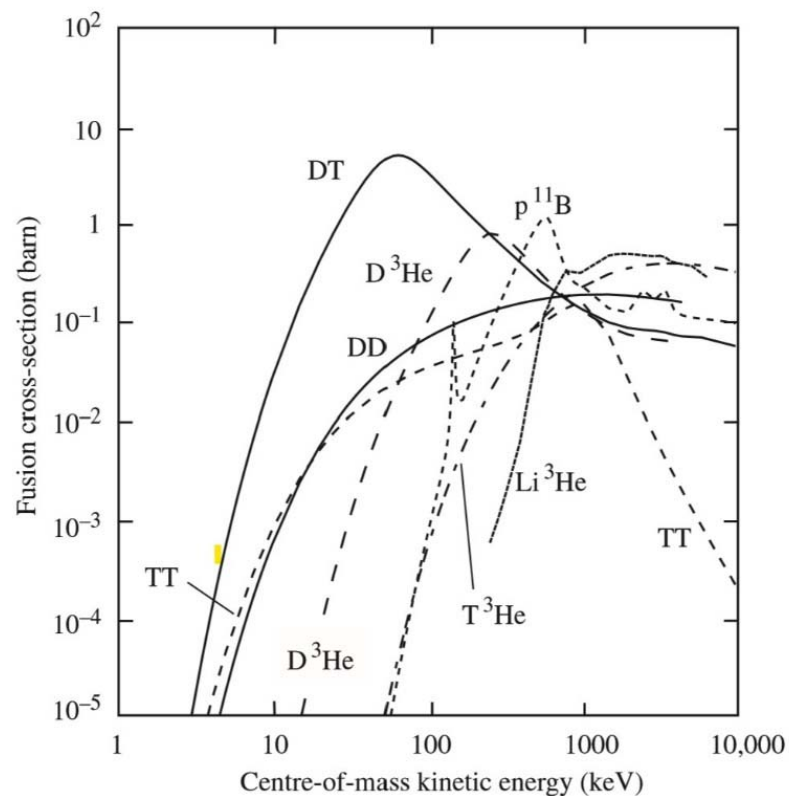
$$R_{12} = \frac{dF n_2 A dx}{A dx dt} = \sigma n_1 n_2 \frac{dx}{dt} = n_1 n_2 \boxed{\sigma v} \quad \text{反应率系数}$$

$$R_{12} = \int f_1(\mathbf{v}_1) f_2(\mathbf{v}_2) \sigma(|\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1|) |\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1| d\mathbf{v}_1 d\mathbf{v}_2 = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$$



高能成分有更大的贡献

反应率系数（考虑速度分布）



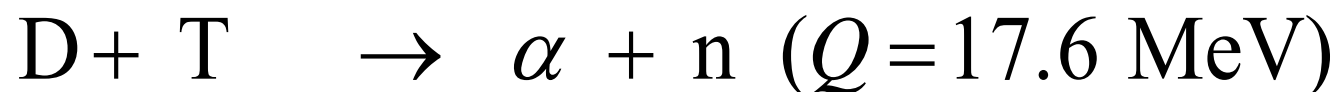
理想聚变反应

- 理想聚变反应：

- 聚变反应性（反应率系数） 高
- 聚变反应产能 高（可点火性）
- 燃料：丰富性、天然性、冷凝性、放射性
丰富且天然易获取、无冷凝性、无放射性
- 产物：放射性、电性
无放射性、不含中子*（advanced fusion fuels）

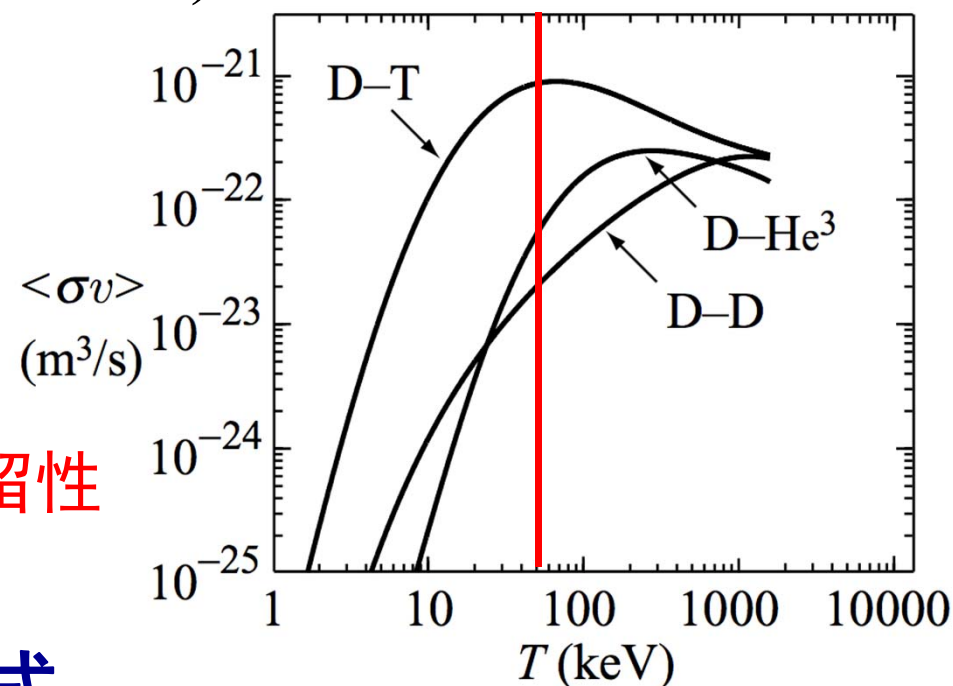
- 但是事实上，很难有反应同时满足所有的要求。

D-T反应：反应性最高



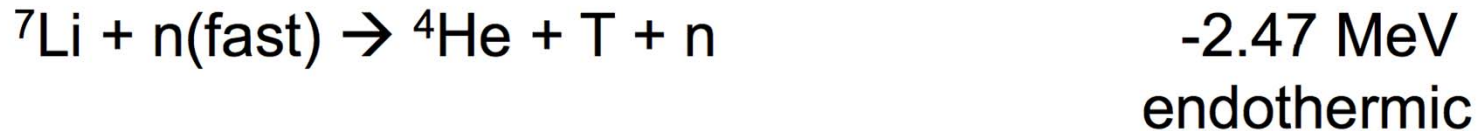
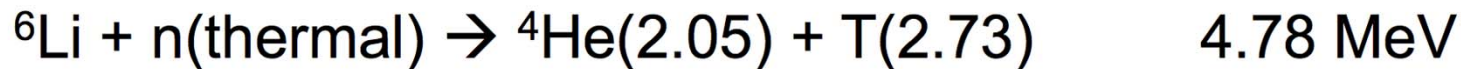
- 反应性最高
- 单位核子放能高
- 有中子产生
- 氚需要人工制备，且具有很强滞留性

是第一代聚变反应堆的首选方式，
而且是未来DD反应的点火机制



D-T反应：需要自持产氚

- 氚半衰期12.3年（衰减率5.47%/y）
- 1000MW D-T聚变堆需要氚的量：50kg/y
- 目前制备方法：反应堆辐照、加速器
（产量 2kg/y, 价格 \$30M-200M/kg）
- 未来聚变堆只能自持生产



Natural lithium = 7.42% ${}^6\text{Li}$ and 92.58% ${}^7\text{Li}$



D-T聚变反应的能量分配

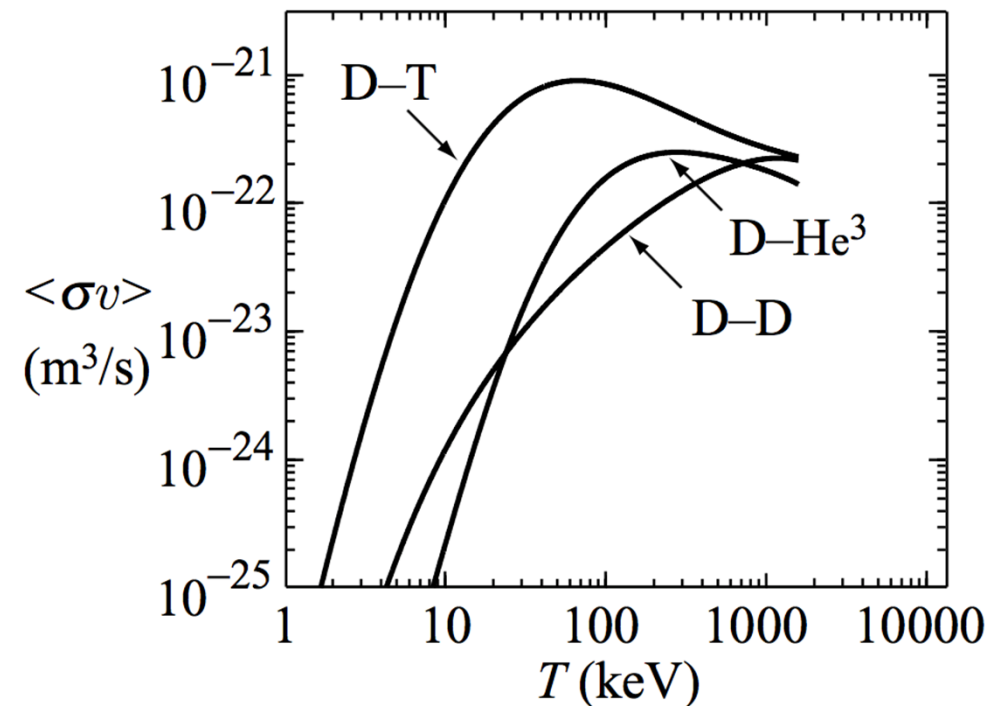
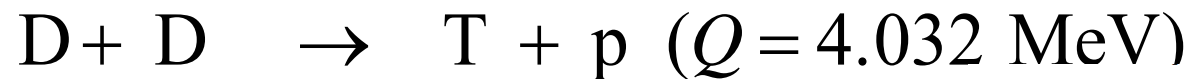
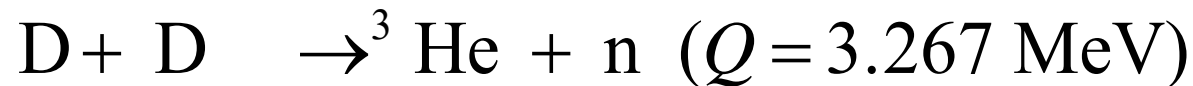
- 对于氘-氚反应来说，确定两种反应产物的能量分配尤为重要，因为它的反应产物中一种是带电的而另一种不带电。
- 根据动量守恒和能量守恒，产物粒子的动能与其质量成反比。或者说，较轻的粒子携带了大部分能量。
- 对于氘-氚反应，释放的能量 $E = 17.6 \text{ MeV}$ 。反应产物为一个 α 粒子和一个中子，因此
 - α 粒子的动能为 $(1/5)E = 3.5 \text{ MeV}$
 - 中子的动能为 $(4/5)E = 14.1 \text{ MeV}$

D-T反应的放射性

- 一方面源自于氚是放射性物质
 - 另一方面来自于14MeV中子对包层和结构材料的活化。
- 这种放射性接近于射线装置，但必须考虑聚变堆的辐射防护和屏蔽。

D-D反应：燃料最丰富

- D的丰度是 1.53×10^{-4} （约7000个氢原子中有一个氘），且制备相当容易



D-D反应：燃料最丰富

- D的丰度是 1.53×10^{-4} （约7000个氢原子中有一个氘），且制备相当容易

蒸馏方法：水中的氘主要以HDO的形式存在。在同一温度下， H_2O 与 HDO 的蒸气压不同。历史上，氘就是由低温下通过蒸发浓缩来发现的

电解方法：电解水时，在阴极产生的氢中，氘的丰度低于电解池中余下的水中氘的丰度，将这种剩余的水冷凝，送入下一级电解池继续电解，就会产生更富集的氘。

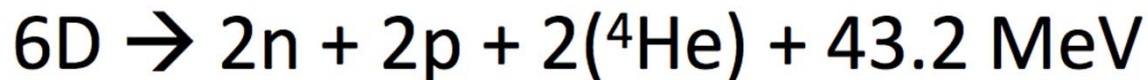
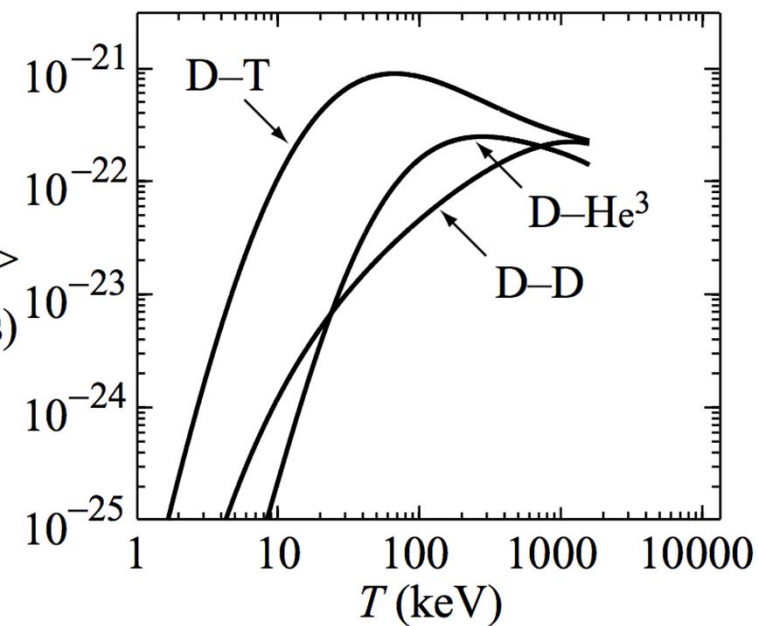
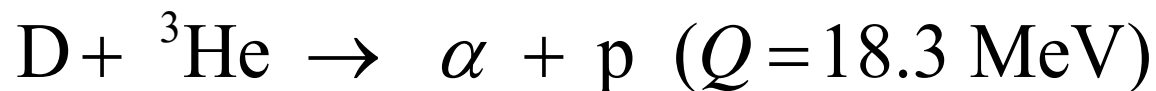
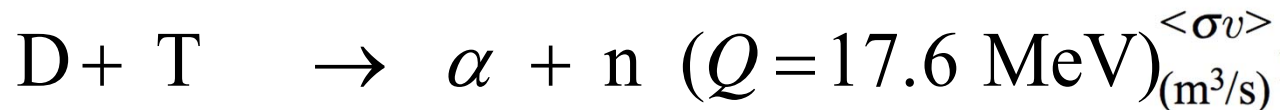
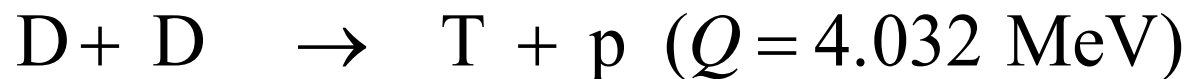
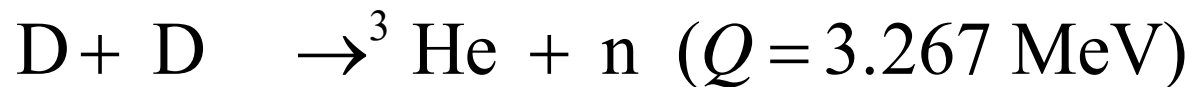
蒸汽-氢气双温置换法：利用可逆反应 $H_2O + HD \rightleftharpoons HDO + H_2$ 在不同温度下正反向速率不同来 富集氘化水（低温下有利于正反应，高温下有利于逆反应）。

铀床净化：将贫铀放入不锈钢真空容器中，充入待净化的氢气，加压（几 MPa），铀与氢和杂质分别生成 UH_3 和氮化铀、氧化铀、碳化铀等，然后加温（ $\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ ），这时杂质化合物很难分解，而 UH_3 则是可逆的，且H, D, T 的金属化合物 UH_3 的平衡蒸气压不同。

D-D反应：燃料最丰富

- 从能量产出的角度看，DD反应的单位核子产能不算太高，仅为1.82MeV
- 从反应产物看，DD第一个反应道有中子产生，在第二个反应道有氦产生。因此，放射性、辐射屏蔽、材料活化等问题都依然存在。

D-D催化反应

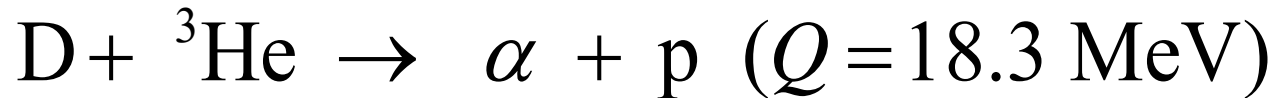


D-T是第一代聚变反应堆的首选方式，而且是未来更先进的 DD反应的点火机制。

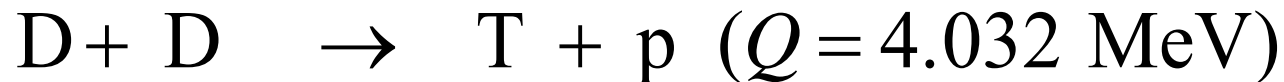
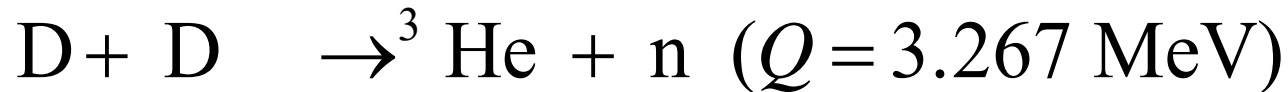
D-D催化反应

- 催化的DD反应中，由于两个高放能反应的加入，单位核子产生提高到3.6MeV
- 考虑T和n的存在，其放射性、辐射屏蔽、材料活化等问题基本上和DT反应堆面临的问题一致，虽然程度稍低
- 催化DD反应能量的大部分（61.8%）由带电粒子携带
- 不再需要额外的氦增值

D-He3反应：无中子反应？



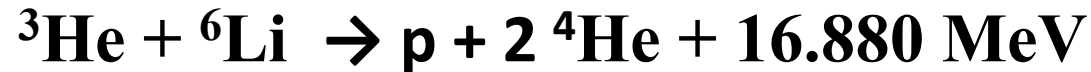
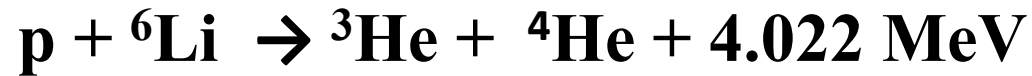
- 反应性较高(甚至略好于D-D)
- 单位核子放能高
- 无中子产生
- ³He在地球无储备
- 伴生反应有中子产生



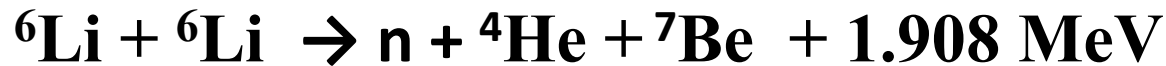


质子+稍重原子：无中子反应？

- p-⁶Li 反应

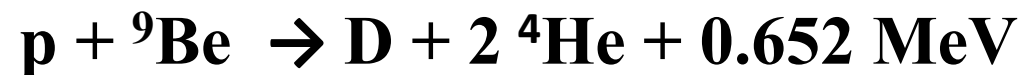
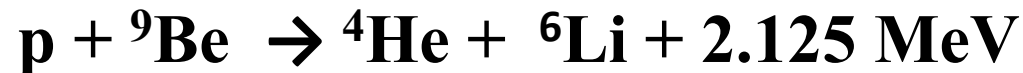


- 次级反应会产生中子和放射性⁷Be



- 这个反应与高性能反应相比不具优势

- p-⁹Be 反应



- 产能不高，次级反应有中子产生

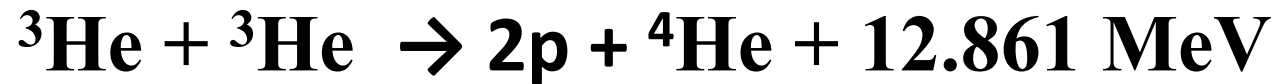
3-alpha: 无中子反应!

- p-¹¹B 反应



- 燃料来自天然同位素
- 无中子，产物稳定且带电
- 在基于质子的无中子反应中，反应截面最大
- 与D-D反应点火要求接近（远比DT苛刻）
- 冷凝性

- ^3He - ^3He 反应



- ^3He 必须来自半催化反应或 DT 反应堆中多余的 T 的衰变
- 无中子，产物稳定且带电
- 同样的点火温度下截面较小

总结：常用聚变反应

名称	聚变反应式	缩写形式	能量产出	
			MeV	Joule
DT:	$D + T \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} \text{ (3.52)} + \frac{1}{0}\text{n} \text{ (14.1)}$	$T(d,n)^4\text{He}$	17.59	2.818×10^{-12}
DDn:	$D + D \rightarrow \frac{3}{2}\text{He} \text{ (.82)} + \frac{1}{0}\text{n} \text{ (2.45)}$	$D(d,n)^3\text{He}$	3.27	5.24×10^{-13}
DDp:	$T \text{ (1.01)} + p \text{ (3.02)}$	$D(d,p)T$	4.03	6.46×10^{-13}
D- ^3He :	$D + \frac{3}{2}\text{He} \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} \text{ (3.66)} + p \text{ (14.6)}$	$^3\text{He}(d,p)^4\text{He}$	18.3	2.93×10^{-12}
p- ^6Li :	$p + \frac{6}{3}\text{Li} \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} + \frac{3}{2}\text{He}$	$^6\text{Li}(p,\alpha)^3\text{He}$	4.02	6.44×10^{-13}
p- ^{11}B :	$p + \frac{11}{5}\text{B} \rightarrow 3(\frac{4}{2}\text{He})$	$^{11}\text{B}(p,2\alpha)^4\text{He}$	8.68	1.39×10^{-12}

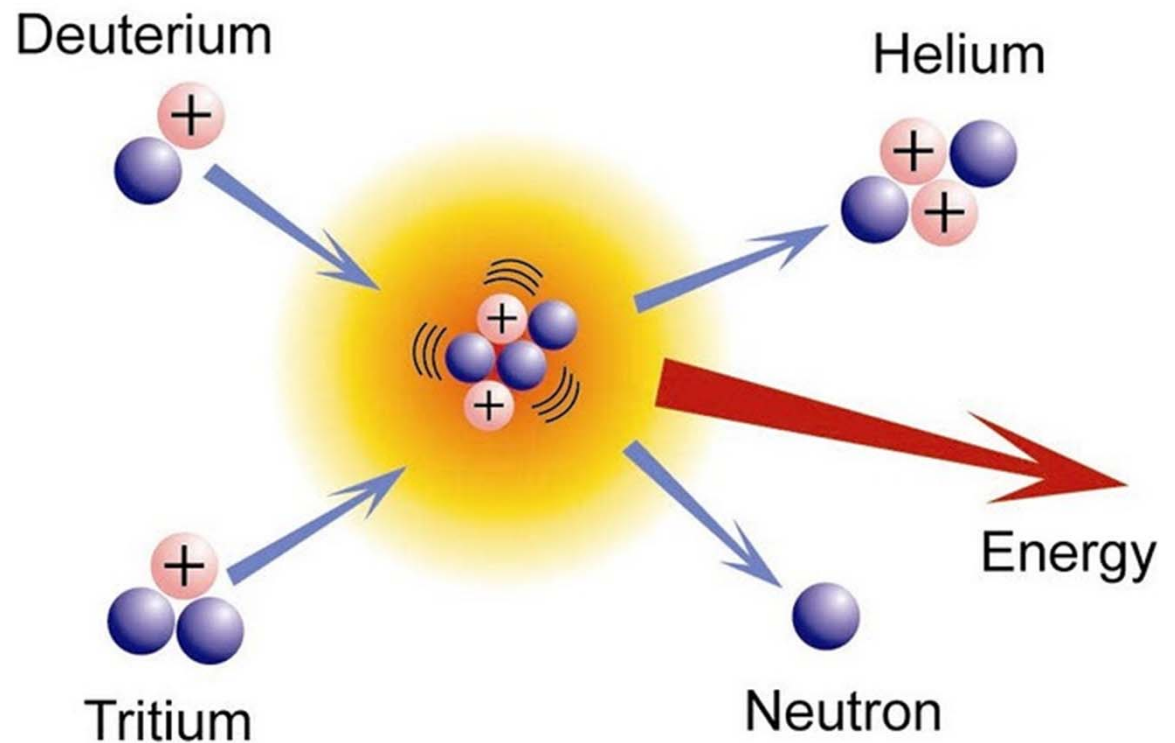
增殖氚的反应 (天然锂为 7.5% ^6Li , 92.5% ^7Li .)

n- ^6Li :	$\frac{6}{3}\text{Li} + \frac{1}{0}\text{n} \text{ (热)} \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} \text{ (2.05)} + T \text{ (2.73)}$	$^6\text{Li}(n,\alpha)T$	4.78	7.66×10^{-13}
n- ^7Li :	$\frac{7}{3}\text{Li} + \frac{1}{0}\text{n} \text{ (快)} \rightarrow T + \frac{4}{2}\text{He} + \frac{1}{0}\text{n}$	$^7\text{Li}(n,n',\alpha)T$	-2.47	-3.96×10^{-13} (吸能反应)

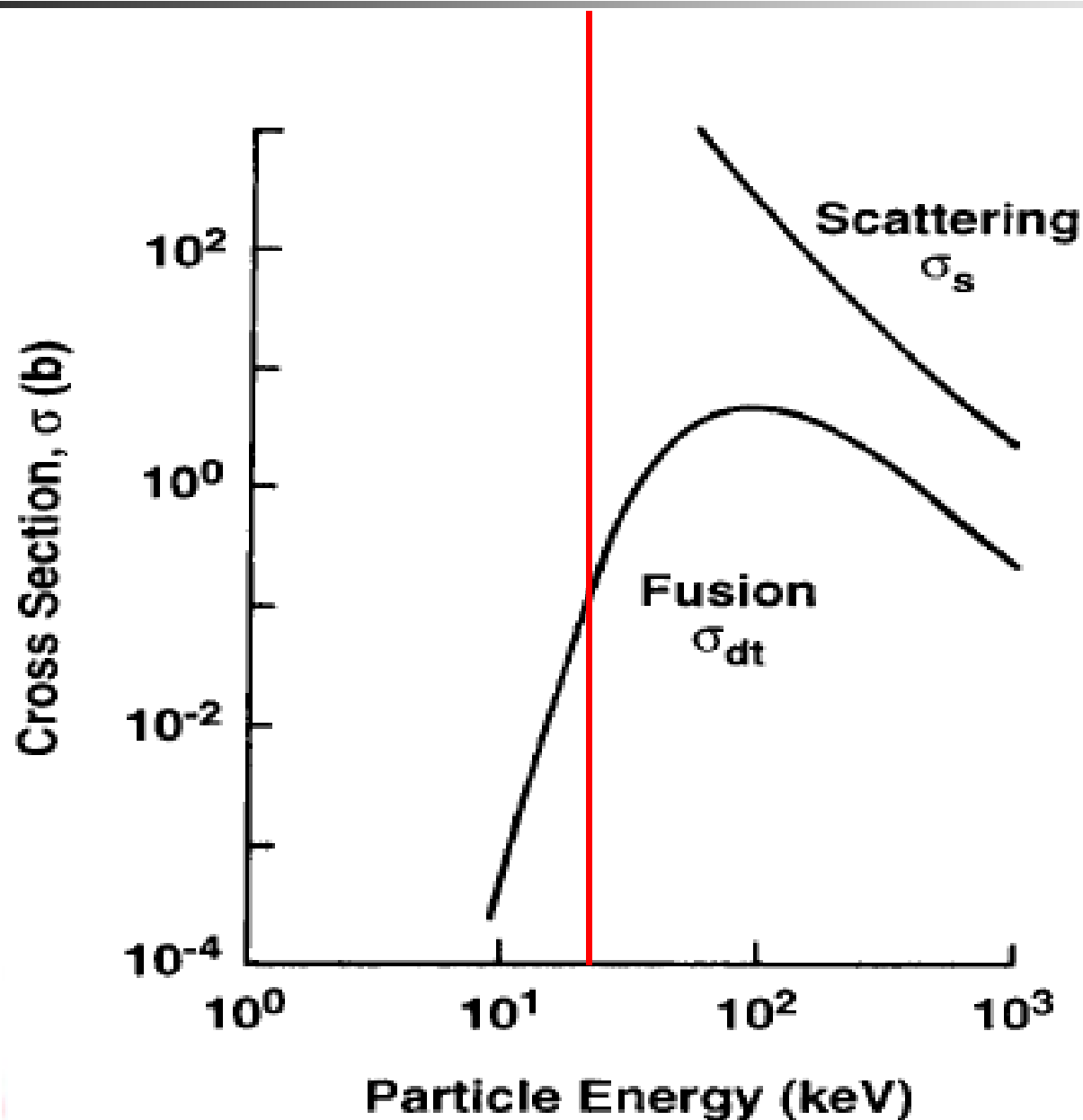
特征	高反应性	高能量密度	燃料易获取	低放射性	直接转换
D-T	*	*			
D-D			*		
催化DD		*	*		*
D-He3		*		*	*
p-B11			*	*	*

聚变反应评估

- **反应性** → 至少在目前是决定性的
- 单次反应产能
- 燃料天然性
- 燃料和产物放射性
- 产物电性



然而，当我们考虑散射截面后…

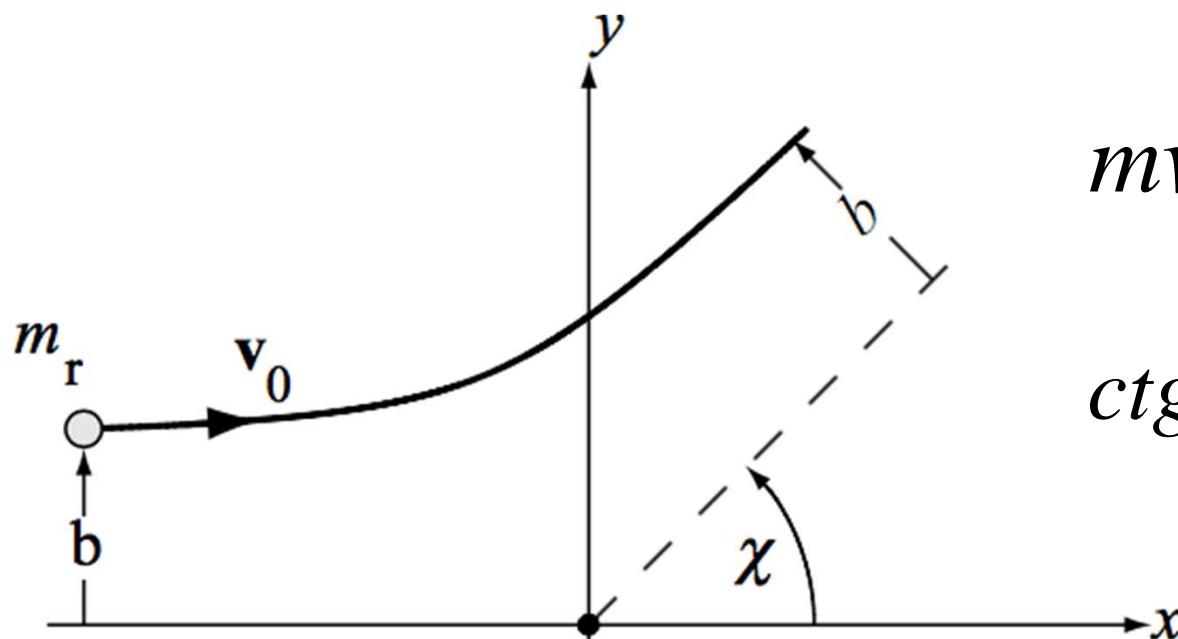


当我们用20keV的D束轰击T靶，大约 10^6 – 10^7 个D离子被散射90度，只有1个发生聚变。

投入： $\gg 20\text{keV} \times 10^6$

产出：17MeV

然而，当我们考虑散射截面后…



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

$$\operatorname{ctg} \frac{\chi}{2} = \frac{b}{b_0}$$

$$\sigma_{90} = \pi b_0^2 = \frac{Z^2 e^4}{16 \pi^2 \epsilon_0^2 m^2 v^4}$$

预习库仑散射截面

因此...

- 需要认真考虑能量得失
- 下节课：热核聚变与聚变功率产生

作业

1. 计算下列燃料可以提供的能量

(a) 1升汽油； (b) 1公斤铀235

(c) 1升海水（利用催化DD聚变）；

(d) 0.5升海水+等量T（利用DT聚变）

2. 计算催化DD聚变中释放能量的分配方式；据此结果设想后续采用的能量取出方式，并与DT聚变进行比较

3. 计算并画出不同分布函数下D-T聚变的反应率系数与温度（能量）关系：（1）D和T为等温的Maxwell分布；（2）T为delta函数分布，D为Maxwell分布；（3）T为delta函数分布，D为能量为5keV，10keV，20keV，50keV，100keV，500keV的束流；（4）T为Maxwell分布，D为能量为5keV，10keV，20keV，50keV，100keV，500keV的束流【第（4）部分，请给出不同束流能量下反应率系数与温度的关系】

*反应截面数据可在文献中查询，网络学堂上传的NRL公式手册中有近似公式

上周作业

- 1. $\sim 1 \times 10^{11} \text{a}$, $\sim 100 \text{m}^2$

- 2.
$$\frac{dP}{dr} = - \frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2} \qquad \frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

$$P_c = AM^{\frac{2}{3}}\rho^{\frac{4}{3}}$$

$$P = K_e \rho^{\frac{5}{3}} + K_i \rho T_c$$