

§ 10 核反应

1.核反应概述

放射性核衰变是不稳定核的自发转变（不可逆）；核反应是核在外界作用下的转变过程（可逆）。研究核反应的重要目的之一是获取核能。核反应研究的问题为两类：一是反应运动学，研究在能、动量守恒下，核反应服从的一般规律；二是反应动力学，研究参加核反应的各粒子间相互作用的机制。

$$i + T \rightarrow l + R + Q; \quad T(i, l)R + Q$$

实现核反应的途径:

- a) 放射源 (i 种类少、强度底、能量小且不可调)
 - b) 宇宙射线 (能量高 10^{21}eV 、强度非常弱)
 - c) 加速器和反应堆 (种类多、能区宽、束流强)
- 近期有望将 ^{197}Au 加速至 $200\text{GeV}/\text{A}$ 。

核反应分类:

- a) 按入射粒子 (i) 的能量分类:
 - 低能 ($<140\text{MeV}$)
 - 中能 ($<1\text{GeV}$)
 - 高能 ($>1\text{GeV}$)

b) 按入射粒子 (i) 的种类分类:

中子核反应 ($n,$)

质子核反应 ($p,$)

光核反应 ($\gamma,$) ($e,$)

放射性束核反应 ($RIB,$)

轻离子核反应

重离子核反应

c) 按靶核 (T) 的质量分类:

轻核反应 ($A \leq 30$)

中核反应 ($30 < A \leq 90$)

重核反应 ($A > 90$)

d) 按出射粒子 (l) 的性质分类:

核散射 $T(i, i) T; T(i, i') {}^mT$

核转变 $T(i, l) R$

e) 按物理机制

深度非弹反应

碎裂反应

直接核反应

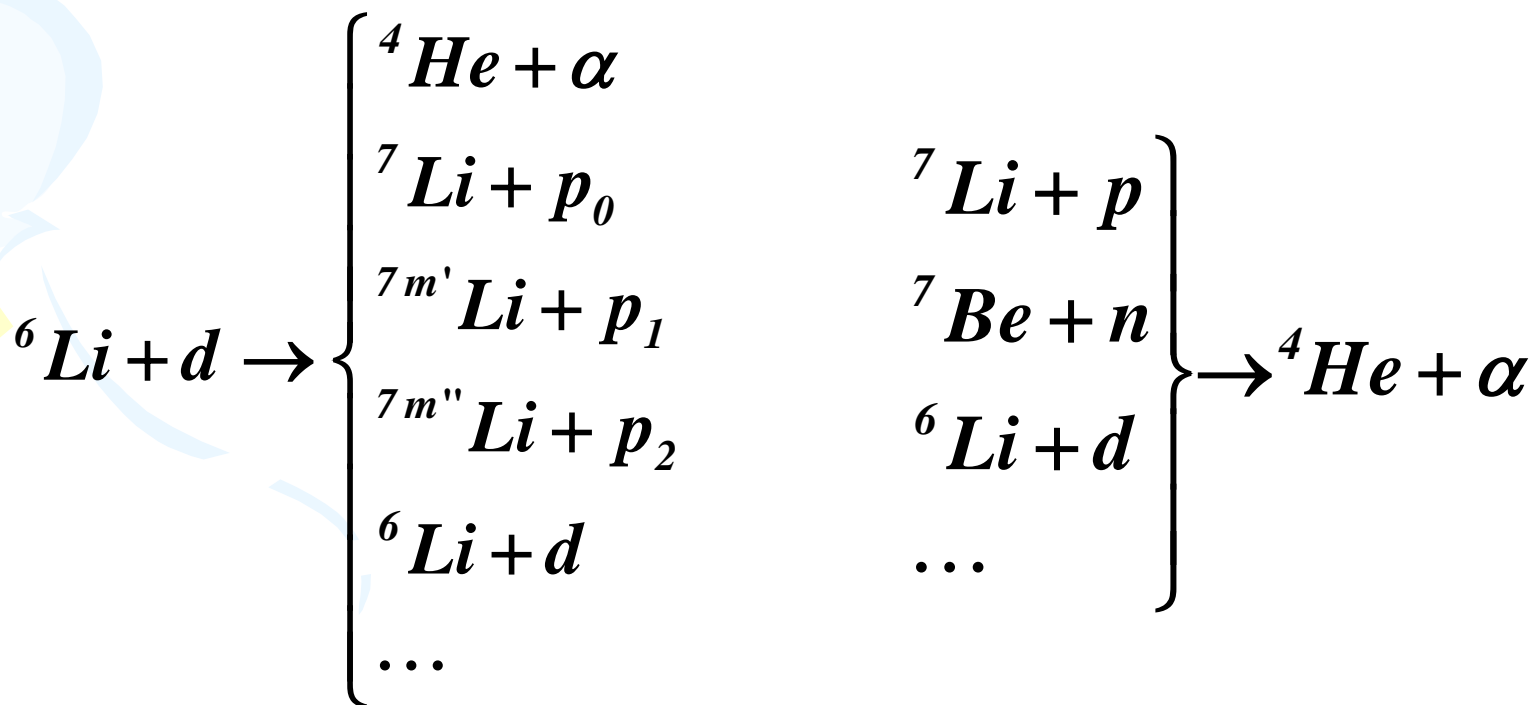
熔合反应

复合核反应

...

核反应道：

在一定条件下，发生核反应的可能途径（对应于每一个核反应过程）称为反应道。反应前的称为入射道，反应后的称为出射道。



核反应遵从的守恒定律：

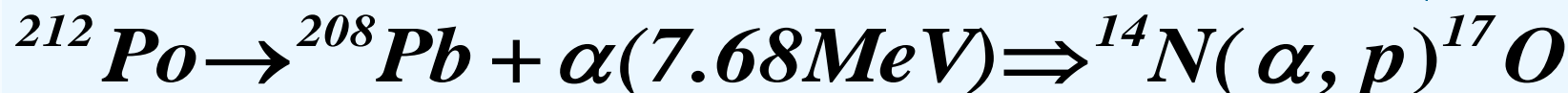
- a) 电荷守恒
- b) 核子数（质量数）守恒
- c) 角动量守恒
- d) 能量守恒（按相对论质能关系确定）
- e) 动量守恒
- f) 宇称守恒
- g) 统计性守恒
- h) 同位旋守恒

点金术

2.几个著名的核反应

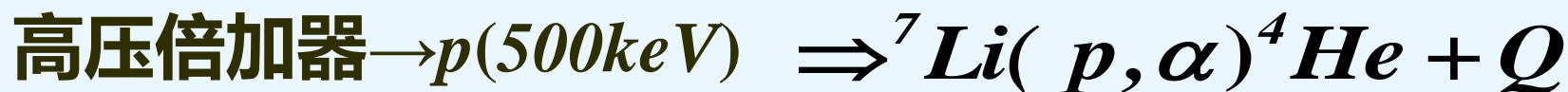
1.第一个人工核反应:

(1919年S.E.Rutherford)



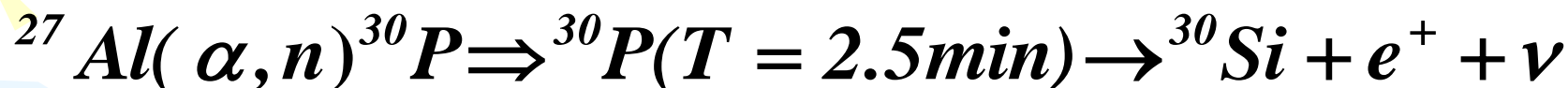
2.第一个在加速器上实现的核反应:

(1932年J.D.Cockcroft和E.T.S.Walton)



3. 产生第一个人工放射性核素的核反应:

(1934年F.Curie-Joliot和I.Curie-Joliot)



4. 导致中子发现的核反应:

(1930年W.Bothe和H.Becker)

(1934年J.Chadwick)



3.Q方程

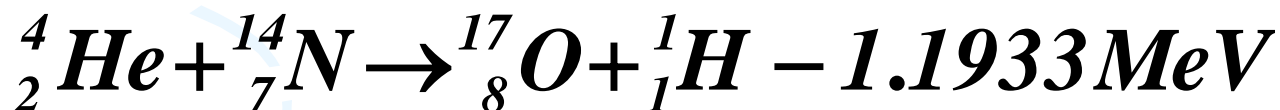
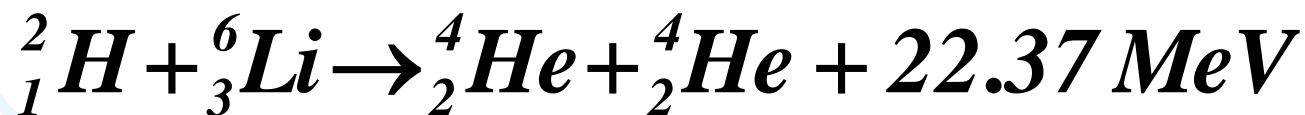
$$i + T \rightarrow l + R + Q; \quad T(i, l)R + Q$$

$$\begin{aligned} Q &\equiv (K_l + K_R) - (K_i + K_T) \\ &= [(M_i + M_T) - (M_l + M_R)]c^2 \\ &= (B_l + B_R) - (B_i + B_T) \\ &= B_{iT} - B_{lR} \end{aligned}$$

$Q > 0$: 放能反应

$Q = 0$: 弹性散射

$Q < 0$: 吸能反应



在实验室坐标系下

$$Q = K_l + K_R - K_i \quad (K_T = 0)$$

$$\vec{p}_i = \vec{p}_l + \vec{p}_R \quad (\vec{p}_T = 0)$$

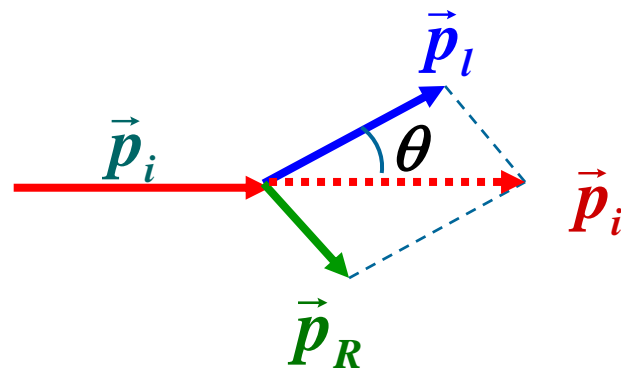
$$p_R^2 = p_i^2 + p_l^2 - 2 p_i p_l \cos \theta$$

$$Q = \left(\frac{M_l}{M_R} + 1\right)K_l + \left(\frac{M_i}{M_R} - 1\right)K_i - \frac{2\sqrt{M_i M_l K_i K_l}}{M_R} \cos \theta$$

$$\approx \left(\frac{A_l}{A_R} + 1\right)K_l + \left(\frac{A_i}{A_R} - 1\right)K_i - \frac{2\sqrt{A_i A_l K_i K_l}}{A_R} \cos \theta$$

$$K_l(\theta) = [u \pm \sqrt{u^2 + w}]^2$$

$$u = \frac{\sqrt{M_i M_l K_i}}{M_l + M_R} \cos \theta; \quad w = \frac{M_R Q + K_i (M_R - M_i)}{M_l + M_R}$$



核反应中的动量守恒

- 若剩余核处于激发态， Q 用 Q' 代替；此时，在同一角度下可以测量到几个 E_l ，进而计算不同激发态的激发能。
- 若方程右面各参数已知，可以求反应能；
- Q 方程可以用于靶核质量的测量；
- 原则上， $Q>0$ 的放能反应只要 i 和 T 能够达到核力作用范围之内就可进行，对 i 的能量没有要求；但 $Q<0$ 的吸能反应如何呢？
- 例如，在 ${}_2^4\text{He} + {}_7^{14}\text{N} \rightarrow {}_8^{17}\text{O} + {}_1^1\text{H} - 1.1933\text{MeV}$ 反应中，当入射 α 粒子的动能为 1.1933MeV 时，这个反应是否可以发生？

$$K_l(\theta) = [u \pm \sqrt{u^2 + w}]^2$$

$$u = \frac{\sqrt{M_i M_l K_i}}{M_l + M_R} \cos \theta; \quad w = \frac{M_R Q + K_i (M_R - M_i)}{M_l + M_R}$$

$$u^2 + w \geq 0 \Rightarrow \theta = 0; K_i \rightarrow K_{i \min} \equiv K_{th}$$

阈能

$$K_{th} = -Q \frac{M_l + M_R}{M_l + M_R - M_i} \approx -Q \frac{M_i + M_T}{M_T} = -Q \frac{A_i + A_T}{A_T}$$

• 前例，在 ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H} - 1.1933\text{MeV}$ 反应中，当入射 α 粒子的动能为 1.53MeV 时，这个反应才能够发生；

• Q 方程的应用：1. 识别靶核；2. 减少运动学变宽。

4. 核反应截面

设靶核占有一个有效面积 σ ,则在厚度为 t ,面积为 A 薄箔靶内总的有效面积为: $NAt\sigma$

入射粒子打到面积为 A 的靶上发生核反应的几率为:

$$\frac{NAt\sigma}{A} = Nt\sigma$$

N 为单位体积内的核数目

这个几率必然等于出射粒子数和入射粒子数之比, 即 $Nt\sigma = \frac{n_l}{n_i}$

核反应截面定义式

$$\sigma = \frac{n_l}{n_i Nt}$$

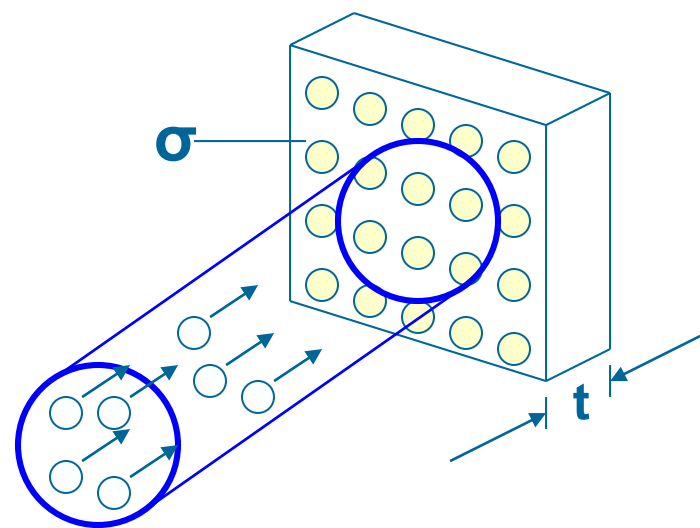
σ 有面积的量纲, 单位为靶(b)

$$\begin{cases} 1b = 10^{-24} \text{ cm}^2 \\ 1mb = 10^{-27} \text{ cm}^2 \end{cases}$$

一个典型原子核的半径为6fm, 经典截面

$$\pi R^2 = 1.1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 = 1.1b$$

由此知反应截面的单位与核的几何大小同数量级



截面的概念

例

核反应 $^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$

已知反应截面、靶厚和入射中子数分别为分别为

$\sigma = 2\text{mb}, t = 0.2\text{mm}, n_i = 10^{10} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 试求出射的 γ 光子数。

解：单位体积的靶核数

$$N = \frac{\rho}{A} N_0 = \frac{2.7}{27} \times 6.022 \times 10^{23} = 6.022 \times 10^{22} / \text{cm}^3$$

则 $n_l = \sigma N t n_i = 2.4 \times 10^4 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$

可知，打进1百万个中子，只有2.4个 γ 光子释出，可见反应几率甚小。

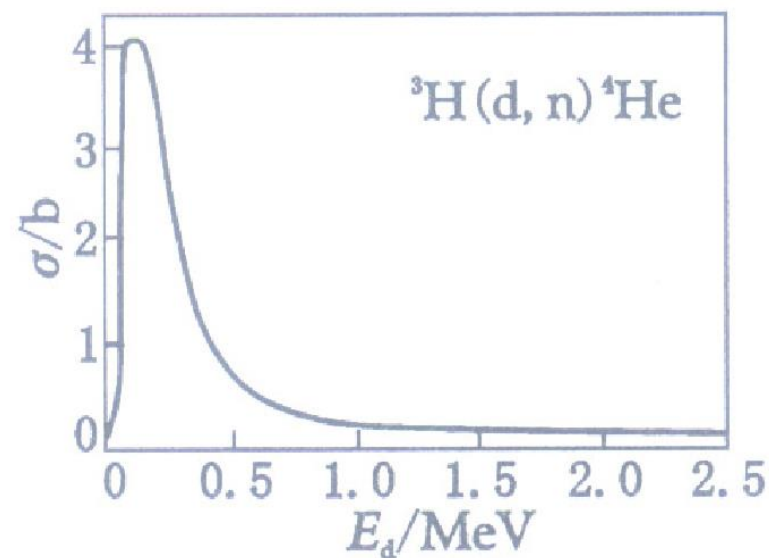
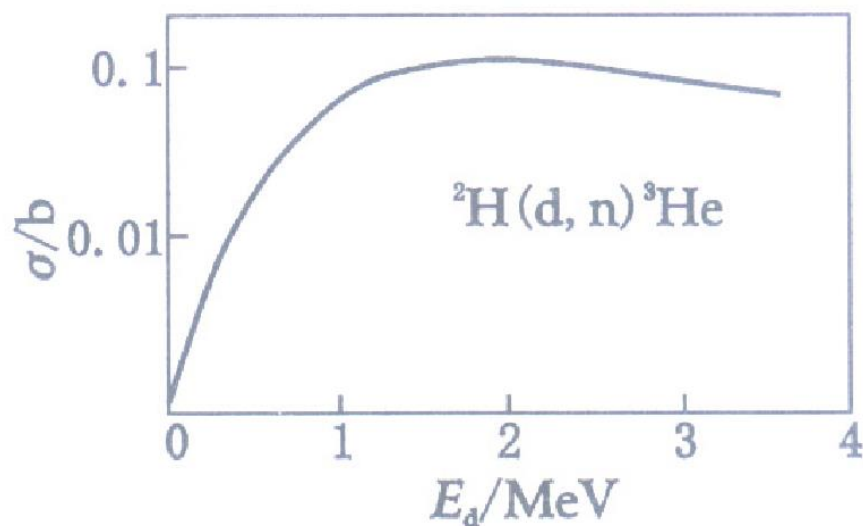
卢瑟福曾认为不可能从原子中获取能量：“任何相信能从原子中获取能量的人，是在说梦话……”

原子核物理概论 § 10 核反应

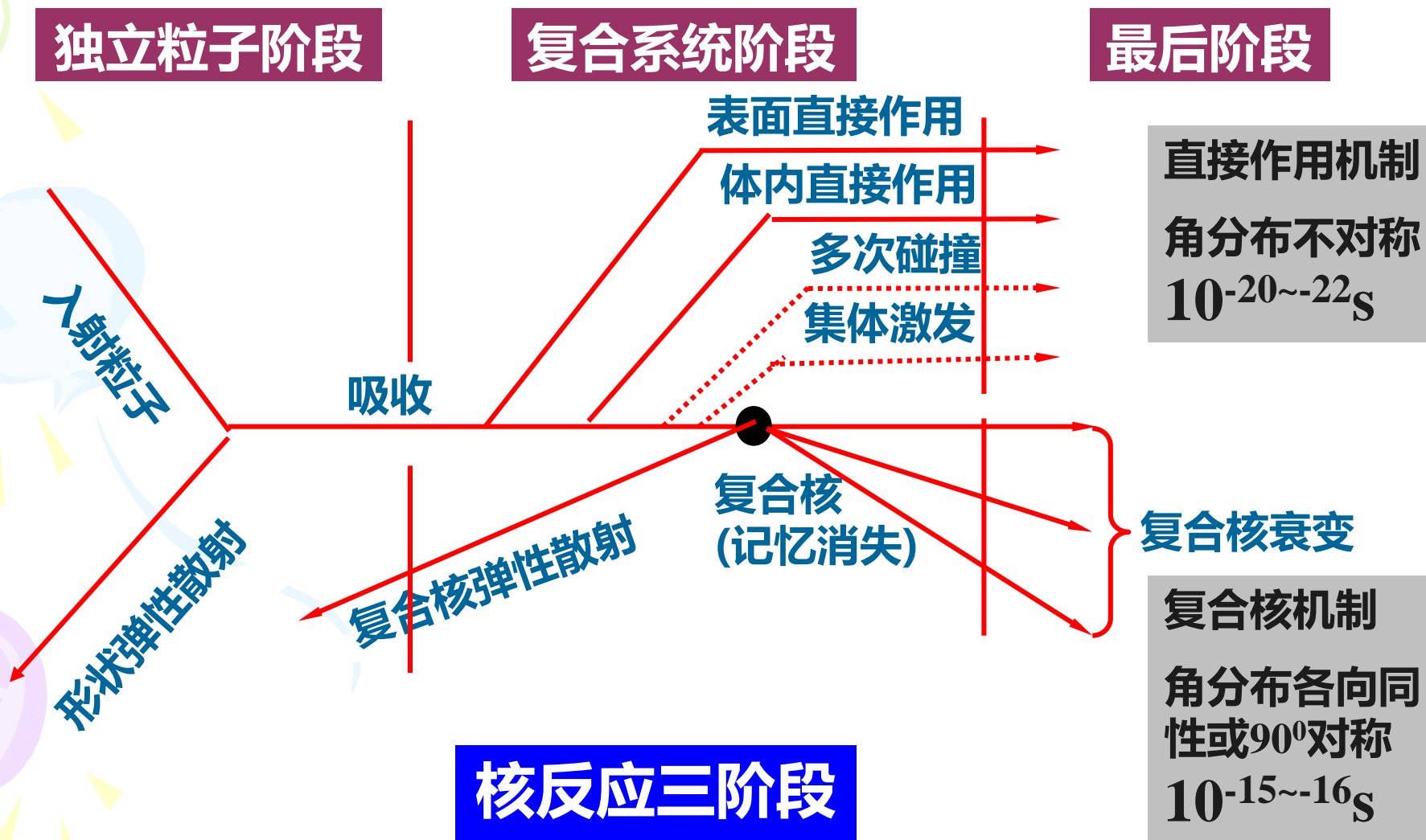
微分散射截面：一个入射粒子到单位面积上，发生核反应后，在某一方向上的单位立体角内产生出射粒子的几率。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \sigma(\theta, \varphi) = \frac{dn_l}{n_i N d\Omega}$$

激发曲线：反应截面随入射粒子能量的变化



5.核反应机制（三阶段二机制）

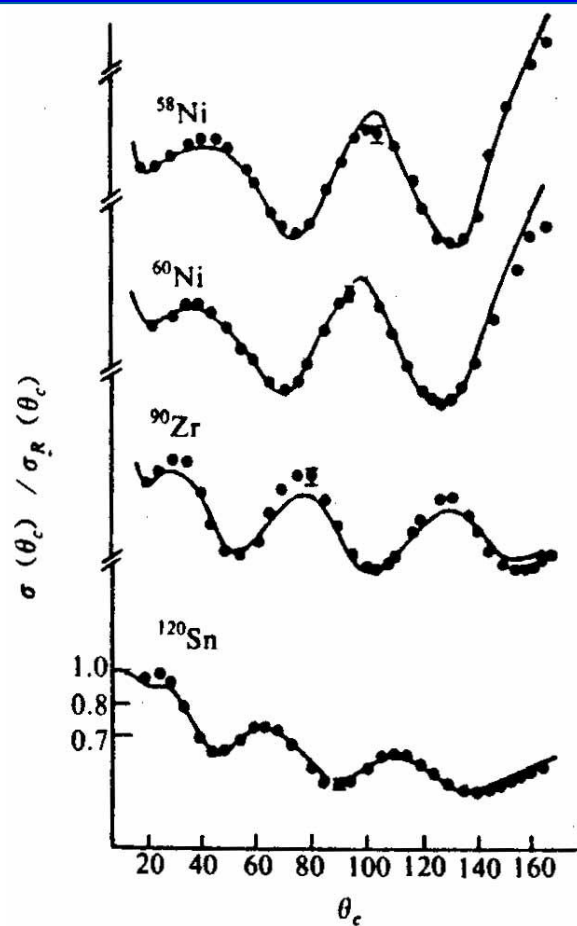
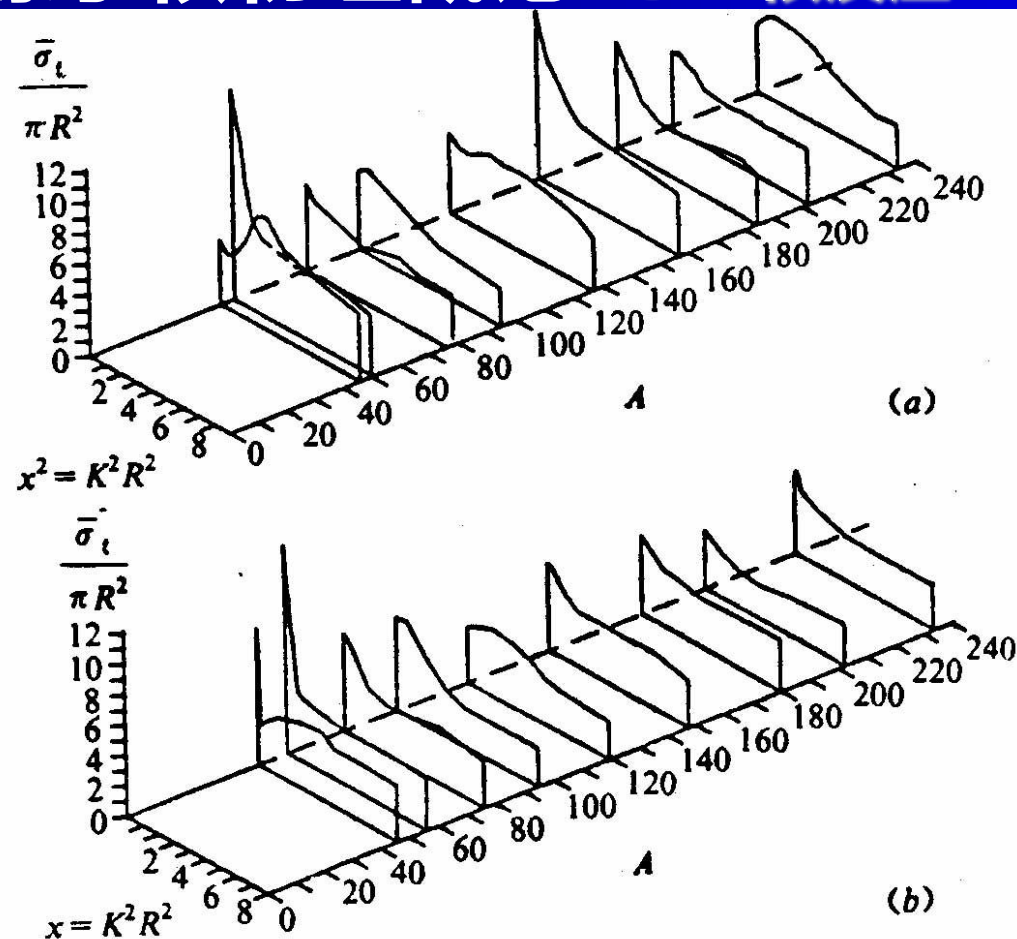


光学模型

1. 入射粒子与原子核的相互作用类似于光波在半透明物质中的传播，一部分透过（散射），另一部分被吸收（核反应）
2. 纯实数势不能产生入射粒子的吸收
3. 方阱复势：

$$V(r) = \begin{cases} -(V_0 + iW) & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases}$$

原子核物理概论 § 10 核反应



1954年H.Feshbach计算了总截面随中子能量和靶核质量数的变化

质子在某些核上的弹性散射角分布

复合核模型

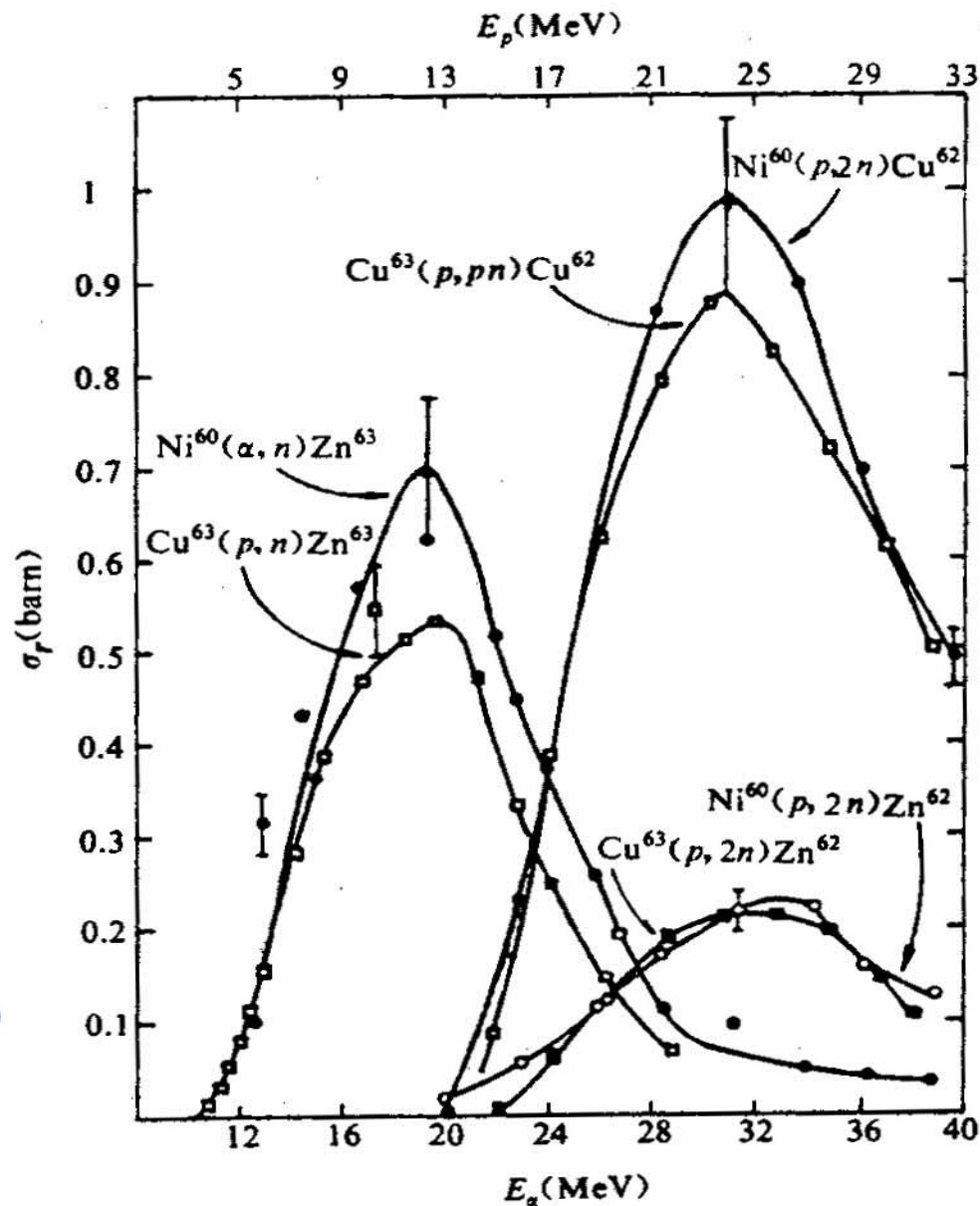
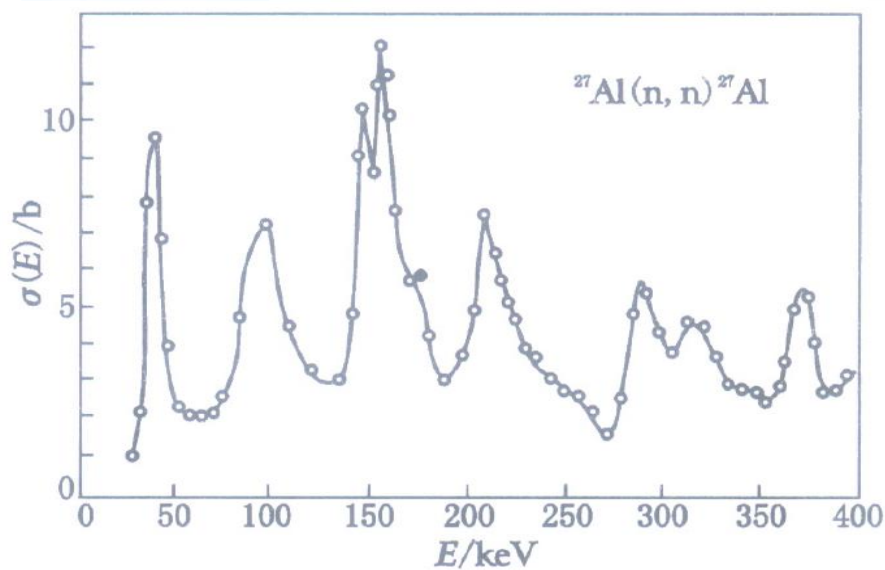
N.Bohr1936年提出并成功解释了许多核反应

- 1.核反应过程：**复合核形成+复合核衰变**；
- 2.复合核处于激发态，并在外界入射粒子的作用下发生共振；
- 3.复合核的衰变方式与形成无关；
- 4.反应截面：

$$\sigma = \sigma_{\text{形成}} \cdot \sigma_{\text{衰变}} \quad \begin{matrix} p + {}^{63}\text{Cu} \\ \alpha + {}^{60}\text{Ni} \end{matrix} \rightarrow {}^{64}\text{Zn}^* \rightarrow \begin{cases} n + {}^{63}\text{Zn} \\ 2n + {}^{62}\text{Zn} \\ n + p + {}^{62}\text{Zn} \end{cases}$$

$$\frac{\sigma[{}^{63}\text{Cu}(p, n){}^{63}\text{Zn}]}{\sigma[{}^{60}\text{Ni}(\alpha, n){}^{63}\text{Zn}]} = \frac{\sigma[{}^{63}\text{Cu}(p, pn){}^{62}\text{Cu}]}{\sigma[{}^{60}\text{Ni}(\alpha, pn){}^{62}\text{Cu}]} = \frac{\sigma[{}^{63}\text{Cu}(p, 2n){}^{62}\text{Zn}]}{\sigma[{}^{60}\text{Ni}(\alpha, 2n){}^{62}\text{Zn}]}$$

其它还有黑核模型
与核反应共振以及
蒸发模型等。



直接反应

1. 削裂反应

(d, p) (d, n) (α, p) 等

2. 拾取反应

(p, d) (n, d) (p, t) (p, α) 等

3. 电荷交换反应

(p, n) $(t, {}^3\text{He})$ 等

4. 非弹性散射 (i, i')

5. 敲出反应 (与1.不同, l 中不包含 i 的成分)