



能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

# 能源物理

## 第五讲：20 世纪物理学介绍

作者 马红孺

上海交通大学大学 机械与动力学院

October 24, 2016



# 目录

能源物理

第五讲：20 世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

① 近代物理介绍

② 核物理基础

③ 裂变

④ 截面

⑤ 临界



# 现代物理带来现代技术

能源物理

第五讲：20 世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

此后的课程比较仔细的介绍与核能有关的一些问题，试图从纯粹科学的角度对于核能的原理，危害给出一些尽可能客观的分析，通过学习，我们能够在遇到与此有关的问题和讨论时，能够有自己的正确看法。



# 20 世纪物理

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红儒

目录

近代物理介绍

核物理基础

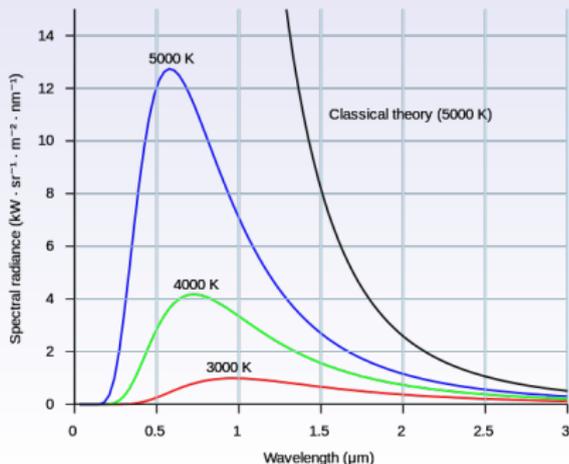
裂变

截面

临界

20 世纪是物理学发展最快的一个世纪，以量子论，相对论为基础的近代物理学不仅改变了物理学研究的面貌，也非常深刻的影响了社会发展的各个方面。

1900 年普朗克引入了量子概念，经过爱因斯坦，波尔，德布罗意，玻恩等物理学家的努力和发展，并最终由海森堡，薛定谔等建立起量子力学。





能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍  
马红孺

目录

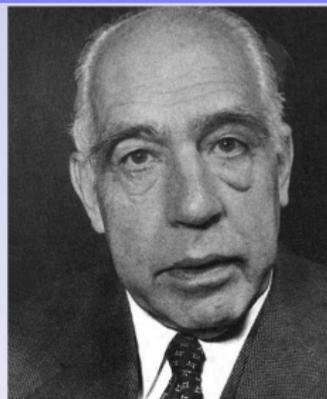
近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

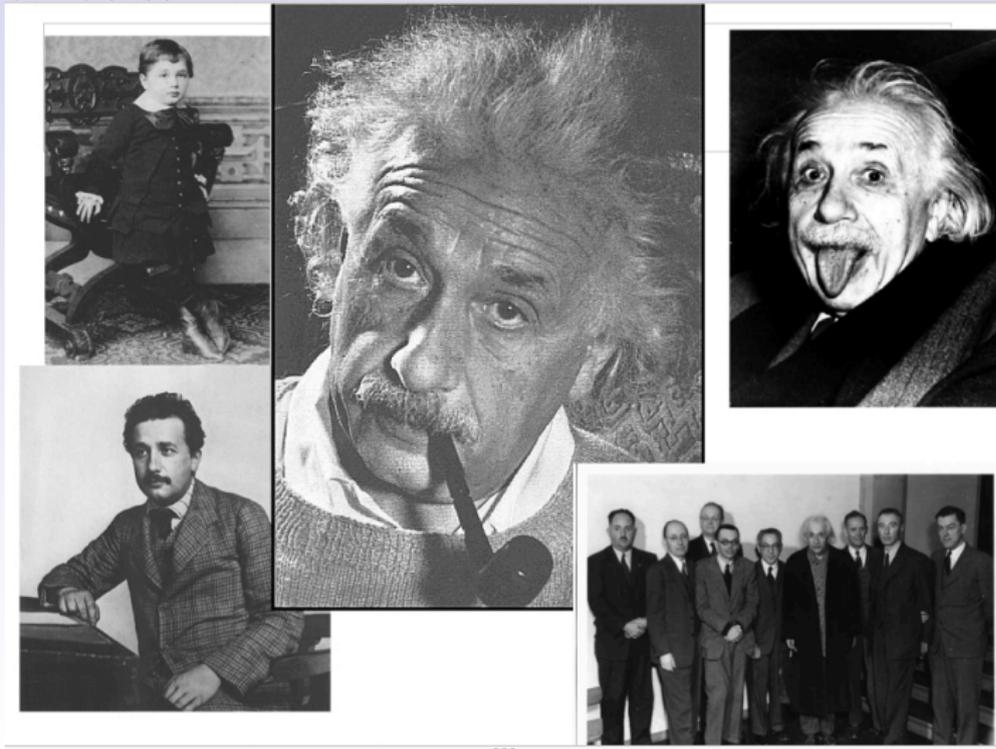


N. Bohr





1905年，爱因斯坦建立了狭义相对论，改变了人们对于时间和空间的认知。





能源物理

第五讲：20 世

纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

相对论和量子力学成为研究微观粒子的理论基础。



# 质能关系

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红儒

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

相对论第一次统一了物质和能量，根据相对论，任何物质都包含有静止能量，其值等于质量乘以光速的平方。用公式写出来，就是

$$E = mc^2$$

而原来以为是独立守恒的两个量，质量和能量，成为一个守恒量。

能量和质量之间是可以互相转化的。由于光速的巨大数值， $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，很小的质量就可以转化出巨大的能量，例如，1 千克物质如果全部转化为能量，则

$$E = 9 \times 10^{16} \text{J} = 900 \text{亿兆焦耳} = 250 \text{亿 kWh}$$

这相当于 3 个 1000 兆瓦的核电站每年的发电量。



# 物质的微观模型

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍

马红儒

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

在 20 世纪初，物质的微观模型已经建立起来。

所有的宏观物质，从山川到江河，包括我们自身，都是由原子构成的。自然界存在的元素有接近 100 种，加上人工合成的元素，有接近 110 种。

原子由一个很小的原子核和围绕原子核运动的电子构成，原子的尺度大约是  $10^{-10}\text{m}$ ，而原子核的尺度大约是  $10^{-14}\text{m}$ 。

原子核由质子和中子构成，质子带一个正电荷，中子不带电，质子和中子统称为核子。电子带一个负电荷。原子核的电荷等于其所包含的质子数。



# 物质的微观模型

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

元素的化学性质由电子的数目决定，从而由原子核所包含的质子数决定。

按照元素化学性质构造出来的元素周期表，每个位置上的元素的质子数是相同的，但中子数可以不同，具有相同质子数的原子核称为同位素（位于元素周期表的相同位置）。

原子核对电子有库伦引力，在库伦引力的作用下，电子在原子核周围运动而形成稳定的原子。

在原子核内部，质子与质子之间有库伦排斥作用，为了维持原子核，核子之间必须有很强的吸引力，这种作用称为强相互作用，或核力。实验表明，核力是一种短程力，虽然其强度很高，但相互作用的范围很小。核力与电荷无关。



# 几种粒子的性质

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

在核能有关的物理中，常常遇到下面这些粒子：电子，质子，中子，光子和中微子。

- 电子的质量为  $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$ ，带有负电荷  $-e = -1.6 \times 10^{-19}$  库伦。
- 正电子是电子的反粒子，除了所带电荷与电子相反，其它性质完全相同。
- 质子的质量是  $m_p = 1.67265 \times 10^{-27} \text{kg}$ ，带有正电荷  $e$ 。
- 中子的质量为  $m_n = 1.67495 \times 10^{-27} \text{kg}$ ，比质子略大。中子不带电。

电子和质子是稳定的粒子，自由的中子不稳定，可以发生衰变，成为一个质子加一个电子和电子反中微子。



# 几种粒子的性质

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍  
马红孺

目录  
近代物理介绍  
核物理基础  
裂变  
截面  
临界

光子是电磁波的量子，没有静止质量，在任何惯性参照系中，都以光速  $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$  运动。

光子的能量为  $E = h\nu$ ，其中  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  是普朗克常数， $\nu$  是光子的频率。

光子不带电，是电磁相互作用的传递者。

中微子具有非常微小的质量，不带电，不参与电磁相互作用，很难探测。



原子核由质子和中子构成。质子带正电，中子不带电。中子和质子统称为核子。中子和质子的质量非常接近，比质子大一点。原子核的质量大致等于其所包含的核子数乘以单个核子的质量，电荷精确等于原子核的质子数乘以单位电荷。原子核的核子数用  $A$  表示，质子数用  $Z$  表示， $Z$  称为原子序数，是该原子核对应的元素在元素周期表中的位置。原子核的中子数为  $N = A - Z$ 。原子核用元素符号加上  $A$  和  $Z$  表示，通常写成



大多数元素都由若干个不同质量的核构成，这些不同质量的和称为同位素。例如，氢有三种同位素， ${}^1_1\text{H}$ ， ${}^2_1\text{H}$ ， ${}^3_1\text{H}$ 。氦有两种同位素， ${}^4_2\text{He}$  和  ${}^3_2\text{He}$ 。



# 原子

能源物理

第五讲：20 世

纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

原子由很小的原子核和核外运动的电子构成，电子数等于  $Z$ 。除了最轻的几个原子外，大多数原子的半径均基本相同，等于  $2 \times 10^{-10}\text{m}$ 。

实际上，很难对原子的半径做出一个确切的定义，这是由于原子并不是一个边界清晰的小球，原子中的电子实际上总是处在不停的运动中，因此原子的半径大致可以理解为电子离开原子核的平均距离。

原子的质量通常用原子量来量度，原子量定义为  $^{12}\text{C}$  原子质量的  $\frac{1}{12}$ 。另一个重要的单位是摩尔，一摩尔碳 12 原子精确等于 12g 碳原子。



# 原子

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍  
马红孺

目录

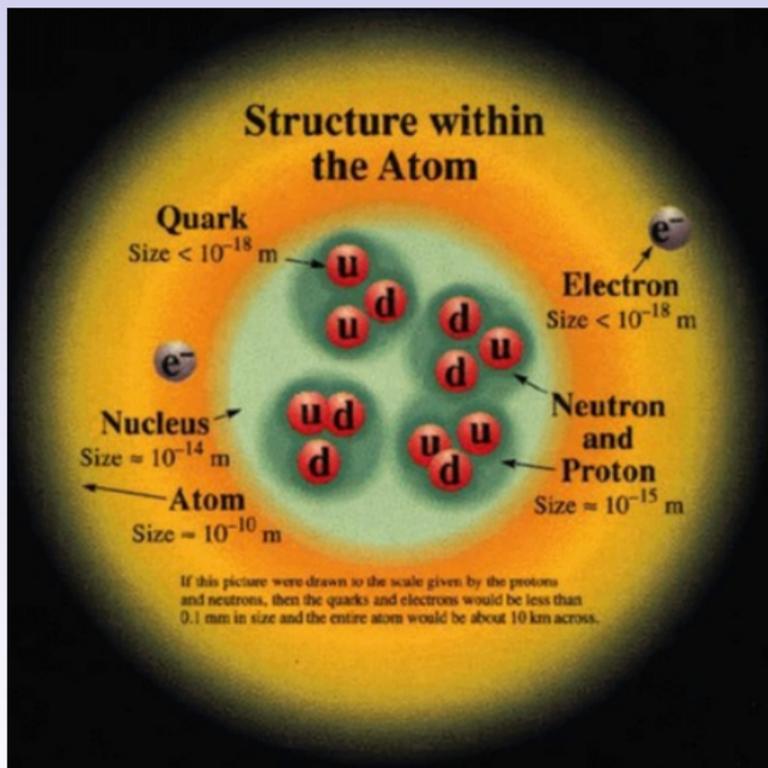
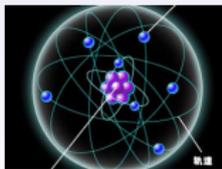
近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界





# 原子

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红儒

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

实验测量发现，一摩尔碳 12 原子包含的原子数为  $6.022045 \times 10^{23}$ ，这个数字称为阿伏伽德罗 (Avogadro) 数。于是，每个碳 12 原子的质量为

$$m(^{12}\text{C}) = \frac{12\text{g}}{6.022045 \times 10^{23}} = 1.99268 \times 10^{-23}\text{g}$$

而一个原子质量单位的质量为

$$1\text{amu} = \frac{m(^{12}\text{C})}{12} = 1.66057 \times 10^{-24}\text{g}$$

任何一个原子的原子量通过与  $^{12}\text{C}$  的比较得出，用  $M(^A\text{X})$  表示原子  $^A\text{X}$  的原子量，则

$$M(^A\text{X}) = 12 \times \frac{m(^A\text{X})}{m(^{12}\text{C})}$$



# 原子

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红儒

目录  
近代物理介绍  
核物理基础  
裂变  
截面  
临界

自然界的元素通常由若干同位素构成，每一种同位素具有一定的丰度，用  $\gamma$  表示，例如，氧具有三种稳定的同位素，其丰度分别为  $\gamma(^{16}\text{O}) = 99.759\%$ ， $\gamma(^{17}\text{O}) = 0.037\%$ ， $\gamma(^{18}\text{O}) = 0.204\%$ ，对应的原子量分别为  $M(^{16}\text{O}) = 15.99492$ ， $M(^{17}\text{O}) = 16.99913$ ， $M(^{18}\text{O}) = 17.99916$ 。元素的原子量定义为各个同位素的原子量的加权平均：

$$M = \sum_i \gamma_i M_i$$

其中， $\gamma_i$  为第  $i$  种同位素的丰度， $M_i$  为第  $i$  个同位素的原子量，例如氧的原子量为

$$M(^{\text{O}}) = \frac{1}{100} (99.759 \times 15.99492 + 0.037 \times 16.99913 + 0.204 \times 17.99916) = 15.99938$$



# 原子

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红儒

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

一摩尔任何物质等于以克为单位的该种物质的原子量，例如，一摩尔  $^{16}\text{O}$  的质量为  $15.99492\text{g}$ 。而一摩尔任何物质包含的原子数均等于阿伏伽德罗常数。

在原子层次上，常用的能量单位是电子伏 (eV)， $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

当原子处于基态时，原子中的电子处于各个状态 (轨道)，每个状态的能量不同，自由电子与最高占据能级的能量差通常为几个电子伏 (eV)，例如，把氢原子的电子电离所需的能量为  $13.6\text{eV}$ 。把铅 ( $Z = 88$ ) 的最外层电子电离所需的能量为  $7.38\text{eV}$ ，而为了把铅的最内层的电子 (K 电子) 打出来，所需的能量为  $88\text{keV}$ 。



# 原子

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

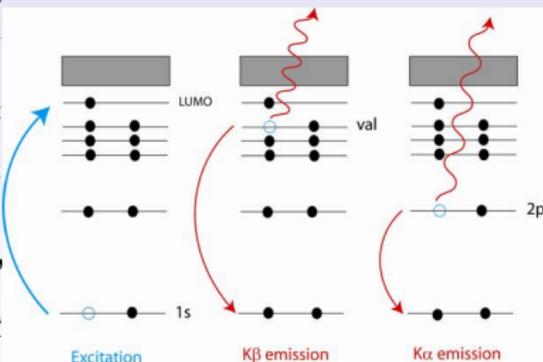
临界

如果有光子打在铅原子上，为了把 K 电子打出来，则光子波长必须小于  $\lambda_{\min}$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{E} = \frac{4.136 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s} \times 3 \times 10^8 \text{m/s}}{88 \times 10^3 \text{eV}} = 1.41 \times 10^{-11} \text{m}$$

这一波长处在 X-射线的波段。

当内层电子被打出来后，高能轨道的电子可以跃迁到留下的空位从而放出光子，这是产生 X-射线的方法之一。不同的原子，对应于不同的内层能级，产生不同波长的 X-射线，这些 X-射线称为元素的特征线，是确定元素的方法之一。





# 结合能

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍

马红孺

目录

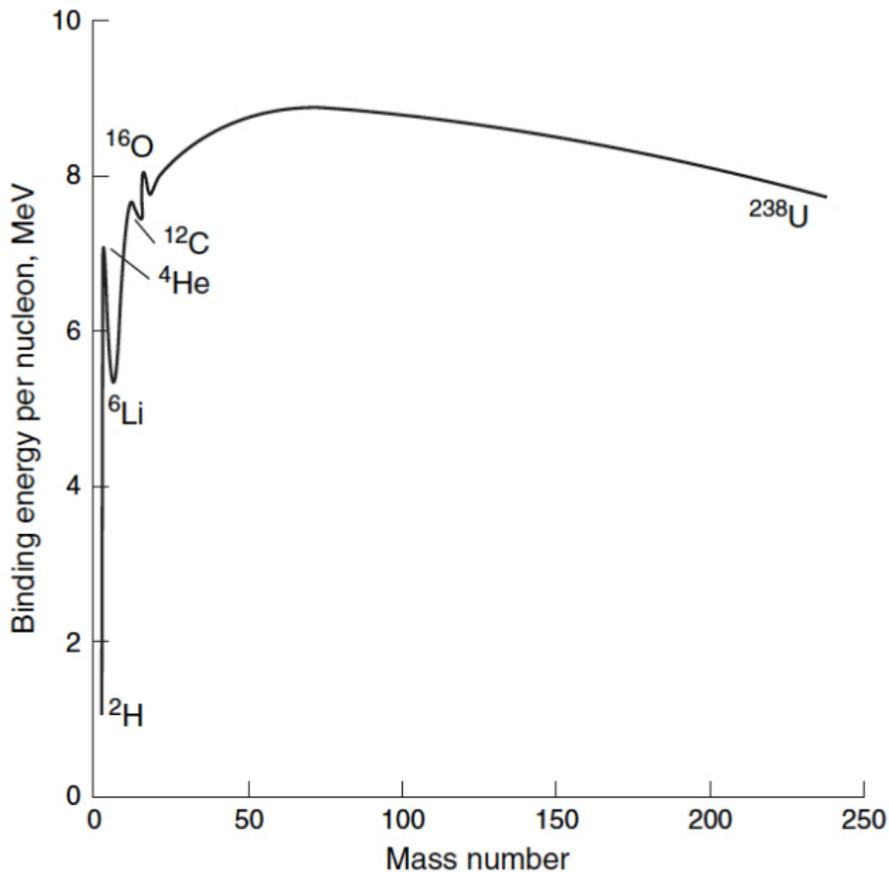
近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界





# $\beta$ 稳定线

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍

马红孺

目录

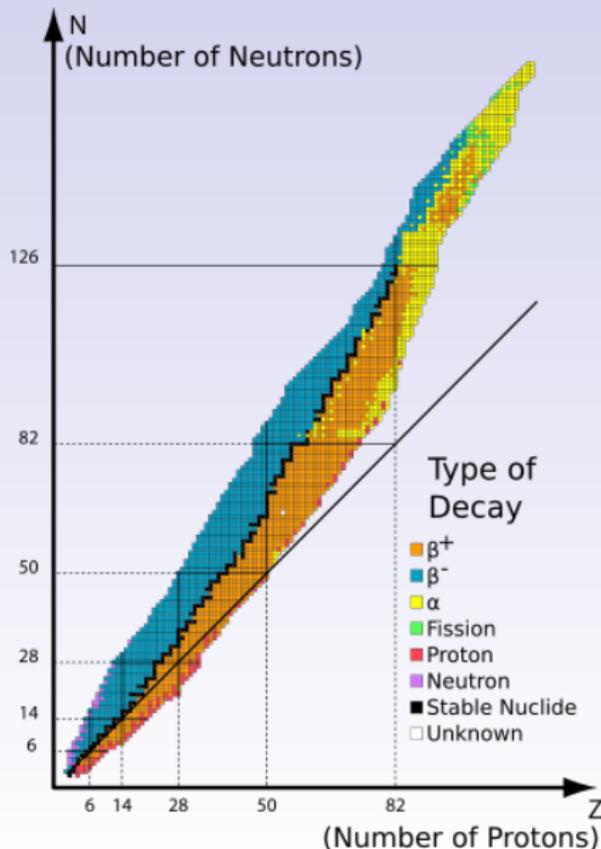
近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界



如果用质子数  $Z$  为横坐标，中子数  $N$  为纵坐标，把自然界存在的原子核画到图上。可以看出，在  $Z$  比较小的地方，原子核基本上都在  $N = Z$  的线上，当质子数增加时，中子数逐步大于质子数。稳定的原子核由图中的黑线给出，这条黑线称为  $\beta$  稳定线。偏离  $\beta$  稳定线的核是不稳定的，将通过衰变向  $\beta$  稳定线靠近。



# 原子核衰变

能源物理

第五讲：20 世

纪物理学介绍

马红儒

目录

近代物理介绍

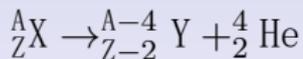
核物理基础

裂变

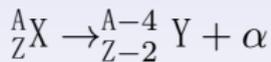
截面

临界

原子核可以发生衰变和反应，典型的衰变有三类，分别命名为  $\alpha$  衰变， $\beta$  衰变和  $\gamma$  衰变。 $\alpha$  衰变中，原子核放出一个  ${}^4_2\text{He}$  原子核，变成另一个原子核。用方程表示



${}^4_2\text{He}$  原子核又称为  $\alpha$  粒子，所以，上式也可简化为





# 原子核衰变

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍  
马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

$\beta$  衰变是原子核放出电子的衰变，本质上是原子核中的一个中子的衰变

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$$

这里  $e$  是电子， $p$  代表质子， $\bar{\nu}$  是电子反中微子。

原子核发生  $\beta$  衰变后，质子数增加 1，中子数减少 1，核子数不变。即

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e + \bar{\nu}$$



# 原子核衰变

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红孺

目录  
近代物理介绍  
核物理基础  
裂变  
截面  
临界

$\gamma$  衰变是处于激发态的原子核放出光子到达低能态或基态的变化，在变化中，中子数和质子数均不改变。

如果原子核的中子过剩，偏离  $\beta$  稳定线，则通常会通过  $\beta$  衰变向  $\beta$  靠近；如果原子核的质子过剩，则通过  $\beta^+$  衰变，即放出正电子的方式向稳定线靠近。

$\beta^+$  衰变是质子放出正电子变为中子的过程，由于质子的质量小于中子的质量，自由的质子是稳定的。在原子核内部，通过核的其它部分提供能量，这一过程是可以发生的。



# 原子核衰变

能源物理

第五讲：20 世

纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

偏离稳定线丰质子不稳定原子核，也可以通过  $\alpha$  衰变向稳定线靠近，一般，重原子核需要经过一系列的衰变 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  衰变) 最后到达稳定的核 (终点一般是铅)。



# 原子核裂变

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红孺

目录  
近代物理介绍  
核物理基础  
裂变  
截面  
临界

不稳定的原子核也可以通过裂变，分裂为质量相近的两部分，并放出中子而向稳定的核靠近。

在自然界，铀 235 是唯一的裂变核。铀 235 可以吸收一个中子成为铀 236，铀 236 的寿命非常短，大约在千万分之一秒的时间内分裂为两个质量大致相同的核，同时放出 2-3 个中子，并放出能量。如果放出的中子完全被铀 235 吸收，将会导致 2-3 个裂变，这样，裂变的核的数目链式放大，在极短的时间内大量原子核裂变，放出巨大的能量，这就是原子弹的原理。



前已指出，铀 235 吸收一个中子后可以裂变为两块，放出能量并放出 2-3 个中子，这些中子可以继续引起新的裂变。

在裂变反应中，一个非常重要的量是增殖系数  $k$ ，代表每一代裂变放出的中子中，有多少可以引起下一代的裂变。

如果  $k < 1$ ，则每次反应的下一代将会减少，链式反应很快就会停止；

如果  $k > 1$ ，则每次反应均会导致更多的反应，放出的能量越来越多并导致爆炸；

如果  $k = 1$ ，则反应将得以维持，这便是反应堆的工作条件。



# 裂变

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红孺

目录

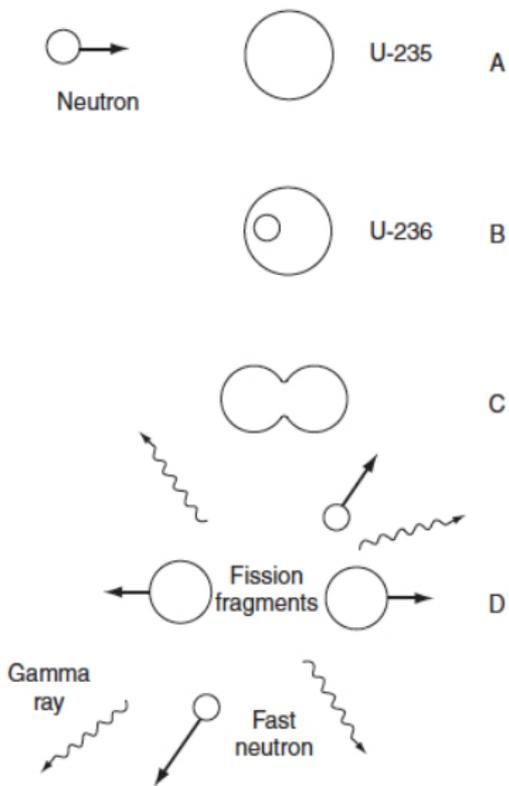
近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界





# 原子核裂变

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

1, 如果按照每次裂变放出 2 个中子计算, 一个原子弹中的铀 235 大概需要多少代能够全部裂变?

- ① 10
- ② 10000
- ③ 100
- ④ 天晓得

2, 如果  $k = 2$ , 原子弹从引爆到爆炸大约需要多长时间?

- ① 10 秒
- ② 1 微秒
- ③ 1 秒
- ④ 10 纳秒



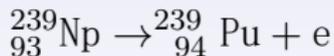
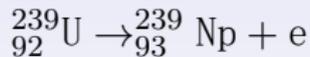
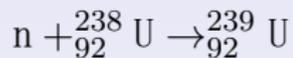
# 铀

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍  
马红孺

目录  
近代物理介绍  
核物理基础  
裂变  
截面  
临界

自然界的铀主要有两种同位素，其中铀 238 占 99.3%，铀 235 占大约 0.7%，还有非常少量的铀 234 等。

铀 238 不是裂变核，吸收中子后，成为不稳定的铀 239，铀 239 经  $\beta$  衰变为镎 239 ( ${}_{93}^{239}\text{Np}$ )，半衰期 23.5min，然后再经过  $\beta$  衰变为钚 239 ( ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ )，半衰期 2.36d.





# 铀 235 的裂变碎块的质量分布

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍

马红孺

目录

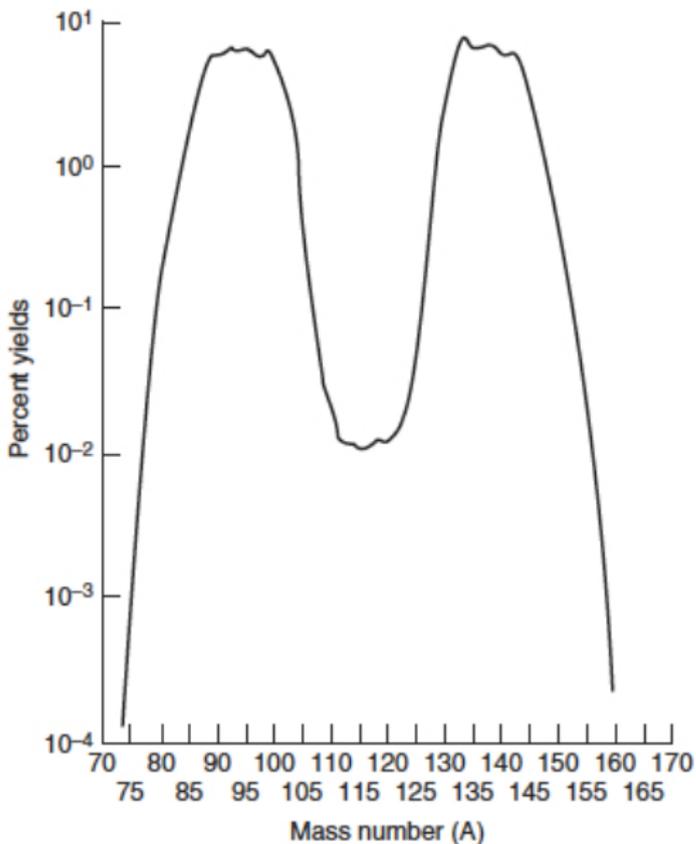
近代物理介绍

核物理基础

裂变

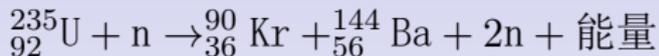
截面

临界

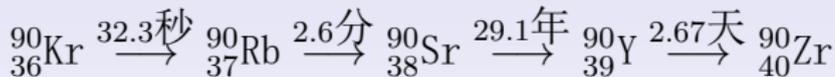




一种可能的裂变（铀-235→ 氪 + 钡）



反应产物一般是放射性的，经过衰变到稳定核，  
例如（氪 → 铷 → 锶 → 钇 → 锆）





# 裂变能

能源物理  
第五讲：20 世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

## 铀-235 的裂变能

	能量 (MeV)
碎片	166
中子	5
$\gamma$ 射线	7
裂变产物的 $\gamma$ 射线	7
$\beta$ 粒子	5
中微子	10



# 截面

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

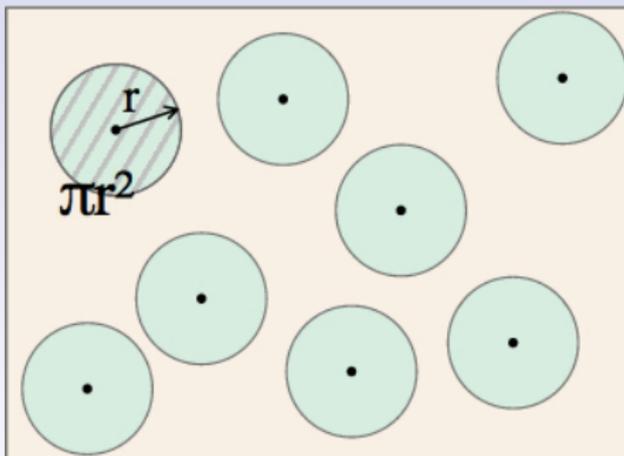
裂变

截面

临界

吸收截面：厚度为  $L$  的薄膜，原子密度为  $n$ ，入射流密度  $N$ ，入射面积为  $A$

$$\Delta N = \sigma ANnL$$



$\sigma$  微观吸收截面

单位是 barn =  $10^{-28} \text{m}^2$ .



# 临界

能源物理  
第五讲：20世纪物理学介绍  
马红孺

目录

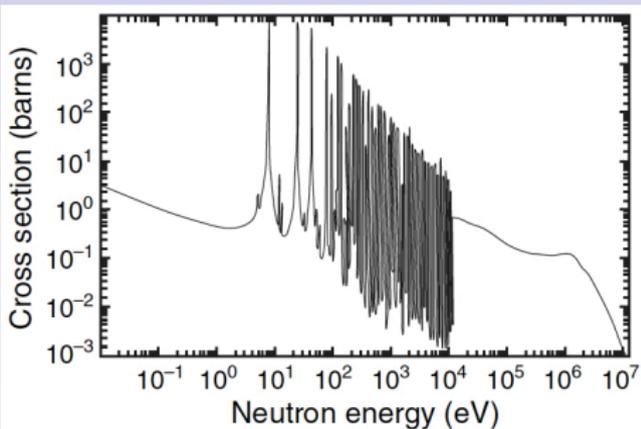
近代物理介绍

核物理基础

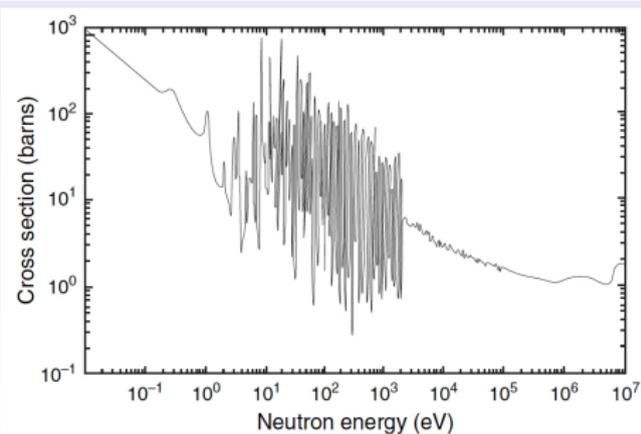
裂变

截面

临界



铀-238 吸收截面



铀-235 吸收截面



# 临界

能源物理

第五讲：20 世

纪物理学介绍

马红孺

目录

近代物理介绍

核物理基础

裂变

截面

临界

- 铀-235 的比例很小，为了达到临界运行，必须使尽可能多的中子被铀-235 吸收，而不是被铀-238 吸收.
- 热中子截面，铀-235 是铀-238 的 190 倍
- 中子慢化，反应堆中必须有慢化剂，慢化剂一般用水，石墨等，
- 不吸收中子，多次碰撞使中子能量降低.