



南京航空航天大学

Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics

反应堆内的中子循环与临界条件

庄坤

2019.7.16

目录

引言

裂变释放的能量分布

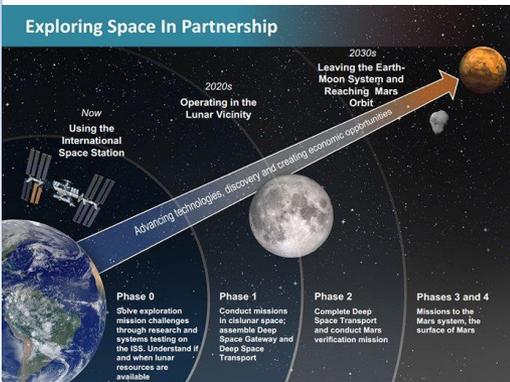
反应堆内的中子循环

反应堆的临界条件

思考与讨论



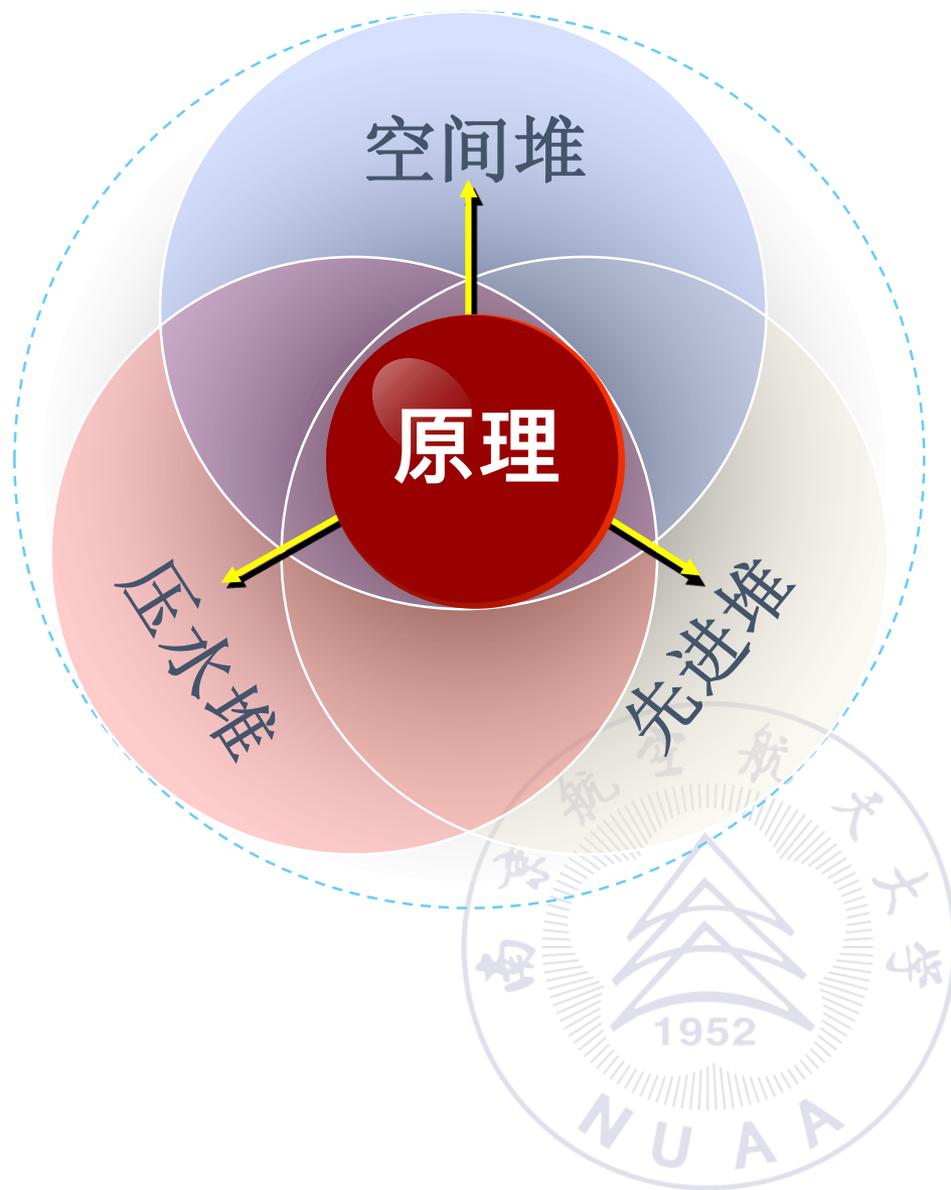
❖ 引言



- ❑ 自20世纪50年代以来，美国和俄罗斯(苏联) 围绕空间堆电源开展了全面而深入的研究设计。
- ❑ 1965年美国将名为SNAP-10A的空间反应堆成功送入太空
- ❑ 2017年美国总统签署太空政策一号指令
- ❑ NASA启动了新一轮太空探索计划，计划于2030年之前将宇航员送往至火星。
- ❑ 2018年3月NASA成功测试了一款名为“kilopower”的小型核反应堆装置

❖ 引言

- 空间反应堆与传统的反应堆在原理上是类似的。
- 均以可控方式实现自持链式裂变反应产生热量的一种装置。
- 两个关键词“自持链式裂变反应”和“产生热量”。



目录

引言

裂变反应与裂变能量

反应堆内的中子循环

反应堆的临界条件

思考与讨论

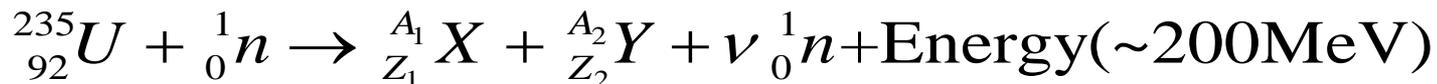


❖ 裂变反应与裂变能量

裂变反应

□ 反应堆中，吸收反应里面**最重要**的一种反应

□ 以最常用的核燃料 ^{235}U 为例，裂变反应式可写作：



其中：

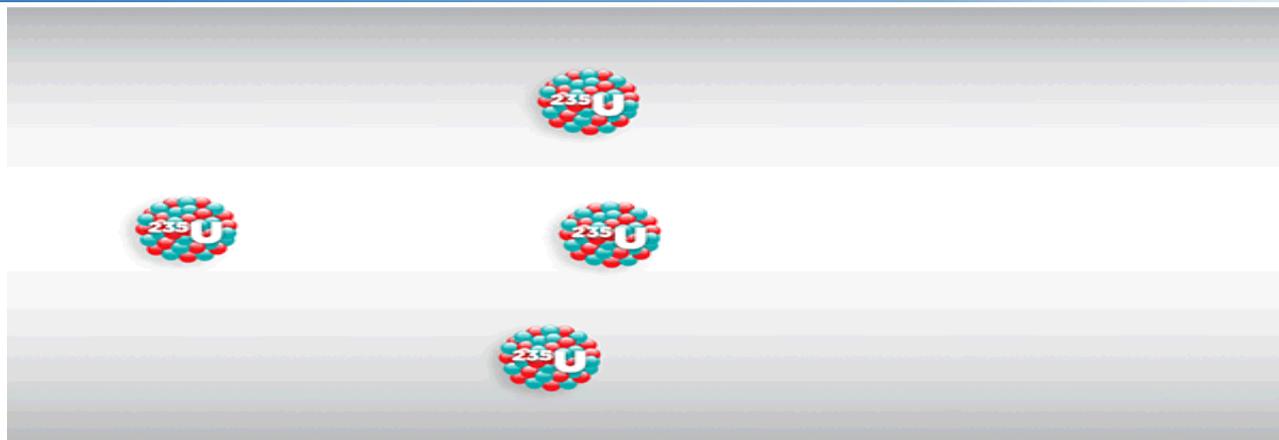
X和Y为中等质量核，称之为裂变碎片；

ν 为平均裂变中子数。



❖ 裂变反应与裂变能量

链式裂变反应



- 一个中子与裂变核素引发核裂变反应时，会释放~200MeV的能量和2~3个中子，这些新中子有可能下一个裂变核素的裂变，如果能持续下去称之为链式裂变反应。
- 如果不需要外界的帮助，仅靠原子核自身就能把这种链式裂变反应不断持续下去，那么这就是所谓的自持链式裂变反应。

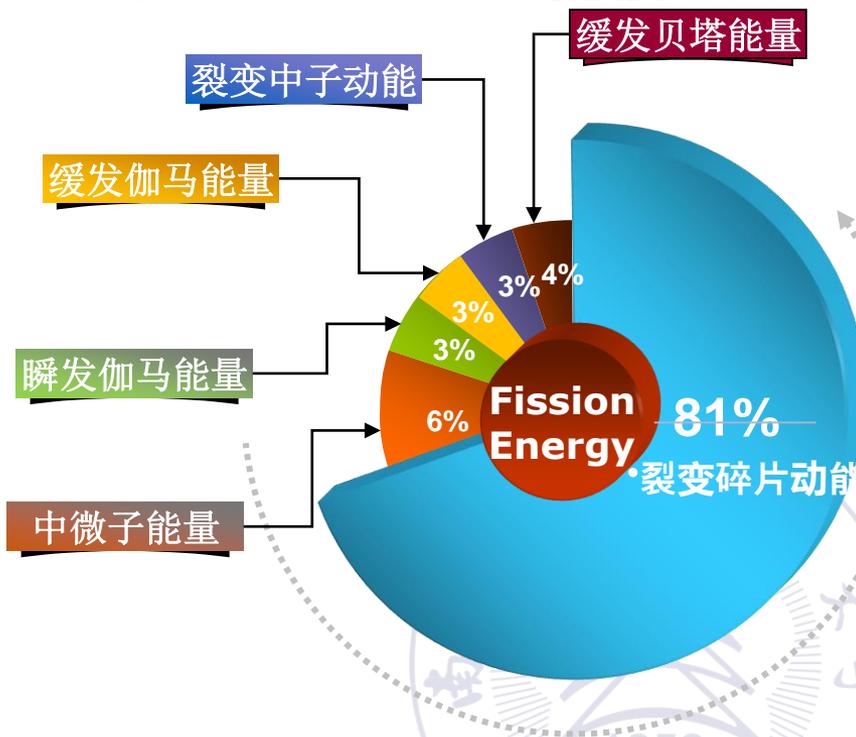
❖ 裂变反应与裂变能量

裂变能量的释放与裂变能量的组成

□ ^{235}U 每次核裂变平均释放出大约207MeV的能量

铀-235 核裂变释放的能量

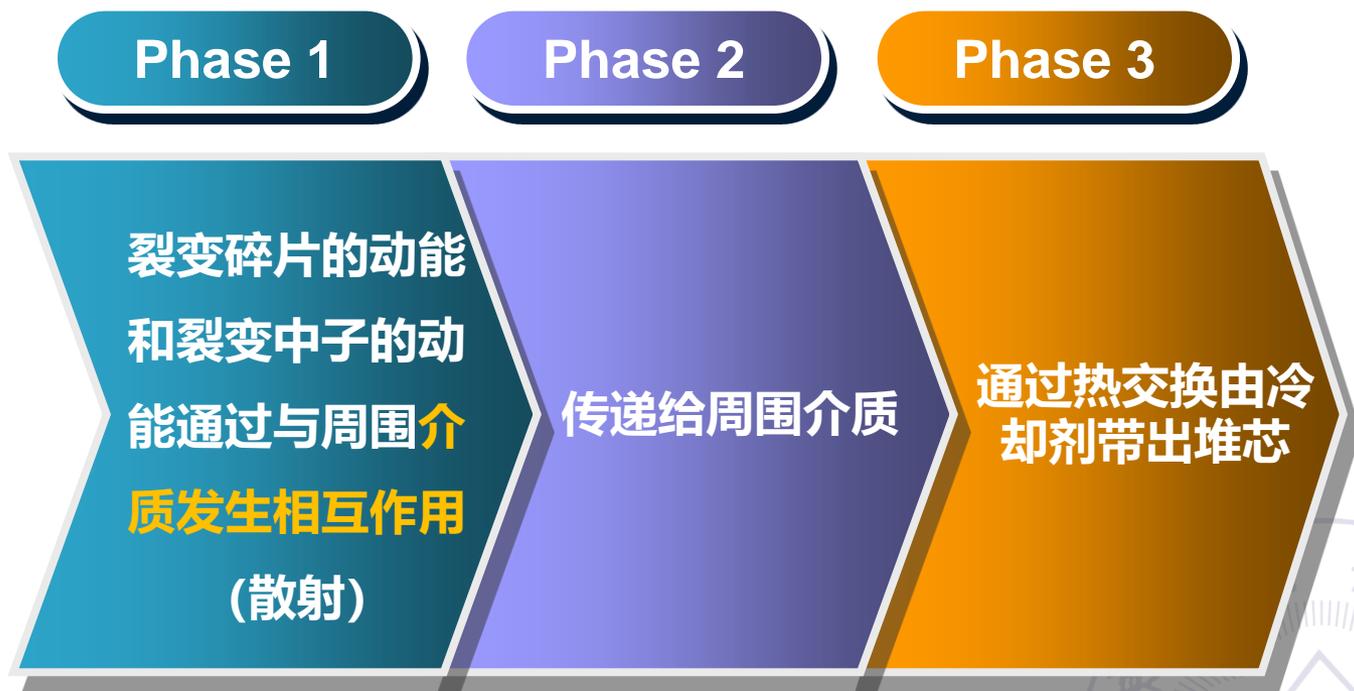
能量形式	能量, 兆电子伏
裂变碎片的动能	168
裂变中子的动能	5
瞬发 γ 能量	7
裂变产物 γ 衰变-缓发 γ 能量	7
裂变产物 β 衰变-缓发 β 能量	8
中微子能量	12
总 共	207



那么这些能量是否全部能被有效利用?

❖ 裂变反应与裂变能量

裂变碎片与裂变中子的动能



□ 这一部分能量是可以被利用的。



❖ 裂变反应与裂变能量

缓发 γ 能量和缓发 β 能量

反应堆自身使得很少的 γ 和 β 射线逸出堆外

被堆芯的介质所吸收

通过热交换被冷却剂带出堆芯

□ 这一部分能量也可以被利用的。



❖ 裂变反应与裂变能量

中微子的能量

- 由于中微子与物质的相互作用截面非常小，其微观截面在 10^{-44}cm^2 数量级上。
- 物质的原子密度一般为 10^{23}cm^{-3} ，中微子在普通物质中的平均自由程约为 10^{16}Km 。
- 这意味着其能够轻易的穿出堆芯而**不与堆芯任何介质发生反应**。

□ 中微子所具有的 12MeV 的能量实际上是**无法利用的**。



目录

引言

裂变释放的能量分布

反应堆内的中子循环

反应堆的临界条件

思考与讨论

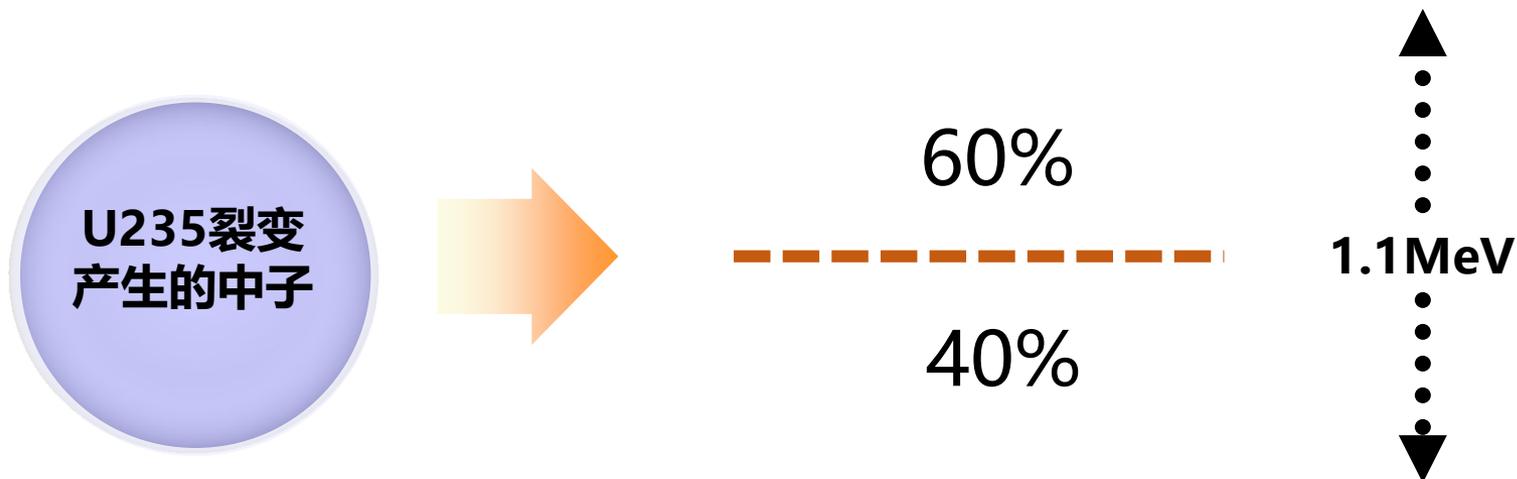


在反应堆内，一个裂变产生的中子在诱发下一次裂变之前需要经过哪些过程？

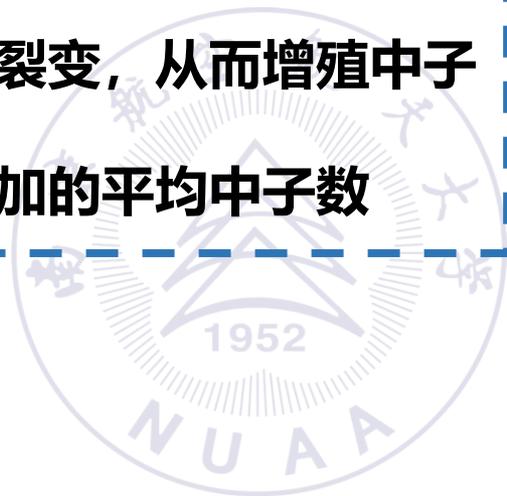
- A 快中子倍增
- B 慢化过程中的泄漏
- C 慢化过程中的共振吸收
- D 热中子扩散过程中的泄漏
- E 非燃料的中子吸收

提交

❖ 反应堆内的中子循环

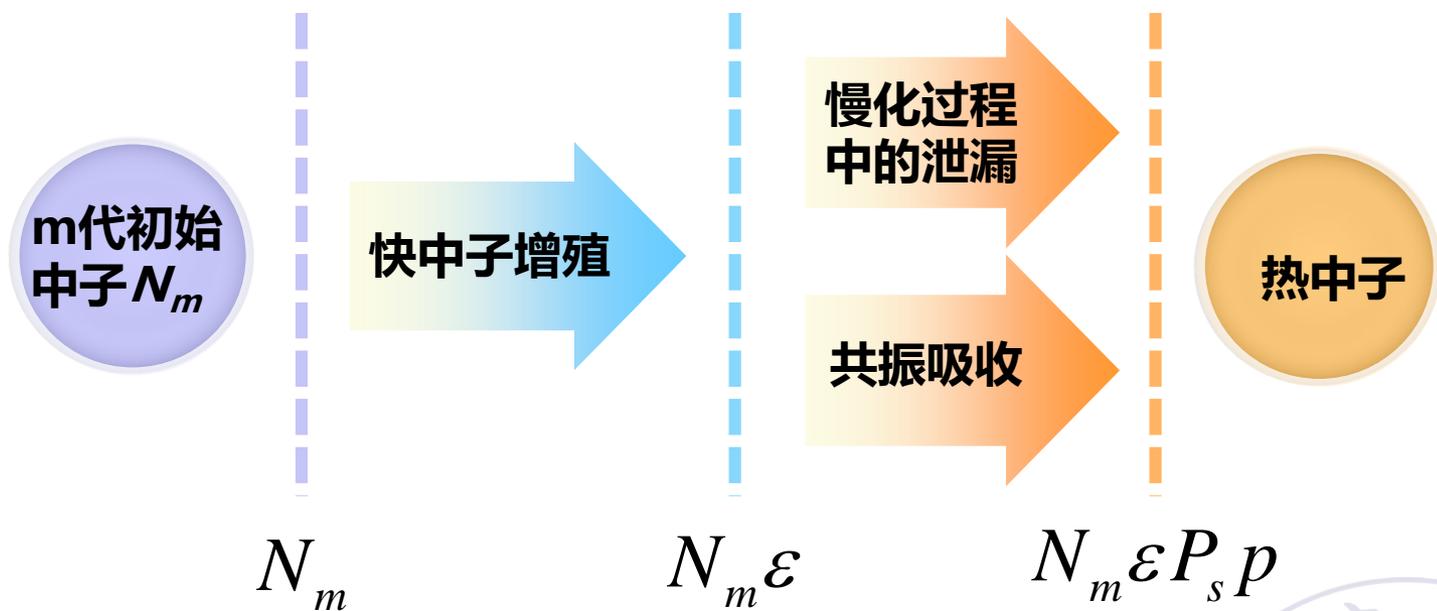


- ◆ **快中子增殖效应** 少部分快中子会引起裂变核素的裂变，从而增殖中子
- ◆ **快中子增殖系数 ϵ** 一个快中子经过可裂变核素后增加的平均中子数



❖ 反应堆内的中子循环

分析一代中子丛生到死的过程，假设第m代初始中子数为 N_m

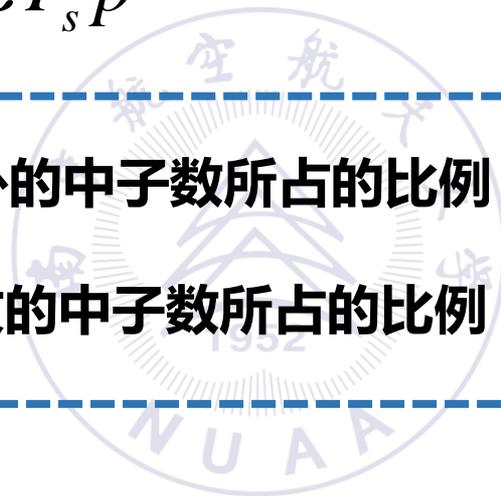


◆ 慢化不泄露概率 P_s

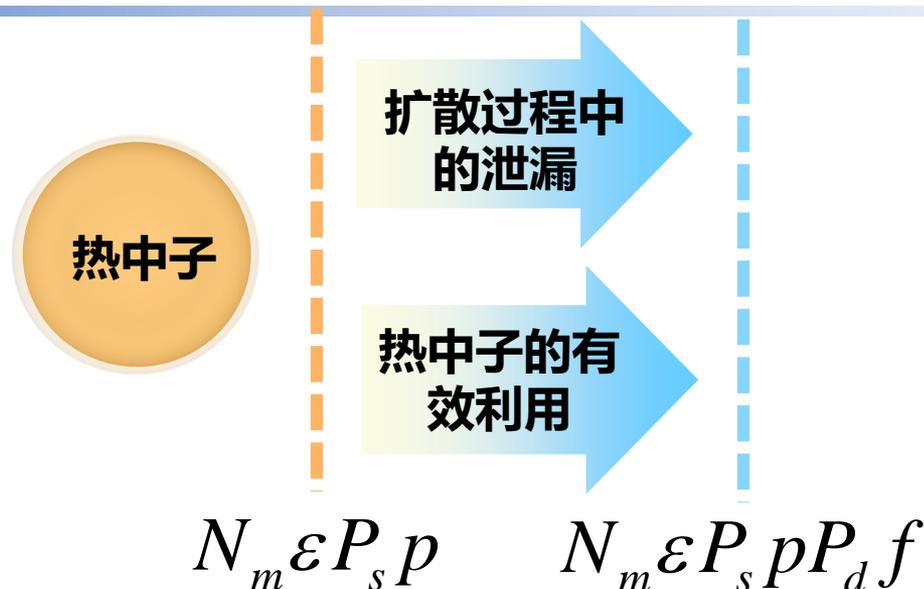
慢化过程中没有泄漏到堆外的中子数所占的比例

◆ 逃脱共振吸收概率 p

慢化过程中没有被共振吸收的中子数所占的比例



❖ 反应堆内的中子循环



- ◆ **扩散不泄露概率 P_d** 热中子扩散过程中没有泄露到堆外的中子数所占的比例
- ◆ **整个系统不泄露概率 P_L** 中子分别在慢化过程和扩散过程中两个不泄露概率的乘积
- ◆ **热中子利用系数 f** 被反应堆中所有物质吸收的热中子中被燃料吸收的热中子所占的比例

$$f = \frac{\text{核燃料吸收的热中子数}}{\text{被吸收（核燃料+非核燃料）的热中子总数}}$$



❖ 反应堆内的中子循环

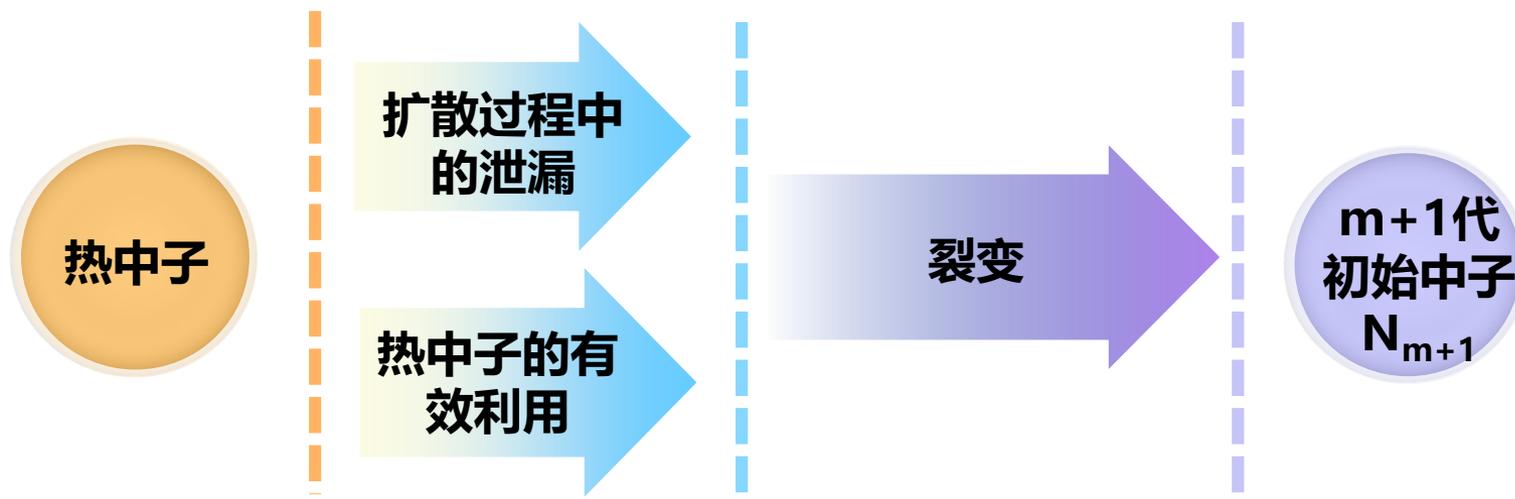
□ 这里的非核燃料包括堆芯的慢化剂、冷却剂和结构材料等等。

□ 如果令 Σ_a^{235} 、 Σ_a^{238} 和 Σ_a^M 分别为²³⁵U、²³⁸U和堆芯内其它材料的热中子吸收截面，则：

$$f = \frac{\Sigma_a^{235} + \Sigma_a^{238}}{\Sigma_a^{235} + \Sigma_a^{238} + \Sigma_a^M}$$



❖ 反应堆内的中子循环



$$N_m \varepsilon P_s p$$

$$N_m \varepsilon P_s p P_d f$$

$$N_m \varepsilon P_s p P_d f \eta$$

◆ **有效裂变中子数 η** ：核燃料每吸收一个热中子所产生的平均

中子数

$$\eta = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a}$$



❖ 反应堆内的中子循环

□ 对于 ^{235}U 和 ^{238}U 组成的核燃料，有：

$$\eta = \nu_{235} \cdot \frac{\Sigma_f^{235}}{\Sigma_a^{235} + \Sigma_a^{238}}$$

□ 根据上式可以看到，热中子裂变因子 η 与堆芯装料的富集度有关：

$$\eta = \nu_{235} \cdot \frac{N_{235} \cdot \sigma_f^{235}}{N_{235} \cdot \sigma_a^{235} + N_{238} \cdot \sigma_a^{238}} = \nu_{235} \cdot \frac{\sigma_f^{235}}{\sigma_a^{235} + \frac{N_{238}}{N_{235}} \cdot \sigma_a^{238}}$$

$$= \nu_{235} \cdot \frac{\sigma_f^{235}}{\sigma_a^{235} + \frac{238}{235} \cdot \frac{1-\theta}{\theta} \cdot \sigma_a^{238}}$$

□ ^{235}U 的富集度和丰度的关系：

$$\theta = \frac{235 \cdot N_{235}}{235 \cdot N_{235} + 238 \cdot N_{238}}$$

θ 为 ^{235}U 的富集度



目录

引言

裂变释放的能量分布

反应堆内的中子循环

反应堆的临界条件

思考与讨论



❖ 反应堆的临界条件

有效增殖系数

- 反应堆中新生一代的中子数 ($m+1$ 代) 与产生他们的**直属**上一代 (m 代) 中子数之比

$$k_{eff} = \frac{N_{m+1}}{N_m} = \frac{N_m \varepsilon P_L p f \eta}{N_m} = \varepsilon P_L p f \eta$$

- 当反应堆无限大时，中子没有泄漏，即中子不泄漏率几率 $P_L=1$
- 无限大核反应堆系统的有效增殖系数称为**无限介质增殖系数** k_{∞} 。

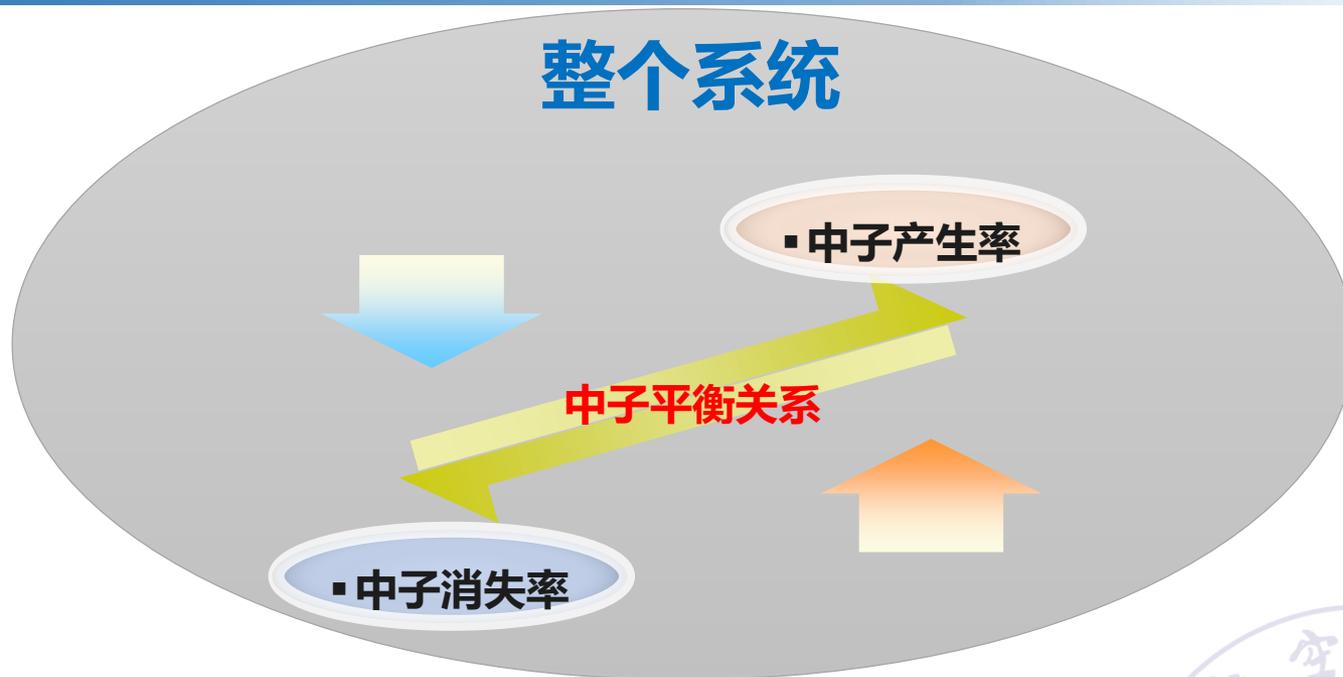
$$k_{\infty} = \varepsilon p f \eta = k_{eff} P_L$$

- ◆ 这就是著名的**四因子公式**，世界上第一座核反应堆就是利用这个公式设计的。
- ◆ 上述定义**很直观但不实用**，因为在实际问题中很难确定中子属于哪一代。



❖ 反应堆的临界条件

k_{eff} 新定义方式

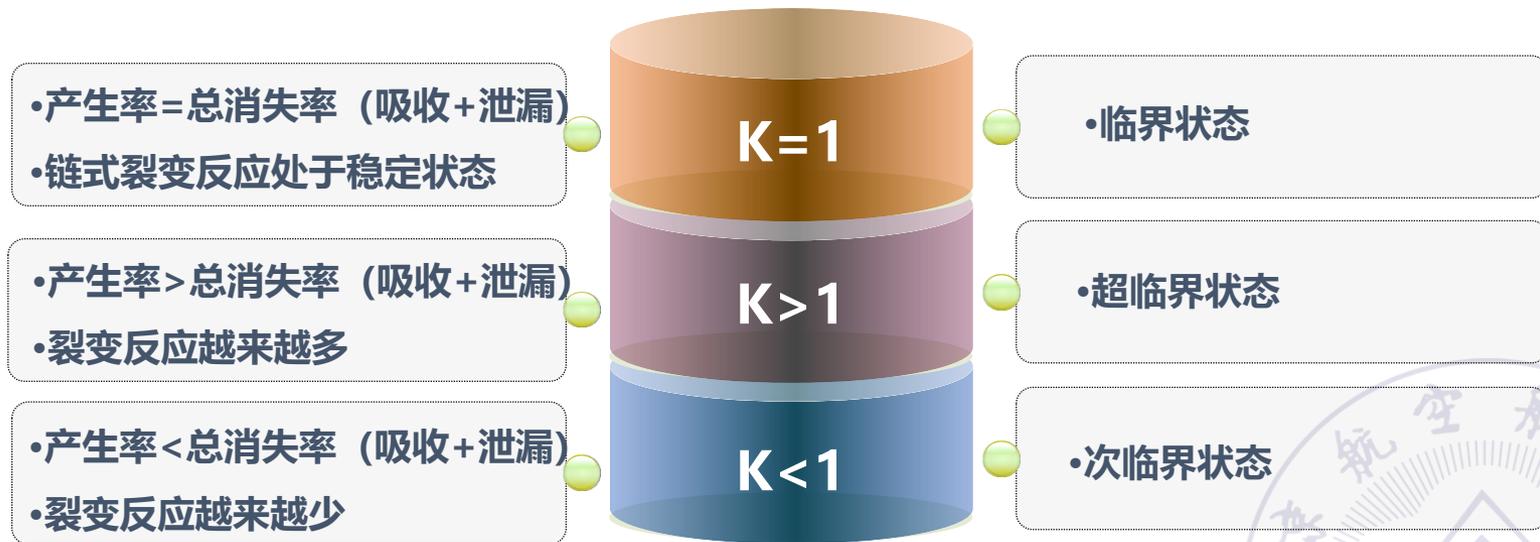


$$k_{eff} = \frac{\text{系统内中子产生率}}{\text{系统内中子消失率 (吸收+泄漏)}}$$



❖ 反应堆的临界条件

反应堆三种临界条件



❖ 反应堆的临界条件

三个重要定义

□ 临界

反应堆的有效增殖系数等于1

□ 临界尺寸

反应堆达到临界时，反应堆芯部的大小。

□ 临界质量

反应堆达到临界时，堆内所装载的燃料量。



目录

引言

裂变释放的能量分布

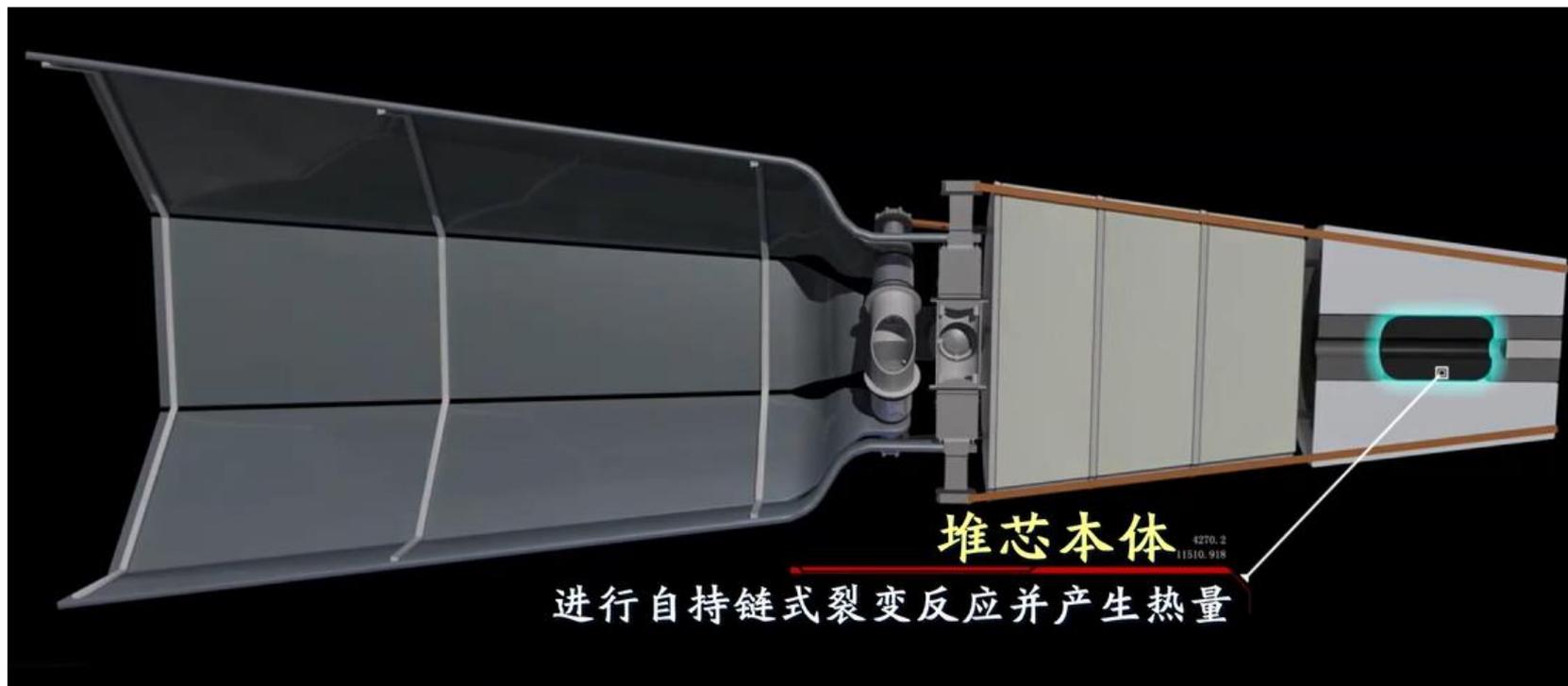
反应堆内的中子循环

反应堆的临界条件

思考与讨论



❖ 思考与讨论



Kilopower具有直径为15cm的堆芯本体。



❖ 思考与讨论

思考题

- 小体积堆芯增加了中子泄漏率，Kilopower如此小的体积是如何达到临界的呢？通过本章 k_{eff} 的内涵进行分析。



谢谢大家

