

南京航空航天大学

二〇〇八年硕士研究生入学考试试题

考试科目: 核辐射物理学

说明: 所有试题答案必须写在答题纸上, 答案写在试卷上无效

一、简要回答下列问题 (本题 50 分, 每小题 5 分)

- 1、1 克镭的放射性活度多大? 每秒钟的衰变数多少?
- 2、 ^{19}O 和 ^{14}O 均不稳定, 会进行 β 衰变。你认为它们会进行 β^- 衰变还是 β^+ 衰变? 为什么?
- 3、中子衍射与 X 射线衍射相比有何优缺点?
- 4、写出无限大介质中中子增殖系数的四因子公式, 并说明各因子的含义。
- 5、什么是托卡马克装置?
- 6、壳模型提出的主要实验依据是什么? 壳模型的主要假定是什么?
- 7、什么是核反应截面? 它的物理意义是什么?
- 8、核力具有哪些主要性质?
- 9、 β 衰变有哪几种形式? 试写出衰变过程的表达式。
- 10、什么是同质异能素 (又叫形状同质异能素)? 它们形成的物理机制是什么?

二、现今在天然铀矿中, ^{238}U 的含量占 99.28%, ^{235}U 占 0.72%, 如地球生成时这两种同位素丰度相等, 并且在化学和物理变化过程中没有同位素分离, 已知 ^{238}U 的半衰期为 $T_1=4.5\times 10^9$ 年, ^{235}U 的半衰期为 $T_2=7.1\times 10^8$ 年, 试由此条件计算地球的年龄。(本题 20 分)

三、 ^{238}Po 衰变至 ^{234}U , 发射三组 α 粒子, 它们的动能分别为: 5.499MeV, 5.457MeV, 5.358MeV, 分别跃迁到 ^{234}U 的基态、第一和第二激发态, 试计算 ^{234}U 原子核的能级并画出衰变纲图。(本题 20 分)

四、用入射中子通量 $\Phi = 10^7 / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 引起 $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ 核反应, 生成 ^{27}Mg 具有 β 放射性, 半衰期 $t_{1/2} = 10.2$ 分。核反应所用靶厚 1cm , 靶面积 $2 \times 5\text{cm}^2$, 经长期照射 (即照射时间远大于 $5t_{1/2}$), 在停止照射后搁置 20.4 分测得放射性活度为 1.13×10^{-2} 微居里, 求核反应截面。(已知 ^{27}Al 密度 $\rho = 2.7\text{g}/\text{cm}^3$) (本题 20 分)

五、厚 $d = 0.02\text{cm}$ 的金箔被注量率为 $\Phi = 10^{12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的热中子照射 $t = 5\text{min}$, 通过核反应 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 生成放射性核素 ^{198}Au (^{198}Au 通过 β^- 衰变为 ^{198}Hg , 其半衰期 $T_{1/2} = 2.7\text{d}$)。已知 ^{197}Au 的热中子反应截面为 $\sigma_0 = 98.7\text{b}$, 金的密度 $\rho = 19.3\text{g}/\text{cm}^3$ 。求每 cm^2 金箔产生的 ^{198}Au 活度 $A = ?$ 为保证样品中金含量不低于 99.99% 时, 最大允许的辐照时间为多少? (本题 20 分)

六、 γ 射线与物质相互作用发生的电子对生成效应中, 正电子在损失能量而停止下来一瞬间, 与介质中的电子发生湮没而产生两个湮没光子, 对有的入射 γ 射线, 这两个湮没光子可能均逃逸; 有的是一个逃逸一个又被吸收 (即又发生次级效应而沉积能量); 有的是两个湮没光子均被吸收, 试分析在这三种情况下, ^{24}Na 的 2.75MeV 的 γ 光子在每个过程中沉积在探测介质中总的总能量。(假定只要 γ 射线一旦发生次级效应产生次电子就可认为把能量沉积在探测介质内)。(本题 20 分)

南京航空航天大学

二〇〇八年硕士研究生入学考试试题参考答案

考试科目：核辐射物理学

一、简要回答下列问题（本题 50 分，每小题 5 分）

1、1 克镭的放射性活度多大？每秒钟的衰变数多少？

答：1 克镭的放射性活度为 $3 \times 10^7 \text{Bg}$ ，每秒钟的衰变数为 3×10^7 次衰变。

2、 ^{19}O 和 ^{14}O 均不稳定，会进行 β 衰变。你认为它们会进行 β^- 衰变还是 β^+ 衰变？为什么？

答：根据 β 稳定线的经验公式：
$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}}$$

对 ^{19}O 和 ^{14}O ， $Z=8$ ， $A=19$ 及 $A=14$ 。对 $A=19$ ，稳定核素的 Z 应为：9，对 $A=14$ ，稳定核素的 Z 应为：7。

因此，对 ^{19}O 将发生 β^- 衰变，而对 ^{14}O 将发生 β^+ 衰变。

3、中子衍射与 X 射线衍射相比有何优缺点？

答：X 射线衍射是与电子相互作用，因而散射长度与原子序数 Z 成正比。所以对轻元素不灵敏。中子衍射与核相互作用，因此并不随 Z 单调变化。从而，中子衍射特别适合于研究点阵中轻元素的位置；对同一元素，中子衍射能区别不同的同位素；中子具有磁矩，因而能与原子磁矩相互作用，引起磁衍射，通过中子衍射可以定出磁性材料点阵中磁性原子的磁矩大小和取向。

4、写出无限大介质中中子增殖系数的四因子公式，并说明各因子的含义。

答： $k = f\eta\epsilon p$

f ：热中子利用系数；

η ：一个热中子被核燃料吸收后平均发出的快中子数；

ϵ ：快中子的增殖系数；

p : 中子逃逸共振吸收的几率。

5、什么是托卡马克装置？

答：用于约束和加热等离子体的，由环形真空室和磁线圈组成的磁约束核聚变装置。

6、壳模型提出的主要实验依据是什么？壳模型的主要假定是什么？

答：1) Z 和 N 为幻数的原子核特别稳定；

2) 原子核的电四极矩 Q ，在 Z, N 通过幻数时 Q 最小。 Q 周期性地从正值变为负值，可见当为幻数时，核子的壳层填满了，原子核接近球形；

3) 中子数 N 为 50, 82, 126 的核，具有特别小的中子俘获截面（约比临近核小 1—2 个数量级），这说明当 N =幻数时，中子壳层已满了。

壳模型的主要假定是：原子核内存在一个球对称的平均场，核内存在一些量子化能级。质子和中子各自按 Pauli 不相容原理填充各自的能级，从能量最低开始，逐步向能量较高填充。

7、什么是核反应截面？它的物理意义是什么？

答：核反应截面是表征粒子和原子核相互作用的基本物理量。截面表示核反应过程发生的几率。其物理意义是：表示一个粒子垂直入射到单位面积内只含一个靶核的靶子上发生反应的几率。

8、核力具有哪些主要性质？

答：核力是短程力；

核力与自旋相关；

核力有排斥芯；

核力具有饱和性核力具有电荷无关性。

9、 β 衰变有哪几种形式? 试写出衰变过程的表达式。

答: 三种类型: β^- 衰变、 β^+ 衰变、轨道电子俘获 (EC)。

$$\beta^- \text{ 衰变: } {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\beta^+ \text{ 衰变: } {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$$

$$\text{轨道电子俘获 (EC): } {}^A_Z X + e_i \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$$

10、什么是同质异能素 (又叫形状同质异能素)? 它们形成的物理机制是什么?

答: 原子核处于长寿命的激发态时形成的核素为同质异能素, 这是由于这些核素的基态和激发态的轨道量子数和总角动量量子数相差太大, 退激发时跃迁几率太小而形成的。

二、现今在天然铀矿中, ${}^{238}\text{U}$ 的含量占 99.28%, ${}^{235}\text{U}$ 占 0.72%, 如地球生成时这两种同位素丰度相等, 并且在化学和物理变化过程中没有同位素分离, 已知 ${}^{238}\text{U}$ 的半衰期为 $T_1=4.5 \times 10^9$ 年, ${}^{235}\text{U}$ 的半衰期为 $T_2=7.1 \times 10^8$ 年, 试由此条件计算地球的年龄。(本题 20 分)

解: 因现在 ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{238}\text{U}$ 的丰度之比为: 0.72:99.28

地球生成时这两种同位素丰度相等, 设两种同位素数目为 N_0

${}^{238}\text{U}$ 的半衰期为 $T_1=4.5 \times 10^9$ 年, ${}^{235}\text{U}$ 的半衰期为 $T_2=7.1 \times 10^8$ 年

$$\text{所以: } \left(N_0 e^{-\frac{t}{T_1} \ln 2} \right) : \left(N_0 e^{-\frac{t}{T_2} \ln 2} \right) = 99.28 : 0.72$$

$$t = \left(\ln \frac{99.28}{0.72} \right) / \left(\frac{\ln 2}{7.1 \times 10^8} - \frac{\ln 2}{4.5 \times 10^9} \right) = 5.94 \times 10^9 \text{ a}$$

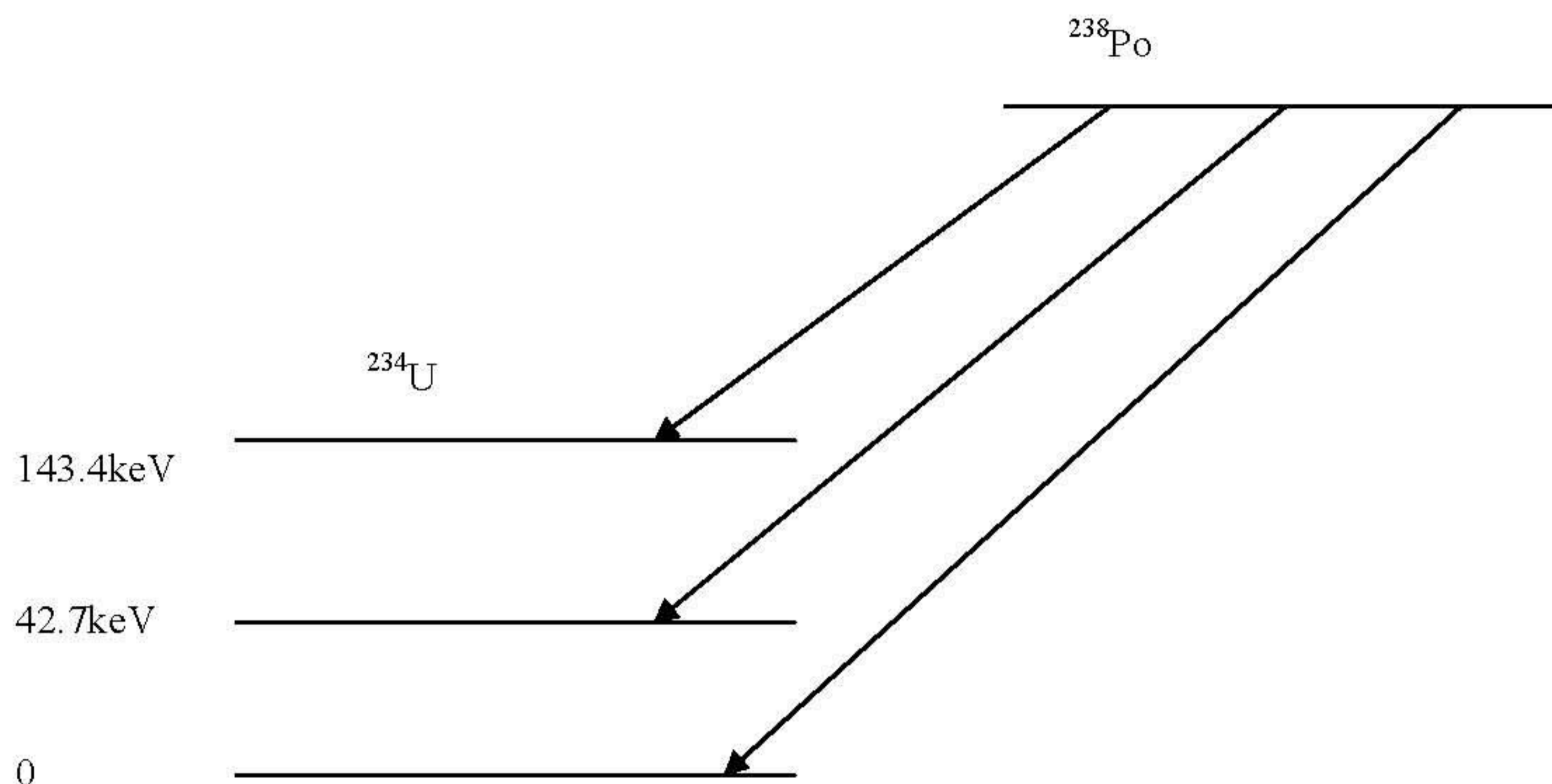
三、 ${}^{238}\text{Po}$ 衰变至 ${}^{234}\text{U}$, 发射三组 α 粒子, 它们的动能分别为: 5.499MeV, 5.457MeV, 5.358MeV, 分别跃迁到 ${}^{234}\text{U}$ 的基态、第一和第二激发态, 试计算 ${}^{234}\text{U}$ 原子核的能级并画出衰变纲图。(本题 20 分)

解:

$$E_1^* = E_{00} - E_{01} = \frac{A}{A-4} E_{\alpha 0} - \frac{A}{A-4} E_{\alpha 1} = 0.0427 \text{ MeV}$$

$$E_2^* = E_{00} - E_{02} = \frac{A}{A-4} E_{\alpha 0} - \frac{A}{A-4} E_{\alpha 2} = 0.1434 \text{ MeV}$$

衰变纲图如下:



四、用入射中子通量 $\Phi = 10^7 / \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ 引起 $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ 核反应, 生成 ^{27}Mg 具有 β 放射性, 半衰期 $t_{1/2} = 10.2$ 分。核反应所用靶厚 1cm , 靶面积 $2 \times 5\text{cm}^2$, 经长期照射 (即照射时间远大于 $5t_{1/2}$), 在停止照射后搁置 20.4 分测得放射性活度为 1.13×10^{-2} 微居里, 求核反应截面。(已知 ^{27}Al 密度 $\rho = 2.7\text{g}/\text{cm}^3$) (本题 20 分)

解: 入射粒子是中子, 且是薄靶, 所以: $\bar{\sigma} = \sigma$

长期照射下, 当照射时间远大于 $5t_{1/2}$, 所以照射后 Mg 的放射性活度达到饱和, $A = YI = Y\Phi S$

再经过 $2T$ 后, 剩下的放射性活度为:

$$A' = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} A = \left(\frac{1}{2}\right)^2 A = \frac{A}{4}$$

$$\text{即: } A' = \frac{A}{4} = \frac{Y\Phi S}{4} = \frac{N_s \sigma \Phi S}{4}$$

所以, 截面:

$$\sigma = \frac{4A'}{N_s \Phi S} = \frac{4 \times 1.13 \times 10^{-2} \times 3.7 \times 10^4}{\frac{2.7}{27} \times 6.02 \times 10^{23} \times 10^7 \times 10} = 0.279 \text{mb}$$

五、厚 $d = 0.02\text{cm}$ 的金箔被注量率为 $\Phi = 10^{12}\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的热中子照射 $t = 5\text{min}$ ，通过核反应 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 生成放射性核素 ^{198}Au (^{198}Au 通过 β^- 衰变为 ^{198}Hg ，其半衰期 $T_{1/2} = 2.7\text{d}$)。已知 ^{197}Au 的热中子反应截面为 $\sigma_0 = 98.7\text{b}$ ，金的密度 $\rho = 19.3\text{g/cm}^3$ 。求每 cm^2 金箔产生的 ^{198}Au 活度 $A = ?$ 为保证样品中金含量不低于 99.99% 时，最大允许的辐照时间为多少？（本题 20 分）

解： ^{198}Au 的活度：

$$A = \lambda N(t) = N_0 \sigma \Phi (1 - e^{-\lambda t})$$

其中： N_0 为在厚 $d = 0.02\text{cm}$ 的每 cm^2 金箔中的 ^{197}Au 的原子总数

$$N_0 = \frac{N_A \rho}{A} \times 1 \times 0.02 = \frac{6.023 \times 10^{23} \times 19.3}{197} \times 0.02 = 1.18 \times 10^{21} \text{ 个}$$

$$\text{所以 } A = 1.18 \times 10^{21} \times 98.7 \times 10^{-24} \times 10^{12} \times \left(1 - e^{-\frac{0.693 \times 5}{2.7 \times 24 \times 60}} \right)$$

$$= 1.04 \times 10^8 \text{ Bq}$$

由于 ^{198}Au 的半衰期仅 2.7d 很快就衰变为 ^{198}Hg ，所以只要考虑 ^{197}Au 的减少的总数，在 t 时间内， ^{197}Au 的减少的总数为

$$N_t = N_0 \sigma \Phi t = 0.0001 N_0$$

即

$$\sigma \Phi t = 10^{-4}$$

所以 最大允许照射时间为

$$t = \frac{10^{-4}}{\sigma \Phi} = \frac{10^{-4}}{9.87 \times 10^{-23} \times 10^{12}} = 1.01 \times 10^6 \text{ d} = 2.78 \times 10^3 \text{ a}$$

可见 N_t 减少的总数是很小的。

p : 中子逃逸共振吸收的几率。

5、什么是托卡马克装置？

答：用于约束和加热等离子体的，由环形真空室和磁线圈组成的磁约束核聚变装置。

6、壳模型提出的主要实验依据是什么？壳模型的主要假定是什么？

答：1) Z 和 N 为幻数的原子核特别稳定；

2) 原子核的电四极矩 Q ，在 Z, N 通过幻数时 Q 最小。 Q 周期性地从正值变为负值，可见当为幻数时，核子的壳层填满了，原子核接近球形；

3) 中子数 N 为 50, 82, 126 的核，具有特别小的中子俘获截面（约比临近核小 1—2 个数量级），这说明当 N =幻数时，中子壳层已满了。

壳模型的主要假定是：原子核内存在一个球对称的平均场，核内存在一些量子化能级。质子和中子各自按 Pauli 不相容原理填充各自的能级，从能量最低开始，逐步向能量较高填充。

7、什么是核反应截面？它的物理意义是什么？

答：核反应截面是表征粒子和原子核相互作用的基本物理量。截面表示核反应过程发生的几率。其物理意义是：表示一个粒子垂直入射到单位面积内只含一个靶核的靶子上发生反应的几率。

8、核力具有哪些主要性质？

答：核力是短程力；

核力与自旋相关；

核力有排斥芯；

核力具有饱和性核力具有电荷无关性。

六、 γ 射线与物质相互作用发生的电子对生成效应中, 正电子在损失能量而停止下来一瞬间, 与介质中的电子发生湮没而产生两个湮没光子, 对有的入射 γ 射线, 这两个湮没光子可能均逃逸; 有的是一个逃逸一个又被吸收(即又发生次级效应而沉积能量); 有的是两个湮没光子均被吸收, 试分析在这三种情况下, ^{24}Na 的 2.75MeV 的 γ 光子在每个过程中沉积在探测介质中总的总能量。(假定只要 γ 射线一旦发生次级效应产生次电子就可认为把能量沉积在探测介质内)。(本题 20 分)

解: 两个湮没光子都逃逸, 这时, 沉积在探测介质的能量仅为正负电子的动能:

$$E_0 = T_{e^+} + T_{e^-} = E_\gamma - 2m_0c^2 = 2.75 - 1.02 = 1.73\text{MeV};$$

一个湮没光子逃逸时, 沉积能量为

$$E_1 = E_0 + m_0c^2 = E_\gamma - m_0c^2 = 2.75 - 0.51 = 2.24\text{MeV};$$

两个光子都未逃逸, 沉积能量为

$$E_2 = E_0 + 2m_0c^2 = E_\gamma = 2.75\text{MeV}$$