

物理 2025

第十六章 近代物理初步

目录

1 光电效应	2
1.1 考点 1 黑体辐射与能量子	2
1.2 考点 2 光电效应规律的理解及应用	3
1.3 考点 3 对波粒二象性和物质波的理解	6
2 原子结构	7
2.1 考点 1 原子结构和氢原子光谱	7
2.2 考点 2 玻尔原子理论能级跃迁	8
3 原子核	9
3.1 考点 1 原子核的衰变半衰期	9
3.2 考点 2 核反应	10
3.3 考点 3 质量亏损及核能的计算	11

1 光电效应

1.1 考点 1 黑体辐射与能量子

1. 热辐射：一切物体都在辐射电磁波，这种辐射与物体的温度有关，所以叫作热辐射。

2. 黑体与黑体辐射

(1) 黑体：能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射，这种物体就是绝对黑体，简称黑体。黑体是一个理想化的模型。

如图，如果在一个空腔壁上开一个很小的孔，那么射入小孔的电磁波在空腔内表面会发生多次反射和吸收，最终不能从空腔射出。这个带小孔的空腔就成了一个绝对黑体。

(2) 黑体辐射：黑体虽然不反射电磁波，却可以向外辐射电磁波，这样的辐射叫作黑体辐射。

(3) 黑体辐射的实验规律

- 对于一般材料的物体，辐射电磁波的情况除与温度有关外，还与材料的种类及表面状况有关。
- 黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与它的温度有关。随着温度的升高，一方面，各种波长的辐射强度都有增加；另一方面，辐射强度的极大值向波长较短的方向移动（如图所示）。

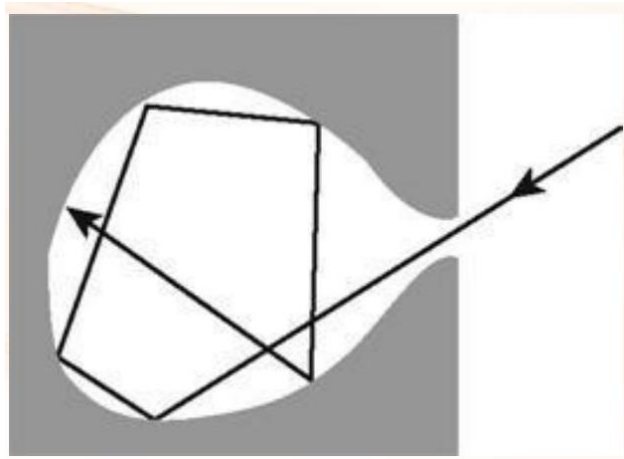


图 1: 黑体模型示意图

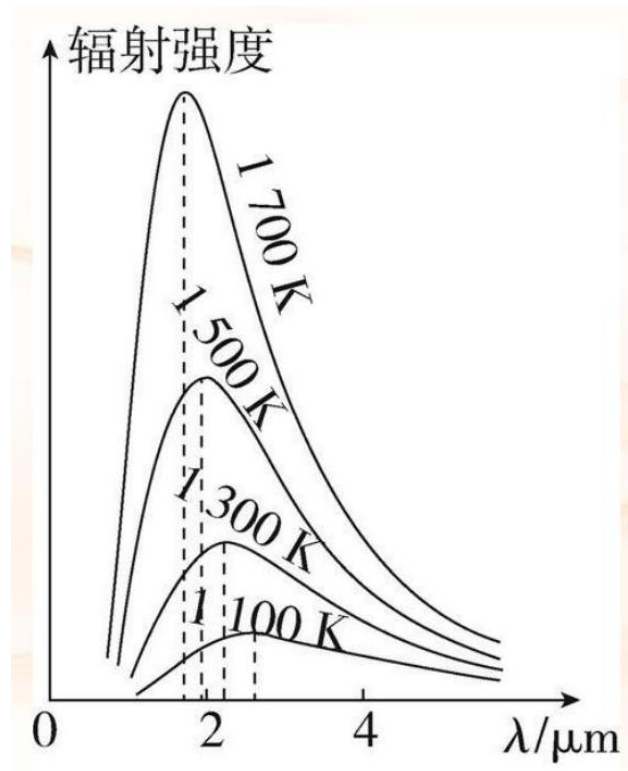


图 2: 黑体辐射强度与波长关系

3. 能量子

(1) 定义: 普朗克认为, 组成黑体的振动着的带电微粒的能量只能是某一最小能量值 ε 的整数倍, 这个不可再分的最小能量值 ε 叫作能量子。

(2) 表达式: $\varepsilon = h\nu$ 。 ν 是带电微粒吸收或辐射电磁波的频率; h 为普朗克常量, 一般取 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

1.2 考点 2 光电效应规律的理解及应用

1. 光电效应: 照射到金属表面的光, 能使金属中的电子从表面逸出现象。逸出的电子叫作光电子。

2. 光电效应的实验规律

(1) 存在截止频率 ν_c (又称极限频率)

当入射光的频率减小到某一数值 ν_c 时, 光电流消失。 ν_c 称为截止频率或极限频率。

点拨提醒 截止频率只和金属自身的性质有关。

(2) 存在饱和电流

光照条件不变的情况下, 光电流随电压的增大而增大, 但最终会趋于一个饱和值, 此后即使电压再增大, 电流也不会增大。对一定频率的光, 入射光越强, 饱和电流越大。

(3) 存在遏止电压 U_c

U_c 是指使光电流减小到 0 的反向电压。遏止电压的大小取决于入射光的频率。

(4) 具有瞬时性

当频率超过截止频率 ν_c 时，无论入射光怎样微弱，照到金属时都会立即产生光电流。

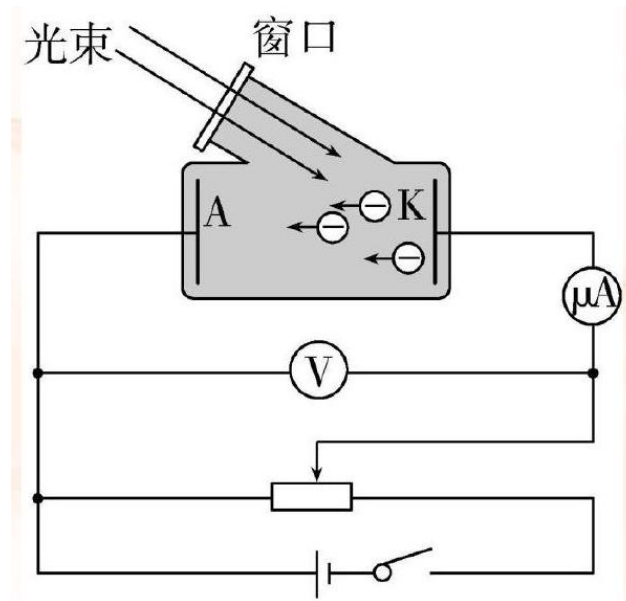


图 3: 光电效应实验装置示意图

3. 爱因斯坦光电效应方程

(1) 表达式: $E_k = h\nu - W_0$ 。

(2) 逸出功 W_0 : 电子从金属中逸出所需外界对它做功的最小值。 $W_0 = h\nu_c = h\frac{c}{\lambda_c}$ 。

(3) 物理意义: 金属表面的电子吸收一个光子获得的能量是 $h\nu$ ，这些能量的一部分用来克服金属的逸出功 W_0 ，剩下的表现为逸出后电子的最大初动能 E_k 。

4. 光电效应的两种决定关系

5. 光电效应中应区分的几个概念

(1) 光子与光电子: 光本身是由一个个不可分割的能量子组成的，这些能量子被称为光子。光电子是金属表面在受到光照射时吸收光子的能量从金属表面逸出的电子。

(2) 光电子的动能与光电子的最大初动能: 光照射到金属表面时，电子吸收光子的能量，可能向各个方向运动，除了脱离金属需要的最小能量（逸出功）外，还要克服原子的其他束缚力做功，剩余的能量为光电子的动能；处于金属表面的电子直接向外逸出时，具有最大初动能。

(3) 入射光强度与光子能量: 入射光强度指单位时间内照射到金属表面单位面积上光子的总能量；光子能量即每个光子的能量，光子总能量等于光子能量与入射光子数的乘积。

6. 光电效应的四种图像分析

最大初动能 E_k 与入射光频率 ν 的关系图像 &

(1) 截止频率 ν_c : 图线与 ν 轴交点的横坐标

(2) 逸出功: $W_0 = |-E| = E$

(3) 普朗克常量: $h = k$ (图线的斜率)

颜色（频率）相同、强弱不同的光，光电流与电压的关系图像 &

(1) 遏止电压 U_c : 图线与横轴交点的横坐标

(2) 饱和电流: 光电流的最大值 I_m, I'_m

(3) 最大初动能: $E_k = eU_c$

颜色（频率）不同时，光电流与电压的关系图像 &

(1) 遏止电压: U_{c1}, U_{c2}

(2) 饱和电流: I_1, I_2

(3) 最大初动能: $E_{k1} = eU_{c1}, E_{k2} = eU_{c2}$

遏止电压 U_c 与入射光频率 ν 的关系图像 &

(1) 截止频率 ν_c : 图线与横轴交点的横坐标

(2) 遏止电压 U_c : 随入射光频率的增大而增大, $U_c = \frac{h\nu}{e} - \frac{W_0}{e}$

(3) 普朗克常量 h : 等于图线的斜率与电子电荷量的乘积, 即 $h = ke$

典例在光电效应实验中，小明同学用同一实验装置如图 (a)，在甲、乙、丙三种光的照射下得到了三条电流表与电压表读数之间的关系曲线，如图 (b) 所示。下列说法正确的是 ()

- A. 乙光的频率小于甲光的频率
- B. 甲光的波长大于丙光的波长
- C. 丙光的光子能量小于甲光的光子能量
- D. 乙光对应的光电子最大初动能小于丙光对应的光电子最大初动能

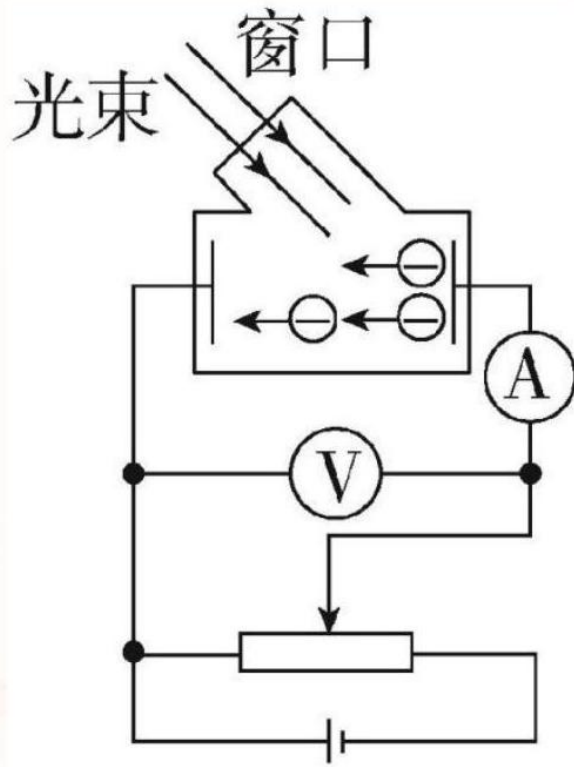


图 4: 图 (a)

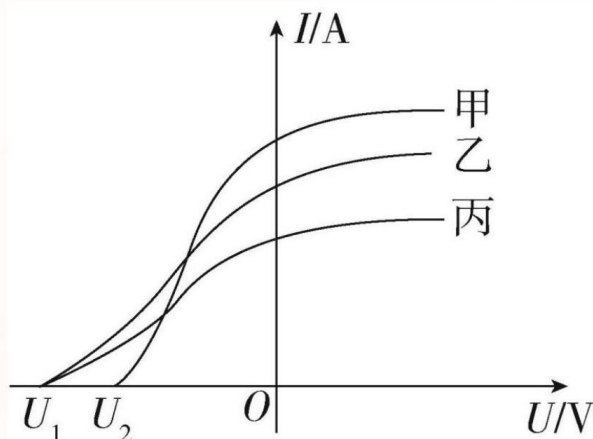


图 5: 图 (b)

1.3 考点 3 对波粒二象性和物质波的理解

1. 康普顿效应

(1) 概念: 当 X 射线入射到物质上被散射后, 在散射的 X 射线中, 除了与入射波长相同的成分外, 还有波长比入射波长更长的成分。人们把这种现象叫作康普顿效应。

(2) 光子的动量: $p = \frac{h}{\lambda}$ 。

推导: 由动量的定义有 $p = mc$, 结合光子能量 $E = h\nu$ 、爱因斯坦的质能方程 $E = mc^2$ 及 $c = \lambda\nu$ 可得 $p = \frac{h}{\lambda}$ 。

(3) 意义

- 证明了爱因斯坦光子说的正确性;
- 揭示了光子不仅具有能量, 还具有动量;
- 揭示了光具有粒子性;
- 证实了光子和微观粒子的相互作用过程也严格遵循动量守恒定律和能量守恒定律。

2. 光的波粒二象性

波动性和粒子性的对立统一

- (1) 大量光子易显示出波动性, 而少量光子易显示出粒子性
- (2) 波长长 (频率低) 的光波动性强, 而波长短 (频率高) 的光粒子性强
- (3) 光的波动性和粒子性是同时存在的

3. 物质波

(1) 定义: 任何运动着的物体都有一种波与之对应, 这种波叫作物质波 (也叫德布罗意波)。

(2) 物质波的波长: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$, h 是普朗克常量。

2 原子结构

2.1 考点 1 原子结构和氢原子光谱

1. 电子的发现：英国物理学家汤姆孙在研究阴极射线时发现了电子。电子的发现说明原子不是组成物质的最小微粒。

2. 粒子散射实验：英国物理学家卢瑟福进行了 α 粒子散射实验，提出了原子的核式结构模型。

(1) 实验装置

(2) 实验现象：绝大多数 α 粒子穿过金箔后基本上仍沿原来的方向前进，但有少数 α 粒子发生了大角度偏转，极少数 α 粒子偏转的角度甚至大于 90° ，也就是说，它们几乎被“撞”了回来。

3. 原子的核式结构模型：在原子的中心有一个很小的核，叫作原子核，原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核里，带负电的电子在核外空间绕核旋转。

4. 氢原子光谱

(1) 光谱：用棱镜或光栅可以把物质发出的光按波长（频率）展开，获得波长（频率）和强度分布的记录，即光谱。

(2) 光谱分类

- 线状谱是一条条的亮线。
- 连续谱是连在一起的光带。

(3) 氢原子光谱的实验规律

- 巴耳末系是氢原子光谱在可见光区的一组谱线，其波长公式为 $\frac{1}{\lambda} = R_\infty \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) (n = 3, 4, 5, \dots)$ ， R_∞ 是里德伯常量， $R_\infty = 1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ ，此公式称为巴耳末公式。
- 氢原子光谱在红外和紫外光区的其他谱线也都满足与巴耳末公式类似的关系式。

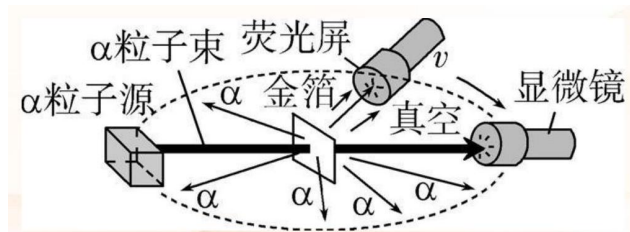


图 6: 粒子散射实验装置

2.2 考点 2 玻尔原子理论能级跃迁

1. 玻尔理论

(1) 轨道量子化与定态

- 电子绕核运动的可能轨道不是任意的，各可能轨道的半径 $r_n = n^2 r_1 (n = 1, 2, 3, \dots)$ ，其中 r_1 为基态轨道半径。
- 原子只能处于一系列不连续的、稳定的能量状态（定态），其总能量 E_n 与基态总能量 E_1 的关系为 $E_n = \frac{E_1}{n^2} (n = 1, 2, 3, \dots)$ 。

(2) 频率条件

原子在两个定态之间跃迁时，将辐射（或吸收）一定频率的光子，光子的能量为 $h\nu = |E_{\text{初}} - E_{\text{末}}|$ 。

2. 氢原子的能级图

3. 两类能级跃迁

- (1) 自发跃迁：高能级 \rightarrow 低能级，释放能量，放出光子。光子的频率 $\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_{\text{高}} - E_{\text{低}}}{h}$ 。
- (2) 受激跃迁：低能级 \rightarrow 高能级，吸收能量。

- 吸收光子的能量必须恰好等于能级差，即 $h\nu = \Delta E$ 。
- 碰撞、加热等。只要入射粒子能量大于或等于能级差即可，即 $E_{\text{外}} \geq \Delta E$ 。

知识拓展电离

(1) 电离态： $n = \infty, E = 0$ 。

(2) 电离能：指原子从基态或某一激发态跃迁到电离态所需要吸收的最小能量。

例如：基态 \rightarrow 电离态， $E_{\text{吸}} = 0 - (-13.6 \text{ eV}) = 13.6 \text{ eV}$ 。

(3) 吸收的能量足够大，电离后，获得自由的电子还具有动能。

4. 光谱线条数的确定方法

(1) 大量的氢原子处于 n 能级的激发态，当这些氢原子向低能级跃迁时，辐射出的光的频率有 $N = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}$ 种。

(2) 一个氢原子处于 n 能级的激发态时，可辐射出的光的频率最多有 $n - 1$ 种。

5. 光子与电子使原子发生能级跃迁的主要区别

原子若是吸收光子的能量而被激发，其光子的能量必须等于能级差，否则不被吸收。原子吸收外来电子的能量而被激发时，只要入射电子的能量大于或等于能级差，均可使原子发生能级跃迁。

典例为了更形象地描述氢原子能级和氢原子电子轨道的关系，作出如图所示的能级轨道图，氢原子从 $n = 2$ 能级跃迁到 $n = 1$ 能级发出的光的波长和频率分别为 λ_1 和 ν_1 ，氢原子从 $n = 3$ 能级分别跃迁到 $n = 2$ 能级和 $n = 1$ 能级发出的光的波长和频率分别为 λ_2 λ_3 和 ν_2 ν_3 ，下列关系正确的是 ()

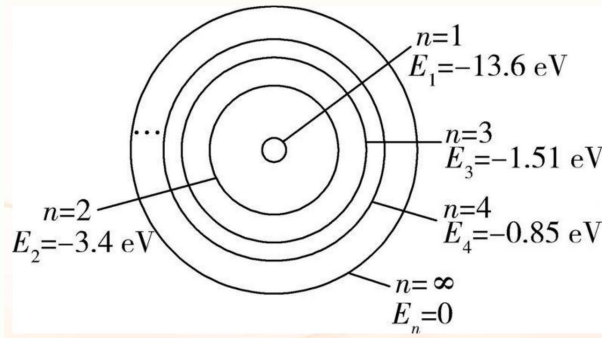


图 7: 氢原子能级轨道图

- A. $\nu_3 = \nu_1 + \nu_2$
- B. $\nu_1 < \nu_2$
- C. $\lambda_3 = \lambda_1 + \lambda_2$
- D. $\lambda_3 > \lambda_2$

3 原子核

3.1 考点 1 原子核的衰变半衰期

1. 衰变和 衰变的比较

	衰变	衰变
衰变方程	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e$
衰变实质	2 个质子和 2 个中子结合成一个整体	1 个中子转化为 1 个质子和 1 个电子
	$2{}_1^1\text{H} + 2{}_0^1n \rightarrow {}^4_2\text{He}$	${}_0^1n \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^0_{-1}e$
匀强磁场中轨迹形状		
衰变规律	电荷数守恒、质量数守恒	

2. 射线: 射线经常是伴随着 射线或 射线同时产生的。

3. 依据“两个守恒”确定衰变次数

设放射性元素 A_ZX 经过 n 次 衰变和 m 次 衰变后, 变成稳定的新元素 ${}^{A'}_{Z'}Y$, 则表示核反应的方程为 ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A'}_{Z'}Y + n{}_2^4\text{He} + m{}_1^0e$ 。

根据质量数守恒和电荷数守恒可列方程

$$A = A' + 4n, Z = Z' + 2n - m,$$

两式联立得 $n = \frac{A-A'}{4}$, $m = \frac{A-A'}{2} + Z' - Z$ 。

4. 三种射线的比较

	本质	射出速度	电离本领	穿透本领
射线	高速氦核流	0.1c	很强	弱 (小纸片即可挡住)
射线	高速电子流	0.99c	较弱	较强 (能穿透几毫米厚的铝板)
射线	光子流	c (光速)	很弱	强 (能穿透几厘米厚的铅板)

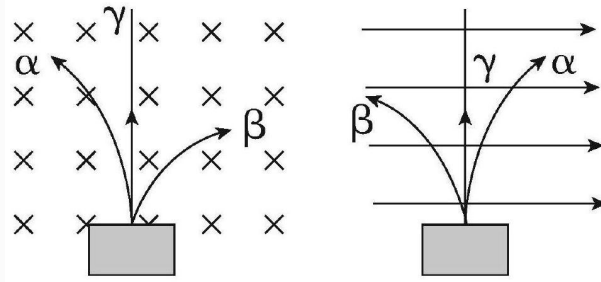


图 8: 三种射线在磁场和电场中的运动轨迹

5. 半衰期

(1) 公式: $N_{\text{余}} = N_{\text{原}} \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$, $m_{\text{余}} = m_{\text{原}} \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ 。

(2) 影响因素: 放射性元素衰变的快慢是由核内部自身的因素决定的, 跟原子所处的外部条件 (例如温度、压强) 和化学状态 (例如单质、化合物) 无关。

典例 1 (依据质量数守恒和电荷数守恒判断、衰变的次数) 放射性同位素钍 $^{232}_{90}\text{Th}$ 经衰变会变成氡, 其衰变方程为 $^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{220}_{86}\text{Rn} + x\alpha + y\beta$, 其中 ()

- A. $x = 1, y = 3$
- B. $x = 2, y = 3$
- C. $x = 3, y = 1$
- D. $x = 3, y = 2$

3.2 考点 2 核反应

典例 2 关于核反应的知识, 下列说法正确的是 ()

- A. $^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{218}_{84}\text{Po} + X$, X 是 α 粒子
- B. 中子轰击 $^{235}_{92}\text{U}$, 一定能发生链式反应
- C. $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0n \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3^1_0n$ 是核裂变方程, 也是氢弹的核反应方程
- D. $^{235}_{92}\text{U}$ 核的平均结合能大于 $^{144}_{56}\text{Ba}$ 核的平均结合能

3.3 考点 3 质量亏损及核能的计算

1. 对结合能与比结合能的理解

(1) 对结合能的理解

- 结合能是针对由核子组成的原子核来说的，孤立核子如质子或中子无结合能。
- 质量数越大的原子核结合能越大。

(2) 对比结合能的理解

- 比结合能的大小能够反映原子核的稳定程度，比结合能越大，原子核就越难被拆分开，表示该核就越稳定。
- 核子数较小的轻核与核子数较大的重核，其比结合能都比较小，中等大小的核的比结合能较大，表示这些原子核较稳定。
- 当比结合能较小的原子核变成比结合能较大的原子核时，就可释放核能。

2. 核能的计算

(1) 对质能方程的理解

- 一定的能量和一定的质量相联系，物体的总能量和它的质量成正比，即 $E = mc^2$ 。
- 核子在结合成原子核时出现质量亏损 Δm ，其能量也要相应减少，释放的能量 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。
- 原子核分解成核子时要吸收一定的能量，相应的质量增加 Δm ，吸收的能量 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。

(2) 与核反应相关的能量计算方法

- 根据 $\Delta E = \Delta mc^2$ 计算。计算时 Δm 的单位是“kg”， c 的单位是“m/s”， ΔE 的单位是“J”。
- 根据 $\Delta E = \Delta m \times 931.5(\text{MeV})$ 计算。因 1u 相当于 931.5MeV 的能量，所以计算时 Δm 的单位是“u”， ΔE 的单位是“MeV”。
- 原子核的结合能 = 原子核的比结合能 \times 核子数。