

高等学校试用教材

核辐射防护基础

王同生 张秀儒 刘忠文 编

原子能出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了核辐射防护的基础知识和基本理论。全书共分九章。前四章阐述了关于原子核物理和辐射探测的基础知识,内容包括原子核的基本概念、放射性、射线与物质的相互作用和放射性测量。后五章主要叙述核辐射防护中常用的辐射量及其单位、剂量当量限值、天然铀生产中的核辐射防护和剂量监测。本书是为高等学校核化学工程专业而编写的一本试用教材,也可供从事放射性同位素应用和环境保护等工作的科技人员参考。

高等学校试用教材

核 辐 射 防 护 基 础

王同生 张秀儒 刘忠文 编

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 11·字数 244 千字

1983年6月第一版·1983年6月第一次印刷

印数 001—3400·统一书号: 15175·480

定价: 1.15元

前 言

本书是为高等学校核化学工程专业而编写的一本试用教材。全书共分九章。本书重点介绍了原子核物理和辐射测量的基础知识；同时介绍了剂量学的基本概念、剂量测量的基本原理和辐射防护标准等内容，根据本专业的需要，还介绍了天然铀生产中的核辐射防护。本书的讲课学时数为50左右。

本书可供未系统地学过核物理及射线探测技术课程的高等学校学生阅读，也可供从事核燃料、放射性同位素应用及环境保护工作的科技人员参考。

书中第一、二、三、四章由张秀儒编写，第五、六、七、九章由刘忠文编写，第八章由王同生编写。

本书蒙潘自强、姜希文两位同志审校；在编写本书过程中，中国科学院原子能研究所、国营二七二厂、二六一厂、二六二厂、二六三厂、二〇二厂、华东电子管厂和上海电子管厂等单位的一些同志提供了有关资料并提出了宝贵意见；轻工业部设计院的一些同志为本书绘制了插图，编者在此谨向他们一并致谢。

由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者指正。

编者

1982年6月

目 录

第一章 原子与原子核的基本概念	1
1.1 原子的结构	1
1.2 原子核的结构	7
1.3 原子核的稳定性	14
第二章 放射性	18
2.1 放射性的发现	18
2.2 自发核跃迁的主要类型	18
2.3 原子核的能级与衰变图	26
2.4 放射性衰变规律	29
2.5 放射性活度及其单位	42
2.6 天然放射系	44
第三章 射线与物质的相互作用	54
3.1 α 射线与物质的相互作用	55
3.2 β 射线与物质的相互作用	63
3.3 γ 射线与物质的相互作用	72
3.4 α 、 β 、 γ 射线的相对危害性	88
3.5 中子及其与物质的相互作用	89
第四章 放射性测量	101
4.1 射线探测概述	101
4.2 气体电离探测器	102
4.3 闪烁探测器	124
4.4 半导体探测器	137
4.5 放射性活度测量	150

4.6	放射性测量中的统计误差	163
第五章	剂量及其单位	181
5.1	照射量及其单位	182
5.2	吸收剂量及其单位	184
5.3	剂量当量及其单位	186
5.4	照射量和吸收剂量的测量	189
5.5	吸收剂量和照射量的换算	197
第六章	射线对人体的影响	201
6.1	射线对人体的作用	202
6.2	急性放射损伤	205
6.3	远后效应	208
6.4	本底辐射与医疗照射	214
第七章	辐射防护标准	221
7.1	发展简史	221
7.2	ICRP 的新建议	224
7.3	最大容许身体负荷量和最大容许浓度的计算	237
7.4	我国现行的辐射防护标准	249
第八章	天然铀生产、加工中的辐射安全与防护	253
8.1	铀的分布及放射性	253
8.2	铀的物理、化学性质	255
8.3	铀的毒性及最大容许浓度	256
8.4	天然铀生产、加工中的辐射防护	262
第九章	辐射防护方法与剂量监测	280
9.1	辐射防护方法	280
9.2	个人剂量监测	295
9.3	工作场所的监测	319

第一章 原子与原子核的 基本概念

1.1 原子的结构

原子是保持元素化学性质的最小粒子。俄国化学家门捷列夫 (Д. И. Менделеев) 1869 年所发现的元素周期律, 指出了各种元素的性质随原子量的增加而呈周期性地变化。这一规律是建立原子结构理论的重要基础。

1897 年汤姆逊 (J. J. Thomson) 发现了电子。接着一些科学家逐渐确定了电子的各种基本特性, 并确立了电子是各种元素的原子的共同组成部分。既然一切原子中都有带负电的电子, 那么原子中就必然有带正电的物质。因此, 在研究原子结构中, 首先要解决的问题就是原子中带正电的物质以及电子在原子中如何分布的问题。

1. 原子的有核模型

20 世纪初, 许多科学家对原子结构曾提出过各种假设模型。

1903 年汤姆逊提出: 原子中的正电荷以均匀的体密度分布在一个大小等于整个原子的球体内, 而带负电的电子则一粒粒地在球内不同位置上分布着。这些电子能在它们的平衡位置上作简谐振动。这种原子模型称为汤姆逊原子模型,

其示意图如图 1.1 所示。

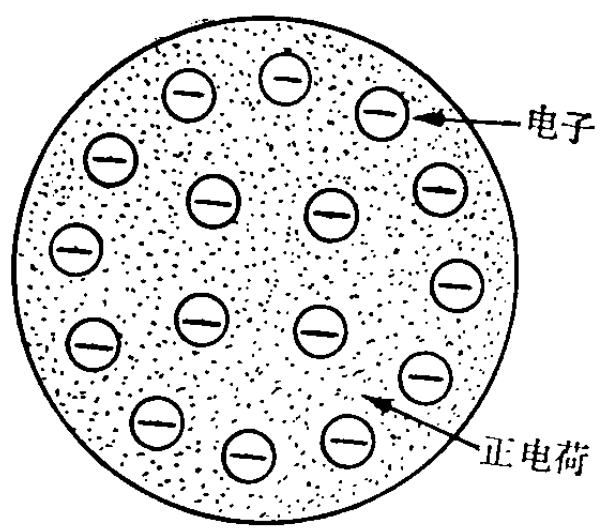


图 1.1 汤姆逊原子模型

这个模型由于同一些实验结果，例如卢瑟福 (E. Rutherford) 做的 α 粒子在金属箔上的散射实验结果相矛盾，所以很快就被放弃了。

1911 年卢瑟福根据实验结果提出了原子的核式模型。

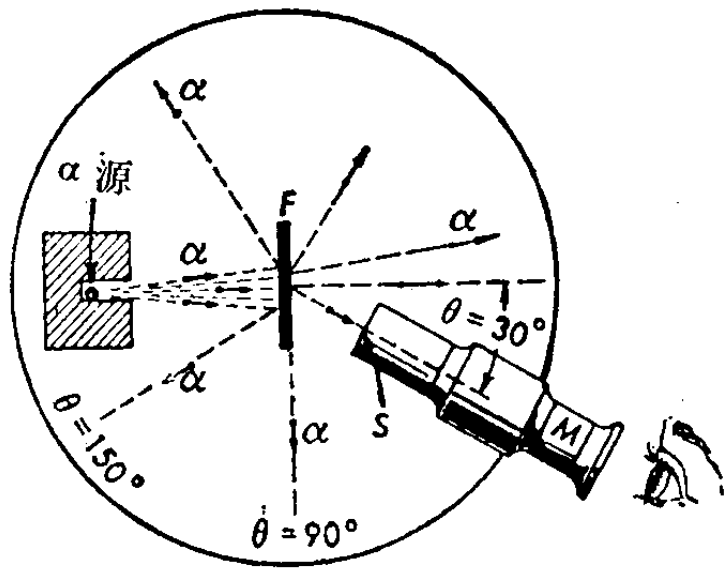


图1.2 卢瑟福散射实验

α 粒子是从某些放射性核素中发射出来的高速带电粒子，它的质量比电子的质量大 7300 多倍，它带两个单位的正电荷。卢瑟福用 α 粒子去轰击金属箔时，穿过金属箔的 α 粒子由于受金属原子内正电荷的作用而偏离了原来的运动方向，即发生了散射。卢瑟福散射实验如图 1.2。

α 源为发射 α 粒子的放射源，发射出来的 α 粒子经一细的孔道后，近似成一平行束，然后打在金属箔 F 上。S 为用硫化锌制成的荧光屏， α 粒子打在上面时它可以发生闪光，用闪光显微镜 M 观察闪光，M 及 S 可以在圆弧上移动，从而实现向各个方向散射的 α 粒子的观察。

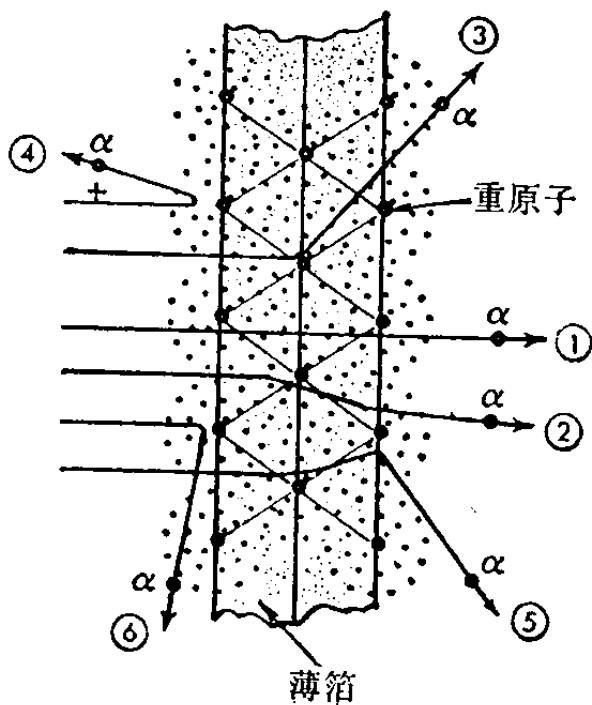


图1.3 α 粒子在金属箔上被原子核散射示意图

- ①— α 粒子通过金属箔时未发生偏转或小角度偏转（大多数 α 粒子偏转情况如此）；
- ②, ③, ⑤, ⑥— α 粒子比较接近原子核时，受到不同程度的偏转；
- ④— α 粒子几乎与金属箔中原子核发生对头碰撞时被反向散射回来。

卢瑟福发现：大多数 α 粒子经过金属箔 F 后散射角 θ 不大，平均为 $2^\circ - 3^\circ$ 。但有少数 α 粒子的散射角 $\theta > 90^\circ$ ，个别 α 粒子的散射角甚至接近 180° ，即 α 粒子从相反方向被弹回来。由于 α 粒子质量比电子的大 7300 多倍，它与金属原子中电子碰撞时不可能产生大角度偏转；而在汤姆逊原子模型中，正电荷均匀地分布在原子中，当 α 粒子通过原子时，与 α 粒子作用的有效电荷很少，所以也不可能使 α 粒子产生大角散射。因此，从 α 粒子散射实验得出的结论是：原子内的正电荷应当集中在一起，构成一个核心即原子核。当 α 粒子射向这种几乎是点电荷的原子核时，才有可能产生大角散射，这种散射过程如图 1.3 所示。

根据这一实验结果，卢瑟福提出了原子的核式模型。他在核式模型中提出：原子中央是带正电的原子核，电子在核外围绕核运动。由于电子质量很小 ($m_e = 9.10953 \times 10^{-31} \text{ kg}$)，所以原子的质量基本上集中于原子核。1913 年盖革 (H. Geiger) 和马斯顿 (E. Marsden) 进一步指出，某元素原子核的正电荷数等于门捷列夫周期表中该元素的原子序数。

2. 玻尔假设与原子能级

卢瑟福所提出的原子的核式模型，虽然肯定了核的存在，对原子物理学的发展起了重大作用，但这个模型仍然是粗糙的，没有说明原子核外边的电子情况，而且与经典电动力学理论相矛盾。按照经典电动力学理论，围绕原子核运动的电子必定要有加速度，因此它应自动地、不断地放出辐射，从而能量逐渐减少，电子逐渐接近原子核，最后落在核上，这样导致原子是一个不稳定系统。另一方面，电子发射出来的辐射，其频率应等于电子围绕核运动的频率，由于电子能量

逐渐减少，因而辐射的频率也将逐渐地改变，故原子发射的光谱应当是连续光谱。以上这两个结论都与实验事实不符。事实上原子是一个稳定体系，它发射的光谱是线状光谱已为许多实验所证实。这说明由研究宏观现象所建立起来的经典理论，不能完全应用于微观领域。1913年玻尔(N. Bohr)基于原子的核式模型并结合原子光谱的经验规律和普朗克(M. Planck)的量子概念，提出了关于原子结构的新假设。玻尔假设：

原子只能较长久地停留在一些不连续的稳定状态，与这些稳定状态相应的能量分别为 E_1 、 E_2 、 E_3 ……。处于这些稳定状态的电子虽然有加速度，但不会放出辐射。一切原子能量的改变，都是由于吸收或放出辐射或者由于碰撞的结果，使原子从一个稳定状态跃迁到另一个稳定状态，而不能任意连续地跃迁。

原子从能量为 E_n 的稳定状态跃迁到能量为 E_m 的稳定状态时，它放出（或吸收）单色的辐射，其辐射频率为 $\nu_{n,m}$ ， $\nu_{n,m}$ 由下列关系式决定：

$$h\nu_{n,m} = E_n - E_m \quad (1.1)$$

式中， h —普朗克常数。

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} (\text{焦} \cdot \text{秒})$$

(1.1) 式又称为玻尔频率条件。

根据玻尔理论，原子的能量具有一系列不连续的值，原子只能处于这一系列间断的能量状态中。原子能量的这些不连续值称为原子的能级。图 1.4 绘出了氢原子的能级图。

图中每一条横线代表一个能级，横线间的距离表示能级的间隔，亦即能量差别。每个能级与电子一定运动轨道相对

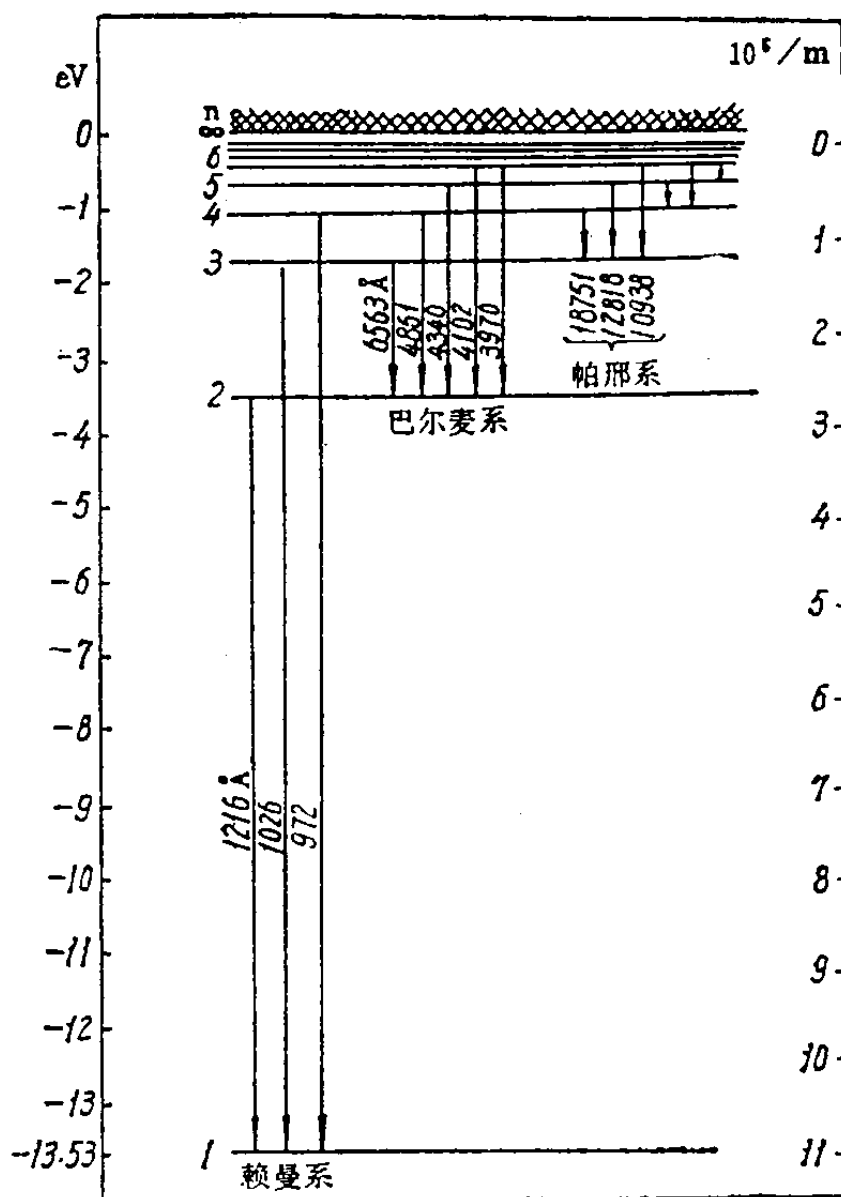


图1.4 氢原子能级

应，这种对应关系以量子数 n 表示。从图 1.4 中我们可以看到 E_1 所处的位置最低，它对应于 $n=1$ ，这种能态称为氢原子的基态。原子若受到外界作用，如适当频率的光照射，它因吸收光子而使电子从某一轨道跳到另一轨道，这时则说原子发生了跃迁。比基态高的能态，它们的量子数 $n=2, 3, \dots$ 这些能态统称为激发态。图 1.4 中用连接两个能级的箭头表

示两个能级间发生跃迁时所吸收或发射的谱线。处于高能态的原子通过一系列跃迁，到达较低的能态，最后回到基态。如果观察大量氢原子所发生的各种可能跃迁，就可得到图1.4中的氢原子能级或氢原子光谱。处于基态和激发态的电子都还没有脱离原子核的束缚作用，所以都是束缚态的。直到原子能量 $E \geq 0$ 时，电子才脱离了原子，这种状态称为氢原子的电离态。

玻尔假设以直接的实验为基础，它在解释氢原子光谱上获得了很大的成功，是原子结构和原子光谱理论的一个重大进展。但它并不是完善的，用它解释氢原子还可以，而用它来解释较复杂的原子如氦，就符合得不那么好，这说明玻尔理论仍然是粗略的近似理论。

现代原子理论是由海森堡 (W. Heisenberg) 和薛定谔 (E. Schrödinger) 等人，根据微观粒子（如电子、原子等）不仅具有粒子性同时还具有波动性的实验事实，于1925年提出了量子力学理论。用量子力学理论处理原子物理问题时所得到的结论与实验事实符合得很好，因此它是现代微观体系的基本理论。

1.2 原子核的结构

1. 原子核的组成

原子是电中性的。如果每个原子有 Z 个电子，每个电子电荷 $e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$ ，则原子所带负电荷为 Ze ，而原子核带有正电荷为 Ze 。许多实验发现，氢原子核在各种原子核内是作为正电荷的单元粒子的，因此它被称为质子，用

符号 p 表示。质子的静止质量 $m_p = 1.67261 \times 10^{-27} \text{kg}$ ，为电子质量的 1840 多倍。1932 年詹姆斯·恰德维克 (James. Chadwick) 发现了中子。不久，海森堡提出了原子核是由质子和中子组成的理论。由于这一理论能解释很多实验现象，所以很快被人们所接受。根据这一理论，原子核是由 Z 个带正电荷的质子和 N 个不带电的中子所组成，即

$$A = Z + N \quad (1.2)$$

式中， A 称为质量数，它是一个没有量纲的数，其数值等于原子核内质子数与中子数之和。质子和中子统称为核子。核中质子数 Z 即为该元素的原子序数。

核素*这一术语在核辐射防护中经常用到，它是指核内具有确定数目的质子和中子并具有同一能态的一类原子。如 $Z=1$ ， $N=0$ 所相应核素为氢原子；铯-134 与铯-134 m 虽然它们的核内质子数与中子数分别相同，但它们所处的能态不同，故属两种不同核素。核素根据其质量数和原子序数及所处能态差异还可分为：

(1) 同位素

系指那些具有相同的原子序数 Z ，但质量数 A 不同的核素。如铀-238、铀-235 与铀-234 等均为铀元素的同位素。

(2) 同质异能素

系指那些具有相同的质量数 A 和原子序数 Z ，但处在不同能态的核素。

* 关于核素的定义目前尚有不同看法：一种看法是核素仅指具有确定质子数和中子数的核所对应的原子，即不把核的能态包括进去。另一种看法是，应把核的能态包括进去，即用质子数、中子数以及核的能态（当处在该能态上的平均寿命长到可以观测时，例如大于 10^{-10}s 时）来表征的一类原子称为核素。本书中的核素定义是根据国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 第33号报告编写的。

同能态的核素称为同质异能素。如铯-124、铯-124 m_1 与铯-124 m_2 。

(3) 同质异位素

系指那些具有相同的质量数 A 而原子序数 Z 不同的核素称为同质异位素。如锶-90和钇-90。

核素用符号 ${}_Z^AX$ 表示。其中 X 代表元素符号，在其左上角标明核质量数 A ，左下角标明核电荷数 Z （有时可省略）。核素如系同质异能素，还应在其质量数后标上 m 或 m_1 、 m_2 ……等。例如 ${}_{29}^{68}\text{Cu}$ 即表示质量数为68、原子序数为29的核素铜-68，而 ${}_{29}^{68m}\text{Cu}$ 则表示它是 ${}_{29}^{68}\text{Cu}$ 的同质异能素。

2. 原子核的质量

前面已经谈到：原子质量绝大部分集中于原子核。

原子核的质量用原子质量单位来表示。原子质量单位等于一个碳-12核素原子质量的十二分之一，记为 u 。

$$1u = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{kg}$$

质子、中子、氢、氘、碳-12以及氧-16的原子质量分别为：

$$m_p = 1.00727644u$$

$$m_n = 1.00866522u$$

$$M({}_1^1\text{H}) = 1.00782522u$$

$$M({}_1^2\text{D}) = 2.01410222u$$

$$M({}_6^{12}\text{C}) = 12.00000000u$$

$$M({}_8^{16}\text{O}) = 15.99491502u$$

原子核的质量是原子核的一个重要特征。原子的质量等于原子核的质量加核外电子的质量，再减去相当于电子全部结合能的质量值。所以对原子核质量做某些计算时，通常用中性原子质量来求原子核质量。

3. 原子核的大小与密度

原子核内的核子紧密地结合在一起，这在某种程度上原子核同由水分子组成的“液滴”一样，可把原子核近似地看成是球形，核的半径 R 按下式求得

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (1.3)$$

式中 r_0 为一常数，较精密的测定值为 $1.20 \times 10^{-15} \text{m}$ ，由此可以计算得到核的半径大约为原子半径的万分之一到十万分之一。由原子核的大小还可以估算出原子核的密度。如果原子

核的质量以 M 来表示，体积以 V 表示，则 $V = \frac{4}{3} \pi R^3$ ，原子

核密度按下式求得

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A} = \frac{3}{4 \pi r_0^3} \frac{A}{M} \quad (1.4)$$

可以证明，上式中的 $\frac{A}{M}$ 等于阿伏伽德罗常数 N_A 。将 r_0 及 N_A 值代入可粗略得到原子核的密度

$$\rho \approx 10^{17} \text{kg/m}^3$$

可见原子核的密度很大，说明原子核内的核子结合得非常紧密。

4. 质量能量联系定律

在研究电子运动中，人们发现电子的质量随电子运动的速度增高而增加。狭义相对论指出：如果物体静止时的质量 m_0 （静止质量），那么当物体运动速度为 v 时，它的质量增大到 m ， m 与 m_0 有如下关系式：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1.5)$$

式中， c —光在真空中的速度。 $c=299792458\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

由于物体速度增加，质量增大，因而它的能量也增大。狭义相对论还指出：任何物体，其质量 m 和能量 E 的关系，根据爱因斯坦（A.Einstein）质能关系公式

$$E=mc^2 \quad (1.6)$$

同样，静止质量为 m_0 的物体，则其静止能量为 m_0c^2 。根据能量守恒定律，我们可以有：

$$m_0c^2 + E_k = mc^2 \quad (1.7)$$

式中， E_k —物体动能。利用（1.5）式可得：

$$E_k = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0c^2 \quad (1.8)$$

或

$$E_k = m_0c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right] \quad (1.9)$$

在核辐射物理中，射线能量通常用eV和MeV来表示。

一个电子在真空中通过1伏特电位差所获得的动能，记为1eV。

$$1\text{eV} = 1.6021892 \times 10^{-19}\text{J}$$

$$1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$$

此外有时还用到keV和GeV， $1\text{keV} = 10^3\text{eV}$ ， $1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$ 。

根据（1.6）式计算得到：与一个原子质量单位相应的能量为931.5016MeV。

电子静止能量经过计算为

$$m_0c^2 = 0.5110034\text{MeV}$$

如果物体质量改变了 ΔM ，那么它的能量也必然产生相

应变化 ΔE

$$\Delta E = \Delta M c^2 \quad (1.10)$$

5. 原子核的结合能

大量实验结果表明：原子核的质量并不等于组成它的各个核子质量之和，而比它小。例如，氦-4核由两个质子和两个中子组成。

氦-4 原子质量 $M({}_2^4\text{He}) = 4.002603\text{u}$

两个氢原子与两个中子质量和为

$$2M({}_1^1\text{H}) + 2m_n = 4.032980\text{u}$$

它与氦-4原子质量差为

$$\begin{aligned} \Delta M &= 2M({}_1^1\text{H}) + 2m_n - M({}_2^4\text{He}) \\ &= 0.030377\text{u} \end{aligned}$$

上面计算中，我们引用的是氢原子质量 $M({}_1^1\text{H})$ 与氦原子质量 $M({}_2^4\text{He})$ ，由于参加运算的电子数目相同，电子质量被消掉，故可以认为所求 ΔM 即为组成氦核的两个质子与两个中子的质量和氦-4原子核的质量差。不仅氦核如此，而且所有核素的原子核质量均比组成它的各核子质量总和小一些。组成原子核的各核子质量之和与原子核的质量之间的差值，称为质量亏损。

根据质能联系定律，当分散的核子结合成一个原子核时，将放出能量

$$E_B = [ZM({}_1^1\text{H}) + Nm_n - M(Z, N)]c^2 \quad (1.11)$$

式中， $M(Z, N)$ —原子质量； E_B —原子核的结合能。

组成原子核的各核子，当它们之间距离接近 10^{-14}m 时，无论中子与中子，质子与质子之间还是中子和质子之间，都存在一种强大的吸引力，这种力称为核力。核力远大于质子