

能源物理

马红孺

上海交通大学机械与动力学院, 上海, 200030

目录

第一章 能量	2
1.1 机械能	2
1.2 电能	3
1.3 化石能源：煤与石油	4
1.4 水力发电：水能	4
1.5 太阳能，风能	4
1.6 核能	4
1.7 生物能，食品	4
1.8 能量的单位	4
第二章 能源	6
2.1 常见能源所包含的能量	6
2.2 化石能源	9
2.2.1 危机	10
2.2.2 排放与气候	10
2.3 水能	12
2.4 核能：裂变能	13
2.5 核能：聚变能	14
2.6 太阳能	15
2.7 风能	17
第三章 核能：原理，安全性	18
3.1 近代物理简介	18
3.2 核物理基础	19
3.2.1 原子	19
3.2.2 原子核的半径	20
3.3 反应堆原理	22
3.4 辐射与癌症	22
3.5 聚变：ITER 简介	22

第一章 能量

“能源”也许是媒体上出现的最多的词之一。“能源危机”，“气候变暖”，“辐射”也是近年来热烈讨论（争论）的话题。作为普通公民，我们如何看待这些问题？我们的观点是什么？当我们赞成或反对一种观点的时候，依据是什么？为了回答这些问题，我们需要对于能源及其相关的物理有所了解。首先，从能量说起。

什么是能量？教课书的定义是：能量是做功的本领。或者，换一种说法：能量是任何最终可以转化为热的东西。

这个定义对于理解能量并没有多少帮助，因为在这个定义中用到了功，或热量的概念。为了理解能量的概念，我们先抛开抽象的定义，从一些具体的现象入手讨论。

1.1 机械能

最简单的能量形式是机械能，机械能是动能和势能的总称。

动能 运动的物体具有能量，这个能量称为动能，在数量上等于物体的质量乘以其速度平方的一半，以后，用 E_k 表示动能

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

在国际单位制中，质量的单位是千克 (kg)，速度的单位是每秒米 (m/s)，于是，动能的单位为（我们用 $[A]$ 表示物理量 A 的量纲（单位））：

$$[E_k] = kg \frac{m^2}{s^2}$$

这个单位有一个名字，叫做焦耳 (Joule，简记为 J)，以纪念焦耳。一个质量为 $1kg$ 的物体，如果按照每秒一米的速度运动，具有 $0.5J$ 的动能。

詹姆斯·普雷斯科特·焦耳 (James Prescott Joule; 1818 年 12 月 24 日—1889 年 10 月 11 日)，英国物理学家，出生于曼彻斯特近郊的沙弗特 (Salford)。焦耳没有上过学校，十五岁以前在家自学。因为家业的关系，他自小对酿酒很有兴趣，更在家自学化学及物理学。他在 16 岁时跟着英国物理兼化学学家约翰·道尔顿学习。完成学业后，开始经营自家酿酒厂，他希望以电动机代替蒸汽机。他的第一件研究便是寻求了改进电动机效率，这使他注意到热量产生的问题。他的第一篇重要的论文于 1840 年被送到英国皇家学会，当中指出电导体所发出的热量与电流强度、导体电阻和通电时间的关系，此即焦耳定律。1847 年焦耳与英国著名物理学家凯尔文勋爵 (Lord Kelvin 即 William Thomson) 合作进行能量守恒等问题的研究。1849 年焦耳提出能量守恒与转化定律：能量既不会凭空消失，也不会凭空产生，它只能从一种形式转化成另一种形式，或者从一个物体转移到另一个物体，而能的总量保持不变，奠定了热力学第一定律（能量不灭原理）之基础。1850 年焦耳当选为英国皇家学会院士。1866 年由于他在热学、热力学和电方面的贡献，

皇家学会授予他最高荣誉的科普利奖章 (Copley Medal)。后人为了纪念他, 把能量或功的单位命名为「焦耳」, 简称「焦」; 并用焦耳姓氏的第一个字母「J」来标记热量。

重力势能 物体从高处落下时, 由于重力的作用, 其速度会越来越快, 从而具有的动能也就越来越多。如果一个物体从高度为 h 处落下, 在下落过程中重力做的功等于 mgh , 其中 m 为物体的质量, $g \approx 10\text{m/s}^2$ 是重力加速度, 如果忽略空气阻力, 则这些功全部变成了物体的动能。我们注意到, 位于高度为 h 处的物体具有做功 mgh 的潜力, 所以, 把 mgh 称为重力势能 (势能), 记为 E_p

$$E_p = mgh$$

一个 1kg 的物体, 位于 $0.1\text{m} = 10\text{cm}$ 高度, 所具有的势能为 1J 。

弹性势能 压缩或拉升的弹簧可以对外做功, 这种可以对外做功的能力是弹簧的弹性势能。在弹性限度内, 弹簧的弹性力与相对于平衡位置的伸长成正比, 弹性势能与伸长量的平方成正比

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2$$

式中 x 为伸长量, k 为弹性系数, 是一个反映弹簧特性的参数。

还有其他形式的势能。

如果忽略掉摩擦力, 力学系统的动能和势能可以相互转换, 且其和不变。例如, 考虑一个小球从一个光滑的碗边上从静止开始放手, 若碗的高度为 h , 则小球的势能是 mgh , 小球滚到碗底时速度最大, 有最大的动能 $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$, 然后再爬上碗边, 到达碗边时速度降低到零, 动能为零。在运动的每一时刻, 动能和势能的和不变, 且等于 mgh 。也就是说, 小球的动能和势能在运动中不断相互转化, 但其总量不变。这个结果称为机械能守恒定律。也就是说, 如果定义机械能为动能和势能之和, 那么, 在运动过程中, 系统的机械能不变。

1.2 电能

电能是最常见, 最有用的能量之一。根据麦克斯韦电磁理论, 电场和磁场均具有能量, 电场的能量密度 (单位体积的能量) 与电场强度的平方成正比, 磁场的能量密度与磁感应强度的平方成正比, 在有电场和磁场存在的情况下, 电磁场的能量密度为

$$\rho_E = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{\mu_0} \vec{B}^2 \right)$$

式中 \vec{E} 和 \vec{B} 分别为电场强度和磁感应强度, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\text{F/m}$ 为真空的介电常数, 单位是法拉/米 (F/m); $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ 为真空磁导率, 单位是亨利/米 (H/m)。真空中的光速由与这两个参数之间的关系是:

$$c^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$$

电磁场的能量可以流动, 其能流密度由坡印亭矢量给出, 用 \vec{S} 表示

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

式中 \vec{H} 是磁场强度。

作为能源的电能通常有两类, 一类是储存在电网中的交流电动势, 另一类是用化学方法储存的直流电动势, 即电池。

1.3 化石能源：煤与石油

1.4 水力发电：水能

1.5 太阳能，风能

1.6 核能

1.7 生物能，食品

1.8 能量的单位

在国际单位制 (Système International d'Unités, SI) 里，能量的单位是**焦耳 (Joule)**，1 焦耳的能量为 1 牛顿的力的作用下，物体移动 1 米是该力所做的功。以焦耳的能量可以把地面上 1 千克的物体升高 10 厘米 (0.1 米)，可以使大约 0.24 克水的温度升高 1 度。显然，焦耳是一个很小的单位，为了方便各个不同领域的使用，便出现了很多不同的能量单位，对于非专业人员，这些单位很难把握。这一节我们将介绍若干常用的能量单位。

在日常生活中，常常用到的能量单位是千瓦时，英文记为 kWh，注意 W 是大写的。这是 1 千瓦 (kW) 功率的任何设备在一小时消耗的能量。家用电表上标出的，就是以千瓦时 (俗称为‘度’) 为单位所消耗的能量。例如，功率为 4W 的节能灯，每小时消耗 $4 \times 10^{-3} \times 1 = 4 \times 10^{-3} kWh$ 的能量。而一台 1kW 的电磁炉，每小时消耗的能量是 1kWh，为节能灯的 250 倍。所以，随手关灯未必是节能的好习惯，因为节能灯的反复开关会降低其使用寿命，晚上，把一个可能经常进出的房间的灯关掉，人的感觉也不好。另一方面，少涮几次火锅，对于节能则是非常明显的。1kWh 能量等于 $1000 \times 3600 = 3.6 \times 10^6$ 焦耳，在物理学和其它科学中，为了方便表示，通常用一些词头加在单位上，以表示很大或很小的量，常用的词头有

皮 (p) 10^{-12}

纳 (n) 10^{-9}

微 (μ) 10^{-6}

毫 (m) 10^{-3}

千 (k) 10^3

兆 (M) 10^6

吉 (G) 10^9

艾 (E) 10^{18}

利用上述表示，我们看到：

$$1kWh = 3.6MJ$$

kWh 是大家比较熟悉的能量单位，电表上的能量单位就是 kWh，俗称为“度”。

另一个日常生活中常用的单位是“千卡”，或称为大卡 (与卡区别)*。卡定义为 1g 水的温度升高 1 度所需要的能量，在不同的温度，这个值略有不同，基本上是 $1cal = 4.18J$ 。

*千卡和大卡有一点细微的差别，为了清楚起见，我们不再仔细区分)

1000 卡等于 1 千卡。所以 $1kcal = 4.18kJ$ 。日常生活中，有时也把“千卡”讲成卡，请根据数量级进行判别。一般，一个馒头提供的能量大致为 200 千卡，人所需要的能量大致为 $1kcal/hr/kg$ ，一个 $70kg$ 的人，每天需要的能量大约为

$$70kg \times 1 \frac{kcal}{hr \cdot kg} \times 24hr = 1680kcal = 7MJ$$

我们注意到，食物在一个人的能量消耗中只占很少的部分。

在计算一个国家，或者全球的能量消耗时，各个国家所用的单位也不同。我国通常用吨标准煤作为单位。1g 煤燃烧大约放出 $7kcal$ 的能量，所以，规定 1g 标准煤为 $7kCal = 29.3kJ$ ，于是，1kg 标准煤的能量是 $29.3MJ$ ，而 1 吨标准煤等能量为 $29.3GJ = 2.93 \times 10^{10}J$ 。中国 2011 年消耗的能量为 34.8 亿吨标准煤，折合成焦耳，

$$34.8 \times 10^8 \times 2.93 \times 10^{10} = 102 \times 10^{18}J = 102EJ$$

中国的人口大约为 15 亿，平均每人每年消耗能量

$$\frac{1.02 \times 10^{20}J}{1.5 \times 10^9} = 6.8 \times 10^{10}J = 68GJ = 2.3\text{吨标准煤} = 19000kWh$$

平均每人每天消耗能量

$$\frac{19000kWh}{365} = 52kWh = 186MJ = 6.3kg\text{标准煤}$$

中国的能量消耗大约占全球的 15%，由此推算，2011 年中国的能量消耗大约是 $650EJ$ ，或大约 230 亿吨标准煤。

另一个常用的单位是 toe，称为吨油当量或吨标准油，其能量值为 $42.62GJ$ ，大致是 1 吨原油具有的能量。一个吨油当量等于 1.45 吨标准煤。例如，中国 2011 年消耗的能量为 34.8 亿吨标准煤，等于 $34.8/1.45 = 24$ 亿吨油当量。

第二章 能源

目前，全球的能源中大部分是化石能源，石油和煤。但是，化石能源是非常有限的，也许在未来几十年就会枯竭。这一章我们将讨论各种可能的能源，这些能源的优缺点以及其可持续性问题。

2.1 常见能源所包含的能量

各种常见能源的能量值如下表所示

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数
原煤	20900 千焦/千克	0.7143 千克标准煤/千克
洗精煤	26334 千焦/千克	0.9000 千克标准煤/千克
其它洗煤		0.2000-0.7000 千克标准煤/千克
洗中煤	8360 千焦/千克	0.2857 千克标准煤/千克
煤泥	8360-12540 千焦/千克	0.2857-0.4286 千克标准煤/千克
煤制品		0.5000-0.7000 千克标准煤/千克
型煤		0.5000-0.7000 千克标准煤/千克
水煤浆		0.7140 千克标准煤/千克
煤粉		0.7143 千克标准煤/千克
焦炭	28424 千焦/千克	0.9714 千克标准煤/千克
其他焦化产品		1.1000-1.5000 千克标准煤/千克
原油	41800 千焦/千克	1.4286 千克标准煤/千克
燃料油	41800 千焦/千克	1.4286 千克标准煤/千克
汽油	43054 千焦/千克	1.4714 千克标准煤/千克
煤油	43054 千焦/千克	1.4714 千克标准煤/千克
柴油	42636 千焦/千克	1.4571 千克标准煤/千克
液化石油气	50160 千焦/千克	1.7143 千克标准煤/千克
炼厂干气	45980 千焦/千克	1.5714 千克标准煤/千克
其他石油制品	1.0000-1.4000 千克标准煤/千克	
天然气	32186-38915.8 千焦/立方米	1.10000-1.33000 千克标准煤/立方米
液化天然气		1.7572 千克标准煤/立方米
焦炉煤气	16720-17974 千焦/立方米	5.7140-6.1430 千克标准煤/立方米
高炉煤气		1.2860 千克标准煤/立方米
其它煤气		1.7000-12.1000 千克标准煤/立方米
发生煤气	5225 千焦/立方米	0.1786 千克标准煤/立方米
重油催化裂解煤气	19228 千焦/立方米	0.6571 千克标准煤/立方米
重油热裂解煤气	35530 千焦/立方米	1.2143 千克标准煤/立方米
焦炭制气	16302 千焦/立方米	0.5571 千克标准煤/立方米
压力气化煤气	15048 千焦/立方米	0.5143 千克标准煤/立方米
水煤气	10450 千焦/立方米	0.3571 千克标准煤/立方米
煤焦油	33440 千焦/千克	1.1429 千克标准煤/千克
粗苯	41800 千焦/千克	1.4286 千克标准煤/千克
热力(当量)	0.03412 千克标准煤/百万焦耳	
电力(当量)	3594.8 千焦/千瓦小时	0.1229 千克标准煤/千瓦小时
其他燃料	1.0000 千克标准煤/千瓦小时	
煤矸石	0.1786 千克标准煤/千瓦小时	
生物质能	1.0000 千克标准煤/千瓦小时	
工业废料	1.0000 千克标准煤/千瓦小时	
城市固体垃圾	1.0000 千克标准煤/千瓦小时	

这里列出来的，是目前常用的各种能源，基本上来源于化石能源。我们注意到，石油包含的能量大约是原煤的 2 倍，在化石能源中，石油显然比原煤的效率高。

为了有一个全面的数量概念，我们再比较一下若干不同物质的能量值。作为比较，我们把 TNT 炸药取做比较的标准。

每千克的能量值

物体	能量 (千焦耳)	与等量 TNT 比较
以声速飞行的物体 (340m/s)	58	0.021
电池 (汽车)	120	0.044
计算机电池	400	0.15
碱性电池	600	0.23
TNT(Trinitrotoluene, 三硝基甲苯)	2700	1
巧克力饼干	21000	7.8
煤	27000	10
黄油	29000	11
酒精	27000	10
汽油	42000	15
天然气 (methane, CH ₄ , 甲烷)	54000	20
氢	110000	40
铀-235(Uranium-235)	8.2×10^{10}	3×10^7

让我们仔细看一下这些数据，首先，我们发现电池的能量很低，同样重量的电池提供的能量只有汽油的 $\frac{1}{340}$ ，这意味着如果要提供相同的能量，电池的重量就应该是汽油的 340 倍。这也许是电动汽车发展受阻的一个物理原因之一。当然，电是一种非常优越的能量，当用于汽车时，其效率可以达到 85%，而汽油的效率大致是 20%，也就是说，只有 20% 的能量用于驱动汽车和保持汽车上各种功能的正常运行，而 80% 的能量则变成了热量，耗散掉了。考虑到效率因素，电动汽车与汽油车的单位能源的实际能量差为 $\frac{1}{80}$ 。普通轿车的油箱的容量大约是 50kg，如果改用电动汽车，相同的能量对应的电池的重量是 $80 \times 50 = 4000kg$ ，这是完全不现实的，而 $\frac{1}{10}$ 是一个比较合适的重量。这意味着，如果使用电动汽车，则需要以 10 倍的频度去更换电池，这自然是一个不太愉快的事情。对于日常的上下班，大约 10 天加一次油，如果改用电动汽车，则可能每天需要充电或换电池。

计算机电池的容量是汽车电池的近 4 倍，但其价格则大约是汽车电池的 100 倍，所以，在目前，使用计算机电池做为电动汽车的能源还是很不合算的。当然，在堵车非常严重的城市，由于电动汽车在停车时不需要耗费能量，而汽油发动机则处于空转状态，在刹车时，刹车的能量也可以以某种方式回收一部分为电池充电，因此，电动车的效率因子还可以进一步提高。电动汽车的合适推广的场所也应该是交通拥堵的大城市。混合动力汽车可能是更好的方向。

从表中我们发现，巧克力饼干的能量很高，是 TNT 的大约 8 倍。只要注意到人每天的工作，运动等所消耗的能量全部来自食物，就能够理解这个数字了。

我们注意到，汽油的能量非常高，是 TNT 的 15 倍。这与人们的直觉有点矛盾，直觉上，TNT 具有很多能量，有很强的威力。这里，其实是另外一个问题，即能量释放的时间。

或者，功率问题。TNT 可以自己通过化学反应释放能量，所以其包含的能量可以在极短的时间内放出，所以，可以有很大的功率，而汽油是通过燃烧放出能量的，燃烧必须要有氧气，因此，其能量释放的速度比较慢。

顺便指出，911 事件中，恐怖分子用飞机撞世贸大楼，其实是选定了最好的攻击性武器。事实上，飞机的撞击对于大楼的损害其实是很小的，除了被撞的一小部分外，不会对大楼造成损坏。但是，飞机上携带的大量汽油的燃烧，才是大楼倒塌的关键因素。其实，恐怖组织未必清楚这一点，他们的目的，或许只是通过撞击世贸大楼来造成轰动效应，但实际的结果大大出乎了他们的预料。我们可以估计飞机撞击大楼的能量和汽油的能量。一架飞机的质量大约是 200 吨，其速度大致 200m/s，于是，其动能为

$$10^5 \times 200^2 = 4 \times 10^9 J = 4GJ$$

另一方面，飞机起飞不久，油箱应该是满的，设为 20 吨汽油，根据前面的介绍，一顿汽油相当于 1.5 吨标准煤，于是，这些汽油燃烧后放出的能量为

$$20 \times 1.5 \times 30GJ = 900GJ$$

汽油燃烧的能量使得大楼内部的钢筋严重变软，失去对大楼的支撑，导致倒楼。

最后，我们发现，铀-235 提供的能量是汽油的 2 百万倍。这是一个非常大的变化，其意义在于，1kg 的铀-235 产生的能量就相当于二百万千克汽油产生的能量，或三百万千克煤产生的能量。而且，铀-235 在放出能量时，不产生任何温室气体的排放。

2.2 化石能源

化石能源是数百万年或千万年以前的动植物尸体经过长期的物理和化学作用形成的产物，主要有煤，石油和天然气等。

煤的成分主要是碳、氢、氧、氮、硫、磷等。世界上探明的煤储量大约是 10^{13} 吨，作为一个合理的估计，如果实际储量是探明储量的 5 倍，那么，世界上总的煤储量为 5×10^{12} 吨。目前每年的开采量大约 50 亿吨，即 5×10^9 吨，如果维持这个开采速度，那么，地球上已探明的煤还可以再开采 200 年，而估计的总储量还可以开采 1000 年。从这个意义上来说，煤是可持续的能源。

石油主要是碳氢化合物。由不同的碳氢化合物混合组成，组成石油的化学元素主要是碳（83% 87%）、氢（11% 14%），其余为硫（0.06% 0.8%）、氮（0.02% 1.7%）、氧（0.08% 1.82%）及微量金属元素（镍、钒、铁、锑等）。地球上探明的石油储量约为（wiki）1.3 万亿桶，即 1.3×10^{12} 桶，每桶大约 160 升，或 140kg，所以储量大约 1.8×10^{11} 吨（1800 亿吨）。目前的年开采量大约 300 亿桶，即 42 亿吨，由此可求得，维持目前的开采水平，探明的石油还能开采 40 年。如果假定地球上的总储量是探明储量的 5 倍，那么，石油还能够维持 200 年。与煤相比，石油的可持续性要差的多。

天然气主要成分是甲烷，是一种气态的化石燃料，主要存在于油田和天然气田。也有少量出于煤层。2005 年，全球已探明的天然气总储量为 179 万亿立方米。全球的天然气消费量约为 3 万亿立方米，探明的储量以目前的水平可以消费 60 年，如果总储量是探明储量的 5 倍，那么，天然气以目前水平可以消费 300 年。

2.2.1 危机

由前面的大致估计可以看到，煤可以说是一种可以持续的能源，它可以持续大致 1000 年的时间，从供应的角度讲，目前还不需要担心煤的危机。

如果以目前的水平消费，石油和天然气分别能持续 200 年和 300 年。在得到这个结论的时候，我已经把探明的储量放大了 5 倍，如果仅仅以探明的储量计算，则分别是 40 年和 60 年。石油的消耗量实际上是逐年增加的，这就意味着，也许在更短的时间内，石油就会用完。

在过去半个世纪，石油危机一直是热门话题，在各种不同的层面有很多讨论，但是，随着探明的石油储量的不断增加，这样一个老生长谈的问题并没有真实发生。尽管石油的价格在上涨，但目前看来，石油仍然是最方便，最便宜的能源。

天然气也许是取代石油作为汽车燃料的最直接的能源，随着可能到来的石油开采量达到峰值，天然气的消费量可能有较大增长，这也就意味着天然气的危机也许更早的到来。

除了存量的因素之外，另一个重要的因素是开采成本。随着时间的推移，不论是煤，石油还是天然气，开采的难度和成本都会上升，这也是另一种意义上的危机。

2.2.2 排放与气候

使用化石燃料带来的一个直接后果就是二氧化碳的排放。二氧化碳是最主要的温室气体之一，最近几十年，一个长期讨论的问题是二氧化碳的排放与气候变暖。关于这一问题，目前，并没有非常确切的答案。一种观点认为，如果维持目前的碳排放量，那么到 2050 年全球的平均温度将上升 2 度。气象学家预测，如果全球平均气温上升 2 度，将会导致一系列灾难性的后果，因此，这是必须要避免的。但另一方面，也有人认为全球气候并没有变暖，最近百年的气温上升是全球长期气候变化中的一个过程，与二氧化碳的排放没有关系。碳排放与气候之间的关系非常复杂，很难（如果不是无法的话）给出确切的结论。在这一节，我们试图给出一些确定的结论。

自工业革命以来，二氧化碳的排放显著增加，这是一个已经确定的事实。我们先看几个数据，自然界的二氧化碳排放主要来源是动植物的呼吸，海洋排放。每年陆地生物圈排放二氧化碳大约 4400 亿吨，海洋排放大约 3300 亿吨，而人类通过化石燃料排放大约 290 亿吨。从数字上来看，人类燃烧化石燃料排放的二氧化碳只占全球总排放量的很少一部分，但是，地球是一个自我循环的系统，每年，地球上植物的光合作用消耗二氧化碳大约也是 4500 亿吨，海洋吸收二氧化碳大约 3400 亿吨，因此，地球自身大致保持二氧化碳的平衡，而化石燃料的排放则附加在这个总量上面，使得大气中的二氧化碳明显增加。

图 2.1 是过去一千年来大气中二氧化碳的含量的测量结果，利用冰层中封闭的空隙中残存的空气，可以比较精确地测量出各个时期空气中二氧化碳的含量，从图中我们可以看到，在 1800 年之前，空气中的二氧化碳的含量基本上上是恒定的，大致是 280ppm, (ppm 是一个比例单位，即 part per millium, 百万分之一)。从 1800 年到现在的 200 年间，二氧化碳含量增加到了 400ppm, 增加了 120ppm, 即 40% 的增加量。与这个增加紧密联系的一件大事发生在 1769 年，这一年，瓦特改进了蒸汽机，蒸汽机的大规模应用，引发了第一次工业革命。一方面，蒸汽机的使用消耗大量的煤，另一方面，利用蒸汽机带动其它机械，使得煤的

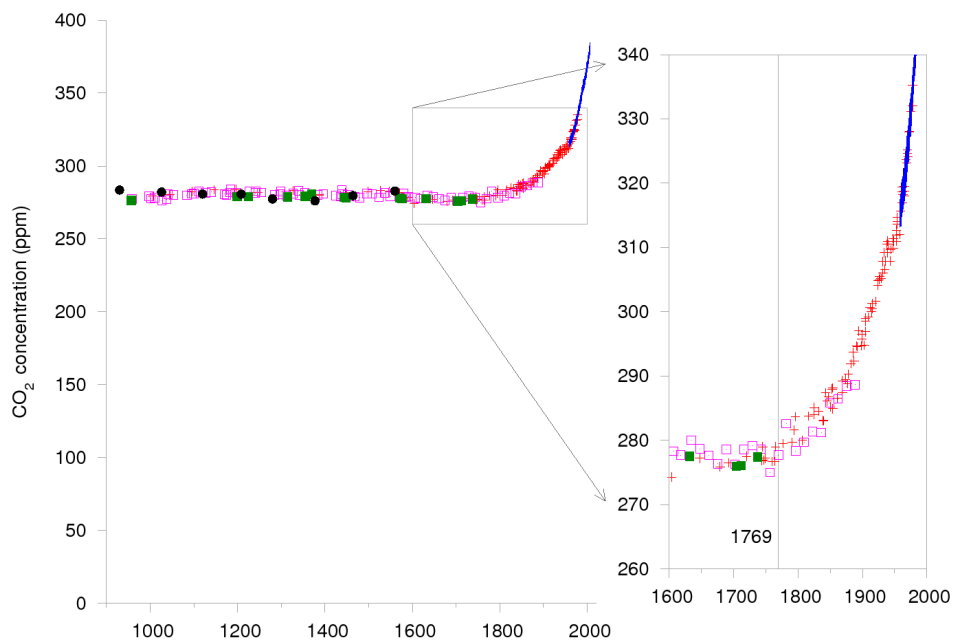


图 2.1: 大气中二氧化碳含量的变化, (From SE, Chap. 1)

开采更为容易。

尽管人工排放量相对与自然排放量只占很小的比例,但是,这一部分是附加在总的排放量中,无法平衡掉的部分,因此,随着时间的推移,这一部分附加的二氧化碳就会积累起来,明显增加大气中二氧化碳的含量。

大气中二氧化碳在过去二百年显著增加是一个事实。那么,这个增加是否影响了全球气候,导致了全球变暖?这是一个非常复杂的问题,我个人认为目前还无法做出这个结论。根据 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 政府间气候变化专门委员会)的研究,全球温度在过去 150 年上升了大约 0.7 度,见图 2.3。这里存在二个问题:首先,早期的温度测量点比较少,测量精度也不够高,由此得到的全球平均温度的误差是比较大的;其次,地球的温度长期以来就有变高和变低,且周期非常长,100 多年的数据也许仅仅是长期气候变化过程中的涨落,并不能得到气候变暖或变冷的结论。但是,从短期看,过去 150 年全球气候变暖的趋势还是比较明显的。

然而,这种变暖,即便能确定为事实,我们也不能确切地把它归结为温室气体的排放所导致。我们已经得到的结论是:第一,第一次工业革命以来,大气中二氧化碳的含量显著增加,这种增加,是由于化石燃料的大量使用所导致的结果;第二,过去 150 年来,地球表面的平均温度上升了大约 0.7 度,其原因可能是由于温室气体排放和在大气中的积累所致,但并不完全确定。

尽管我们不能完全确定全球正在变暖,也不能确定即使全球变暖,这个变暖是否与二氧化碳的排放直接相关。但有几点是确定的,化石燃料的大量使用导致了大气中二氧化碳的增加;如果全球的平均温度上升 2 度,可能导致灾难性的后果;化石燃料特别是石油,是不可持续的,也许只能再开采 50 年。

如果我们完全抛开上述理由不谈,把石油和煤仅仅作为能源烧掉也是非常可惜的,我们

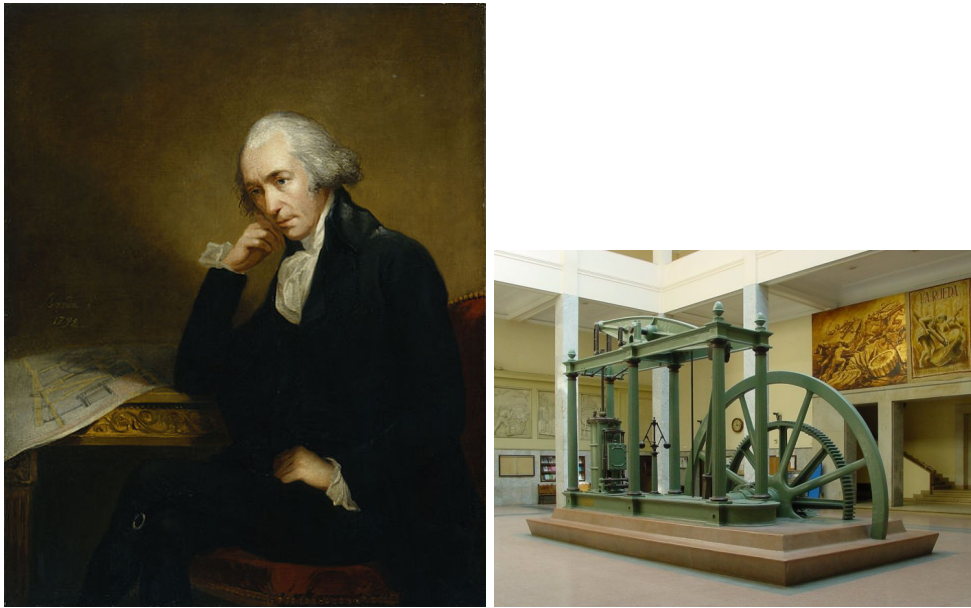


图 2.2: 瓦特和他的蒸汽机, (from Wiki)

已经知道可以从石油和煤中获取非常多, 非常有用的其它资源。由于这些理由, 发展可持续发展的, 无害的新能源是人类面临的十分紧迫的任务。

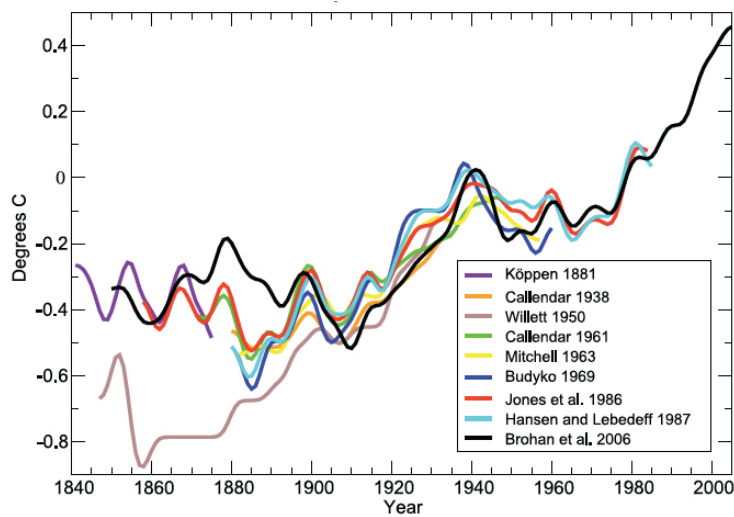


图 2.3: 1840 年以来气温的变化。(from IPCC Ar4, Fig. 1.3)

2.3 水能

水力能源没有有害的排放, 是一种绿色能源。当水从高处流向低处时, 其势能变小, 释放出的势能可以用以发电, 也可直接驱动机械做功。水力能取决于两个因素, 一个是落差, 一个是流量。中国有 960 万平方公里的土地, 如果平均海拔按照 1200 米计算, 每年的平均

降水量 600 毫米，所以，水力资源可以估计出为

$$9.6 \times 10^{12} m^2 \times 0.6m \times 10^3 kg/m^3 \times 1200m \times 10m/s^2 = 7 \times 10^{19} J = 70EJ$$

当然，并不是所有的水力资源都可以使用，例如，一部分水渗入地下，水在流动中由于摩擦而消耗能量，有一些水力无法开发等等，作为一个大约的估计，我们猜测水力资源的使用效率为 20%，也就是说，我国的可用水力资源大致是 $14EJ = 3.8 \times 10^{12} kWh = 3.8$ 万亿 kWh 。根据网上查询，我国可利用的水力资源装机容量大约为 1.92 万亿 kWh ，与我们的估计是相符的。按照正确的数据，可以求出人均可利用水力资源为

$$\frac{1.92 \times 10^{12} kWh}{1.5 \times 10^9 \times 365d} = 3.5 kWh/d$$

我国目前已经建成的水电站的装机容量大约 2.3 亿千瓦，年发电量约 7 千亿 kWh ，人均开发的水力资源 $1.3 kWh/d$ 。

我国水力资源的开发已经超过可开发量的三分之一以上，即便全部开发，也远远不能满足能源的需求，只能作为能源的一个比较小的部分。另外，水电开发对于环境以及社会的影响也是不能忽视的问题。

2.4 核能：裂变能

重原子核铀-235 等可以发生裂变，在裂变过程中放出能量。核反应过程的能量变化通常是每原子核兆电子伏的数量级，而燃烧过程是化学反应过程，其能量变化是电子伏的数量级。因此，单位质量核能源的能量是化石能源的百万倍。

自然界的铀有三种同位素，铀 234，铀 235 和铀 238，其中，主要的是铀 238，大约占 99.27%，其次是铀 235，占 0.72%。铀是第 92 号元素，包含 92 个质子，铀 238 包含 $238 - 92 = 146$ 个中子，铀 235 包含 143 个中子，铀 234 包含 142 个中子。铀 235 是自然界唯一可以发生裂变的原子核。铀 235 的衰变寿命很长，大约为 7 亿年。铀 235 可以吸收一个中子成为铀 236，并在月千万分之一秒裂变为两个轻原子核，并放出 2-3 个中子，在此过程中可以放出大约 200Mev 的能量。铀 235 的分裂大约有 40 多种，通常是一个稍重的核（140 左右）和一个稍轻的核（95 左右）。放出的中子可以继续触发裂变，如果放出的中子全部触发新的裂变，那么，裂变的核数目非常快的增加，并在很短的时间内放出大量的能量，这对应于原子弹爆炸的情形。如果平均只有一个中子触发进一步的裂变，那么，裂变过程将维持并持续放出能量。

核裂变的能量的 80% 以上碎片动能放出，由于碎片带电，与周围物质有很强的相互作用，在很短的飞行距离内将把动能传递给周围物质，成为热能。其余为中子的动能，碎片的衰变能量， γ 光子 γ 与物质也有很强的作用，其能量也将变为物质的热能，中子可以飞行较长的距离，部分将触发下一步的裂变，其余将最终通过与物质的相互作用而被原子核吸收。大约有 8% 的能量是裂变碎片的衰变能，最终也会以热能的形式转到物质内部，只有中微子会不受阻碍的飞出并带走一小部分能量。

核裂变放出的热能通过水的循环可以用来带动发电机发电。

为了能够维持裂变，铀 235 必须达到一定的浓度，这就需要对自然界的铀进行浓缩。我们暂时不考虑这些细节，先估算一下相关的能量，每摩尔铀的质量是 238g，其中铀 235 占 0.7%，每个铀 235 裂变放出的能量是 200MeV，于是，一摩尔铀放出的能量

$$6 \times 10^{23} \times \frac{0.7}{100} \times 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} = 1.3 \times 10^{11} J \approx 1.3 \times 10^5 MJ$$

每千克铀可放出大约 $5 \times 10^5 MJ$ ，即 50 万兆焦耳的能量。一个 1000 兆瓦的电厂，每年发电 8000 小时，可输出能量 $8 \times 10^6 MWh = 8 \times 10^9 kWh = 80$ 亿千瓦小时 $= 2.9 \times 10^{10} MJ$ ，需要消耗铀

$$\frac{2.9 \times 10^{10} MJ}{5 \times 10^5 MJ/kg} = 60000 kg = 60 \text{吨}$$

考虑到转换效率等因素，一个 1000 兆瓦的电厂一年大概需要 150 吨铀。如果考虑到核电站实际使用的是 3% 的浓缩铀，所以每年需要给核电站加铀燃料大约 40 吨就可以了。

核电站没有二氧化碳排放，所需燃料很少。与燃煤电厂比较，我们做一个简单的计算，一顿标准煤的能量是 29.3GJ，于是， $2.9 \times 10^{10} MJ$ 的能量对应于

$$\frac{2.9 \times 10^{10} MJ}{2.93 \times 10^4 MJ/t} = 10^6 t$$

即一百万吨标准煤，考虑到发电效率，实际煤与标准煤的能量比值等，实际使用的煤应该是上述值的 3-4 倍，分配到每一天，即除以 365 天，得到每天的烧煤量为 1 万吨。大约相当于 150 车皮的煤。而 1 万吨煤燃烧后，会排出大约 4 万吨的二氧化碳，以及其它如二氧化硫等有害气体。

相比之下，核能是清洁，高效的能源。但是，核能也有若干严重问题。

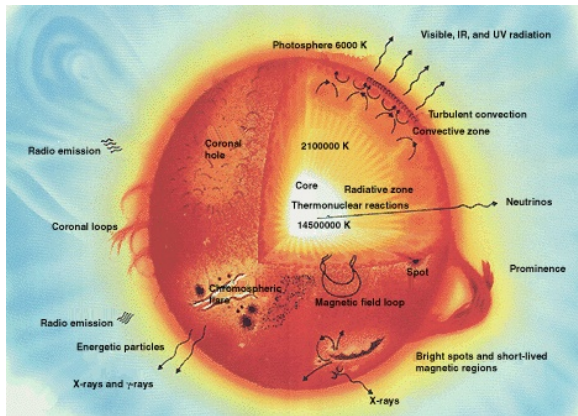
目前，全球探明的铀的储量大致为 500 万吨，全球的核电站有 400 多座，按照每座每年 150 吨计算，每年消耗 6 万吨铀，铀的总储量可以使用大约 80 年。

这里，我们仅就铀 235 进行了估计，实际上，经过合适的设计，把裂变时的中子都利用起来，则可以把不能裂变的铀 238 转变成可以裂变的材料，从而使铀的使用从 0.7% 增加到 30%-40%，提高 60 倍左右，那么，现有的铀资源的使用年限也可以增加这个倍数，或者，可以建造更多的核电站。

核电的另一个问题是安全问题，这其实是反核电的人反核电的唯一理由，毕竟，在全球运行的 400 多座核电站中，发生过三次严重的核事故，事故率接近 1%。发生在美国的三里岛事故，虽然没有造成严重后果，但导致了严重的核恐慌；发生在苏联切尔诺贝利核电站的事故，导致了严重的后果；而发生在福岛的核事故，尽管后果不算严重，但传达了一个信息，那就是核电似乎并不是安全的，因为千年一遇的灾难并非要等千年才碰的上。关于核安全的问题，我们在后面将详细讨论。

2.5 核能：聚变能

原子核由中子和质子构成，轻核中，氦核具有最大的结合能，由氘，锂原子核反应生成氦原子核时，可以放出大量的能量。聚变所需要的原料基本上是有限的，如果实现了受控核聚变，那么能源的问题将一劳永逸的获得解决。但是，核聚变的条件非常苛刻，由于原子核



带电，当两个核非常靠近时，其静电斥力将非常的大，为了克服这个非常大的斥力，实现聚变，核子应该具有非常高的动能，这个动能基本上只能来源于热能，也就是说需要非常高的温度才能实现聚变，而这个高温下，任何材料都将气化，因此，没有任何材料可以把聚变的核装起来。考虑到高温的物质是以等离子体的方式存在，因此，可以用磁场来约束聚变反应。基于这种思路的受控核聚变研究是过去几十年来一直在进行的研究课题，目前一个国际合作的项目，ITER 项目正在进行，我们期望在未来的 50 年或更长一段时间，或许可以解决这个问题。

2.6 太阳能

太阳是位于太阳系中心的恒星，是一个巨大的高温天体。其直径大约是 1,392,000 公里，相当于地球直径的 109 倍；质量大约是 2×10^{30} 千克（地球的 330,000 倍），约占太阳系总质量的 99.86%。太阳质量的大约四分之三是氢，剩下的几乎都是氦，包括氧、碳、氦、铁和其他的重元素质量少于 2%。其表面温度大约 5500°C ，太阳的内部温度可以高达

太阳的核心是指距离太阳的中心不超过太阳半径的五分之一或四分之一的区域，核心内部的物质密度高达 150 克/立方厘米，大约是水密度的 150 倍，温度接近 1,360 万 K。太阳形成后的大部分的时间里，核聚变的能量是经过一系列被称为质子-质子链反应的过程产生的；这个过程将氢变成氦。核心是太阳内唯一能经由核聚变产生大量热能的区域，99% 的能量产生在太阳半径的 24% 以内，而在 30% 半径处，聚变反应几乎完全停止。太阳的外层只是被从核心传出的能量加热。在核心经由核聚变产生的能量首先需穿过由内到外接连的多层区域，才能到达光球层，然后化为光波或粒子的动能，散逸到外层的宇宙空间去。太阳核心每秒大约进行着 9.2×10^{37} 次质子-质子链反应。这个反应是将 4 个自由的质子（氢原子核）融合成氦原子核（ α 粒子），每秒大约有 3.7×10^{38} 个质子成为 α 粒子（太阳拥有的自由质子大约有 8.9×10^{56} 个），相当于大约每秒 6.2×10^{11} 千克。每次氢原子核聚合成氦时，大约会有 0.7% 的质量转化成能量。因此，太阳的质能转换速率为每秒钟 426 万吨，释放出 384.6 兆瓦特（ $3.846 \times 10^{26}\text{W}$ ）的能量，这相当于每秒钟产生 919.2×10^{10} 万吨 TNT 炸药爆炸的能量。

太阳核心的核聚变是在自我修正下达到平衡：速率只要略微提升，就会造成核心的温度上升，压强增大，更能抵抗外围物质的压力，因此核心会膨胀，从而降低核聚变速率，修正



之前核聚变速率增加所造成的扰动；而如果反应速率稍微下降，就会导致温度略微下降，压强降低，从而核心会收缩，使核聚变的速率又再提高，回复到它之前的水平。

核聚变产生的 γ 射线（高能量的光子流）从太阳核心释放出来后，只要经过几微米就会被太阳中的等离子体吸收，然后再以较低的能量随机地辐射向各个方向。因此，在不断反复的吸收和再辐射中，光子流要经过漫长的时间才能到达太阳表面。估计每个光子抵达太阳表面需要 10,000 年至 170,000 年的时间。

在穿过对流带，进入透明的光球表面时，光子就以可见光的型态散逸。每一股 γ 射线在核心产生的在逃逸入太空之前，都已经转化成数百万个可见光频率的光子。核心的核聚变时也释放出中微子，但是与光子不同的是它很难与其它的物质相互作用，因此几乎是立刻就从太阳表面逃逸出去。多年来，测量到来自太阳的中微子数量都只有理论数值的三分之一，因而产生了太阳中微子问题。这个差异直到 2001 年发现中微子振荡才获得解决：太阳发出的中微子数量一如理论的预测，但是中微子探测器侦测到的少了 $2/3$ ，这是因为在被侦测时中微子改变了它们的味。

太阳能一般是指太阳光的辐射能量，在现代一般用作发电。

自地球形成生物就主要以太阳提供的热和光生存，而自古人类也懂得以阳光晒干物件，并作为保存食物的方法，如制盐和晒咸鱼等。但在化石燃料减少下，才有意把太阳能进一步发展。

太阳能技术分为有源（主动式）及无源（被动式）两种，有源的例子有太阳能光伏及光热转换，使用电力或机械设备作太阳能收集，而这些设备是依靠外部能源运作的，因此称为有源。无源的例子有在建筑物引入太阳光作照明等，当中是利用建筑物的设计、选择所使用物料等达至利用太阳能的目的，由于当中的运作无需由外部提供能源，因此称为无源。

而太阳能发电是一种新兴的可再生能源。广义上的太阳能是地球上许多能量的来源，如风能，化学能，水的势能，化石燃料可以称为远古的太阳能。

在地球表面，太阳直射时每平方米辐射功率约为 1400W，假设每天太阳的照射时间为

8 小时，则每平方米每天可以得到

$$1400W \times 8 \times 3600 = 4 \times 10^7 J = 40MJ = 11kWh$$

每年的能量是 $11 \times 365 = 4000kWh$ 。太阳能的应用有两个方面，一是直接应用，例如，太阳能热水器，二是转变为电能。考虑到太阳实际上与地面有一个角度，每年有阴天，再考虑到转换效率等因素（太阳能电池的转换效率大约是 15%），我们假定太阳能的使用效率是 2.5%，于是，每平方米每天可以提供太阳能 $0.28kWh$ ，每年可提供太阳能 $100kWh$ 。这其实是一个很大的能量。如果按照目前每人每天消耗 $52kWh$ 能量计算，每人需要的太阳能提供面积是 $200m^2$ 。全国 15 亿人口，需提供太阳能的面积是

$$1.5 \times 10^9 \times 200 = 3 \times 10^{11} m^2 = 3 \times 10^5 (km)^2$$

中国有九百六十万平方公里土地，如果全部使用太阳能，所需面积占总面积

$$\frac{3 \times 10^5}{9.6 \times 10^6} = 0.03 = 3\%$$

也就是说，只要 3% 的国土面积收集的太阳能就可以提供国民目前的能量需求。太阳能本身是一种绿色，可持续的能源，不会带来温室气体的排放。从理论上讲，太阳能作为未来的可持续能源是非常有希望的。目前，太阳能应用还存在技术上的问题，如太阳能电池生产过程中的耗能和污染，排放问题，太阳能发电的成本偏高等等。

2.7 风能

风能 (wind energy) 地球表面大量空气流动所产生的动能。由于地面各处受太阳辐照后气温变化不同和空气中水蒸气的含量不同，因而引起各地气压的差异，在水平方向高压空气向低压地区流动，即形成风。据估算，全世界的风能总量约 1300 亿千瓦，中国的风能总量约 16 亿千瓦。如果可开发风能占 10%，即可以开发 1.6 亿千瓦。平均每人 $0.1kW$ 或每天 $2.4kWh$ 的能量。由此可见，风能只能起到补充作用，不可能解决未来的能量需求。但是，考虑到风力资源主要在相对偏远的地区，如内陆的高原地带，海岛等，因此，在这些地方大力发展风能是合适的。

第三章 核能：原理，安全性

这一章我们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。

3.1 近代物理简介

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。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识。相对论和量子力学成为研究微观粒子的理论基础。

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。而能量和质量之间是可以互相转化的。由于光速的巨大数值， $c = 3 \times 10^8 m/s$ ，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

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

这相当于 3 个 1000 兆瓦的核电站每年的发电量。

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 $10^{-10} m$ ，而原子核的尺度大约是 $10^{-14} m$ 。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。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。

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。光子是电磁波量子，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， ν 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。

3.2 核物理基础

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

$${}^A_Z X$$

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， ${}^1_1 H$ ， ${}^2_1 H$ ， ${}^3_1 H$ 。氦有两种同位素， ${}^4_2 He$ 和 ${}^3_2 He$ 。

3.2.1 原子

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 ${}^{12}C$ 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。实验测量发现，一摩尔碳 12 原子包含的原子数为 6.022045×10^{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

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

而一个原子质量单位的质量为

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

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

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

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 γ 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， γ_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

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

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}O 的质量为 15.99492g 。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 13.6eV 。把铅 ($Z = 88$) 的最外层电子电离所需的能量为 7.38eV ，而为了把铅的最内层的电子 (K 电子) 打出来，所需的能量为 88keV 。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 λ_{\min}

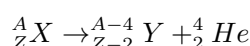
$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{E} = \frac{4.136 \times 10^{-15}\text{eV} \cdot \text{s} \times 3 \times 10^8\text{m/s}}{88 \times 10^3\text{eV}} = 1.41 \times 10^{-11}\text{m}$$

这一波长处在 X-射线的波段。当内层电子被打出来后，高能量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。

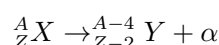
3.2.2 原子核的半径

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，可以得到图 3.2.2。从图上可以看出，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 β 稳定线。偏离 β 稳定线的核是不稳定的，将通过衰变向 β 稳定线靠近。

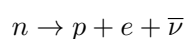
原子核可以发生衰变和反应，典型的衰变有三类，分别命名为 α 衰变， β 衰变和 γ 衰变。 α 衰变中，原子核放出一个 ^4_2He 原子核，变成另一个原子核。用方程表示

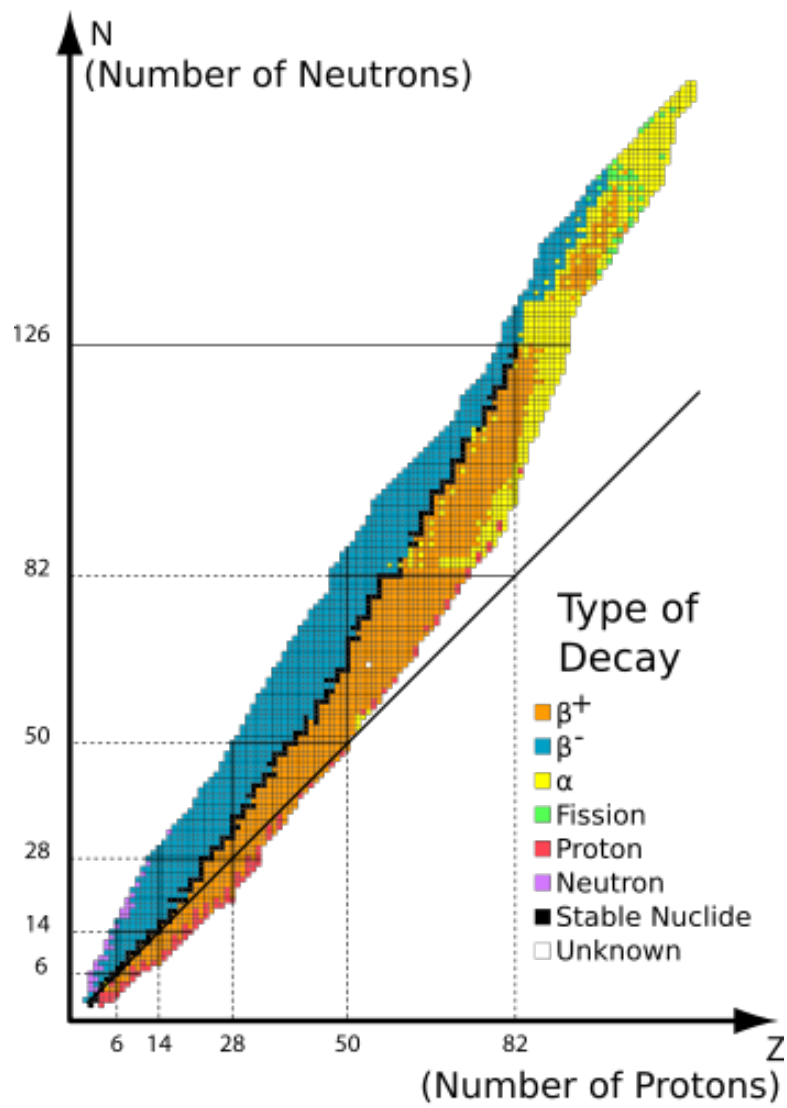


^4_2He 原子核又称为 α 粒子，所以，上式也可简化为

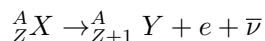


β 衰变是原子核放出电子的衰变，本质上是原子核中的一个中子的衰变





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 β 衰变后, 质子数增加 1, 中子数减少 1, 核子数不变。即



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

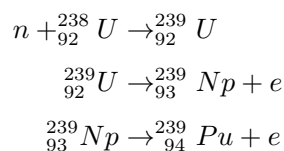
偏离稳定线丰质子不稳定原子核, 也可以通过 α 衰变向稳定线靠近, 一般, 重原子核需要经过一系列的衰变 (α, β, γ 衰变) 最后到达稳定的核 (终点一般是铅)。

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。

3.3 反应堆原理

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。

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 β 衰变为镎 ${}^{239}_{93} Np$, 半衰期 23.5min, 然后再经过 β 衰变为钚 ${}^{239}_{94} Pu$, 半衰期 2.36d。



铀 235 的裂变碎块的质量分布如图??所示。

3.4 辐射与癌症

辐射的危害到底有多大?

3.5 聚变: ITER 简介

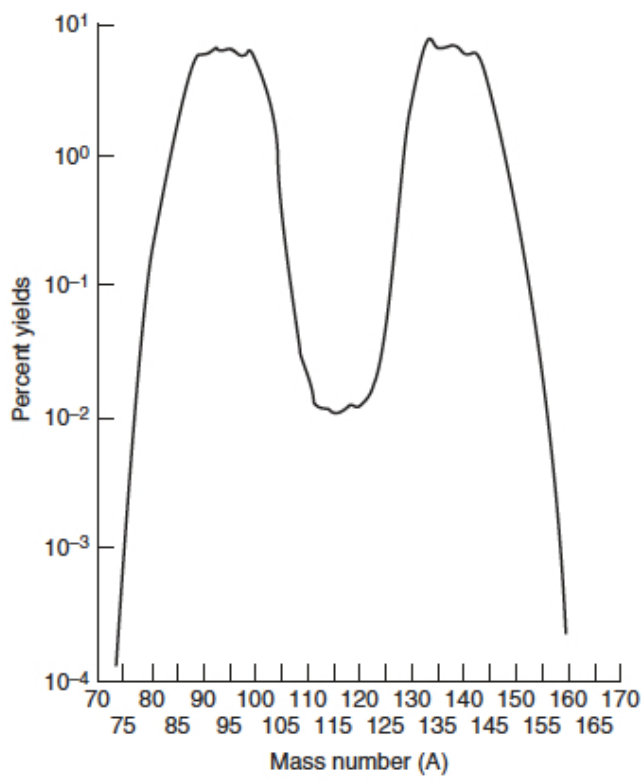


图 3.1: