

中国科学院高能物理研究所“小粒子 大宇宙”系列课程

第六讲：核能利用与核辐射

石伟群

大家好！

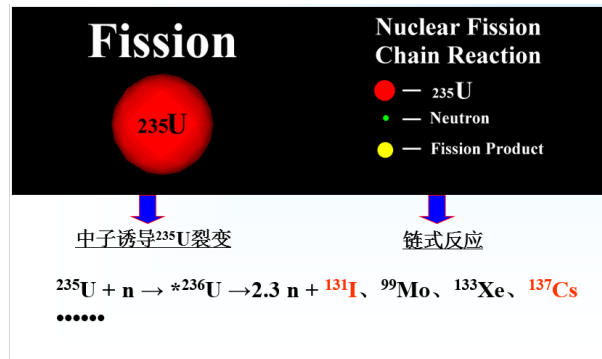
欢迎来到“小粒子 大宇宙”系列课程。这里是中国科学院高能物理研究所。我是石伟群。

今天很高兴给大家讲解核能利用与核辐射相关的知识。我主要从四个方面给大家进行讲解。一、什么是核能；二、核能利用与核反应堆工作原理；三、辐射离我们远吗；四、放射性同位素及辐射技术的应用。

首先，什么是核能？核能又称原子能，是原子核中的核子重新分配时释放出来的能量。它符合爱因斯坦著名的质能方程：

$$E=mc^2$$

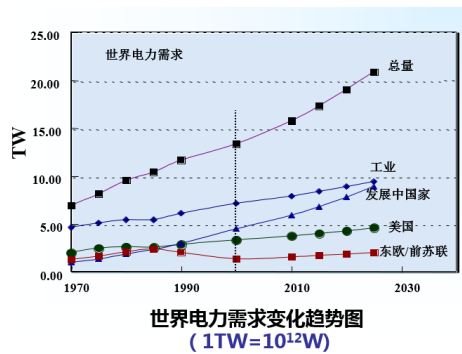
核能又分为三类。一类就是我们通常说的核裂变能。第二类是聚变能。我们人类得益于聚变能，因为太阳的工作原理实际上就是聚变。第三类核能是指衰变能，是原子核衰变时释放出的放射能。这个衰变主要指的是 α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变。



裂变与链式反应（这是个动图）

我们通常所说的核能指的是裂变能，是因为人类对裂变能利用的比较多，主要是利用它的链式反应。重核，尤其指的是像铀 235、钚 239 这些放射性的同位素，裂变的时候它会释放出更多的中子，中子又可以诱发新的重核产生裂变，这样就维持了一个链式反应产生巨大的能量。

核能是人类进步的必然选择。随着社会经济的发展需要更多的能源，化石能源毕竟有用完的那么一天。而现在我们也提出了建设和谐社会，建设美丽乡村、美丽城市，都需要降低化石燃料的使用，这样核能的利用一定是越来越重要的。从整个世界的电力需求变化来看是迅速在攀升的，到 2030 年将会超过 20TW 的总量，这当中有很大部分将会是核能的贡献。



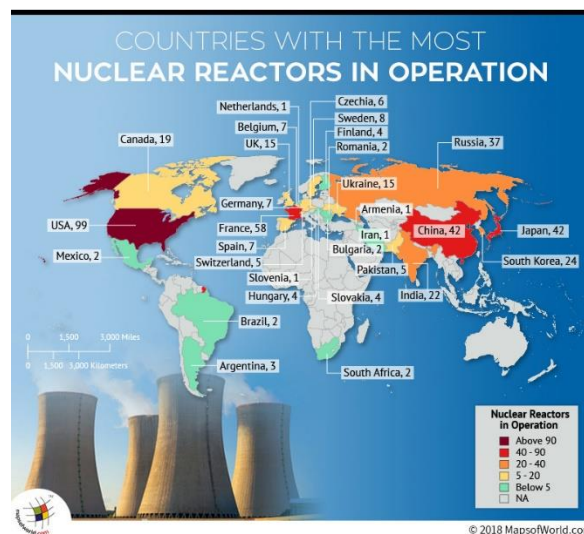
核能之所以越来越受到大家的青睐，主要是它有三个方面的优势：

第一，核能是一种高能量密度的能源。打个比方，100 万千瓦级的一个核电站一年只需要 25 吨的低浓缩铀，一辆卡车运输就够了。但是 100 万千瓦级的热电站需要多少燃煤呢？350 万吨。要几千节的火车皮车厢去拉煤。大家想想要排放多少二氧化碳？

第二，核能是一种清洁的能源。因为它不排放烧煤产生的有毒气体杂质，而且实际上核电站周围的辐射剂量是很低的，甚至比燃煤电站周围的放射性剂量率还要低。

第三就是低碳，因为核能排放的二氧化碳很少。

所以核能主要是得益于这三个方面的优势，越来越受到大家的青睐。



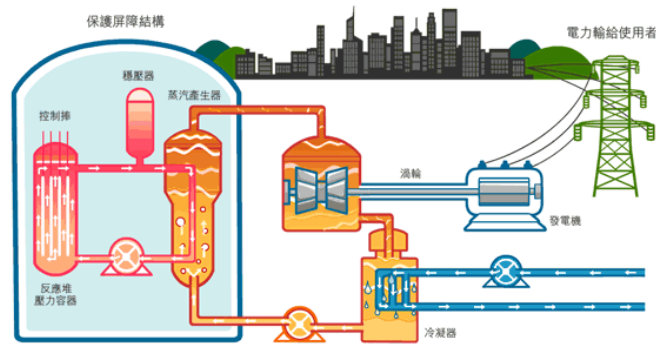
全球核反应堆分布示意图

在全世界来说核能的发展也是方兴未艾，主要的发达国家尤其重视核能。上图显示的是 2018 年全球核反应堆的分布示意图，里面颜色越深的，表示这些国家的反应堆的数量越多。我们可以看到像美国、法国、中国、日本这些国家都是核电站数量比较多的，其中法国核电的比例占全国的电力供应的比例达到 78%，所以它是高度依赖核电的一个国家。



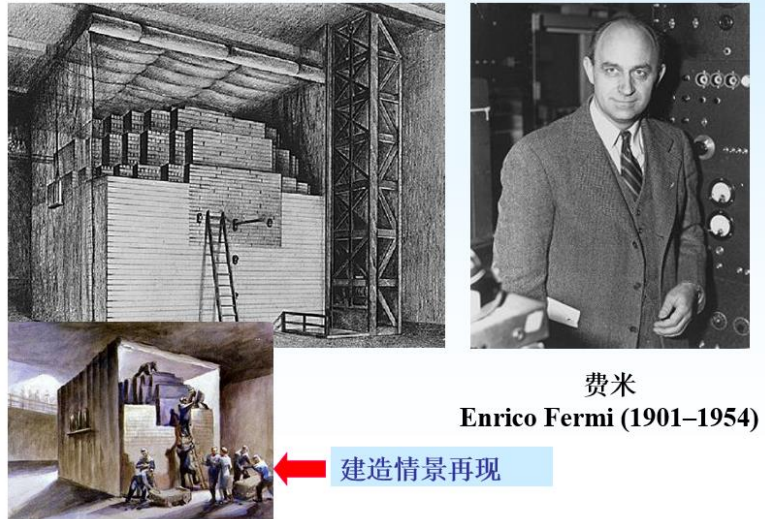
我国核电站分布示意图

具体到我们中国来说，截至 2018 年 12 月底，我国在运核电机组 44 台，发电量占我国整个电力供应的比例为 4.22%。跟法国比起来我们还是有很大提升空间。预计到 2050 年左右我们国家的核电将会在世界排在首位。中国到时候要发展成为一个发达国家，对能源会有非常大的一个需求。大家可以看到，我们国家目前的核电站基本都分布在沿海。



核电站工作原理 (这是个动图)

核电站的工作原理其实很简单，实际上跟烧锅炉也差不多。就是把核能的能量引出来以后来加热水，这个水再变成蒸汽驱动汽轮机进行发电。但是核能毕竟能量密度高，所以这是一个高科技的产业。



费米
Enrico Fermi (1901-1954)

建造情景再现

世界上第一座反应堆（1941）

实际上反应堆的发展历程已经经过了 70 到 80 年的时间，世界上第一座反应堆是在 1941 年由费米在芝加哥大学一个网球场下建的。这个图是当时建设反应堆的一个场景，当时就真的是一块砖头一块砖头垒起来的，所以叫反应堆。费米是著名的物理学家。



“华龙一号”反应堆模型

经过几十年的发展之后，现在的反应堆越做越精细。它是一个高科技产业，我们要考虑它的安全。大家看到这张图片是我们国家“华龙一号”的反应堆的模型。反应堆现在是有单独的园区，非常的漂亮。



燃料芯块

建反应堆我们需要燃料，燃料是怎么来的？我们从铀矿中开采得到铀，进一步浓缩，做成二氧化铀的燃料芯块。这个是二氧化铀燃料芯块的图片，它是一种陶瓷燃料。其中铀 235 的比例是从天然铀的比例浓缩到 2% 到 5% 的水平。二氧化铀，就是我们俗称的像小煤块一样这个东西，把它装到一个不锈钢的钢管子里面，然后再用电焊焊起来使它彻底密封在里面，这样保证它的安全性。这些不锈钢管我们又称燃料棒，把它再加工成燃料组件，变成燃料组件以后把它再吊装到反应堆里面去进行工作。这就是燃料和燃料组件的一个原理。

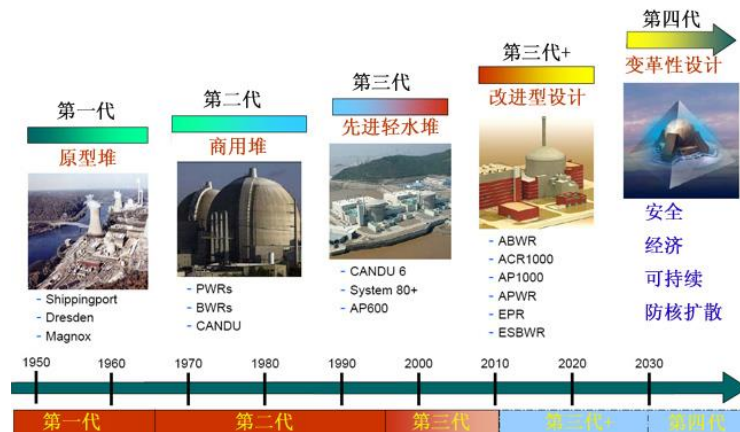


奥克洛的史前天然反应堆（非洲加蓬共和国）

前面说了核燃料实际上是低浓缩的铀，我们知道自然界当中的铀主要有两种同位素，一种是铀 238，一种是铀 235。这两种同位素的衰变速率是大大不一样的。铀 235 的衰变周期比较短，所以想象一下在 20 亿年前的铀矿当中，铀 235 的含量会比较高，达到了一个低富集度铀的水平。所以地球上实际上存在一个史前的反应堆，在特殊的地理水文情况下存在。这个反应堆在哪呢？在现在的非洲加蓬共和国的境内。这个图片是核反应堆的遗址。后来科学家经过考察论证，证实确实这是一个史前的反应堆。

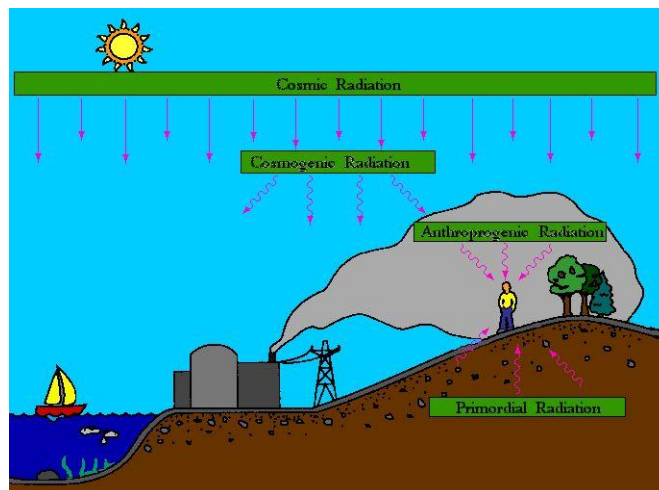
核燃料在进堆之前就是二氧化铀燃料芯块，放射性实际上是比较弱的，不需要采取特殊的、高度的防护措施。但是核燃料在反应堆里面燃烧之后，它的放射性会成几个数量级的增长。所以在反应堆里烧过了的燃料，放射性非常强、发热量非常大。从反应堆里提取出来的乏燃料，我们往往要在堆附近乏燃料水池里面放置几年的时间，使它冷却，然后再进行处理。

目前国际上对于乏燃料处理有两种路线：一种是把它做深层的地质处置，找个荒无人烟的戈壁把它埋起来，等它放射性慢慢地衰减；第二种是把乏燃料进行化学分离，然后运输到厂址对它进行处理。

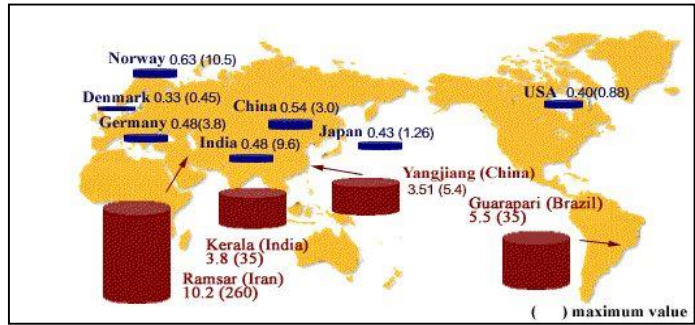


核能的发展趋势：更安全、更高效

总的来说，核能是一个高科技的产业，它的发展需要科学家不断地去努力，发展新的技术，核能的发展趋势是变得更安全、更高效。我们现在的核能系统主要是在第三代和第四代之间，第四代是最高的标准。我们今后要进行变革性的设计使核能可持续发展。



在讲解核反应堆、核燃料的原理之后，我想讲讲辐射。大家对辐射非常的关心。实际上辐射离我们并不远，就在我们身边。为什么？因为我们无时无刻不生活在一个辐射场中，第一是宇宙射线，第二是地壳里面的一些放射性物质也会构成辐射。所以大家大可不必担心，因为我们时时刻刻生活在辐射的环境当中。

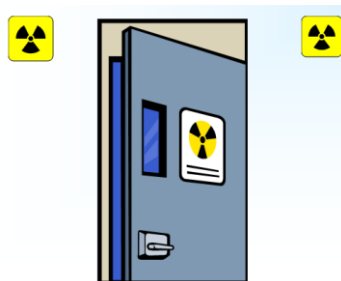


世界自然本底辐射概况 (mSv)

在地球上天然的辐射水平有些地方高、有些地方低，这个图是全世界自然本底辐射的一个情况。全世界像中国的阳江地区、印度、伊朗、巴西这些地方，它的辐射本底就比世界平均水平要高很多，科学家也对这些重点地区进行相关的流行病学的调查。比如说伊朗的 Ramsar 地区，它的放射性本底就非常高。我们平均的自然本底的剂量率大概是 0.1 个 $\mu\text{Sv/h}$ 。大家看看这个图，它的辐射本底可以达到 19.99 个 $\mu\text{Sv/h}$ ，这是世界平均水平的 200 倍。但是伊朗 Ramsar 地区是一个著名的温泉疗养圣地。科学家对这个地区进行放射性流行病学调查，发现这个地方甚至长寿的人更多。为什么？是有科学原理的。



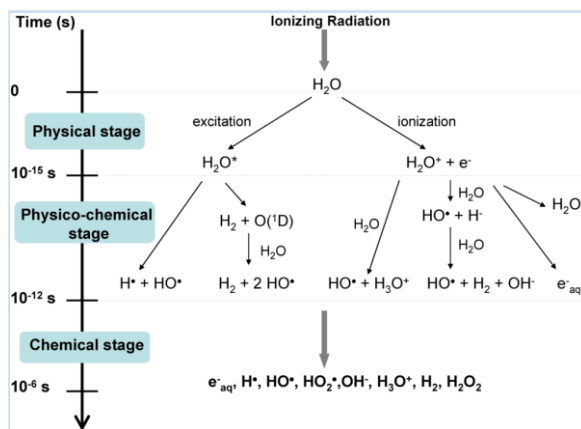
伊朗 Ramsar 地区的婴儿



电离辐射的标志

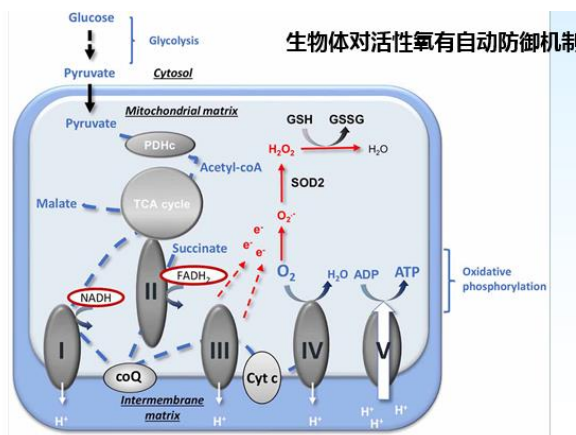
我们在生活当中无时无刻不接受到辐射，比如说我们坐飞机，我们去拍胸片、抽烟也会吸入一定的放射性剂量。我建议大家要留意放射性辐射的标志，

它像一个电风扇，是黄色的背景。你到医院去，或者到工厂、到科研机构，看到这个标志就要小心，避免遭到不必要的辐射。



水的辐射分解

核辐射对人体、对生物体会产生影响，那是什么原理呢？实际上它不是射线直接跟生物体产生作用，而是跟生物体内的水产生作用。因为人体实际上50%到70%都是由水组成的，水含量很高。射线首先是跟水产生作用使水产生分解，变成了各种各样的活性自由基，活性自由基反应活性非常强。它可以跟我们体内的生物分子比如说蛋白质、DNA产生反应，导致不好、不良的一些后果。



电离辐射可以刺激抗氧化酶的表达

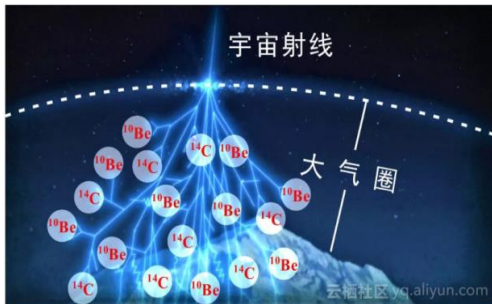
线粒体内电子传递泄漏导致活性氧的产生

但是大家不必担心，因为这些活性自由基在我们体内本来就是存在的。比如说在我们的细胞线粒体内存在一个电子传递链，我们人要呼吸氧气，氧气很容易跟电子传递链中的电子产生反应，产生超氧自由基，我们又叫它活性氧。那么为什么人体不怕呢，是因为人体内或者生物体内本身就存在一个防御的机制。因为体内各种的酶，抗氧化的酶或者辅酶，它可以清除掉这些活性自由基。所以大家大可不必感到担心，因为辐射产生的这些活性自由基体内本来就存在、本来就有的，而我们体内存在一个清除自由基的这种生物机制。

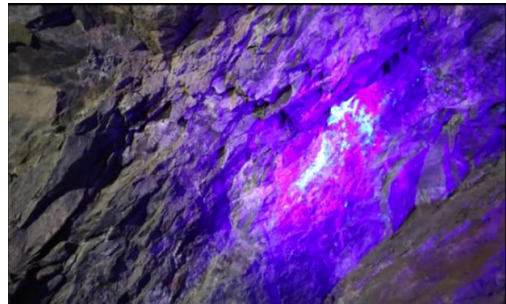
检测	有效剂量 (mSv)
头部 CT	1-2
胸部 CT	5-7
腹部和骨盆 CT	8-11
冠状动脉造影诊断	3-10
侧胸部 X 光透视	0.04-0.06

常见放射性医学检查的有效剂量

我们日常生活当中会去到医院做放射性的医学检查，实际上这个时候也接受了不少的剂量。比如说头部 CT、胸部 CT，它的剂量大概分别是 1-2 个 mSv 到 5-7 个 mSv 之间。而我们一般的人一年接受的自然本底的平均辐射大概是 1 个 mSv，所以建议大家尽量少做 CT。当然这些 CT 实际上剂量也是比较低的，总体来说是安全非常安全的。



宇宙射线



古老铀矿石

放射性核素的天然来源



核试验



反应堆



粒子加速器

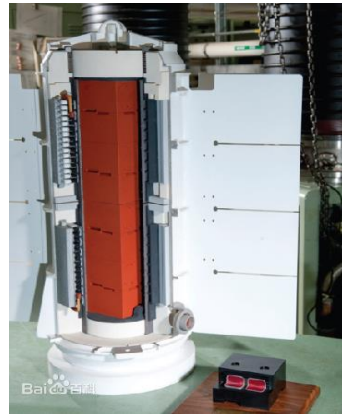
放射性核素的人工来源

最后我们介绍一下放射性同位素以及辐射技术的应用，因为放射性可以造福人类。放射性同位素的来源主要分为两类：一类是自然的，前面已经讲过天然本底它是有辐射的，宇宙当中也会产生放射性的核素，比如碳 14，在地壳当中有天然的放射性同位素，比如铀的同位素；一类是人工的，主要来源于核试验、反应堆以及加速器这三种人工生产方式。



^{131}I 治疗甲状腺疾病

从放射性同位素的利用来说，首先医用的应用非常多，主要是用在治疗和诊断上面。比如说碘 131 是一种碘的放射性同位素，它的半衰期是 8 天左右。我们知道碘是甲状腺需要的一种元素，甲状腺对这个碘还有富集作用，如果有甲状腺疾病的话，就可以利用碘 131 对它进行治疗。



嫦娥三号携带的核电池

大家非常关心非常熟悉的航天工程也需要用到放射性的同位素。近地的这种航天器我们可以用太阳能做动力，但是如果去离太阳很远的地方做深空探测，比如说去火星，这个时候就要用到核能，主要是核电池。我们国家的嫦娥三号上面就携带有不少的钷 238 核电池。今后我们国家也要进行火星探测，更是离不开钷 238 这种核电池。



火灾报警器

还有部分的日常生活当中用的火灾报警器，里面是含有镅 241 这种同位素的，因为镅 241 可以发射 α 粒子。



日本的辐射育种实验场地

辐射技术还可以用在辐射育种方面，就是用在农业上面的品种改良、增产增收，也可以用在花卉等的品种改良。在医疗和食品方面辐射技术也有很广阔的应用前景，比如说我们医院用的这些棉签，这次我们新冠肺炎需要大量的防护服，生产出来的防护服也是需要消毒的，但是用化学消毒就很麻烦，如果用辐射消毒的办法，把防护服包装好推到钴源房里面去照一照就把细菌杀死了。



辐射可用于食品消毒和改良

在改变食品风味方面辐照技术也是潜力无限的。比如，牛栏山二锅头经过辐照过后味道就没有那么硬了，还有一种茅台的香味。

今天我主要是就核能利用和核辐射的相关应用，做了一些讲解，希望对大家有所帮助。谢谢大家的聆听！