

电离辐射与人类生活

郭 勇 金冈年 编著
梁德明 杨家宽

原子能出版社

264/18

内 容 简 介

本书以通俗易懂的语言，理论联系实例的手法阐述了电离辐射与人类生活——这个世人极为关心的问题。

本书篇幅不大，但内容丰富，涉及面较宽，许多内容都与人的生活、健康密切相关，诸如宇宙深处来的射线；住宅里也有放射性；生活用品中的放射性；燃煤和核能生产引起的照射；X射线诊疗与工业探伤；医疗用品辐射灭菌与食品辐射保藏；核电站是清洁的能源；电离辐射的生物效应；征服癌症与放射治疗；辐射防护及辐射防护法规等，书后附有名词解释、辐射量及单位等表格。

阅读这本书，人们可以获得有关电离辐射与人类生活相关的知识，当有所启发和裨益，从而更好地认识它，掌握它和利用它。

本书可供中等文化水平的广大读者阅读，也可供从事电离辐射及其防护专业人员和医务工作者参考。

电离辐射与人类生活

郭 勇 金冈年 编著
梁德明 杨家宽

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京昌平兴华印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092_{1/32} ·印张6.375 插一 ·字数137千字

1990年1月北京第一版 1990年1月北京第一次印刷

印数1—1540

ISBN 7-5022-0210-2

X·7 定价：4.55元

前 言

人类自演变形成迄今，一直处于天然电离辐射（放射性）的环境之中，世代繁衍生长，发展进化。近一个世纪，人工电离辐射广泛深入到人类生活的各个领域，如同其它工业的发展和进步一样，它给社会带来了文明和进步，但也给人类带来了不幸和潜在的危害。

电离辐射是单凭人的感官看不见、摸不着、嗅不出、听不到的物质。在发现了放射性的初期，人们不知道它对人有危害作用，有些人用含有放射性物质的材料制成药剂，以为是万灵药，广为应用；还有些人认为氡可以使人延年益寿或能治疗某些疾病，竟在含氡量很高的旧矿井中进行“氡气浴”……。X射线和镭出现以后，有许多在医疗上使用不当甚至滥用的情况，造成一些严重的辐射损伤，甚至死亡。这时人们才开始重视电离辐射对人的危害，同时也产生了对电离辐射的恐惧心理。广岛和长崎两次原子弹爆炸造成的惨重破坏和伤亡，使人们把电离辐射同原子弹的破坏和杀伤联系起来，更加重了恐惧心理，以致电离辐射成为一个敏感的问题，引起世人的格外关注。事实上，在正确应用的情况下，它能给人类造福，仅在不正确应用的情况下，才会带来危害，广

岛和长崎惨案的主要“凶手”是原子弹爆炸时产生的冲击波和光辐射，电离辐射引起的伤亡是次要的。

正确对待电离辐射的原则是，既要充分利用它为人类造福，又要将它的危害限制到尽可能低的限度。本书的目的就是向广大读者介绍关于电离辐射的性质及如何正确对待它的知识。电离辐射无处不在，人类时时处处都不可避免地受到它的照射，无需害怕，但要注意避免不必要的多余照射。

在编写中，史元明先生提供了许多有益的建议，并审阅了书稿；书中引用了一些作者的资料，在此一并表示衷心的感谢。

编著者的水平和掌握的资料有限，错误和不当之处望批评指正。

编著者

1988年1月30日

目 录

一、人类生活在电离辐射的环境之中	(1)
来自宇宙深处的射线	(1)
地面到处都有辐射	(7)
住宅里也有放射性	(12)
生活用品中的放射性	(18)
燃煤引起的照射	(29)
核爆炸造成的放射性污染	(33)
核能生产带来的照射	(37)
医疗照射是最大的人工辐射来源	(42)
二、人体也是个小放射源	(47)
人体内放射性核素的来源	(47)
人体内放射性核素的含量	(49)
人体内放射性核素对健康的影响	(52)
三、人受到的电离辐射的剂量有多少?	(54)
四、电离辐射给人类带来文明和进步	(60)
寻找白蚁巢与放射性示踪	(60)
拿破仑之死和宝剑之谜与核分析	(63)
以虫治虫与辐射诱变	(64)
杀虫消毒与医疗用品辐射灭菌	(66)
宇航员的食物与食品辐射保藏	(69)
X射线诊断与工业探伤	(73)
痕量元素测定与放射免疫分析	(75)
征服癌症与放射治疗	(76)
原子电池与核时钟	(78)

五、核电站为人类提供新的巨大能源	(82)
风华正茂方兴未艾	(84)
核电站的组成和工作原理	(85)
核电站会像原子弹那样爆炸吗?	(88)
核电站是清洁的能源	(91)
核电站事故	(94)
六、核武器给人类带来灾难	(99)
核武器是一种大规模杀伤的武器	(101)
核武器杀伤效应中有一部分是可以防护的	(105)
七、放射事故给人类带来不幸	(111)
放射事故的可能来源和概况	(112)
高度重视防患未然	(120)
八、电离辐射效应面面观	(123)
电离辐射与放射线	(123)
电离辐射的生物效应	(125)
九、电离辐射对人体的影响	(128)
几种器官的辐射效应	(130)
放射性核素的体内照射效应	(137)
电离辐射照射的远期效应	(139)
职业性照射对人体的影响	(141)
短时间内全身照射的辐射效应	(143)
十、莫要夸大电离辐射致癌的可能性	(145)
电离辐射致癌的发现史	(145)
电离辐射致癌可能性的估计	(146)
电离辐射可能引起的癌症	(147)
降低电离辐射照射的途径	(150)
十一、安全的天使——电离辐射防护	(155)
电离辐射发现初期引起的损伤实例	(155)
辐射防护活动的由来、发展和现状	(158)

ICRP第26号出版物产生的积极影响	(163)
十二、强制的管理——辐射防护法规	(166)
国外辐射防护法规的现状	(168)
我国辐射防护法规的历史和今天	(181)
附录1 名词解释	(185)
附录2 电离辐射和辐射防护中常用的量和单位	(188)
附录3 国际单位制 (SI) 词头	(192)
附录4 某些带电粒子的性质	(193)
附录5 电磁辐射系列	(194)
附录6 化学元素名称与符号	(195)
附录7 天然放射系的衰变情况	(197)

一、人类生活在电离辐射的环境之中

人类生活在地球上，自古以来每时每刻都受到天然存在的各种电离辐射源的照射，我们把这种照射称为天然本底照射。在现代社会中，由于工业的发展和科学技术的进步，也产生了人类并不希望有的天然照射，如天然气和地热的利用以及燃煤电站排出物对居民的照射，乘飞机增加的照射等；尤其是在核科学和核技术发展的今天，人类生活已与放射性紧密相关，也受到人工电离辐射源的照射，如放射诊断和放射治疗，含有放射性或产生电离辐射的电子产品的照射等。总之，人类是生活在电离辐射的环境之中，但这却不是人们都能感觉得到的事实。

来自宇宙深处的射线

从那无限遥远、茫茫无垠的宇宙空间，有一股单凭人的感官看不见、摸不着、嗅不出、听不到而又具有很高能量的粒子流，永不停息地倾泻到地球上来，人们称它为宇宙射线。

人们又将那些从宇宙空间进入地球大气层的高能粒子称为初级宇宙射线；这些初级宇宙射线与大气层中的原子核相互碰撞产生的次级粒子和电磁辐射称为次级宇宙射线。初级宇宙射线主要是由质子、 α 粒子和电子等高能粒子所组成。这

些粒子主要又由各种元素的原子核构成，其中氢原子核约占93%，氦原子核约占6%，其它元素的原子核约占1%。令人惊奇的是凡地球上存在的元素的原子核，在宇宙射线中都可以找到，甚至地球上天然并不存在而只能靠人工产生的超铀元素的原子核，在宇宙射线中也已经发现了。初级宇宙射线闯入大气层后，与大气中的氮、氧等各种原子核发生核反应，释放出次级质子和中子。当初级宇宙射线的能量大于100MeV时，同原子核碰撞会产生级联簇射而生成很多次级高能粒子，其中含有介子、重子等。中性 π 介子衰变成光子，高能光子在原子核附近形成电子，高能电子在原子核附近又产生韧致辐射，如此交替作用形成电子光子簇射。带电 π 介子与原子核作用产生核簇射，形成 μ 子， μ 子又衰变为电子，依次下去又能产生韧致辐射。在核簇射中的核子（质子和中子）可引起核反应或再产生核簇射。在核簇射中形成的 k 介子和超子衰变为其它粒子，这些粒子再与核子反应产生新的粒子和再引起核簇射，如此继续“繁衍”，直到能量耗尽方肯罢休。当初级宇宙射线的能量高达 $10^{12} \sim 10^{13}$ MeV时，这些罕见的超高能粒子在大气中产生核簇射后，又可引起一系列核级联，粒子数剧增，所产生的高能电子和光子又引起链锁的电子光子簇射，产生几百万甚至数万亿的电子、光子、质子、中子、 π 介子等一大群粒子，形成“宇宙雨”同时辐射到地球上，这就是所谓的广延大气簇射现象。可惜，目前人们还没法用肉眼直接观看这种奇异的景象。

惊人的能量和穿透力

宇宙射线粒子的能量一般在 $1 \sim 10^{14}$ MeV范围之内，它比太阳光的能量大到数不尽的倍数。据说在大气层之外，已测得 4×10^{14} MeV的粒子，这种把直径放大到 10^{11} 倍以后还

不足1mm的微粒，所具有的能量，却足以把一个人举起1m高，可见能量大得惊人。

地球上存在着铀和镭这类天然放射性元素，能自发放出 α 、 β 、 γ 射线，它们都具有一定的穿透物质的能力，尤其是 γ 射线贯穿力更大。但它们与宇宙射线相比，则是小巫见大巫了。 γ 射线穿过几厘米厚的铅板后已所剩无几，而宇宙射线在穿过10cm厚的铅板时，其强度只减弱1/3，穿过1m厚的铅板时，也只减少1/2，足见穿透力之强了。至于能量很高的粒子，如 μ 子，竟能贯穿几千米的地壳和海洋，被称为“天然X射线”就更不待言了。

不过那些高能粒子的数量是很少的。在海平面处，每平方厘米的范围内，每分钟只有1.5个 ($1.5\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)，在大气层顶端每平方厘米范围内，每分钟也不超过60个 ($60\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)。而能量为 10^{14}MeV 的粒子就更少了，大概每小时发射1个 (1h^{-1})，能量为 10^{14}MeV 以上的粒子大约每年仅有1个。这些高能粒子不但本身是科学研究的对象，而且还可以利用它从事高能物理和其它方面的科学研究工作。譬如，1932年安德森应用威尔逊云室，对从宇宙射线中摄取的正电子进行了“反物质”的研究；1947年莱梯斯等人从宇宙射线中发现了 π 介子，由此揭开了原子核核力的秘密。

自50年代以来，人们已应用高能加速器进行基本粒子的研究，但这些加速器所产生的粒子能量远低于 10^{14}MeV 。因此，对于宇宙射线的研究，有着非常重要的科学意义。我国于1976年在西藏海拔5500m的高山上，设置了乳胶室对宇宙射线进行研究。这个实验室的高度居世界之首，其规模在世界上也是数得着的。

奇怪的强度变化

当人们开始研究宇宙射线强度的时候，发现了一个有趣的现象。射线强度随海拔高度的增加而增大，开始增大较缓慢，自2km后迅速上升，在17~20km范围内基本保持不变，高于20km后，射线强度渐趋减弱，尔后保持在一个恒定值上。也就是说，宇宙射线强度在距地球表面大约17~20km的高空达到最大值，从这里向下逐渐减小，向上稍有减弱后基本保持恒定。

为什么宇宙射线强度会有这种奇怪的变化呢？其实回答这个问题也并不困难。因为在17~20km以上的高空，空气稀薄，从环宇远道下来的射线粒子与气体中各种原子核碰撞的机会较少，当它们深入到大气层里之后，随着空气密度的增加，相互作用的几率大大增加，碰撞结果产生许多新的射线粒子，所以射线强度就增加了。当低于17~20km时，又由于到达这个高度时那些原有的和碰撞新发射的射线粒子，经过多次碰撞散射之后，其本身的能量不断消耗，已成为强弩之末，其中能量较小的或能量已耗尽的粒子，到达大气下层，就逐渐被大气吸收了，因此射线强度又递减了。

由于宇宙射线强度有这样的变化规律，所以住在高原上的人群要比住在平原上的人群受到宇宙射线的照射多一些。假若以海平面受照剂量为1的话，在海拔2km处的受照剂量大约增加2倍（即为3），海拔5km增加约3倍，海拔12km可以增加至20~30倍（即受照剂量为20~30）。

此外，宇宙射线强度还受地球磁层（地球磁场作用所及范围）和太阳调制等因素的影响。表现为在地球磁区宇宙射线强度比赤道区的要大一些。这也是很容易理解的，因为一些带电粒子稍偏向磁极方向，同时这种地磁纬度效应还随高

度增加而更加显著。据估计，中纬度地带的居民所接受的宇宙射线的剂量，要比全世界的平均剂量值高约25%，而热带地区的居民所受剂量，却比全世界平均剂量值低60%左右。太阳活动周期为11年一次，其活动最大期间，宇宙射线的辐照量最小，太阳活动期减弱时，这种辐照量增大，但太阳这种周期性调制引起的变化一般不超过5%。

总的来说，到达地球表面的宇宙射线的强度还是比较稳定的。据联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）1982年报告，在一般地区，宇宙射线所致人群个人年有效剂量当量为0.3mSv，其中电离成分的年有效剂量当量为0.28mSv，中子成分的为0.02mSv。这种正常的宇宙射线辐射对于人体不会产生不良的影响，人类从远古的原始人开始，早已经适应这种辐射环境了。但是，当人类进入太空或在高空旅行时，对于宇宙射线的辐照应引起重视。

起源的种种假说

自从1901年科学家们发现了空气中的电离现象之后，在1911~1919年期间，奥地利物理学家赫斯（Hess）和德国物理学家科尔霍斯特（Ker Hurst）等人又进一步探知高贯穿射线是从上空进入地球大气层的，1925年米利肯（Millikan）及其同事又作了深入的试验研究，后取名为宇宙射线。

人们不禁要问：这些渊源久远的宇宙射线究竟起源于哪里呢？是太阳爆发的产物吗？

目前，人类对初级宇宙射线的起源还不很清楚。但是，人们已经知道大部分初级宇宙射线来源于太阳系之外的银河系等天体，也还有起源于太阳的。太阳是离地球最近的辐射爆发源，一次强烈的爆发，所释放的总能量相当于 10^{10} 个百万吨级TNT（三硝基甲苯，也称黄色炸药）当量氢弹爆炸的总

威力；而一次特大的太阳爆发，释放的总能量更为巨大，同时发射出大量的可见光、紫外线和X射线，还释放出 10^{33} 个或更大量的以质子和 α 为主的带电粒子，其能量在 $1\sim 40\text{MeV}$ 范围，这就是人们常说的太阳宇宙射线。计算的结果表明，太阳所抛出的粒子数仅占宇宙射线总粒子数的 $1/10$ ，而且粒子的能量远远小于宇宙射线中其它高能粒子的能量。与太阳相似，宇宙中其它恒星的爆发，也只能产生一些中、低能粒子。因此，人们普遍认为，宇宙射线的大部分粒子只能起源于太阳系之外的某些天体，象银河系来的银河宇宙射线，就是从星际间进入太阳系的，其中质子能谱约为 $1\sim 10^{14}\text{MeV}$ 。目前，象超新星这一类高能天体的发现，人们会自然而然地把这些发生剧烈爆发的天体与宇宙射线的起源联系起来。观测结果表明，宇宙射线的分布又与这些超新星的分布有一定的关系。自脉冲星发现之后，又有人认为这是宇宙中的天然高能粒子加速器，宇宙射线可能是从它那里发射出来的。此外，还有人推论宇宙射线可能来源于其它更遥远的天体。总之关于揭示宇宙射线起源秘密的种种假说，尚待不断地探索和证实。

初级宇宙射线是对人类具有潜在危害的主要太空辐射。但由于地球周围的大气层、电离层和磁层的保护，才使生活在地球上的人类和生物免受这些初级宇宙射线的直接损害。至于宇宙射线对生命的起源和发展究竟有什么影响，还有待进一步地研究。然而，耐人寻味的是宇宙射线犹如一条无形的纽带，把人类赖以生存的地球与整个宇宙密切地联系起来，从而把人类对于无垠的宏观世界的探索与对于极小的微观粒子（世界）的研究也微妙地联系起来。这些大千的世界和奇妙的自然现象，不仅显示了宇宙奥秘之无穷，而且也启

示了令人深思的自然哲理。

地面到处都有辐射

人类生活在地球上，除受到宇宙射线的照射之外，还受到来自地球表面存在的天然放射性核素所发出的射线的照射。

早在1896年，法国物理学家贝可勒尔 (Becquerel)第一次发现了铀矿石可以使照相底片感光，这是人类首次发现的放射性物质；同年，原籍波兰的法国物理学家居里夫人 (Marie Curie)继贝可勒尔之后，发现了自然界中的钍也有类似于铀的放射性；后来，她又从沥青铀矿渣中先后发现了另外两种新的放射性元素钋和镭，它们比钍具有更强的放射性。从此之后，人们才知道，这些地球上到处都存在的天然放射性元素，能自发地衰变发出 α 、 β 或 γ 射线，我们把这种来自地壳表面的射线称为地面辐射。通常又把宇宙射线和地面辐射统称为天然本底辐射。

地面上的天然放射性核素分为宇生和原生两类。宇生放射性核素主要是由于宇宙射线和大气层中的原子核相互碰撞产生的，也有小部分是宇宙射线与地球表层原子核相互作用形成的。从辐射防护的观点看， ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 和 ^{22}Na 是对人引起外照射的主要的宇生放射性核素。原生放射性核素是自从有地球以来原始存在于地壳里的天然放射性核素，主要是铀系 (^{238}U 放射系)、钍系 (^{232}Th 放射系)、和锕铀系 (^{235}U 放射系) 以及 ^{40}K 、 ^{87}Rb 等放射性核素。以上的天然放射性核素的种类很多，但其中引人注意的是 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{222}Rn 、 ^{40}K 和 ^{14}C 。

在岩石和土壤里

天然放射性核素在地壳中的含量尽管不多，但其分布却极其广泛，几乎遍地皆是，各种岩石土壤、江河、湖海以及矿物中都有，只是含量多寡而已。在构成地壳的各种岩石中，大约有95%为火成岩，5%是沉积岩。由于绝大部分的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 和 ^{40}K 存在于火成岩里，所以通常火成岩中含有的放射性核素的比活度较沉积岩中的高。而火成岩中的酸性岩（如花岗岩）中的比放射性活度最高， ^{238}U 的比活度为 $60\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， ^{40}K 的比活度高达 $1000\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， ^{232}Th 的比活度为 $81.4\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沉积岩中的石灰岩的比活度最低，其中 ^{238}U 的比活度仅有 $28\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， ^{40}K 的只有 $90\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， ^{232}Th 的为 $7.03\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而有些沉积岩，如页岩也含有较高的放射性，其中 ^{238}U 的比活度为 $44.4\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ^{40}K 的比活度为 $700\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 ^{232}Th 的比活度为 $44.4\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

土壤是由岩石风化产生的，土壤中天然放射性核素的含量取决于生成该土壤的岩石的种类和形成土壤的作用过程，并且也受风、水及生物活动等诸因素的影响，但风化前的岩石是决定的因素。表1汇列出岩石和土壤中几种主要放射性核素的一般含量。

表1 岩石和土壤中天然放射性核素比活度($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)

核 素	岩 石	土 壤
^{40}K	81.4~814	29.6~88.9
^{226}Ra	14.8~48.1	3.7~70.3
^{232}Th	3.7~48.1	0.47~55.5
^{238}U	14.8~48.1	1.11~22.2

在岩石和土壤里含有的几种主要的放射性核素中，以 ^{40}K 含量最高，这主要是因为钾元素广泛地存在于各种岩石和土壤之中，并且其含量也比其它核素多，在钾元素中放射性同位素 ^{40}K 约占0.019%。

在水和空气中

由于岩石和土壤中的放射性核素溶入水中，而水是转移放射性物质的主要介质，所以各种天然水中也都含有放射性核素，只不过含量不同而已。如淡水中含 ^{40}K 很少，而海水中 ^{40}K 的放射性浓度竟高达 $12\sim 13\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

令人惊奇的是，海水中的铀含量要比陆地上的储藏量多得多。每1000kg海水中含铀3mg左右，可别小看了这个不大的数字，由于整个地球上海水的量是相当多的，由此推算出全部海水中的含铀量约在 $4\times 10^{12}\text{kg}$ 以上，而陆地上铀的蕴藏量不过 $5\times 10^9\text{kg}$ ，也就是说，海水中的铀要比陆地上的铀多近一千倍。

井水中放射性核素含量的多少随井的深度而异。一般来讲，井水中的放射性浓度高于地面水的放射性浓度。如上海地区三种不同深度的井水，每升水中 ^{226}Ra 的含量是：土井为 1.85mBq ，100m深的井为 5.55mBq ，400m深的井为 30.3mBq 。为什么会有这种差异呢？主要是因为深井水中 ^{226}Ra 的来源，除了土壤之外，还来自地下深层的岩石；又因为象 ^{222}Rn 这类放射性核素，在地面水中或浅的井中，大部分会逸散到空气中去，而随着井的加深， ^{222}Rn 越不易扩散，所以深井水中 ^{222}Rn 的含量也比较高。有的资料报道，地下水 ^{222}Rn 的放射性浓度高达 $2.6\times 10^4\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ ，比地面水高一万倍。

矿泉水中的天然放射性核素的含量也往往高于地面水，

有些地区的矿泉水因具有较高的放射性，过去（直到现在）还有人利用这种浴场“治疗”一些疾病。

饮水基本上来自地下水和地面水，在饮水中，对人造成威胁的主要是 ^{226}Ra 和铀， ^{222}Rn 的含量虽然一般较高，但因其寿命短，又是惰性气体，对人产生剂量不会很大。典型的数据表明， ^{226}Ra 在饮水中的浓度通常比铀浓度要高，而 ^{226}Ra 的年摄入量限值以及空气和食物的导出浓度又较 ^{238}U 的相应值为低，所以国内外对此比较注意。如1980年美国对50000处饮水源的 ^{226}Ra 进行了第一次普查，取水样近60000个，其中约有500个样品超过污染浓度限值（ $185\text{mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ ），约有50000人饮用的水大于 $370\text{mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ ，有的饮用井水高达 $5.7\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。我国居民饮用水中的放射性核素含量相差不大。现以北京市居民饮用水的两个主要水源为例，一些主要放射性核素含量的平均值及国家规定的露天水源的导出浓度限值一并列于表2中。

表2 官厅、密云水库水中主要天然放射性核素浓度及国家规定的导出浓度限值

放射性核素	官厅水库	密云水库	导出浓度限值
天然铀, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	7.1	0.7	50.0
天然钍, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.5	0.1	100.0
^{226}Ra , $\text{mBq}\cdot\text{L}^{-1}$	7.8	3.7	111.0

由此看出，官厅水库水中的各种放射性核素的含量均大于密云水库的相应值，其中尤以铀的含量更为明显，大约相差10倍。可见不同地区露天水中的放射性核素含量差异很大。但即使象官厅水库那样放射性核素含量较高的水源，仍