

生活中的辐射及其控制

李雨随

(洛桑联邦理工学院, 洛桑 瑞士 1015)

摘要 这是一篇针对电离辐射的科普性文章。介绍了电离辐射的概念、剂量的定义以及关于日常生活与医疗中可能的辐射暴露的一些常识,旨在消除公众对正常的辐射暴露的恐慌,同时普及辐射防护的一些基本常识。

关键词 电离辐射;照射剂量限值;医疗暴露

RADIATION IN LIFE AND ITS RESTRICTIONS

LI Yusui

(Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Lausanne Switzerland 1015)

Abstract This is a popular science article on the subject of ionizing radiation. This article introduces the concept of ionization radiation, the definitions of doses and some common sense about radiation exposure in our daily lives and medical diagnosis. This article is aimed at eliminating the public's panic about normal radiation exposure, with some basic knowledge of radiation protection.

Key words ionizing radiation; dose limit; medical exposure

1 辐射是什么

现代生活中,人们越来越多地接触到“辐射”这一概念。对于大多数人来说,最关心的问题便是:“辐射对人体有没有伤害啊?”然而,我们注意到,在互联网上流传的不少有关辐射的科普,在讲解之前往往并没有将辐射的概念理清,给读者造成了较大的误解或困惑。因此,在本文中,我们将从辐射的概念解释出发,结合日常生活中的辐射实例来介绍人们如何衡量辐射带来的危险,以解答读者关于辐射对人体是否有伤害、有多大伤害的疑惑。

首先,关于辐射的概念。辐射其实就是字面意义,如辐条一样地向外放射。它本身只是描述

一种行为,可以用以描述很多物理过程。譬如热辐射,顾名思义,是描述热量从热源向外传播的一种过程,譬如紫外辐射则是描述紫外线传播的一种过程。但这些通常都不是大家生活中所关心的可能对人体产生伤害的辐射。

在生理损伤方面,尤其是在医学中,大家所关心的会对人体产生伤害的辐射其实就是核物理中非常经典的几类辐射: α 辐射、 β 辐射、 γ 辐射与中子辐射。这些命名其实也都是非常字面意义了。 α 指 α 粒子,即两个质子两个中子构成的氦原子核。 β 指电子,由于历史原因,它可能特指某些情形下的电子,不过我们此处就不做深究了。 γ 辐射指高能光子的辐射。中子辐射就是中子的辐射,也是对生命体而言最可怕的一种辐射,不过好消息是日常生活中人们几乎不会接触到它。这些

收稿日期: 2022-02-18; 修回日期: 2022-02-21

作者简介: 李雨随,女,硕士研究生,研究方向为复杂系统统计物理, yusui.li@epfl.ch。

引文格式: 李雨随. 生活中的辐射及其控制[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 168-171, 178.

Cite this article: LI Y S. Radiation in life and its restrictions[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 168-171, 178. (in Chinese)

辐射是对生物体有害的,称为电离辐射(ionizing radiation),“辐射防护”一词所针对的就是电离辐射。在生活中,出现电离辐射的场合一般都应有如图 1 所示的警示标志。



图 1 “当心电离辐射”警示标示

这时有同学就会问了,大家平常会很关心的“手机、电脑、基站、信号塔会不会产生辐射对人体有害”,这些辐射是电离辐射吗?首先,它们是低能电磁辐射,而非电离辐射。低能电磁辐射与介质的作用方式和电离辐射与介质的作用方式是完全两回事。此处所说的介质当然也包括人体。那么,低能电磁辐射对人体是否有害呢?目前没有证据表明它们会对人体健康产生较为显著的危害。当然,功率密度过高的电磁环境会对人体产生不良的影响,不过有相关标准严格限制。在日常生活中大家还是很难有机会接触到如此强的低能电磁辐射的,因为当前城市内高功率电磁设备,如基站、电视信号发射塔等,在建设之前均需要专业机构出具环评报告以确认其对环境影响极低。我国采用的电磁辐射控制标准可以参看我国生态环境部与国家质量监督检验检疫总局发布的《电磁环境控制限值》^[1]。因此,大家在正常的生产生活中并不需要担心低能电磁辐射的健康风险问题,除非你是射电天文学家,会因为电磁污染破坏了你的观测结果而感到心梗,或者你对电气设备的电流噪声感到抓狂。

对本文而言,如非特别说明,后文所说的“辐射”都专指电离辐射。

电离辐射对生物体产生的损害是对遗传物质,也就是 DNA 的损害。损害方式主要有两种。一种是直接电离(direct ionization),往往发生于 α 辐射、 β 辐射与部分 X 射线辐射中,这时入射粒子直接电离 DNA 分子,破坏其结构。另一种是间接

电离(indirect ionization),通常发生于 γ 辐射,这时辐射粒子并不能直接电离 DNA 分子,而是作用于细胞中的水分子生成自由基,这些自由基再去破坏 DNA 分子结构(见图 2)。

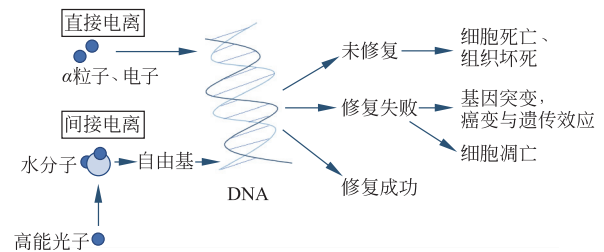


图 2 电离辐射作用于遗传物质示意图

在细胞内,当 DNA 受到破坏之后,是存在修复机制的。有一种修复蛋白(repair protein)均匀分布于细胞中,它们能够逐渐修复受损的 DNA。但修复也是需要时间的,因此如果辐射过强、持续时间过长或间隔时间过短等等,修复很可能会失败。这些修复失败的细胞可能死掉或者被清除掉,也有可能将受损的遗传物质代代传递下去。无法完成复制或死掉的细胞导致了组织的坏死,遗传物质受损而未被修复的细胞持续分裂则有可能导致癌变与遗传效应。

因此,我们看到,辐射对生物体的损伤效应分为两类。一类称为确定性效应(deterministic effects),例如皮肤灼伤、白内障和急性辐射综合征(acute radiation syndrome)等。还有一类称为随机性效应(stochastic effects),包括癌变和遗传效应。确定性效应在普通人的日常生活中很难遇到,因为它需要接受足够多的辐射才会产生。这种效应也被应用于灭菌与放疗(例如针对癌症的放射治疗,利用辐射杀伤癌细胞)。而平常大家对辐射这一话题最关心的则是随机性效应产生的危害,尤其是癌变。

那么,辐射与癌变等生理损伤究竟有怎样的关系呢?受到辐射就一定癌变吗?这就需要引入剂量这一概念了。剂量可以用来衡量辐射对人体的危险程度。

2 辐射的剂量

出于辐射计量与辐射防护在许多不同场景下的需要,物理学家们为辐射的度量引入了吸收剂

量等剂量的概念。

吸收剂量(absorbed dose),是一个纯物理的概念,定义是单位质量的介质中沉积的辐射能量,

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}, \text{单位是戈瑞(Gray, Gy)。} 1\text{Gy} = 1\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

它直接衡量了人体所受到的辐射影响的强度。对于一个全身暴露于辐射之中的人,危险剂量的阈值是 0.5Gy,而半数致死剂量(semi-lethal dose)是 5Gy。

由于不同种类的入射粒子,或者说不同种类的辐射,对人体的伤害能力是不同的(为什么不同呢?此问题留给读者下来思考),人们又引入了当量剂量(equivalent dose)的概念。当量剂量的定义是对某个组织或者器官内受到所受各种类辐射的平均吸收剂量的加权求和, $H_T = \sum_R w_R D_{RT}$ 。其中 w_R 是不同粒子(以下标 R 指代)的辐射权重因子, D_{RT} 是该组织或器官(以下标 T 指代)内的某种辐射粒子的平均吸收剂量。表 1 为不同辐射粒子的权重因子 w_R 。

表 1 不同辐射粒子的权重因子 w_R

辐射粒子种类	辐射权重因子 w_R
光子、电子	1
质子	2
α 粒子	20
中子	较复杂,总体在 2.5~22 之间

显然,权重因子越大,表明此种辐射对细胞的伤害能力越强。当量剂量的单位是希沃特(Sievert, Sv)。例如,一个组织或器官受到 1Gy 的 α 辐射或 β 辐射,那么它受到辐射的当量剂量便分别是 20Sv 或 1Sv。注意,还有一个概念叫剂量当量,包括周围剂量当量(ambient dose equivalent)与个人剂量当量(personal dose equivalent),与当量剂量是不同的。此处我们不介绍剂量当量,因为它是放射测量学中引入的概念,此处暂不涉及。

为了更好描述整个人体受到辐射的影响,人们更进一步地引入了有效剂量(effect dose)的概念。这是因为人体不同部位受到辐射产生的伤害效果是不同的,比如骨髓受到辐射产生的伤害就大于膀胱受到辐射产生的伤害。有效剂量的值是各部位的当量剂量按照一定的组织权重因子进行加权求和的结果, $E = \sum_T w_T H_T$, 单位仍然是希沃

特(Sv)。对于全身辐射,权重因子就是 1。这些权重因子的值是由国际放射防护委员会 ICRP 制定的,制定的依据是对全人口辐射危害(detriment)的统计结果,并且没有将前文所说的确定性效应包括在内。表 2 给出了部分人体组织的权重因子 w_T 。

表 2 部分人体组织的权重因子 w_T [2]

人体组织名称	组织权重因子 w_T
(红)骨髓	0.12
结肠	0.12
肺	0.12
胃	0.12
生殖腺	0.08
膀胱	0.04
肝	0.04
食道	0.04
甲状腺	0.04
大脑	0.01
皮肤	0.01

需要说明的是,对不同种类辐射与不同组织或器官的吸收剂量进行求和以计算当量剂量与有效剂量的方法,是基于线性无阈假说(linear no-threshold model)的。该假说也是目前世界各国进行公众辐射管理所采用的依据。在此假说下,辐射带来的健康风险与剂量成正比,每 100mSv 的有效剂量会增加 1% 的癌症风险。然而,在低剂量辐射的研究中,这一假说是存在争议的。例如,位于伊朗的拉姆萨尔(Ramsar)有着全世界最高的天然辐射量本底(这一概念将在后文介绍),高于世界平均值数十倍,每人每年平均辐射量可以达到 260mSv。然而,目前在当地并没有观察到统计显著的高癌症发病率。甚至有观点认为,接受一定的低剂量辐射是对健康有益的。目前相关讨论仍在学界进行。

现在,有了剂量的度量,我们就能来探讨辐射对人体的危害了。人们无时无刻不受着辐射。一段时间内,当辐射剂量在一定水平之下时,我们无需为此担忧。当辐射剂量超过一定水平,就会对人体产生显著的伤害,我们需要加以防护。

3 生活中的辐射

辐射离我们并不遥远,因为每个人在日常生

活中每时每刻都受着辐射。这些辐射是不可避免的,主要来自于自然界。它们主要包括宇宙线辐射、陆地辐射(terrestrial radiation)、吸入或食用的带放射性物质这几大自然来源。这些辐射构成了针对大众的辐射防护领域的所谓天然辐射量本底(natural radiation background)。近现代以来,人类社会进行的多次核试验与发生的核事故同样构成了日常辐射的来源,所幸监测显示这部分辐射的影响在逐年减弱。

关于大众日常所接受的辐射量的统计,我们可以引用联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)的统计数据。一般而言,天然辐射本底造成的大众的年平均剂量为 2.4mSv。这部分就是生活在地球上必然会接受的辐射。

在这 2.4mSv 的年平均辐射量本底中,氡气的辐射是最显著的。氡气是一种天然存在于空气中的气体,属于吸入的带放射性物质。一个人平均每年受到的氡气辐射剂量约为 1.26mSv。这一数值在不同地区差异很大,与房屋的通风条件、建筑材料也有关系,其典型值在 0.2~10mSv 之间变化。氡气主要是 α 射线。 α 射线的穿透能力很弱,打到人体身上,基本上还没穿透皮肤表面那层死皮就没了。可是,氡气会被人体吸入,直接到达肺部,产生内照射(internal exposure),严重的可以导致肺癌。

宇宙线辐射来源于太阳、超新星爆发与一些暂时未明的系外来源。宇宙线辐射是很强的,但由于地磁场与大气层的保护,来到地表的辐射已经大大减弱。一个在地球上生活的人每年受到的宇宙线辐射约为 0.39mSv,这个数值在不同纬度、海拔略有不同。值得一提的是,长途飞行会增加宇宙线辐射量。譬如一趟 10 小时的洲际航班所受辐射的典型值是 0.03mSv。

陆地辐射主要来源于地层中的钾-40、铀-238 及其衰变产物、钍-232 及其衰变产物。这些放射性核素普遍存在于自然界中。每年每人平均受到该来源辐射 0.48mSv。而吸入的空气和日常的食物中含有的放射性核素也会带来辐射剂量的贡献。这部分的年辐射量约为 0.29mSv。

有趣的是,在其他一些零散的辐射来源中,包括了人体自身的辐射。因为人体内是含有碳-14 和钾-40 的,它们会放射出 β 射线与 γ 射线。一个人每年受到自己的辐射大约在 0.4mSv 级别。同样的,每个人也都会对其他人产生微量的辐射,因

为人体内产生的 β 射线固然很难穿透人的身体,穿透能力强的 γ 射线却并不会在人体内消耗殆尽,它们会继续向外放射。

根据前文提到的线性无阈假说,辐射剂量越高健康风险越高,因此人们在本底之上制定了法定的年照射剂量限值。这是一个推定的安全上限。在我国,根据国家标准 GB 18871—2002 规定,对普通人,是每年有效剂量 1mSv,而对由于工作需要会长期接触放射源的专业人士,是每年有效剂量 20mSv^[3]。只要不超过这个限值,都不用担心健康风险。

在现代社会,还有一类辐射对人们的日常生活非常重要,也受到人们很高的关注,那就是医疗中的辐射暴露。现代医学借助放射学的原理实现了多种多样的造影成像技术,在极大提升了诊疗水平的同时,也给患者带来了辐射危害方面的顾虑。接受放射科的检查,会给我们的身体带来损害吗?通过有效剂量,我们可以衡量这些检查项目的健康风险。表 3 给出了部分医学成像项目的辐射剂量。

表 3 部分医学成像项目的辐射剂量^[4]

放射成像项目	有效剂量/mSv
胸部拍片	<0.1
腹部拍片	0.1~10
钡餐	1~10
头部 CT	1~10
SPECT 成像	1~10
胸部 CT	10~100
腹部 CT	10~100

对于普通的拍片,其剂量都很微弱。例如拍胸片,一次胸片所受到的辐射在 0.1mSv 以下。每两周拍一次的话,一年下来的量和天然辐射本底相当。大家也不是没事儿就去拍一张,因此,需要作此检查时也不必感到害怕。而 PET 成像与 CT 等断层扫描技术的辐射量是较大的,在 10~15mSv 之间,因此如非必要,建议每次检查至少间隔四五年。

另外,需要注意的是,核磁共振或磁共振成像(MRI)并不是利用放射性物质成像,因此没有辐射。

放疗并不包括在公众防护意义的医疗辐射暴露的讨论之中。

(下转第 178 页)

3) 物理之和谐统一美

自然界中的和谐统一美,在物理规律中充分的体现。三大守恒定律将物质、能量、动量协调统一,形成一种极具美感的科学体系。自然界是和谐统一的,物理定律都是由自然界而来。所以,物理规律往往具有普适性、普遍性。统一性的思想对于物理学的发展至关重要,也正是因为这种思想的引导,使人们对物理的和谐统一美愈加着迷。

4 结语

在全面、辩证地分析课程的性质、目标、内容的基础上,在保证课程水准的基础上,我们丰富背景资料、挖掘育人精华,在课程学习中恰到好处地融入课程思政元素。在专业知识传授的同时,从学科的思维与理解、科学态度、人文素养、家国情怀、协作创新等各方向上发挥课程的价值引领作用。使学生开阔思路、广泛联想,超越了具体问题的束缚,掌握一套处理问题的科学方法论。

参 考 文 献

- [1] 习近平在全国高校思想政治工作会议上强调:把思想政治工作贯穿教育教学全过程 开创我国高等教育事业发展新局面[N]. 人民日报, 2016-12-09.
- [2] 邱伟光. 课程思政的价值意蕴与生成路径[J]. 思想理论教

育, 2017,(7):10-14.

- QIU W G. Value implication and generation path of Curriculum Ideology and Politics[J]. Ideological and Theoretical Education, 2017, (7): 10-14. (in Chinese)
- [3] 高德毅,宗爱东. 课程思政:有效发挥课堂育人主渠道的必然选择[J]. 思想理论教育导刊,2017(1):31-34.
- GAO D Y, ZONG A D. Curriculum Ideology and Politics: An inevitable choice of giving full play to the main channel of classroom education[J]. Leading Journal of Ideological & Theoretical Education, 2017(1): 31-34. (in Chinese)
- [4] 张焕庭. 西方自残阶级教育论著选[M]. 北京:人民教育出版社,1964.
- [5] 李砚祖. 艺术与科学[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [6] 恩格斯. 自然辩证法[M]. 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局, 编译. 北京:人民出版社, 2018.
- [7] 弗洛里斯·科恩. 世界的重新创造:近代科学是如何产生的[M]. 张卜天, 译. 长沙:湖南科学技术出版, 2012.
- [8] 郝刘祥. 自然的数学化关于科学革命编史纲领的探讨[J]. 科学文化评论, 2014, 11(5): 5-23.
- HAO L X. The mathematization of nature: An inquiry into a historiographical issue of the scientific revolution[J]. Science & Culture Review, 2014, 11(5): 5-23. (in Chinese)
- [9] 关小蓉. 时空观的三次变革及其产生的影响[J]. 玉林师专学报(自然科学版), 1998,(3):44-47.
- GUAN X R. Three changes of space-time concept and their influence[J]. Journal of Yulin Teachers College (Natural Science), 1998,19(3): 44-47. (in Chinese)

(上接第 171 页)

4 辐射影响生活的其他方面

除了大家关心较多的日常生活中的辐射风险之外,辐射在其他很多方面都扮演着重要的角色。

在食品工业中,辐射处理,即使用射线辐照食品,被广泛应用。在绝大多数欧美国家与我国,食品工业的辐射处理都是被许可甚至有商业应用的。食品的辐射处理主要是为了杀灭寄生虫、灭菌、保鲜。经过规范辐射处理的食物是完全安全的。

除去食品,利用辐射进行消毒灭菌处理也广泛应用于其他工业产品,例如医学上使用的防护用品。在新冠疫情期间,使用辐射处理防护服等医疗用品,比传统化学方法具有更快的速度,有力地支持了抗疫工作。

而天然辐射量本底中的一项重要来源,宇宙线辐射,则是妨碍人类太空旅行的一个重要因素。

对国际空间站的宇航员的统计表明,在国际空间站逗留六个月所受到的辐射量约为 80~160mSv。国际空间站虽然处在大气层外,但它还处于地磁场的保护之下,并且舱体也有辐射防护措施。当人类向更深空进发,将生活的领域扩展至地球之外,宇宙线辐射的威胁将更大,辐射防护将是一个重要的课题。

参 考 文 献

- [1] GB 8702—2014, 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 电磁环境控制限制[S]. 2014.
- [2] The Swiss Federal Council. Radiological Protection Ordinance[Z]. 2017: 118-119.
- [3] GB 18871-2000, 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 2002.
- [4] HARRISON J D, BALONOV M, BOCHUD F, et al. ICRP Publication 147: Use of Dose Quantities in Radiological Protection. Annals of the ICRP 50(1)[R]. Ottawa: ICRP, 2021.