

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202006072

www.dxhx.pku.edu.cn

## 一眼看透你——X 射线

张万群\*, 邵伟, 兰泉, 朱平平

化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230026

**摘要:** X 射线是一种电磁波。虽然其存在固有的危险性, 但对人类的生活与生产有着重要的作用。本文以 X 射线自述的形式生动地介绍了 X 射线的发现、本质、特性和科学应用, 让读者对 X 射线具有正确的认知。

**关键词:** X 射线; 辐射; 性质; 应用

**中图分类号:** G64; O6

## Light That See through You: X-ray

Wanqun Zhang\*, Wei Shao, Quan Lan, Pingping Zhu

National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China),  
Hefei 230026, P. R. China.

**Abstract:** X-ray is an electromagnetic wave. Although it is inherently dangerous, it plays an important role in human life and production. In this paper, the discovery, essence, characteristics and scientific application of X-rays are vividly introduced in a self-reported tone, so that readers have a correct understanding of X-rays.

**Key Words:** X-ray; Radium; Property; Application

小红咳嗽好几天了, 也不见好, 小红妈妈带她到医院看病。医生了解病情后告诉他妈妈, 小红需要做个 X 射线透视检查。到了医院放射科, 小红妈妈急切地询问放射科张医生, X 射线检查对小孩身体有影响吗? 有多大影响? 放射科张医生告诉小红妈妈, 他这里每天有很多病人到放射科做各种检查, 如 X 射线透视、消化道钡餐以及各种造影等。病人经常会提出这样或者那样的问题, 其中最多、最普遍的问题是这些检查对健康有多大影响。要回答这个问题不是简单一句话就能说明白的, 具体情况要具体分析, 还是让 X 射线自己做个介绍吧。

### 1 我的发现

我在宇宙之中, 无处不在, 很久以来, 只不过人们没有发现我而已。时钟退回到 1895 年 11 月 8 日。这天, 德国物理学家伦琴在他的实验室中使用阴极射线管, 这种仪器类似于现在的荧光灯灯管。他抽空了管内所有空气, 充满了特殊的气体, 并通过高压, 灯管会发出荧光。伦琴用厚厚的黑纸屏蔽了灯管, 他注意到约 1 米外的涂有铂氰化钡(一种用于照相板的荧光材料)屏幕上发出微弱的绿色光芒。伦琴意识到从管子发出的一些人眼不可见射线正穿过纸板, 使屏幕发光。他第一次发现了我的踪影, 但他不相信自己所看到的, 而是花了很多时间严格测试和记录这奇怪的光线, 最终他意识到我的存在。通过其他实验, 他还发现, 我可以穿过大多数物质, 在胶片上投射出固体物体的

收稿: 2020-06-24; 录用: 2020-07-31; 网络发表: 2020-08-20

\*通讯作者, Email: wqz@ustc.edu.cn

基金资助: 中国科学院 2018 年度科普项目(2018D0038); 中国科学院 2019 年度科普项目(KP57)

阴影。他给我取了个名字，叫 X 射线，因为在数学中“X”用于表示未知量<sup>[1]</sup>。

伦琴于 1895 年末得到第一张关于人体的 X 射线透视影像，即他的妻子贝莎(Bertha)戴着戒指手的影像(图 1)。伦琴发现我的新闻迅速传遍了世界，各地的科学家都可以重复他的实验，因此我也被世界所知晓。



图 1 威廉·伦琴和他拍摄的他的妻子戴着戒指手的 X 射线照片<sup>[2]</sup>

## 2 我的产生

我的产生方法是通过灯丝加热放出热电子，电子通过高压电场加速，加速后的电子撞击金属靶，见图 2。撞击过程中，电子突然减速，其损失的动能会以光子形式放出，形成 X 射线光谱的连续部分，称之为轫致辐射。通过加大加速电压，电子携带的能量增大，则有可能将金属原子的内层电子撞出。外层电子跃迁回内层，同时放出光子。由于外层电子跃迁放出的能量是量子化的，所以放出的光子的波长也集中在某些部分，形成了 X 射线谱中的特征线，此称为特征辐射。

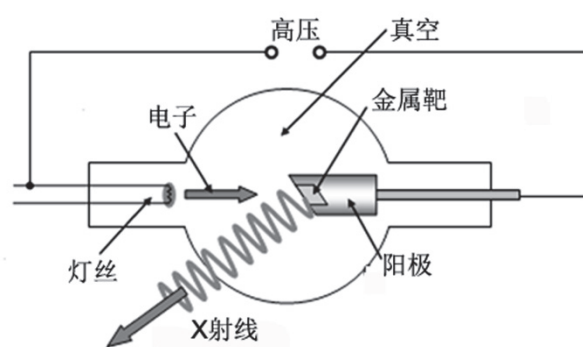
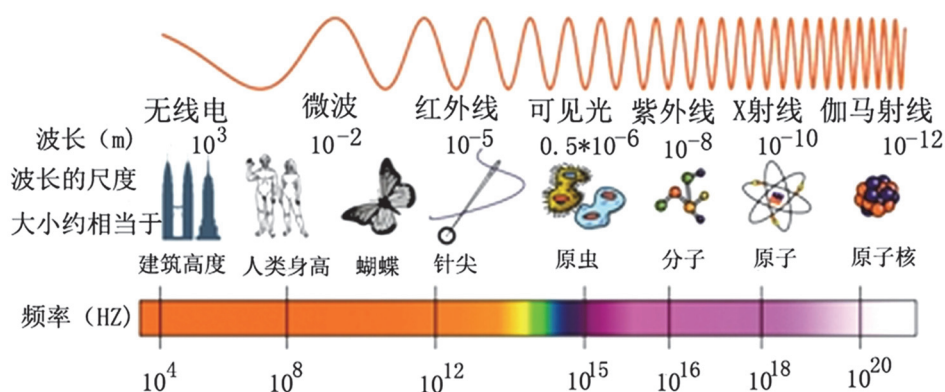


图 2 X 射线产生示意图

## 3 我的本质

现在人们都知道，我是一种不可见光，具有光的一切通性。我作为一种电磁波，具有波粒二象性，既可以把我当作波来讨论，也可以当作粒子来讨论，这也就是为什么我也被称为 X 光子的原因。电磁波谱中，我的能量通常介于紫外线和  $\gamma$  射线之间。我和紫外线、 $\gamma$  射线一样，由于光子能量高，能使物质电离，因此都属于电离辐射(图 3)。

图3 电磁波谱的分布<sup>[3]</sup>

#### 4 我的特性

我的波长很短( $0.001\text{--}10\text{ nm}$ <sup>[4]</sup>), 能量大, 故穿透物质的能力强。我对物质的穿透性不仅与自身的能量有关, 还与被穿透物质的性质、结构有关。一般原子序数大的物质密度大, 吸收 X 射线多, 我对这种物质的穿透性就差。如在人体组织中骨骼和牙齿的密度大, 含钙量最高的组织, 钙的原子序数又较大, 所以我对它的穿透性较差。软组织以及体液, 是由碳、氢、氧、氮等原子序数小的原子组成, 我对它们的穿透性比骨骼强。脂肪组织的原子成分和软组织相似, 但排列不紧密, 密度比软组织小, X 射线的透过性较好。我对人体的这种穿透性和衰减差别, 就是 X 射线透视和摄影时在荧光屏和胶片上构成不同组织器官影像的基础。

由于我具有穿透性, 人们看不见摸不着, 而且穿透人体时, 人们又毫无察觉, 因而人体对其失去本能自我保护能力, 这就需要事先采取安全防护措施。根据我对材料穿透性差别, 选择一些屏蔽防护材料。铅(原子序数 82, 密度  $11.344\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )有耐腐蚀和强衰减 X 射线的特性, 是一种良好的屏蔽材料。含铅的制品在 X 射线的防护中有着重要的作用, 如含铅橡胶制成铅手套、铅橡胶挂帘、铅橡胶围裙、铅玻璃和各种含铅材料个人防护用品等。

我具有很高的能量, 能激发某些物质如硫化锌、铂氰化钡及钨酸钙等发出肉眼可见的荧光。物质受到我照射后, 其原子被激发或电离, 当恢复到基态时, 便释放出波长位于电磁波谱中可见光和紫外线之间的荧光。人们利用我这一特性, 制造出多种显示屏, 如 X 射线机上的荧光屏、增感屏和影像增强器中的输入屏、输出屏等。

我有足够能量的 X 射线光子, 使物质电离。电离作用也是 X 射线治疗肿瘤和 X 射线损伤的物理基础。我不仅能使物质原子的核外电子脱离原子核的束缚, 离开原子成为自由电子, 使物质电离, 而且脱离了原子的自由电子还能与物质的其他原子相互作用, 使其产生二次电离。X 射线光电子能谱(XPS)就是利用我使原子电离, 并且激发出俄歇电子, 探测非键的内层电子, 用于元素的定性、定量和价态的分析测量。

我与可见光一样, 可使摄影用的胶片感光。胶片乳剂中的溴化银受 X 射线照射后感光, 经化学显影, 还原出黑色的金属银颗粒。胶片的黑度取决于感光程度。X 射线对物体的穿透性不同, 在 X 射线胶片上的感光程度就不同, 这样就使物体组织的影像出现在胶片上。利用我的穿透性感光作用, 可进行 X 射线摄影。

我对有机体会产生生物效应。当我照射机体时, 由于机体吸收了能量而产生电离作用, 导致化学键断裂, 分子结构的改变, 在组织细胞和体液内产生一系列生理、生化代谢改变, 使有机体细胞受到抑制、损伤、甚至死亡。我对有机体损伤的程度取决于有机体对我吸收量的大小和细胞的种类等。人们可利用我的生物效应来破坏肿瘤组织进行放射治疗。我对人体的正常组织也有一定的损伤作用, 因此必须注意安全防护。

## 5 我的应用历程

### 5.1 早期不正当的应用

早期, 看不见的我具有穿透固体物质的能力, 并能拍摄骨骼和身体内部部位的照片, 吸引了公众的眼球。人们对我在医学和外科手术中的潜在应用产生了极大的热情。这项发现宣布后的一个月, 在欧洲和美国就有医生利用我从事医学照相, 来指导他们的工作。1896 年 6 月, 也就是伦琴宣布他的发现仅 6 个月后, 战场医生就用我在受伤的士兵体内中找到子弹。

随后, 实验人员、医师和物理学家们都建立了我的发生装置, 并开始了他们的工作, 而不担心我潜在的危险, 特别在医学和日常生活中对我的不正当使用。例如人们使用我来为婴儿拍摄全身 X 光片、我的摄影技术用于选美比赛(图 4)。早期欧洲一些妇女将我拍摄的 X 光片作为礼物送给友人, 在毫无防护情况下用我来治疗偏头痛、脊柱炎、肺结核等<sup>[5]</sup>。即使在 20 世纪三、四十年代, 许多美国鞋店都配备了鞋型荧光镜, 它们使用我让顾客能够看到脚上的骨头, 来确定鞋子大小(图 4)。直到五十年代, 这种做法才被确定为是具有风险的业务。由于对我生物效应不了解、不重视, 不可避免地, 早期我的广泛无限制地使用给人们身体造成了严重的伤害, 开始有公开报告我对身体的可怕影响: 皮肤灼伤, 脱发和癌症。



图 4 20 世纪四、五十年代 X 射线试鞋机广告和 X 射线选美照片<sup>[6,7]</sup>

### 5.2 今天科学、合理的应用

#### 5.2.1 医学方面

近 30 年来借助于影像学的迅速发展, 新技术不断涌现, 我在临床应用的范围不断扩大, 医学影像学已成为医学领域中发展最快的学科之一。我的家族成员越来越多, 有普通 X 射线机、数字化 X 射线机(CR、DR、DSA)和 X 射线计算机断层扫描(X 射线-CT)等。

在早期大量剂量反应数据积累的基础上, 今天关于我对分子、细胞和器官系统的辐射损伤机理, 人们已有了清楚认识。随着技术的发展, 人们利用各种方法, 在确保检查质量的前提下, 尽量降低检查剂量(剂量是电离效应量, 它与我作用于物体作用的强度和时间积累成正比), 例如: 缩小投照视野、最合适曝光条件和我敏感部位遮盖防护用品等。

其实生活在地球上的人类所有人每时每刻都受到来自太阳、地球, 甚至人体中某些天然化学物质的自然辐射。在中国, 平均自然本底辐射为每年有效剂量约 2.1 mSv<sup>[8]</sup>(mSv 是生物体遭受射线辐射的剂量当量的单位), 那是人们无法避免的辐射。表 1 为联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR) 2000 年度报告关于我的世界医用检查的频率和每项检查的有效剂量。

表 1 世界医用 X 射线检查的频率和每项检查的有效剂量

| 检查名称      | 每一千人口检查次数 | 每次检查有效剂量/mSv |
|-----------|-----------|--------------|
| 胸部 X 射线摄影 | 87        | 0.14         |
| 胸部 X 射线透视 | 37        | 1.1          |
| 腰椎        | 15        | 1.8          |
| 胸椎        | 4.1       | 1.4          |
| 骨盆和腹部     | 11        | 0.83         |
| 上肠胃道      | 13        | 3.7          |
| 下肠胃道      | 3.4       | 6.4          |
| 尿路造影      | 3.8       | 3.7          |
| CT        | 16        | 8.6          |
| 血管造影      | 2.1       | 12           |
| 介入治疗      | 0.84      | 20           |

从表 1 一目了然,我的一次简单的胸部检查可使一个人平均暴露于 0.14 mSv,远小于一年自然本底辐射量。CT 扫描的辐射要大得多,达到 8.6 mSv。检查次数越多,你的一生暴露辐射量就越高,因此风险也就越高。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002),对居民的有效剂量限值为:每年 1 mSv,此值为连续 5 年的平均值。大家不必过于担心,从上表可看出,无论每次检查的有效剂量,还是每人接受检查的频率都是比较低的。

### 5.2.2 安全检查

利用我照射物品透射出来的强度来反映物品内部结构信息,采用 X 射线扫描成像技术对机场、铁路终点站和其他地方的乘客的行李进行安全检测。行李安检时对成像质量的要求没有医学上那样高,我的强度要小得多。假设每天每位旅客行李包安检时接近安检系统入口和出口时间约为 10 秒,每天 2 次安检,由此可估算公众个人每年由此增加的辐射剂量约为 0.009 mSv<sup>[9]</sup>。

### 5.2.3 天文学

X 射线望远镜从太空收集来自天空特定区域的 X 光子。将 X 光子定向到检测器上,在此将其吸收,并记录各个光子的能量、时间和方向。这样的测量可以提供有关遥远天体的组成、温度和密度的线索。例如,我国的“慧眼”便是一颗 X 射线天文卫星,可以帮助科学家们发现一批新的天体源,尤其是以中子星和黑洞为主的新的 高能天体。

### 5.2.4 工业用途

利用我穿透材料和材料的衰减特性来发现缺陷。我能检查金属和非金属材料及制品的内部缺陷。这种无损检测被广泛应用于各类锅炉、管道、压力容器等的生产中,主要是检查焊接的裂纹、缝隙等,保证这些设备在一定的压力下正常运行。

### 5.2.5 材料微结构分析

我和普通光一样,具有干涉、衍射、反射、折射性质。这些性质在显微镜、波长测定和物质结构分析中都得到广泛应用。其中我的衍射技术在化学、生物化学、物理、材料和矿物科学领域具有广泛的应用。我对晶体衍射的发现者——德国物理学家劳埃(Laue)在 1937 年声称,该技术“已将观察微小结构的能力扩展到超过显微镜的一万倍”。

我的衍射类似于具有原子级分辨率的显微镜。当作为电磁波的我照射到晶体时,晶体中原子产生散射。由于晶体中原子周期性排列,原子间距离与入射 X 射线波长有相同数量级,散射的 X 射线相互干涉,在某些方向上相位得到加强,而在某些方向上相互抵消,从而出现衍射现象。人们通过测量这些衍射的方向和强度,并根据晶体学理论可推导出晶体中原子的排列情况。如单晶 X 射线衍

射仪(图 5)用于测定单晶分子的准确三维立体结构(包括键长、键角、构型、构像及成键电子密度等)及分子在晶格中的排列状况(图 6),被广泛应用于化学学科、材料学科、生物学小分子晶体的结构测定和表征。可见,X 射线衍射犹如给观察者戴上了一副特别的“眼镜”,可以通过“透视”来“感知”原子在晶体材料中的原子及电子分布。

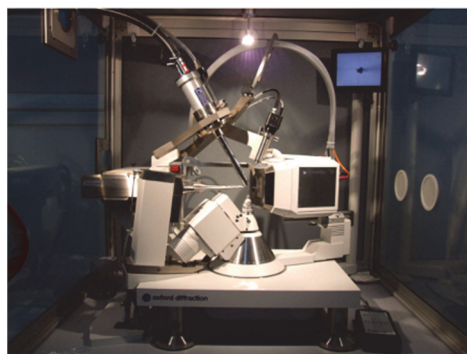


图 5 X 射线单晶衍射仪

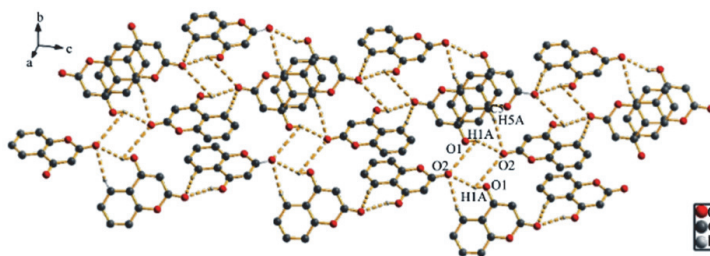


图 6 4-羟基香豆素化合物的二维网络晶体结构图<sup>[10]</sup>

## 6 结语

爱因斯坦说过:“科学技术,这种强有力手段,究竟是给人类带来幸福还是带来灾难,应取决于人自己”。我的发现成为 19 世纪末物理学的三大发现(X 射线 1895 年、放射线 1896 年、电子 1897 年),对物理学、化学、生物学和医学等都产生了深刻的影响。随着人们对我的认知不断深入,使我在各个行业得到更加科学的应用。我相信大家会逐渐以正确的心态看待我,成为人类好朋友,你说的是吗?

## 参 考 文 献

- [1] 苑红霞. X 射线的发现及其早期研究的历史回顾[D]. 北京:首都师范大学, 2003.
- [2] 人类群星闪耀(75)——伦琴 人类第一张“X”光片,是带着戒指的手. [2020-06-22]. [http://www.360doc.com/content/19/0718/16/18841360\\_849587448.shtml](http://www.360doc.com/content/19/0718/16/18841360_849587448.shtml).
- [3] “慧眼”独具 给宇宙来张 X 光“留影”. [2020-06-22]. [http://www.kepuchina.cn/qykj/hkht/201707/t20170705\\_208565.shtml](http://www.kepuchina.cn/qykj/hkht/201707/t20170705_208565.shtml).
- [4] 苏浩,王鹏飞,李晖. 大学化学, **2019**, 34 (2), 30.
- [5] Rheunmtism, F. J. *Rheunmtism* **1964**, 20, 28.
- [6] 1940s: Remembering When Stores Used X-ray Machines to Fit Shoes. [2020-06-22]. <https://www.syracuse.com/living/2019/05/1940s-remembering-when-stores-used-x-ray-machines-to-fit-shoes.html>.
- [7] You Think Beauty Is Skin Deep? You're Not a Chiropractor. [2020-06-22]. <https://www.npr.org/sections/health-shots/2012/07/13/156718782/you-think-beauty-is-skin-deep-youre-not-a-chiropractor>.
- [8] 周湘艳,吕慧敏,李文红,邹跃,刘丽宏,梁小芳,尚兵. 癌变·畸变·突变, **2011**, 23 (6), 476.
- [9] 王桂敏,姜永根,孙中兴,王彦梅. 环境与职业医学, **2015**, 32 (12), 1117.
- [10] 聂迎芳,史久洲,孙露,卢雯. 广州化学, **2020**, No. 1, 50. [http://www.360doc.com/content/19/0718/16/18841360\\_849587448.shtml](http://www.360doc.com/content/19/0718/16/18841360_849587448.shtml).