知识介绍 研究综述

挖掘同步辐射光源中的高中物理教学素材

张燕怡

（中国人民大学附属中学　北京　100080）

（收稿日期：2021－12－14）

摘　要：2021 年高考北京物理选择压轴题以同步辐射光源为情境命题，使广大中学师生了解到了这一大型科研工程案例. 笔者曾有幸参观第三代同步辐射光源“上海光源”，并查阅了相关资料，从同步辐射的原理、发现、特点、发展历史、应用举例等方面入手，对同步辐射光源进行了科普，并思考、挖掘了将这一素材与高中教育教学挂靠结合的切入点.

关键词：同步辐射　学科前沿　大型科学工程　北京高考

1　背景介绍

高考物理北京卷的选择压轴题（2019 年前为理综卷第 20 题，2020 年后为物理学业水平等级考试第 14 题），往往以学科前沿、联系生活生产实际的新材料为背景，全面考查学生从阅读中获取新知识新信息的探究精神，以及在对概念规律深入理解的基础上综合迁移、推理、运用的能力，情境新颖有趣、区分度大，历来备受关注. 压轴题中所用到的背景素材，往往会成为各中学教师和教研团队深入研究的对象，并在后续的教学与命题中，对其进行挖掘、改造、发展和升华.

2021 年的高考物理北京卷，以在建的第四代同步辐射光源“北京光源”为情境，全面、综合考查了学生对于电磁波产生、原子发光机理（玻尔模型）、物理光学相关基本概念的理解应用能力，渗透了定量思维，同时在考题中展现了我国前沿科技发展的最新成果，又具有一定的地方特色，让“同步辐射光源”这一大规模科学重器第一次为基础教育界广大师生所知晓.

笔者曾有幸在国家第三代同步辐射光源“上海光源”进行参观学习，后续又通过查阅资料，对同步辐射的产生机理、发展历史、应用价值有了一些粗浅的认识，对如何将同步辐射素材与高中物理教学进行挂靠有了一些不成熟的思考. 本文将从以上几个方面进行回顾阐述，供各位教育界同仁参考.

2　同步辐射光源发展回顾

同步辐射（Synchrotron Radiation），是指能量很高的相对论性带电粒子，在磁场中沿弧形轨道运动时放出的电磁辐射. 19 世纪末至 20 世纪初，利纳德、斯格特等科学家预言了这种辐射，并从理论上计算了该辐射的能量辐射率、频率角分布等参数. 但由于产生辐射所需的加速器能量很高，所以直到 30 多年后的 1947 年，美国 GE 公司的科学家，才首次在 70 MeV 的同步回旋加速器上观测到这种电磁辐射，“同步辐射”也因此得名.

自然界也存在同步辐射. 1054 年，宋朝科学家观察到金牛座 M1 星系超新星爆发的遗迹并做了记录. 1946—1947 年，在英国留学的中国学者朱洪元先生研究了宇宙射线中的高能粒子在地磁场中的辐射，为同步辐射的初期研究做出了贡献.

高能物理学家们曾为加速器中的能量损失和辐射倍感苦恼，同步辐射并不是他们希望出现的东西. 但很快，其他领域的科学家们发现，同步辐射光源是一台高品质的巨型 X 光机和超级显微镜，具有高亮度、高准直性、波长可调等不可替代的优点.

（1）亮度高：普通的 X 光机，是用几千伏特的电压将带电粒子（如电子）加速到高能量，然后轰击靶材（如金属铜靶），通过碰撞的方式，让铜原子内层电

作者简介：张燕怡（1985－　），女，中教一级，主要从事初高中物理常规教学.

子跃迁，产生 X 光. 高速电子的能量，99% 都转化成了热量，效率和亮度都有局限. 而同步辐射光源产生的电磁辐射，亮度可达普通 X 光机的上亿倍.

(2) 波段宽：气体放电管和 X 光管只能在一个很弱的连续本底区域产生若干条分立的特征 X 谱线. 但在同步辐射中，可通过调节电子能量，产生从红外到 X 波段的连续光谱，并且在整个区域保持高辐射强度.

(3) 高准直性：同步辐射光源中电子以接近光速运行，辐射沿运动电荷的切向发出，并集中于以电子瞬间位置为顶点的、开口极小的锥体内(约为 10^{-4} rad)，其准直程度类似激光. 一个形象的比喻是，下雨天时高速旋转雨伞把手，辐射光子就像水滴一样沿着雨伞边缘被甩出去.

(4) 高偏振：同步辐射的振荡电场主要在电子轨道平面内振动.

(5) 以脉冲形式发射，周期短、重复性好.

(6) 高纯净：在超高真空(10^{-4} ～ 10^{-7} Pa) 的环境中产生，杂质少，作为测试手段能获取更精确的结果

……

20 世纪 70 年代后，随着人们对新型光源的需求与日俱增，同步辐射光源进入了大发展时代. 具体来说，经历了如下四代的演化.

第一代同步辐射光源，只是高能物理研究的副产物，在加速器上“寄生”运行. 我国的代表机构为北京高能物理研究所的正负电子对撞机，于 1988 年按照“一机两用”的方针建成，并于 1991 年对用户开放. 但其作为“兼职光源”，各性能参数远不能满足高端用户的需求.

第二代专用同步辐射光源，以日本东京大学 SOR、美国 NSLS、中国合肥光源为代表，经过结构和参数优化，辐射亮度有了几十到几千倍的提高，并且用光时间充裕、效率高，极大促进了交叉学科的发展交流.

第三代同步辐射光源，电子能量更高、束流发射度更小、光源亮度比二代至少高出 100 倍，可以实现如 X 射线衍射 / 相干成像、全息成像、光子吸收治疗、穆斯保尔谱学等一、二代光源无法实现的技术，进行更加细微的物质结构研究. 以上海光源、英国 DIAMOND、法国 SOLEIL、西班牙 ALBA、日本 SPRING－8 等为代表，目前全球正在运行和在建的三代光源已经超过 70 台.

第四代发展中的同步辐射光源，基于自由电子激光技术，怀柔科学城正在建设中的“北京光源”，以“世界上最高的光谱亮度”为目标，建成后将为基础科学和工程科学等领域的原创性、突破性创新研究提供重要支撑平台.

图 1 展示了同步辐射光源基本结构.

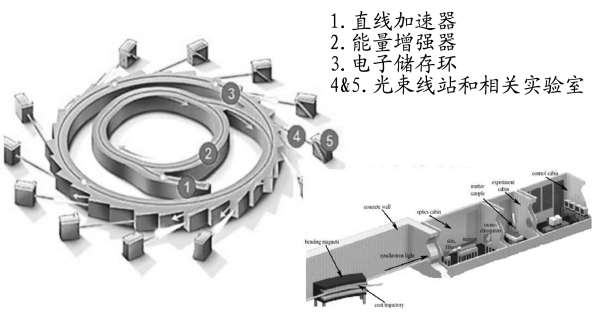

图 1　同步辐射光源基本结构(图片来自“上海光源”)

3　同步辐射光源应用举例

同步辐射光源的研究领域非常广泛，涵盖了物理、化学化工、材料科学、能源、环境、考古、纳米、生命科学、医学等，并且还在持续扩展中.

下面讨论一些可以和中学物理知识挂靠的同步辐射应用案例.

案例 1：成像

X 射线成像(以我们熟知的医用透视和安检机为例) 的基本原理，是不同材料对 X 光的穿透性和吸收能力有差异. 如果待测样品对 X 光的穿透 / 吸收能力差异不大，则普通 X 光成像技术的分辨率就会受到限制. 同步辐射具有高亮度、高准直、高偏振的特点，因此特定频率的同步辐射可以作为“准激光”使用. 利用电磁波入射到物体不同部位上引起的相位差异(而不是强度差异)，可以实现成像的高分辨、高衬度. 如图 2 显示了一只小昆虫的内部器官结构.

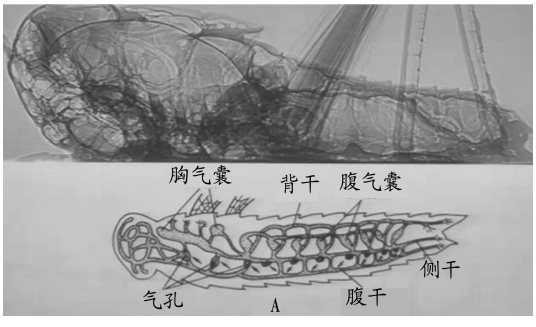

图 2　利用同步辐射对昆虫内部器官结构成像
(图片来自“上海光源”)

案例 2:光谱分析

通过玻尔模型可以知道,每种元素都有和原子结构相对应的特征谱线,光谱分析可用于鉴别未知物质的化学组成.而同步辐射光源因其波段宽、亮度高,可以精确检测出含量极其微量的化学成分,最低可达 10^{-15} g.

案例 3:物质结构分析

测量物质晶格常数的常见方法是 X 射线衍射(XRD),从中学生可以理解的角度出发,可以将 XRD 中典型的 $\theta \sim 2\theta$ 扫描基本原理简化如下(图 3):X 光斜入射到晶体上,在两层晶面间反射,两束反射光存在光程差(相位差),若光程差恰好为波长的整数倍,则干涉加强,在反射光角度上会测到一个光强的峰值.干涉加强的条件为 $2d\sin\theta = k\lambda$.其中,d 为晶面间距,k 为整数.

实际情况,光强峰值其实是入射 X 光经晶体中各分立的原子分子散射后再叠加的结果,但可以证明,以上公式在计算晶格常数时仍然成立,被称作布拉格条件.

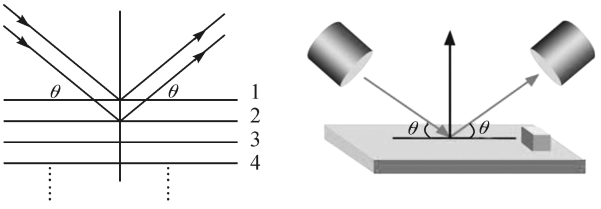

图 3　XRD 技术测量晶体结构原理示意图

显然,衍射峰的信号强度和入射光强度呈正相关.若所探测的物质含量很少,就需要更强的入射光,才能探测到代表性的信号.例如在结构生物学领域,大分子蛋白具有晶体脆弱、分子量大、晶体衍射各向异性差别大等特点,为得到高质量的数据,对衍射光源的准直性、光斑尺寸、稳定性等有很高要求.传统的 XRD 技术,有入射光频率固定、亮度有限的局限性,而同步辐射光源的出现,完美解决了这一难题.

4　思考与展望

基础物理教育以牛顿力学和经典电磁学为主体进行深入应用和扩展,对热学、光学、原子物理相关知识以了解理解为主,模型理想化,具有普适性,符合学生日常生活经验;而前沿科技主要基于近代物理中的量子力学和相对论得以发展,内容艰深、往往与常识相悖,一旦涉及技术领域,又细节繁多.两者看似天差地别,但很多时候也会共享一些基本原理.通过提炼本质、有所取舍,把前沿科技素材纳入中学物理教学,符合新课改、新高考的方向.

通过前面两部分的介绍,可以梳理出高中物理与同步辐射情境进行挂靠的相关知识点(图 4),分成如下 3 大类.

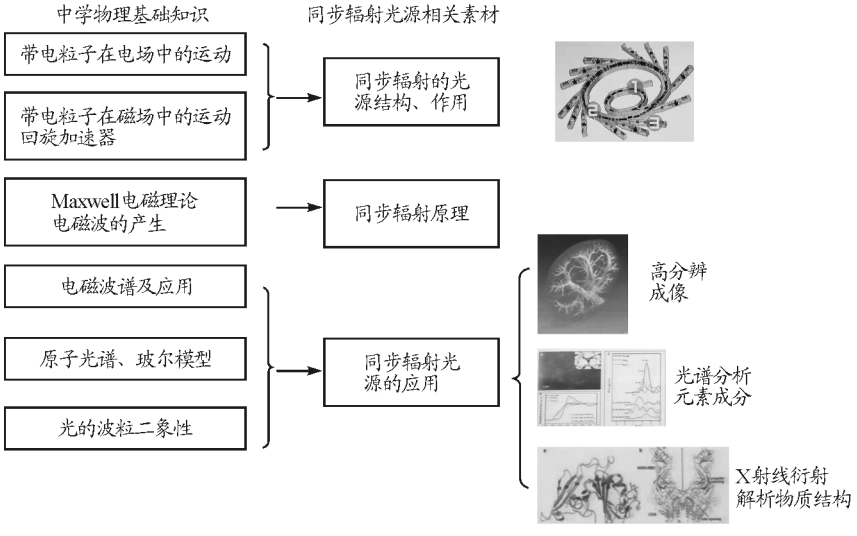

图 4　高中物理知识点与同步辐射情境的挂靠

以上素材，可以适当进行模型简化，让学生在实际情景下对概念规律进行深入的理解、应用和迁移，另一方面，也可以以科技文阅读的形式，培养学生从材料中提取信息、并利用所学知识进行分析推理的能力. 2021 年的高考物理北京卷，就是一个有益的尝试.

另一方面，同步辐射光源也蕴含着丰富的科学－技术－社会－环境素材：

(1) 同步辐射的发现历史，遵循“理论预言—实验验证—失败—实验改进—再验证—成功”的科学探究规律，有助于培养学生的探究精神、证据意识，学习科学先驱不屈不饶的精神品格.

(2) 同步辐射从高能物理加速器能量损失的“罪魁祸首”，变成各领域科学家心之所向的“梦幻之光”，这一史实可引导学生进行辩证思考，科学发现如何能够兴利除弊，变“废”为宝.

(3) 以“上海光源”从提议到运行近 20 年的历史、从动工到竣工经历 6 年的建造过程为素材，学生可以了解大型科学工程从立项、论证、奠基、建设、验收……整个流程会遇到的方方面面的问题与困难，明白“国之重器”背后是千万人的努力，非一日之功.

(4)“上海光源”建成后，《自然》杂志以“中国加入世界级同步辐射俱乐部”为题进行了宣传和报道，各领域科学家汇集与此，各学科前沿成果不断涌现…… 这一事实充分说明了大型科研仪器不仅有力推动了科技发展，也在提高综合国力方面发挥了巨大作用.

(5)“上海光源”的外观被设计为优美的“鹦鹉螺”造型(出自凡尔纳科幻小说中的“鹦鹉螺号”潜艇)，为此不惜将项目预算增加了几千万. 但此后，“上海光源”因其科学性与视觉艺术的完美融合，成为了上海市的地标性建筑，也间接拉动了当地旅游行业的发展. 这一案例可以很好地体现科学与文化的相辅相成，引导学生在物理—地理—人文学科的交叉领域进行思考.

以上素材，有助于学生全方位了解人类科技进步的曲折性、辩证看待科学与技术的相互作用，培养“科学态度与责任”的核心素养，渗透学科德育，激发学生的爱国情怀和民族自豪感.

参 考 文 献

1 北京教育考试院. 2021 年普通高中学业水平等级考试试卷[Z]. https://wenku.baidu.com/view/bd09a25502f69e3143323968011ca300a6c3f663.html

2 王德武. 同步辐射的昨天和今天[J]. 现代物理知识，1994(6)：13～14

3 黎刚，梁岫如. 同步辐射——当代最重要的多学科交叉研究基地[J]. 物理教学，2010，32(9)：2～5

4 索鸿英. 梦幻之光——同步加速器辐射[J]. 物理教师，1997(1)：32～34

(上接第 150 页)

3 王焕霞. 物理学科能力评价指标体系构建研究[J]. 湖南中学物理，2015，30(5)：1～3

4 刘洋，李贵安，王力，等. 基于教育目标分类的高中物理核心素养评价[J]. 教育测量与评价，2017(10)：35～40

5 何铁. 基于物理学科核心素养视角的成都中考物理试题分析[J]. 物理教学探讨，2016，34(9)：48～51

6 郑行军. 指向核心素养评价目标的试题命制策略——以物理组合题设计为例[J]. 中国考试，2019(5)：68～72

7 张杰. 中考物理试题与核心素养评价——以无锡市中考物理杠杆类试题为例[J]. 物理教师，2020，41(6)：40～43

8 杨力富. 高中物理核心素养评价与学业质量检测有效性研究[J]. 新课程，2020(46)：27

9 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述和处理[J]. 信息与控制，1995(3)：162～166

10 汪海东，曾志兴. 基于集对分析的高性能再生混凝土性能优化[J]. 四川建筑科学研究，2012，38(3)：230～233

11 俞峰，李荣钧. 基于集对分析的飞机客舱安全疏散能力评估[J]. 消防科学与技术，2012，31(4)：425～427

12 苏生瑞，张其伟，景积仓，等. 基于集对分析方法的山区高速铁路线路方案优选研究[J]. 工程地质学报，2011，19(5)：764～770

13 赵克勤. 集对分析及其初步应用[J]. 大自然探索，1994(1)：67～72

14 金国娟. 一种基于 SPA 的物理实验成绩评价方法[J]. 绍兴文理学院学报(教育教学研究)，2003(12)：29～30