

在大学物理课程中讲授黑洞照片拍摄的探讨

解希顺

(东南大学物理学院 江苏 南京 210000)

(收稿日期:2020-03-10)

摘要:探讨了如何在大学物理课程中介绍史上第一张黑洞照片并进行相关教学的设计和方法.初步的实践表明,对基础良好的理工科本科生,在已具备一定的力学、光学等知识的情况下,讲授黑洞照片拍摄的基本原理和大致形状是可行的.作者希望通过本文的探讨,与同行交流切磋,进一步提高此案例教学的水准,并结合相关教材的修订,将此以适当方式纳入新版教材中.

关键词:大学物理 黑洞照片 教学设计

1 史上第一张黑洞照片

2019年4月10日,人类历史上第一张黑洞照片在全球六地(比利时布鲁塞尔、智利地亚哥、中国上海、中国台北、日本东京、美国华盛顿)同时发布.照片中央是室女座超巨椭圆星系M87中心的超大质量黑洞,其质量是太阳的65亿倍,距离地球大约5500万光年.黑洞的周围有一个明亮的环状结构,是绕黑洞高速旋转的吸积盘(图1).

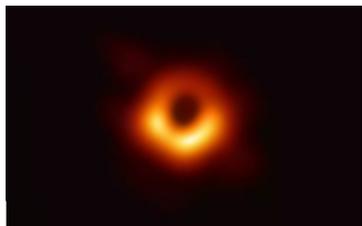


图1 史上第一张黑洞照片

人们一直好奇黑洞究竟长什么样?这张“照片”的问世,在物理界乃至整个科学界引起了极大的反响.因为它是对爱因斯坦广义相对论的又一极限验证,也是人类在迈向宇宙的漫漫征途中,竖起的又一里程碑.

2 在大学物理中如何讲授黑洞照片的拍摄

大学物理课程是理工科大学生的一门重要的基础课.在大学物理中讲授现代物理的新知识、新发展、新应用,一直是物理教学中的一个重要的改革方向和追求目标.当然,由于本科学生物理基础、物理课时等原因的限制,在大学物理课程中讲授现代物理知识通常有一定的困难.如何在大学物理中讲好黑洞照片的拍摄,是一值得探讨的问题.对此,我们做了一点尝试,在这里与同行交流与讨论.

Spatial Distribution of Electric Potential of a Uniform Charged ring

Luo Zhijuan He Yan Yu Li

(Department of the Basics, Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019)

Abstract: The electric potential function expression of the charged ring is calculated by the method of separation of variables and δ function, and derive the electric potential in the spool thread and the center of the ring, deepening to understand the physical boundary problem.

Key words: charged ring; electric potential; the method of separation of variables; δ function

2.1 黑洞半径

在大学物理中,难以用系统的广义相对论知识讲授黑洞,但将黑洞简单解释为由于具有极其强大的质量和引力,光也难以逃逸的天体,学生是容易理解的.借助于牛顿力学的概念,我们容易得到物体从质量为 M 的天体逃逸的速度大小为

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

式中 G 是万有引力常量, R 为天体的半径.

若将上式中 v 看成是光速,则可得黑洞半径与其质量的关系为

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

这样类比得到的黑洞半径与用广义相对论得到的黑洞半径(史瓦西半径)^[1]结果相同.类比虽不严格,但讲授黑洞照片的拍摄时重点不在黑洞半径的推导,故也不失为一种简易处理的方式,对于在教学中渗透物理方法也是有益的.

M87 中心的超大质量黑洞的质量是太阳的 65 亿倍,据此可算出该黑洞的半径为

$$R_s = 1.9 \times 10^{13} \text{ m}$$

2.2 黑洞照片的拍摄方法

给黑洞拍照更不容易.这不仅因为黑洞不发光(黑洞周围的物质发光),更主要的困难是黑洞离我们实在太远了,尽管 M87 星系中心的黑洞是银河系外距离地球最近的超大黑洞,但离我们也有 5 500 万光年($1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$)! 目前世界上直径最大的单体射电天文望远镜,是位于我国贵州黔南的天眼——FAST(图 2),其镜面直径有 500 m,但它拍摄黑洞照片,其分辨率依然远远不够.



图 2 我国的天眼(FAST)

科学家们采用的方法是,用位于全球各地的 8 台亚毫米波射电望远镜组成一望远镜组,称其为事件视界望远镜(EHT),其分辨率相当于直径(两相

距最远的望远镜之间的基线距离)与地球直径相当的单体望远镜的分辨率.在 8 台望远镜同时对黑洞展开观测后,将它们测得的数据集中到一起,利用甚长基线干涉测量(VLBI)原理^[2](马丁赖尔因此获 1974 年物理诺贝尔奖)^[3],由计算机进行运算,即可合成得到黑洞的照片.M87 黑洞的照片合成,用了长达两年的时间,这不仅因为数据量大,而且在迭加不同望远镜的测量数据时,需要严格考虑数据的同时性,即同相位性,甚至需要考虑由于相对论等诸多效应引起的不同望远镜之间的信号时间延缓,等等.

我们是在波动光学部分讲到圆孔衍射时插入黑洞照片拍摄的内容.此时学生已对相干迭加有了基本的概念,对圆孔衍射的分辨率公式已经知晓.我校的大学物理课程,狭义相对论内容是紧接在牛顿力学后面讲授的.此时介绍黑洞照片拍摄的基本原理,学生基本可以接受.当然,我们讲述中,可不涉及 VLBI 的细节等深度理论,而把重点放在比较容易理解和计算的黑洞照片分辨率上.

2.3 黑洞照片的分辨率

M87 黑洞照片的分辨率可以用与圆孔衍射相同的计算公式进行计算.当拍摄所用波长 λ 为 1.3 mm,望远镜直径 D 等效为 12 000 km(与地球直径量级相当)时,利用圆孔衍射最小可分辨角公式

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

计算得到利用事件视界望远镜观测 M87 中心黑洞的最小可分辨角 θ 为 $1.3 \times 10^{-10} \text{ rad}$,其倒数即为黑洞照片的分辨率,量级为 10^{10} (比哈勃望远镜的分辨率高了大约 1 000 倍).尽管分辨率很高,但 M87 中心的黑洞离我们的距离 s 远达 5 500 万光年,由此可求得 M87 黑洞上最小可分辨的两点之间的距离为

$$\Delta l = \theta s \approx 6.8 \times 10^{13} \text{ m}$$

这已达 M87 黑洞的半径量级.所以,我们看到的黑洞照片显得不够清晰,也就不奇怪了.

若要继续提高拍摄黑洞照片的清晰度,已有科学家设想未来向太空发射射电望远镜,让其与地球上的射电望远镜一起组成一更高分辨率的望远镜(等效直径为太空望远镜与地面间的距离,即卫星的高度).例如,具有同步卫星高度的射电望远镜,其高度大约为地球直径的 3 倍.由于分辨率与望远镜直

径成正比,据此,理论上的分辨率可比拍摄 M87 中心的事件视界望远镜提高 3 倍.当然,根据分辨率公式,减小测量波长也可以提高分辨率.

需要指出的是,我们这里只定量讨论了分辨率.而测量信号的总的干涉强度显然与参与拍摄的望远镜的个数等有关.望远镜越多,信号则越强,测量的灵敏度越高.

2.4 对吸积盘的简单说明

黑洞照片上黑洞的周围有一个明亮的环状结构,称为吸积盘.它是绕黑洞旋转的发光物质形成的,在大学物理课程中,不可能也不必要对其进行很深入的讨论.对于吸积盘的上暗下亮(见图 1),可以用学生了解的多普勒效应^[1]的概念加以定性的说明.由于拍摄位置的关系,M87 黑洞吸积盘照片的上方运动的物质大体上离我们远去,照片下方运动的物质大体上朝我们而来,相对我们运动的速度大小不同.光的多普勒效应导致上方的物质发出的光产生红移,照片显得较暗;下方则相反.

3 总结

经过初步实践我们发现,在大学物理相关教学阶段,引入黑洞照片的拍摄内容进行讲授,是基本可行的.在学生已有一定基础的情况下,课堂教学所需要的时间也不多(1 课时左右).这样的内容可以使我们将物理基本原理与实际应用紧密结合起来;使

物理学的最新进展与经典物理知识有机结合起来.在此过程中,可以自然而然地将课程思政元素(FAST 的建设等)、物理学家的人文精神(诺贝尔物理奖等)、物理学的方法(类比方法等)嵌入其中,达到立德树人的目的.

如果受学时或学生基础等条件的限制,也可以将黑洞照片的拍摄简化为一个例题或习题:直接给出 M87 黑洞到地球的距离和事件视界望远镜的等效直径及测量波长,利用圆孔衍射相关公式计算黑洞上最小可分辨的两点间距离并与黑洞的半径比较.

本文所说的只是一个教学实例,有许多类似的案例教学(包括本例)还需要在实践中进一步的推敲和完善.我们正结合《物理学》第 7 版^[4]的修订再版工作尝试更多的改革或改变,期待与物理同行有更多的交流或探讨,共同探索大学物理教学的进展或进步.

参考文献

- 1 马文蔚,解希顺,周雨青.物理学(第 5 版)(下).北京:高等教育出版社,2006.295
- 2 平劲松.太阳系人造天体甚长基线干涉测量方法研究[D].上海:中科院上海天文台,1996
- 3 林克雄.甚长基线干涉测量技术.北京:宇航出版社,1985
- 4 马文蔚,解希顺,周雨青.物理学(第 7 版).北京:高等教育出版社,2020

Discussion on the Teaching on Shoot of Black Hole Photograph in University Physics Course

Xie Xishun

(School of Physics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210000)

Abstract: This paper concerns how to teach resolving factor about the first photograph of black hole and related problems in university physics course. The practice shows the teaching is feasible if the students have some fundamental knowledge. It is hopeful that improving the level of the case teaching through discussion of this paper with the readers. We are revising a text book of physics which involves a lot of the case like this.

Key words: university physics; black hole photograph; teaching design