

第二批国家级一流本科课程申报书
(虚拟仿真实验教学课程)

课程名称：系外行星大气光谱探测虚拟仿真实验

专业类代码：0704

负责人：刘慧根

联系电话：15380920084

申报学校：南京大学

填表日期：2021.05.30

推荐单位：南京大学

中华人民共和国教育部制

二〇二一年四月

填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。

2.文中○为单选；□可多选。

3.团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。

4.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

5.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

6.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

1.基本情况

实验名称	系外行星光谱探测虚拟仿真实验	是否曾被推荐	○是○否
实验所属课程(可填多个)	行星大气概论		
性质	○独立实验课 ○课程实验		
实验对应专业	天文学		
实验类型	○基础练习型 ○综合设计型 ○研究探索型 ○其他		
虚拟仿真必要性	<input type="checkbox"/> 高危或极端环境 <input checked="" type="checkbox"/> 高成本、高消耗 <input type="checkbox"/> 不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练		
实验语言	○中文 ○中文+外文字幕(语种) ○外文(语种)		
实验已开设期次	共 2 次: 1. 时间、人数 2019 年 11 月, 20 人 2. 时间、人数 2020 年 11 月, 40 人		
有效链接网址	(要求填写标准 URL 格式的实验入口网页,不允许仅为文件下载链接) 实验网址: https://astroxfz.nju.edu.cn/exp/1.html		

2.教学服务团队情况

2-1 团队主要成员 (含负责人, 总人数限 5 人以内)								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	承担任务
1	刘慧根	1984 01	南京 大学	无	副教授	15380920084	huigen@nju.edu.cn	总负责人, 实验设计、网站内容更新, 在线教学服务人员
2	王牧天	1997 10		无	科研助理	15606931699	neptunego@126.com	知识点素材、相应课件准备, 在线教学服务人员
3	陈安东	1998 07		无	助教	18172363070	mg20260001@smail.nju.edu.cn	计算程序开发, 评分标准细化, 在线教学服务人员
4	谢基伟	1984 10		无	教授	18651839176	jwxie@nju.edu.cn	相关视频资料搜集整理, 论坛互动
5	彭志欣	1976 12		本科教学 室主任	讲师	13182866834	zxpeng@nju.edu.cn	学生实验操作指导
2-2 团队其他成员								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	承担任务		
1	李乃斌	1986 08	南京恒点信息技 有限公司	工程师	无	仿真软件程序设计, 运行技术支持人员		
2	朱军	1977 09	南京恒点信息技 有限公司	工程师	无	仿真软件 3D 模型设计, 运行技术支持人员		
4	杨明	1988	南京大学	副研究员	中级	热点资讯和科技前沿新		

		11				闻更新
5	余周毅	1991 08	南京大学	助理研究员	中级	实验数据更新和拓展
6	何秋会	1977 08	南京大学	左涤江天文 台实验教师	中级	搜集整理学生反馈意见

团队总人数：10 人 其中高校人员数量：7 人 企业人员数量：3 人

2-3 团队主要成员教学情况（限 500 字以内）

（近 5 年来承担该实验教学任务情况，以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况）

负责人承担本实验教学任务情况：

2017 年秋季学期至今，开设《行星大气概论》课程（36 学时，2 学分），面向天文专业大四学生，已完成 4 个教学周期；

2019 年在《行星大气概论》课程中，开展“系外行星大气光谱探测虚拟仿真实验”，已经历 2 个完整教学周期，共计服务学生~100 人；

2020 年秋季学期共同参与《天文探秘》课程（36 学时，2 学分），面向数理大类和匡亚明学院的大一本科生，参与实验的学生~20 人；

负责人参与教学研究和学术获奖情况：

1. 2018 年作为骨干成员参与南京大学“百”层次优质课程 B 类建设课程：《天体力学基础》；该课程于 2020 年被认定为首批国家一流本科课程；

2. 2020 年获江苏省天文学会科学技术奖（第四完成人）

参与和主持的国家自然科学基金项目：

1. 主持面上项目：利用天体测量数据对行星系统进行统计和动力学分析研究，项目批准号：11973028；研究起止年月：2020/01-2023/12，在研。

2. 主持青年基金：南极天区短周期行星搜寻与短周期行星特征研究；项目批准号：11503009；研究起止年月：2015/01-2018/12；结题；

3. 参与重点项目：亮星系外行星搜寻与动力学研究，项目批准号：11933001；研究起止年月：2020/01-2024/12；在研；

4. 参与国际（地区）合作与交流项目：近邻红矮星周围行星形成机制和大气研究；项目批准号：11661161014；研究起止年月：2017/01-2019/12，结题。

注：必要的技术支持人员可作为团队主要成员；“承担任务”中除填写任务分工内容外，请说明属于在线教学服务人员还是技术支持人员。

3.实验描述

3-1 实验简介

1. 虚拟仿真实验的必要性

1) 面向世界科技前沿：

系外行星是天文研究的热点问题，目前已经找到四千多颗系外行星，但对行星的精细刻画还远远不够。行星大气对行星气候至关重要，是判断宜居性的关键因素。目前借助地面和空间望远镜，已探测到部分系外行星大气中含有水、二氧化碳、一氧化碳等大气成分，但主要是类木行星的大气探测，类地行星的探测还很少。因此系外行星大气探测是未来行星宜居性研究的关键，是未来 10 年行星科学研究的高地。

2) 《行星大气概论》是天文学的本硕贯通课程：

实验所属课程《行星大气概论》，依托天文与空间科学学院教育部重点实验室，作为双一流 A+学科天文学的大四专业课，纳入了天文与空间科学学院教学体系，是本硕贯通和行星科学交叉复合的重要课程，为学生在系外行星领域继续深造夯实基础，为行星科学方向发展培养复合型人才。

3) 突破传统观测限制，实现低成本、无竞争、可容错、自由度高的实验平台

系外行星距离遥远，行星大气探测精度要求极高，必须借助大型望远镜才能实现，学校的传统教学和学校天文台难以提供相应的平台。目前探测行星大气的望远镜主要是空间的哈勃望远镜，斯皮策望远镜（已退役），时间非常宝贵，学生鲜有使用；地面望远镜也主要是凯克等大型望远镜有能力观测，观测时间也不易获取，加上地面观测受天气、台址等因素限制，学生很难有实践经验。为了克服上述难题，本实验为学生提供了低成本、无竞争、能容错、自由度高的行星大气光谱探测的实验平台。

此外，虚拟仿真实验结合我国大型天文望远镜较为匮乏的特点，希望通过实际观测的训练，为我国培养更多的观测方面的人才，为今后国内观测天文的发展储备力量；为未来我国的大型项目（如：已经立项的中国空间站望远镜，筹备中的清华大学6.5米多目标望远镜等）培养潜在科学用户；为系外行星大气领域的科研队伍培养后备人才。

2. 实验系统的先进性

本实验设计紧密贴合《行星大气概论》课程的教学内容（如图1），涉及的知识点丰富，贯穿整个课程；通过虚拟仿真新技术手段，对理论性较强的专业课程更进行直观、形象的教学尝试；提高学生的学习热情和积极性，提高学生学习效率。本实验未来可以应用在《普通天文学》，《实测天体物理》等天文学专业课程中。

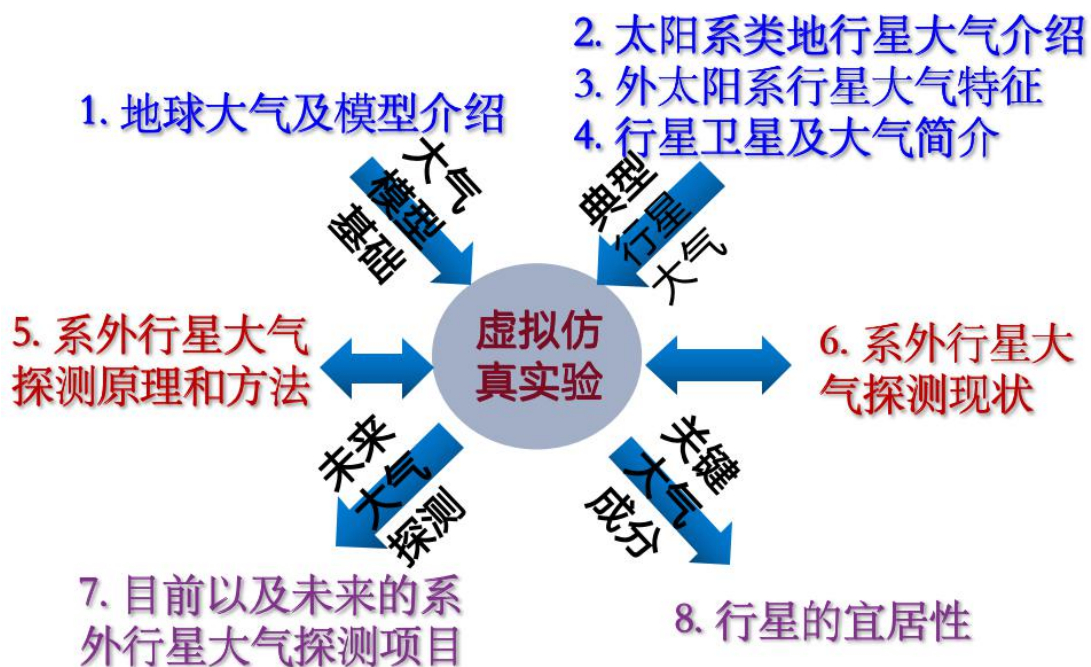


图1 虚拟仿真实验与《行星大气概论》课程内容的衔接紧密。

3. 教学设计的合理性

本实验采用虚拟仿真技术，突破大望远镜的硬件限制，突破时间和地域的限制，让学生可以全天候、多台址、自主地进行系外行星大气透射光谱探测的实验。

实验按三个环节来设计，融合了理论-观测-数据分析，让学生通过不同环节，

- (1) 理解光谱探测行星大气透射/反射光谱的原理；
- (2) 学会如何估计不同的恒星-行星系统的大气透射光谱信号强度，并结合目标透射光谱特征、台址，选择合适的望远镜，设计观测方案；
- (3) 通过光谱模拟观测，让学生了解光谱数据的获取过程；最后根据模拟测量的数据和理论数据对比，对光谱信噪比进行估计，确定行星大气成分。

3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

希望学生通过实验，具备初步的观测方案设计能力，要求学生在实验不同环节中分别掌握相应的知识点：

- **环节一：系外行星大气透射/反射光谱产生原理的介绍和学习；**
 - (1) 掌握透射光谱的测量原理和特征；
 - (2) 掌握反射和热辐射光谱的测量原理和特征；
 - (3) 掌握行星平衡温度和大气标高的估计方法；
 - (4) 掌握行星大气透射光谱信号强度的估算方法；
- **环节二：系外行星大气观测方案设计和模拟观测获取光谱数据；**
 - (1) 学会如何选择光谱探测所需要的望远镜；
 - (2) 学会根据目标特征，选择合适的观测站点，预测大气透射光谱观测的时间窗口；
 - (3) 了解天文望远镜观测过程中，光谱数据的获取过程；
 - (4) 理解地面观测中，地球大气对目标观测的影响（周日运动，大气消光等）；
 - (5) 学会根据实测的光谱数据读数，实时调整合适的曝光时间；
- **环节三：光谱数据信噪比估计；**
 - (1) 掌握天文观测中，常见的误差来源（泊松噪声，天光背景，读出噪声等）；
 - (2) 掌握利用实测数据和理论模拟信号，计算光谱数据信噪比的方法；
 - (3) 判断行星大气中的重要分子（例如水）。

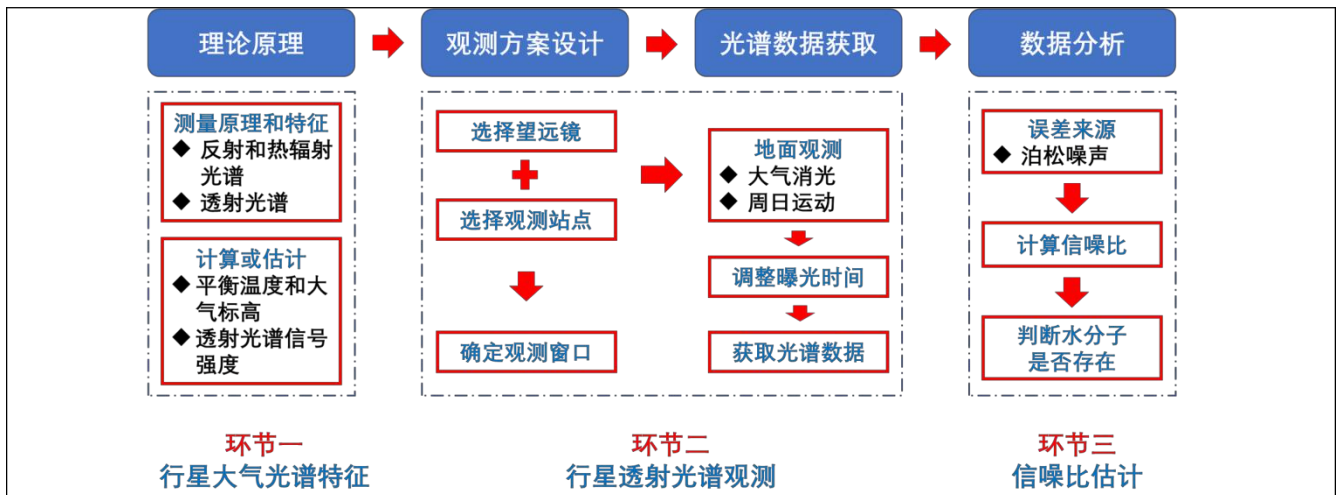


图 2 实验教学目标

3-3 实验课时

- (1) 实验所属课程课时： 36 学时
- (2) 该实验所占课时： 4 学时

3-4 实验原理

1. 实验原理

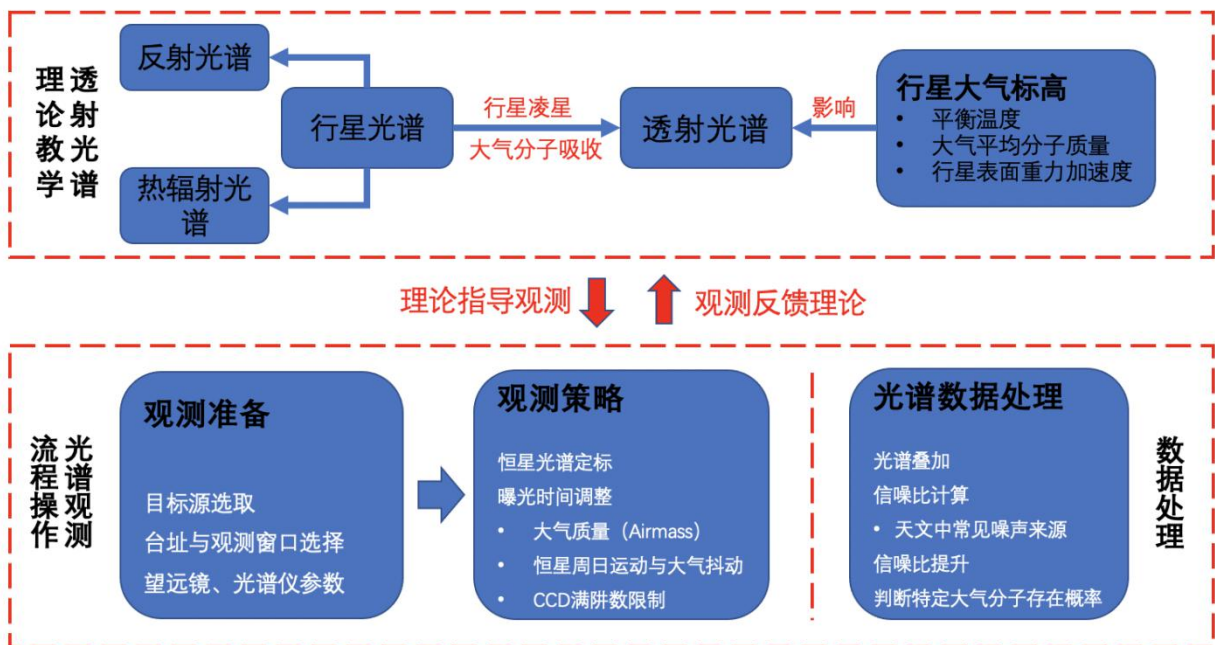


图 3 实验原理

“系外行星大气透射光谱探测虚拟仿真实验”项目以光谱探测**相关物理原理与观测实践**并重，呈现天文学科中“**理论指导观测，观测反馈理论**”的科学互动模式（见图3），以生动形象的虚拟仿真实验协助学生理解理论性较强的课程知识，使学生掌握基础的观测筹划、实践能力，培养学生天文理论、观测相互联系的思维模式。理论部分主要包括讲解行星光谱的分类：**反射光谱、热辐射光谱和透射光谱**。而透射光谱由行星凌星时**行星大气的分子吸收**造成，其强度与**行星大气标高**相关。在观测行星透射光谱研究大气组分时，可通过对行星大气标高估计进行**观测准备**，选择恰当的台址、望远镜参数；实际观测中，学生要综合运用实测天文知识（周日运动、大气消光、CCD参数）灵活调整**观测策略**；在**光谱数据处理**中，可以分析出光谱中特定分子吸收线显著度（信噪比）来评估**行星大气的可能气体组成**。

知识点：共 10 个。

1. 恒星光谱和行星光谱的特征

恒星的光谱具有近似黑体辐射连续谱的特征。行星光谱主要由反射光谱和行星热辐射光谱组成。行星的反射光谱强度与行星的轨道相位有很强的相关性。恒星辐射加热或行星内部热源使行星发出热辐射光谱，主要在红外波段。

2. 行星凌星与行星大气透射光谱

行星位于我们与恒星视野连线时（也称行星凌星），少部分来自恒星的光会直接经过行星大气后被我们观测到，此时行星大气中的不同气体分子会散射或吸收不同波长的恒星光子，主要表现为观测到的凌星深度在不同波长上不同，这就是行星透射光谱的成因。

3. 大气透射光谱信号强度影响因素及其规律

大气透射光谱信号相对（于恒星光谱）强度主要由行星的大气标高有关。行星平衡温度越高，大气平均分子质量越小，行星表面重力加速度越小，大气标高越高。

4. 基于观测台站筛选适宜行星凌星的凌星窗口

估计行星凌星窗口和凌星窗口的误差是我们观测凌星透射光谱成功与否的关键。在选择台址时，不仅需要知道当地在凌星窗口时间是否处于夜晚，还需计算目标的地平高度角是否符合地面测光要求。

5. 望远镜相关参数评估

为了在行星大气透射光谱观测中获得足够高信噪比的光谱从而获得科学产出，要合理选择望远镜和光谱仪的参数，具体包括：望远镜口径、光谱仪分辨率和望远镜通光效率。我们需要结合科学目标与仪器成本问题，选择出最佳的望远镜组合方案。

6. 地球大气对地面光谱观测的影响

由于地球大气内水等分子的吸收，地面观测主要在可见光和射电波段以及少量的红外窗口内展开。我们在地面观测获取行星大气透射光谱时，要对地球大气的吸收进行改正。

7. 行星大气透射光谱观测策略及调整

观测条件（大气质量，周日运动）的变化使得我们要实时地对观测策略进行调整，合理地调整曝光时间，避免时间过长而造成 CCD 过曝，避免时间过短而造成无法获得足够信噪比的光谱数据。

8. 天文观测中常见噪声来源

在进行高精度光谱探测时，测光误差来源有很多，实验中主要考虑恒星光子的泊松噪声。此外还包括背景噪声、探测器噪声、望远镜噪声。

9. 行星大气透射光谱数据处理

行星大气透射光谱数据处理的步骤主要包括：（1）多次短曝光光谱叠加；（2）凌星期间获得的恒星光谱与非凌星阶段的恒星光谱做较差，获得行星大气的透射光谱；（3）特定分子吸收线信噪比计算。

10. 透射光谱信噪比提升方式

常见的提高光谱信噪比方式有：（1）空间观测，降低地球大气再特定波长上的屏蔽或吸收效果；（2）增加凌星观测次数，以获得更多恒星流量；（3）降低光谱分辨率，使得单波长并范围内的光子数增加。

2. 核心要素仿真设计

1. **贴近现实的系外行星动画模型**：在“行星凌星光变曲线”步骤，可以通过调整行星半径、行星反照率和行星周期，查看对应的行星系统变化和对光变曲线形状的影响，**变化幅度和规律由基本公式计算，真实可信**。行星的反射、热辐射光谱与行星轨道相位的协同变化**真实反映**。
2. **基于真实行星数据的仿真**：在“观测目标选择”步骤，提供的行星系统均为已经过透射光谱观测的**真实行星系统**，提供**真实的行星参数和目标的特征**（光谱、亮度、天空中的位置）；

3. **符合天文观测的真实环境和仪器设置**：在“正式光谱观测”环节，模拟真实的行星透射光谱观测场景，观测条件的变化使得学生要实时地对观测策略进行调整，合理地调整曝光时间。所选台址为真实天文台址，大气质量、周日运动等变化为真实变化，CCD 光谱成像图片、光谱曝光图与现实效果一致。

3-5 实验教学过程与实验方法

1. 实验教学过程

- (1) 实验前，教师简要介绍实验目的、实验流程，让学生自主开始实验；
- (2) 学生结合《行星大气概论》课程的基本知识，自行阅读实验指南，独立自主在实验中探索和学习，锻炼学生自主学习的能力和科学探索的精神；
- (3) 学生按照实验指南和步骤引导，完成实验的三大环节的学习、操作和考核，结合自己的实验报告和系统评分，自我纠错；训练学生自我校正的能力，通过查缺补漏，夯实学生基础；
- (4) 老师结合实验，以及学生整体的实验报告，得分情况，对操作步骤和知识点进行细致讲解和对关键操作步骤进行详细剖析，帮助学生复盘，加深对知识点的理解，熟悉巩固观测操作流程；
- (5) 学生在课后可以自由讨论、互动，甚至选择更多的系统，重复实验。可以结合最新热点新闻和科学前沿进展，与老师讨论，将课堂学习延伸到课外，培养学生终生学习的意识。

2. 实验方法

本实验课程采用了**观察法、自主设计法、控制变量法**和**归纳法**等多种实验方法，旨在让学生通过科学的方法有效地掌握大气标高计算、台址和观测窗口选择和信噪比计算时用到的基本原理，理解凌星光变曲线、大气透射光谱、正式光谱图像等观测结果对主要物理参数的依赖关

系，从而全方位了解系外行星大气探测的科学意义、实验方法和过程、实际困难与解决途径，以及相关成果产出等。

- **观察法**主要用于了解行星热辐射、反射光谱与轨道相位的关系，行星大气透射光谱产生原理，空间、地面观测对比和叠加光谱获取最终观测数据等步骤，将复杂的物理公式转化为形象生动、易于理解的动态动画，培养学生对新知识的探索心和科研热情，让学生更直观地了解图像背后传达的物理含义。学生通过查看行星光谱随轨道相位的变化，可以获知凌星光变曲线的周期性浮动变化产生的原因；通过观察行星大气标高改变时不同波长的光子被大气吸收的状况和光谱的变化形式，可以了解行星透射光谱的原理；通过分别查看空间和地面观测时光谱的差异，可以理解地球大气对光谱探测的影响；通过观看光谱叠加的动画，可以了解增加积分时间对光谱图像的影响和理解长时间观测目标的作用。
- **自主设计法**主要用于观测行星系统目标选择，台址和观测窗口选择，望远镜参数设置，正式光谱观测等步骤。在为观测目标设计观测方案时，可行的观测方案并非唯一，学生通过知识点和理论环节的知识掌握可自由探索、组合若干个可供选择的观测目标、台址，并自由设置望远镜的口径、分辨率、通光效率、曝光时间等参数。这让学生拥有很大的自由选择空间，能更加真实地体验天文观测的基本流程。每一观测设计步骤还设置有反馈效果，使学生能对比不同选择带来的实验效果，避免在自主设计观测过程中的盲目性，更有助于提高学生学习的热情。
- **控制变量法**主要用于行星凌星光变曲线，信噪比提升等步骤，在阐述一个物理图像对各种参数的依赖关系时，提供了可调整的参数轴，让学生可以逐个地、仔细地了解各个参数对结果的影响，从而加深了学生对物理原理的理解。在凌星光变曲线展示的步骤中，为了解行星的周期、半径和反照率对凌星光变曲线的影响方式，学生需要固定其他参数为合适且确定的值，改变要研究的参数，反复调整并观察凌星光变曲线的变化。在信噪比提升的步

骤中，学生需要先控制变量地研究空间观测、增加积分时间和降低分辨率三种方式对信噪比的提升效果，最终选择一种科学的、合适的方案来提升信噪比。

➤ **归纳法**主要应用于行星大气标高计算原理和行星大气光谱特征环节考核——重现透射光谱轮廓等步骤，从反复实验的结果出发归纳出半经验的结论，培养了学生的严谨求知的科研精神和理性思考。在计算大气标高的环节，学生需要在反复调整行星的平衡温度、行星大气的平均分子量、行星的表面重力加速度等参数，从中归纳总结出大气标高对这些参数的依赖关系，并应用于随后的重现透射光谱轮廓的考核当中。

3-6 步骤要求（不少于 10 步的学生交互性操作步骤。操作步骤应反映实质性实验交互，系统加载之类的步骤不计入在内）

(1) 学生交互性操作步骤，共 15 步

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时（分钟）	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	行星凌星光变曲线	5	三个操作步骤： “调整行星周期”，观察学习行星周期对凌星光变曲线的影响，2分； “调整行星半径”，观察学习行星半径对凌星光变曲线的影响，2分； “调整行星反照率”，观察学习行星反照率对凌星光变曲线的影响，2分。	6	操作
2	了解行星热辐射、反射光谱与轨道相位的关系	3	两个操作步骤： “查看恒星光谱”，了解恒星光谱的特征，2分； “查看行星光谱”，学习行星光谱的特征，2分。	4	操作
3	行星大气透射光谱产生原理	5	四个操作步骤： “观察行星凌星”，学习行星凌星过程，2分； “观察光子通过行星大气的行为”，学习行星大气吸收过程，2分； “查看行星大气透射光谱信号”，学习行星大气透射光谱的特征，2分； “调整大气标高”，学习大气标高对行星大气吸收和透射光谱的影响，2分。	8	操作
4	行星大气标高计算原理	9	五个操作步骤： “学习行星大气标高的计算方法”，1分；	6	操作

			<p>“调整行星的平衡温度”，观察学习行星平衡温度对行星大气标高的影响，1分；</p> <p>“调整行星的表面重力加速度”，观察学习行星表面重力加速度对行星大气标高的影响，1分；</p> <p>“调整行星的大气平均分子质量”，观察学习行星大气平均分子质量对行星大气标高的影响，1分；</p> <p>“拓展学习平衡温度的计算方法”，2分。</p>		
5	行星大气光谱特征环节考核——重现透射光谱轮廓	6	<p>一个操作步骤： “计算行星大气标高”，充分理解行星大气标高的计算过程与依赖因素，2分。</p> <p>一个考核： “行星大气标高考核”，考察学生对行星大气透射光谱特征的掌握程度，10分。（通过比对学生的输入值和随机生成的参数之间的差异可以计算出曲线的契合度，由此可以换算出学生具体得分。）</p>	12	操作、考核
6	观测行星系统目标选择	8	<p>一个操作步骤： “选择观测目标”，1分。</p> <p>两个考核： “估计行星的大气标高”，考察学生对大气标高计算方法的掌握程度，5分； “估计行星的大气吸收强度”，考察学生对行星大气吸收强度估计方法的掌握程度，5分。（根据不同的大气模型可以计算得到行星大气标高和行星大气吸收强度的容许区间，学生的输入值在区间内得到全部5分，大于1.5倍的上区间界限或小于1.5倍的下区间界限为0分，中间线性赋分。）</p>	11	操作、考核
7	台址和观测窗口选择	6	<p>一个操作步骤：“选择台址”，1分。</p> <p>一个考核：“选择观测窗口”，考察学生对天文基本观测常识的掌握和能否将其应用于实例，10分。（学生一次就选择到了正确窗口则得到全部10分，学生每选错一个少获得1分。选择10次仍错误则不得分。）</p>	11	操作、考核
8	望远镜参数设置	3	<p>两个操作步骤： “查看恒星光谱”，了解恒星光谱的特征，2分； “设置一组望远镜参数”，了解望远镜各参数对光谱的影响，5分。</p>	7	操作
9	空间、地面观测对比	2	<p>两个操作步骤： “在视野进度条最大时查看行星光谱”，学习在空间观测行星凌星时的光谱特征，2分； “在视野进度条最小时查看行星光谱”，学习在地面观测行星凌星时的光谱特征，2分。</p>	4	操作
10	正式光谱观测	10	<p>两个操作步骤： “调整时间倍率”，学习行星在天球上的运动轨迹，2分； “完成全部5次曝光”，考察学生对通常的天文观测流程的掌握，2分。</p> <p>两个考核：</p>	14	操作、考核

			“设置曝光时长”，考察学生设置的曝光时长是否合适，每次曝光 1 分，共 5 分； “设置曝光时间点”，考察学生进行曝光的时间点是否正确，每次曝光 1 分，共 5 分。（对于每一次曝光，程序会计算得到曝光图像，曝光图像的最大值为满阱数的 80% 时得到全部 1 分，为满阱数的 60% 左右得 0.6 分，小于满阱数的 30% 或超过满阱数的 120% 时不得分，各区间内线性赋分。程序还会记录每一次曝光的时间点，正确时间点为凌星开始前曝光一次，凌星时曝光 3 次，凌星后曝光 1 次，学生进行曝光的时间点，每对一个给 1 分。）		
11	叠加光谱获取最终观测数据	2	两个操作步骤： “估计总曝光时间”，考察学生对凌星时长与总曝光时间的关系的掌握，2 分； “观看叠加动画”，学习光谱图叠加的过程，1 分。	3	操作
12	恒星、行星光谱图和信噪比估计	5	一个考核： “估计信噪比”，考察学生对信噪比的物理意义和计算方法的掌握程度，10 分。（学生的输入值在正确答案的 90% 至 110% 区间内时得到全部 10 分，在 80% 到 90% 或 110% 到 120% 区间内时得到 8 分，以此类推。）	10	考核
13	信噪比提升	5	两个操作步骤： “选择信噪比提升的方式”，理解不同的信噪比提升方式对信噪比的影响，2 分； “计算信噪比提升的倍数”，考察学生对信噪比提升的计算方法的掌握，2 分。	4	操作
14	结论	1	该步骤不设分值。		
15	实验报告提交		教师根据学生报告情况进行评价，加强师生互动和反馈。		教师评价

(2) 交互性步骤详细说明

步骤一：行星凌星光变曲线

操作目的

学生通过调整系外行星的相关参数（轨道周期，行星半径，行星表面反照率），了解这些行星参数如何影响系外行星的凌星光变曲线的形状。



图 4 行星凌星光变曲线展示

操作步骤

- 点击界面右方（见图 4）点击三个行星参数旁边的“？”符号，了解参数的物理含义。
- 拖动进度条，调整三个行星参数的数值，观察行星凌星光变曲线和行星系统的相应变化。

操作结果

行星凌星光变曲线会根据学生设置参数而展现变化过程。总结规律为：行星周期越长，轨道半径越大；行星半径越大，动画中的行星也越大，在凌星和掩星时光变曲线下降的幅度越大；行星反照率越大，掩星时光变曲线下降也越大。

步骤二：了解行星热辐射、反射光谱与轨道相位的关系

操作目的

学生通过对比恒星光谱图和行星光谱图，了解两者光谱之间的联系，并且通过观察行星光谱的不同成分与行星轨道相位的相关变化，配合相关知识点，了解不同光谱成分的成因。

操作步骤

- 点击恒星，查看恒星光谱；
- 点击行星，弹出【行星光谱】按钮，点击后右下角出现行星光谱界面（见图5），其中展示行星的热辐射和反射光谱。
- 点击行星光谱界面标题旁的“？”按钮，了解这两种光谱成分的区别，观察行星的这两种光谱随行星运动的变化关系。
- 点击界面右侧【知识提示】，阅读【黑体辐射】和【行星反射光谱和热辐射光谱】相关材料。

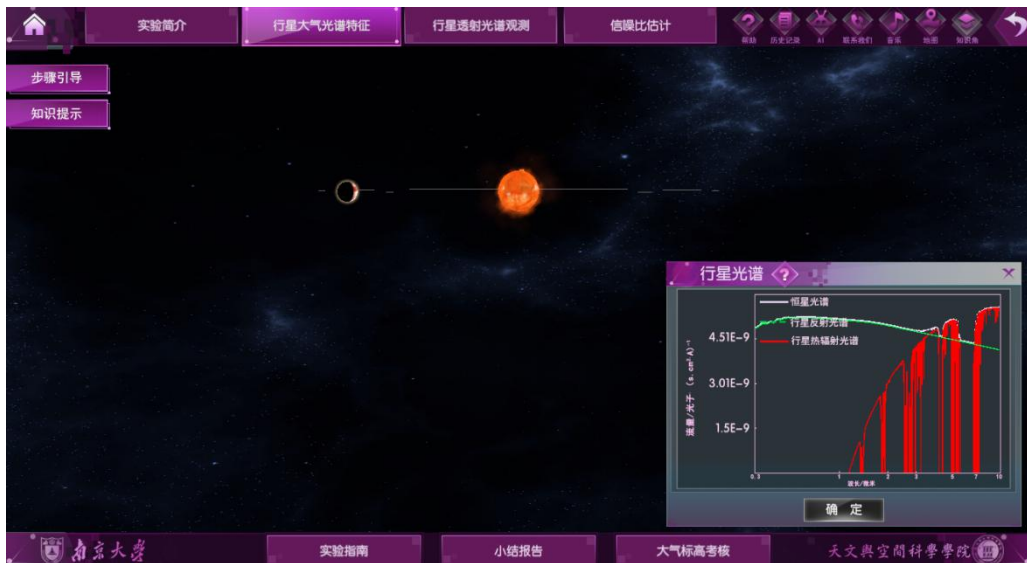


图5 行星的热辐射、反射光谱展示

操作结果

恒星光谱和行星的热辐射光谱可以近似为两种温度不同的黑体辐射光谱。行星反射光谱形状与恒星光谱形状类似，其大小与行星的轨道相位有关，在行星掩星附近时反射光谱最强，在凌星附近时反射光谱最弱。

步骤三：行星大气透射光谱产生原理

操作目的

学生通过观看行星大气吸收恒星光子动画，了解行星大气透射光谱的成因；并且通过调整行星大气的大气标高，了解行星大气标高对观测透射光谱的影响。

操作步骤

- 点击行星，点击【行星凌星】按钮，观看行星凌星动画（见图6）。
- 点击界面右下角的【行星大气吸收】按钮，进入行星透射光谱界面（见图7）。左侧的动画模拟了恒星发射出的光子透过行星大气的过程（光子的颜色代表波长，红色的光子波长较长，绿色光子波长较短）。
- 界面的右方是恒星光谱经过行星大气后的光谱，点击右侧的【行星大气透射光谱信号】，恒星光谱图切换为行星大气吸收光谱。
- 调整界面下方的行星大气标高进度条，左侧动画中的行星大气高度会随之变化。
- 点击界面右侧的【知识提示】，阅读材料【行星透射光谱】。



图 6 行星凌星慢镜头动画

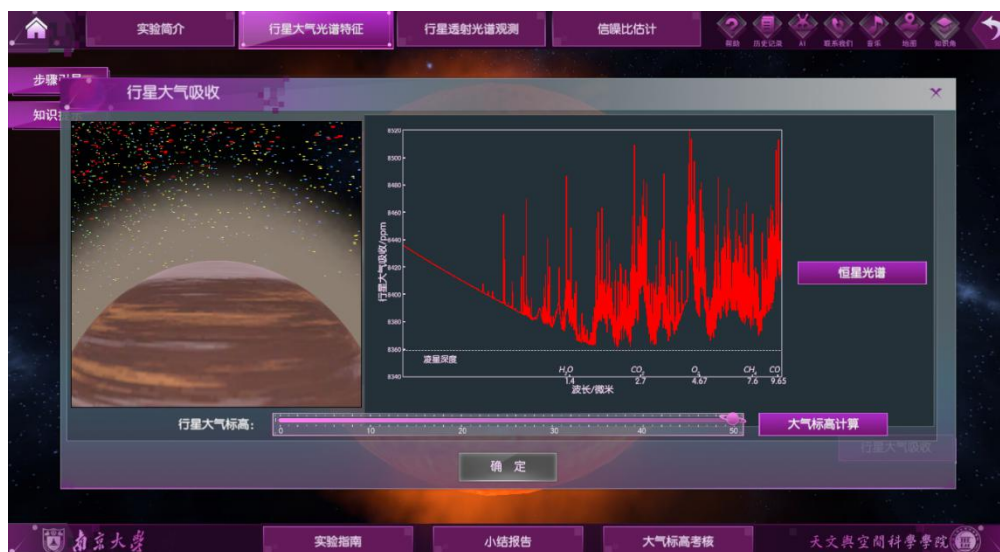


图 7 行星大气透射光谱界面

操作结果

行星大气透射光谱是行星凌星时，行星大气对恒星不同波长光子吸收程度不同而产生的光谱，具体表现为在不同波长上行星掩食深度不同。透射光谱中存在行星大气不同分子的吸收线特征，光谱横坐标里标注了水、二氧化碳、氧气、臭氧和一氧化碳吸收线的波长位置。光谱信号的强度与行星大气标高有关，行星大气标高越大，动画展示大气越厚，透射光谱的强度越大。

步骤四：行星大气标高计算原理

操作目的

学生掌握行星大气标高的计算方法。通过改变行星大气有关参数，了解行星的平衡温度、大气平均分子质量和行星表面重力加速度对大气标高的影响。了解行星的平衡温度计算方式。

操作步骤

- 点击“行星透射光谱”界面右下方的【大气标高计算】按钮，进入“行星大气标高计算”界面（见图8）。

- 大气标高计算界面右侧有三个进度条，分别可以调整行星的平衡温度、大气平均分子质量与表面重力加速度。点击“？”符号了解行星相关物理量的含义。

- 调整参数进度条，点击界面下方的【计算】按钮后，进度条下方会自动出现相对应的大气标高数值。点击大气标高数值旁的“？”符号，了解大气标高的计算方式。

- 点击“平衡温度”一行旁的【拓展】按钮，了解行星平衡温度的计算方式，点击“？”符号，可以了解影响行星平衡温度的相关物理量。

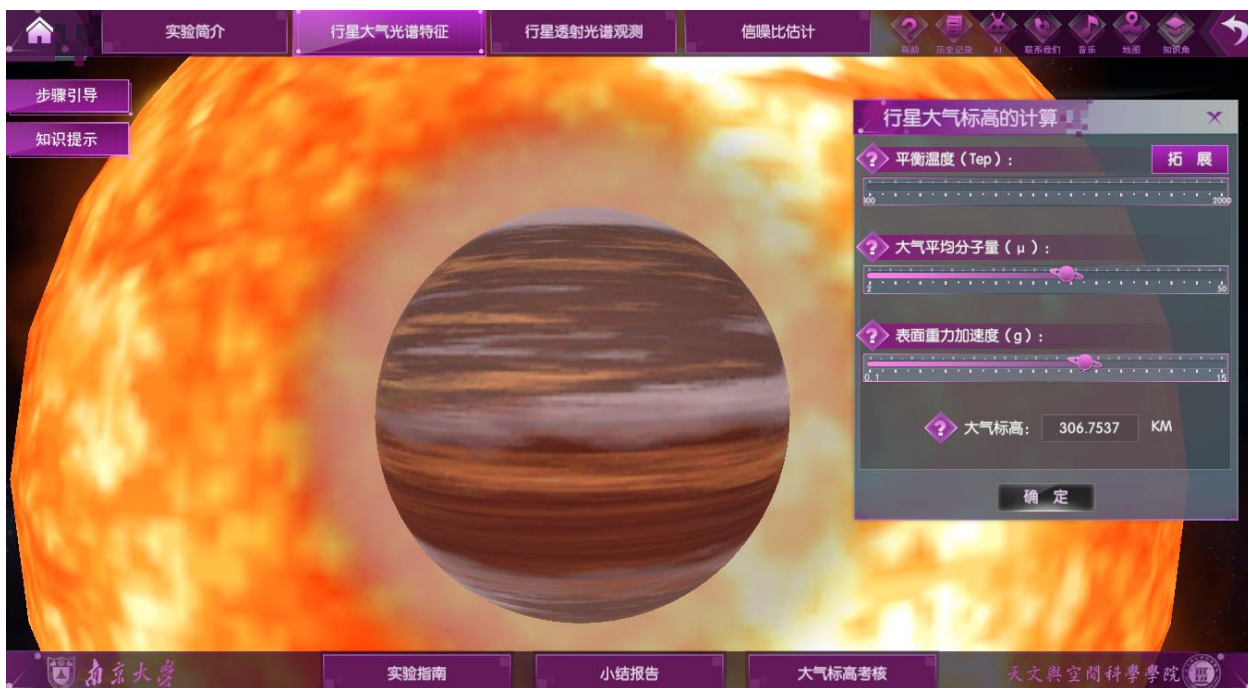


图8 设置不同参数，计算行星大气标高的界面

操作结果

改变行星平衡温度、大气平均分子质量和表面重力加速度，实验会自动计算对应的大气标高数值，同时界面中央行星的大气厚度随之变化。主要规律为：**行星平衡温度越高，大气平均分子质量越小，行星表面重力加速度越小，大气标高越高。**

步骤五：行星大气光谱特征环节考核——重现透射光谱轮廓

操作目的

考察学生对大气标高计算掌握熟练度和对行星透射光谱产生原理的了解。

操作过程

- 点击“大气标高计算”界面下方的“大气标高考核按钮”，进入考核界面（见图9），页面左图中有蓝色的固定透射光谱曲线。
- 在界面右方设置行星的相关参数，可重复调节。
- 点击“执行”按钮。



图9 考核：调整参数，重现透射光谱轮廓（蓝色光谱）界面

操作结果

页面左图中生成与学生设置参数对应的透射光谱（绿色），考核界面下方的“契合度”表

示蓝色和绿色光谱的重合程度。蓝、绿光谱越符合，“契合度”越高。

。需要调整的四项参数中，行星半径主要调节透射光谱信号的最低强度，**这一项参数影响“契合度”最明显**，学生需要首先使用鼠标拖拽或左右方向键微调**行星半径进度条**的方式将绿色光谱曲线与蓝色光谱曲线适配在同一水平上。**平衡温度、大气平均分子质量和表面重力加速度**可以有多种组合，这三项参数决定大气标高大小，主要调节绿色光谱吸收线的强度。

点击顶部“行星透射光谱观测”进入环节二

步骤六：观测行星系统目标选择

操作目的

学生从系统提供的行星系统中挑选后续用于观测的目标，并记录与观测相关的行星参数。并将上一环节所学习的行星大气标高和透射光谱信号强度估计方法运用进实例。

操作步骤

- 进入“观测目标选择界面”（见图10），通过键盘的方向键或鼠标滚轮调整星空视野。
- 选择希望观测的行星系统。点击星空中的恒星后，将弹出行星系统动画和系统介绍界面。
- 点击界面下方的【观测此行星】按钮，确定观测目标。进入“观测准备”界面。界面会显示该行星系统的基本物理参数。更多行星参数，可点击“行星基本参数”查看。
- 阅读【知识提示】中的【行星大气吸收深度计算】一节。
- 点击【确定】按钮，进入环节二的第一个考核。



图 10 系外行星观测目标的选择界面



图 11 行星参数展示和大气透射光谱信号估计界面

操作结果

学生根据提供的行星物理参数表格，记录初始观测凌星事件的时间零点，行星周期和行星周期误差。点击确定按钮后，根据行星系统参数表格中的行星质量、行星半径和行星平衡温度信息估计该行星的大气标高大小（可以参考地球大气或木星大气的平均分子质量：地球~29，木星~2），并估计透射光谱信号的强度，填写到对应输入框中（见图 11）。输入确认后，进入“台址选择”界面。

步骤七：台址和观测窗口选择

操作目的

学生根据先前所选择的行星系统和记录的凌星参数,学习并掌握如何为透射光谱观测选择地面望远镜台址,并在实验提供的台址、观测窗口组合中做出正确选择。

操作步骤

- 阅读【知识提示】中【凌星观测窗口估计方法】文档,了解凌星时刻的预测方法。
- 在“台址选择”界面中(见图12),结合提供的台址经纬度信息(阅读【台址】文档),选择地图上的观测台址。
- 进入“台址详细信息”界面(见图13),上方为学生选择行星的观测时间窗口,下方为台址基本信息,点击下方【返回】键可以重新选择台址。
- 点击观测窗口左侧的方框,点击【确定】,以确认后续观测时段。观测窗口可多次选择。



图 12 台址选择界面



图 13 台址详细信息、观测窗口选择界面

操作结果

选择观测窗口后，若在凌星发生时该台址处于夜晚，或目标系统的地平高度角小于 20 度，是不宜观测的，系统会自动给出相应提示。当学生选择到正确的台址和观测窗口组合后，将自动进入观测准备环节。

步骤八：望远镜参数设置

操作目的

学生根据选择的行星系统目标特征，选择合适的观测仪器。

操作过程

- 进入“恒星光谱界面”（见图 14）。
- 学生阅读【知识提示】中的【望远镜参数选择】，结合恒星光谱，和实验报告中记录的该行星系统的参数，评估在此次观测中所需要望远镜和光谱仪的规格，并设置**望远镜口径、光谱分辨率、通光效率**。望远镜口径可选择 2 米、4 米、8 米、10 米和 30 米；光谱分辨率可选择 10、100、1000、1000；通光效率输入范围在 0.5–0.95 内。
- 点击三棱镜图片，显示设置的望远镜参数下在空间观测到的恒星光谱（见图 15）。



图 14 观测准备—望远镜参数选择

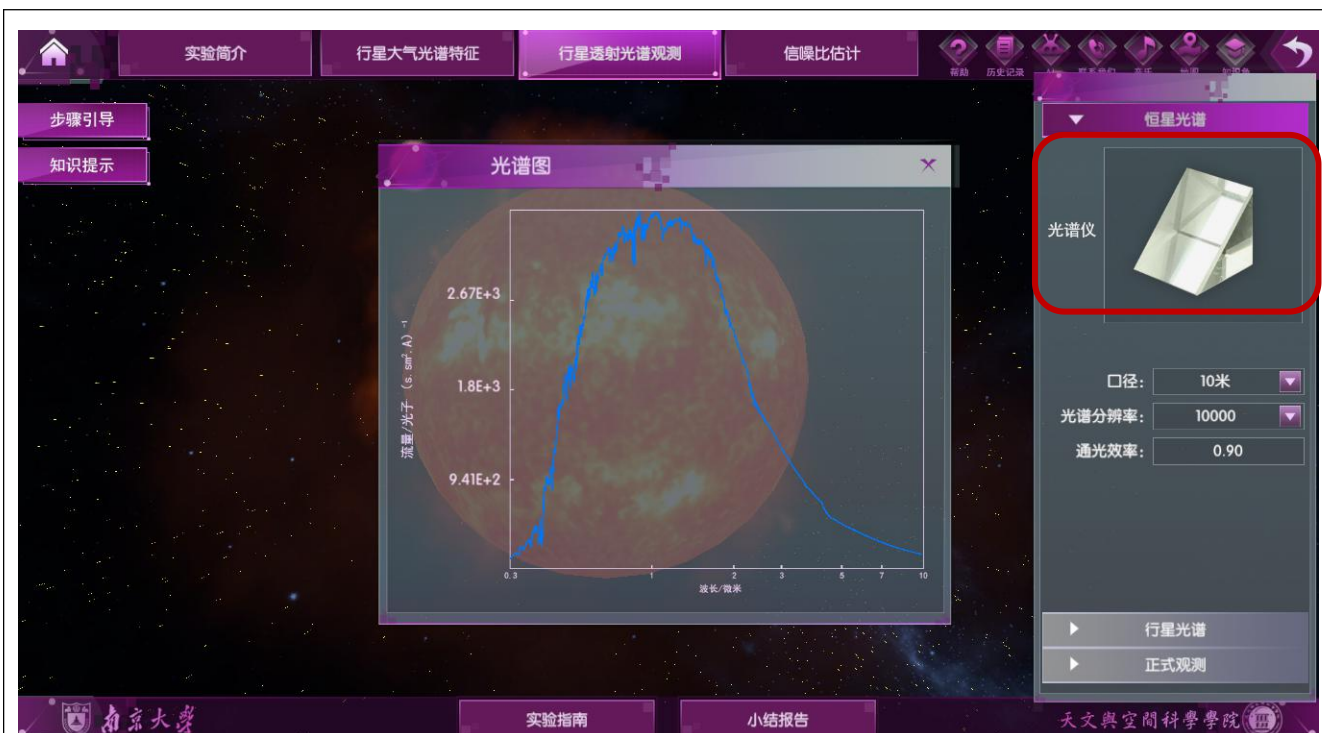


图 15 观测准备—恒星光谱查看

操作结果

选择不同的望远镜参数，观测到的恒星光谱轮廓和光子数会不同。**望远镜口径越大，透光效率越高，接收到光子数越多。光谱分辨率越高会降低光谱单并内的光子数，但是恒星光谱中的吸收线轮廓会更清晰。**学生结合恒星光谱，尝试多种望远镜参数组合，使得观测中可以获得足量光子数。

步骤九：空间、地面观测对比

操作目的

学生通过调节视野倍率条，观察在空间和地面观测条件下恒星光谱的差异，了解地球大气对光谱观测的影响。

操作过程

- 点击“行星光谱”按钮，进入恒星的空间观测视野（见图 16）。

- 拖动调整视野倍率条，进行空间观测和地面观测之间的模式切换（见图 17）。
- 点击三棱镜图片，对比空间、地面观测得到的恒星光谱的区别。



图 16 空间观测视野倍率调整

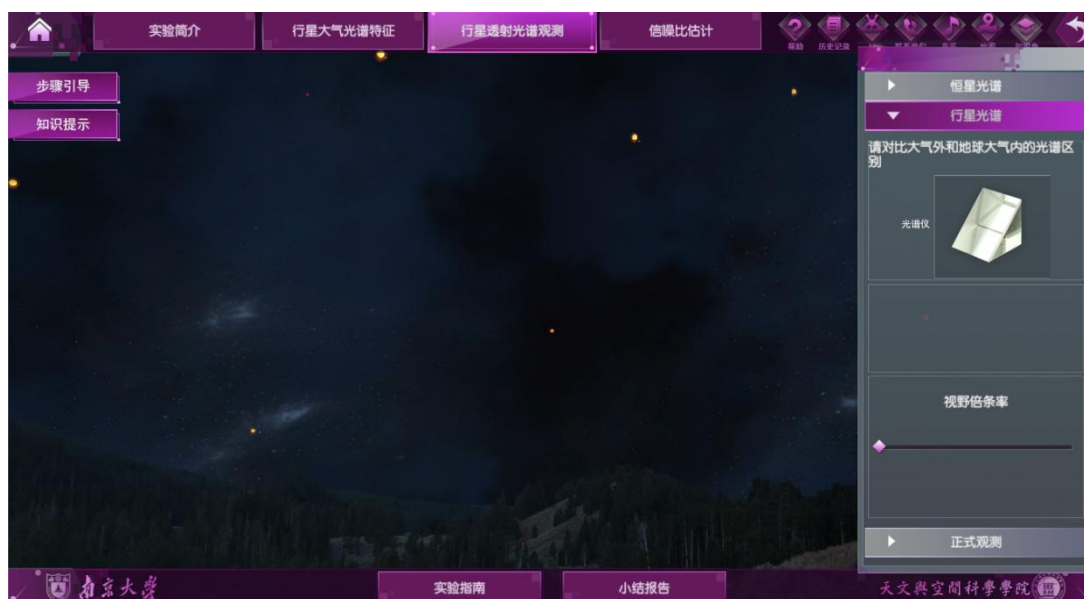


图 17 地面观测视野

操作结果：在动画中，经过行星大气的光子呈现绿色，未经过行星大气的光子呈现黄色。

当视野处于不同处时，观测的恒星光谱将不同。主要表现为：**在地面观测恒星光谱时，有很强的地球大气吸收线特征，而在空间观测不存在这一特性。**只有当将视野设置在地面时（视野倍

率最小时)，才能进入模拟观测环节。

步骤十：正式光谱观测

操作目的

该场景模拟真实的行星透射光谱观测场景，学生考虑实时观测条件的变化和 CCD 满阱数，合理设置观测曝光时间，获取光谱数据。

操作过程

- 点击“正式观测”按钮，弹出观测开始提示框，点击“确定开始观测”后，观测模拟场景将自动启动（见图 18）。
- 界面右方从上到下依次为时间流逝速度档位和五次曝光输入框。**选择调整时间流逝速度中的档位（x4, x8...），可以加快时间流逝速度。**
- 随着时间推进，目标系统会在天球上运动，目标系统的方位角、高度角，地球大气透过率，大气质量（Airmass）随时间变化在左上角显示。学生可以在【知识提示】中查看文档【Airmass】了解 Airmass 对天文观测的影响。
- 界面的右上方是恒星星象在大气湍动下产生抖动的动画。
- 在界面的下方，有整个观测过程的进度条（黄绿色条纹）。**学生需要在凌星发生时段(绿色)进行三次曝光，并在首尾的非凌星时刻（换色）各进行一次曝光。**
- 在界面右下方的曝光设置输入框中设置单次曝光时间，点击输入框右方的【曝光】按钮，完成一次曝光。每一次曝光后，CCD 曝光图（左下）和实时光谱图（右下）会显示该次曝光的结果。
- **第五次曝光结束后，可以选择重新曝光，也可以选择完成观测。**

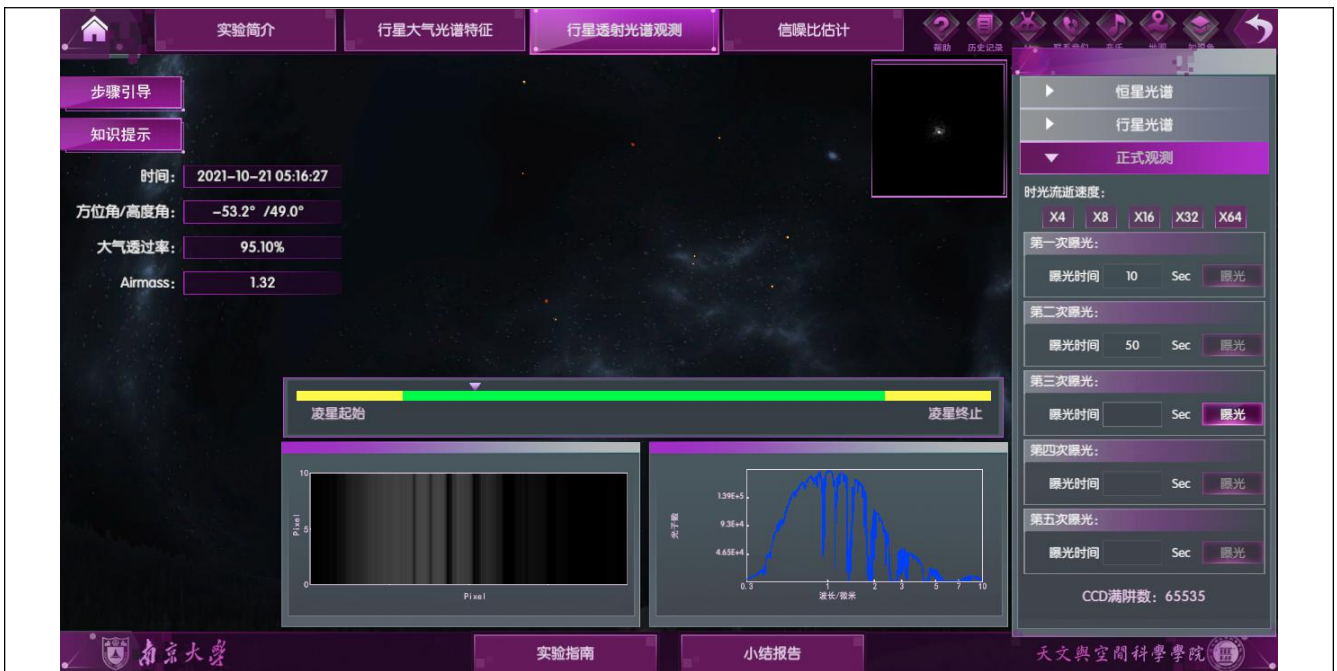


图 18 正式观测界面

操作结果

学生需要注意将每次曝光后光谱图光子数与 CCD 的满阱数（65535）对比，**判断是否过曝或曝光时间过短**，并结合实时大气透过率和 Airmass，**适当调整曝光时间**。最终将获得五张光谱图。

点击顶部“信噪比估计”进入环节三

步骤十一：叠加光谱获取最终观测数据

操作目的

行星大气吸收的光子数相较于恒星光子数是很稀少的。为了获取更多的恒星光子数达到较高光谱信噪比，需要延长曝光时间。但是由于 CCD 具有满阱数，无法在单次曝光中无限制延长曝光时间，**因此要将多次短曝光得到的光谱叠加，获得总光谱数据**。学生在该步骤将设置观测的总曝光时间，并了解多次曝光光谱叠加成总光谱的过程。

操作过程

- 阅读【知识提示】中的【行星大气透射光谱数据处理】，
- 界面的上方是光谱的 CCD 图像（见图 19），下方是总曝光时间的输入框，和学生选择行星的凌星总时长。在输入框内输入光谱叠加所对应的总曝光时间，**以行星的总凌星时长作为参考。**

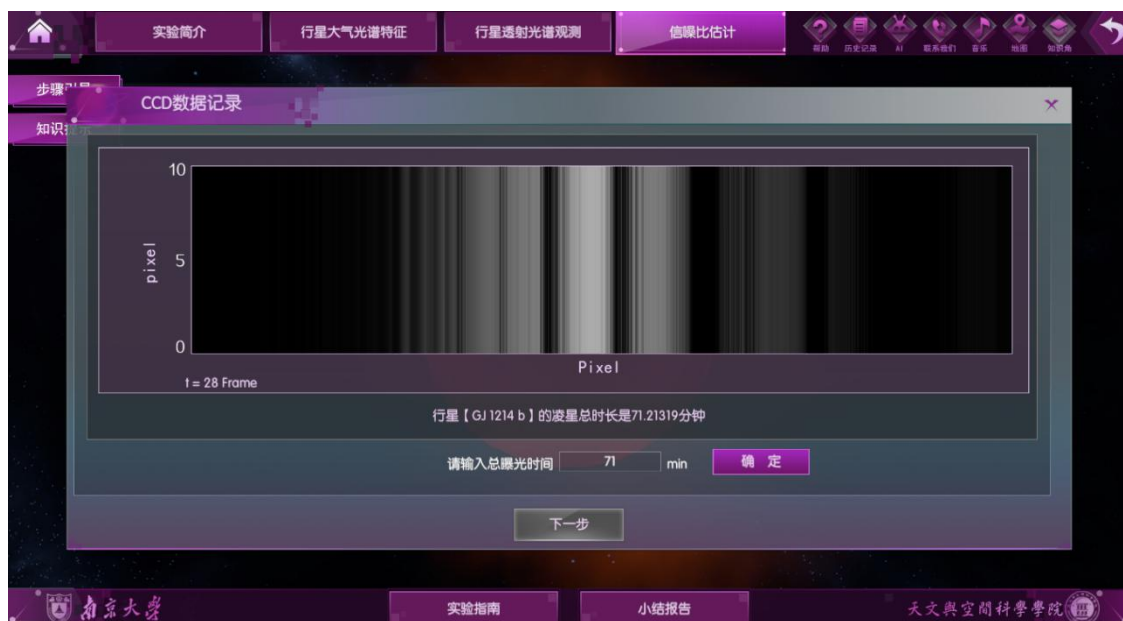


图 19 光谱叠加演示动画界面

操作结果

设置完成后，动画将呈现光谱逐渐叠加的过程。等效的总曝光时间越长，光谱中吸收线特征越明显。点击下一步，进入“光谱信噪比”界面。

步骤十二：恒星、行星光谱图和信噪比估计

操作目的

学生通过阅读材料和查看实验自动计算的恒星、行星光谱图，恒星、行星信噪比图，**学会光谱信噪比估计方式**，并根据自己先前观测获得的行星透射光谱数据估计行星大气中水吸收线

的信噪比。

操作过程

- 界面分别展示了光谱叠加过后的恒星光谱图、恒星信噪比图、行星透射光谱图和行星透射光谱的信噪比图（见图 20）。点击右上方的“？”按钮查看每张图的详细介绍。
- 阅读知识点中的【行星大气透射光谱数据处理】和【天文观测常见噪声来源和误差分析】，了解天文观测中的主要噪声来源和光谱信噪比的估计方式。
- 点击“开始计算”按钮，右下角行星光谱图的信噪比图消失，出现计算水吸收线信噪比的考核题目。
- 根据表格中的数据，估计在 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ 范围内，水吸收线的信噪比（仅考虑泊松噪声），并填写到输入框。

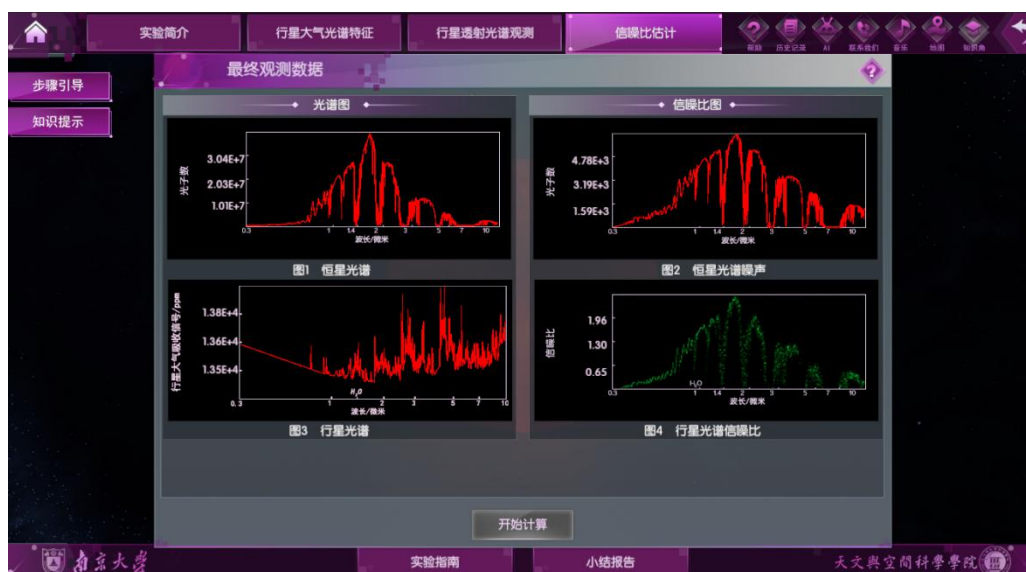


图 20 最终观测数据界面

操作结果

点击【输入完成】，右下角行星光谱图的信噪比图（绿色）出现重新出现，学生输入的估计结果以红点形式在信噪比图上展示。学生记录水吸收线的信噪比。

步骤十三：信噪比提升

操作目的

获得的行星透射光谱信噪比仍有提升空间。学生将了解空间观测、增加凌星观测次数和降低光谱分辨率对信噪比提升的效果和原理,并为自己的透射光谱观测结果选择一套提升信噪比的方案。

操作步骤

- 在光谱信噪比界面中, 点击下一步, 进入“信噪比提升”界面(见图 21)。
- 界面左方分别是三种方式提升光谱新造比的途径和采取该途径后的光谱信噪比图片。学生阅读知识点中的【信噪比提升】了解这三种提升信噪比途径的原理。
- 点击对应信噪比提升途径方框右上角的打钩说明选择该种方式。在“增加观测次数”中, 可选择 x2, x4, x8, 分别对应观测 2, 4, 8 次凌星事件。在“降低光谱分辨率”中, 可选择 x4, x9, 对应光谱数据中每 4 个点并合和每 9 个点并合。学生选择多选信噪比提升方式。



图 21 信噪比提升方案选择界面

操作结果

点击【确定选择】，界面右上图展示采用所选方案后的改善了的光谱信噪比；对比右下图的原始信噪比（为上一步骤中的光谱信噪比结果），学生评估所选方案对信噪比的提升倍数，在“信噪比提升X倍”输入框中填入相应数值。

步骤十四：结论

操作目的

根据学生观测的行星透射光谱结果，判断行星上存在水的概率。

操作过程

- 在“信噪比提升”界面点击【下一步】，出现行星动画，观察观测行星表面大气细节。
- 点击【跳过动画】，弹出“水分存在概率”输入框。学生根据先前估计的水吸收线信噪比，判断该行星大气中存在水的可能性，填写到输入框中（见图 22）。



图 22 实验结论界面

步骤十五：实验报告提交

点击报告完毕，点击右上角的【退出实验】按钮，点击【返回】。回到实验初始页面，点击页面下方的【小结报告】，**生成本实验三个环节的完整实验报告，查看后确认无误，点击【提交】按钮提交实验报告。若提交成功，会自动显示“提交报告成功”的提示。**



图 23 实验报告查看及提交

3-7 实验结果与结论（说明在不同的实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论）

本实验会自动记录学生在实验当中完成的每一步有效操作和在考核环节的输入表现。其中操作会计算实验的完成分，而考核中的输入则会用以评估学生对知识点的理解和熟练程度。

在每一个大环节结束时，会生成阶段性**实验小结**，以供学生参考本阶段的学习情况。在全部实验完成后，会将实验得分和实验结论以**实验报告**的形式给出，并附以**五边形能力图**和**实验评价**，为学生提出提升意见，还将提供对应的**展示动画**，直观地告诉学生实验结论。

实验报告的具体内容如下：

系外行星大气光谱探测实验报告

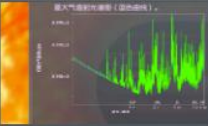



姓名: njusl

时间: 2021-5-28

得分: 90

环节	子环节	操作	得分
行星大气光谱特征	调节参数	行星周期	2
		行星大小	2
		行星反照率	2
	恒星	恒星光谱	2
		点击行星光谱按钮	2
	行星按钮	点击行星凌星按钮	2
		点击行星大气吸收按钮	2
		点击行星大气透射光谱信号	2
		调整大气标高进度条	2
		点击大气标高计算按钮	1
		点击平衡温度拓展按钮	2
		调整平衡温度进度条	1
	调整表面重力加速度进度条	1	
	调整大气平均分子质量进度条	1	

考核1-1	计算一次大气标高		2	10
初始界面	选择一个系统, 并点击观测此行星按钮	WASP-17 b		1
考核2-1	预估行星大气标高	10		5
	预估行星大气吸收强度	160		
台址选择页面	点击一个台址			1
考核2-2	观测窗口选择正确	智利		10
观测环节—恒星光谱	点击查看一次恒星光谱			2
	观测环节—恒星光谱			5

行星透射光谱观测	观测环节—行星光谱	视野进度条处于视场最小时, 查看一次行星光谱		2	
		视野进度条处于视场最大时, 查看一次行星光谱		2	
	观测环节—正式观测	点击使用时光流逝速度按钮			2
		曝光次数满足5次			2
		考核2-4: 曝光时间适宜			5
		输入总曝光时间	输入总曝光时间	460	2
	观看动画			1	

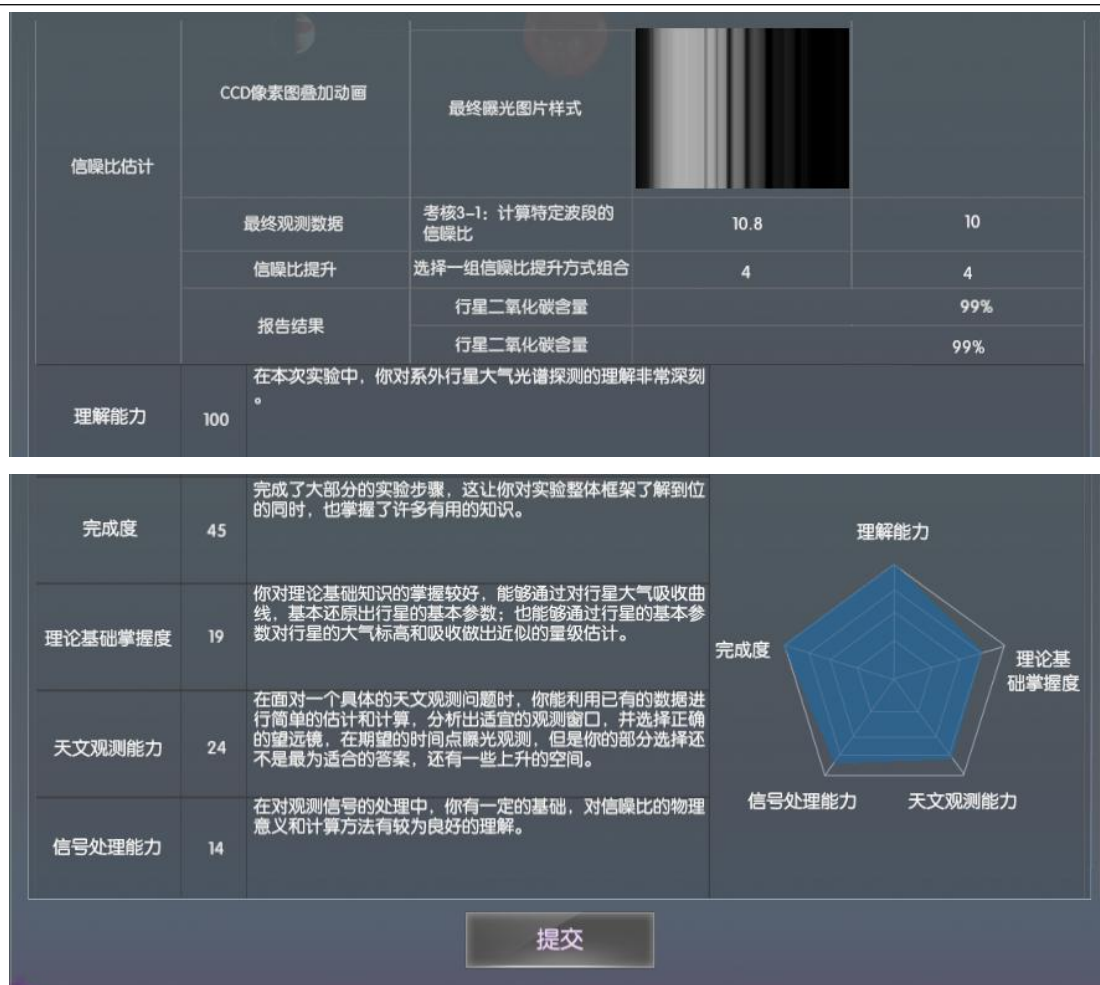


图 24 完成实验后自动生成的实验报告

在实验过程中，选择不同的观测目标、望远镜参数的组合，会得到不同的结论。

选择**热木星**为观测目标时，要从其透射光谱中证认诸如水分子这样在光学和近红外波段上有明显吸收线的分子的存在，使用 8 米口径的大型光学望远镜就已经足够，即使用 VLT、Keck 等望远镜可以实现预期科学目标。对于这类行星，在实验结论中就会给出**信噪比足够，可以探测到水分子**的评价。

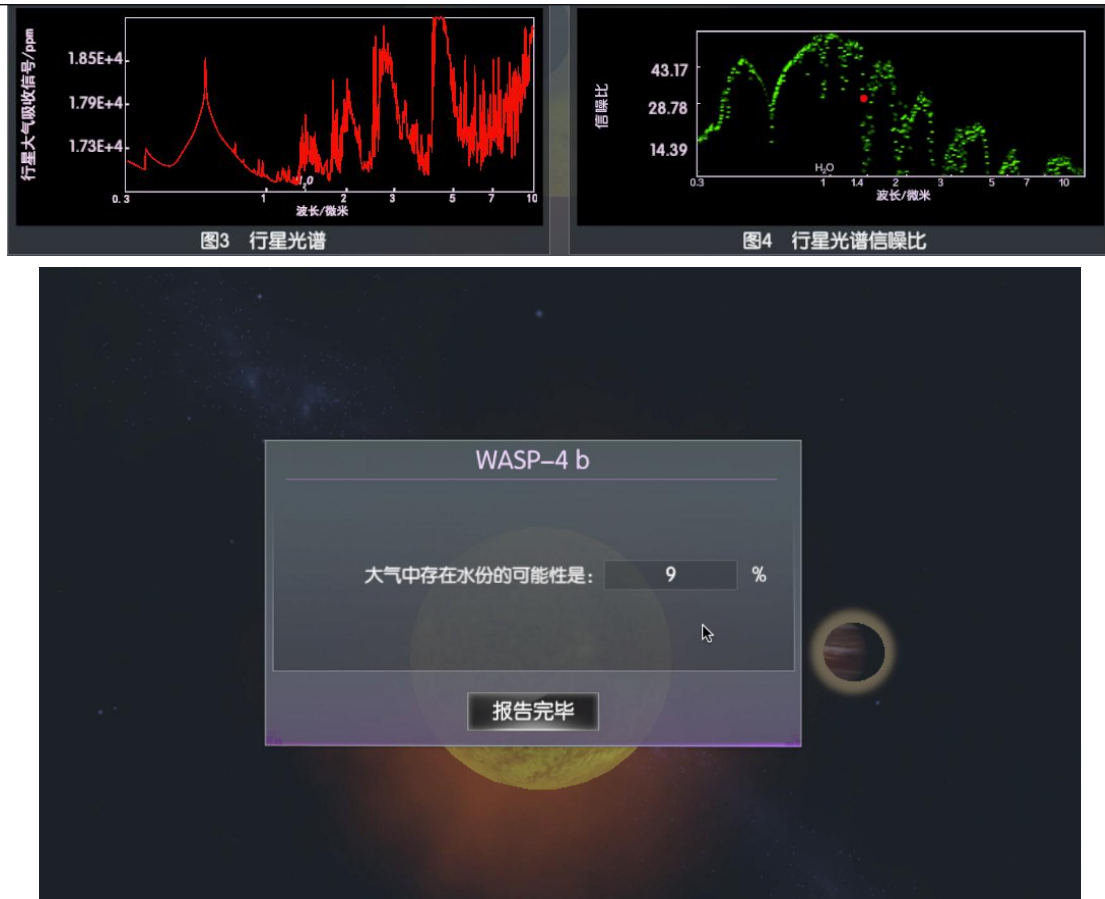


图 25 热木星大气透射光谱、透射光谱信噪比图，以此判断大气中水分子存在的概率。

选择**超级地球**为观测目标时，由于行星半径和大气标高均小了一个量级，要获得较好的信噪比，一个方法是大幅增加观测时间，一个是提升望远镜口径。前一种方法在望远镜时间宝贵、不同科学目标分享可观测时间的前提下，显然是难以做到的，而建设下一代 30 米口径的望远镜能有效提高望远镜集光能力，更可能获得较好的信噪比。不过对于这一类行星，还不能较为确定地证认水分子的存在，在实验结论中会给出**信噪比不足，不能探测到水分子**的评价。

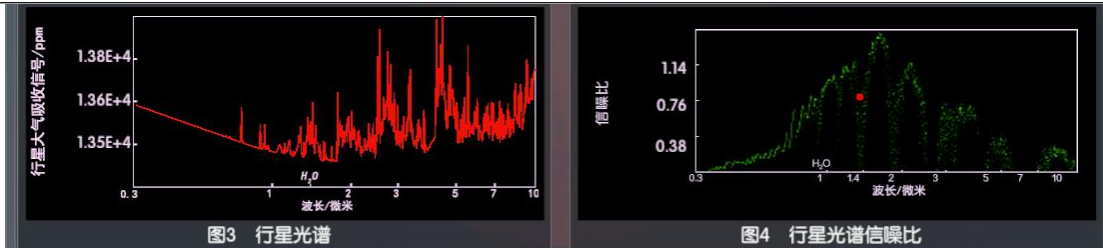


图 26 超级地球大气透射光谱、透射光谱信噪比图，以此判断大气中水分子存在的概率。

3-8 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

目前面向本校天文专业大三、大四本科生，要求完成前序相关课程《普通天文学》、《实测天体物理》、《原子物理》课程。适度开放给本校有较好数理基础的高年级本科生和研究生，以及部分合作高校的天文专业学生。

(2) 基本知识和能力要求

本实验对学生参与者有以下要求：

1. **具备一定专业知识：**对凌星法探测系外行星有所了解、知晓吸收光谱的成因及光谱探测的原理、具备实测天体物理的基础知识，对天文观测有一定程度的了解，能灵活运用学到的知识解决相关问题。
2. **具备独立思考，文献阅读和自主调研的能力：**能够通过阅读本实验中的拓展资料，主动在课后进行延伸学习，完善相关知识面。
3. **具备诚信的学术道德：**不依靠他人独立完成全套实验操作内容，实验中不得抄袭他人的实验报告进行操作。

3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2019年11月20日（上传系统日志）

系外行星大气光谱探测虚拟仿真实验项目

总体情况											
学习完成情况			成绩分布								
完成人次	未完成人次	0-59	60-69		70-79		80-89		90-100		
60	0	6	8		12		25		9		
第1期											
开课时间	2019.11.20	结束时间	2019.11.20	招生开始时间		招生结束时间					
学习完成情况			成绩分布								
完成人次	未完成人次	0-59	60-69		70-79		80-89		90-100		
20		3	3		4		7		3		
序号	身份	姓名	学号	单位	专业	进度%	进入时间	离开时间	用时(min)	得分	
1	学生	姚俊	161210037	天文与空间科学学院	天文学	100%	2019/11/20 14:30	2019/11/20 15:50	80	94	
2	学生	莫时显	161210016	天文与空间科学学院	天文学	100%	2019/11/20 14:30	2019/11/20 15:50	80	84	

第2期											
开课时间	2020年11月	结束时间	2020/11/18	招生开始时间		招生结束时间					
学习完成情况			成绩分布								
完成人次	未完成人次	0-59	60-69		70-79		80-89		90-100		
40	0	3	5		8		18		6		
序号	身份	姓名	学号	单位	专业	进度%	进入时间	离开时间	用时(min)	得分	
1	学生	蔡畅	171840607	天文与空间科学学院	天文学	100%	2020/11/18 8:30	2020/11/18 9:50	80	92	
2	学生	陈泓宇	171830638	天文与空间科学学院	天文学	100%	2020/11/18 8:30	2020/11/18 9:50	80	84	

(2) 已服务过的学生人数：本校 150 人，外校 40 人

(3) 附所属课程教学计划或授课提纲并填写：

纳入教学计划的专业数：1，具体专业：天文学，

教学周期：2个（2019，2020 秋季学期），学习人数 ~ 60 人：

附：《行星大气概论》教学周历（详见参考附件）：

2019-2020 年教学周历：

周次	授课方式	主题
1	课堂教学	绪论

2	课堂教学	系外行星探测方法——间接探测
3	课堂教学	系外行星探测方法——直接探测
4	课堂教学	行星宜居性——宜居带的定义
5	课堂教学	行星宜居性——大气的作用
6	课堂讨论	行星宜居性、系外生命小组讨论
7	课堂教学	地球大气--垂直结构与成分
8	课堂教学	地球大气--光化学反应
9	课堂教学	地球大气--大气运动
10	课堂教学	内太阳系行星特征介绍
11	课堂教学	外太阳系行星特征介绍
12	课堂教学	太阳系大卫星特征介绍
13	课堂教学	系外行星大气探测方法和原理
14	虚拟仿真实验	系外行星大气透射光谱虚拟仿真实验--自主学习
15	虚拟仿真实验	系外行星大气透射光谱虚拟仿真实验--讲解剖析
16	课堂教学	系外行星大气探测的前沿科学和最新进展
17	上机教学	系外行星大气透射光谱模拟软件的使用
18	课堂教学	未来系外行星探测项目
	期末考试	闭卷

(4) 是否面向社会提供服务: 是 否

(5) 社会开放时间: 2021 年 4 月 5 日

(6) 已服务过的社会学习者人数：约 40 人

4. 实验教学特色

(该虚拟仿真实验教学课程的实验设计、教学方法、评价体系等方面的特色，限 800 字以内)

1. 实验设计

以系外行星大气光谱探测为切入点，充分结合虚拟仿真实验的特点，模拟望远镜光谱观测实践，让学生对望远镜光谱观测有更直观，更深入地理解和认识。同时，以真实的系外行星大气光谱探测为例，训练学生根据目标特征选择、设计天文观测设备和观测方案，为学生进入研究生后，申请国际大型望远镜的观测项目积累经验，打下坚实基础。

2. 实验特色

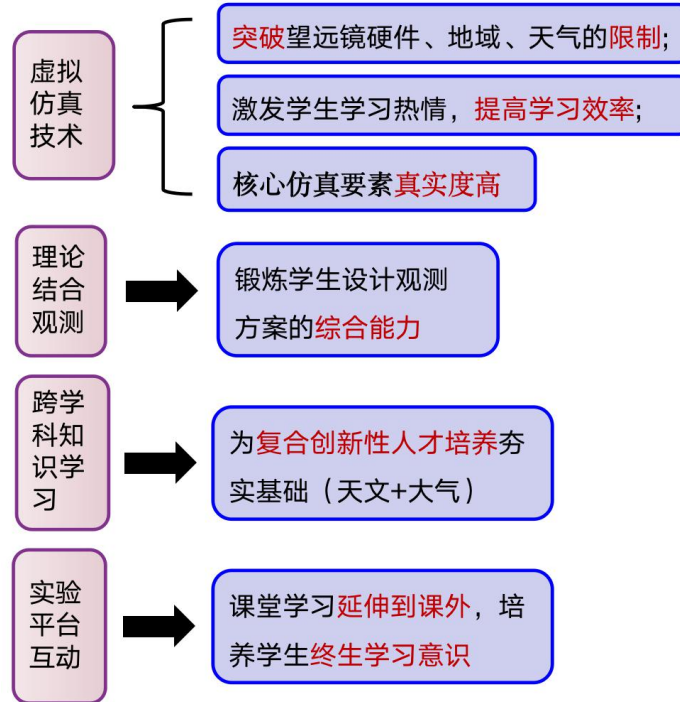
1. 虚拟仿真手段对观测目标、模拟观测流程进行建模，突破望远镜硬件、地域、天气的限制，同时激发学生学习热情，提高学习效率。

2. 结合在行星科学这一新兴的多学科交叉领域，让学生学习跨学科的基础知识，为复合创新性人才培养夯实基础。

3. 与观测相结合，锻炼学生设计观测方案的综合能力。

4. 借助实验平台，分享科技热点和科学前沿动态，通过评论区互动讨论，将课堂教学延展到课外，培养学生终生学习的意识和能力。

实验特色:



系外行星大气光谱探测虚拟仿真实验特色示意图

3. 教学方法

交互式学习: 为了帮助学生理解不同因素对行星大气透射光谱的影响, 允许学生对关键参数进行调节, 动态展示透射光谱变化, 让学生更直观地感受到不同参数的具体影响, 辅助理解背后的物理含义;

案例导向式教学: 学习过程中, 通过典型案例, 让学生理解透射、反射光谱的测量原理, 光谱数据的探测过程。考核过程中, 也结合学生自主选取的行星系统, 让学生按步骤分别进行透射光谱信号分析, 合理设计观测方案, 在模拟观测中自主获取光谱数据和并对光谱数据信噪比进行估计。

探索式学习和考核: 在学生自主选择行星系统, 进行透射光谱方案设计时, 方案并非唯一的, 需要学生灵活结合观测窗口, 信号特征, 自主探索合适的观测方案; 模拟观测过程中, 也需要学生根据目标特征, 实测的光谱数据, 自主选择、调整曝光时

间，以获取信噪比较高的光谱数据。

4. 评价体系

本虚拟仿真实验采用多元化的考核方式评价学生的实验效果，从理解能力、完成度、理论基础掌握度、天文观测能力、信号处理能力五个维度评价学生在实验中的表现，并给出五边形能力图。理解能力与学生的实验得分和实验完成时长相关，考察的是学生对实验的整体掌握情况；完成度考察的是学生对实验操作步骤完成情况；理论基础掌握程度考察的是学生对行星光谱、大气标高计算等实验原理的掌握程度；天文观测能力考察的是学生对观测步骤的熟悉程度；信号处理能力考察的是学生的数据处理能力。

学生最后的课程得分不仅包含有考察知识点掌握状况的考核分数，也包含有考察步骤熟悉程度的操作完成分，强调了在天文实验中理论观测并重的理念，同时也适当照顾外专业的学生，提高了学生的学习积极性。在理论知识学习的环节，学生按照实验步骤点击各个按钮，查看光谱、了解物理量的计算原理，就可以获得可观的操作完成分；在实际观测的环节，学生会体验一次完整的天文观测，包括选择目标、台站，确定观测时段，曝光观测以及数据处理，完成流程也可以获得相当一部分分数。在考核的赋分模型上，我们也关注了之前天文基础较弱的一部分同学，尽量采取阶梯式或线性赋分的形式，设定了足够大的答案容许区间。

5.实验教学在线支持与服务

(1) 教学指导资源：教学指导书 教学视频 电子教材 课程教案

(申报系统上传) 课件(演示文稿) 其他

(2) 实验指导资源：实验指导书 操作视频 知识点课件库 习题库

(申报系统上传) 测试卷 考试系统 其他

(3) 在线教学支持方式：热线电话 实验系统即时通讯工具 论坛

支持与服务群 其他

(4) 名提供在线教学服务的团队成员； 3名提供在线技术支持的技术人员；
教学团队保证工作日期间提供 4 小时/日的在线服务

6.实验教学相关网络及安全要求描述

6-1 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求(需提供测试带宽服务)

带宽要求：20M 下行对等带宽。

经测试客户机，带宽在 20M 以上时，能够有较快的加载速度和较好的交互体验。

本次测试基于主流配置计算机，模拟学生在校内校外不同的使用环境，最大限度地还原用户上网学习虚拟仿真实验的需求。

测试一：物理连接链路测试。测试目的：测试客户机和虚拟仿真实验项目网站的延迟和丢包情况；测试方法：客户机对本次虚拟仿真实验项目网站进行 PING

操作。

测试二：网络质量测试。测试目的：测试不同网络环境访问本虚拟仿真实验页面的加载情况。测试方法：通过 IP 代理，测试客户机在不同地域环境下打开虚拟仿真实验项目网页的速度。

测试结果：

当客户机带宽小于 20M 时，丢包情况严重、网络延时都很高，部分环境延时可以达到 20ms 以上，丢包率超过 5%；

当客户机带宽小于 20M 的时候，在不同 IP 对本虚拟仿真实验网页打开的测试中，网页打开速度较慢，特别是课件加载卡顿现象也常有发生，访问效果不理想。

基于以上测试结果，我们推荐客户机的带宽应大于 20M。

(2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）

本虚拟仿真项目的服务器最佳响应并发数为 300。

我们模拟用户访问虚拟仿真项目网站首页、用户登录和加载课件等操作。

经测试，当用户数量在 300 以下时，各项服务均能在 0.2s 内做出响应，服务器负载处于较低水平，课件加载也很快。当用户数达到 2000，服务响应时间维持在 0.8s 以内，但课件加载速度下降严重。当用户数达到 6000 时，服务响应时间超过 1s，服务器负载也超过了 80%。

基于以上测试结果我们认为本虚拟仿真项目服务器的最佳响应并发数为 300。

6-2 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

(1) 计算机操作系统和版本要求

计算机操作系统为 Windows7、Windows8、Windows10

Deepin15.7（国产 Linux 系统）

(2) 其他计算终端操作系统和版本要求

无

(3) 支持移动端：是 否

6-3 用户非操作系统软件配置要求（兼容至少 2 种及以上主流浏览器）

(1) 非操作系统软件要求（支持 2 种及以上主流浏览器）

谷歌浏览器 IE 浏览器 360 浏览器 火狐浏览器 其他

(2) 需要特定插件 是 否

如勾选“是”，请填写：

插件名称：（插件全称）

插件容量：M

下载链接：

(3) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

学生需要在 Windows7、Windows8、Windows10 系统环境下，使用以下浏览器打开：

浏览器类型	支持 WebGL	不支持 WebGL
Mozilla Firefox 52 及以上版本	支持	
Google Chrome 57 及以上	支持	

版本		
Apple Safari 11 及以上版本	支持	
MS Edge 16 及以上版本	支持	
360 浏览器	基于 (Chrome) 内核, 并且开启极速模式、智能开启硬件加速情况下支持 存在右键划线问题, 属于浏览器自身设置原因, 关闭浏览器鼠标手势即可	基于 (IE) 内核, 不支持

浏览器: Google Chrome

下载地址: http://dl.hdtool.com/tools/chrome_x64.exe

6-4 用户硬件配置要求 (如主频、内存、显存、存储容量等)

(1) 计算机硬件配置要求

Web 端 用户硬件要求

处理器: Intel (R) Core (TM) i5

主频: 2.4GHz

内存: 8GB

显卡: NVIDIA GeForce GTX GT740 2G

(2) 其他计算终端硬件配置要求

无特殊要求，满足能上网功能即可。

6-5 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

(1) 计算机特殊外置硬件要求

无

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求：无 有

如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求：

6-6 网络安全（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）

(1) 证书编号：32011243001-21002

(2) 请附信息系统安全等级保护备案证明



7. 实验技术架构及主要研发技术

指标	内容
系统架构图及简要说明	本系统是基于 B/S 架构设计的虚拟仿真

实验教学平台。系统采用轻量化的开发语言和模块化设计方案，部署简单、使用方便。系统支持分布式部署方案，可随使用情况动态扩充容量，基于容器化部署还可实现自动扩容，无需人为干预。

系统包含实验实训、实验报告、实验指南、数据统计、考试系统、帮助中心、收费系统、安全中心、资源中心、协同服务、学问系统和知识角等功能模块。系统除支持虚拟仿真实验外还可上传视频和其它文档资料，支持系统化课程体系学习。系统可对学生实验、学习数据做详细记录并分析每个学生的学习情况和整体学生知识掌握情况，实验报告系统可对学生提交的实验报告进行自动批阅也可由教师人工批阅或学生相互阅评。

系统用户可分为教师和学生两种角色。教师可发布实验资源、建设实验课程、设置课程共享信息、可查看发布课程的学习情况、可批阅学生实验报告和考试。学生可报名参与课程，可观看报名课程的视频操作课程的实验资源，可查看个人的学习情况，可评价

	<p>学习课程、参与课程讨论，可参与实验报告互评等。</p>	
实验 教学	<p>开发技术</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/>VR <input type="checkbox"/>AR <input type="checkbox"/>MR <input checked="" type="checkbox"/>3D 仿真 <input type="checkbox"/>二维动画</p> <p><input type="checkbox"/>HTML5</p> <p><input type="checkbox"/>其他</p>
	<p>开发工具</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/>Unity3D <input checked="" type="checkbox"/>3D Studio Max <input checked="" type="checkbox"/>Maya</p> <p><input type="checkbox"/>ZBrush <input type="checkbox"/>SketchUp <input type="checkbox"/>Adobe Flash</p> <p><input type="checkbox"/>Unreal Development Kit <input type="checkbox"/>Animate CC</p> <p><input type="checkbox"/>Blender <input type="checkbox"/>Visual Studio</p> <p><input type="checkbox"/>其他</p>

	<p>运行环境</p>	<p>服务器</p> <p>CPU <u>16</u> 核、内存 <u>32</u> GB、磁盘 <u>1000</u> GB、</p> <p>显存 <u>16</u> GB、GPU 型号 <u>NVIDIA GRID K1</u></p> <p>操作系统</p> <p><input type="checkbox"/>Windows Server <input checked="" type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他</p> <p>具体版本：</p> <p>数据库</p> <p><input checked="" type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle</p> <p><input type="checkbox"/>其他</p> <p>备注说明（需要其他硬件设备或服务器数量多于 1 台时请说明）</p> <p>是否支持云渲染： <input type="radio"/>是 <input checked="" type="radio"/>否</p>
	<p>实验品质（如：单场景模型总面数、贴图分辨率、每帧渲染次数、动作反馈时间、显示刷新率、分辨率等）</p>	<p>单场景模型总面数：40 万三角面</p> <p>贴图分辨率：512*512</p> <p>每帧渲染次数：30fps</p> <p>动作反馈时间：1/90s</p> <p>显示刷新率：60HZ</p> <p>分辨率：4K</p>

8. 实验教学课程持续建设服务计划

(本实验教学课程今后5年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数)

(1) 课程持续建设

日期	描述
第一年	根据行星大气探测的最新研究进展、学生学习反馈，持续更新虚拟仿真实验内容，扩展系外行星相关的数据库，进一步提升虚拟仿真的真实度；将本实验应用到更多的天文学专业课程、观测实习课程中，并适当向其他专业学生开放课实验。
第二年	借鉴和学习其他高校的天文虚拟仿真实验，将其他相关实验也引入教学课程中，与各天文单位开展合作，逐步尝试在其他高校的天文专业学生中，开展系外行星大气光谱探测的虚拟仿真实验。
第三年	将实验从网页拓展到虚拟仿真的便携设备上，针对实验开发相应的一体机应用程序，可以结合个人虚拟设备使用，有效扩展实验的场景，下载应用后，可以不再依赖电脑、网络，让用户可以更加自由、便捷地开展本实验，拓展实验的用户人群。
第四年	将实验专业知识点适当简化，通过天文讲座、在线课程、慕课等方式，降低外专业学生学习门槛，并向社会公众开放，以实验展示的形式，面向低年级本科生、高中生、甚至部分初中生进行科普宣传，吸引更多人投身天文研究。
第五年	与大气、地球科学等南大优势学科合作，在本实验基础上，

进一步拓展、开发行星科学相关的虚拟仿真实验场景，促进跨学科融合，将行星科学中不同学科的知识点有机结合起来，纳入核心课程《行星科学概论》，促进行星科学方向的复合型创新人才培养与教学知识体系的建设。

其他描述：考虑到天文专业学生人数普遍不多，通过后续持续建设，将用户拓展到非天文专业的学生，乃至非高校的用户（如高中生、社会科普团体），扩大实验影响力，让更多人从实验中学习受益。

(2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年	1	30	0	-
第二年	2	100	0	-
第三年	2	100	1（科普行业）	200+
第四年	1	50	1（科普行业）	200+
第五年	1	50	1（科普行业）	200+

其他描述：通过教学推广，应用到其他高校天文专业学生、非天文专业学生和社会群体中。

9.知识产权

软件著作权登记情况	
以下填写内容须与软件著作权登记一致	
软件名称	系外行星大气光谱探测虚拟仿真实验软件 V1.0
是否与课程名称一致	<input checked="" type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否
每栏只填写一个著作权人，并勾选该著作权人类型。如勾选“其他”需填写具体内容；如存在多个著作权人，可自行增加著作权人填写栏进行填报。	
著作权人	著作权人类型
南京大学	<input checked="" type="radio"/> 课程所属学校 <input type="radio"/> 企业 <input type="radio"/> 课程负责人 <input type="radio"/> 学校团队成员
权利范围	全部权利
软件著作登记号	2020SR1602980
如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。	
受理流水号	

10. 诚信承诺

本团队承诺：申报课程的实验教学设计具有一定的原创性，课程所属学校对本实验课程内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验课程的一切资源）享有著作权，保证所申报的课程或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

实验教学课程负责人（签字）：

刘慧根

2021年6月6日

11.附件材料清单

1.课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

2.课程内容学术性评价意见（必须提供）

[由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学科专业领域专家（不少于3名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。]

3.校外评价意见（可选提供）

（评价意见作为课程有关学术水平、课程质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由课程应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以1份为宜，不得超过2份。无统一格式要求。）