

率先成功甄别磁层顶瑞利-泰勒不稳定性

我科学家证实地球磁场边缘存在“窗帘涟漪”

□ 燕广庆



太空科普

栏目主持人:刘勇

中国空间科学学会与科普时报社合办

近日,我国科学家利用 THEMIS (西弥斯计划,是美国航空航天局主导的一个空间科学探测项目) 星座 5 颗卫星中的一颗卫星 TH-1D 的探测数据,成功甄别出磁层顶的瑞利-泰勒不稳定性。其中给出的观测特征,与 27 年前理论预期的磁场在平行方向上压缩,在垂直方向上蜿蜒,等离子体的密度、温度等都随着边界层的波动而周期性扰动完全吻合。同时,基于对瑞利-泰勒不稳定性深入理解,还成功提取了以前的文章没有提及的电场扰动特征,以及电场在等离子体中带来的跨越磁力线的传输效应。地球磁场边缘的“窗帘涟漪”,率先被中国科学家证实了。该成果 6 月 27 日发表在《美国地球物理研究》上。

空间等离子体中存在“窗帘涟漪”

瑞利-泰勒不稳定性,是指在密度不同的两种流体界面上,受到重力作用而使密度小的流体(比如油),托着密度大的流体(比如水),从而在这个界面上出现不稳定性。这种不稳定性表现为界面上任何扰动都会被迅速放大而使界面崩塌。由于重力是产生这种不稳定性的一个必要条件,所以这种不稳定性又称为重力不稳定性。

早期研究这一现象的是英国科学家瑞利勋爵(Lord Rayleigh)。后来的英国科学家泰勒(Geoffrey Ingram Taylor)在研究中发现,当上述界面存在加速度,且较轻的流体推动较重流体运动时,相当于界面上存在一个等效重力。这种情况下也能产生同样的不稳定性。由于他们在这一研究上的开创性贡献,这种不稳定性就以他们两个人的名字命名,简称 R-T 不稳定性。

在等离子体中,由于磁场的存在,扰动界面多呈现类似古罗马石柱上刻出来的纵向槽型形态。这种不稳定性又称为槽型不稳定性。理论上讲,在空间等离子体中,只要满足界面上的重力和与重力相反的密度梯度,或者与界面上加速度相同的密度梯度,就可能产生瑞利-泰勒不稳定性。



当外部太阳风动压突然下降时,地球磁层顶由于这种不稳定性而产生形变,形成“窗帘涟漪”,并伴随独特的电场和附近等离子体横越磁场运动。(图片由作者提供)

性,并在窗帘般的界面上制造出纵向凹槽状的“窗帘涟漪”。

理论预测始终未在卫星观测中得到证实

磁层顶是一个把地球磁层等离子体与太阳风分开的界面,也可以看作是浸没在太阳风中的地球磁场所吹出来的泡的外边界。这个界面因处于不断变化的拉锯战中而来回摆动,其典型的运动速度大约为每秒几十公里。由于空间等离子体的理想导电性,几乎没有电阻,所以等离子体只能沿着磁力线运动,而不能跨越磁力线运动。换言之,等离子体总是与其中磁场冻结在一起相伴相随,从而使太阳风无法跨越磁力线进入磁层顶以内的磁层区域。

那么,在磁层顶能否激发出瑞利-泰勒不稳定性而形成“窗帘涟漪”?再进一步讲,这种“窗帘涟漪”能否提供太阳风跨越磁层顶进入磁层的通道?1996 年,科学家在一篇论文中给出了理论分析,其结论是,在行星际磁场北向条件

下,如果磁层顶加速度超过 1km/s^2 ,并且持续 1-2 分钟,可以激发出瑞利-泰勒不稳定性。文章同时给出了这种不稳定性预期观测特征。这些特征包括界面扰动造成磁场的扰动、局地磁场压缩、磁层顶厚度增加、密度梯度减小,并指出单颗卫星很难捕捉到这一物理过程。理论分析最终需要用观测来证实,而寻求这种观测证据的过程,往往需要几十年甚至更久。

在空间等离子体探测中,单颗卫星无法区分时间变化和空间变化。因此,搭载相同仪器的多颗卫星形成一个星座,“组团”进行同步探测是当下的一个发展趋势。采用多点同步探测,就可以利用空间梯度计算方法,定量区分物理量的时间变化和空间变化,从而更准确地甄别物理过程的各种细节。

从 1957 年第一颗卫星上天,到本世纪初的 5 颗 THMIES 卫星组网,人类制造的卫星无数次穿越了磁层顶,但论文所提出的问题,始终没有在卫星观测中得到回答和证实。也就是说,没有人知道磁层顶瑞利-泰勒不稳定性长什么样。

我国科学家终于揪出“狐狸尾巴”

由于等离子体中的瑞利-泰勒不稳定性中必然经过电荷分离过程,从而形成静电场,所以这一不稳定性过程必然伴随一个特殊的电场信号,它必然隐藏在观测数据中。

早在 20 世纪中期,出于当时对核爆冲击波和核电站中磁约束的研究需要,有科学家对等离子体中的瑞利-泰勒不稳定性进行了理论分析,明确给出等离子体中瑞利-泰勒不稳定性伴随的电场,应该是在垂直磁场方向上相位相差 90 度的两个正弦信号。但在所有等离子体物理教科书中,几乎没有人提到这一理论预期的解析表达式。

幸运的是,我国科学家在研究中发现,如果能在数据分析中仔细甄别,就可以找出藏在复杂数据中的瑞利-泰勒不稳定性——那两个相位相差 90 度的正弦信号。经过反复验证,我国科学家终于揪出了隐藏在杂草丛中的“狐狸尾巴”,还进一步在等离子体相空间分布特征中,找到了瑞利-泰勒不稳定性这一特征伴随电场所带来的等离子体跨越磁力线传输的证据。

这一研究结果近日通过严格的同行评审并发表于《美国地球物理研究》。审稿人高度评价了这一研究成果:“这是一项很重要的研究,其科学意义处于该领域的最前沿。”另一审稿人认为:“这是磁层顶瑞利-泰勒不稳定性的一个观测案例。作者对卫星观测数据进行了非常细致的分析,并给出了教科书式的呈现,观测不仅与早期已有的理论工作相符合,而且还基于了理论预期的分析,又增加了新的重要元素和内容。”

审稿人提到的这些“新的重要元素和内容”,指的就是我国科学家对瑞利-泰勒不稳定性伴随电场的独特的识别方法,对这种不稳定性增长的估算,以及对其中必然伴随的电荷分离比率的确定方法。

相较于 27 年前的理论研究,卫星观测所提供的证据和细节,将更加生动的事实在人们面前,极大深化了我们对这一发生在大约 8 万公里以外的地球磁层边缘的“窗帘涟漪”现象发生发展过程的理解和认识,并为太阳风等离子体在磁场重联机制不能奏效时进入磁层,并引发空间天气灾害事件提供了定量参考。

(作者系中科院图维天信科技股份有限公司首席科学家)



近日,在泰国曼谷联合国会议中心举办的 2023 气候与清洁空气大会上,“中国十年清洁空气之路”专题分会特别介绍了中国有关大气治理的经验,指出快速增长中的经济体,应重视协同减少空气污染物和碳排放。而在诸多的大气污染中,光化学烟雾污染作为一种潜在的污染物,需引起我们足够的重视。

沿海城市面临光化学烟雾污染的威胁

光化学烟雾污染最早在美国洛杉矶被发现。早在 20 世纪 40 年代初,洛杉矶民众发现空气质量逐渐恶化,阳光明媚的城市上空笼罩着一层浅蓝色的烟雾。在这样的环境中,许多人出现眼红、喉咙痛、呼吸急促等症状。科学家对此研究后发现,造成这一切的罪魁祸首竟是臭氧,事件的根本原因是洛杉矶庞大的车辆基数。这些汽车尾气排放每天会产生数以吨计的碳氢化合物、氮氧化物。它们将在太阳光紫外线照射下发生的光化学反应,转变为以臭氧为主要成分的光化学烟雾,造成光化学污染。

在 20 世纪 70 年代初期,我国可用能源主要以燃煤为主,煤炭燃烧除了释放大量烟尘外还会产生大量的氮氧化物,成为这一时期我国大气最主要的污染源。步入 21 世纪后,我国经济发展和城市化进程显著加快,部分城市的大气污染由煤烟型向光化学烟雾型转化,呈现出二者混合型污染特征。我国中南部地区,特别是沿海城市,也发生或面临光化学烟雾污染的威胁,上海、深圳、广州等城市也曾监测到光化学烟雾污染。

对植物的影响远超人类

光化学烟雾主要是指汽车尾气,以及工厂废气作为氮氧化物、碳氢化合物等一次污染物排放到大气中,经太阳光紫外线照射,发生光化学反应所形成的二次污染物与一次污染物混合后,在阳光照射下形成的浅蓝色烟雾。

光化学反应是在阳光照射下发生的一系列氧化还原反应,会产生大量高活性自由基以及二次污染物,混合后就形成了光化学烟雾。经光化学反应后,光化学烟雾的主要化学组成有臭氧、过氧乙酰硝酸酯、过氧化氢、无机酸、醛,以及烃类化合物等。

光化学烟雾对人体具有刺激作用,尤其对眼睛伤害更大,可引起眼睛发红、流泪等症,还会出现咳嗽、喉咙痛等症状。

光化学烟雾对植物的影响甚至超过人类。它的主要成分臭氧会减弱植物的光合作用,导致植物自然的营养吸收受损,抵抗力变差。

光化学烟雾还可与大气中的颗粒污染物,如烟尘、PM2.5 等混合形成气溶胶,弥漫在空气中,且难以沉降,影响光的散射,导致大气能见度降低。

从源头进行治理

在光化学烟雾污染防治中,我们可从源头上治理,即减少汽车尾气和工业废气排放。汽车燃油无法充分燃烧,排放的汽车尾气中含有许多对环境有害的化学物质,因此可以通过科学技术手段提高汽车燃油的利用率,为汽车添加尾气净化装置也是有效方法。

如今,各个城市新能源汽车越来越多,使用清洁能源是为环境减负的重要措施。此外,减少工业废气排放,更新能源结构需要重点关注。工厂废气排放必须经过处理后进行脱硫脱硝,降低污染物含量。此外,我国当下使用最主要的能源仍是煤炭、石油,对这些能源经过煤的净化、石油提纯等前期处理后再使用,也是防止光化学污染的有效手段。寻找新型能源替代传统化石燃料是未来环境治理的重要途径,例如太阳能、风能、核能等。

在城市经济快速发展的背景下,我们必须警惕光化学烟雾的形成,这就要求社会各界积极主动参与环境治理,从小事做起,规范标准,共同营造美丽家园,让碧水蓝天与我们共存。

(第一作者系西北师范大学教授、博士生导师,第二作者系西北师范大学硕士研究生)

警
惕
被
忽
视
的
光
化
学
污
染

□ 莫尊理
吕文博

打雷要躲 为什么还要人工引雷

□ 文川东



6 月 26 日,河北石家庄多位网友拍下当地打雷瞬间。网友说,当时,雷声巨大,隔着玻璃都能感到震动。这个视频一时冲上热搜。

下雨时,天上的云有的是正极,有的是负极,两种云碰到一起就会发出闪电,同时放出很大的热量,使周围空气受热膨胀,瞬间被加热膨胀的空气会推挤周围空气,引发强烈的爆炸式震动,这就是雷声。

打雷本来是一种自然现象,而 2021 年 7 月一段炫酷的雷电视频在网上引起关注。视频中,一枚带有金属导线的小火箭迅速飞上云端,突然一道闪电划破长空,笔直入地。这次高能燃爆不是什么电影特效,而是目前先进的人工引雷技术。

不少网友直呼“人工引雷怎么这么酷”,当然也有不少网友提出疑问,打雷时我们躲都来不及,为什么还要引雷?今天我们来揭开人工引雷背后的秘密。

人工引雷是我们主动从天上将雷引下来,而不是将雷电打在避雷针上,其中引雷火箭是人工引雷最主要的方式。火箭的外壳由复合材料制成,内部安装的是发动机和点火电炮管。为了让火箭能更平稳降落在地面上,在火箭顶部安装了降落伞。火箭尾部的金属丝是引雷的关键角色,它的作用就是在火箭上升过程中在空中制造出一条引雷路线,让雷电沿着这条路线打在指定的地面上,因此对金



雷雨天闪电击中地面。视觉中国供图

属丝的强度、粗细要求非常严格,强度自然越强越好,重量要足够轻。

科研人员经过试验发现,直径为 0.2 毫米的细钢丝是导线的最佳对象。此外,火箭上升的速度最好控制在每秒 150 米到 190 米,因为上升快容易将火箭尾部的金属丝拉断,太慢又赶不上带电粒子漂移速度,同样无法实现引雷。

可能很多人要问,既然引雷如此费力,那这些人工引雷又有什么用呢?这是因为人工引雷能提供最接近真实的自然雷电模拟源,不但可

以用于雷电的物理研究,还能对雷电保护装置的性能进行综合实验和评估,从而为我国的雷电监测、预报、预警、雷电防护技术研究和开发提供必要的基础平台,大大提高

我国雷电灾害的预防能力。不仅如此,雷电还是一个强大的能源资源,如果我们能掌握并储存,将为人类带来不可估量的价值。

科技创新,气象先行。如今,我国的引雷技术世界领先,相信随着气象科技的不断进步与发展,一定能用科技和智慧的力量去创造下一个气象奇迹,为防灾减灾作出贡献。

(作者系四川省南充市气象局助理工程师,第九届全国科普讲解大赛二等奖获得者)



扫码观看
讲解视频

『围炉冰茶』来了
如何正确使用干冰

□ 科普时报记者 史诗

还记得去年火爆的“围炉冰茶”吗?最近,“围炉冰茶”也火了。炎炎夏日,将炭火换成干冰,热茶换成冷泡茶、冰镇水果取代烤橘子,一桌“围炉冰茶”在仙气缭绕中透出丝丝凉意。但很多人并不知道,“围炉冰茶”的必备道具干冰若是储存、使用不当则会“暗藏凶险”,引发安全事故。

中国科普作家协会应急科普专委会常务副主任张英告诉记者,干冰是二氧化碳的固体形式。在大气压下,二氧化碳的凝固点为 -78.5°C ,因此,干冰通常用于保持物体冷冻或低温状态,在食品、卫生、工业、餐饮中大量应用。

作为“围炉冰茶”的必备道具,干冰在使用中存在一定的安全隐患。张英解释说,“围炉冰茶”的原理是在干冰上倒热水或开水会迅速降温,营造出浓厚的烟雾。但干冰遇热迅速气化的同时,也可能会爆炸伤人,最好用隔网或软布将干冰和玻璃瓶隔开再倒水。“此外,干冰极易挥发,会释放出比固体干冰体积大 1000 多倍的二氧化碳气体,尤其是在密封条件下高于 -78°C 就可能发生爆炸,在与液体混装时也极易爆炸”。

张英介绍了存放干冰的容器、存放干冰的地点和取干冰的正确方法。

使用和存储干冰要适量,一定不能用密封容器和玻璃容器,最好使用不锈钢内壁的保冷壶。在装入手冰前,一定要把保冷壶的密封胶条拆掉,这样就可以释放保冷壶的压力,确保不会发生爆炸。

普通家庭保存干冰,切记不能在冰箱存放,因为冰箱也是密闭空间,也不能在密闭的车里存放干冰。使用干冰时,要开窗通风,否则,时间一长,高浓度二氧化碳会让人窒息。

如果直接用手接触干冰,超过一两秒就有冻伤的危险,取干冰时要戴好防冻手套或用夹子抓取。

如果要达到让月球解体的能量下限,至少要发射千万枚超高速“弹丸”,在科学上没有任何可实现性,最终剧组舍弃了原方案。

不过,这个情节又有其必须存在的理由。为了让核爆月球更有可信性,苟利军团队引入了“相控阵”的新概念,比直接核爆更“科学”了。但最初剧本中设定的是另一版“弹幕”计划:在太空电梯上加装大炮,在地球上以一定角度、规律、时长发射“弹丸”,像抽陀螺一样抽动月球,让其自转加速解体。

苟利军团队经过周密计算后发现,如果要达到让月球解体的能量下限,至少要发射千万枚超高速“弹丸”,在科学上没有任何可实现性,最终剧组舍弃了原方案。

融合就是互相包容和需要

王姝发现,越来越多的电影人开始正视并思忖一个问题:科幻这个曾被认为与想象力相关的类型,跟科学到底能有多少关系?

随着公民科学素养的不断提高,一

批高素养、高要求的观影群体正在形成。王姝常常对影视界的朋友说,“我们的观众准备好了,你们呢?”

“科影融合的主体一定是电影。”穿梭在科学和影视之间的王姝,一直坚信电影导演的需求,才是这项跨界合作最核心的需求。

当然,王姝也能看到科幻影视行业暴露出来的问题,一些创作者对科学的认知还停留在“高中理科生”的阶段。王姝分享了这样一个插曲:一位编剧在拜访一位生命科学领域的科学家之前,花了大半年时间做了大量调研工作。但一番交流之后,这位编剧在感慨科学研究更新速度之快时,甚至崩溃大哭。

另一个不可忽视的现实情况是,观影群体的科学素养也在提升。王姝形容这是非常“恐怖”的事情,在她看来,影视创作者应该尽快刷新对科学的认知,因为观众越来越不好“糊弄”了。

科学界也在主动拉近与科幻影视的距离。电影圈的朋友告诉王姝,“今年以来,一些非常有影响力的影评,竟来自我们很‘陌生’的科学界”。

王姝很欣喜看到这样的变化,“科学家写影评,角度比较新颖,更易产生积极的效果”。

毕竟,人们看的是电影本身,科学给电影喊“卡”,并非谁在妥协。

科学,给电影喊“卡”



轻松扫码 科普一下