

瑰丽的球状闪电 ——地球科学概论学习心得

中国科学技术大学地球和空间科学学院 廖荣 PB21071406

导言:球状闪电 (Ball Lightning) 是一种神秘而罕见的现象, 笔者有幸在高中晚自习期间亲眼目睹了一回球状闪电, 一团直径 10 厘米的橙红色的球状的等离子体或云雾状物质从窗外飘入教室, 大约五秒钟后, 飘荡至灯管附近并爆炸消失, 发出巨大响声并直接导致教室电路损毁。事后总结得到的其他信息有: 1. 不同的同学对于同一个球状闪电颜色的描述是不一样的, 笔者描述为橙红色, 这也符合现有记录下球状闪电的普遍颜色, 而其他的描述包括白色、红色、蓝色、绿色等。2. 事发当晚有较大暴雨及明显雷暴气象, 窗外的树因此折断一棵。3. 并不只有笔者所在的教室出现了球状闪电, 在其他楼层也出现了球状闪电, 并稳定存在和飘荡了更长时间, 从一间教室的窗户飞入, 飘荡过整个封闭的楼道并从另一教室的窗口飘走, 并未爆炸消失, 但在沿途的墙上留下了明显的黑色灼烧痕迹。由于笔者对高中阶段的这一经历印象深刻, 故选此课题撰写地空科学概论课学习心得。但由于笔者几乎没有任何专业知识, 也没有实验条件, 故所做的工作只能是尽可能搜集并学习相关的发表在知名期刊上的外文论文及其参考文献并总结归纳为类似科普文章的形式。

理论模型: 由于对球状闪电的观测可遇不可求, 因此对于球状闪电的模型和实验的解释并不成熟, 但大致根据球状闪电的能量来源分为两个方向, 内能理论方面最著名的是 J. Abrahamson 和 J. Dinniss 教授提出的**缓慢氧化硅的纳米颗粒网络模型**, 而这一理论得到了 G. S. Paiva 和 K. D. Stephan and N. Massey 等人的实验证明, 他们的模型认为球状闪电的产生可以被解释为当正常雷击土壤时, 其能量转化为化学能储存在土壤中的硅、硅或碳化硅纳米颗粒中, 并使这些硅纳米颗粒聚集形成纳米球链和纳米球网。由于雷击穿透的土层很深, 周围的土壤会阻挡硅纳米颗粒网络的径向扩散, 从而保护纳米颗粒网络的完整性, 并使其在冲击压力衰减后以蒸汽的形式稳定地喷射到空气中, 然后当热蒸汽在大气中冷却时, 硅在空气中凝结成纳米硅颗粒的气溶胶。电荷聚集在气溶胶表面, 将其结合在一起, 由此产生的球体随着大气中硅氧化的热量开始发光。

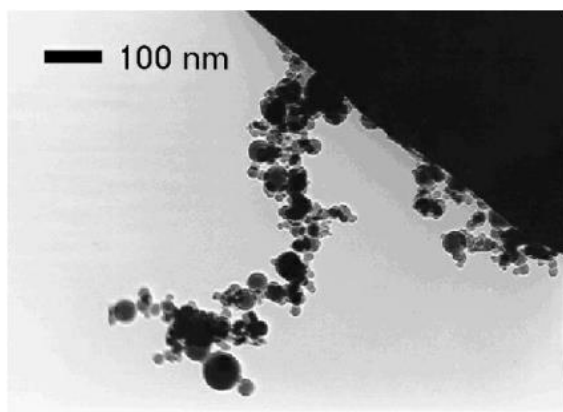


图 1. 对碳含量为 12.5% 的淤泥壤土进行 14.9kV 放电后在上方气体空间进行采样得到的硅纳米颗粒链电子显微照片

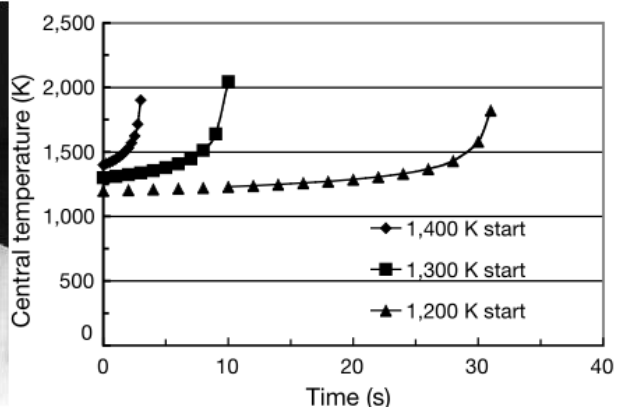


图 2. 纳米颗粒网络模型对直径为 300 mm 的球状闪电的温度变化过程的预测

而对球状闪电**颜色及寿命**可以通过温度的变化得到解释。硅纳米颗粒网络模型对直径 300mm 的球状闪电温度变化过程进行了预测, 当起始温度为 1200 - 1400

K 时，单位体积的热变化随温度呈指数上升，在大约 3 - 30 s 后会突然增加。该模型也同时预测了球状闪电的剧烈结束。当温度上升到 1700 或 2000 K 以上时，硅或二氧化硅将熔化，从而发生氧化加速和网络破裂。但对于较低的活性金属负载（例如，来自低碳土壤的球状闪电），熔化温度可能无法达到，球状物会从视野中消失。对于较低的起始温度，球可能仅在其寿命的后期（可能在几分钟后）才可见，因此它不容易与形成性雷击联系起来。对于颜色及其变化的解释可以由模型预测得到的温度数据和黑体辐射理论结合起来得到，在 1200-1400K 的温度范围内，硅峰值辐射 4.5-35W，对应于可见光中的 1.2-14W，因此 1200K 时的球状闪电被报告为半透明白色，而较低的温度可能被报告成黄色或红色，也与大多数目击报告相符。

而 J. J. Lowke 等人提出的外部能量理论将球状闪电解释成微秒级的脉冲放电，这又可以很好地解释天然球状闪电地形成、寿命、能量来源和运动。而 P. L. Kapitsa 又在外部能量理论方面建立起最著名的模型，假设**强烈的射频电磁场可以提供和维持球状闪电所需要的能量**。并由此开展了一系列的微波实验，其中 Dikhtyar 和 Jerby 教授的实验成功用局部微波产生火球并从熔融热点喷出，且在微波电源关闭后仍能持续存在较短时间，体现出黄色到红色的颜色。但由于现仅有的由中国科学家记录下的实地观测数据符合内能理论中的 J. Abrahamson 和 J. Dinniss 教授提出的缓慢氧化硅的纳米颗粒网络模型而尚未有观测数据证明 J. J. Lowke 等人提出的外部能量理论，故不展开介绍。

观测现象：虽然球状闪电曾较多次地被目击，但是对于自然界的球状闪电的首次科学观测和记录发生在 2012 年中国青海省，由兰州西北师范大学的研究人员绘制辐射地图时意外记录下，并成功记录下球状闪电的光学图像和光谱信息。

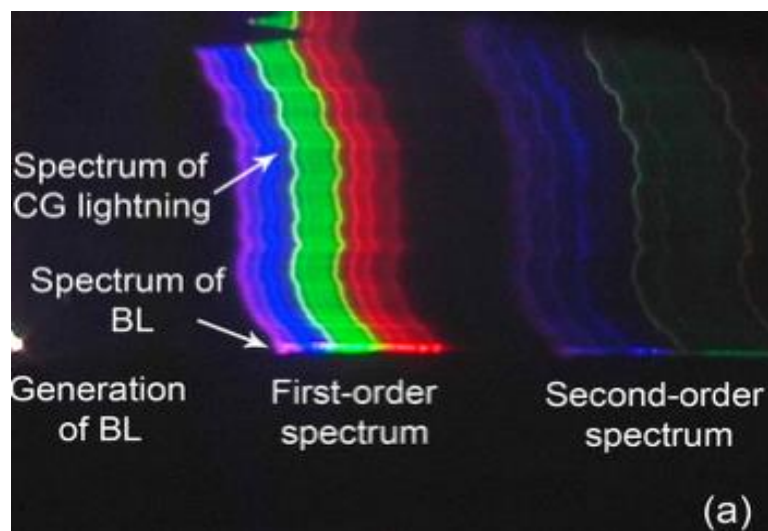


图 3. 成功获得球状闪电的光学图像及其一阶二阶光谱信息



图 4. 光学图像中可以看到球状闪电的颜色随时间变化，在开始时呈现强烈的紫白色，80ms 时变为橙色，160-1100ms 期间大致保持白色，在 1120ms 后消散成红色，且有照片像素算出移动速度为 8.6m/s

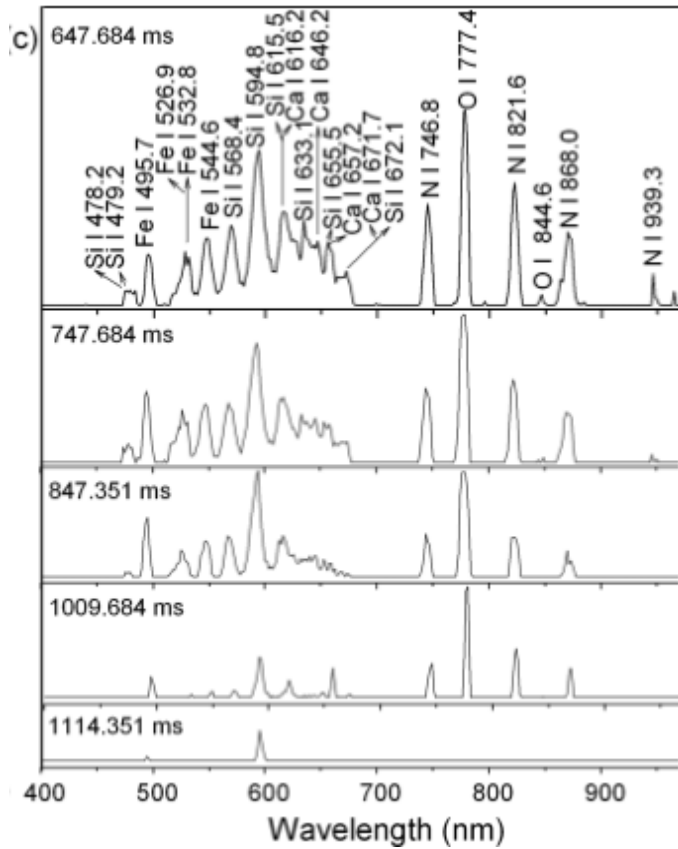


图 5. 在高速摄像机下球状闪电的光谱信息。在可见光范围内大多数发射线由中性硅、铁、钙辐射，且球状闪电的大部分寿命中都存在硅、铁、钙辐射线且强度保持不变。由于硅、铁、钙是土壤的主要成分而明显区别于大气的元素组成，因此认为这次观测到的球状闪电是闪电击中地面土壤而形成的。而这和 Abrahamson-Dinniss 的缓慢氧化硅的纳米颗粒网络模型高度吻合。至于为什么没有记录到铝这一土壤中主要成分的谱线，研究团队认为是仪器测定范围的问题。

实验模拟: Gerson Silva Paiva 研究团队在正常大气压下用电弧蒸发小块高纯硅晶片来检验 Abrahamson-Dinniss 的理论。电路中断产生的电弧会导致非常高的温度，因此硅片会局部熔化或汽化，并能够制造出寿命长的发光球，且通常报道的自然球闪电的一些特性。他们使用直径两英寸、电阻率 $1 \Omega \text{ cm}$ 、p 型掺杂的 $350 \mu \text{ m}$ 厚的硅晶片放置在五毫米厚、一平方米大小的钢板上，并把钢板作为基底电极，用钨或石墨做顶部电极并加以 20-25V、100-140A 的电流。实验过程中，操作员用顶部电极轻轻触摸硅片并关闭电路。然后，将顶部电极升高至约 1 至 2 mm 的距离。在上升运动过程中形成电弧并产生炽热的发光碎片，最终，闪电状发光球向各个方向飞走。

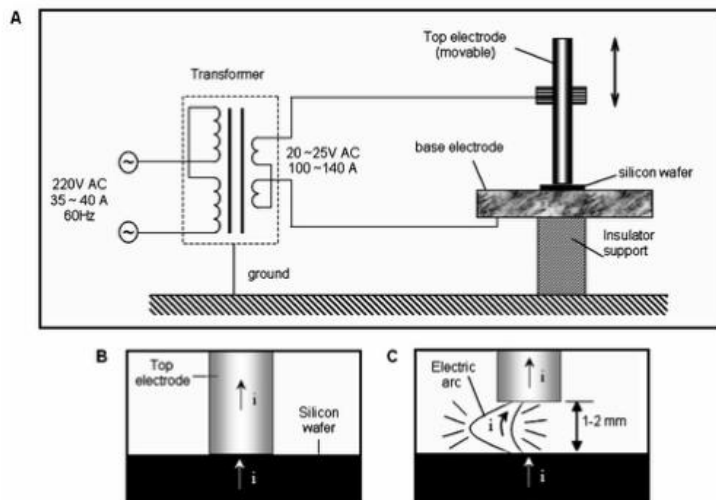


图 6. A 展示了装置设计，由一个可移动的顶部电极和固定的基底电极组成，在两电极间安置硅晶片并通以直流电。

图 6. B、C 展示了在顶部电极向上移动的过程中两电极间产生电弧并直接作用在硅晶片上。产生发光小球。

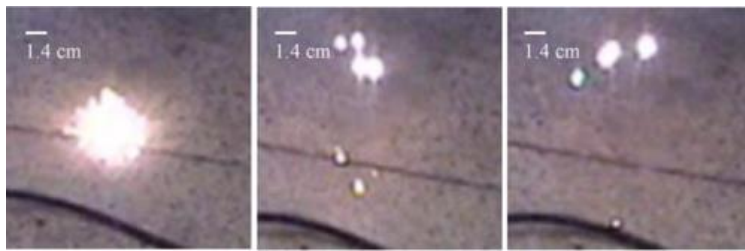


图 7. 发光小球在地上跳

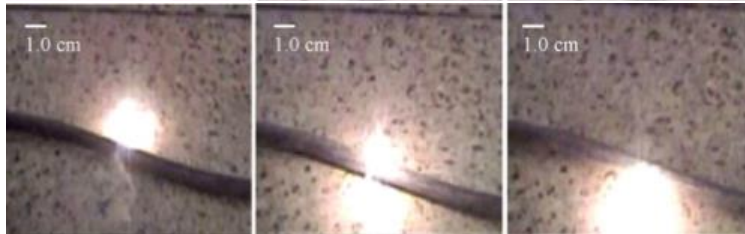


图 8. 发光小球穿过导电体下的狭小缝隙, 这可能与目击到的球状闪电可以穿过窗户缝隙甚至直接穿过窗户本身有关

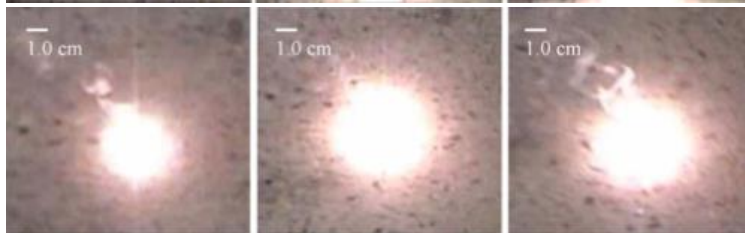


图 9. 发光小球上端出现螺旋状的烟迹

这个实验有四个重要特点：(1) 它不依赖于自然现象中不可能存在的能源和激发机制，可以被当前的科学解释。(2) 它清楚地证明了 Si 的蒸发和氧化所起的作用，正如 Abrahamson 和 Dinniss 关于球状闪电形成的理论所提出的那样。(3) 该实验产生的发光球寿命长（高达 8 秒）并且符合球状闪电在自然现象下被观察到的至少 10 种特性。因此是非常成功的。

总结和展望： J. Abrahamson 和 J. Dinniss 教授提出的缓慢氧化硅的纳米颗粒网络模型成功获得了 Gerson Silva Paiva 研究团队的实验模拟验证和西北师范大学的研究人员的自然观测验证，具有非常大的可信度和说服力。已经能基本解释球状闪电的产生、组成、颜色、温度、演变等大部分问题。但三者间仍有部分不协调之处和瑕疵：1. 观测到的球状闪电经历了紫白色到红色再到白色最后以红色消失的过程，但是理论模型中中心温度和时间为单调关系且单调增加，与观测到的颜色来回变动不符。2. 实验模拟得到的发光小球明显受重力影响大且在碰撞中表现出弹性，这与观测到的漂浮状态的球状闪电不符。3. 观测到的球状闪电光谱图中缺失铝元素，虽然解释为实验仪器的范围问题，但仍是观测实验的瑕疵。4. 理论模型和实验模拟中都使用电子显微镜看到了硅纳米球链的存在，但并没有展示硅纳米网络的图片。

参考文献：【1】 Jianyong Cen, *Observation of the Optical and Spectral Characteristics of Ball Lightning*, PRL 112,035001 (2014)

【2】 Gerson Silva Paiva, *Production of Ball-Lightning-Like Luminous Balls by Electrical Discharges in Silicon*, PRL 98,048501 (2007)

【3】 J. Abrahamson and J. Dinniss, *Ball lightning caused by oxidation of nanoparticle networks from normal lightning strikes on soil*, Nature (London) 403, 519 (2000).