

探秘宙斯之杖——球状闪电之谜

武慧春¹ 罗会仟²

(1 浙江大学 310058; 2 中国科学院物理研究所 100190)

球状闪电，所称滚地雷。人们对它的了解，可能来自于刘慈欣的科幻小说。然而球状闪电本身并非科幻杜撰，它是一种真实的物理现象。早在上千年前就有过记载。让我们从物理学的角度揭开球状闪电之谜。

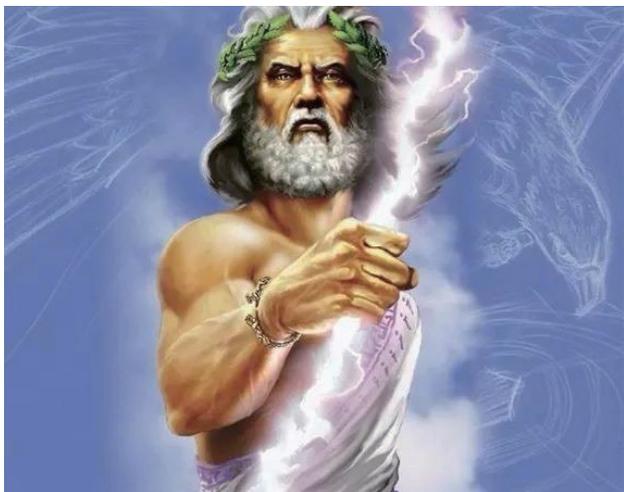


图1 宙斯的雷霆之杖

一、神秘的球状闪电

在古希腊神话中，天神宙斯掌握了一把雷霆之杖，可放出威力无穷的闪电，象征着至高无上的神权。这实际反映了人们对大自然的敬畏之情，因为早期地球气候变幻多端，闪电是最常见，也是最震撼的自然现象之一。直到如今，地球上的每一秒钟，都将发生约100次的闪电现象，一年中闪电出现次数最多的地方在非洲的刚果。闪电的颜色多姿多彩，取决于空气中元素含量的不同；闪电的形状也是各式各样，主要是因为形成环境不同。在每年的30多亿次闪电中，少部分闪电的形状呈现出非常奇特的球形，又称球状闪电（以下简称球闪）。在雷雨交加的天气，人们会看到一个火球，伴随着耀眼的光芒和剧烈的霹雳之声，无不令人胆战心惊，这就是神秘的球闪。

球闪的记录最早见于公元前古希腊时期亚里士多

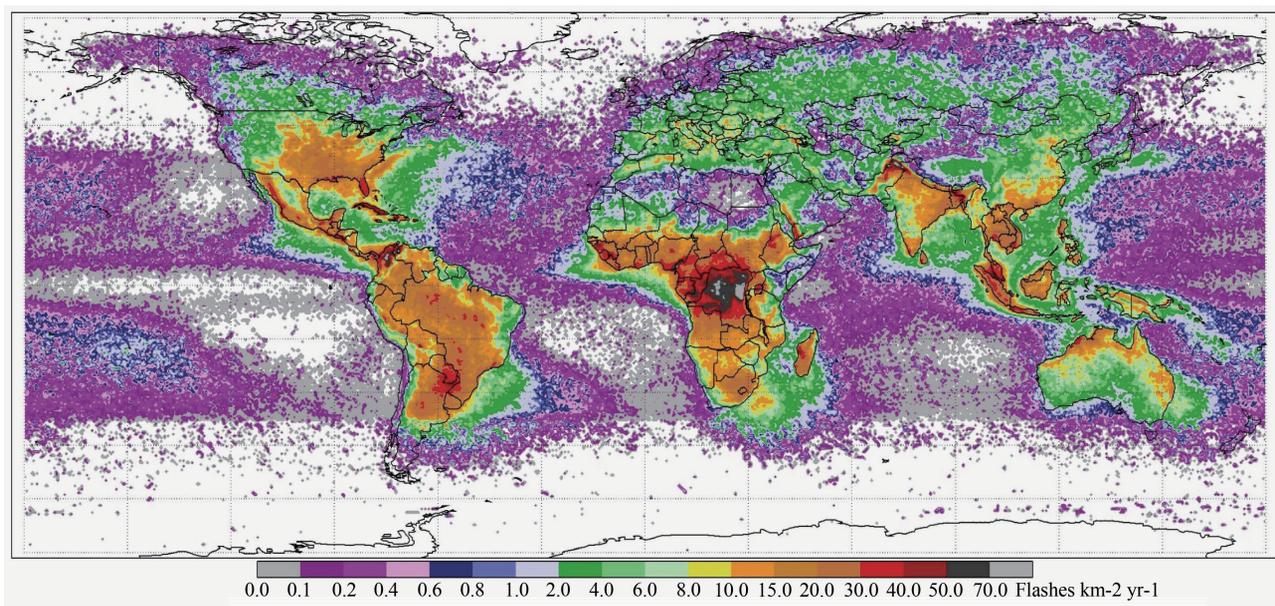


图2 全球闪电分布

德和波希多尼的书中，他们记载了包括球闪在内 6 种不同类型的闪电。早期都尔的圣额我略主教在公元 500 余年时，详细记载一次球闪事件——在他自己主持的一次宗教仪式中，一个耀眼的火球突然出现，在场的所有人看到了这个火球，并都被吓得趴在了地上。中国古代也有对球闪的一些记载，比如沈括的《梦溪笔谈》和张居正的《张文忠公全集》，其中张居正如此写道：“天微雨，忽有流火如球，其色绿，后有小火点随之，从雨中冉冉腾过予宅，坠于厨房水缸之中，其光如月，厨中人惊视之，遂不见。”对球闪的形态、颜色、光强、运动方式都有清楚的描述。

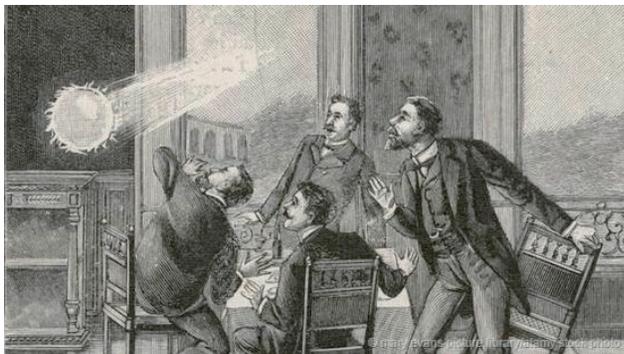


图 3 球状闪电目击事件

从科学角度来看，球闪的存在长期没有可靠的实物证据，对其真实性一直有质疑之声。一百七十多年前，阿拉戈就对这种怀疑论进行了强有力地驳斥。事实上，2014 年 1 月，中国西北师范大学的科学家就从科学角度报道了球闪的视频记录，为球闪存在提供了首个实物证据，该结果发表在 *Physical Review Letters* 上，还被美国物理学会选为年度进展之一。

目前，正式发表的球闪目击报告有近万份，其中不乏身为科学家或工程师的目击者。韦斯科夫在一次关于球闪的讲座中提到其导师玻尔就是一名球闪目击者。科学家们从大量目击报告统计出了球闪的主要特征：跟普通闪电紧密相关；维持球体 (20~50cm) 超过 1 秒；在空气中悬浮并水平运动；可在飞机和密闭空间内形成，还可传过玻璃；产生刺激性气味和发出嘶嘶或嗡嗡声；安静或爆裂消失。这确立了球闪的真实存在性，同时又体现它和普通闪电许多不同的神秘之处。

二、球闪的早期研究

闪电实际上是云层中电荷释放到地面的一种现象。雷电云的底端往往聚集着大量的电子，与地面之间电压高达百兆伏特。由于某种触发机制，这些电子向地面俯冲下来，形成先导。先导发出的光很弱，肉眼看不见。通过高速摄像机可以揭示，先导一步一步下行，每一步在 1 微秒内形成，停顿约 50 微秒后开始下一步。先导接近地面时，先导和地面之间的电场已经很大，这时地面上的一些突起就会发生尖端放电。放电产生的离子受先导吸引而上行，离子与先导接触后就连通了云地之间的等离子体通道，之后电流迅速增加，通道得到加热并剧烈膨胀，发出耀眼的光芒和轰隆声。一般整个闪电过程持续约 0.1 秒。

受阿拉戈影响，电磁学先驱法拉第在他著名的《电学实验研究》中表示他不否认球闪存在，但是他认为寿命较长且行动缓慢的球闪与一刹那的闪电可能没有必然联系。法拉第指出的正是球闪和闪电的本质区别，

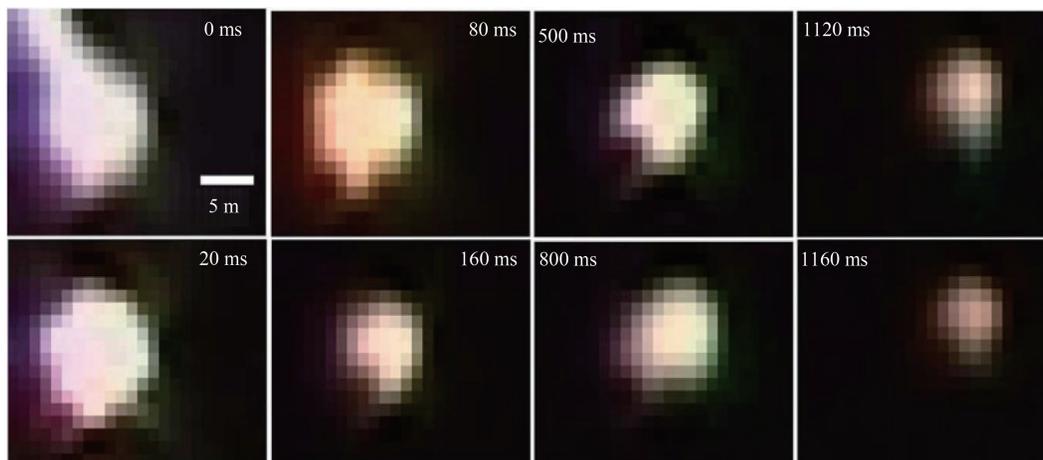


图 4 球状闪电的真实视频记录照片 (PRL,2014 中国观测)

也就是说球闪并不是传统意义上的闪电。

我们知道雷击点会诱发火灾和物质溅射，因此，马森布罗克和阿拉戈猜想球闪是一种燃烧火球，建立了球闪的化学模型。其他人认为球闪是土壤溅射形成的硅蒸汽或者消融后的金属。但是，燃烧反应和硅蒸汽并不一定呈现球状，消融的金属球也不能在空气中悬浮；另一个事实是这些化学火球都不能轻易穿过玻璃。他们的解释并不令人信服。

1900 年左右，大家都在用直流放电来模拟闪电过程，试图产生球闪。该时期电学怪才——特斯拉提到自己制作出了疑似球闪的火球。几十年后其学生分析了实验记录，发现这种火球的能量极低，不大可能是球闪。

后来，在研究放电的过程中，人们把放电产物定义为等离子体。作为物质第四态，等离子体由电子和离子组成，占到可见物质的 90% 以上。等离子体一般很热，成千上万度，譬如太阳就是一个不断发生核聚变的巨大等离子体。有些人认为球闪很可能就是一团等离子体。因为等离子体的行为很像流体，不太稳定。为了解释球闪的稳定性，人们必须假设等离子体团是旋转的。但是，这种等离子体也难以穿越玻璃。

为了解释球闪，人们还提出了其他更加离谱的解释，譬如：暗物质，黑洞，磁单极，超导等。1987 年，闪电物理权威乌曼说：“球闪毫无疑问是存在的，



图 5 球状闪电形态(再现图)

但是很不幸，大部分理论只能说是垃圾。”目前，关于球闪文献已有 2000 多篇，在 1971、1980、1999 年都有不断出版的球闪专著，球闪的理论模型也已有几十种，但没有一个能合理地解释球闪特征并得到广泛承认。实验上，1999 年，金兹堡在一篇物理综述中

指出只有在实验室中成功复制球闪后，才可能建立一个成功的球闪理论。遗憾的是，直到现在，还没有人能在实验室成功产生类似球闪的火球。

三、微波空泡和闪电的微波辐射源

回顾 2014 年中国科学家对球闪的观测，可以发现球闪光谱同时包含空气分子和土壤的谱线。假如球闪是由电离的空气组成，该等离子体贴在地面上，等离子体中的电子激发土壤元素使它们发光。球闪的球体结构非常类似于在强激光领域观测到的一个有趣现象：一束强激光在等离子体中传输过程中，一小部分能量会被约束在等离子体中，自然演化成一个球状的等离子体空腔，空腔内部的电磁波是一个半周期的电磁驻波。这些激光等离子体空泡只有微米尺度量级。那么，对于一个波长为 30 cm 的微波，形成的空泡就跟球闪相仿。为此，中国科学家提出了基于等离子体微波空泡机理的球闪理论模型，该理论论文发表于新近一期的 *Scientific Reports* 上。

实际上，卡皮查在 1955 年就提出了微波导致球闪的建议(洛奇在 1892 年也提出过类似的建议)，他认为在一个共振腔里微波形成了稳定的驻波，波节部位击穿空气形成了等离子体火球。但是他并没有说明微波怎么产生，而且实际中也不存在这样一个共振腔。由于卡皮查的地位，他的提议引起了很多人对球闪的兴趣。日本科学家做了金属波导内微波产生火球的实验，演示了火球穿过瓷板的特性。有人在 1969 年同样提出了球状等离子体空腔内约束微波的球闪猜测。

等离子体是一个电荷系统，对电磁波非常敏感。倘若闪电的微波辐射也能形成微波空泡，那么首先必须找到闪电的微波辐射源，并且模拟证实其能自然演化为一个球状等离子体空腔。从闪电通道弯弯曲曲的图片可以猜测在闪电拐点处由于电流的剧烈转向可能辐射出了微波。可是拐点处对应闪电先导停顿的位置。继续疯狂猜测下去——云地之间电压超过百兆伏特，电子加速应该可以到差不多百兆伏特的量级，这样就可以轻易产生微波！可是记载中闪电就是一个巨大的火花，是一个低温等离子体，温度只有几个 eV(1eV 约等于 10000℃，相比常规物质温度很高，但是相对于几十上百万度的等离子体则很低)。如何从微波空泡

的假说得出球闪的等离子体模型，似乎遇到了困难。

2014年一篇关于闪电物理的综述给了新的启示：云对地闪电可以产生X射线，为了解释这些X射线需要7 MeV的相对论电子，而且数目相当可观。的确如此！高能电子产生的过程是先导头部形成一个超强的电场，克服了空气的最大阻尼力，使得电子得以从几个eV加速到相对论能量。因此，X射线观测打破了上百年来认为闪电只是一个纯粹低温等离子体的传统认识。对于相对论电子，一切都变得很简单。电子脉冲的自场在纵向上压缩，很类似于一个半周期电磁波。界面反射会形成渡越辐射，反射后的波快速演化为一个单周期的微波。（注：关于渡越辐射，金兹堡提出了第一个理论，之后除了加速器领域，应用最多的就是激光等离子体领域。）



图6 球状闪电产生的等离子体机理（假想图）

四、球闪形成和新理论对其特性的解释

上面理论初步预言的是单周期微波，可是打入到激光等离子体空泡对应的等离子体条件，并不会形成微波空泡。这是因为等离子体是一个对外界电磁波非常敏感的电荷系统，初始条件不一样，结果就完全不同。在特定参数范围内，即使在单周期微波下也可以变成一个空泡。球闪的形成机理也变得非常简单：被微波辐射压排开的电子回流会很快包围微波，形成一个微波空泡，就像打个洞钻进去。离子动作很慢，等电子空腔形成后，才会在电子牵引下慢慢跟进。当然，这个打洞现象需要微波功率达到一定相对论阈值才会发生。此外，在微波情况下还得考虑与中性空气分子的碰撞。加入了空气阻尼力影响进行数值模拟表明，空泡照样可以形成，而且空气最大阻尼力与相对

论微波阈值相匹配。

在新的球闪理论模型下，我们可以成功解释许多球闪的典型特征。如：

1. 跟闪电紧密联系。 先导产生相对论电子脉冲，电子脉冲打击地面产生单周期微波，单周期微波在空气等离子体中形成球状空腔。

2. 维持球状(20~50cm)超过1秒。 激光空泡就是一个完美的球状，相似体微波空泡没有理由不是球状；球闪直径约等于电子脉冲长度，电子脉冲长度又等于观测到的X射线脉冲长度，后者在闪电和实验室放电测量中可短至1纳秒(30cm)；一个纯粹的等离子体在空气中很快会通过复合消失，这一点对所有等离子体球闪模型构成了致命的威胁。但是有一种情况可以除外，就是所谓的内能球闪模型，就是要求等离子体有可供消耗的驱动源，俘获的微波就是这个能量源。有人计算过百焦耳的微波可以维持等离子体空腔超过1秒，而实验表明微波产生的火球在切断源后寿命长达0.5秒。

3. 在空气中悬浮并水平运动。 首先微波空泡质量可以完全忽略，但是其等离子体热效应会加热空气诱导对流，假设热功率100W，得到的对流速度远小于球闪的水平运动速度(~2m/s)。

4. 可在飞机和密闭空间内形成，还可传过玻璃。 7MeV的电子可以穿透飞机表皮进入飞机，渡越辐射机制在出射面也可以辐射微波，效率对电子能量不敏感，同样的方式可以进入密闭空间或穿过玻璃。

5. 刺激性气味和嘶嘶声、嗡嗡声。 空气等离子体合成臭氧和二氧化氮是气味的来源，微波听觉效应导致了声音的出现。

6. 安静或爆裂消失。 空泡结构有爆裂功能。

可以说，微波空泡等离子理论第一次成功地解释了球闪形成，并成功解释了其他球闪特征现象。有意思的是，该理论同样表明电子打击点(球闪形成地)和雷击点没有必然关系，球闪完全可以远离雷击点形成，这是和基于雷击点和闪电通道产生球闪的理论极不相同的地方，也和目击报告十分相符。

由此可见，球闪的神秘面纱也不是那么神秘！

(本文转载自《知社学术圈》，网址：<http://chuansong.me/n/437231151942>)