

学院：物理学院

编号：

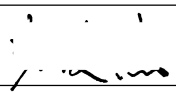
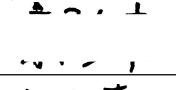
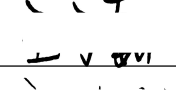

## 哈尔滨工业大学 大一年度项目立项报告

项目名称：人工“球状闪电”的产生和特性研究  
项目负责人：李俊杰 学号：  
联系电话： 电子邮箱：  
专业集群：应用物理学 辅导员：白雪  
  
指导教师：袁承勋 职称：教授、博导  
联系电话： 电子邮箱：  
学院及专业：物理学院 等离子体物理

哈尔滨工业大学基础学部制表

填表日期： 2020 年 11 月 05 日

## 一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在专业集群	学号	联系电话	本人签字
李俊杰	男	应用物理			
郭伟	男	智能装备			
王子嘉	女	智能装备			
应浩松	男	应用物理			

## 二、指导教师意见

“球状闪电”是一种“神秘”的自然现象，蕴含丰富的物理机制。项目组在课题组前期研究基础上，尝试在实验室产生“球状闪电”，并采用多种手段探测“球状闪电”的物理参量，探究其中的物理机制，项目具有极好的创新性。项目组成员配置合理，分工明确，前期已经阅读了相关文献，了解了“球状闪电”装置，并制定了详细的研究方案，具备了开展项目的各种条件，建议支持开展研究。

签 名

2020 年 11 月 10 日

## 三、项目专家组意见

同意立项

批准经费：800 元

组长签名： （学部盖章）

2020 年 11 月 17 日

## 四、立项报告

### 1.课题研究的背景和意义

#### 1.1 课题研究的背景和意义

##### 1.1.1 等离子体

等离子体(Plasma)是一种由自由电子和带电离子为主要成分的物质形态,广泛存在于宇宙之中,一般被视为是物质的第四态,被称为等离子态,或者"超气态",也称"电浆体"。一般情况下,等离子体具有很高的电导率,并且与电磁场存在极强的耦合作用。等离子体是由克鲁克斯教授在 1879 年发现的,1928 年美国科学家欧文·朗缪尔和汤克斯(Tonks)首次将"等离子体"(plasma)一词引入物理学,用来描述气体放电管里的物质形态。严格来说,等离子体是一种具有高位能动能的气体团,等离子体的总带电量仍是中性,借由电场或磁场的高动能将外层的电子击出,结果电子已不再被束缚于原子核,而成为高位能高动能的自由电子,该电子具有很高的活泼性。

等离子体是物质的第四态,即电离了的"气体",它呈现出高度激发的不稳定态,其中包括离子(具有不同符号和电荷)、电子、原子和分子。其实,人们对等离子体现象并不生疏。在自然界里,炽热烁烁的火焰、光辉夺目的闪电、以及绚烂壮丽的极光等都是等离子体作用的结果。对于整个宇宙来讲,几乎 99.9%以上的物质都是以等离子体态存在的,如恒星和行星际空间等都是由等离子体组成的。用人工方法,如核聚变、核裂变、辉光放电及各种放电都可产生等离子体。分子或原子的内部结构主要由电子和原子核组成。在通常情况下,即上述物质前三种形态,电子与核之间的关系比较固定,即电子以不同的能级存在于核场的周围,其势能或动能不大。

##### 1.1.2 球状闪电

球状闪电是一种自然现象,属于闪电的一种。俗称滚地雷,就是一个呈圆球形的闪电球。这是一个真实的物理现象,它十分光亮,略呈圆球形,直径大约是 15~40 厘米不等。通常它只会维持数秒,但也有维持了 1-2 分钟的纪录。颜色除常见的橙色和红色外,还有黄色、紫色、蓝色、亮白色,幽绿色的光环,呈现多种多样的色彩<sup>[1-2]</sup>。球状闪电通常都在雷暴之下发生。通常它只会维持数秒,但也有维持了 1-2 分钟的纪录。更神奇的是它可以在空气中独立而缓慢地移动。

##### 1.1.3 人工“球状闪电”

在复现球状闪电的实验方面,已经有一些相似物在实验室中被制造出来,这些实验对于球状闪电的理论有很好的验证及推动作用。在 2002 年前后,俄罗斯科学家 G.D. Shabanov 等在 Gatchina 市内的圣彼得堡核物理研究所中,通过在大气压水面上进行高压脉冲放电,制造出了一种能够存活约 400 $\mu$ s 的球状闪电类似物<sup>[3-6]</sup>。这一球状闪电类似物在国际上还没有统一命名,一般称之为“Plasmoid”,物理学名词审定委员会在第三版《物理学名词》中给出的译名为“等离子体团”<sup>[7]</sup>。我们哈尔滨工业大学的物理学院实验室在俄罗斯科学家 G.D. Shabanov 的帮助下,已经可以独立的制造出该种类似物。由于时间原因,我们对其研究十分有限,因此对其进一步的研究与探索成了十分迫切的问题。

## 1.2 研究目的

- (1) 探究人工球状闪电的相关性质和特征。
- (2) 探究对实验仪器与方案的改进和环境的改变对球状闪电形成与寿命的影响。

## 1.3 国内外研究现状及分析

### 1.3.1 等离子体的研究进展

19 世纪以来对气体放电的研究;19 世纪中叶开始天体物理学及 20 世纪对空间物理学的研究;1950 年前后开始对受控热核聚变的研究;以及低温等离子体技术应用的研究,从四个方面推动了这门学科的发展。

19 世纪 30 年代英国的法拉第以及其后的汤姆孙、汤森德等人相继研究气体放电现象,这实际上是等离子体实验研究的起步时期。1879 年英国的克鲁克斯采用"物质第四态"这个名词来描述气体放电管中的电离气体。美国的朗缪尔在 1928 年首先引入等离子体这个名词,等离子体物理学才正式问世。1929 年美国的汤克斯和朗缪尔指出了等离子体中电子密度的疏密波(即朗缪尔波)。

对空间等离子体的探索,也在 20 世纪初开始。1902 年英国的 O.亥维赛等为了解释无线电波可以远距离传播的现象,推测地球上空存在着能反射电磁波的电离层。这个假说为英国的阿普顿用实验证实。英国的哈特里(1931)和阿普顿(1932)提出了电离层的折射率公式,并得到磁化等离子体的色散方程。1941 年英国的查普曼和费拉罗认为太阳会发射出高速带电粒子流,粒子流会把地磁场包围,并使它受压缩而变形。

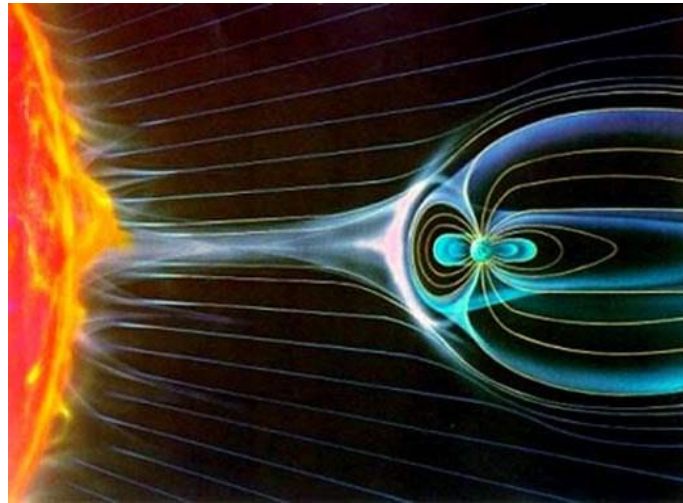


图 1 磁重联现象

从 20 世纪 30 年代起,磁流体力学及等离子体动力论逐步形成。等离子体的速度分布函数服从福克-普朗克方程。苏联的朗道在 1936 年给出方程中由于等离子体中的粒子碰撞而造成的碰撞项的碰撞积分形式。1938 年苏联的符拉索夫提出了符拉索夫方程,即弃去碰撞项的无碰撞方程。朗道碰撞积分和符拉索夫方程的提出,标志着动力论的发端。

1942 年瑞典的阿尔文指出,当理想导电流体处在磁场中,会产生沿磁力线传播的横波(即阿尔文波)。印度的钱德拉塞卡在 1942 年提出用试探粒子模型来研究弛豫过程。1946 年朗道证明当朗缪尔波传播时,共振电子会吸收波的能量造成波衰减,这称为朗道阻尼。朗道的这个理论,开创了等离子体中波和粒子相互作用和微观不稳定性这些新的研究领域。

从 1935 年延续至 1952 年,苏联的博戈留博夫、英国的玻恩等从刘维定理出发,得到了不封闭的方程组系列,名为 BBGKY 链。由它可导出符拉索夫方程等,这给等离子体动力论奠定了理论基础。

1950 年以后，因为英、美、苏等国开始大力研究受控热核反应，促使等离子体物理蓬勃发展。热核反应的概念最早出现于 1929 年，当时英国的阿特金森和奥地利的豪特曼斯提出设想，太阳内部氢元素的核之间的热核反应所释放的能量是太阳能的来源，这是天然的自控热核反应。1957 年英国的劳孙提出受控热核反应实现能量增益的条件，即劳孙判据。

50 年代以来已建成了一批受控聚变的实验装置，如美国的仿星器和磁镜以及苏联的托卡马克，这三种是磁约束热核聚变实验装置。60 年代后又建立一批惯性约束聚变实验装置。

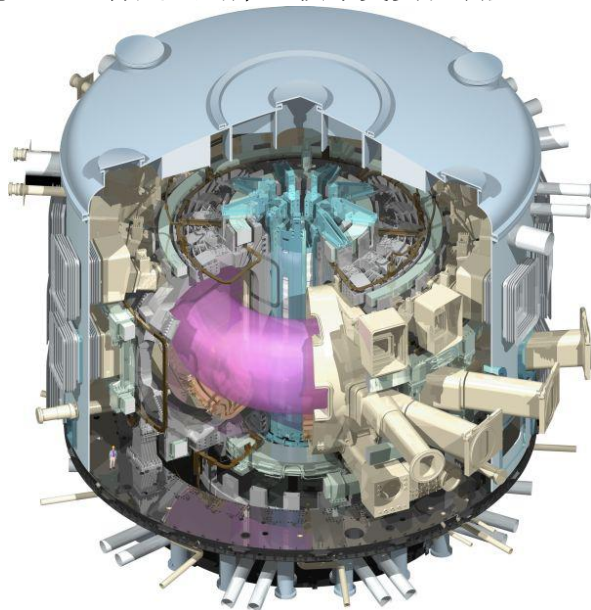


图 2 托卡马克模型

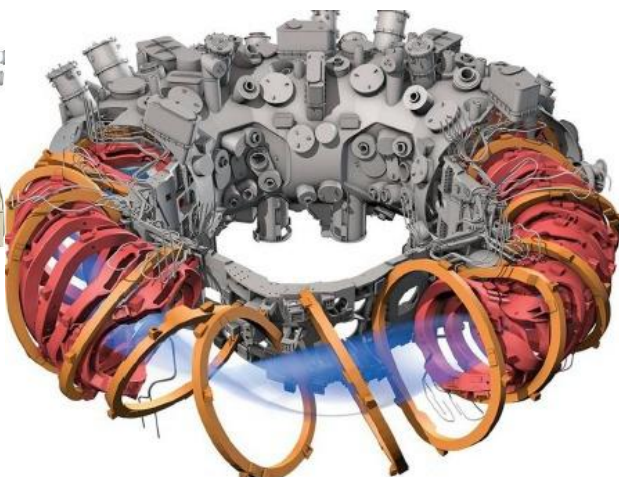


图 3 仿星器模型

环状磁约束等离子体的平衡问题由苏联的沙弗拉诺夫等解决。美国的克鲁斯卡和沙弗拉诺夫导出了最重要的一种等离子体不稳定性，即扭曲不稳定性的判据。1958 年美国的伯恩斯坦等提出分析宏观不稳定性的能量原理。处在环状磁场中的等离子体的输运系数首先由联邦德国的普菲尔施等作了研究(1962)，他们给出在密度较大区的扩散系数，苏联的加列耶夫等给出了密度较小区的扩散系数(1967)，这一理论适用于托卡马克这类环状磁约束等离子体中的输运过程被命名为新经典理论。

自从苏联在 1957 年发射了第一颗人造卫星以后，很多国家陆续发射了科学卫星和空间实验室，获得很多观测和实验数据，这极大地推动天体和空间等离子体物理学的发展。1959 年美国的范艾伦预言地球上空存在着强辐射带，这一预言为日后的实验证实，即称为范艾伦带。1958 年美国的帕克提出了太阳风模型。1974 年美国的格内特根据卫星资料，认证出地球是一颗辐射星体，为长波辐射和热红外辐射。地球辐射的辐射源是地球，其波长范围约为 4~120 微米，为长波辐射。辐射能量的 99%集中在 3 微米以上的波长范围内。地球辐射的最强波长约为 9.7 微米。

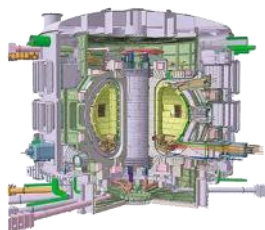


图 4 ITER 图片

在此期间，一些低温等离子体技术也在以往气体放电和电弧技术的基础上，进一步得到应用与推广，如等离子体切割、焊接、喷镀、磁流体发电，等离子体化工，等离子体冶金，以及火箭的离子推进等，都推动了对非完全电离的低温等离子体性质的研究。



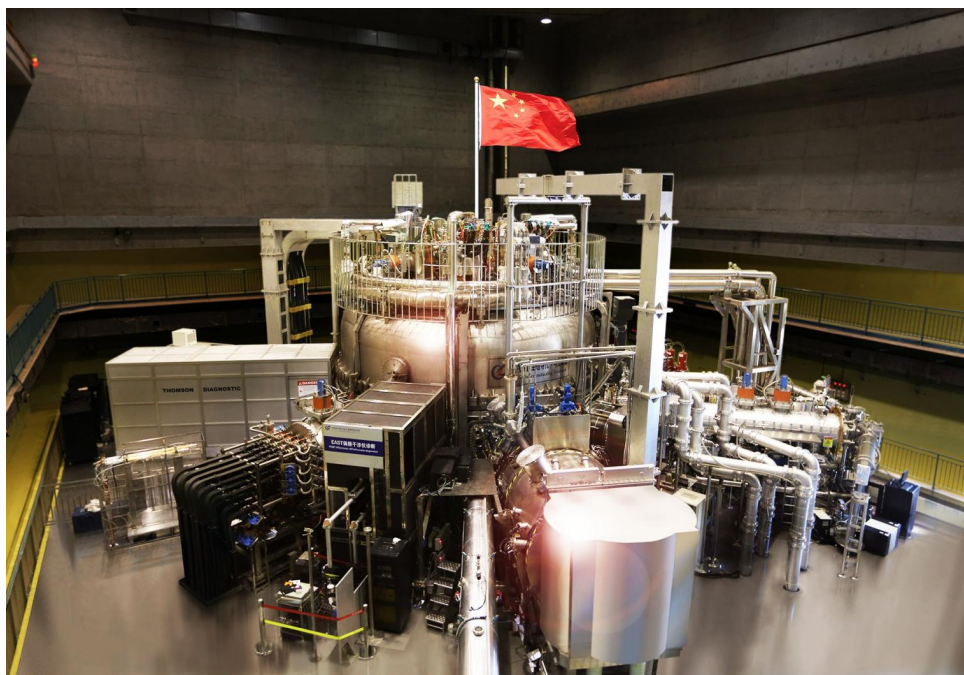


图 5 东方超环实验设施

经过 30 年的发展，等离子体所在高温等离子体物理实验及核聚变工程技术研究方面中国科学院等离子体物理研究所处于国际先进水平，形成了广泛的国际交流与合作，与欧、美、日、俄、澳等近三十个国家和地区建立了稳定合作交流关系，开展多个国际合作项目，成为"第三世界科学院开放实验室"和"世界实验室聚变研究中心"，是国际受控热核聚变计划 ITER 中国工作组的重要单位之一。

### 1.3.2 球状闪电的研究进展

在 G.D. Shabanov 等人的工作之后，多个团队陆续开始研究这一放电过程。Noriyuki Hayashi 等人<sup>[8-9]</sup>首次给出了由高速摄像机拍摄的等离子团产生过程，并将其分为三个阶段。该团队还得到了放电过程的电压电流曲线。Youichi Sakawa<sup>[10]</sup>等人给出了等离子团的发射光谱并分析了发光成分。Versteegh<sup>[11-12]</sup>等人计算了放电过程中消耗的能量约为 0.7kJ，还用热电偶测量了等离子团的温度，发现在  $t \approx 235\text{ms}$  时，温度可达 900K， $t \approx 260\text{ms}$  时，温度可达 600K。他也给出了发射光谱，并用 Stark 展宽方法得到电子密度为  $10^{20}\text{-}10^{22}\text{m}^{-3}$ ，其研究结果如图 6 所示。

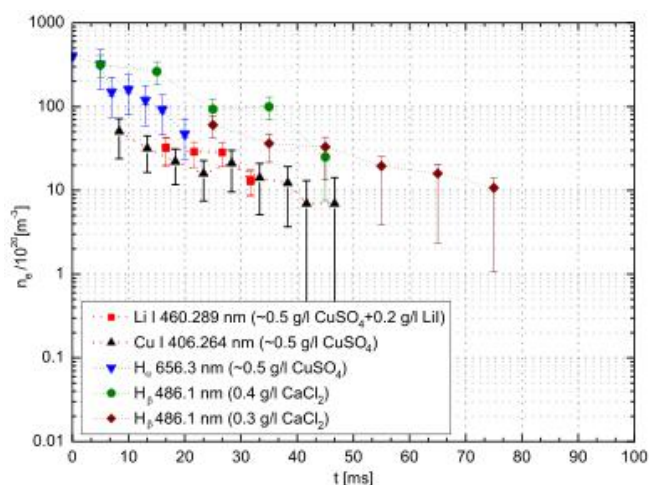


图 6 斯塔克展宽计算得到的不同时刻的电子密度<sup>[11]</sup>

U. Fantz<sup>[13-15]</sup>等人分析计算了大气中等离子团的大小、速度和自持阶段与耗散能量的关系，计算了放电过程中电阻值的变化，分析了能量去向，有 14.85kJ 消耗在水中，有 4.24kJ 通过等离子团释放，同时他还用 COMSOL 模拟了放电时的电势分布。Karl D Stephan 等人<sup>[16]</sup>同样给出了 COMSOL 模拟的放电电势分布以及一些光谱。S.E. DUBOWSKY 首次使用质谱仪<sup>[17]</sup>和红外发射光谱仪<sup>[18]</sup>分析了等离子团的物理和化学性质，并提出了等离子团能量储存的可能机制<sup>[19]</sup>与水簇离子以及氮分子的超稳态有关。Stelmashuk V 等人<sup>[20]</sup>将放电分为四个阶段：初始阶段、击穿和爆炸阶段、成型阶段以及自持阶段。Friday D M 等人<sup>[21]</sup>分析了 PH 值对于等离子团存活寿命的影响，同时给出了红外吸收光谱。

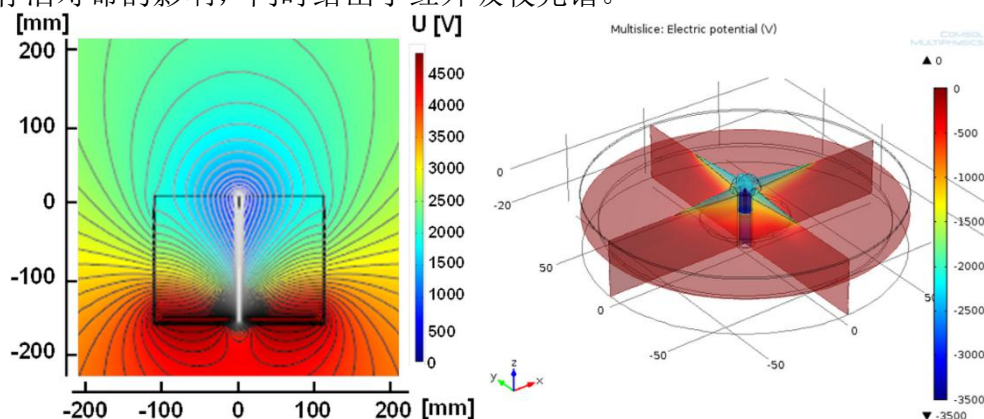


图 7 放电前(左)<sup>[13]</sup>和放电初期(右)<sup>[16]</sup>的电势分布图

此外，G.D. Shabanov 曾引入激光使其与等离子团产生相互作用，如图 8。他在文章<sup>[22]</sup>中报道称：“结果表明，1mw 的激光在强度低至 0.001W/cm<sup>2</sup> 的情况下，可以改变它的形状和传播方向”。但 D.M. Friday 却声称<sup>[23]</sup>：“做了以下实验以试图复现这些结果（指<sup>[22]</sup>的结果）——3.5 mW 绿色激光笔(532 nm, 20 mW/cm<sup>2</sup>)，20 mW 绿色激光器(532 nm, ~ 150 mW/cm<sup>2</sup>)，以及 0.5mW HeNe 激光器(632 nm, 5 mW/cm<sup>2</sup>)——但这些等离子团外形都没有改变”。这给以后的工作提出了进一步验证的空间。

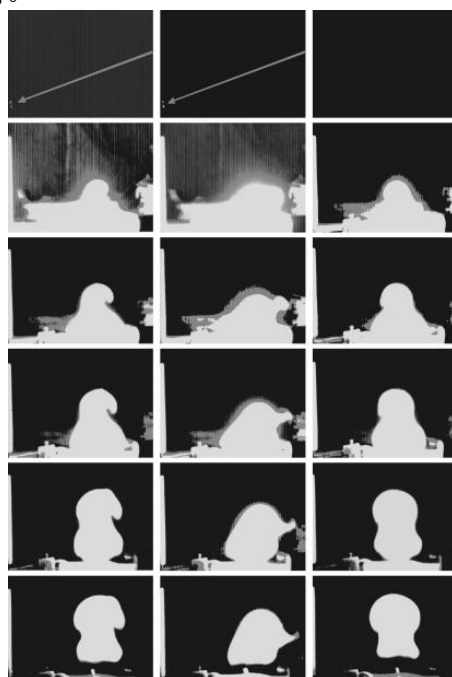


图 8 激光改变等离子团的形状及方向<sup>[22]</sup>

## 2. 研究方案

### 2.1 实验方案

本课题目前拟采取理论与实验相结合的方法开展研究。在搭建起等离子团（Plasmoids）放电设备后，通过高速摄影机观察来探究在不同温度、湿度及电解液电导率等条件的影响下，等离子团的大小、持续时间及运动轨迹等参数的影响。

### 2.2 实验装置

本文使用 NHWY15kV-2A 系列高压直流电源产生 5-6kV 左右的电压，将其储存在两个并联的 HZMJ6kV-300 $\mu$ F 脉冲电容器（实测电容 289.2 $\mu$ F、289.0 $\mu$ F，峰值电压 7.2kVdc）中，根据电容能量计算公式  $E = 1/2CU^2$  可知，这两个并联的电容器最大可以储存 10kJ 左右的能量。本文搭建的产生等离子团的装置，如图 9（a）所示，其电极结构及诊断装置如图 4（b）和（c）所示，图中标号在图注中给出对应设备名称，图中部分设备的参数在表 1 中列出。

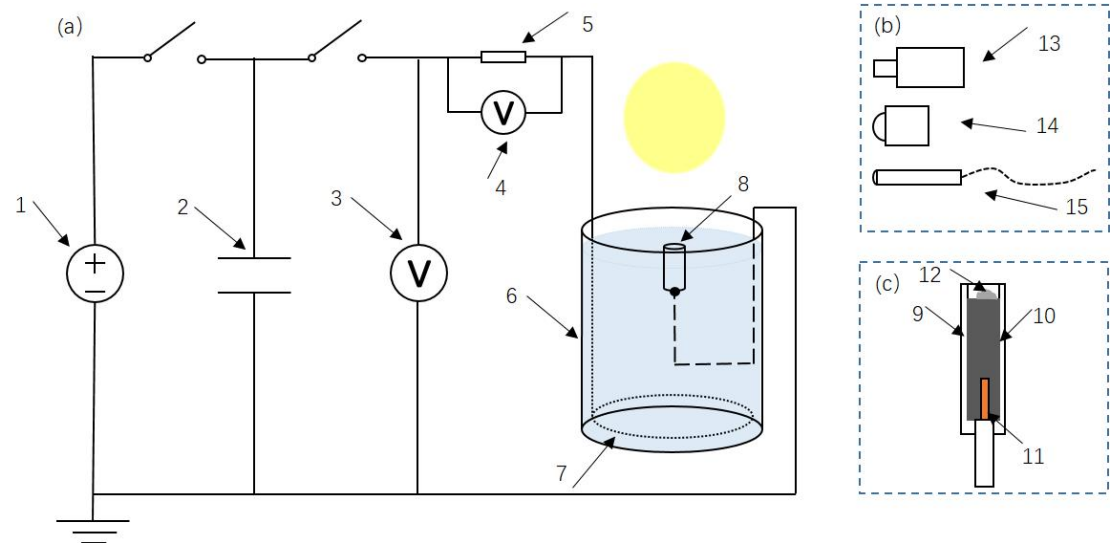


图 9(a) 等离子团产生装置图；(b) 等离子团诊断设备图；(c) 中心电极结构图；（1——高压直流电源；2——脉冲电容器；3——示波器信道 1（电压）；4——示波器信道 2（电流）；5——小阻值电阻（0.1 $\Omega$ ）；6——聚四氟乙烯桶；7——环电极；8——中心电极；9——石英管；10——碳棒；11——铜线；12——碳粉等；13——高速摄像机；14——热成像仪；15——光纤探头（光谱仪））

聚四氟乙烯桶中盛入自来水，水中可加入  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ （等）溶液以调节电导率，电导率可通过电导率计测出。环电极连接至电容器，为阳极端，环电极是弯曲成圆形的铜导线，完全没入水中，后期可通过调节其高度来研究两电极间距对于放电的影响。中心电极为三层结构，最外层为石英管，电极为碳棒，碳棒通过插入其中的铜线接地，为阴极端，其上端露出水面 1-2mm。碳棒上端稍低于石英管上端 1-2mm，可以在其中加入碳粉（等）粉末或  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ （等）溶液。石英管下端通过密封胶密封以防止漏电。碳棒等结构的参数已在表 1 中给出。

表 1 装置中的部分设备参数

设备名称	参数
聚四氟乙烯圆桶	17cm $\times$ $\phi$ 20.5cm
聚四氟乙烯方桶	长 27cm $\times$ 高 17cm $\times$ 宽 27cm
环电极（铜线）	圆环直径 $\phi$ 20cm；铜线直径 2.5mm
石英管	6cm $\times$ $\phi$ 9mm
碳棒	5cm $\times$ $\phi$ 6mm



示波器为 RIGOL MSO2202A 数字示波器，信道 1 通过衰减比例为 1000:1 的 RIGOL RP1010H 高压探头并联在电容器两端，测量电压，信道 2 通过衰减值为 1:1 的探头并联在一个小阻值电阻两端，测量其电压并计算出放电时通过回路的电流。实验所采用的高速摄像机为 Sony FDR AX700，每秒帧数（fps）可达 1000。此外，我们还利用希玛仪表的 AR8011 笔试电导率计来测量水溶液的电导率。

为了减小外界光源对实验观测的影响，对实验室进行遮光处理，同时尽量在晚上进行试验。由于放电持续时间很短，为保持实验的一致性，所有测量需要针对同一次放电，所以在开始试验前，将示波器两个探头接入电路，并测量溶液电导率，同时将高速摄像机置于合适位置，并对所有测量设备设置到合适状态，准备好对放电过程同时进行观测记录。

### 3.进度安排

课题的研究，预期 9 个月内完成，即从 2020 年 10 月到 2021 年 6 月，进度安排如表 2 所示。

表 2 进度安排

时间	研究内容
2020.10-2020.11	查阅资料，确定研究方案，准备实验
2020.11-2020.12	进行初步实验，记录实验数据及现象
2021.01-2021.02	对数据进行整理和深入分析，改进实验方案
2021.03-2021.05	进行探究对实验仪器与方案的改进和环境的改变对球状闪电形成与寿命影响实验
2021.05-2021.06	对数据进行整理和深入分析，撰写论文，准备答辩

### 4.预期目标

#### 4.1 中期目标

了解球形闪电的相关性质和特征，进行实验操作与初步分析。

#### 4.2 结题目标

进行探究对实验仪器与方案的改进和环境的改变对球状闪电形成与寿命的影响实验，对实验结果进行总结与分析，并根据存在的问题对实验方案进行改进，在结题时提供相应数据及结果。

### 5.经费使用计划

表 3 经费使用计划

用途	经费预算（元）
耐高压粗导线（铜）	200
耐高压电阻等电子器件	250
等离子体的相关资料	50
总计	500

## 6.参考文献

- [1] Turner D J. Ball lightning and other meteorological phenomena[J]. Physics Reports, 1998, 293(1): 2-60.
- [2] E. W. Davis. Ball lightning study[R] United States Air Force Research Laboratory, Edwards Air Force Base, CA, May 2003.
- [3] Shabanov G D. The optical properties of long-lived luminous formations[J]. Technical Physics Letters, 2002, 28(2): 164-166.
- [4] Egorov A I, Stepanov S I. Long-lived plasmoids produced in humid air as analogues of ball lightning[J]. Technical Physics, 2002, 47(12): 1584-1586.
- [5] Egorov A I, Stepanov S I, Shabanov G D. Laboratory demonstration of ball lightning[J]. Physics-Uspekhi, 2004, 47(1): 99.
- [6] Egorov A I, Stepanov S I. Properties of short-living ball lightning produced in the laboratory[J]. Technical Physics, 2008, 53(6): 688.
- [7] 物理学名词审定委员会编. 物理学名词[M]. 科学出版社, 2019: 369.
- [8] Hayashi N, Satomi H, Kajiwara T, et al. Properties of ball lightning generated by a pulsed discharge on surface of an electrolyte in the atmosphere[J]. IEEE transactions on electrical and electronic engineering, 2008, 3(6): 731-733.
- [9] Hayashi N, Satomi H, Mohri T, et al. General nature of luminous body transition produced by pulsed discharge on an electrolyte solution in the atmosphere[J]. IEEE transactions on electrical and electronic engineering, 2009, 4(5): 674-676.
- [10] Sakawa Y, Sugiyama K, Tanabe T, et al. Fireball generation in a water discharge[J]. Plasma and Fusion Research, 2006, 1: 039-039.
- [11] Versteegh A, Behringer K, Fantz U, et al. Long-living plasmoids from an atmospheric water discharge[J]. Plasma sources science and technology, 2008, 17(2): 024014.
- [12] Versteegh A. Analysis of a Longliving Atmospheric Plasmoid[D]. Technische Universität Eindhoven und Humboldt-Universität Berlin, 2007: 100-101.
- [13] Fantz U, Kalafat S, Friedl R, et al. Generation of an atmospheric plasmoid from a water discharge: An analysis of the dissipated energy[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(4): 043302.
- [14] Fantz U, Friedl R, Briefi S. Correlation of size, velocity, and autonomous phase of a plasmoid in atmosphere with the dissipated energy[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(17): 173301.
- [15] Fantz U, Briefi S, Friedl R, et al. Initial Phase of a Large Atmospheric Plasmoid Generated Above a Water Surface[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 2624-2625.
- [16] Fantz U, Briefi S, Friedl R, et al. Relaunch of the water plasmoid experiment for investigations of ball lightning phenomena[C]//Proc. 30th ICPIG Conf. 2011: 1-4.
- [17] Dubowsky S E, Friday D M, Peters K C, et al. Mass spectrometry of atmospheric-pressure ball plasmoids[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2015, 376: 39-45.
- [18] Dubowsky S E, Deutsch B, Bhargava R, et al. Infrared emission spectroscopy of atmospheric-pressure ball plasmoids[J]. Journal of Molecular Spectroscopy, 2016, 322: 1-8.
- [19] Dubowsky S E. Characterization and analysis of ball plasmoid discharges[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2018: 63.

- [20] Stelmashuk V, Hoffer P. Experimental study of a long-living plasmoid using high-speed filming[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(12): 3160-3165.
- [21] Friday D M, Broughton P B, Lee T A, et al. Further insight into the nature of ball-lightning-like atmospheric pressure plasmoids[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2013, 117(39): 9931-9940.
- [22] Shabanov G D, Krivshich A G, Sokolovski B Y, et al. Interaction of the equipotential surface of a charged object with weak laser radiation[J]. Plasma physics reports, 2009, 35(7): 611-618.
- [23] Friday D. In pursuit of a chemical and phenomenological understanding of long-living atmospheric pressure water-based ball plasmoids[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014: 27.
- [24] Kunze H J. Introduction to plasma spectroscopy[M]. Springer Science & Business Media, 2009: 1-2.
- [25] van der Heijden H, van der Mullen J, Baier J, et al. Radiative transfer of a molecular S<sub>2</sub> B–X spectrum using semiclassical and quantum-mechanical radiation coefficients[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2002, 35(17): 3633.