



欢迎来到高电压工程课
请进入雨课堂

清华大学电机系

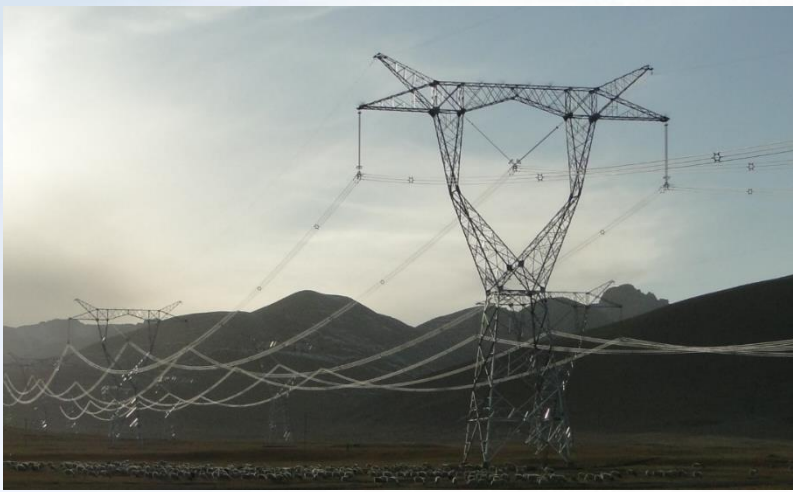
2024春《高电压工程》第二讲

梁曦东

2024-3-8

- 电能的大规模传输是电气化得以普遍应用的基础
- 高压输电是实现电能大规模传输最主要的技术手段

- 电能的大容量、远距离输送，需要高电压
- 电力生产与消费的瞬时平衡，需要大电网
- 各类输变电装备是高压大电网的物质基础
- 高电压技术最大应用场景就是高压大电网



高电压、高场强下有哪些特殊问题？

绪论 含四小节

第一章 气体放电过程的分析

第二章 不同电压形式下空气的绝缘特性

第三章 高压外绝缘及沿面放电

第四章 液体、固体电介质的电气性能

第五章 绝缘检测与诊断

第六章 高电压和冲击大电流的产生

第七章 高电压的测量

第八章 传输线的波过程

第九章 雷电过电压及其防护

第十章 操作过电压与绝缘配合

附录A: 电力设备的耐受电压值

附录B: 国内外部分高电压实验室的参数

高电压、高场强下
的特殊问题

掌握科学原理
了解技术措施
理解工程规范



第1章 气体放电过程的分析

- 1.1 带电质点与气体放电
- 1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律
- 1.3 高气压下均匀电场自持放电的流注理论
- 1.4 高气压下不均匀电场气体击穿的发展过程

本章核心概念：

碰撞电离、自持放电、汤逊放电、巴申定律、电子崩、流注、先导、电晕放电、极性效应、长间隙放电

气体放电与高电压
是什么关系？

低气压在这里是干
什么的？

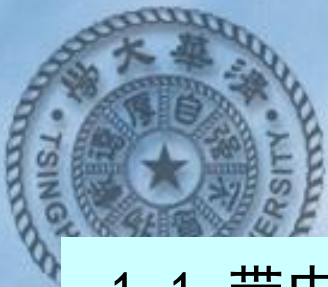
有哪些特殊现象和
特殊过程？

特别的原理？

特别的手段？

.....

给自己多提问



第1章 气体放电过程的分析

1.1 带电质点与气体放电

- 高电压能否维持取决于绝缘是否有效。
- 空气是应用最广泛、最廉价的绝缘材料，高压输电都用裸导线
- 气体放电是气体在高电压、高场强下的特有现象
- 高电压研究的特点之一，是从物理现象入手，分析原因、推测结果、验证结论，确定试验条件与现象间的因果关系
- 对高电压的认识从放电现象的外形开始



你们都见过哪些由高电压产生的气体放电？

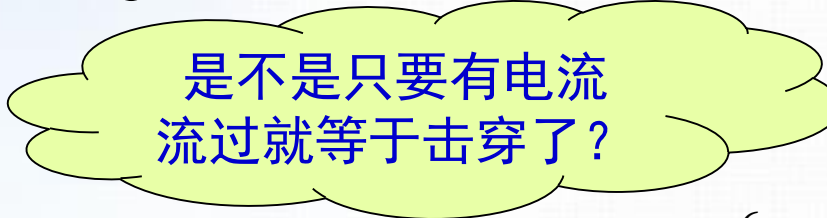


1.1 带电质点与气体放电

气体中流通电流的各种形式统称气体放电。

处于正常状态并隔绝各种外电离因素的气体是完全不导电的，但空气中总会有来自空间的各种辐射，总会有少量带电质点，一般情况下每立方厘米空气中有约500-1000对离子，由于带电质点数量极少，导电极差，所以空气仍是性能优良的绝缘体。

当施加在气体间隙上的电压达一定数值后，流过间隙的电流剧增，气体间隙失去绝缘能力，这种由绝缘状态突变为导体状态的变化称击穿。



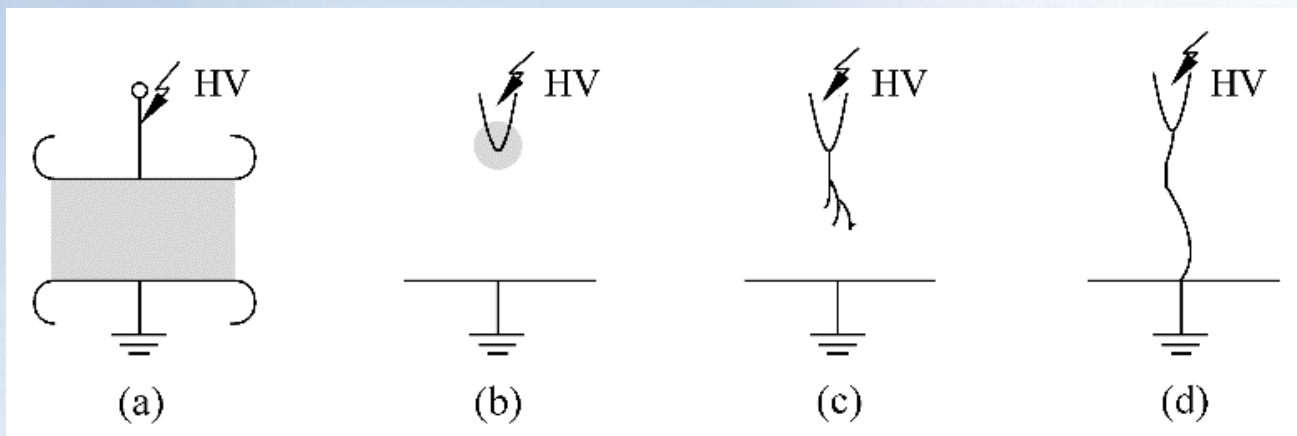
是不是只要有电流
流过就等于击穿了？

1.1 带电质点与气体放电

1.1.1 气体放电的主要形式

从物理现象入手，
探寻原理、规律，
推测下一个……

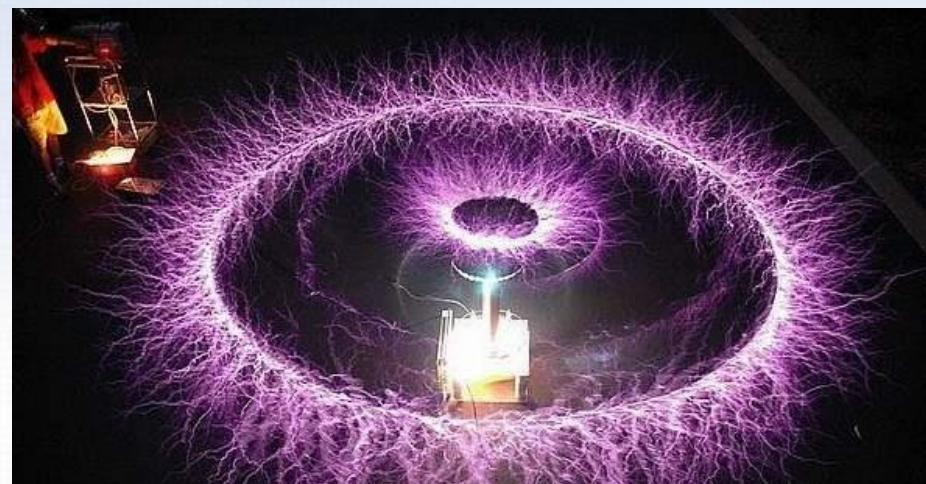
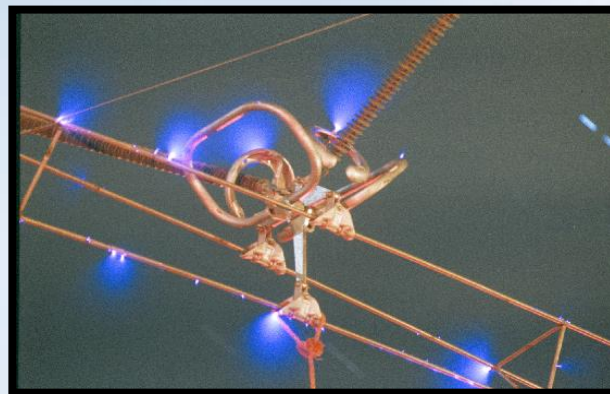
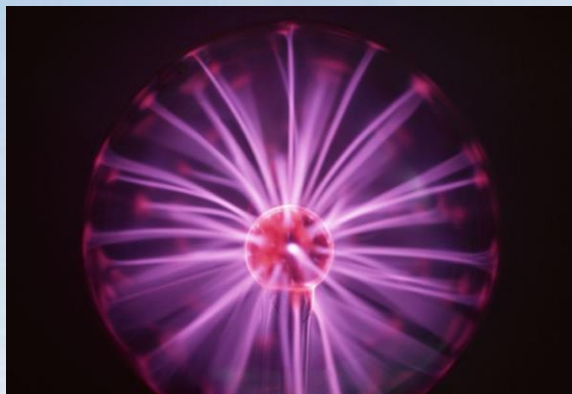
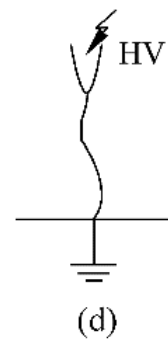
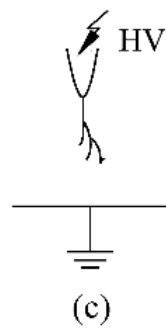
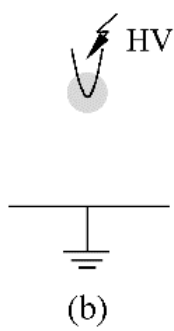
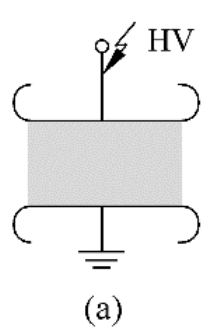
根据电极之间气体间隙上的气压、电场分布、电源功率的不同，空气间隙击穿前后气体放电可以有多种不同的外形。

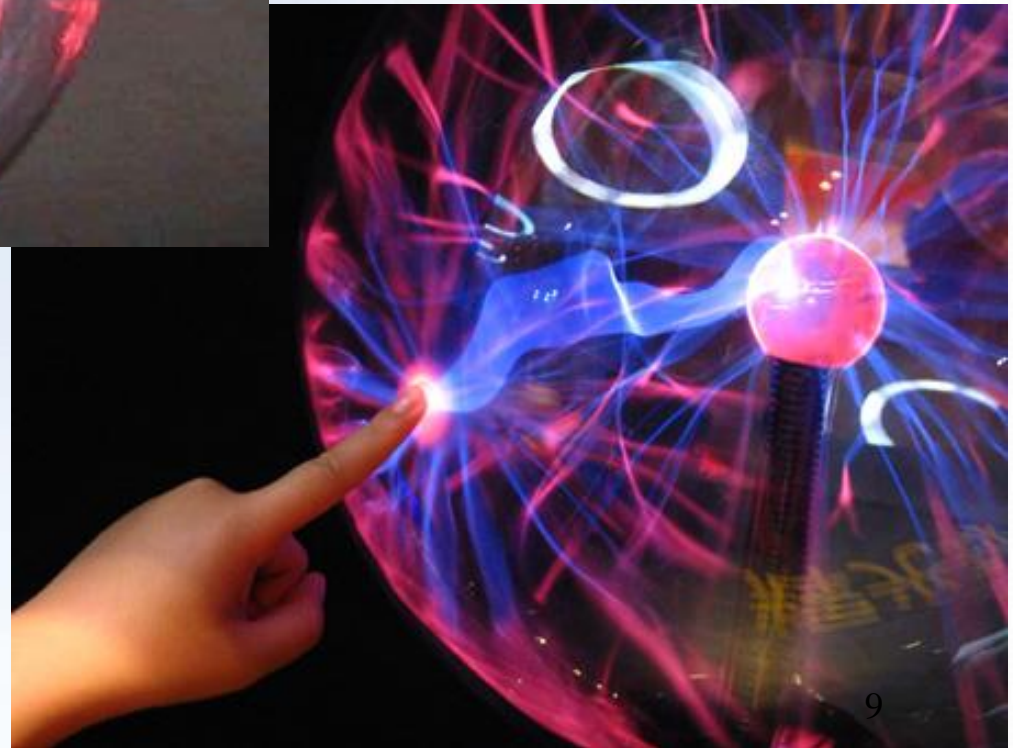
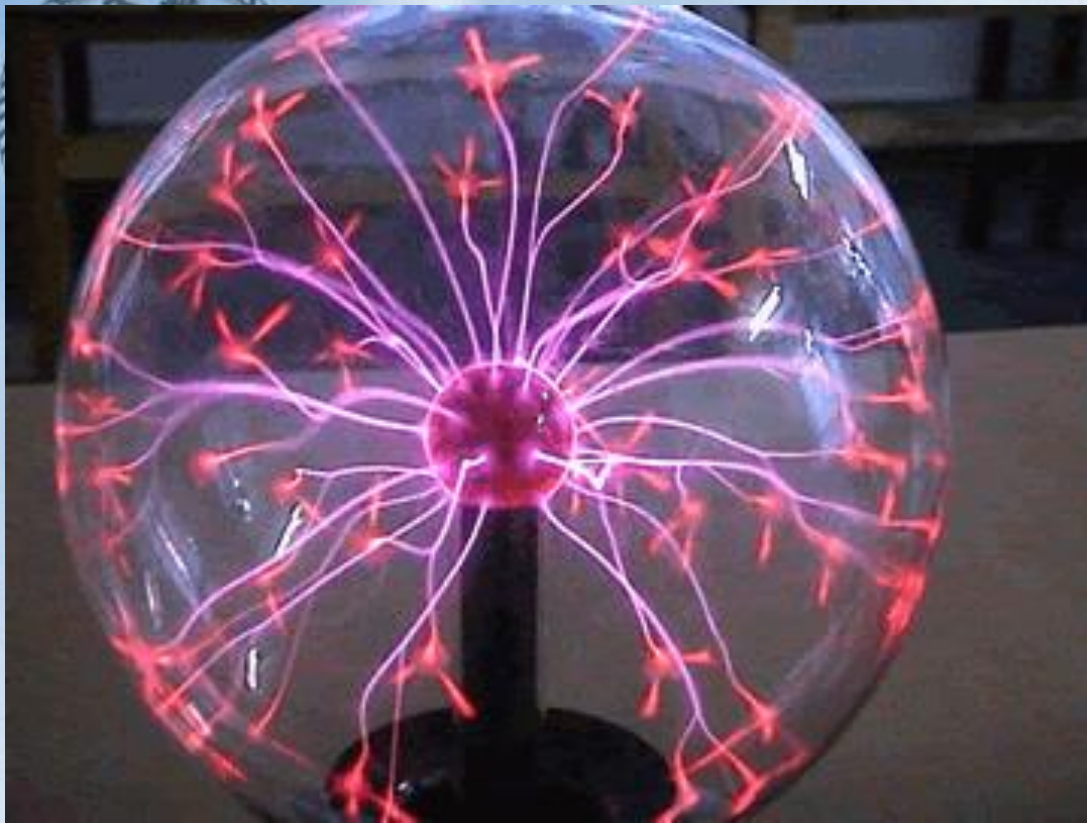


	低气压 ($\ll 1$ 大气压)	高压 (1 个大气压及以上)
均匀电场	辉光放电	火花放电、电弧放电
极不均匀电场	辉光放电	电晕放电、刷状放电、火花放电、电弧放电

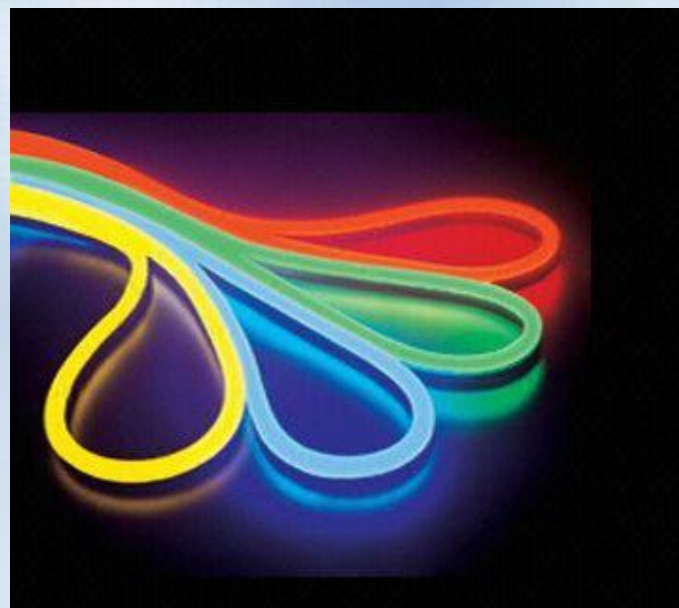
1.1 带电质点与气体放电

放电外形、放电现象



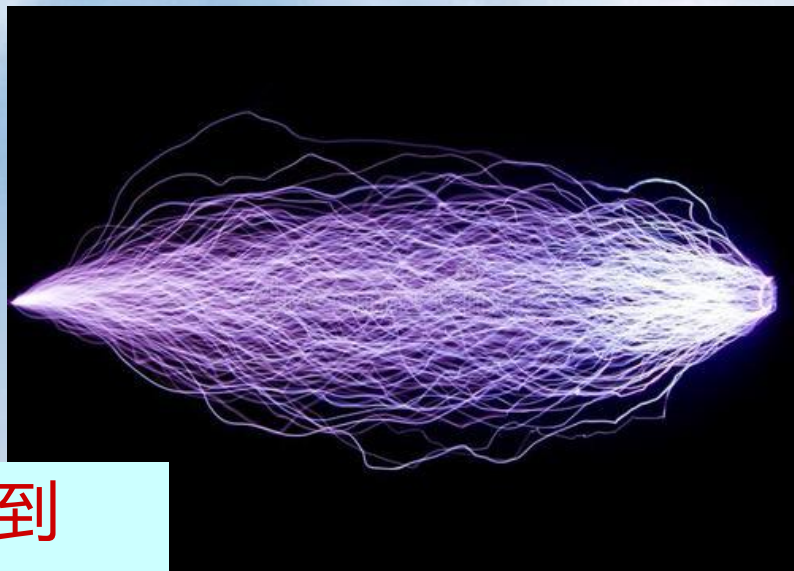


低气压辉光放电球



霓虹灯中的
辉光放电





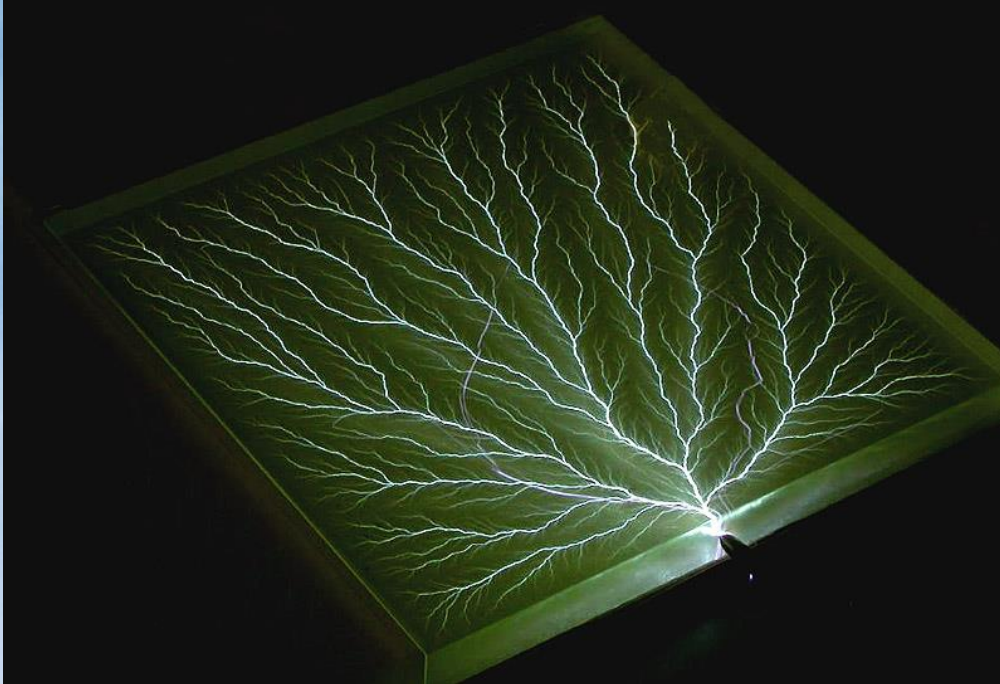
很容易搜到
各种放电现象



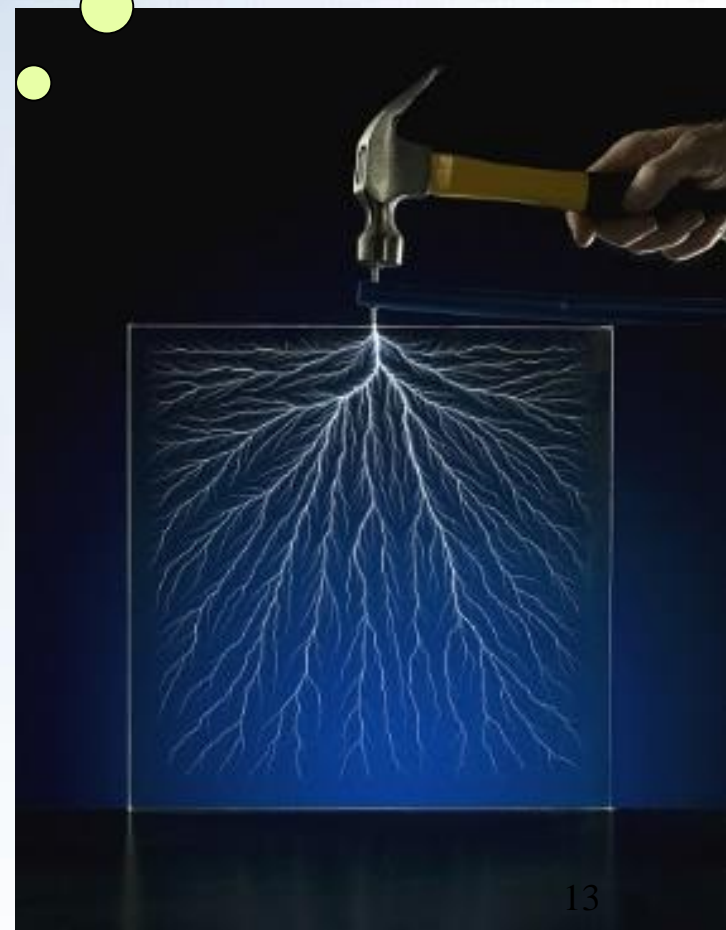


还有大量精心拍摄
的雷闪放电照片
不妨搜来看看



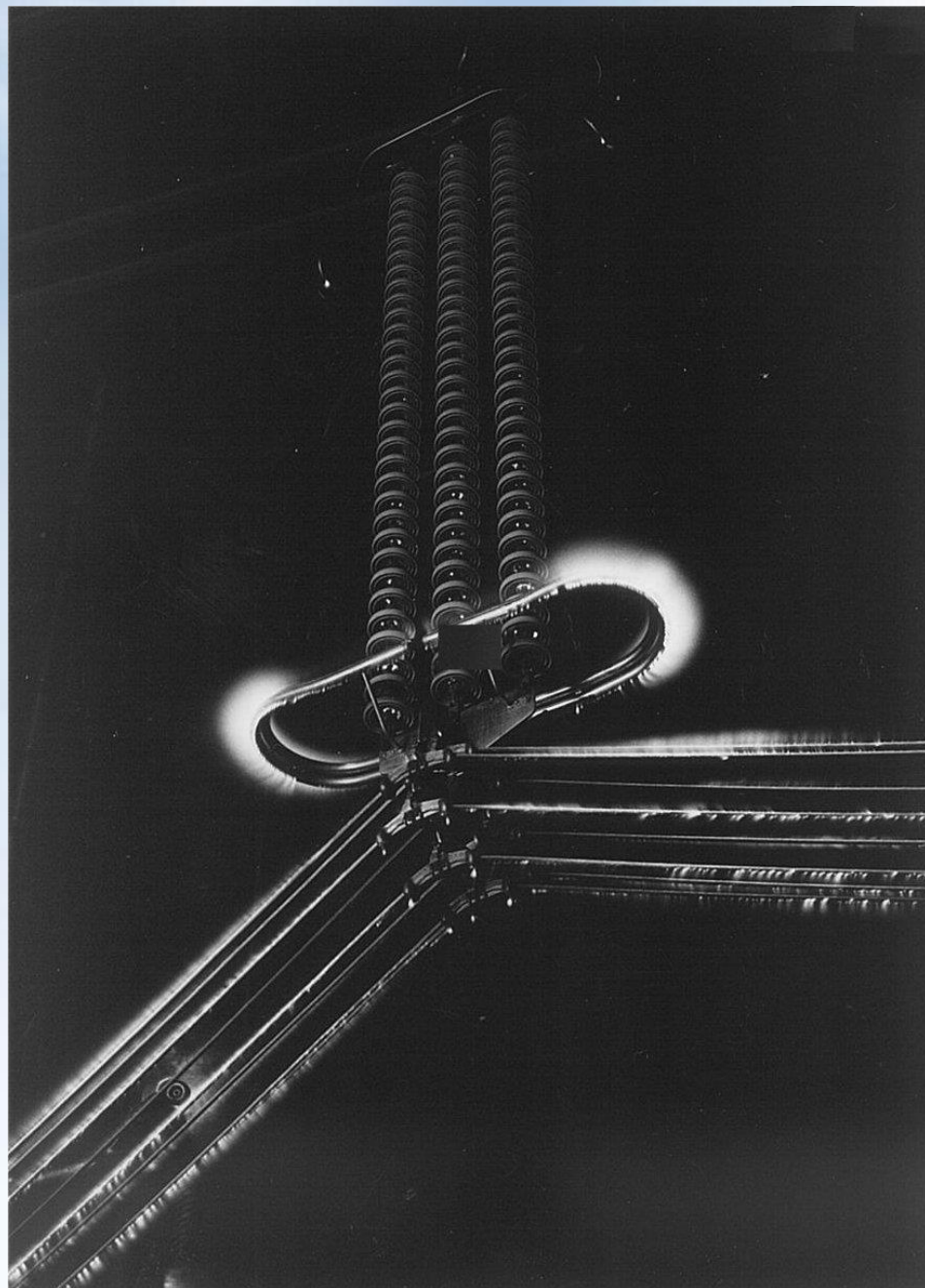


还有大量人工制造的
高压放电精美图片，
不妨搜来看看

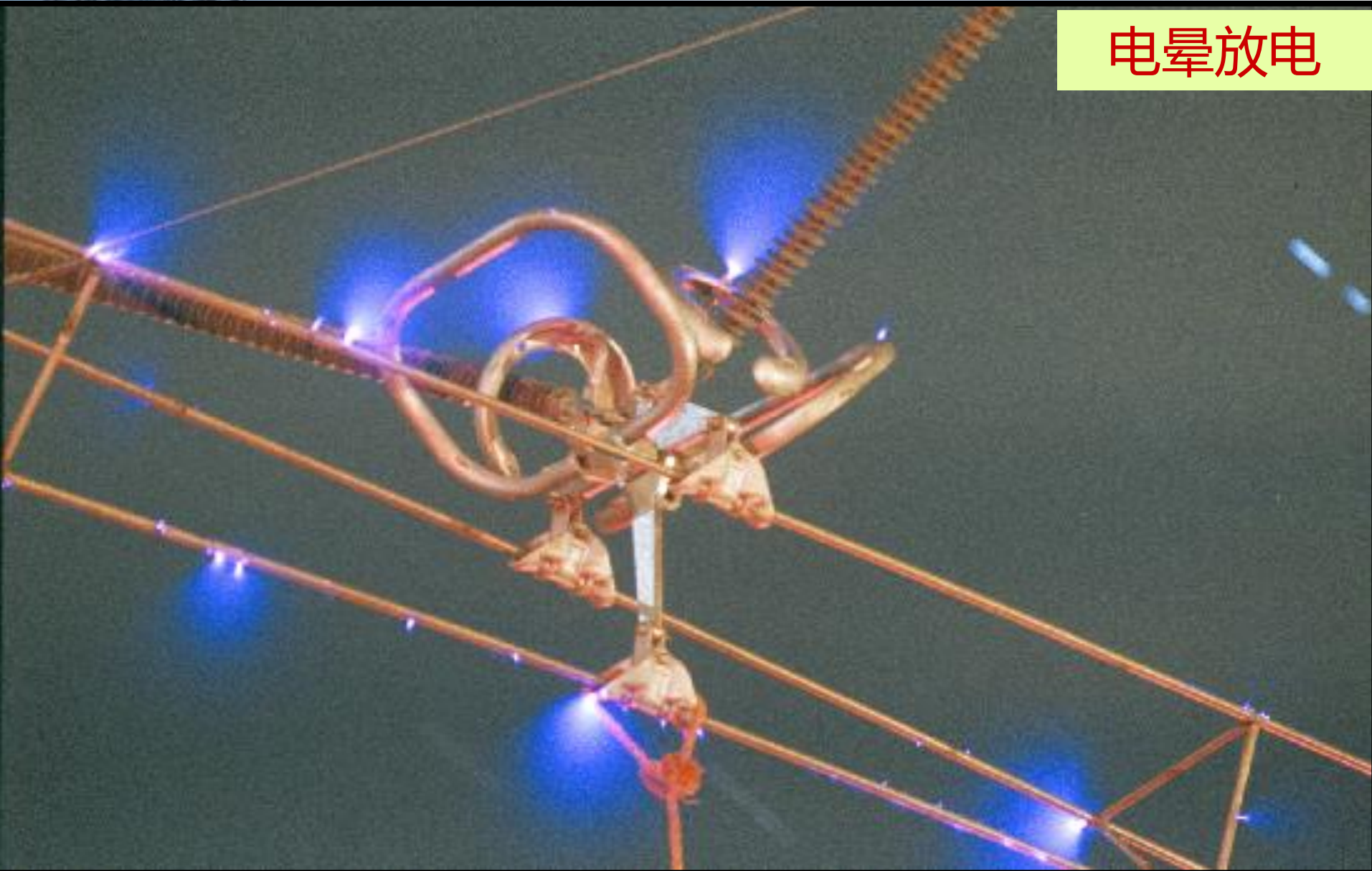




高场强电极处的 电晕放电



电晕放电



为观察放电，高压试验大厅
一般都没有窗户





绝缘子间隙的闪络(右)
及闪络前的刷状放电(左)

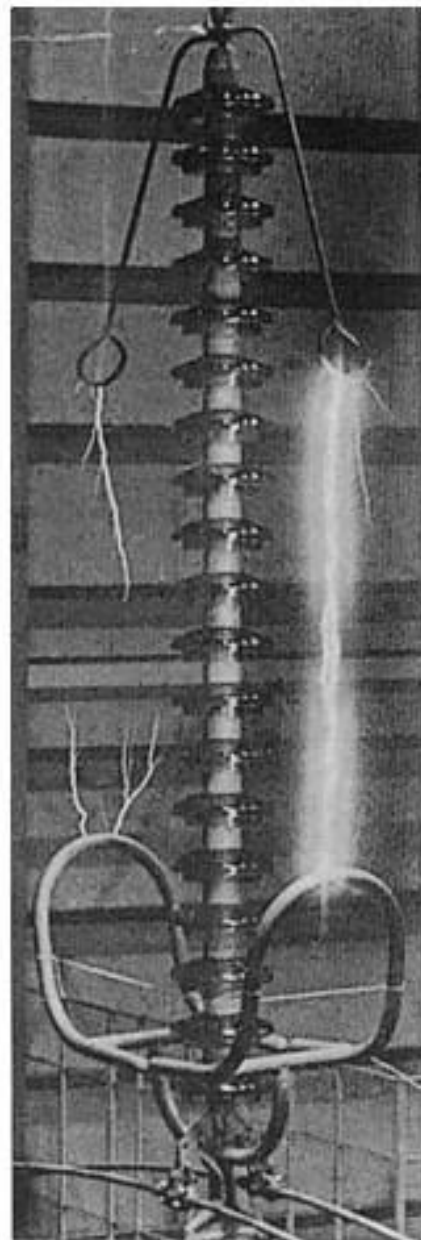
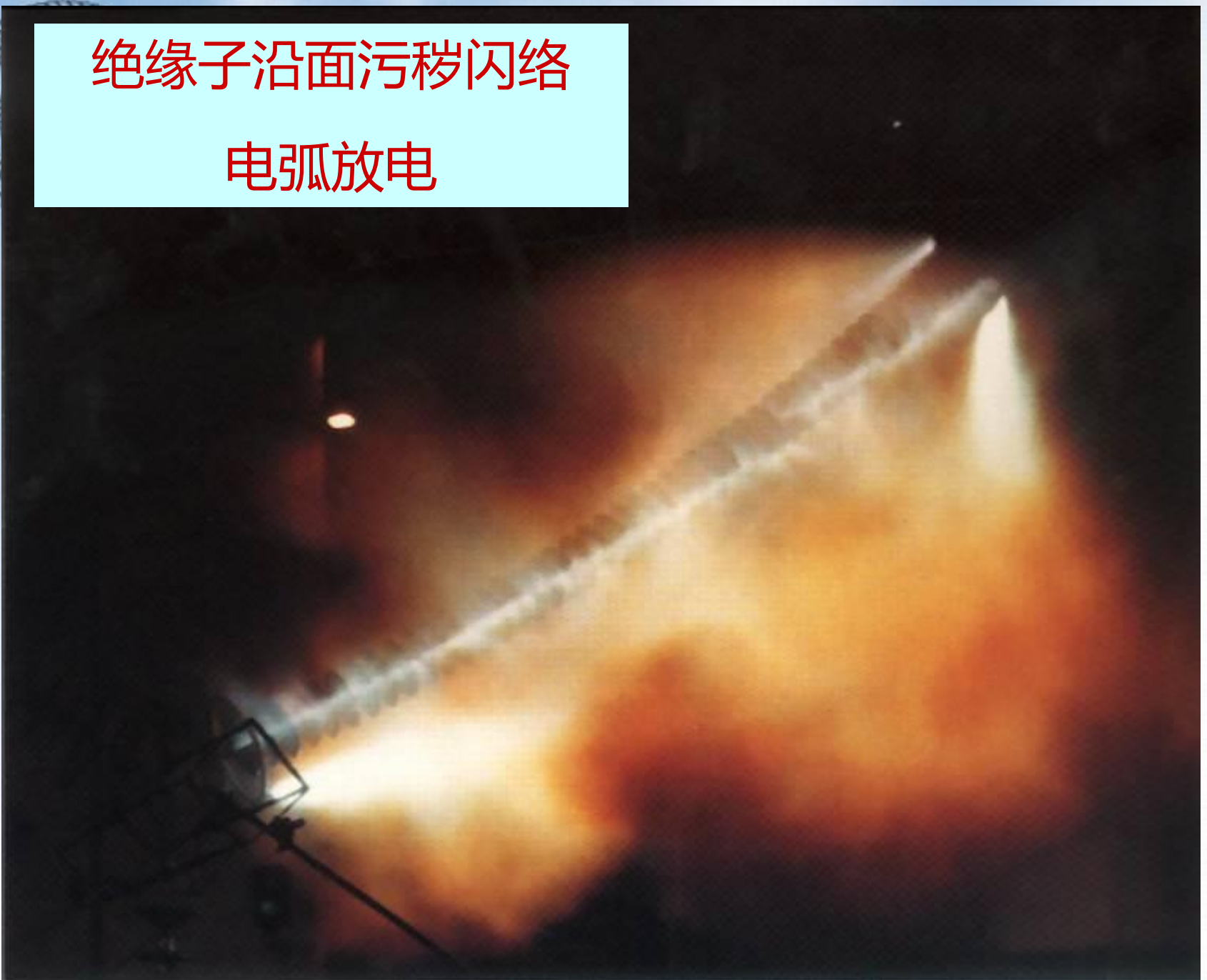


Figure 2.26 Line gap flashover



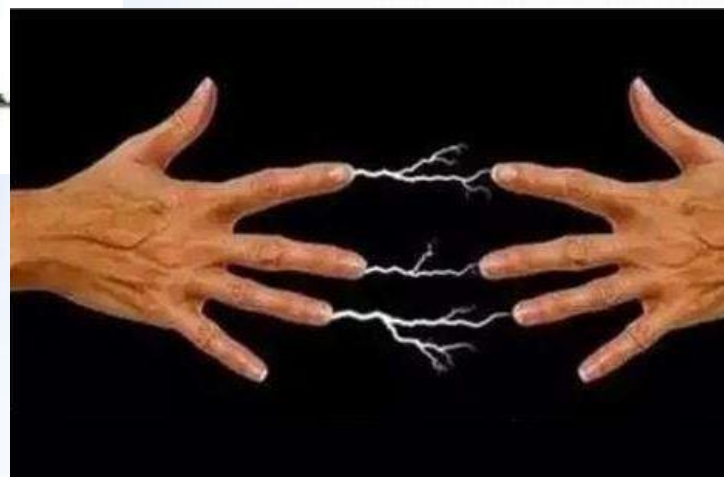
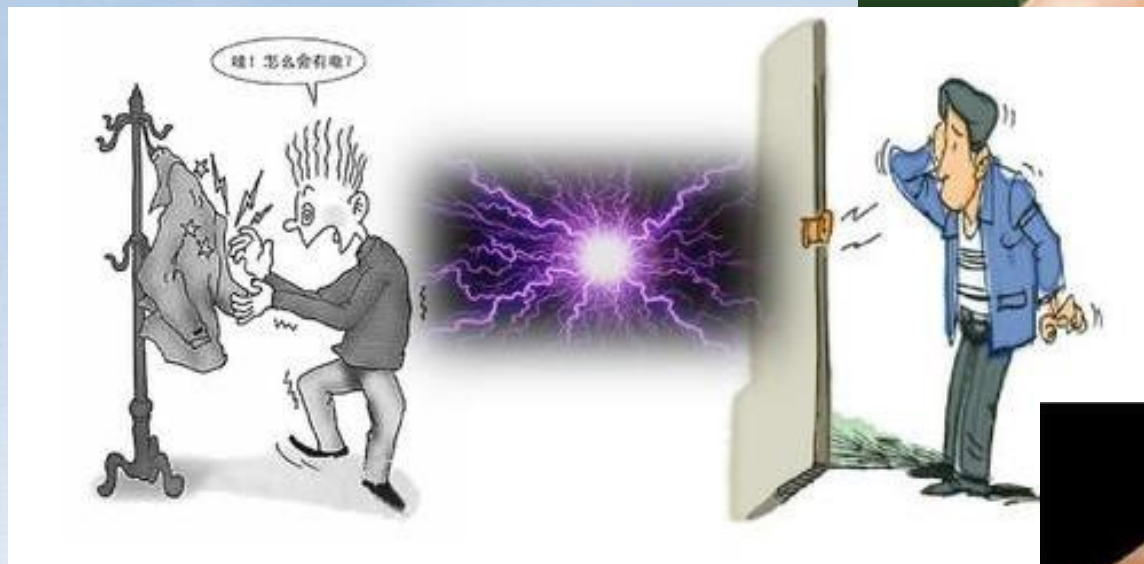
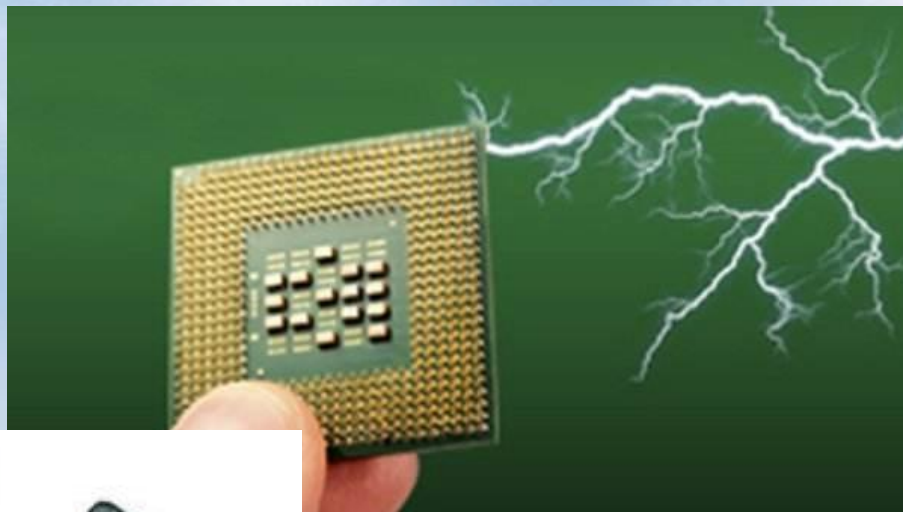
空气间隙击穿

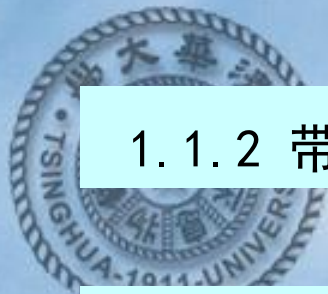
绝缘子沿面污秽闪络
电弧放电





生活中还有各种静电放电





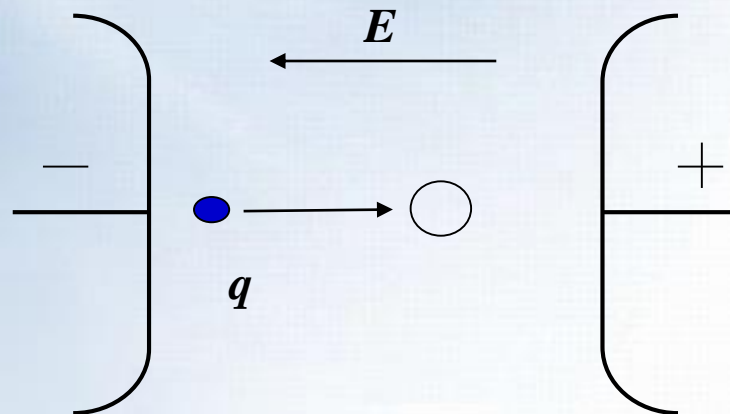
1.1.2 带电质点的产生

电荷守恒！
不能凭空产生、消失啊

1. 电极空间带电质点的产生：

(1) 碰撞电离

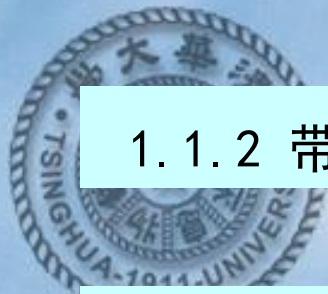
高电压、高场强下特有的



在电场 E 的作用下，质量为 m 、电荷量为 q 的带电质点被加速，沿电场方向行经 x 距离后**获得一定的能量 qEx** ，具有一定的速度 v ，表现为动能

当带电质点动能（**从电场获得的能量**）达到或超过气体分子电离能 W_i 时，若与气体分子发生碰撞，即有可能使分子电离为电子和正离子，

碰撞电离的条件用公式表示即为 $\frac{1}{2} m v^2 \geq W_i$



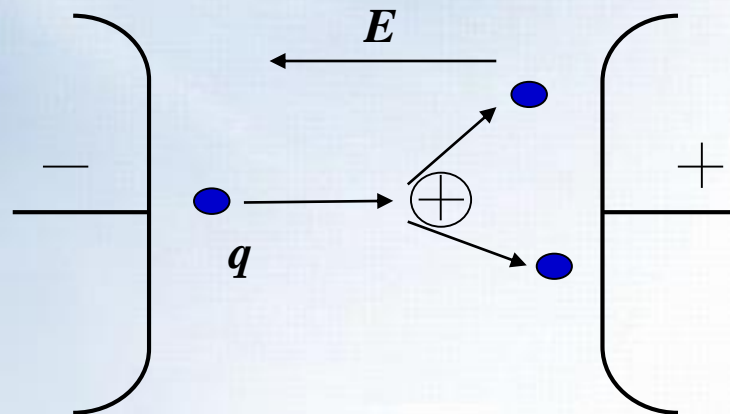
1.1.2 带电质点的产生

电荷守恒！
不能凭空产生、消失啊

1. 电极空间带电质点的产生：

(1) 碰撞电离

高电压、高场强下特有的



在电场 E 的作用下，质量为 m 、电荷量为 q 的带电质点被加速，沿电场方向行经 x 距离后**获得一定的能量 qEx** ，具有一定的速度 v ，表现为动能。当带电质点动能（**从电场获得的能量**）达到或超过气体分子电离能 W_i 时，若与气体分子发生碰撞，即有可能使分子电离为电子和正离子，

碰撞电离的条件用公式表示即为 $\frac{1}{2} m v^2 \geq W_i$

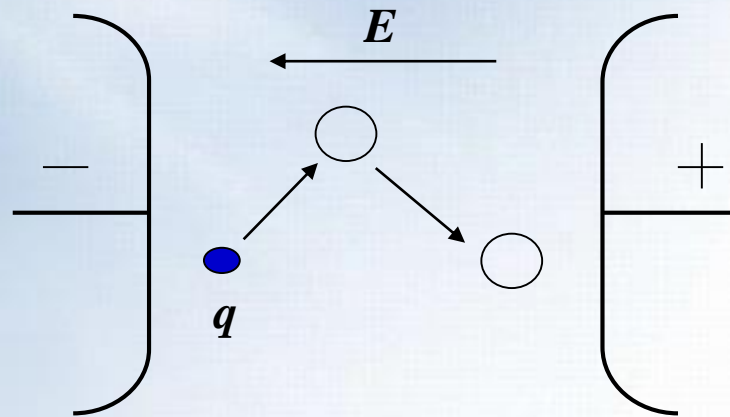
即带电质点从电场获得能量足够多时，会与中性气体分子发生碰撞电离

1.1.2 带电质点的产生

1. 电极空间带电质点的产生：

(1) 碰撞电离

高电压、高场强下特有的



每次碰撞都造成电离的几率是很小的。

自由行程：一个质点在每两次碰撞间自由地通过的距离。

平均自由行程 λ ：众多质点自由行程的平均值 $\lambda = KT / [\pi(r_1 + r)^2 p]$ 。

若平均自由行程 λ 大，则积累的动能也大，容易造成气体电离。

在碰撞电离中，由电子引起的电离占主要地位。在常温常压下，空气中电子的平均自由行程在 10^{-5} cm数量级。

平均自由行程 λ

1.1.2 带电质点的产生

1. 电极空间带电质点的产生：

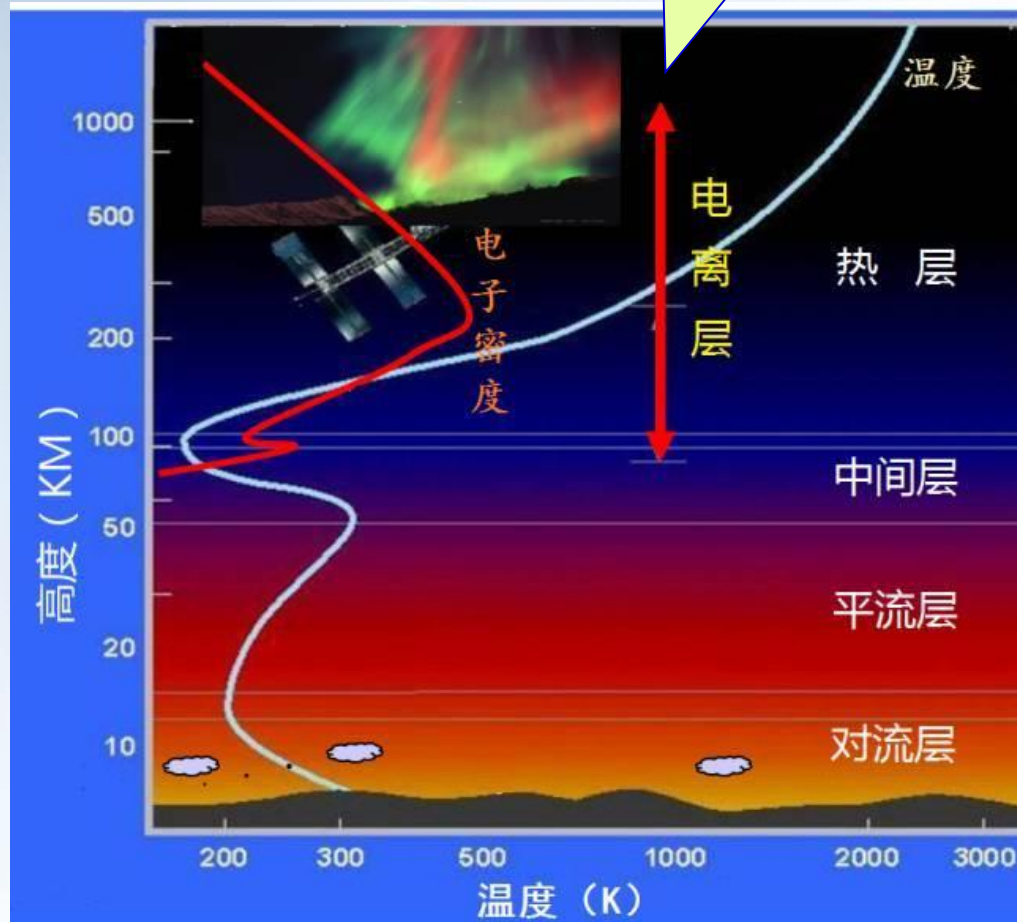
(2) 光电离

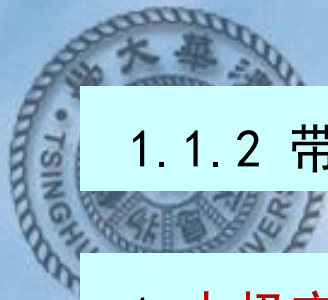
当气体分子受到光辐射时，若光子能量 W 大于气体分子的电离能 W_i ，就有可能引起气体分子发生光电离。

$$W = hf = hc / \lambda \geq W_i$$

地球的电离层即由太阳高能辐射以及宇宙射线的激励而电离的大气高层。

大气层：对流层、平流层、中性层、电离层.....





1.1.2 带电质点的产生

1. 电极空间带电质点的产生：

(2) 光电离

地球的电离层即由太阳高能辐射以及宇宙射线的激励而电离的大气高层。



R. Marskar, Plasma Sources Sci. Technol. 33 025024 (2024)

1.1.2 带电质点的产生

1. 电极空间带电质点的产生：

(2) 光电离

当气体分子受到光辐射时，若光子能量 W 大于气体分子的电离能 W_i ，就有可能引起气体分子发生光电离。 $W = hf = hc / \lambda \geq W_i$

从而可得引起光电离的临界波长 $\lambda_0 = hc / W_i$

表 1-2 几种气体的电离电位及光电离临界波长

气体或金属蒸汽	O ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂	N ₂	空气	He
电离电位 / V 或电离能 / eV	12.2	12.7	13.7	15.4	15.5	16.3	24.6
光电离临界波长 / nm	102	97.7	90.6	80.6	80.1	76.2	50.4

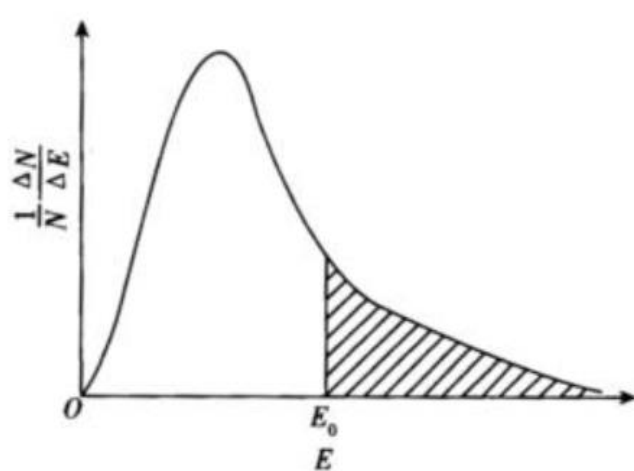
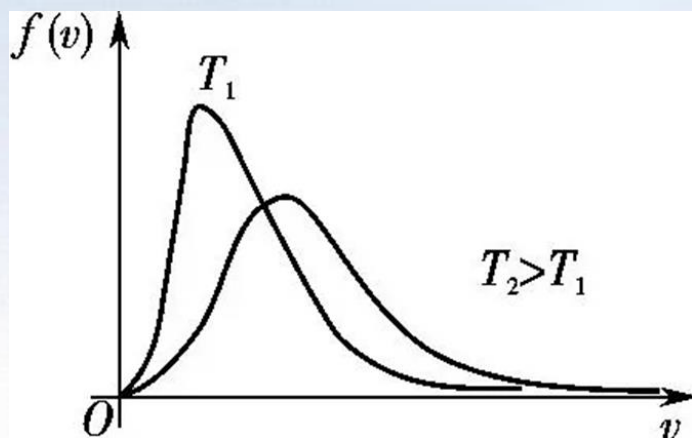
到达地面的普通阳光照射（ $\lambda \geq 290\text{nm}$ ）远不足以引起气体分子光电离

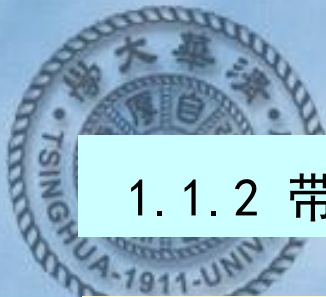
1.1.2 带电质点的产生

1. 电极空间带电质点的产生：

(3) 热电离 因气体的热状态而引起的电离，称热电离。热电离的本质仍是高速运动的气体分子的碰撞电离和光电离，只不过其能量不是来源于电场，而是来源于气体分子本身的热能。

气体温度是气体分子热运动剧烈程度的标态。常温下，气体分子平均动能 $W_m \approx 3.88 \times 10^{-2} \text{ eV}$ ，远小于空气的电离能 $W_i = 16.3 \text{ eV}$ ，远不足以引起空气电离。当发生电弧放电时，气体温度可达数千度以上，这时气体中热运动速度快的高能分子，就可以导致碰撞电离了。





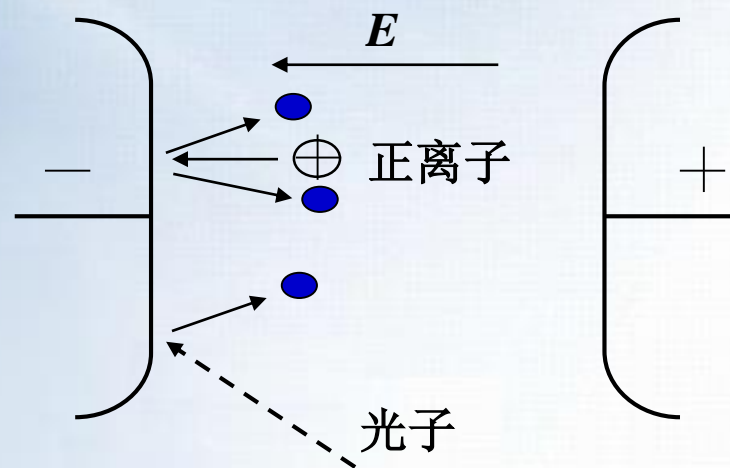
1.1.2 带电质点的产生

2. 电极表面带电质点的产生：

(1) 正离子碰撞阴极

正离子在电场力作用下向阴极运动，直至碰撞阴极。

若正离子动能足够大，碰撞出两个电子，则一个电子与正离子复合，另一个电子就成为新的带点质点了。



(2) 光电效应(光子照射阴极)

1.1.2 带电质点的产生

2. 电极表面带电质点的产生:

(2) 光电效应(光子照射阴极)

想想现在火爆
的光伏发电

给阴极注入的能量超过逸出功, 会使阴极发射电子, 即阴极表面电离

表 1-3 几种金属及金属氧化物的逸出功

金属名称	铯	锌	铝	铬	铁	镍	铜	银	钨	金	铂	氧化铜
逸出功/eV	1.88	3.30	4.08	4.37	4.48	5.24	4.70	4.73	4.54	4.82	6.30	5.34

与气体相比, 阴极表面更容易发生电离

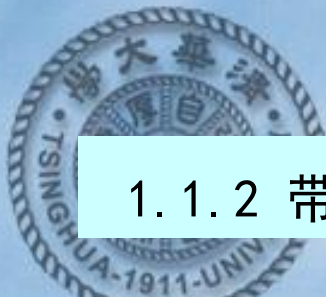
表 1-2 几种气体的电离电位及光电离临界波长

气体或金属蒸汽	O ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂	N ₂	空气	He
电离电位 / V 或电离能 / eV	12.2	12.7	13.7	15.4	15.5	16.3	24.6
光电离临界波长 / nm	102	97.7	90.6	80.6	80.1	76.2	50.4

(2) 光电效应(光子照射阴极)

1922年，爱因斯坦因对光电效应的解释获得1921年度诺贝尔物理学奖

- 1887年赫兹对电磁波波速、波长、反射等研究，得出光就是电磁波的结论，为光的波动说提供了最有力的证据。但是当赫兹用不同金属电极、不同光源进行实验时，发现高频率的紫外光可以使电火花增强。困惑！
- 1902年勒纳德发现光电管中每种阴极金属对应一特定频率，当入射光小于该频率则不发生光电效应。但根据经典电磁理论，光波（电磁波）能量由振幅决定，与频率无关！
- 勒纳德提出“触发说”，认为光电子逸出的能量来自特定原子的内部，紫外线只起激发作用，1905年获诺贝尔物理学奖。
- 1905年爱因斯坦提出“光量子”概念，“从点光源发射出来的光线的能量在传播中不是连续分布在越来越大的空间体积中的，而是由个数有限的，集中在空间某些点的能量子所组成，这些能量子能够运动，但不能分割，而只能整个地被吸收或产生出来”，把光看成光量子，似乎回到了微粒说，引起普遍反对。
- 1916年密立根的精确实验，证实光电子初动能和光频率的函数曲线的斜率正好等于普朗克解释黑体辐射时的常量 h 。爱因斯坦的光量子假说成功地解释了光电效应和康普顿效应（散射实验）！



1.1.2 带电质点的产生

1. 电极空间带电质点的产生：

(1) 碰撞电离（高场强特有的）

(2) 光电离（放电产生的光，或其他原因产生的光）

(3) 热电离

2. 电极表面带电质点的产生：

(1) 正离子碰撞阴极（高场强特有的）

(2) 光电效应（光子照射阴极，放电产生的光或其他原因产生的光）

(3) 阴极热电子发射

(4) 阴极强场发射（高场强特有的）

从电场获得能量、从光照获得能量、从加热获得能量
总之，外界能量输入，产生带点质点



1.1 带电质点与气体放电

带电质点的消失：

受电场力作用流入电极、带电质点的扩散、带电质点的复合

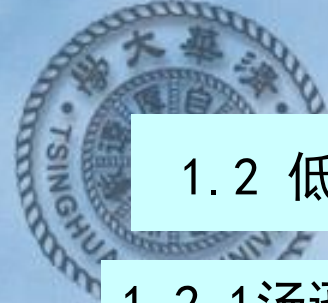
带有异号电荷的质点相遇，发生电荷的传递，中和而还原为中性质点的过程称为复合。

在带电质点的复合过程中会发生光辐射。

异号带电质点的浓度越大，复合就越强烈。因此，**强烈的电离区通常也是强烈的复合区。**

有时电子和气体分子碰撞，非但没有电离出新电子，反而是碰撞电子被分子吸附形成了负离子。

电子为分子俘获而形成负离子后，电离能力大减。负离子的形成起着阻碍放电的作用。



1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律

1.2.1 汤逊理论


自持放电及其条件、电子崩、碰撞电离系数 α 、 γ 及其过程

1.2.2 巴申定律与均匀电场击穿电压

巴申定律、均匀电场的击穿电压

1.2.3 汤逊理论的适用范围

- 20世纪初，英国物理学家J. S. Townsend根据大量实验，提出了基于碰撞电离的气体放电理论
- 在汤逊理论提出之前，德国物理学家F. Paschen从大量的实验中总结出了气体间隙击穿电压的巴申定律



The phenomenon of the electron avalanche was discovered by him, and is known as the Townsend discharge.

At the Cavendish laboratory, he studied under J. J. Thomson. He developed the "***Townsend's collision theory***".

Townsend supplied important work to the electrical conductivity of gases ("Townsend discharge" circa 1897).

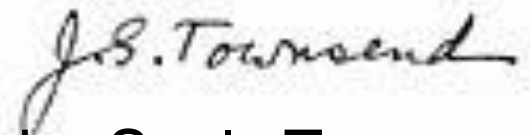
Works:

The Theory of Ionisation of Gases by Collision (1910)

Motion of Electrons in Gases (1925)

Electricity and Radio Transmission (1943)

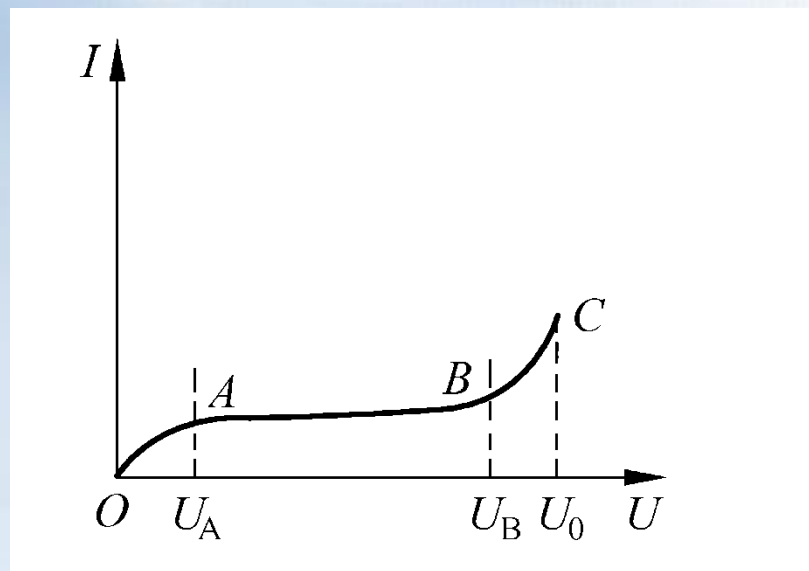
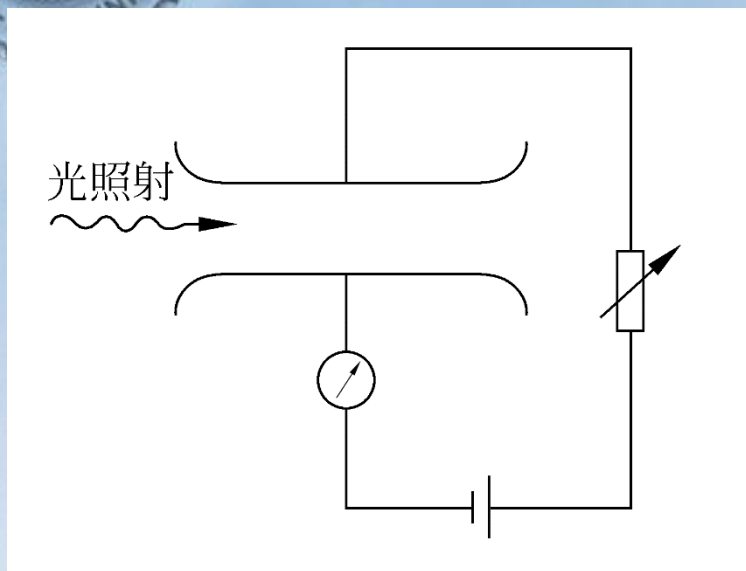
Electromagnetic Waves (1951)



John Sealy Townsend
(1868–1957)

1.2.1 汤逊理论

自持放电与非自持放电



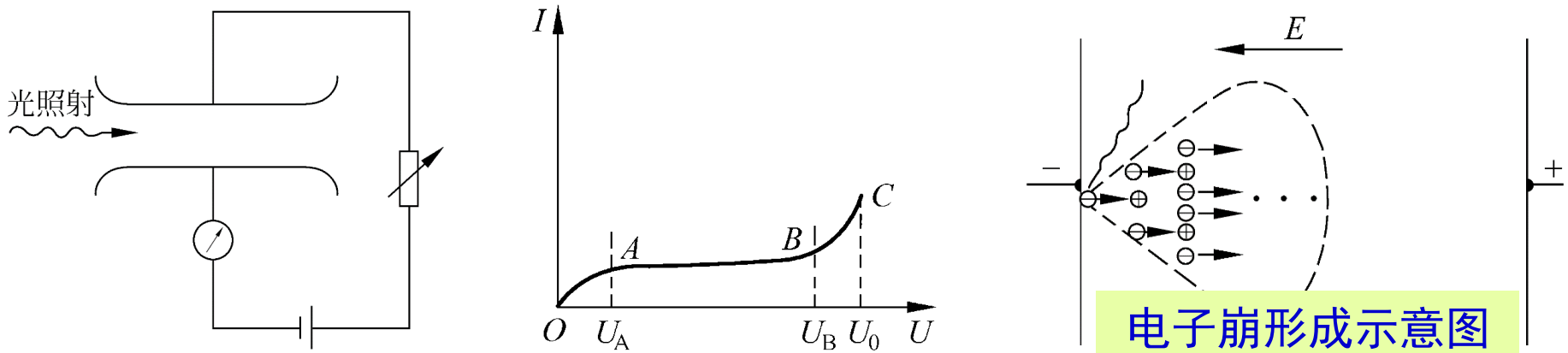
外加电压介于 U_B 与 U_0 时，B-C 段电流为碰撞电离产生的电流。

外加电压小于 U_0 时，取消外电离因素（光照），电流就消失（为什么？），此即非自持放电。

引入“**自持放电**”概念：外加电压达到 U_0 后，取消外电离因素，放电依然可继续，电流依然可保持（为什么？）， U_0 为自持放电电压

1.2.1 汤逊理论

自持放电、电子崩及碰撞电离系数 α 、 γ 过程与自持放电条件



外加电压介于 U_B 与 U_0 时， B-C段电流为碰撞电离产生的电流。

引入“**电子崩**”：碰撞电离的电子崩使得初始电子可在电场中大幅度增殖

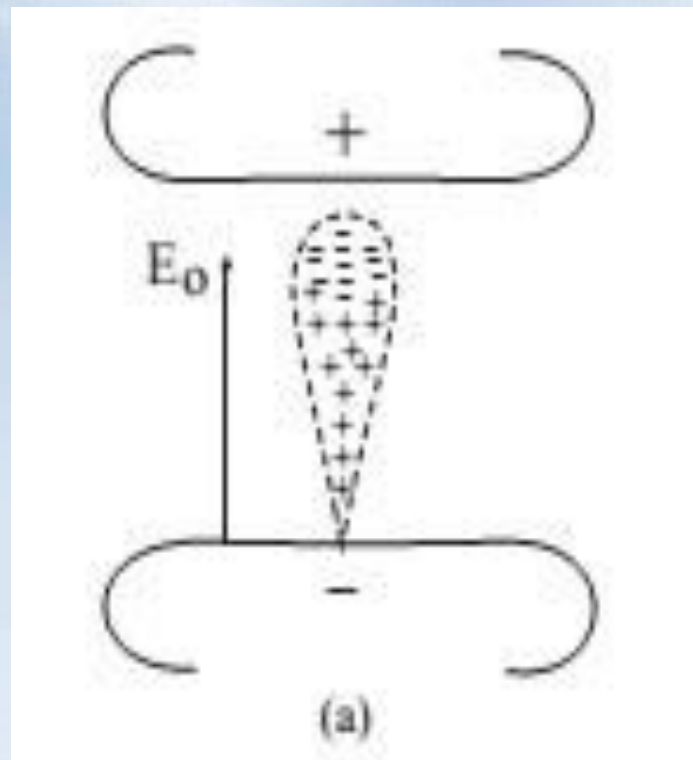
引入“**电子碰撞电离系数 α** ”：一个电子沿电场方向行经1cm长度，平均发生的碰撞电离次数。若每次碰撞电离仅产生一个新电子，则 α 表示在沿电场方向单位行程内新电离出的电子数。

按 α 系数定义，有 $dn = n\alpha dx$ 或， $dn/n = \alpha dx$ ， 积分可得 $n = n_0 e^{\alpha x}$

则外回路中电流为 $I = I_0 e^{\alpha d}$



实际拍摄的电子崩



电子崩中电荷分布示意图

1.2.1 汤逊理论

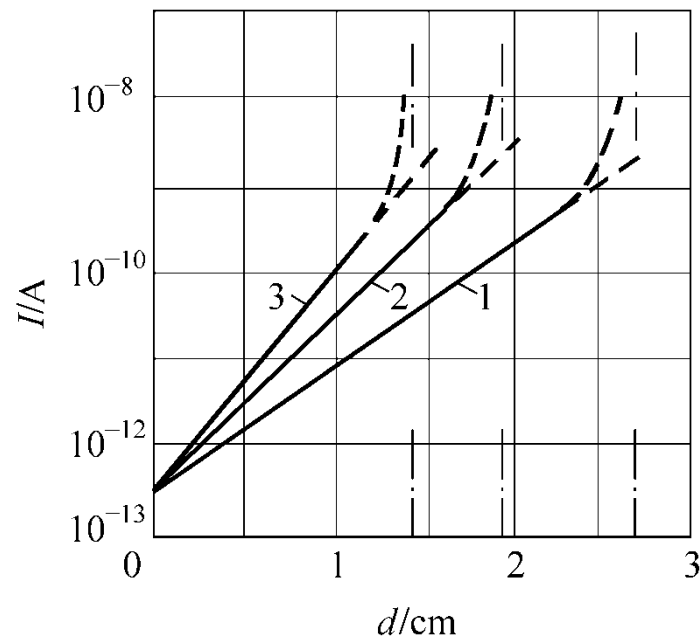
自持放电、电子崩及碰撞电离系数 α 、 γ 过程与自持放电条件

由电子碰撞电离系数 α ，可推得碰撞电离的外回路电流为

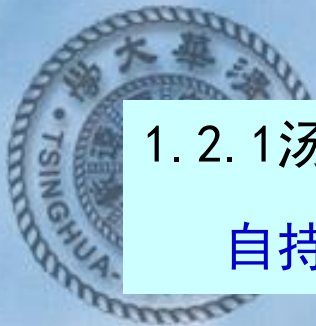
$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

实验结果如图（直线段），即碰撞电离的假设得到了实验支撑
图中直线段的斜率也就是碰撞电离系数 α 。

从图中直线段的电流可方便地得到碰撞电离系数 α 。



$$\alpha = \frac{1}{d_2 - d_1} \ln \frac{I_2}{I_1}$$



1.2.1 汤逊理论

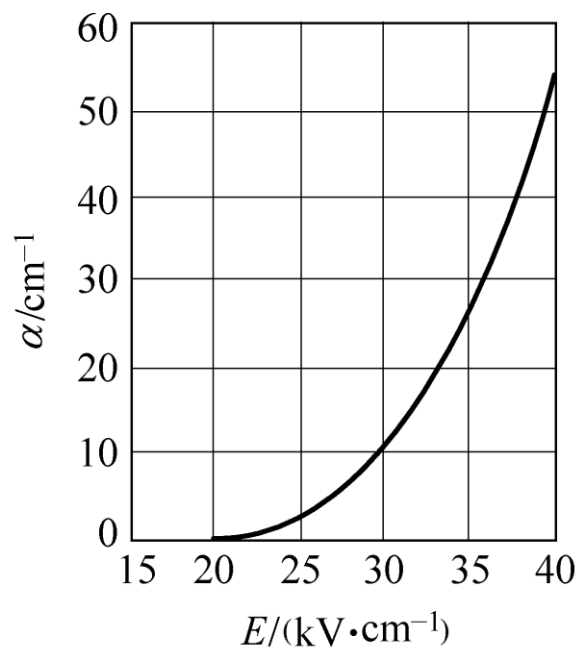
自持放电、电子崩及碰撞电离系数 α 、 γ 过程与自持放电条件

对碰撞电离做适当假设后，还可推算得到系数 α 与外电场强度的关系为

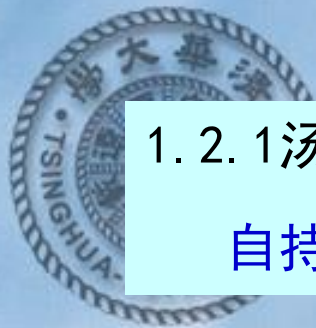
$$\alpha/\delta = A \exp(-B\delta/E)$$

或 $\alpha/\delta = f(E/\delta)$

场强对碰撞电离的强弱影响很大



空气中电子电离系数 α
和场强 E 之间的关系

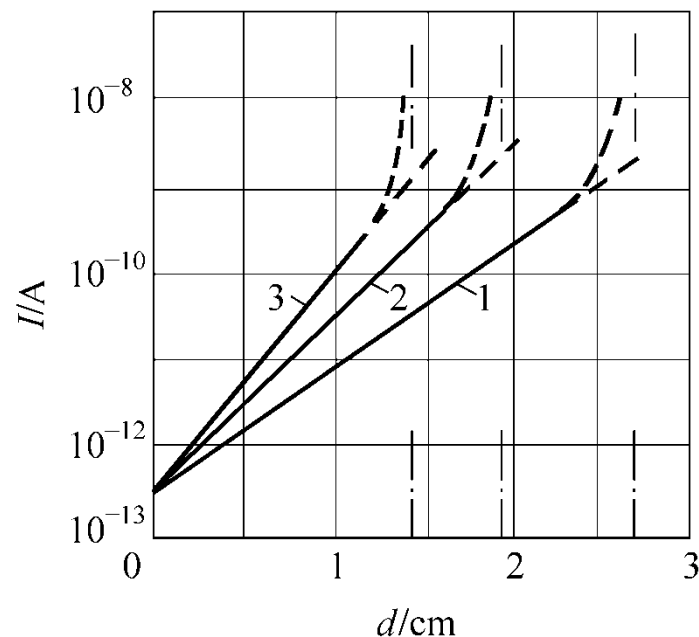


1.2.1 汤逊理论

自持放电、电子崩及碰撞电离系数 α 、 γ 过程与自持放电条件

α 过程仅讨论了电极空间的碰撞电离。

再引入阴极表面电离系数 γ ， γ 为折算到每个碰撞阴极的正离子（包括正离子和光子在阴极引发的自由电子）在阴极释放出的自由电子数



外回路电流从 $I = I_0 e^{\alpha d}$ 变为 $I = I_0 e^{\alpha d} / (1 - \gamma e^{\alpha d})$
即外回路电流大于直线段仅由 α 过程产生的电流，如图中虚线

1.2.1 汤逊理论

自持放电、电子崩及碰撞电离系数 α 、 γ 过程与自持放电条件

阴极表面

气体间隙中

阳极表面

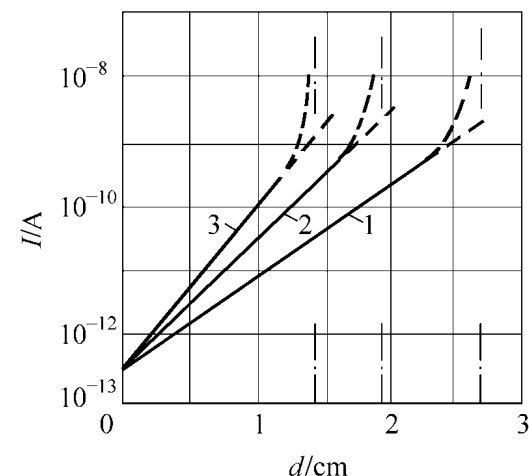
第1周期	一个电子逸出	形成 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子	$e^{\alpha d}$ 个电子进入
第2周期	$\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 个电子	$\gamma(e^{\alpha d} - 1)^2$ 个正离子	$\gamma(e^{\alpha d} - 1)e^{\alpha d}$ 个电子
第3周期	$\gamma^2(e^{\alpha d} - 1)^2$ 个电子	$\gamma^2(e^{\alpha d} - 1)^3$ 个正离子	$\gamma^2(e^{\alpha d} - 1)^2 e^{\alpha d}$ 个电子

可推得外回路电流 $I = I_0 e^{\alpha d} / (1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1))$

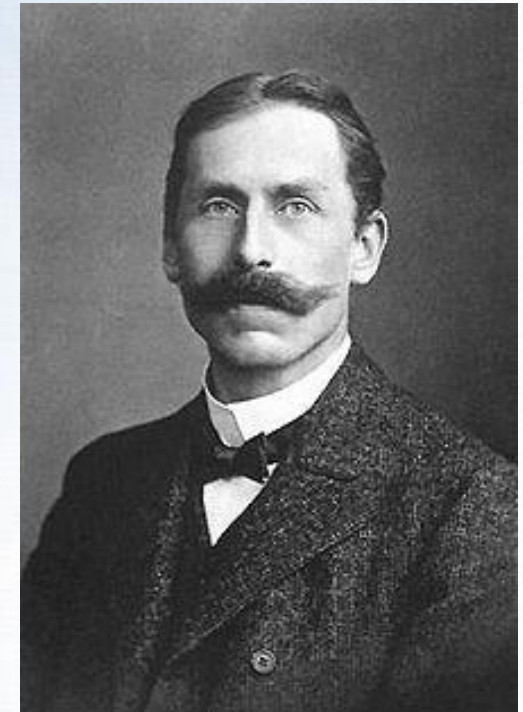
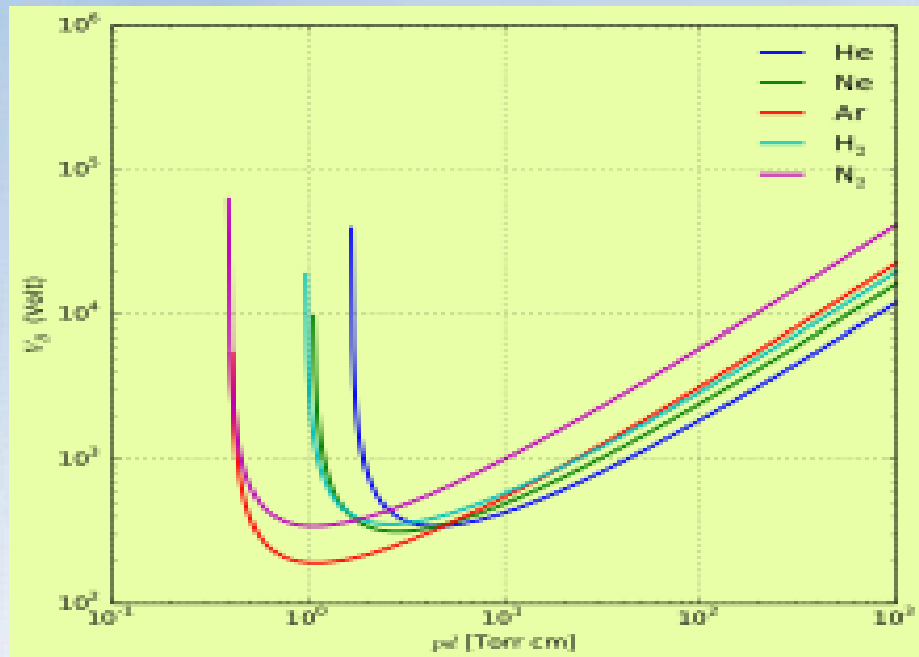
简化为 $I = I_0 e^{\alpha d} / (1 - \gamma e^{\alpha d})$

即考虑 γ 过程后，电流比仅考虑 α 过程要大

自持放电条件 $\gamma e^{\alpha d} = 1$



Friedrich Paschen was known for his work on electrical discharges. He established the now widely used Paschen curve. *Paschen's Law* is named after Friedrich Paschen who discovered it empirically in 1889.



Friedrich Paschen
(1865–1947)

During the war he had the Chinese scientist He Zehui to stay at his house and she became like a daughter to him.

空气的巴申曲线

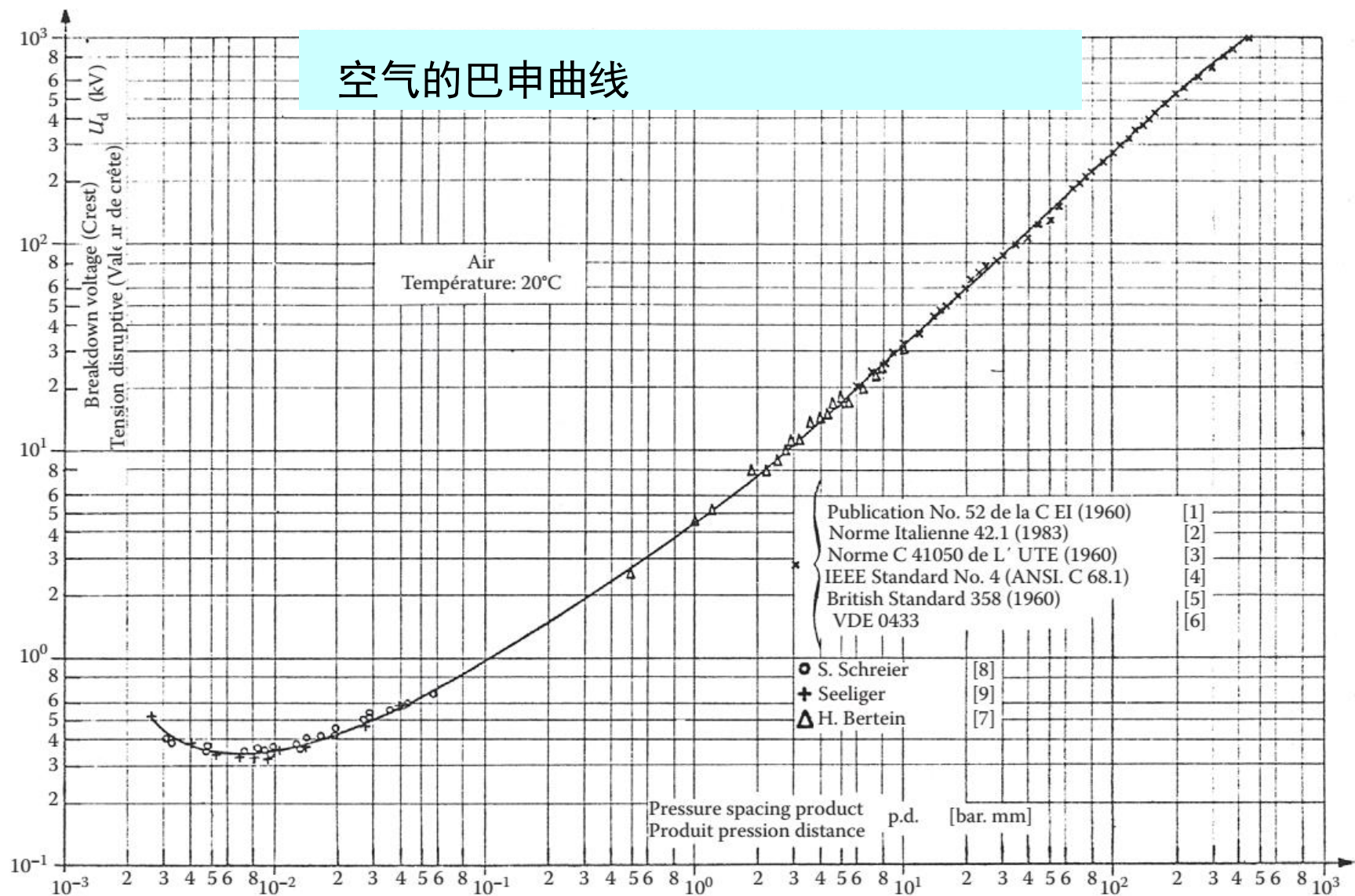
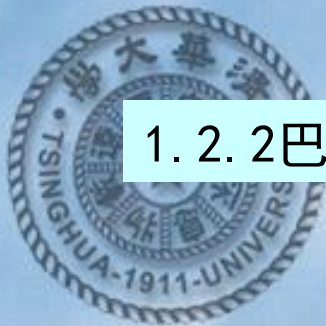
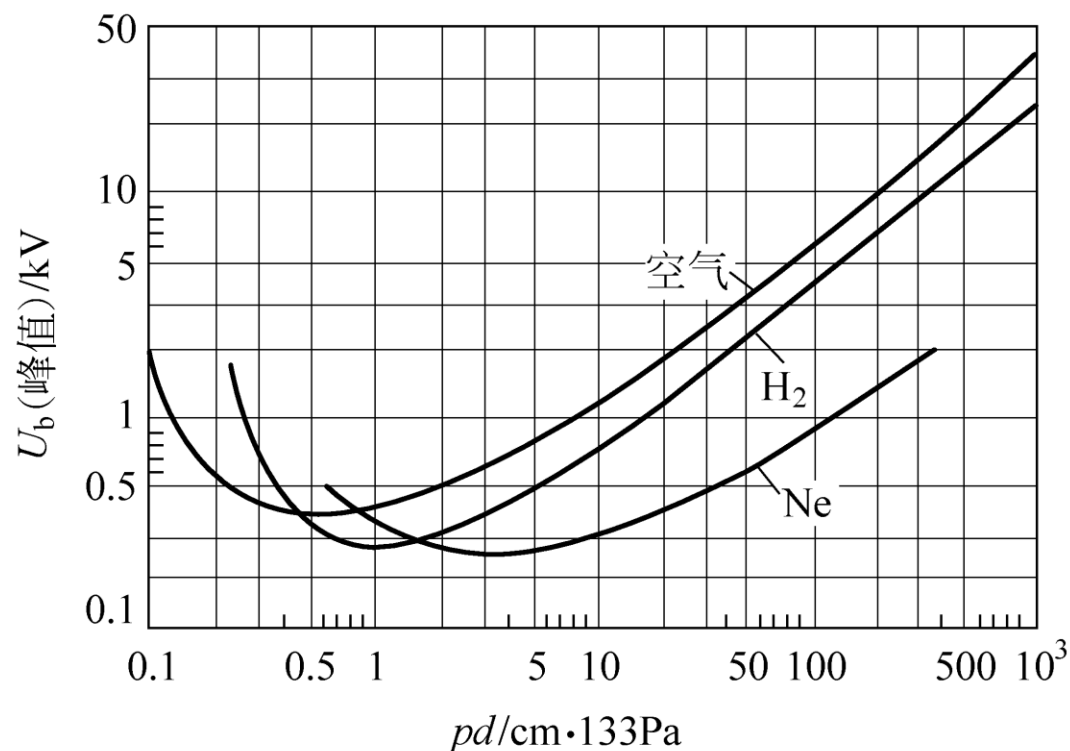


FIGURE 4.29 Paschen's curves in air. (From Dakin, T.W. et al., *Electra*, 32, 61, 1974.)



1.2.2 巴申定律与均匀电场击穿电压

实验求得的均匀电场
不同气体间隙的
 $U_b = f(pd)$ 曲线



从汤逊理论的自持放电条件，也可推得击穿电压 $U_b =$

这也是U形曲线，理论及实验都说明 U_b 有极小值

$$U_b = \frac{B \delta d}{\ln(A \delta d / \ln \gamma^{-1})}$$

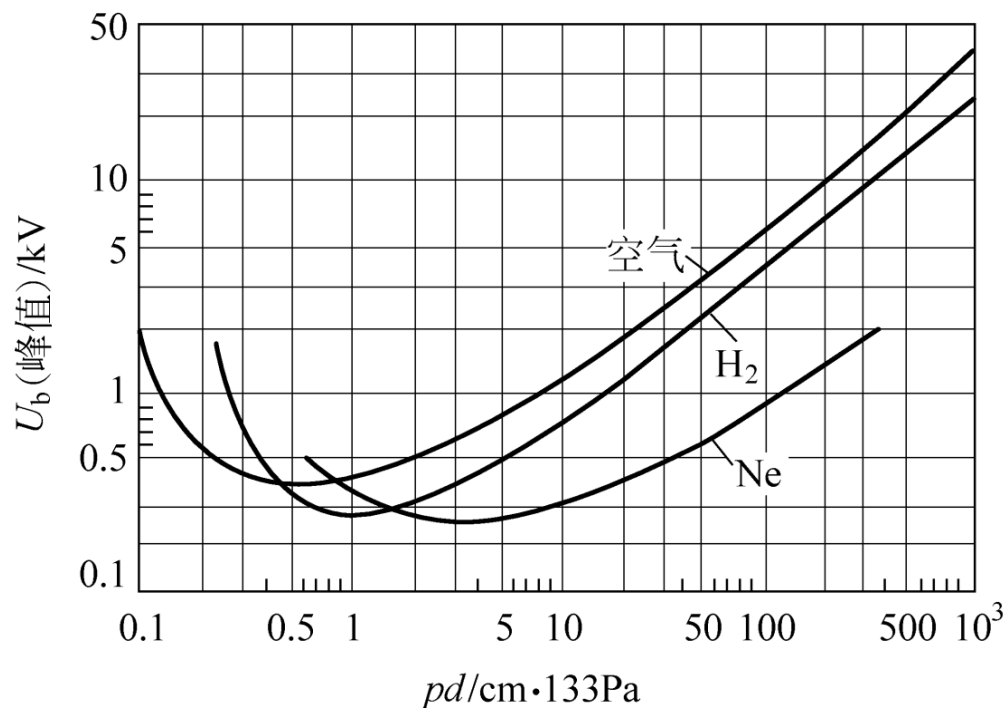
1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律

1.2.1 汤逊理论

平均自由程、碰撞电离、自持放电、电子崩及碰撞电离系数 α 、 γ 过程与自持放电条件

1.2.2 巴申定律与均匀电场击穿电压

1.2.3 汤逊理论的适用范围

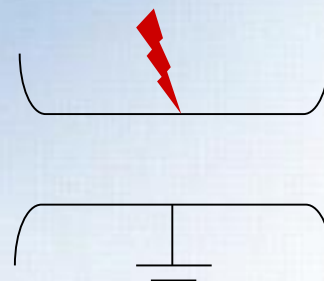


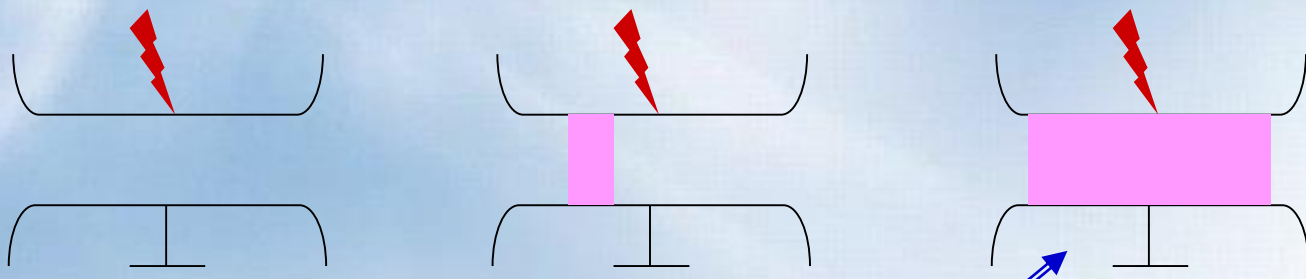
汤逊理论建立在低气压、 pd 值较小的实验条件下

若 pd 值过小或过大，则放电现象、放电机理将发生变化

空气中 $pd > 200$ (cm·133Pa) 时，就不能用汤逊理论来说明了

对平板间隙，保持电压不变，仅降低气压，实验现象会怎样？





气压

时间

不放电

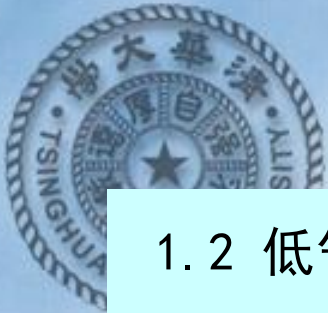
通道放电

辉光放电

不放电

电压

时间



1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律

自持放电条件 $\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1$ 或 $\gamma e^{\alpha d} = 1$

1.3 高压下均匀电场自持放电的流注理论

1.3.1 空间电荷对电场的畸变

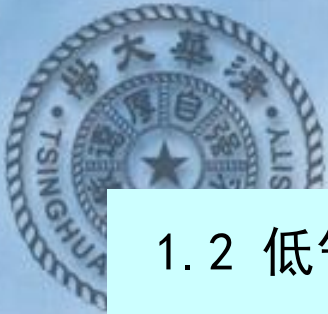
1.3.2 流注的形成

正流注的形成、负流注的形成

$$\gamma e^{\alpha d} = 1$$

1.3.3 均匀电场中的自持放电条件 自持放电条件

1.3.4 流注理论对放电现象的解释



1.2 低气压下均匀电场自持放电的汤逊理论和巴申定律

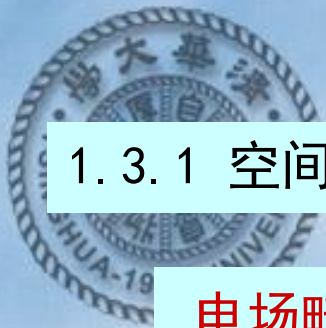
自持放电条件 $\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1$ 或 $\gamma e^{\alpha d} = 1$

1.3 高气压下均匀电场自持放电的流注理论

1.3.1 空间电荷对电场的畸变

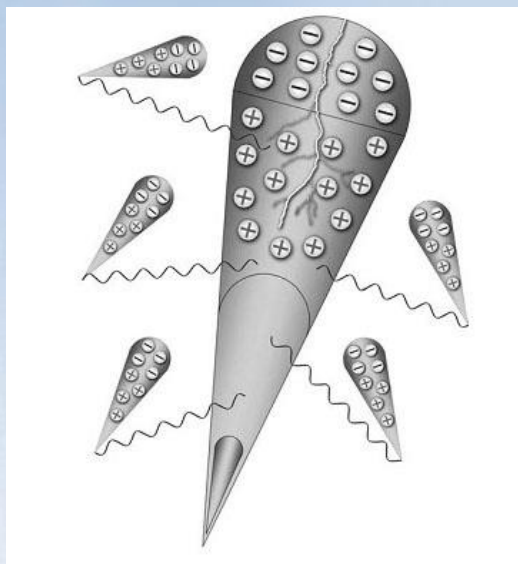
高气压下，空气密度比低气压时大了很多，电子平均自由行程大大减小，碰撞电离所需的场强大为增加。

一旦场强达到碰撞电离的条件，单位空间内碰撞电离产生的空间电荷数比低气压时也大了很多，以至于这些新产生的空间电荷使得原有的外电场都产生了畸变。

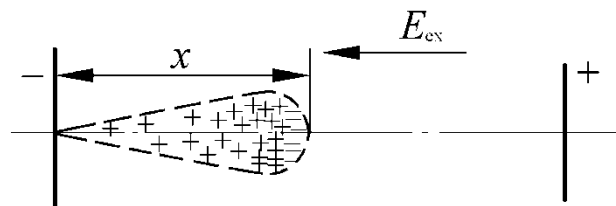


1.3.1 空间电荷对电场的畸变

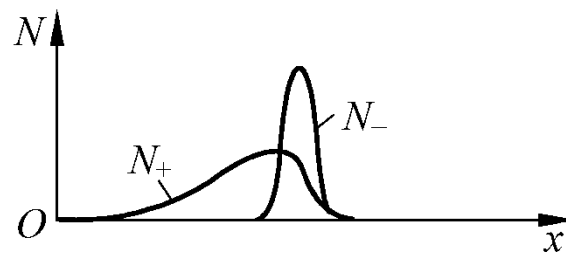
电场畸变程度取决于
电子崩中电子数



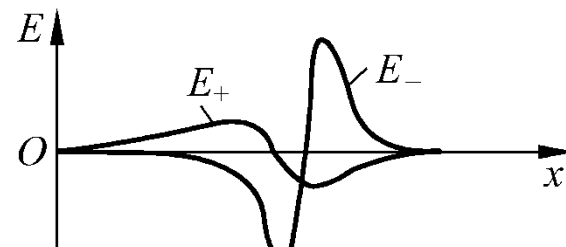
初始电子崩及
空间光电离引发的
二次电子崩



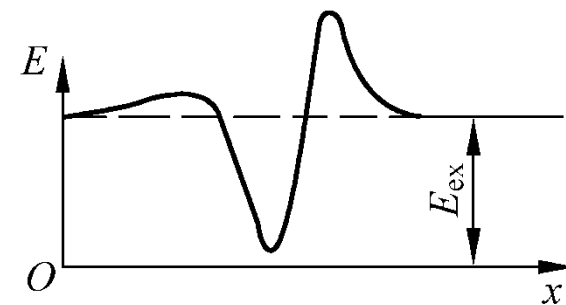
(a)



(b)



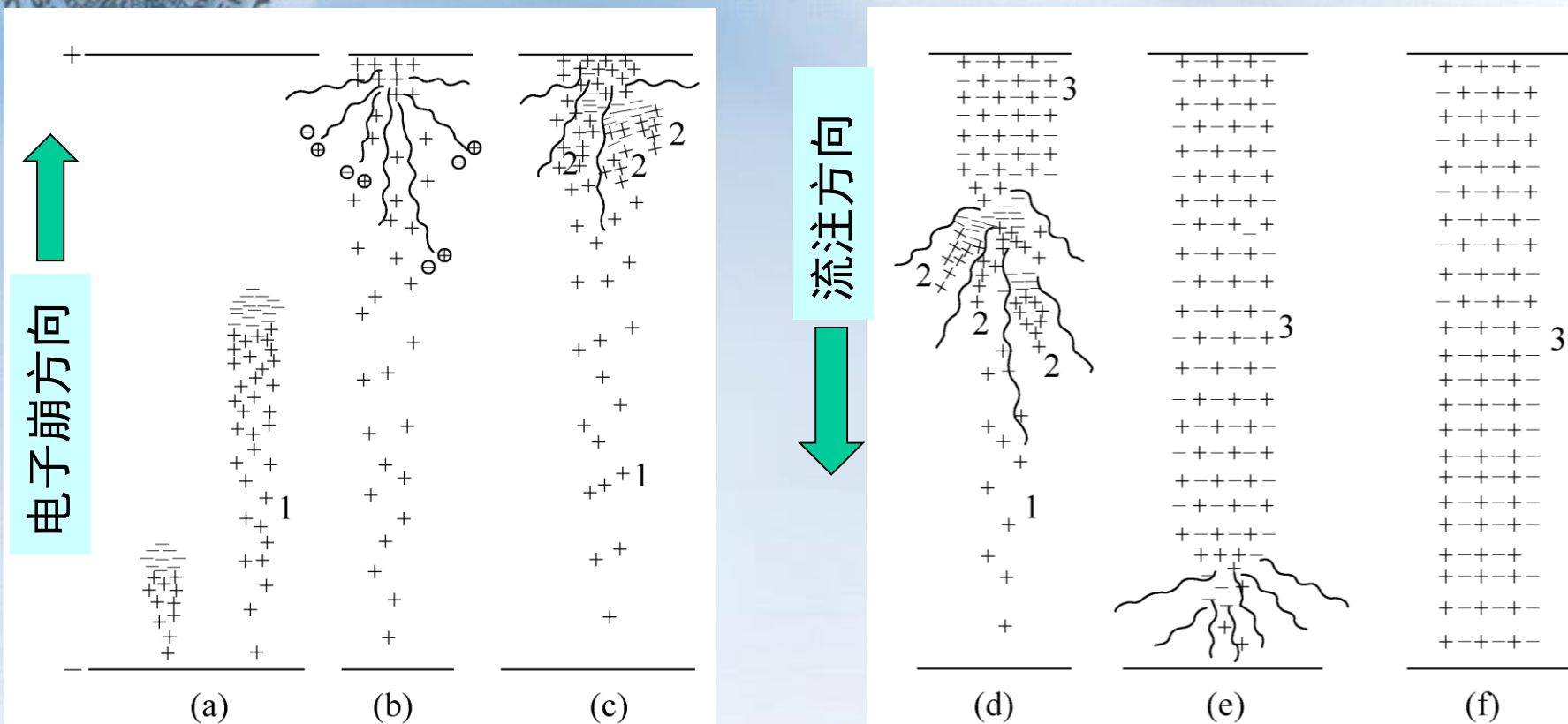
(c)



(d)

1.3.2 流注的形成

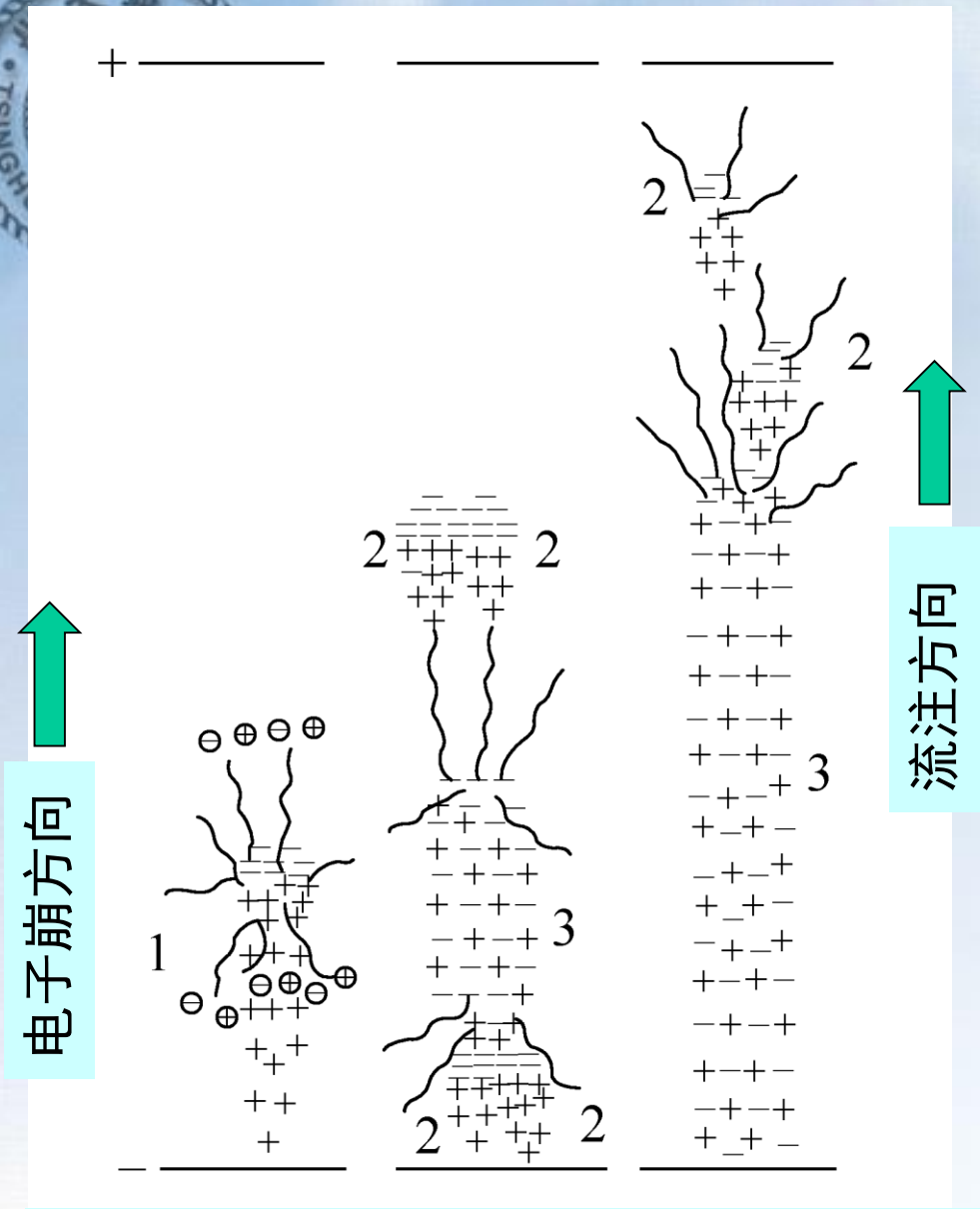
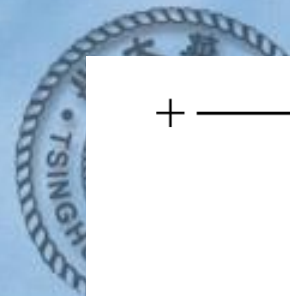
流注的自持放电条件：电子崩头部电子数达到一定数量，对电场的畸变达到一定程度



1—初始电子崩(主电子崩); 2—二次电子崩; 3—流注

正流注的形成与发展

正流注的发展速度约 $(1-2) \times 10^8$ cm/s, 电子崩约 1.25×10^7 cm/s



换一个说法的流注自持放电条件：
电子崩中**电子总数达到一定数量**
(e^{ad})，因此空间电荷对外电场的
畸变也增强到一定程度，密集的空间
电荷复合产生的光子足以引发就近的
光电离，从而产生就近的二次电子崩

负流注的形成与发展

- 1—初始电子崩(主电子崩)
- 2—二次电子崩
- 3—流注

负流注的发展速度约 $(0.7-0.8) \times 10^8$ cm/s，也比电子崩快得多

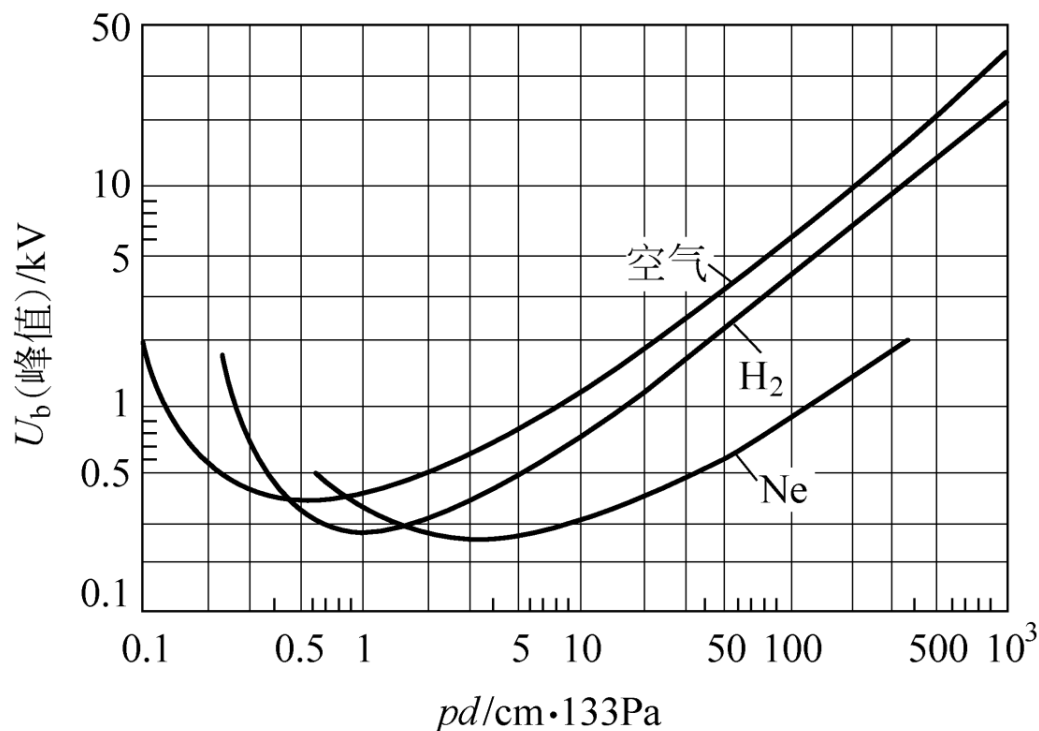
1.3.4 流注理论对放电现象的解释

流注自持放电条件即： $e^{\alpha d} = 1/\gamma$ 也就是 $\gamma e^{\alpha d} = 1$

此处 γ 与前述 γ 物理意义不同，数值上也相差极大

(此处 $1/\gamma \approx 10^8$, 前述汤逊放电 $\gamma \approx 0.025$)

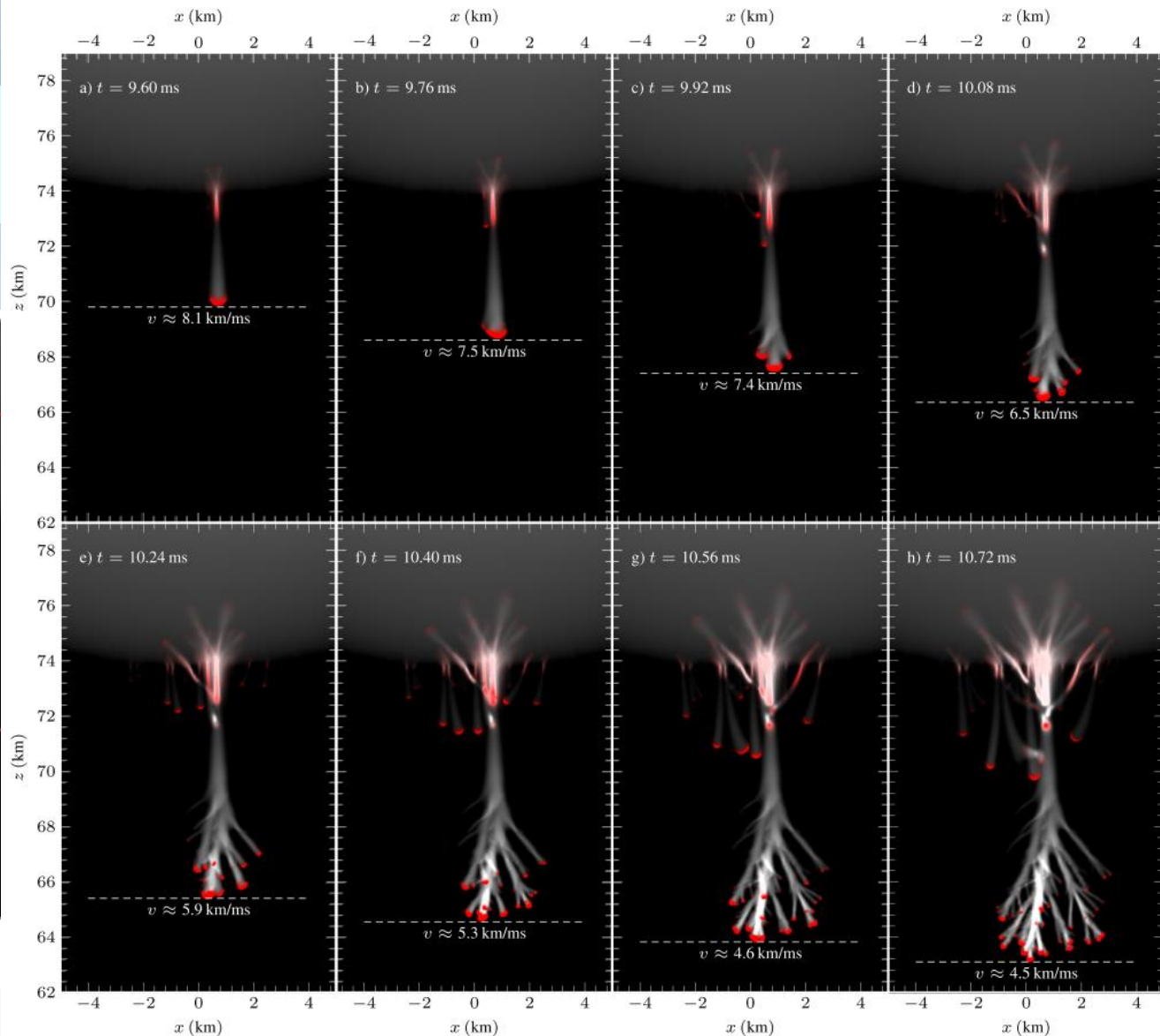
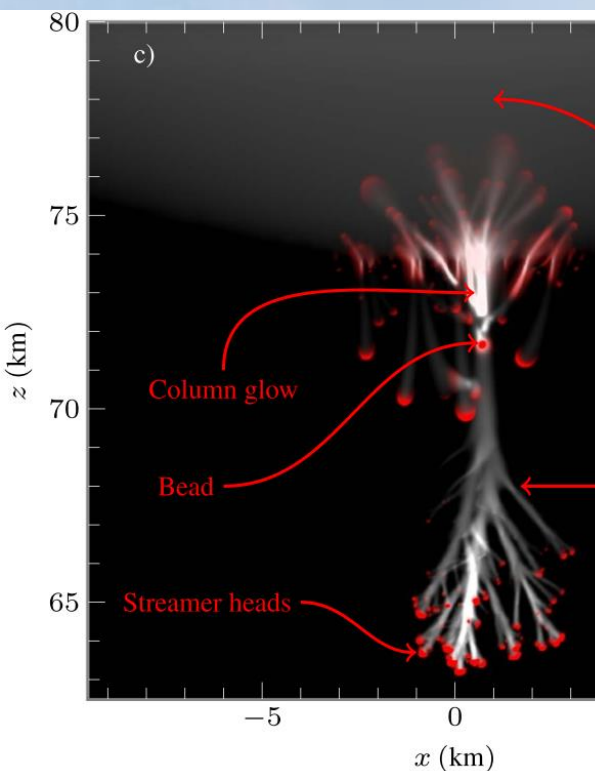
在广阔的 pd 范围内，间隙击穿电压都服从 U 形曲线的规律



实验求得的均匀电场不同气体间隙的 $U_b = f(pd)$ 曲线

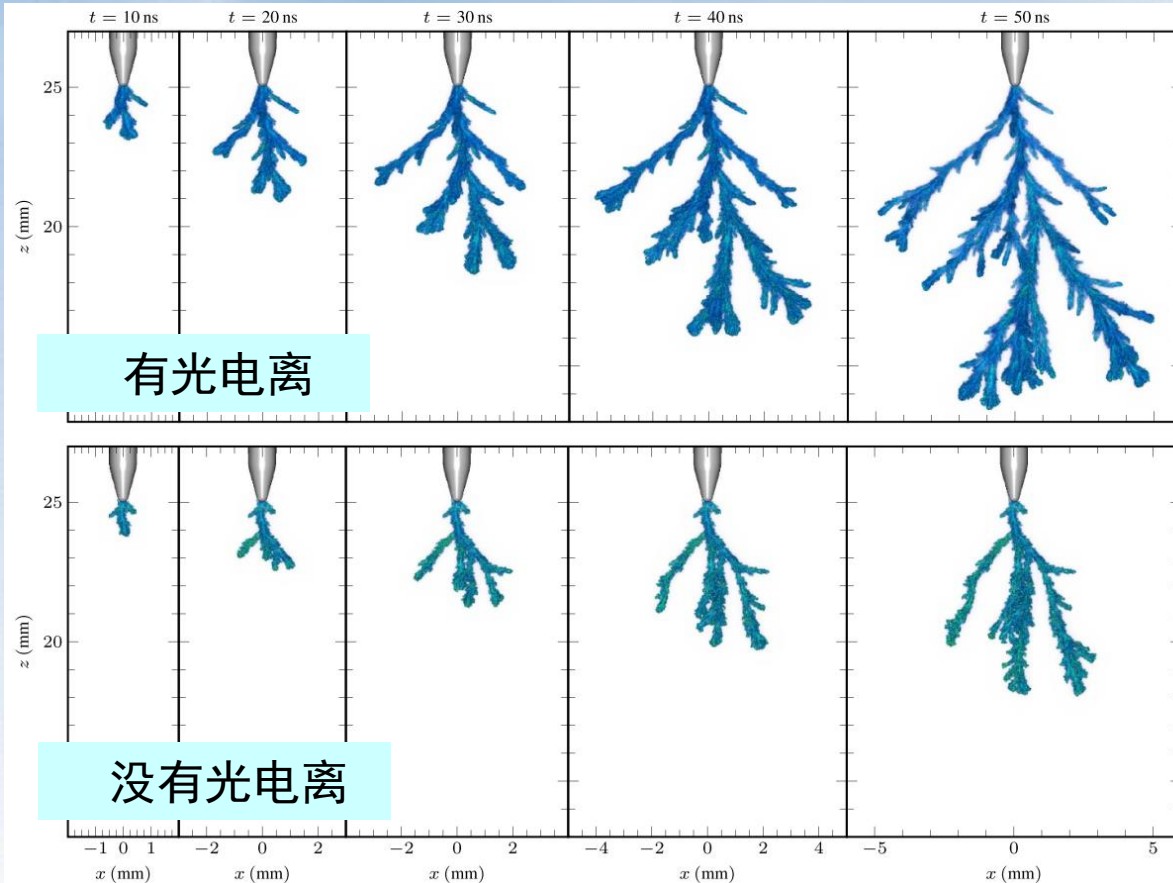
数值模拟也是近年来另一种研究放电过程的手段

外层空间精灵放电的数值模拟



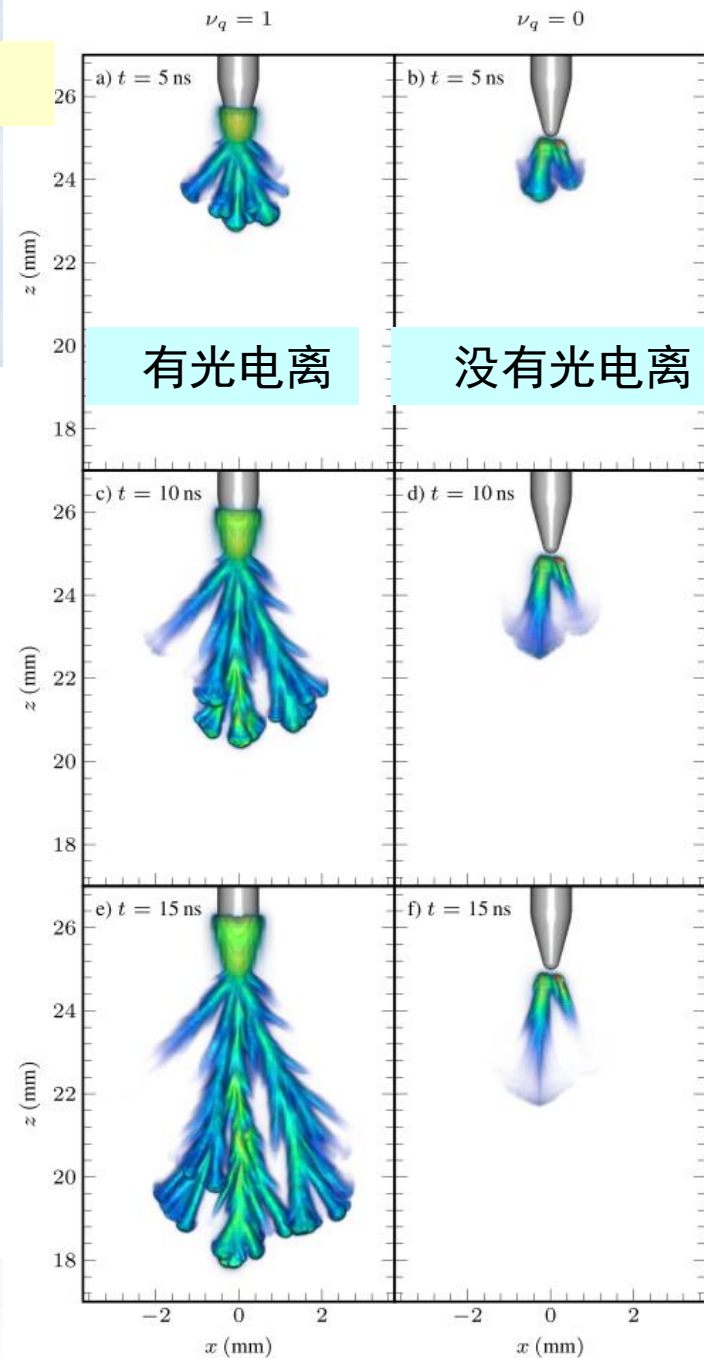
数值模拟也是近年来另一种研究放电过程的手段

光电离在流注放电发展中具有重要作用
CO₂中流注放电的数值模拟



正流注

R. Marskar, Plasma Sources Sci. Technol. 33 025023 (2024)



负流注

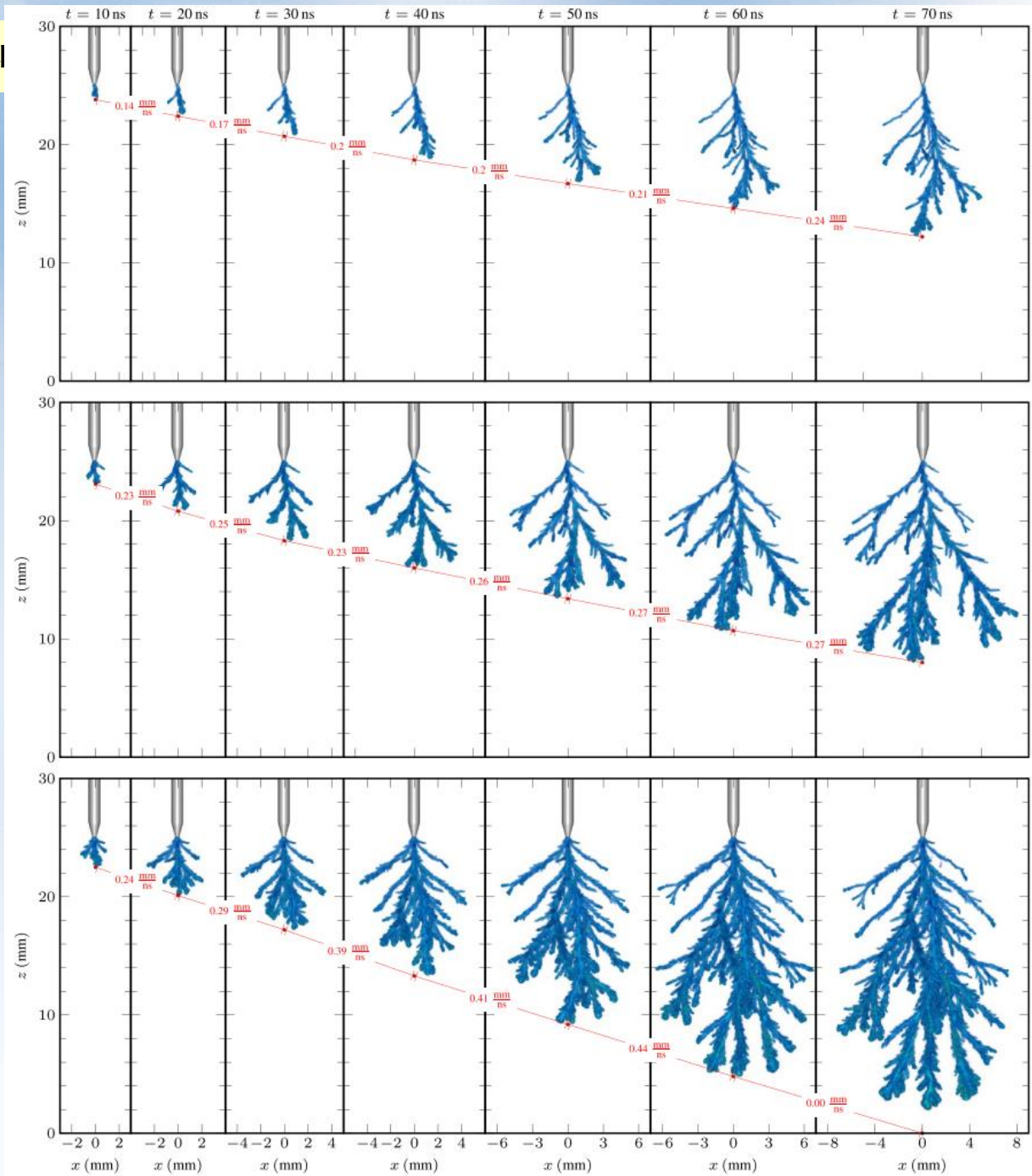
数值模拟也是近年来另一种

施加电压对流注放电的影响

CO₂中流注放电的数值模拟

正流注

R. Marskar, Plasma Sources
Sci. Technol. 33 025023 (2024)



数值模拟也是近年来另一种研究

施加电压对流注放电
的影响

CO₂中流注放电的数
值模拟

负流注

R. Marskar, Plasma Sources
Sci. Technol. 33 025023 (2024)

