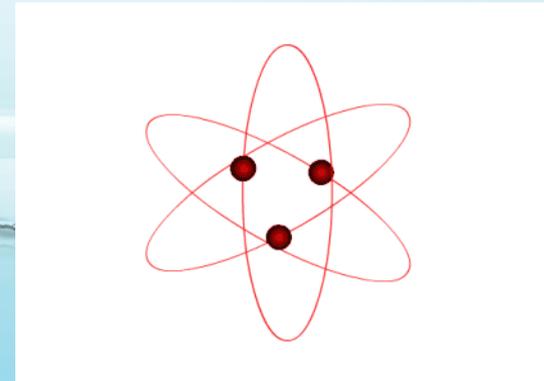
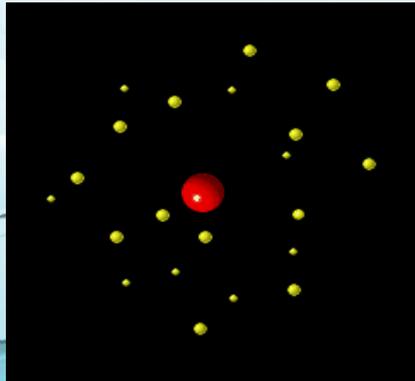




中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

# 电子是什么？

中国科学技术大学 物理学院  
邓友金 教授



# 1 早期的电现象



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

从「電」字说起

公元前16-11世纪，甲骨文出现“雷”字

西周公元前11世纪出现“電”字

康熙字典：陰陽激耀 從雨從申



# 1 早期的电现象



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

公元前120年 《淮南子》

阴阳相搏为雷，激扬为电

三国时代 《吴书》

虞翻：「虎魄不取腐芥」

南北朝 陶弘景《名医别录》

琥珀，惟以手心摩热拾芥为真



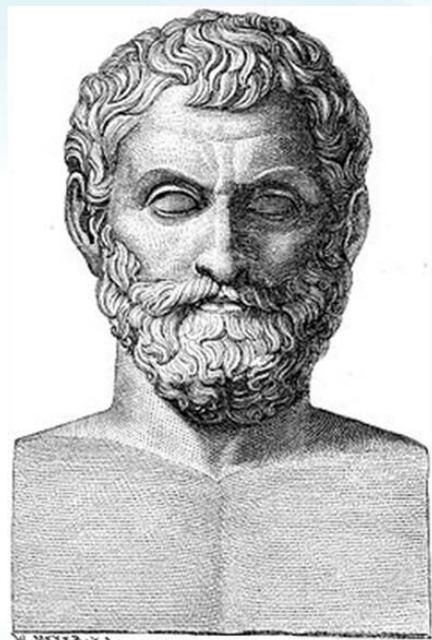
# 1 早期的电现象



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

公元前558年 古希腊 泰勒斯

摩擦能改变琥珀的性质



公元三世纪 晋朝张华 《博物志》

今人梳头，解着衣，有随梳解结，有光者，亦有咤声



# 1 早期的电现象



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

西汉 司马迁 《史记》

从公元前27世纪到16世纪，  
有350多次极光的记录。

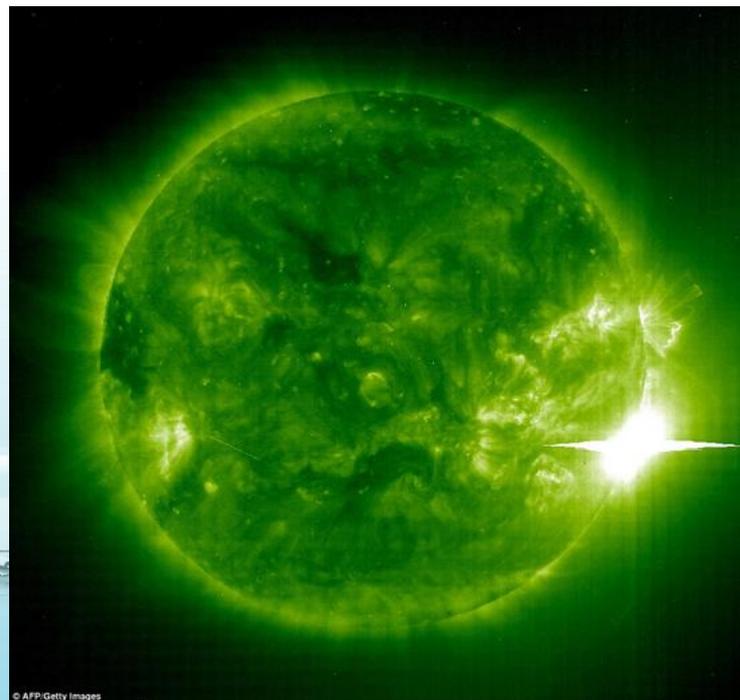


西汉 《周易》

日中有骏鸟

东汉 《汉书—五行志》

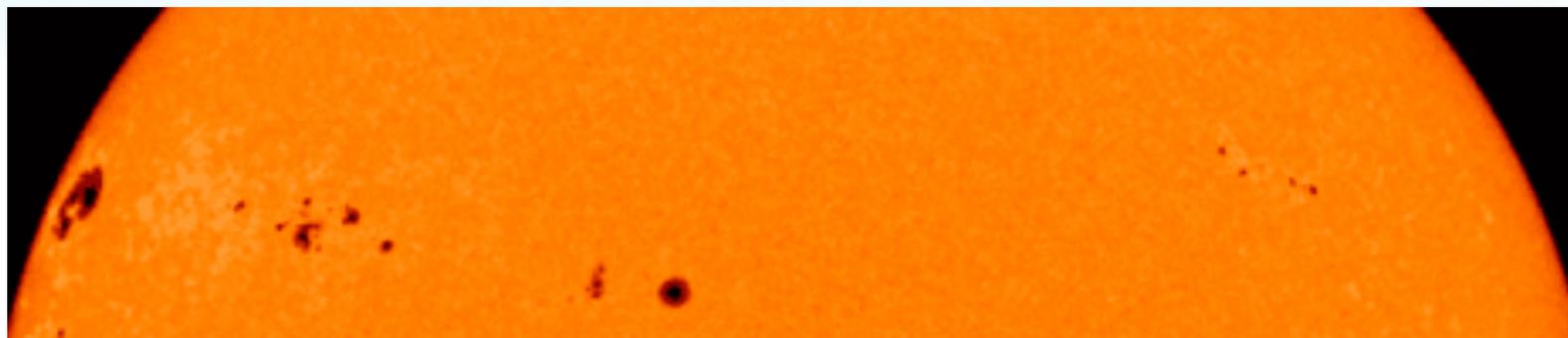
三月乙未，日出黄，有黑气，  
大如钱，居日中央



# 1 早期的电现象



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



所谓太阳黑子是太阳光球层上的黑暗区域，它的温度大约为 $4500^{\circ}\text{C}$ ，而光球其余部分的温度约为 $6000^{\circ}\text{C}$ 。在明亮的光球反衬下，就显得很黑。

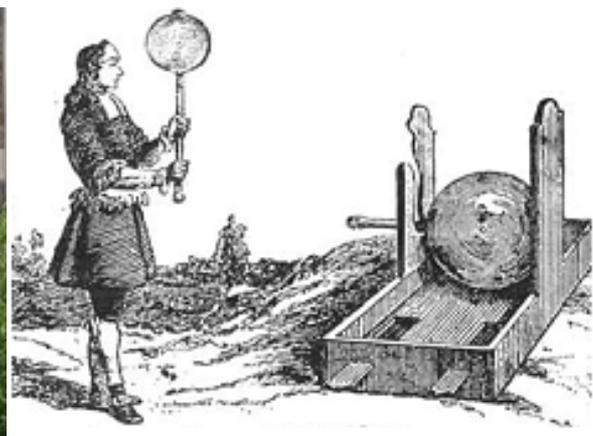
# 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## ——摩擦起电

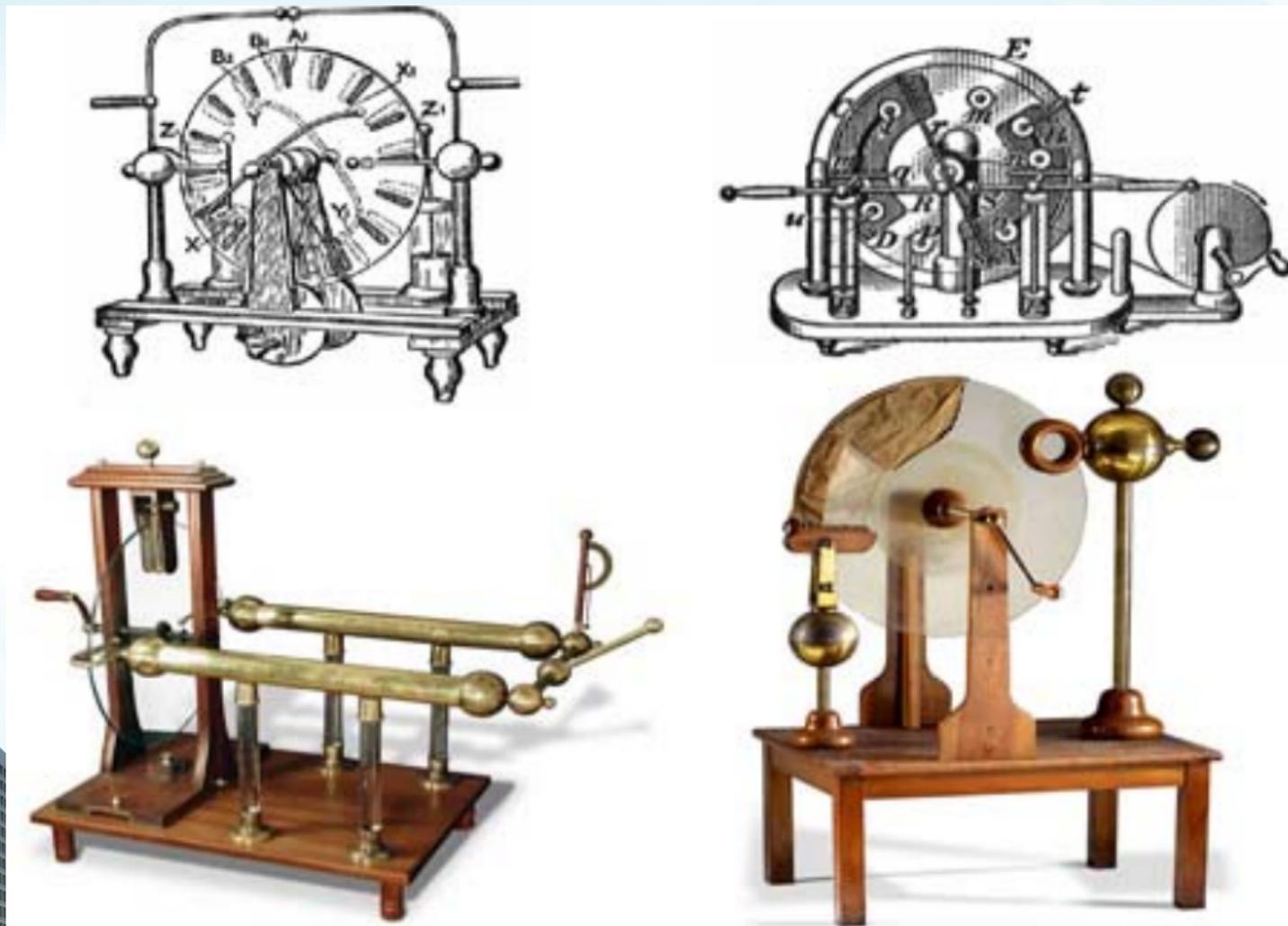
17世纪，盖里克(Guericke, 1602-1686)发现电的排斥现象，发明摩擦起电机。



## 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

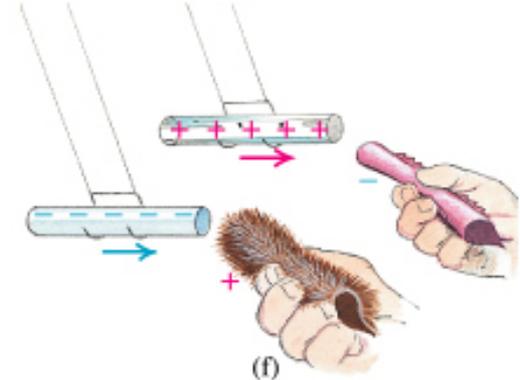
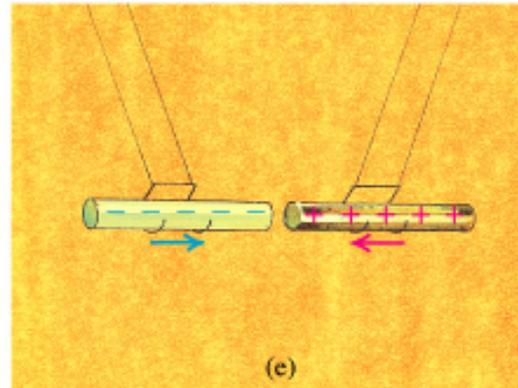
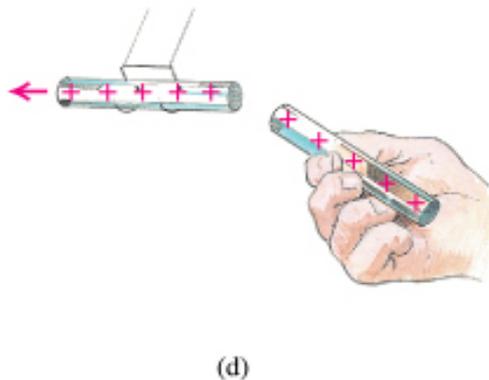
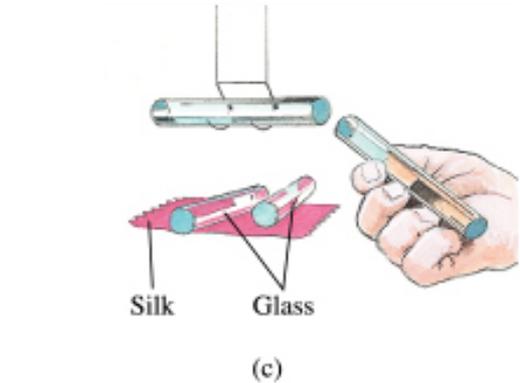
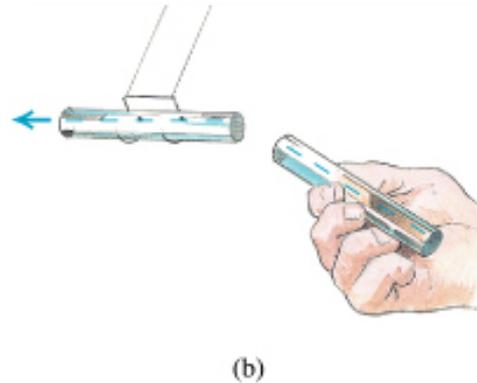
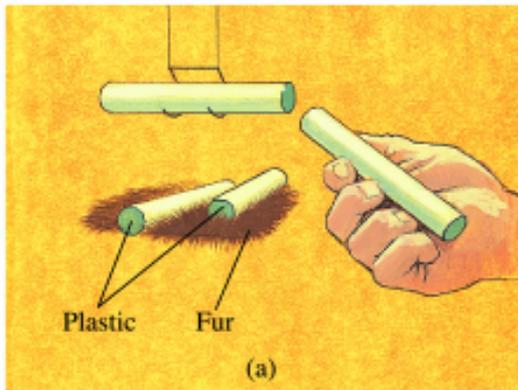
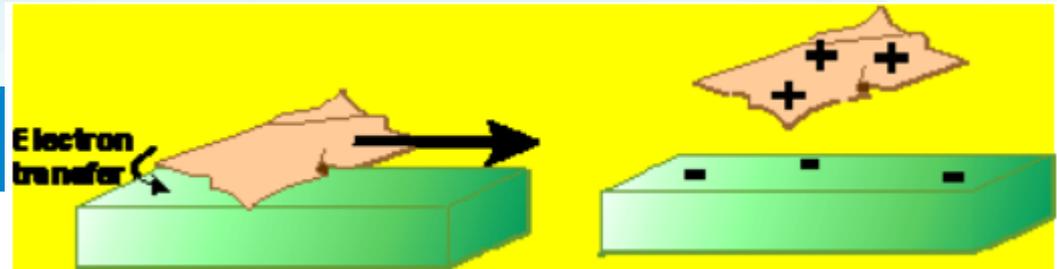


17世纪的静电产生器

# 2 近代的电学研究



## 摩擦起电示意图



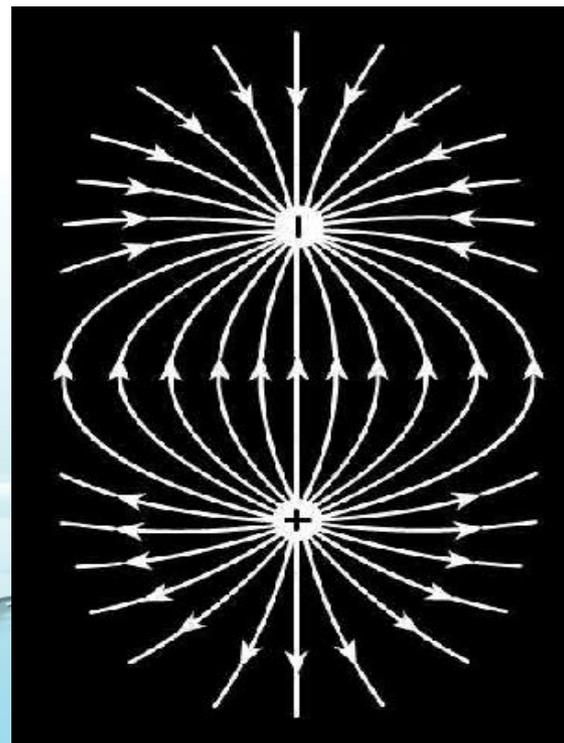
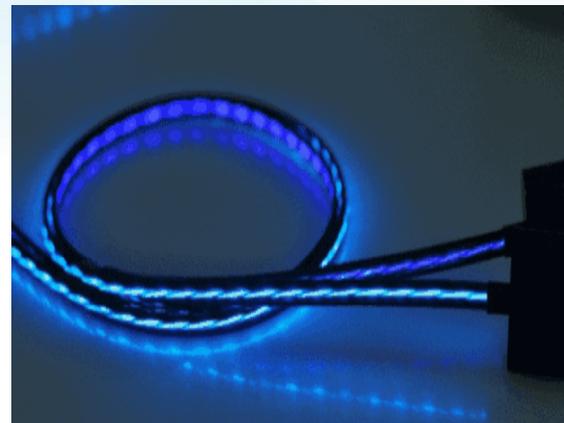
## 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

1729年，英国人格雷在《关于一些新电学实验的说明》中，提出了摩擦带电和感应带电，并有些物质可以传导电，有些则不能。主张带电体不能导电，而非电体却可以。他的实心木球和空心木球具有相同的电效应实验，使人们认为电是一种流体。

法国物理学家迪非在《论电》中，经过实验表明，带电体与非电体之间并无本质的区别，所有物体都可以带电。1734年，迪非发现两类不同的电荷，一种称为玻璃电，一类称为树脂电。他实际上发现了正负电荷，但命名不确切。并提出二元电液理论。



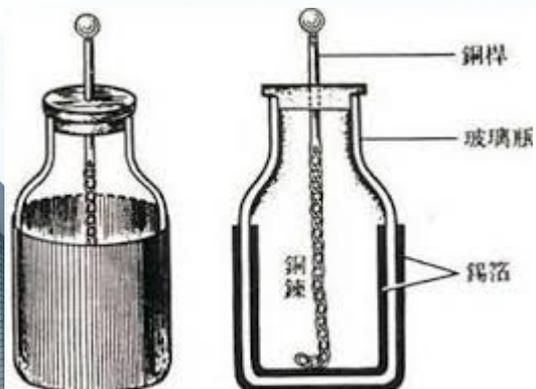
# 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## ——莱顿瓶

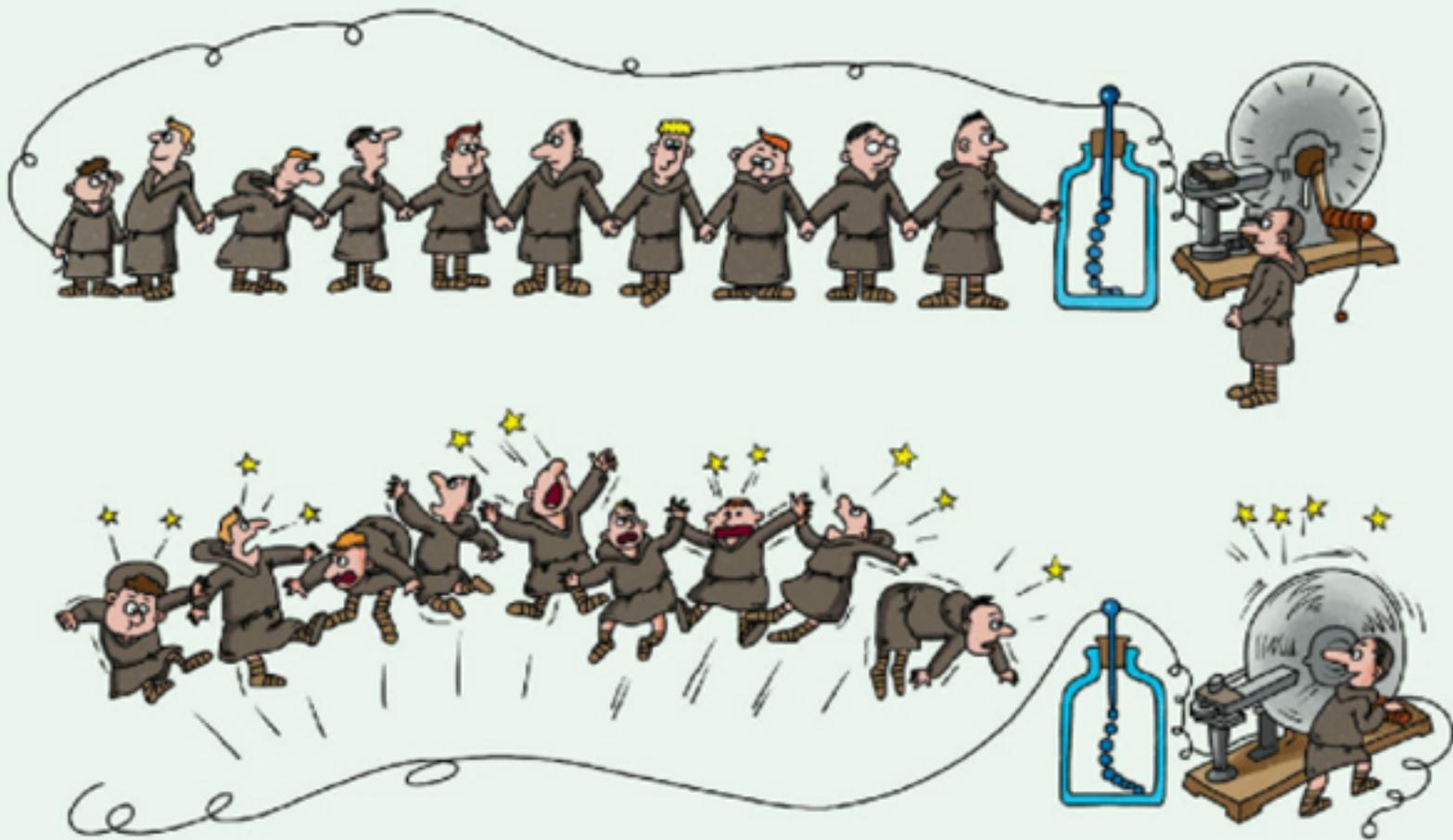
1745年，荷兰莱顿大学的物理学教授马森布罗克（1692—1761）发现玻璃瓶可以储存大量电荷。此瓶被称为莱顿瓶。



# 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



## 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

1746年4月春光明媚的一天、巴黎的市民穿红戴绿、扶老携幼，从四面八方方向“巴黎圣母院”教堂前的广场赶去，去观看一场神奇的科学表演。

下午3时，教堂正门台阶上临时搭起的观礼台上，坐满了达官显贵和皇室人员，法国国王路易十五的皇室成员看的700人。巴黎实验物理学校教师诺雷让700名修道士手拉手地围成一个直径约270米的半圆圈，他走到圆圈的中心，将一只银光闪闪的玻璃瓶高高举起，大声说：“这瓶子就是这几个月来人们热衷于议论的莱顿瓶，现在我将使各位大人亲眼目睹它的神威。”接着，他令助手拿来摩擦起电机，手摇把柄，向莱顿瓶充电。然后，他让排头的修道士手捧玻璃瓶，再令排尾的修道士用手去握住莱顿瓶中央金属棒引出的导线，就在修道士握住这导线的瞬间，蓦然一声“噼啪”响，700多名修道士同时像触电一样，跳了起来，一个个吓得面如土色。这一触目惊心的场面，使所有的观众都惊得目瞪口呆：小小的玻璃瓶，哪来这么巨大的威力，真是不可思议！

**“这威力并不是来自瓶子，而是这莱顿瓶里储藏的电。电将是未来世界的主宰。”**

# 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## ——费城实验



## 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

富兰克林在1752年7月，与他的儿子一起在美国费城做了一个震撼世界的“电风筝实验”。风筝是用杉树枝作骨架，扎成菱形，蒙上一层不易湿透的绸子，风筝的上端装了一根1英尺长的尖铁丝，将它与牵风筝的亚麻线系在一起，亚麻线的下端接在一段不长的丝绳上，以便将风筝拉住，丝绳末端拴了一把金属钥匙。实验那天，费城雷雨交加，当风筝上面飘浮着带雷电的云时，尖铁丝立即从云中取得了“电火”。他发现与丝绳连在一起的亚麻线上有几处散开的纤维直竖了起来，且能被手指吸引。他用食指靠近钥匙圈，骤然间，一些电火花从他食指上闪过，与摩擦生电时发生的电火花没有两样。他大叫道：“电，天电捕捉到了！”

富兰克林也因这项成就，而在1753年11月荣获了伦敦皇家学会颁发的科普勒金质奖章。

## 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

**科普利奖**由英国皇家学会所颁发，是世界上历史最悠久的科学奖项。1731年以皇家学会的高级会员戈弗里·科普利爵士的遗赠设立。

获奖者中多是世界著名的学者。第一枚科普利奖章获得者是电学研究的先驱S.格雷。现代获奖者中有不少是诺贝尔奖获得者。

获奖者包括卡文迪许、法拉第、欧姆、汤姆孙、爱因斯坦、普朗克、玻尔、狄拉克、霍金等优秀的科学家。



## 2 近代的电学研究



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

### 富兰克林（1706—1790）

- 美国科学家、发明家、政治家、社会慈善家
- 首先定义正电、负电
- 单流体说
- 电荷守恒原理
- 费城风筝实验
- 连结天电和地电
- 发明避雷针



# 3 电子的发现



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 洛伦兹是**经典电子论**的创立者。他认为电具有“原子性”，电的本身是由微小的实体组成的。后来这些微小实体被称为**电子**。
- 洛伦兹以电子概念为基础来解释物质的电性质。从电子论推导出运动电荷在磁场中要受到力的作用，即**洛伦兹力**。
- 他把物体的发光解释为原子内部电子的振动产生的。**1896年10月**，洛伦兹的学生塞曼通过实验证实了洛伦兹的预言。塞曼和洛伦兹共同获得**1902年诺贝尔物理学奖**。

洛伦兹(1853—1928)  
荷兰物理学家、数学家

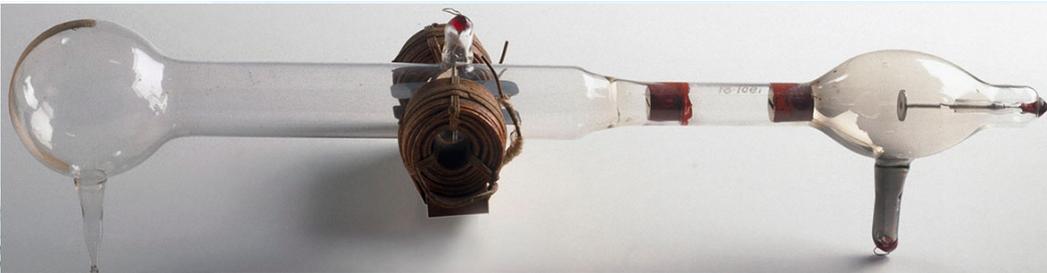


# 3 电子的发现



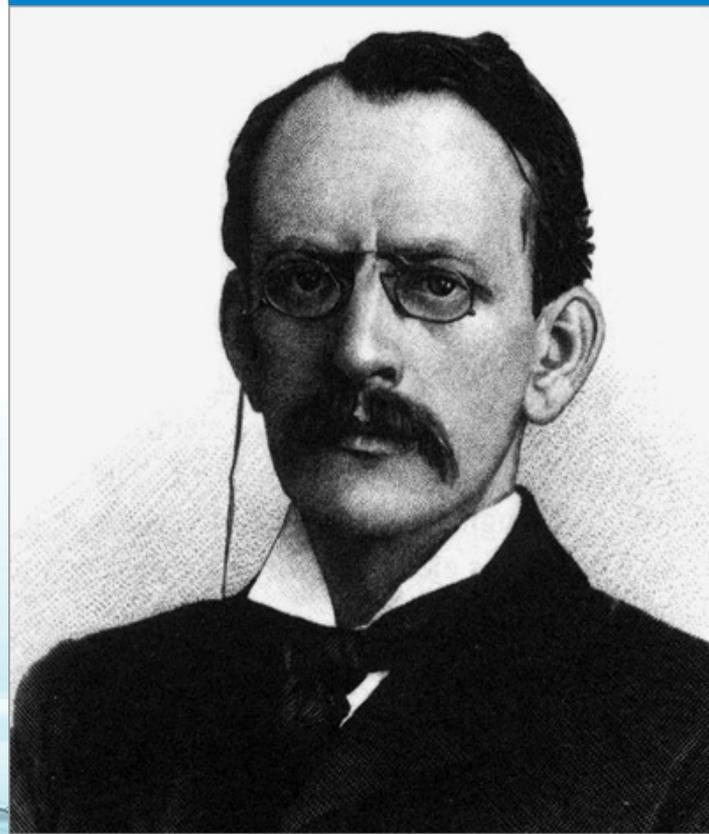
中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 卡文迪许研究所所长。
- 通过研究阴极射线在磁场和电场中的偏转，从实验上发现了电子的存在。
- 提出了原子模型，把原子看成是一个带正电的球，电子在球内运动。
- 1906年因在气体导电研究方面的成就获得了诺贝尔物理学奖。



汤姆孙(1856—1940)

英国物理学家



# 3 电子的发现



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 卡文迪许实验室

卡文迪许实验室作为剑桥大学物理科学院的一个系，从1904年至1989年的85年间一共产生了29位诺贝尔奖得主，占剑桥大学诺奖总数的三分之一。若将其视为一所大学，则其获奖人数可列全球第20位，与斯坦福大学并列。其科研效率之惊人，成果之丰硕，举世无双。在鼎盛时期甚至获誉“全世界二分之一的物理学发现都来自卡文迪许实验室。”



# 3 电子的发现



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 1896年-1921年间，密立根在世界上顶级学府芝加哥大学进行了一系列测定电子电荷以及光电效应的卓越工作，包括著名的油滴实验，因而获得1923年诺贝尔物理学奖。
- 之后物理学家测定的基本电荷数值不断增大，每次只增大一点点。费曼认为这是由于后来的物理学家在测定基本电荷时，如果获得的数值比密立根的数值高得多，就只保留那些比较接近密立根数值的数据。看来干修饰数据勾当的物理学家还不在少数。

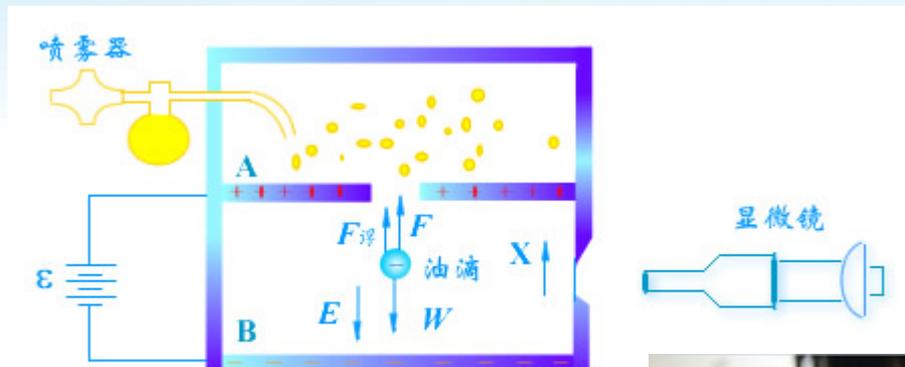
密立根(1868—1953)  
美国实验物理学家



# 3 电子的发现



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



密立根油滴实验

中学物理实验室



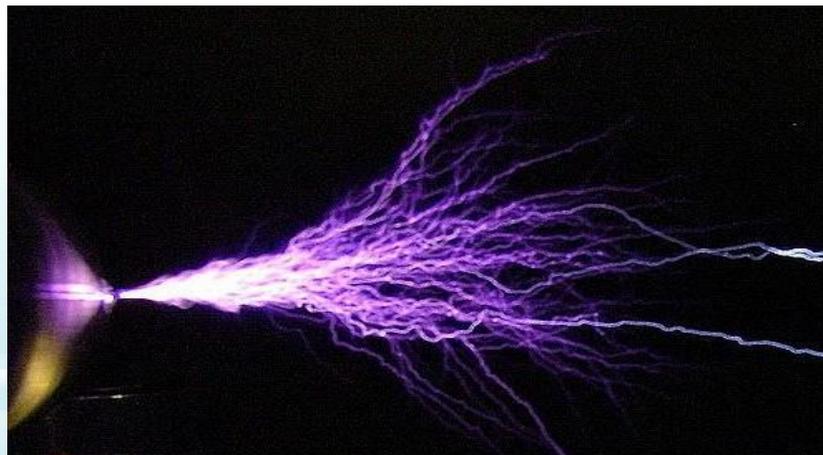
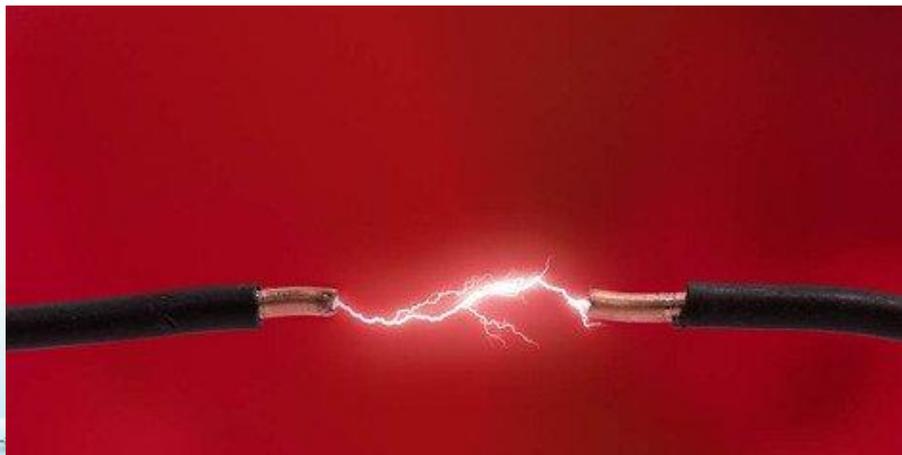
# 3 电子的发现



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 全球电气化 电子科技时代

法拉第发现电磁感应现象后，英国皇家研究所举办成果展览，英国财政大臣也来参观，看到助手们表演火花放电以娱乐伦敦民众，不太高兴，便问法拉第：你花了政府这么多钱，就为了表演？**法拉第冷冷地回答了四个字：You will tax it。**



# 3 电子的发现



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

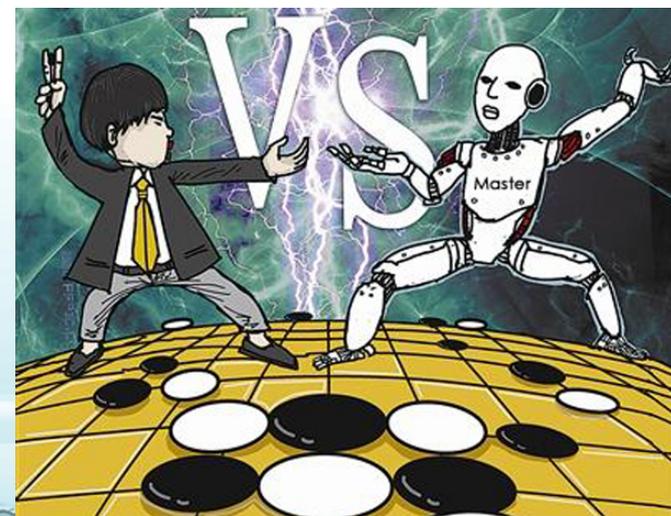
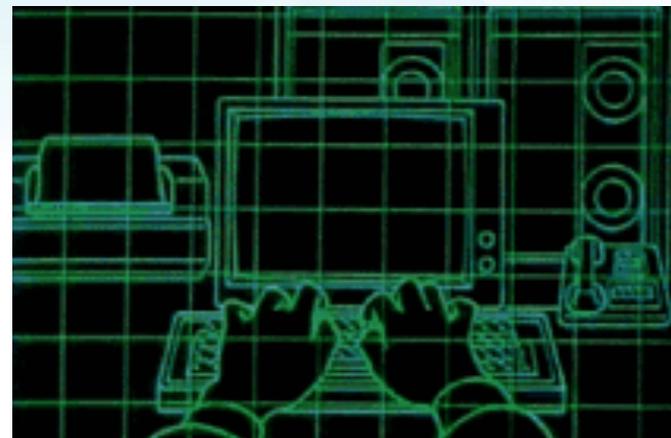
## 计算机的发展

- 电子管数字机（1946—1958年）
- 晶体管数字机（1958—1964年）
- 集成电路数字机（1964—1970年）
- 大规模集成电路机（1970年至今）

➤ 量子计算机

➤ 人工智能

2016年12月29日晚起到2017年1月4日晚，AlphaGo在弈城围棋网和野狐围棋网以Master为注册名，依次对战数十位人类顶尖高手，取得60胜0负的辉煌战绩。



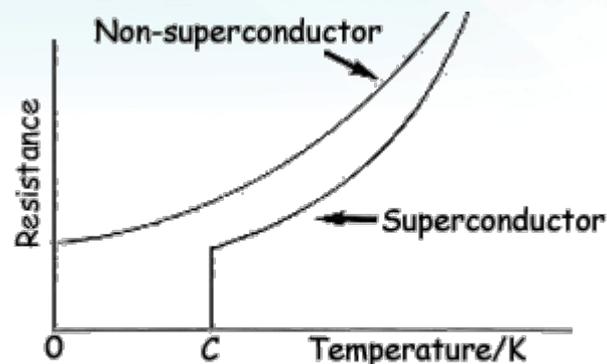
# 3 电子的发现



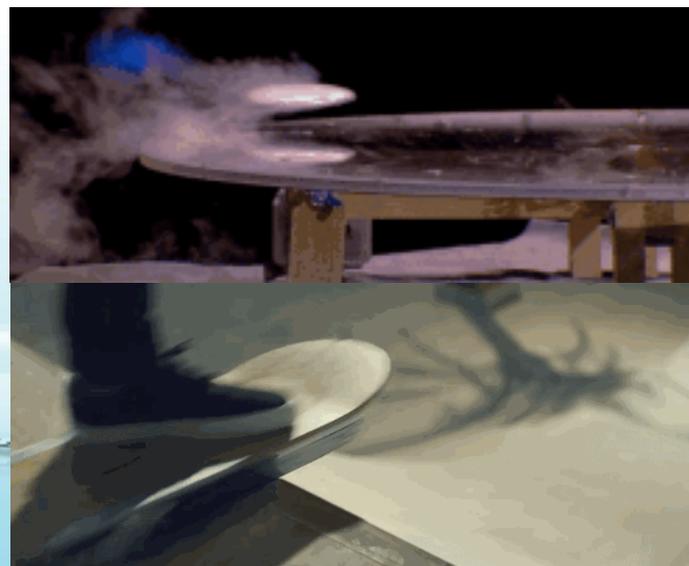
中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 超导材料

- 超导：当温度降温到一定程度，金属的电阻会突然消失变为零。
- 高温超导体：通常指临界温度高于液氮温度（77K）的超导体。
- 1911年，荷兰科学家卡末林—昂内斯用液氮冷却汞，当温度下降到4.2K（-268.95℃）时，汞的电阻完全消失，卡末林将这种现象称为超导电性。卡末林因此获得1913年诺贝尔奖。



C = critical temperature



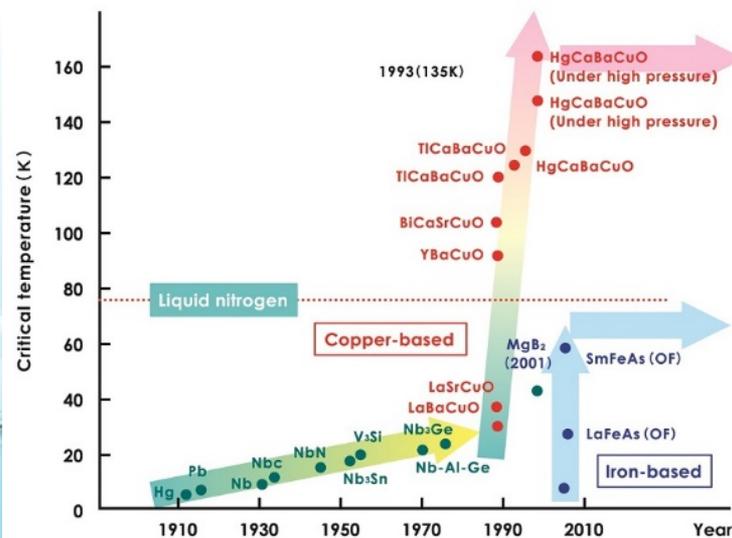
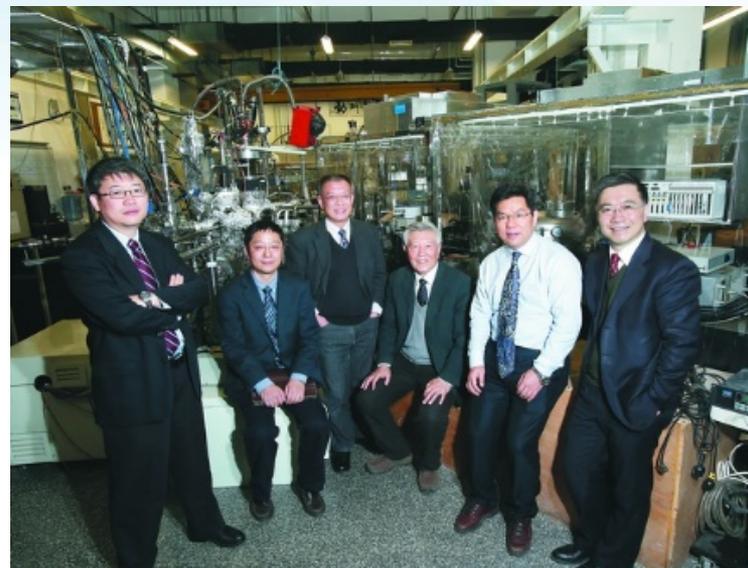
# 3 电子的发现



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 超导材料

- 2013年中国科学技术大学和中科院物理所的“40K以上铁基高温超导体的发现及若干基本物理性质研究”问鼎**国家自然科学一等奖**。
- 其主要贡献者赵忠贤和陈仙辉均为中科大校友。
- 国家自然科学一等奖是中国自然科学领域的最高奖项，由于该奖项的评选严格性，在历史上多次空缺（90年代以来共空缺12次）。

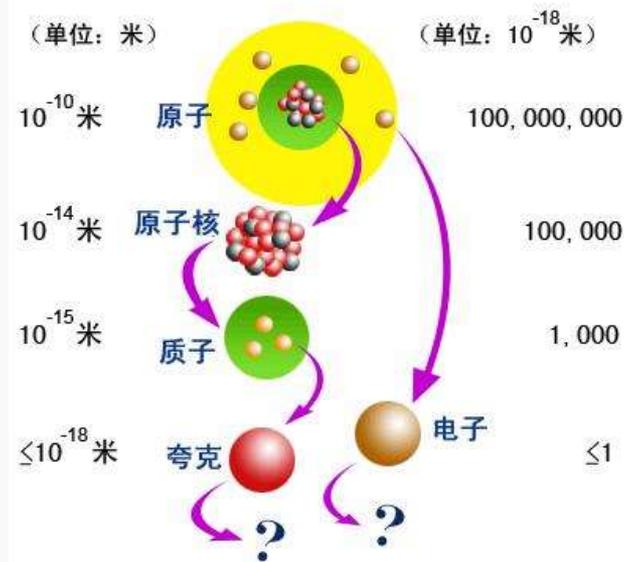


# 4 电子的性质

## (1) 元电荷

电子是点电荷？

- 实验证实，电子的电荷集中在半径小于  $10^{-18}$  m 的小体积内。因此，电子被当成是一个无内部结构而有有限质量和电荷的“点”
- 通过高能电子束散射实验测出的质子和中子内部的电荷分布。质子中只有正电荷，都集中在半径约为  $10^{-15}$  m 的体积内。中子内部也有电荷，靠近中心为正电荷，靠外为负电荷；正负电荷电量相等，所以对外不显带电。



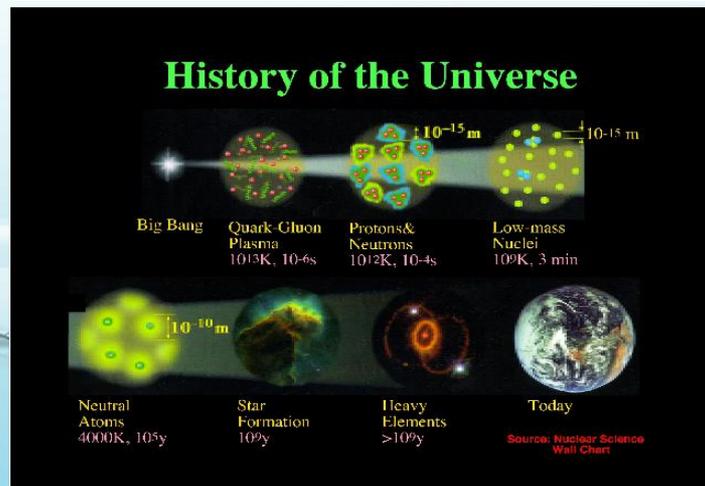
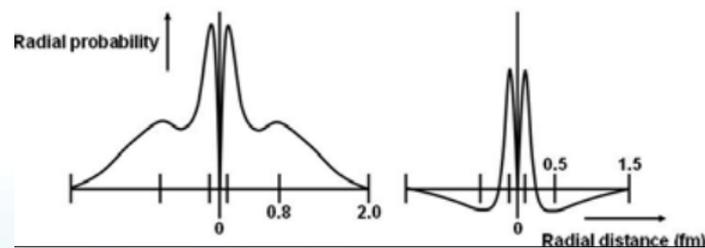
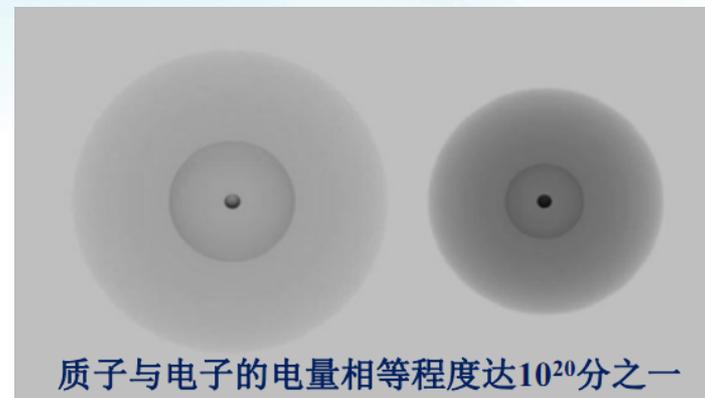
QUARKS	<b>UP</b> mass 2,3 MeV/c <sup>2</sup> charge 2/3 spin 1/2 u	<b>CHARM</b> 1,275 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 c	<b>TOP</b> 173,07 GeV/c <sup>2</sup> 2/3 1/2 t	<b>GLUON</b> 0 0 0 1 g	<b>HIGGS BOSON</b> 126 GeV/c <sup>2</sup> 0 0 H
	<b>DOWN</b> 4,8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 d	<b>STRANGE</b> 95 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 s	<b>BOTTOM</b> 4,18 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 b	<b>PHOTON</b> 0 0 0 1 γ	<b>GAUGE BOSONS</b>
	<b>ELECTRON</b> 0,511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 e	<b>MUON</b> 105,7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 μ	<b>TAU</b> 1,777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 τ	<b>Z BOSON</b> 91,2 GeV/c <sup>2</sup> 0 0 1 Z	
<b>ELECTRON NEUTRINO</b> <2,2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>e</sub>	<b>MUON NEUTRINO</b> <0,17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>μ</sub>	<b>TAU NEUTRINO</b> <15,5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>τ</sub>	<b>W BOSON</b> 80,4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 W		

# 4 电子的性质



电子电量与质子电量精确相同，这对于宇宙存在的形式是十分重要的

- 不难设想，如果两者稍有差别，虽然也可以形成稳定的“原子”与“分子”，但却是非电中性的。由于电力比引力大37个量级，其间的电斥力将超过引力，从而不可能形成星体，各种生命和人类也就失去了赖以形成的基础。
- 另外，还应指出，由于质子质量比电子质量大千余倍，使原子中的原子核几乎不动，这才得以形成各种有序结构的物质和高度有序的生物。如果质子质量与电子质量相差无几，则各种有序物质与生物都将不复存在。
- 由此可见，这些基本物理常量以及其间的关系，正是宇宙能以当今形式生存发展的根据，或者，也可以反过来说，基本物理常量以及其间的关系，正是宇宙基本特征的描绘与反映。



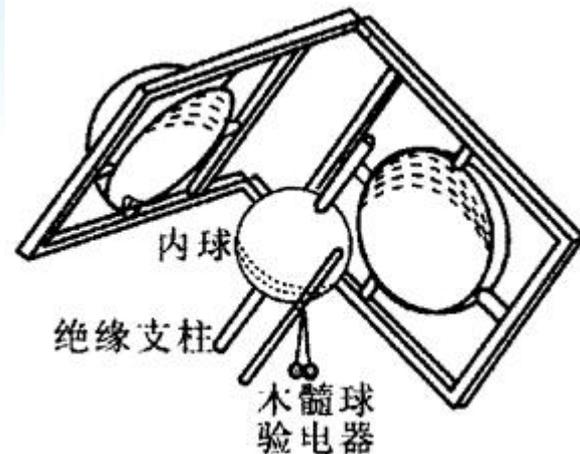
# 4 电子的性质



## (2) 平方反比力

1767年，普里斯特利对此提出了一个猜测：“难道我们就不可以认为电的吸引力遵从与万有引力相同的规律吗？”但是，普里斯特利仅仅停留在猜测上，而没有作深入一步的研究。

著名的英国科学家卡文迪许在1777年提出了与普里斯特利相同的推测。但是他的进一步成果没有公开发表，直到他去世后1879年才由著名的物理学家麦克斯韦整理出版了他生前的手稿，其中记述了平方反比定律。



$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



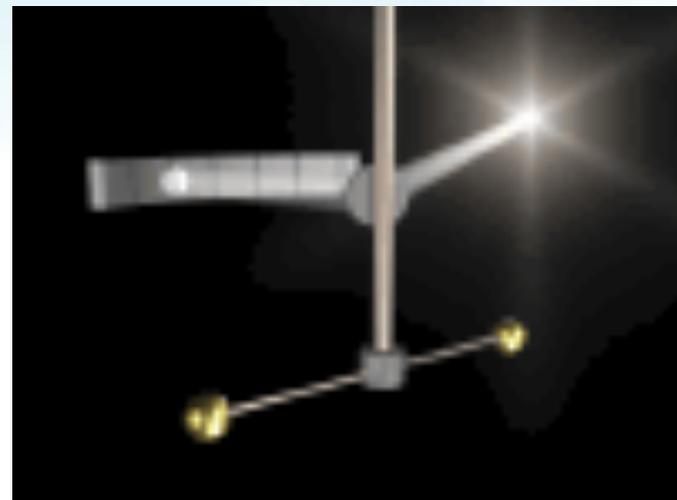
# 4 电子的性质



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 库仑的扭秤实验

- 库仑早年是一名军事工程师，督造着若干年的防御工事，也许正是这一工作，使他对科学产生了兴趣，开始对扭力进行系统的研究。1781年，由于有关扭力的论文，他当选为法国科学院院士。在1784年送交科学院的一篇论文中，他通过实验确立了决定金属丝的扭力定律，发现这种扭力正比手扭转角度，并指出这种扭力可用来测量  $6.48 \times 10^{-6}$  克重这样小的力。
- 1785年，库仑自行设计制作了一台精确的扭秤，测量了电荷之间的相互作用力与其距离的关系，于1788年建立了库仑定律。

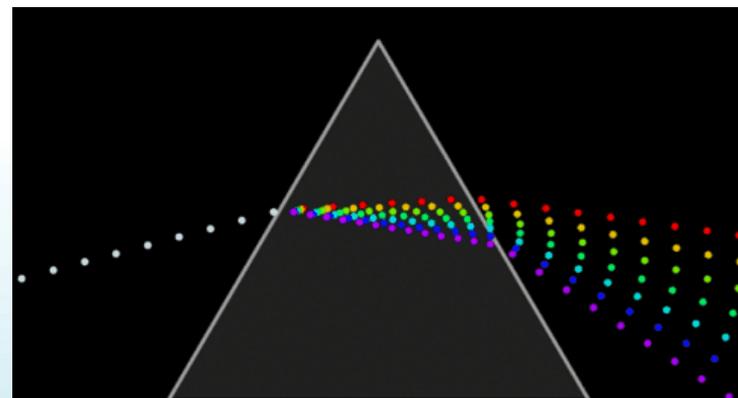
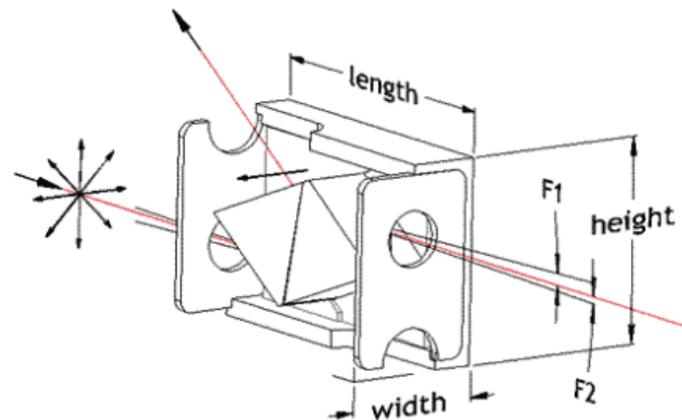


# 4 电子的性质



## “平方反比”的重要性

- 如果“平方反比”不成立
- ✓ 电动力学的规范不变性被破坏，使电动力学的一些基本性质失去了依据；
- ✓ 光子偏振态不再是2而是3，这将影响光学；
- ✓ 黑体辐射公式要修改；会出现真空色散，即不同频率的光波在真空中的传播速度不同，从而破坏光速不变；
- ✓ 总之，“后果”是很严重的。
- 电力平方反比律与光子静止质量是否为零有密切的关系。
- ✓ 迄今为止，用天体物理的磁压法得出的光子静止质量  $< 10^{-60}$  克，但它是否严格为零仍引起广泛的关注。

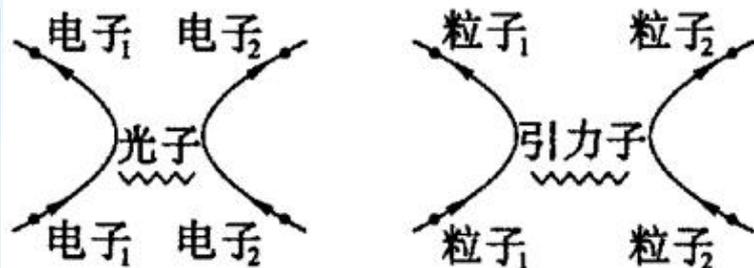


# 4 电子的性质

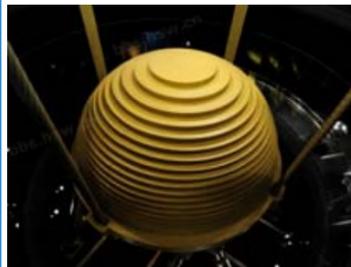


## 库仑力与万有引力的比较

- 电力与距离平方成反比是物理学中**最精确**的实验定律之一；而引力与距离平方成反比的关系却并不精确。
- 电磁力在这里即为电力和万有引力一样是自然界的两种基本力，也是宇宙宏观世界的两种基本力。它们都是长程力，**它们决定者我们宏观宇宙存在的形式。**
- 万有引力是四大力中作用强度最弱的力，与电磁力相比，**仅为电磁力 $10^{-37}$ 。**
- 质量只有一种，其间总是彼此吸引；电荷则有正和负两种。
- ✓ 如果负质量存在，粒子的加速将不受限制！



引力无法屏蔽！



电力可以屏蔽！

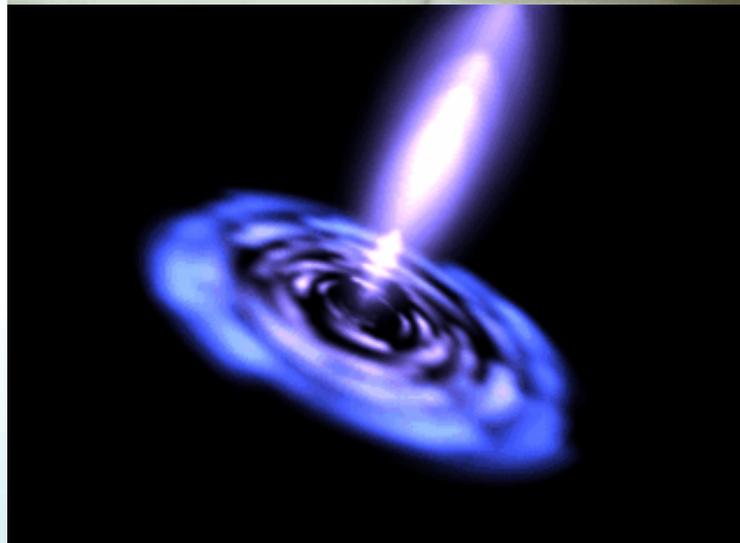
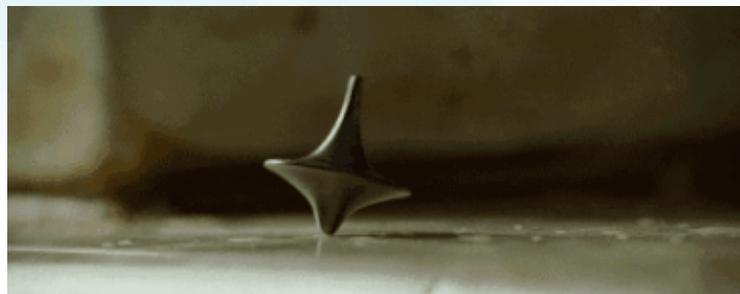


# 4 电子的性质



## (3) 神奇的自旋

- 自旋：电子的基本性质之一，电子的**内禀运动**。
- 电子自旋是**量子效应**，不能作经典的理解，如果把电子自旋看成绕轴的旋转，则得出与相对论矛盾的结果。
- ✓ 电子边缘速度超过光速！
- 电子自旋会产生磁效应，由此可以解释原子光谱的精细结构及反常塞曼效应。
- 质子、中子都有自旋。医疗中的**核磁共振**就利用了原子核的自旋。

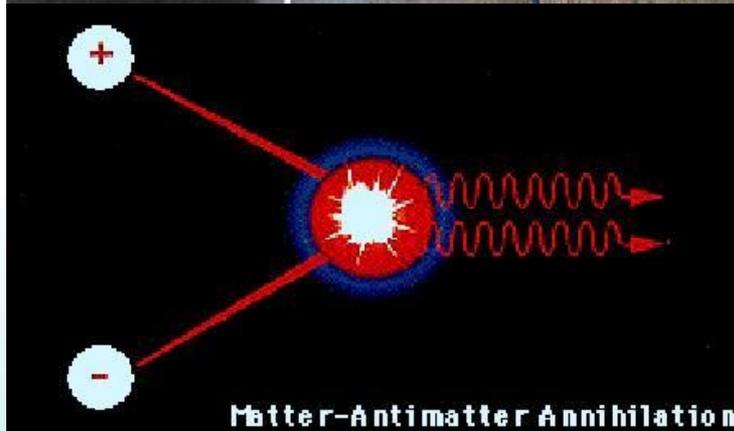
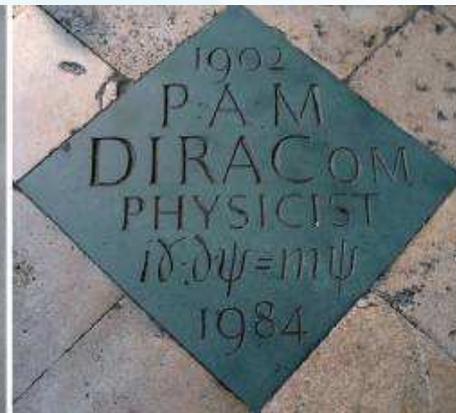


# 4 电子的性质



## (4) 反物质正电子

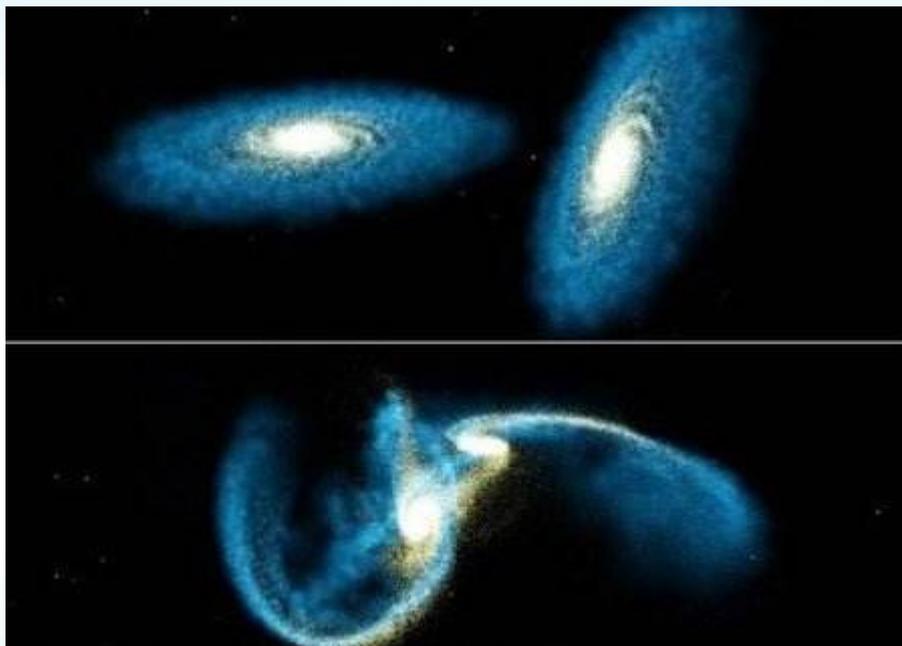
- 狄拉克把量子论和相对论结合在一起, 得到了一个描述电子运动的方程式, 并由此推导出反粒子的概念。
- 狄拉克大胆地预言一切粒子都存在其反粒子, 电子的反粒子就是正电子。这是第一次提出反物质的存在。
- 1932年, 安德森在宇宙射线进入Wilson云室时发现正电子。



# 4 电子的性质



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China



也许宇宙中还有一个反你，你遇到反你时，小心不要握手！



# 4 电子的性质



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 赵忠尧与诺贝尔奖擦肩而过

赵忠尧，1927年赴美国加州理工学院学习，从师于密立根教授。第一次发现了正电子的存在，他是人类物理学史上第一个发现反物质的科学家。他观测到的正、负电子湮灭辐射比后来安德逊看到的正电子径迹早两年。

赵忠尧先生是中国科学技术大学的缔造者之一，近代物理系首任系主任。



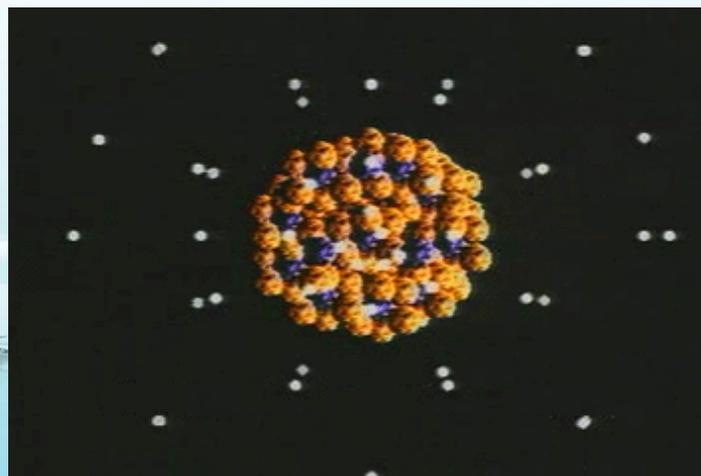
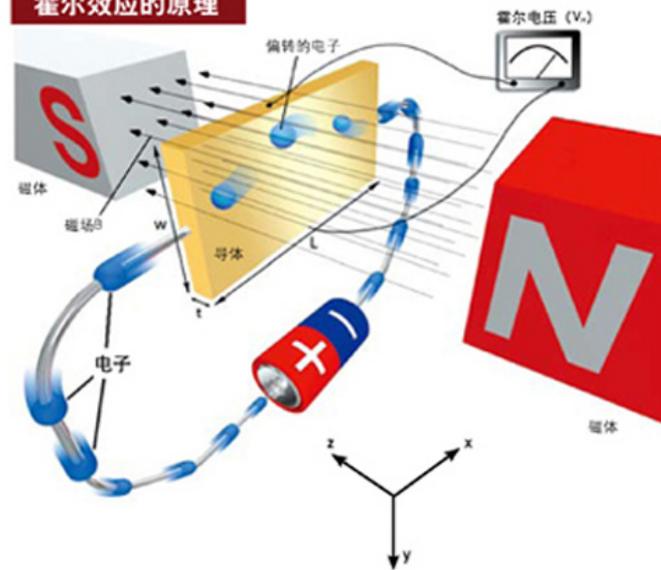
# 5 电子是粒子？



## 经典电磁理论遇到的困难

- 经典电磁理论认为电子是“粒子”
- ✓ 粒子的特点为：有确定的运动轨道和运动速度，在电磁场中运动受力由洛伦兹力公式给出
- ✓ 确实有大量实验证实了这个观点，例如注明的**霍尔效应**。
- 经典电磁理论无法解释**原子的稳定性**。
- ✓ 经典电磁理论认为电子绕原子核运动，变速运动的电子会向外辐射电磁波，损失能量，电子会“坠入”原子核中。

霍尔效应的原理

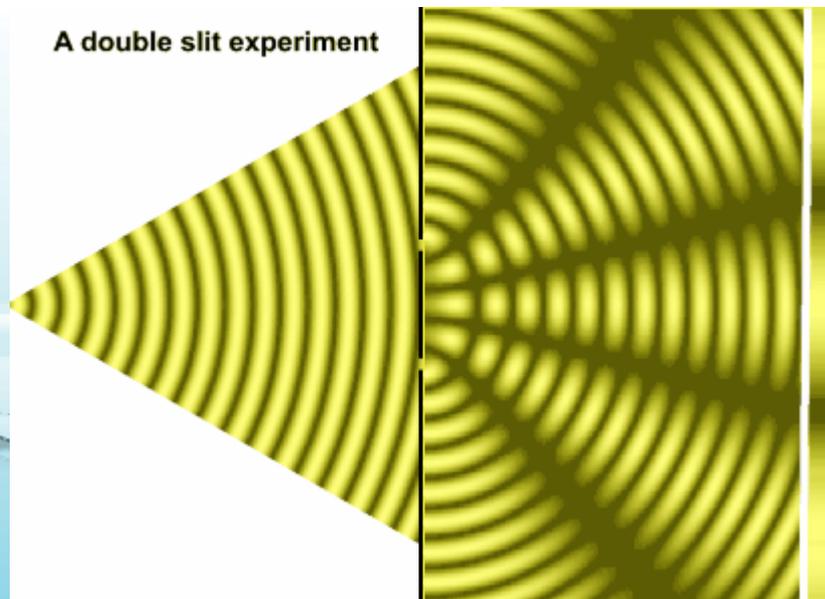
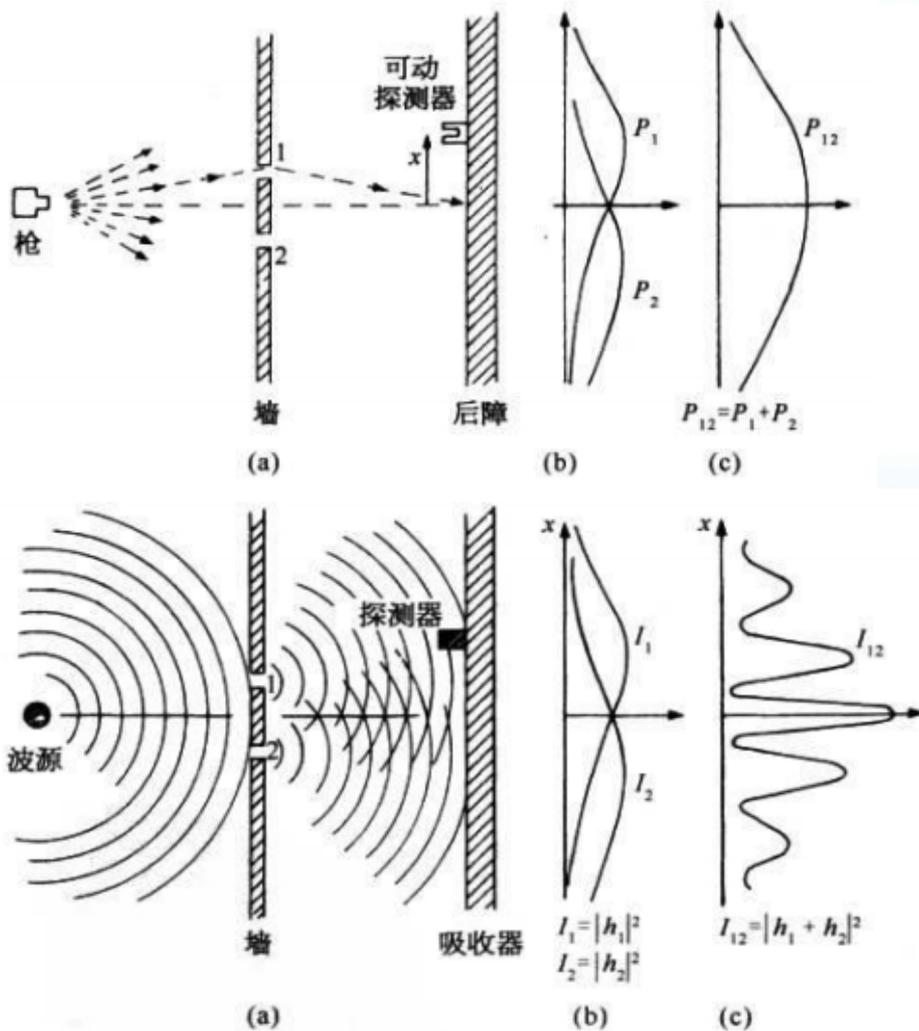


# 5 电子是粒子？



物理学家费恩曼(1918-1988) 对比了两个有趣的实验

如果发射器发射的是电子  
会发生什么??



# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

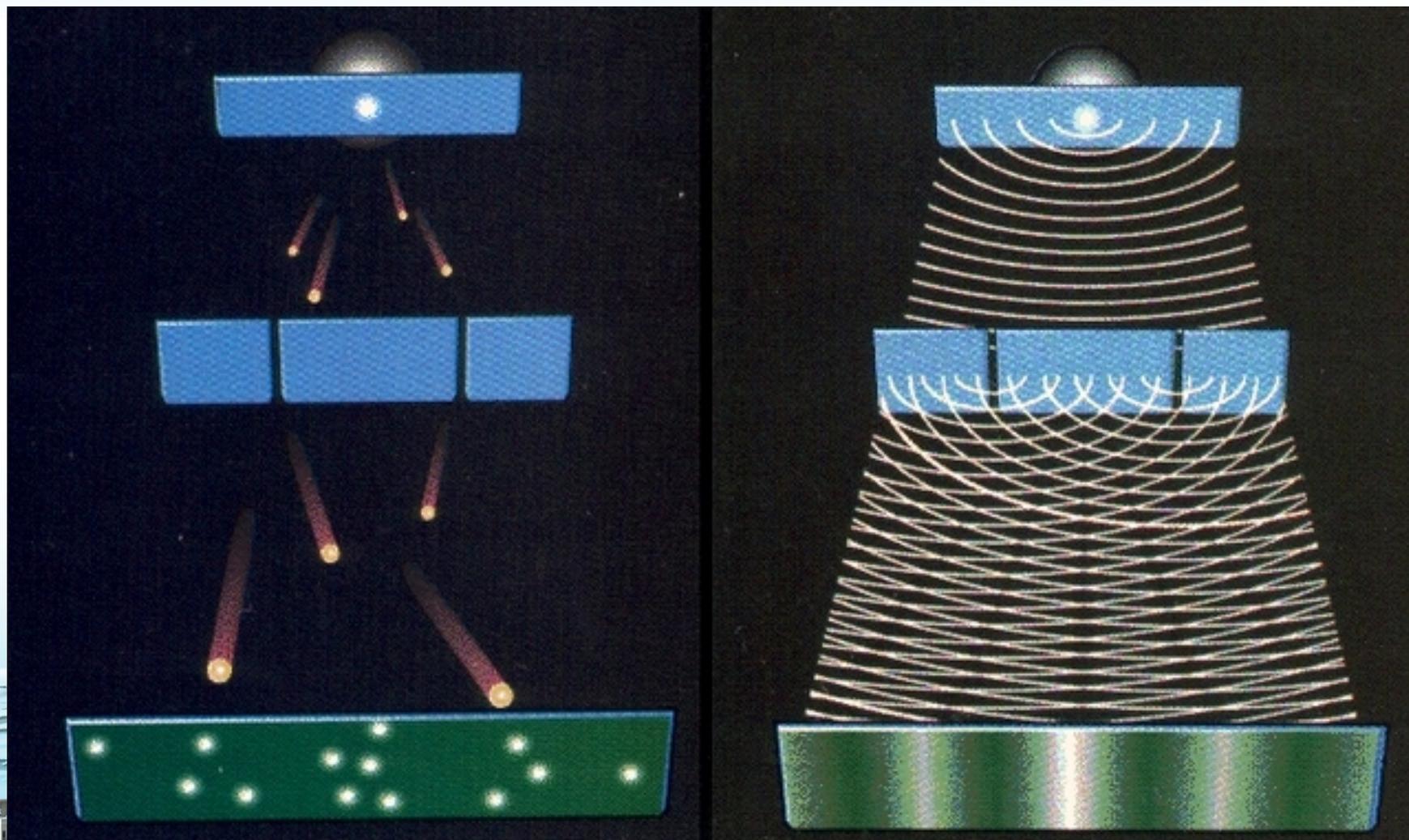


# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

电子竟然像水波一样！

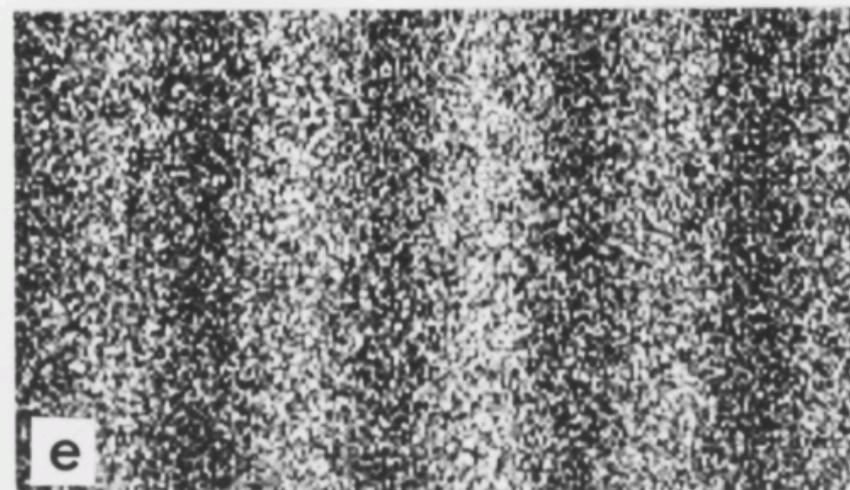
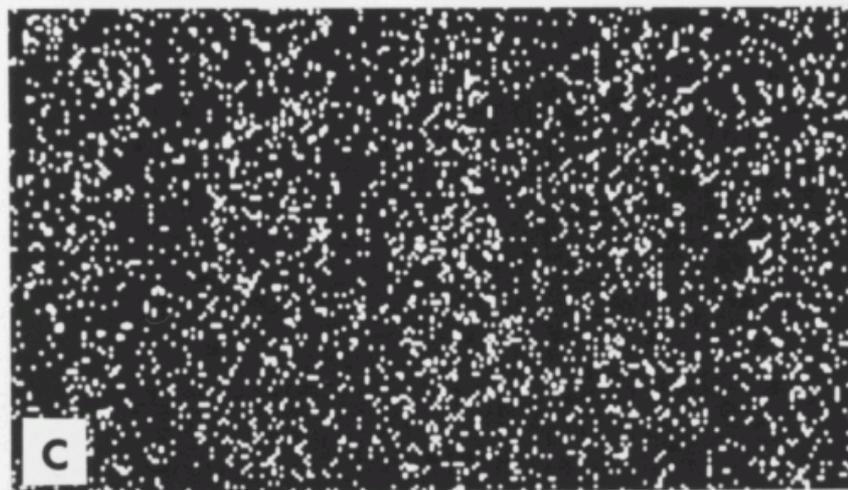
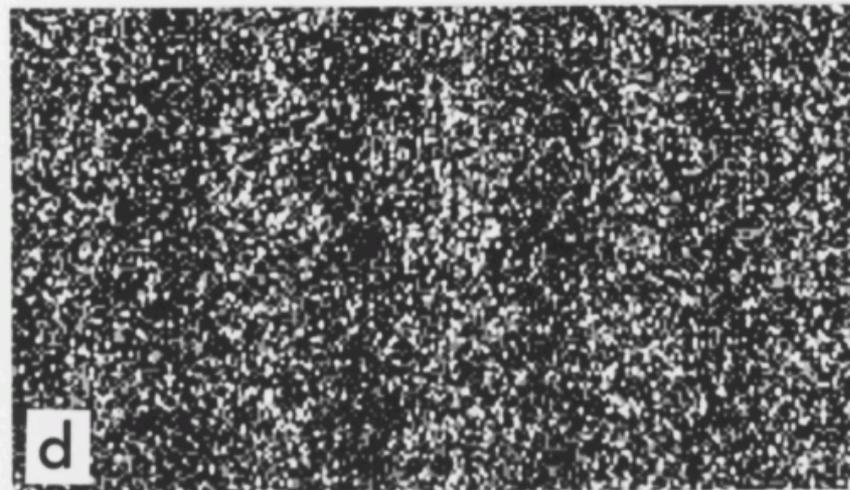


# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 实验数据展示：电子干涉

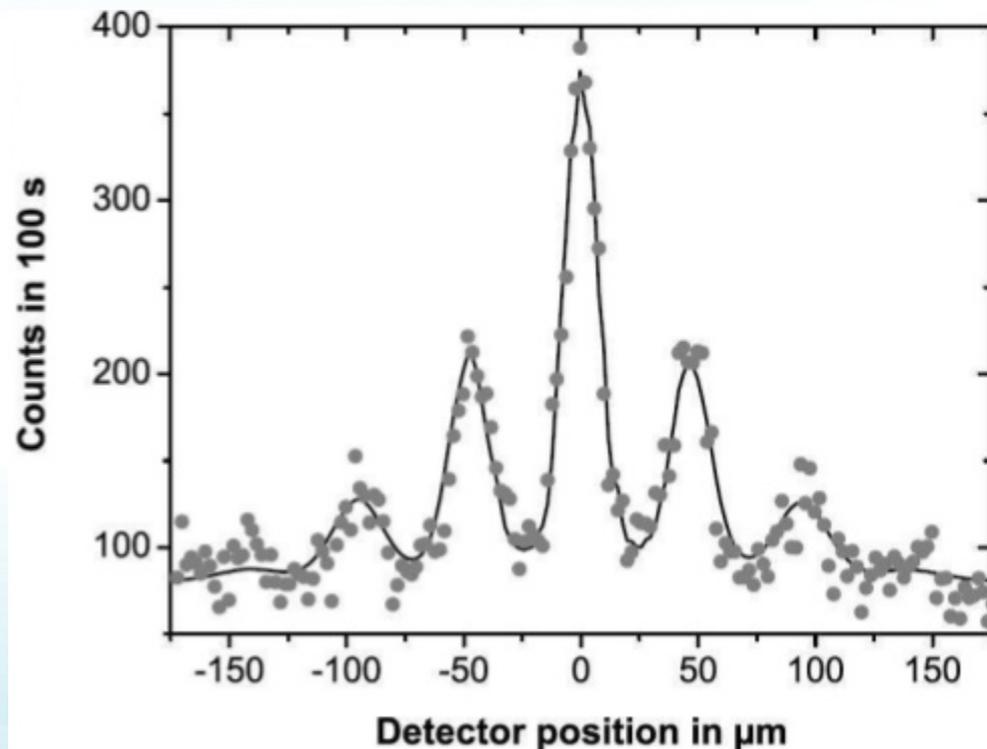


# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 实验数据展示：C60分子干涉



# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 波粒二象性

- 电子又像“粒子”又像“波”
- ✓ 这种性质称为电子的**波粒二象性**
- ✓ 电子有时候展示出粒子的一面，有时候展示出波的一面。好像一个爱哭又爱笑的小女孩。
- ✓ 电子到底是粒子还是波？
- 薛定谔的猫
  - ✓ “薛定谔的猫”是由奥地利物理学家薛定谔(1887-1961)于1935年提出的有关猫生死叠加的著名思想实验，是把微观领域的量子行为扩展到宏观世界的推演。



# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 量子物理的应用

- 在许多现代技术装备中，量子物理学的效应起了重要的作用。从**激光**、**电子显微镜**、**原子钟**到**核磁共振**的医学图像显示装置，都关键地依靠了量子力学的原理和效应。对半导体的研究导致了**二极管**和**三极管**的发明，最后为现代的**电子工业**铺平了道路。在**核武器**的发明过程中，量子力学的概念也起了一个关键的作用。
- 在上述这些发明创造中，量子力学的概念和数学描述，往往很少直接起了一个作用，而是**固体物理学**、**化学**、**材料科学**或者**核物理学**的概念和规则，起了主要作用，在所有这些学科中，量子力学均是其基础，这些学科的基本理论，全部是建立在量子力学之上的。



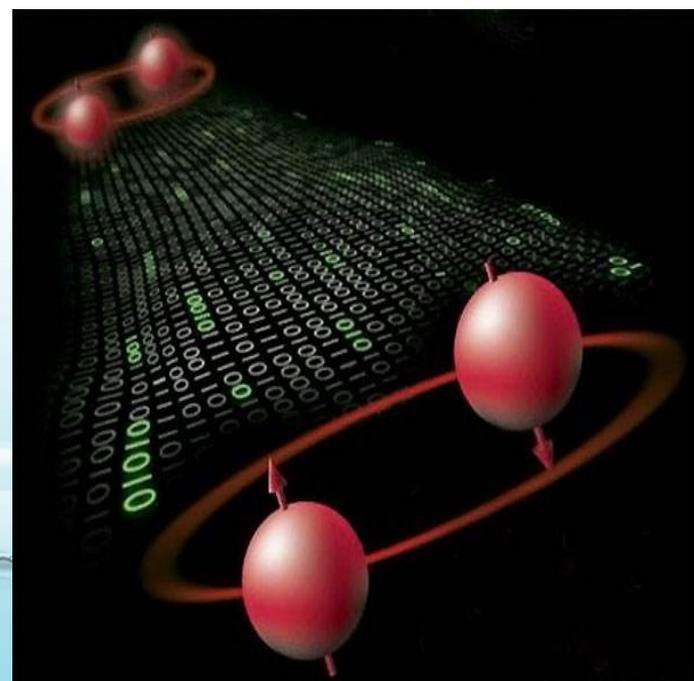
# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 量子信息

- 量子信息是量子物理与信息技术相结合发展起来的新学科，主要包括量子通信和量子计算两个领域。量子通信主要研究量子密码、量子隐形传态、远距离量子通信的技术等等；量子计算主要研究量子计算机和适合于量子计算机的量子算法。
- 中国科学技术大学潘建伟院士的“多光子纠缠及干涉度量”获2015年国家自然科学一等奖。这是继2013年铁基高温超导研究成果之后，中科大再次获此殊荣。



# 5 电子是粒子？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

## 量子卫星

2016年8月16日01时40分，由中国科学技术大学主导研制的世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”在酒泉卫星发射中心用长征二号丁运载火箭成功发射升空。“墨子号”是中科院空间科学先导专项中首批确定立项研制的4颗科学实验卫星之一，它的成功发射和在轨运行，不仅将助力于我国广域量子通信网络的构建，服务于国家信息安全，还将开展对量子力学基本问题的空间尺度实验检验，加深人类对量子力学自身的理解。



# 6 电子到底是什么？



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China





中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

谢谢!

