

气体探测器中的自淬灭流光放电

陈 昌

气体探测器是高能物理实验中广泛使用的探测器类型。自淬灭流光放电 (Self-Quenching Streamer Discharge) 是气体探测器中经常采用的模式(简称为 SQS-模式)。流光放电早在本世纪 40 年代前后,就有实验和理论研究。但到 70 年代后才发现自淬灭流光放电,并在高能物理实验领域受到广泛重视。20 余年来,世界上各个高能物理实验室纷纷投入相当大的力量开展这方面的研究工作,使得 SQS-模式的气体探测器在高能物理实验中发挥了很大作用。但由于 SQS-放电现象的复杂性,至今这方面的实验和理论研究仍在不间断地继续进行中。

一、SQS-模式的发现和特征

当快速的带电粒子通过气体介质时,入射带电粒子的电磁场与气体介质原子的轨道电子发生库仑相互作用。带电粒子传递的能量,引起介质原子电离或激发。

带电粒子与介质原子直接相互作用产生的电子-离子对,称为原初电离。原初电离的电子在外电场作用下向阳极运动,能进一步产生电离,称为次级电离。次级电离使电子数目倍增。当原初电离的电子在外电场作用下飞向阳极时,电子数目“雪崩”似地倍增,这种电子数目的倍增过程称为“电子雪崩”。电子在气体中两次碰撞之间所行进的平均距离称为电子的平均自由

程 λ 。在不同的气体中电子的平均自由程不同。

SQS-模式在实验上观察到之前,气体探测器中阳极上收集的电荷量 Q 和阳极与阴极之间的电位差 V 的关系如图 1 所示。由图可知当外加电压由低到高时气体探测器的放电模式依次为:正负离子复合区,电离室区,正比室区,有限正比区,盖革-米勒(G-M)区,最后到击穿放电。自从实验上观察到 SQS-模式以后,图 1 中画有斜线的区域就要作相应修正。对某一种确定的气体混合物成分,在有限正比区之后,是发展成为 G-M 模式还是 SQS-模式,取决于气体混合物的组分。

1970 年欧洲核子研究中心 (CERN) 恰帕克教授领导的实验组,在多丝正比室性能研究中,在一种特殊的混合气体,即所谓“幻异”气体(65.5% 氩 (Ar) 气 + 34% 异丁烷 (isobutane) + 0.46% 氟里昂 (Freon-13 B1) 中,在外加电场的高电压尚未达到击穿电压时,观察到气体倍增因子高达 10^7 , 并出现增益的饱和效应,即正比室输出脉冲高度分布与带电粒子和气体介质发生电离作用时损失能量多少无关。此后,在粗丝(丝直径 $100\mu\text{m}$)宽丝距的多丝正比室中,当有机淬灭气体成分的百分比减小(例如 90% 氩气 + 10% 异丁烷的气体混合物),在足够高的电压下,观察到正比室输出脉冲幅度很大(在 50Ω 负载上, $30-40\text{mV}$),并且出现从正比模式到被阻尼的盖革放电模式的转变。这种放电包围着阳极丝并沿着丝传播,但由于自淬灭性而只传播有限一段长度(10mm)。恰帕克等认为此现象是盖革放电不完全所致,因而称之为“有限盖革”放电。

此后,这种气体放电现象受到高能实验物理学界的普遍关注。人们认识到这种放电模式不可能是已知的气体探测器中的放电模式,也不可能是它们之中的中间模式。1977 年恰帕克等确立了这种放电现象的流光本质。他们观察到,这种过程产生的电荷重心距阳极丝很远,对这种距离,外加电场强度不足以使“电子雪崩”进一步发展。这表明在流光放电过程中的“雪崩”,是因光子传播的作用而从阳极丝向阴极发展。

随后前苏联的联合核子研究所的 G. Alekseev 等用这种放电过程的自淬灭流光本质的照片作出了直观的证明。1981 年美国费米实验室的 M. Atac 等,用象增强器获得了单次流光的细节照片,流光在很细($\sim 200\mu\text{m}$)的细丝状放电通道从阳极丝开始向着阴极传播,长度为几个毫米(见图 2)。

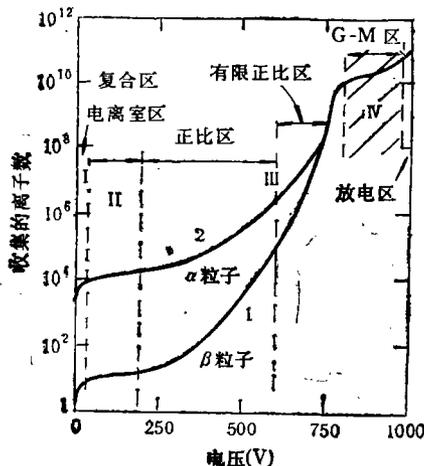


图 1 在 SQS-模式从实验上观察到以前,气体探测器阳极上收集的电荷量 Q 与外界电压 V 的关系。在 SQS-模式观察到以后,图中画有斜线的区域将有相应改变

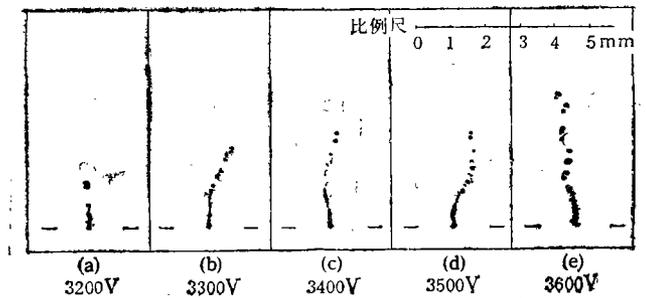


图2 在不同的外加高压电压值下,自淬灭流光放电的照片. 阳极丝位置示于照片两侧,比例尺示于图右上方.

自淬灭流光放电模式的基本特征是:

- (1) 输出信号幅度大(阳极上收集的电流 $\approx 0.2-4\text{mA}$),且信号幅度分布窄(FWHM $\sim 40\%$).
- (2) 输出脉冲宽度窄(在脉冲半高处宽度 $t_{1/2}$ \sim 几十纳秒至几百纳秒).
- (3) 在粒子通过气体室之后,阳极丝的一小部分被阻塞失效成为“死区”.“死区”($\xi \approx$ 阻塞区丝的长度 \times 阻塞时间)远远小于 G-M 模式.
- (4) 模式很稳定,存在计数率坪,且坪区很宽($\sim 10^3\text{V}$).
- (5) 从有限正比模式到 SQS-模式的输出电荷量有跃迁特性,跃迁时的电压称为跃迁电压 V_{tr} . 两种模式输出电荷量的差距称之为跃迁跨度.
- (6) 伴随电流脉冲输出同时有类似形状的光脉冲输出.

SQS-模式的发生跟诸多因素有关. 例如室内工作气体的组分、入射带电粒子的种类、室的结构、工作气体的压力大小等.

气体室的工作气体第一种成分通常是惰性气体,最常使用的是氩气. 第二种成分是淬灭气体,如有机气体 CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , $\text{iSOC}_2\text{H}_{10}$, 或 CO_2 等. 有时还加有少量第三种成分例如乙醇、氟里昂等. 研究结果发现,跃迁电压随淬灭气体的含量增加而增高. 除了在氩气加淬灭气体中观察到 SQS-模式外,在氦、氖、氪和氙等惰性气体加淬灭气体中也观察到 SQS-模式. 即使在纯淬灭气体 CO_2 中,在一定条件下也能观察到这一模式. 但必须指出的是,对某一种确定的气体混合物,只能观察到 SQS-模式或是 G-M 模式,它取决于气体混合物的组成.

不同的带电粒子产生不同的原初电离. 它们对应的 V_{tr} 不同,跃迁跨度也不同.

气体室的结构,尤其是粗阳极丝易产生 SQS-模式. 当阳极丝细到一定程度(如丝直径 $< 25\mu\text{m}$)时,便不能产生 SQS-模式.

此外,气体室内工作气体压力增高, SQS-模式的跃迁电压增高,流光长度减小.

二、SQS 放电机制的探索

迄今为止,对 SQS 放电机制的研究尽管有些唯象模型和理论计算,但仍无令人满意和为人们普遍接受的解释.

在本世纪 30—40 年代,由 Loeb、Meak、Raether 等提出的在均匀电场中火花击穿的古典流光理论,被广泛地应用于气体放电过程的分析. 这一理论认为,在次级雪崩形成中的光致电离以及原初雪崩的空间电荷,对流光形成的影响起决定性作用. 按照这个理论,在气体室中自淬灭流光放电形成的图象是:

入射带电粒子在气体室中形成的电子,在外加电场作用下漂向阳极丝. 在阳极丝附近电子处于很强的外电场中,因而开始猛烈的雪崩过程. 在这种原初雪崩发展的过程中,象 $\text{Ar}^+ + e^- \rightarrow \text{Ar}^* + h\nu$ 的过程就可能产生,氩的正离子(Ar^+)与电子复合发射出光子. 发射出的这些光子有些可能到达原初雪崩产生的空间电荷云的外部,并使气体分子电离而产生光电子. 这些光电子的一部分可以在正离子圆锥的尖端产生倍增,因为那里外电场是最强的. 而在圆锥的侧面由于电场弱而不能产生倍增. 光电子引起的次级雪崩将汇入原初雪崩并形成流光. 一旦流光过程由复合产生的光子所触发,这种过程将继续,直到最后一个这样的光子被耗尽. 因而流光放电过程终止而自行淬灭. 艺术家笔下的自淬灭流光放电图象见图 3.

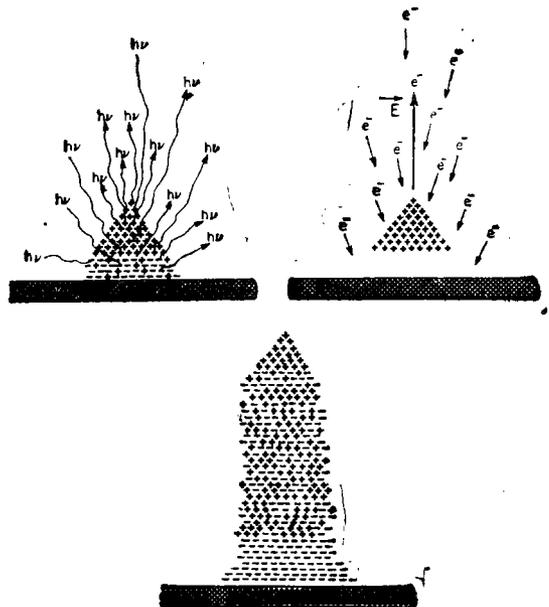
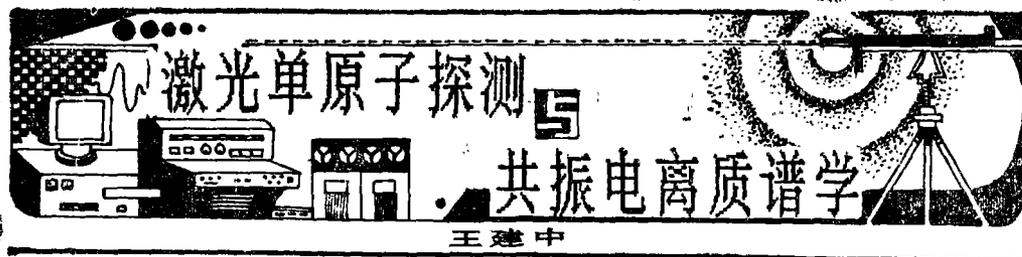


图3 艺术家笔下的自淬灭流光放电现象

上述模型要求复合过程放出的光子具有足够高的能量,才能使淬灭气体电离. 这些光子是由氩的激发态放出的. 1989年和1990年日本的 N. Koori 相继报道在氦、氙、氪、氟等惰性气体加淬灭气体(CH_4 、



共振电离质谱学 (Resonance Ionization Spectroscopy, RIS) 是 80 年代发展起来的一个物理学新分支, 在此基础上发展起来的激光单原子探测 (Laser Single Atom Detection, LSAD) 技术是超微量探测技术的一大飞跃。它实现了探测灵敏度的理论极限, 即能够探测到一个原子(或分子)的存在, 而且能从电子结构运动层次上观察原子相互作用及变化的过程(扩散, 凝聚, 涨落, 解离, 催化……)。它在基础研究和应用基础研究中获得了极广泛的应用(如材料科学, 原子、分子物理, 化学, 地学, 凝聚态物理, 核物理, 医学, 资源科学, ……), 可能在一些学科领域中引起突破性的进展。

在 LSAD 技术的近期发展过程中, 共振电离质谱学和质谱学相结合的 RIMS (Resonance Ionization mass Spectroscopy) 是近代超微量探测分析方法中最新的也是最灵敏的一种 LSAD 技术。

1. RIMS 发展的历史

共振电离质谱学 (Resonance Ionization Spectroscopy, RIS) 首先是由美国的 G. S. Hurst 和前苏联的 V. S. Letokhov 等创立和发展起来的。共振电离的概念首先是在激光同位素分离的研究工作中得到重视, 1968 年出现在美国的 Oak Ridge 国家实验室的

C_2H_2 、 C_2H_4 和 $iSOC_2H_6$ 或 CO 等的混合气中明显地观察到 SQS-模式。从氮的激发态放出的光子已知的最大能量为 $10eV$ (电子伏特), 这个能量比以上各种淬灭气体的电离电位都低, 其中 $iSOC_2H_6$ 的电离电位最低为 $10.4eV$ 。因此对这些淬灭气体的直接的光致电离过程不可能发生。

三、自淬灭流光在高能物理实验中的应用

在自淬灭流光模式下运行的气体探测器已广泛应用于高能物理实验中。

首先以塑料流光管形式开发利用 SQS-模式于高能物理实验的是意大利的佛拉斯卡蒂(1976)。其管子的直径为 $2-3cm$, 中心为 $100\mu m$ 的粗阳极丝。他们建造了一个有 200 根塑料流光管的小型探测器, 用作正负电子贮存环 ADONE 上一个实验中的内探测器, 于 1978 年开始运行。

文献报告和法国的一个专利书中。1969 年 Letokhov 提出将两步共振光电离应用于同位素分离和痕量元素的检测。首次实验是 1971 年在前苏联科学院光谱研究所完成的 Rb 原子的两步共振光电离, 使用的是红宝石激光器。随后类似的实验在 Na、U、Ca 原子上实现。1975 年 Hurst 等使用 RIS 方法对 He (2^1S) 亚稳态(量子选择态)的布居进行了测量, 并首次实现了饱和电离。

由于光电离达到饱和比较困难, Ivonov 和 Letokhov 于 1975 年首先引入了场电离的思想。同年, 相应的两步里得堡态激发和场电离实验由 Ambartzumian 和 Dučas 等完成。随着饱和电离的理论和实验的进一步研究, 电离的效率逐渐接近 100%, 人们的注意力开始转向单原子的检测 (Single Atom Detection, SAD)。1975 年出现一本专利书, 1977 年由 Hurst 等首次在实验中检测到单个 Cs 原子的存在, 实现了单原子的探测。从此开辟了一个广阔的, 富有生气的应用领域。随后, 相应的分子的共振电离的研究也得到广泛的开展, 包括用于铀同位素分离的 UF_6 分子两步光电离的思想的提出。多步共振电离技术成为微量同位素和包含短寿命核原子的超精细结构研究的最灵敏的方法。

首次大规模应用流光管是 CERN 的 CHARM 探测器, 它使用了 20000 个截面为 $1cm^2$ 的铝管。

1980 年 Frascati-Milano-Torino-CERN 合作组建造 Mont Blanc 峰的质子衰变实验室, 完全采用了塑料流光管。其规模比 CHARM 探测器更大。使用了约 50000 根长 3.5 米的塑料流光管。管子的内壁涂石墨层。中心阳极丝直径 $100\mu m$ 的镀银铜-铜丝。塑料管截面为 $9 \times 9mm^2$, 壁厚 $1mm$ 。8 个内室构成一个单元。

CERN 的大型正负电子对撞机 LEP 上的四个大型实验合作组, 其中三个组 (ALEPH, DELPHI 和 OPAL) 都采用了这种塑料流光管作为它们整个探测器的一个组成部分。

北京谱仪 (BES) 桶部簇射计数器使用了总计

(下转第 13 页)

开垦物理学发展史这块宝地

钱三强



· 纪念钱三强 · 学习钱三强

编者按:

想见音容空有影,欲闻教诲杳无声。今年的6月28日,是我们的恩师、中国杰出的物理学家钱三强先生逝世一周年。许多人在思念他、追忆他、学习他。本刊编辑部除举行读者座谈会外,特将先生于1991年7月25日为清华大学教授郭奕玲、沈慧君所著《物理学史》题写的序言发表,以资纪念。标记为编者所加,特此说明。

物理学发展史是一块蕴藏着巨大精神财富的宝地。这块宝地很值得我们去开垦。这些精神财富很值得我们去发掘。如果我们都能重视这块宝地,把宝贵的精神财富发掘出来,从中吸取营养,获得效益,我相信对我国的教育事业和人才培养都会是大有益处的。

值此郭奕玲、沈慧君两同志的《物理学史》一书出版之

际,我想谈三点看法:

一、科学上没有平坦的大道。我们要通过物理学史的介绍,向学生讲清楚,它经历的是一条非常曲折、非常艰难的道路。然而,我们的教师在对学生进行教育的时候往往是应用经过几次消化了的材料来讲授,或者经过抽象的理论分析加以表述,把已有的知识系统归纳,形成简明扼要的理论体系,这当然是必要的,但是这样的教学方法,往往会使学生对科学概念的产生和发展引起误解,以为什么结论都可用数学推导出来,失去了对观察和实验的兴趣。这样的结果使学生们不了解科学是怎样来的,时间长了,等到他自己从事教学时

就很容易会把科学当作一门死科学来教,今天我们科学界有一个弱点,这就是思想不很活泼,这也许跟大家过去受的教育有一定关系。我在1981年给《物理教学》编辑部的信中就提出过这个看法。

我认为,在物理教学中适当增加一点物理学史的内容,或者在教学计划中增加一门物理学史选修课,就象清华大学所做的那样,让学生更多地了解科学发展的历程,这对他们的成长将会是有益的。

二、通过物理学史可以阐明理论与实践的关系。物理学是实验科学,实验工作是基础,强调实验的意义,并不是否定理论的重要性。只有在实验的基础上建立了正确的、经得起实践检验的理论,才能由表及里达到对客观事物的规律性认识。如果能在系统地介绍理论发展线索的同时,更多地介绍实验工作的经过和所起作用,以及理论与实验的相互依赖关系,就更有教育意义。郭奕玲、沈慧君两同志写的这本《物理学史》比较注意这些方面。在这本书里,不但全面探讨了这些关系,还就物理学每一分支的不同特点加以具体阐述。值得提到的是,书中专门设了“实验与实验室”和“单位、单位制与基本常数”两章。这就更丰富了有关实验的内容。

三、科学是全人类共同创造的社会财富,它是科学家集体智慧的结晶,是时代的必然产物。但它的每阶段的具体发展情况又往往要受到各种客观条件的影响。我们不否认科学家个人的伟大作用,但科学绝不是少数几个特别有天才的大科学家在头脑里凭空创造出来的。只有那些善于继承又勇于创新的科学家才有可能抓住机遇作出突出贡献。机遇也可以说是一种偶然性。但是在偶然性中体现了必然性。物理学史中大量事例可以说明,各种科学发现往往具有一个共同点,那就是勤奋和创新精神,只有不畏劳苦沿着陡峭山路攀登的人,才有希望达到光辉的顶点。

最后,我还想对青年同学们讲几句话,除了自然科学以外还应该学一点近代史和现代史、辩证唯物主义、历史唯物主义和毛泽东选集第二版。我们能在40年中在经济建设、文化建设和国防建设上取得重大成绩,提高我国的国际地位,是与在中国共产党领导下发扬独立自主、自力更生、艰苦奋斗、大力协同,建设有中国特色的社会主义道路分不开的。为祖国的四个现代化作出贡献,我们更需要强调集体主义精神。

钱三强

1991,7,25.

(上接第28页)

13344个自淬灭流光管。流光管有效长度3.85米。中心阳极丝为直径50 μ m的不锈钢丝。管子截面为矩形,内层宽14.2mm,外层宽18.7mm,高为13mm。所用工作气体为Ar(80%)+CO₂(20%)混合后通过

4 $^{\circ}$ C的正戊烷(*n*-pentane)。

自淬灭流光模式的气体探测器技术被广泛采用,它只是整个探测器庞大规模的一部分。从这一部分的规模我们就可体会到现代高能物理实验的整体规模是多么宏大。