

碘化钠(铯)闪烁体 发现四十年

美国物理学家罗伯特·霍夫斯塔特 (R. Hofstadter) 于 1948 年发现无机闪烁体碘化钠(铯), 到今年四十周年了。对于这项发现, 他曾经这样说过: “我确实感到自豪, 这样一种简单的材料居然在世界范围里对人类文化做出了多么多的贡献”。

闪烁材料具有在原子核辐射作用下发出脉冲光(称为闪烁)的性质。它在放射性研究中的应用可以追溯到本世纪之初。 α 粒子打在闪烁材料制作的屏上引起闪烁, 在暗室中通过放大镜或显微镜进行肉眼观测。这种看起来非常原始的方法

在约有四分之一世纪的早期核物理发展过程中起过十分重要的作用, 它参与了例如著名的证实原子核存在的 α 散射实验, 以及历史上第一个人工核反应 $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$ 的研究。从三十年代起, 以盖革-弥勒计数管为代表的气体放电计数管技术得到发展, 取代了目测闪烁法的地位。闪烁方法成为历史名词。这种情况延续了十五年之久。

四十年代后期出现了闪烁方法的转机, 这首先是和光电倍增管技术的发展密切相关的。第二次世界大战期间, 军事上的需要刺激了光电倍增管的生产与发展。它们作为由噪声发生器用于雷达干扰技术。战争结束以后, 大量光电倍增管成为剩余物资。人们开始注意到这种器件对于弱水平光的高灵敏性, 把它和硫化锌闪烁体配合使用, 取得了很好的效果。借助于光电倍增管一批新的闪烁晶体相继发现, 闪烁方法以崭新的面貌重新成为重要的原子核实验探测手段。

碘化钠(铯)就是在铯掺杂在碘化钠中作为激活剂这样的历史背景下和其它一些闪烁材料一起被发现的。霍夫斯塔特曾经回忆了这段发现经过, 他说: 这段故事让人们看到有用的发现是常常可以采用非常简单的手段来实现的。

霍夫斯塔特对固体发光产生兴趣是从 1938 年在普林斯顿大学获得博士学位那年开始的。这年夏天他在通用电气公司同赛茨 (F. Seitz) 一起工作了一段时间, 后者其时正在从事碘化钾(铯)的研究工作。这段短暂的时间对他以后的发现产生了重要的影响。

1946 年, 霍夫斯塔特结束了战时工作, 受聘于普林斯顿大学物理系, 担任助理教授。他选择了氯化银和卤化铯作为核辐射探测器的性能的研究课题。但是由于多种因素, 在这些材料上并没有取得很多进展。

1947 年夏秋之交, 从柏林传来了有关德国物理学家卡尔曼新发现的消息: 他用樟脑丸材料, 也就是萘, 作为闪烁体放到光电倍增管前成功地探测了 γ 射



图 1

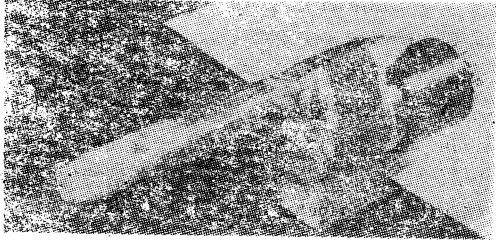


图 2

线。这是一个令人振奋的消息。 γ 射线由于穿透能力强，一向是探测上的难题。如今采用一块几个厘米厚的萘晶体测量能量为 1.2MeV 的 γ 射线可以达到 20% 的效率。一时间许多核物理实验室都可以闻到樟脑丸的气味。不久，美国橡树岭实验室的研究人员又发现蒽晶体的性能还要好：它给出比萘大一倍还多的脉冲幅度；而且是更为稳定的材料，不象萘那样容易挥发。但是，无论萘和蒽对于 γ 射线的单位体积阻止本领仍旧是比较低的，它们比原来已有的探测器如盖革-弥勒计数管固然要好，但是远不象人们所期望的那样好。

霍夫斯塔特决定寻找更好的闪烁材料，他想起了 1938 年夏天在通用电气公司接触过的 KI(Tl) 晶体：已知这种材料具有发光性能，可以拿来一试；而他手中正好有一块这种样品。试验的结果表明：KI(Tl) 确实具有闪烁性能，同萘和蒽相比虽然脉冲幅度并不高出多少，但是阻止本领则要大多得多，这使他感到鼓舞。随即去寻找关于碱金属卤化物发光的实验资料。他注意到了碘化钠估计在其可能发射光的波段具有良好的透明性。但是，可能由于潮解性使它难于进行研究，因此文献上少有记载，于是他立即订购一些 NaI 原料，以便亲手进行试验。他用一些 NaI 粉末加进一小撮碘化铯放在一个敞口的陶瓷坩埚里，然后用喷灯进行加热，终于得到了一小块 NaI(Tl) 样品。他把制成的 NaI(Tl) 样品同结晶的蒽、萘、KI(Tl)、NaCl(Tl)、KBr(Tl) 以及 CaWO_4 等样品进行了发光性能的比较。他在暗室中将这此样品排放在一片拍摄光谱用的照相底板上，用黑纸盖住，再放进一个硬纸盒里。在样品之上半米的地方放置一个镭源进行半小时左右的辐照。在将照相底板显影和定影之后，他高兴地发现照相底板对应着 NaI(Tl) 的位置显著变黑了，而对应其它样品的位置则几乎没有影响。

霍夫斯塔特着手改进制备方法。他采用过去生长 AgCl 晶体的同样方法在一个 1/2 英寸的石英试管中

生长了 NaI(Tl) 的多晶样品，为了防止样品因接触空气而变质，石英管口被封了起来。他把包有铝反射层的样品捆绑到一个光电倍增管上，开上高压电源并连到一个放大器上。第一次测试就在示波器上看到了从放大器输出的非常大的脉冲！在同样条件下测试萘时却几乎见不到脉冲讯号。接着又测试蒽，和 NaI(Tl) 比较，发现后者的脉冲幅度是前者的两倍还多，并且计数也多多。他惊喜万分，确信终于得到了很好的结果。图 1 显示了封装在石英试管中的 NaI(Tl) 多晶样品，图 2 则是这个多晶样品装在 RCA931A 型光电倍增管上的情况，这也是历史上最早的 NaI(Tl) 闪烁计数器。

霍夫斯塔特很快将实验结果整理成文投寄到《物理评论》(Physical Review) 杂志。文章在六个星期之后就刊登出来了。但是即使在文章发表了几个月后，一位在闪烁计数器领域工作的知名人士来到他的实验室，对 NaI(Tl) 的脉冲大于萘仍然表示怀疑。他坚信自己是对的，继续研究并相信可以做出大块、干净、具有很好的阻止本领的 NaI(Tl) 晶体来。他花了几个月的时间来生长更大的晶体，终于在石英管里生长出了直径达到 2 英寸的单晶。但是石英管和 NaI(Tl) 的组合不能保证很好的光学性质，而晶体的灵敏体积也不能在几何上很好地确定。由于这种情况（根本原因是因为 NaI(Tl) 的潮解性能），霍夫斯塔特的发现没有立刻得到重视和实际应用。

1948 年末，霍夫斯塔特指导一名博士研究生麦金泰尔 (J. A. McIntyre) 采用具有确定几何的 NaI(Tl) 晶体研究康普顿效应来验证克莱因-仁科公式。他们用了两块每边 1 厘米，切割整齐的 NaI(Tl) 晶体，其中一块兼作散射靶和反冲电子计数器，另一块探测散射后的 γ 射线，两者进行符合测量。实验开始不久，他们立刻注意到靶晶体产生的闪烁脉冲竟由原先看到的连

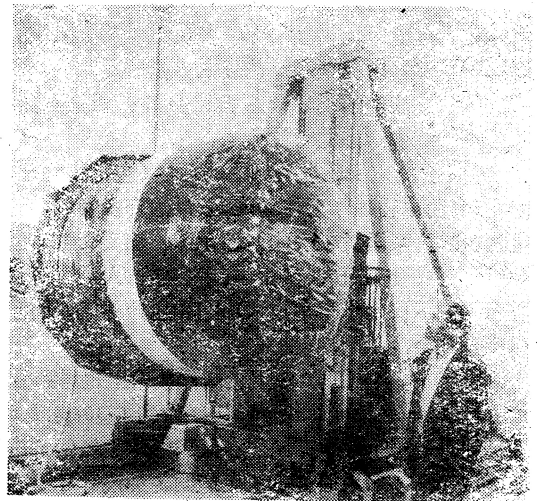


图 3

谱变窄成为确定的峰;即使撤去散射 γ 射线的符合,峰仍旧十分明显.霍夫斯塔特马上意识到,在靶晶体中看到了 γ 射线的全吸收峰了.这天他们一直工作到深夜,又接着干了几夜,测量了一系列放射性物质,包括Ra、 ^{198}Au 、 ^{66}Ga 和 ^{24}Na 的能谱.结果表明NaI(Tl)不仅可以简单地计数,而且能够测量 γ 射线能量.这是历史上首次实现了应用NaI(Tl)作为 γ 射线能谱仪.消息不胫而走,整个科学界开始了这方面的应用.NaI(Tl)的价值被充分认识,从此出现了NaI(Tl)久盛不衰的局面.

NaI(Tl)发现以来的这四十年间,作为闪烁体中的佼佼者,其应用达到了空前广泛的程度.首先,它在当代物理学发展中起了重大作用.我们可以随手列举一系列有它参与的基础研究方面的重要发现:

1. 电子偶的发现(1951年 Deutsch). NaI(Tl)被用来探测 e^+e^- 系统衰变的 γ 射线.

2. μ 子原子的重要证据(1953年 Fitch 和 Rainwater). NaI(Tl)被用来探测 μ 子原子中 μ 子跃迁产生的 γ 射线.

3. 弱作用中宇称不守恒的实验证明(1957年吴健雄等).研究 ^{60}Co 的 β 衰变,用蒺藜晶体探测 β 粒子,用NaI(Tl)探测接续发射的 γ 射线.

4. 穆斯堡尔效应的发现(1958年 Mössbauer). NaI(Tl)被用来探测129keV能区 γ 射线.

5. 爱因斯坦等效性效应预言的验证(1960年 Pound 和 Rabka). 采用NaI(Tl)观察 γ 射线由于 γ 量子在发射点及吸收点的引力场的差别所引起的移动.

6. 力距离量子电动力学的验证(1974年 Biddick 等).在正负电子对撞机上用大NaI(Tl)谱仪测量高能电子或 γ 射线,证明量子电动力学在小到大约 4×10^{-15} 厘米距离上的正确性.

7. 新粒子的发现(1979—1981年晶体球合作组).在正负电子对撞机上用700多块NaI(Tl)组成的“晶体球”探测器研究 ρ 介子及其衰变,先后发现了长期寻找的 ρ 介子家族中的 η_c 粒子和 η_c' 候选态,以及可能是胶球候选态的新粒子 τ 和 θ .

NaI(Tl)的应用还扩展到了物理学(包括核物理、高能物理、固体物理和天体物理)以外的许多领域,诸如生物、化学、医学、核能、放射性示踪、地质、铀矿勘探、石油探井、食品研究、气象学、考古学、人类学等诸多方面.它不仅用于科学技术部门和生产部门,而且也用到了社会生活领域.

四十年来,NaI(Tl)在生长制作技术上也得到了长足的进步.优质大体积单晶已经做到了30英寸直径的尺寸.七十年代中,制作多晶闪烁体的热锻挤压工艺发展起来.采用这种工艺生产的各种尺寸异型晶体不仅用料节省,而且也是通常的机械加工单晶的方

法难以胜任的.锻压所得到的成品在光学和闪烁性能方面与原来的单晶几无差别,而在机械强度、抗热冲击和抗潮解性能方面有所增强. NaI(Tl)闪烁计数器从最早的单块小尺寸晶体构成的实验装置发展到了今天由大尺寸晶体或由几十块乃至数百块晶体组成的大型装置.图3是一个采用大块NaI(Tl)晶体的高能 γ 射线望远镜(EGRET),将要安装在美国国家航空与宇航局建造的 γ 射线天文台(GRO)上,用来观察和测量来自各种天体源的高能 γ 射线能量,计划在1990年送入太空.图中望远镜的后部是大块NaI(Tl)晶体,它的前面还有两套火花室系统,一套飞行时间符合系统和反符合计数器(旁立者是霍夫斯塔特的长期合作者休斯(E. B. Hughes)博士).

也许还值得指出这样一个情况:在NaI(Tl)闪烁体发现以来的这些年里,人们不断作出努力来寻找性能超越NaI(Tl)的新闪烁材料,却没有取得显著进展.虽然霍夫斯塔特和他的合作者在1951年和1964年发现了 $\text{CaI}_2(\text{Tl})$ 及 $\text{CaI}_2(\text{Eu})$:前者荧光效率比NaI(Tl)大10%,后者则大出一倍左右.可惜这类晶体因生长困难而未能得到进一步的发展.

霍夫斯塔特除了无机闪烁体方面的杰出贡献,尤其因NaI(Tl)闪烁体的发现而知名外,还以他“在原子核的电子散射方面的先驱研究与由此而得的有关原子核构造的发现”而同鲁道夫·穆斯堡尔分享1961年诺贝尔物理学奖.他的后面这项工作是在1950年从普林斯顿大学转到斯坦福大学后进行的.他在斯坦福大学工作三十多年,并于1971年被任命为Max H. Stein物理学教授.他的学术兴趣广泛,主要研究领域涉及原子核物理、高能物理、 γ 射线天文学和其它方面.

本文作者在七十年代末到八十年代初有幸和霍夫斯塔特教授(图4)一道参加在美国SPEAR对撞机上的高能物理实验项目,常常见面并进行过饶有兴味的学术交谈,他曾于1974年访问过中国.我国自己生产的NaI(Tl)晶体给他留下了深刻的印象.

在纪念NaI(Tl)发现四十周年之际,作者曾经写信给他.他因为心脏病发作住院,虽在病中,还特地委托斯坦福大学高能物理实验室主任耶里安(M. R. Yecarian)教授回信,并寄来了作为本文插图的3帧照片,谨在文末表示深切的谢意.



图 4