

# μ 子 原 子

何景棠

1948年,张文裕先生把多层金属薄膜放在云雾室中,在研究宇宙线与物质相互作用时,首次发现了 $\mu$ 子原子,这是当代粒子物理学上的一个重大发现,开创了 $\mu$ 子原子和介子原子这一新的研究领域,在科学发展史上写下了光辉的一页。



张文裕先生近照

## 一、什么是 $\mu$ 子原子

为了说明什么是 $\mu$ 子原子,我们先从电子原子说起,卢瑟福根据进行的 $\alpha$ 粒子散射的实验事实,在1911年提出了原子的“核型结构模型”,卢瑟福认为,原子中心是一个带正电荷的核,它集中了原子几乎全部

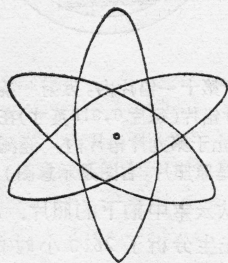


图1 卢瑟福原子模型的形象化描述

质量,但其大小远小于整个原子,在核的周围有若干个电子围绕着他转动。我们在报刊杂志上看到有如图1的标志,这就是卢瑟福电子原子模型的形象化描述。卢瑟福在实验中测得原子核的半径约为 $10^{-12}$ — $10^{-13}$ 厘米,而原子的半径即核外层电子的轨道半径约为 $10^{-8}$ 厘米。

玻尔于1913年成功地将量子论应用于卢瑟福的原子模型。玻尔认为,核外电子不是象在经典力学中那样可以在任何轨道上存在,而是只能存在于一系列分立的满足一定量子化条件的轨道上,这种被容许的轨道称为定态轨道或称为玻尔轨道。当核外的某一个电

子由一个定态轨道跳向另一个定态轨道时,就要辐射(或吸收)一个光子,如果电子的初态能量为 $E_i$ ,终态能量为 $E_f$ ,则辐射光子的能量为 $E_\gamma = E_i - E_f$ 。

当一个带负电荷的 $\mu$ 子以低速穿过物质时,由于受到物质原子核的正电荷的吸引, $\mu$ 子有可能成为原子核的“卫星”,围绕原子核旋转。这种 $\mu^-$ 与原子核组成的原子就称为 $\mu$ 子原子。

$\mu$ 子的质量约为电子质量的200倍,它是1936年由安德逊(C. D. Anderson)等人在研究宇宙线时发现的。人们可能会问:1936年安德逊已经发现了 $\mu$ 子,为什么要到1948年,即 $\mu$ 子被发现了12年之后, $\mu$ 子原子才被发现呢?

原来 $\mu$ 子被发现之后,起初人们认为 $\mu$ 子就是汤川秀树于1935年预言的传递核力的 $\pi$ 介子,但对 $\mu$ 子所进行的所有实验都发现 $\mu$ 子并不是汤川所预言的粒子。直到1947年,鲍威尔等人把原子核乳胶放于高山上,进行宇宙线实验,才发现了 $\pi$ 介子。发现 $\pi$ 介子与核有强相互作用,同时证实 $\pi$ 介子可以衰变成 $\mu$ 子。

由于 $\mu$ 子的静止质量约为100MeV,人们起初期望 $\mu$ 子被核吸收之后,会产生核反应,放出能量,因此,研究 $\mu$ 子被核吸收之后所出现现象,是当时许多粒子物理学家研究的一个有趣的问题。张文裕先生起初也是出于上述目的,利用多层薄膜云雾室来研究宇宙线的 $\mu$ 子与核的相互作用的。

## 二、精心的设计,可靠的运行

张文裕先生在1948年利用的多层薄膜云雾室如图2所示。云雾室是早期宇宙线实验普遍使用的实验设备。云室中尚有一块橡皮,将云室分隔成前部和后

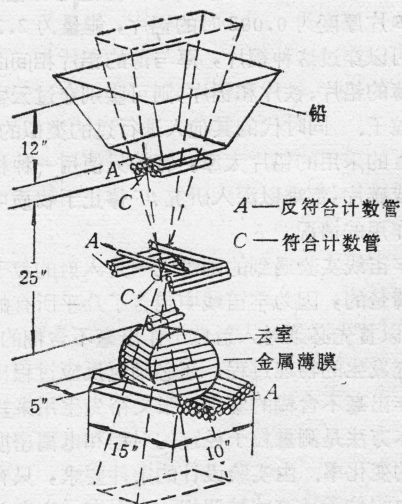


图2  $\mu$ 子吸收实验所使用的仪器  
虚线表示仪器的接收度

部。前部充有工作气体，后部有压缩空气压缩橡皮，使前室的气体呈压缩状态。当带电粒子穿过云室时，在云室前部工作气体中产生电离中心，与此同时，自动控制系统将云室后部的阀门打开，后室气压下降，分隔前后室的橡皮向后运动，前室的气体便在绝热状态下膨胀，以电离中心为生长点，沿着带电粒子穿过的路径便形成雾滴，在闪光灯照耀下，利用照相机和高灵敏度的感光底片，则可将带电粒子形成的径迹拍照下来，供分析实验结果之用。在每一次快膨胀之后，云室在自动控制系统的控制下，进行几次慢膨胀，以便清除本底雾滴，使下一次照相得到清晰的径迹照片。

张文裕先生使用的云室是在 1946 年开始建造的。云室是圆柱型的，内直径约为 12 吋，室的前部约 5 吋，由调节后室的多孔隔板的位置即可得到所希望的膨胀比，以便获得适于照相尺寸的雾滴，得到清晰的径迹照片。在云室的一个边上垂直地放了一块平面镜，以便获得立体照片。云室周围有符合计数管阵列 C，有反符合计数管阵列 A，只有当穿过计数管阵列 C 而不穿过计数管阵列 A 的停止于云室内的粒子，控制系统才使云室膨胀和照相。为使工作可靠，整个云室放在恒温环境内；为使粒子减速，增加慢粒子的数目，在云室的最上部放了约 12 吋厚的铅块。

张文裕先生所设计的实验有其独到之处。他采用了不同材料的多层薄金属片的方案。为了研究  $\mu$  子与轻核、中等重的核和重核相互作用，张文裕先生分别在云室内放有铝片，铁片和铅片，进行三次实验。铅片厚度为 0.018 吋，铁片厚度为 0.028 吋，为了增加照相时的反光，在所有铅片和铁片的两面均镀上厚度约为 0.002 吋的铝箔。能量为 15MeV 的质子可以穿过每片铁片和铅片。用铝片进行实验时，铝片的厚度为 0.032 吋，能量为 11.5MeV 的质子可以穿过这种铝片，另外还有 8 片厚度为 0.002 吋的铝片，能量为 2.2MeV 的质子可以穿过这种铝片，厚与薄的铝片相间而放。用上述薄的铅片、铁片和铝片，则可鉴别穿过云室的各种低能粒子。同时代的其他人进行过的类似的云室实验，有的采用的铅片太厚，有的只使用一种材料，如铁片或碳片，都难以深入研究  $\mu^-$  停止于物质中与物质相互作用的情况。

宇宙线实验遇到的困难之一是入射的粒子的种类是不清楚的，因为宇宙线中包含了几乎所有的基本粒子，所以首先必须对入射粒子作出毫不含糊的鉴别，为了研究发生的物理过程，还必须对反应过程出射的粒子也作出毫不含糊的鉴别。张文裕先生用来辨认粒子的基本方法是测量粒子径迹的射程和电离密度沿径迹长度的变化率。由实验设计的条件要求，只有停止于云室内的粒子径迹才被照相。由于在云室内分别放有铅、铁和铝等金属薄片，所以进入云室的粒子在停止前必然穿过若干金属薄片。质子、 $\mu$  子和电子在穿过金

属薄片前后电离密度的变化是非常不同的。利用这一特性，就可以辨别入射的粒子是质子、 $\mu$  子或电子。例如当质子快要停止在金属薄片时，它的径迹较浓，而且穿过连续两片金属薄片时，径迹的电离密度呈现不连续的变化。当电子快要停止在金属薄片时，整条径迹很淡，在最后一个间隙中，电离密度突然增加。当  $\mu$  子快要停止时，在最后三个间隙中，它的径迹的电离密度逐渐增加。对反应中出射的粒子，也用类似的方法进行鉴别。为了确保整套实验装置运行的可靠性，张文裕先生作了许多检验，其中之一是从工作时间，从金属片的原子序数和质量、从云室的立体角，可以获得  $\mu$  子的绝对停止率是  $1.5 \times 10^{-6}/(\text{克} \times \text{秒} \times \text{立体角})$ ，与其他实验结果完全一致，说明实验所用的多层薄膜云室运行可靠。

### 三、细心的分析，意外的发现

人们起初期望  $\mu$  子被核吸收之后，会产生核反应，放出能量。事与愿违。张文裕先生发现  $\mu$  子穿过云室的隔板时， $\mu$  子被核吸收之后，没有观察到放出  $\alpha$  粒子或质子，即不会引起核碎裂，也就是说不会引起大量的释放能量。1948 年张文裕先生得出的第一个结论是： $\mu$  子和原子核没有强作用。

张文裕先生并没有就此罢休。他的头脑中想着两个十分重要的问题：首先，带负电荷的  $\mu$  子会不会形成围绕原子核运动的玻尔轨道呢？其次， $\mu$  子被核吸收之后， $\mu$  子的 100 MeV 的静止质量到哪里去了呢？

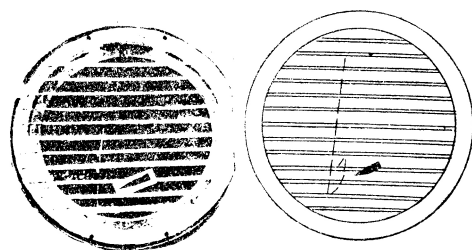


图 3  $\mu^-$  从上至下停止于第十一铝片内，发射一条淡的径迹，它向上穿过两片铝片（每片 0.018 英寸）在第八片铝片被散射回来停止于第九片铝片内，经测量这是慢电子径迹（左图是原照片，右图是示意图）

张文裕先生仔细察看从云室中拍下的照片。1948 年底—1949 年初，张文裕先生分析了 2610 小时的云室运行的照片，找到七张表明预示着有新现象的照片。这些照片的特征是：有一条径迹表明  $\mu$  子慢慢停止于铝片内，有的照片表明，如图 3 所示，在  $\mu$  子停止点，发射一个低能电子；有的照片表明，如图 4 所示，有一个低能电子或一对低能电子对，其连线以  $\pm 20^\circ$  的方向指向  $\mu$  子停止的地方。张文裕先生把这些事例取名为指向  $\mu$  子的电子和指向  $\mu$  子的电子对。

为什么说这些事例表明存在新物理呢？1947 年的时候，人们已经清楚， $\mu$  子的寿命  $\sim 10^{-6}$  秒，它可衰变

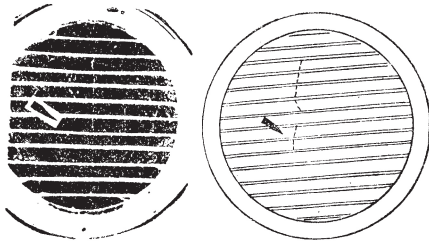


图4 指向 $\mu$ 子的电子事例  
如箭头所示,在第六与第七块铅片之间有一条淡的径迹,它指向 $\mu$ 子停止的地方(第五块铅片)

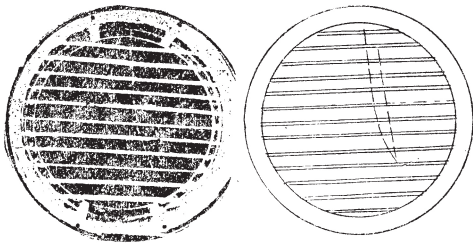
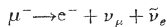


图5  $\mu$ -e 衰变事例  
 $\mu^-$  从上而下,停于第九块铅片中,快电子从下而上穿透所有铅片,把这种径迹作为参考径迹以便鉴别停止的 $\mu^-$  和慢电子

成电子和中微子。



$\mu$  子的部分静止质量转变成按这种方式产生的电子的动能,因此这样的电子带有约为几十兆电子伏的动能。在云室的照片中;这样的电子应该穿过较多的金属片,张文裕先生的确拍下了许多这样的照片,如图5所示,并把 $\mu$ -e 衰变的 $\mu$ 子径迹以及快电子径迹作为分析数据时的参考标准,来分辨其他径迹是由什么粒子产生的。但图3和图4的事例不同于图5的事例。在图3中,电子能量很低,它只穿过两块薄铅片,测量估计电子能量约为5MeV。在图4中,电子的能量也很低,测量估计少于5MeV。

这种指向 $\mu$ 子的低能电子和指向 $\mu$ 子的低能电子对的根源是什么呢?张文裕先生认为,当带负电荷的 $\mu$ 子通过云室的金属片逐渐慢化后,其运动速度接近热运动的速度,在强大的核的正电荷的吸引下, $\mu$ 子会被核抓住,代替了原来围绕核运动的其中一个电子,形成 $\mu$ 子原子。接着 $\mu$ 子从较高的能态跃迁到较低的能态。如果 $\mu$ 子在跃迁过程中,与其他围绕核运动的电子相互作用而发射俄歇电子的话,就会得到如图3那样的 $\mu^-$  停止而发射的低能电子;如果跃迁过程发射电磁辐射的话,那么就会得到如图4所示的指向 $\mu$ 子的电子对。

以前人们只知道,原子是由原子核和核外电子组成的,电子围绕原子核而旋转。现在张文裕先生经过

对实验现象进行的仔细分析,得到了原来没有预料到的发现,发现了 $\mu$ 子围绕原子核旋转的新的物质形态: $\mu$ 子原子。这个开创性的工作结果发表于1949年的现代物理评论上。要确认一种新现象,必须有更大量的事例的支持,同时还要排除以假乱真的可能性。还要有其他人用其他方法也找到同样的新物理现象,这样新的物理现象才能被人们所普遍承认。

不久,张文裕先生从普林斯顿大学转到普渡大学任教,他对从普林斯顿运来的仪器作了稍许改进。还作了两套新仪器,以增加事例的统计量,继续进行 $\mu$ 子停止于金属片中的实验研究,直到1954年,他积累了更多的云室照片,从约3000小时的连续运转的云室照片中,找到81个 $\mu^-$  停止事例,其中有4张 $\mu^-$  停止的地方直接发射电子,有21张指向 $\mu$ 子的电子和指向 $\mu$ 子的电子对的照片,主要实验结果可以归纳如下:

$\mu^-$  停止在物质之后,不会产生核碎裂,不会发射高能质子,即 $\mu$ 子与核没有强相互作用。

用铅片、铁片和铝片进行的实验发现,只有当 $\mu^-$  停止于铅片时,才会产生指向 $\mu$ 子的电子和指向 $\mu$ 子的电子对。 $\mu^-$  停止之后,没有看到能量大于15MeV的高能光子。

在所获得的 $\mu^-$  停止的照片中,可将事例分成三类,一类是发生 $\mu$ -e 衰变;另一类是 $\mu^-$  停止之后,没有发射可见的径迹;再一类是产生了指向 $\mu$ 子的电子和指向 $\mu$ 子的电子对。这些电子或电子对的能量为1—5MeV之间。

$\mu^-$  只交给原子核一小部分能量,而其余的大部份能量被中性的、不产生电磁作用的粒子所带走。

当时的理论家惠勒用量子力学对 $\mu$ 子原子进行了计算。实验结果与惠勒的计算结果非常符合。人们对整个物理图象也就更清楚了。例如当 $\mu^-$  被铅吸收在K轨道时,要放出约9MeV的总能量。这个总能量的一部分在过程的最初阶段通过俄歇过程传递给原子的电子,这就是实验看到的电子直接从停止的 $\mu$ 子的端点发射出来。随着 $\mu$ 子向低量子数的轨道过渡,能量将以发射光子的形式释放出来,光子转变成电子对,这在实验中看到指向 $\mu$ 子的电子对。 $\mu$ 子最终被质子吸收产生中子和中微子:



这样 $\mu$ 子的一部分静止质量将转变成中微子的能量而被带走。由于中微子不会在云室留下可观察的径迹。这在实验中看到 $\mu^-$  停止之后,没有发射其他径迹。

实验在81个 $\mu^-$  停止事例中,找到21个指向 $\mu$ 子的电子和电子对,即事例率为21/81。经过仔细的分析,假事例率为6/80到1/63之间,远远小于真事例率。



张文裕先生将这篇总结性文章发表于1954年的物理评论上 (Physical Review 95 (1954) 1288)。

柯星斯 (Cosyns) 于1949年,富雷 (Fry) 于1950年利用核乳胶也观察到 $\mu^-$ 停止发射低能电子的现象。后来灵瓦特 (Rain Water) 于1953年利用加速器产生的 $\mu^-$ ,进一步证实了 $\mu^-$ 停止于物质中会放射低能 $\gamma$ 射线。所有这些利用不同方法的实验都证实了张文裕先生的发现。因此 $\mu$ 子原子这一新的物质形态就被世人所普遍接受了。

#### 四、意义和影响

张文裕先生发现 $\mu$ 子原子的整个过程,在科学研究方面为我们树立了一个光辉的榜样。与他同时代的许多物理学家有不少都曾采用云室来研究过 $\mu$ 子与物质的相互作用,但张文裕先生在物理思想上比别人考虑得深入,在实验设计上有自己独到之处,整个实验过程仪器运转可靠,数据分析细心周密,所得出的实验事实确实可靠。这样张文裕先生才在世界上第一次发现了一种新的物质形态: $\mu$ 子原子。

$\mu$ 子原子的发现开创了研究物质结构的一个新领域,即 $\mu$ 子原子物理学。可以用 $\mu$ 子原子产生的辐射来研究核的结构。由于 $\mu$ 子的质量比电子大200倍, $\mu$ 子的某一轨道只应为电子相应轨道的200分之一,即 $\mu$ 子比电子离核更近,所以,用 $\mu$ 子作为探针来观察核结构要准确得多。

从1953年起美国建成了高能加速器,可以产生大量的 $\mu$ 子束,又采用了NaI(Tl)闪烁晶体来探测 $\mu$ 子原子能级间跃迁产生的 $\gamma$ 射线,因此 $\mu$ 子原子物理得到一定程度发展。例如利用 $\mu$ 子原子测量了核的尺寸;研究了真空极化效应,精确地测出了 $\mu$ 子的质量等。

1964年之后,世界上建造了一些介子工厂, $\mu$ 子的流强比普通加速器大 $10^2-10^4$ 倍,此外,具有出色能量分辨率的半导体探测器被应用于 $\mu$ 子原子物理学,可以测量精细结构和超精细结构的 $\gamma$ 射线,从而研究核的电偶极矩,四极矩和磁偶极矩,研究核的极化效应,测量核的电荷分布。利用 $\mu$ 子原子作为工具研究固体物理和化学反应也取得了重大进展。吴健雄从1964年就开始用半导体探测器研究 $\mu$ 子原子,全世界这样的组共有六个,吴健雄的组是第一个,他们花了二十多年功夫,差不多把所有的原子核都作了研究。吴健雄和休斯 (Hughes) 总结了这个领域的工作结果,写了三卷大书,叫做“ $\mu$ 子物理”(Muon Physics)。

目前在世界上例如美国的LAMPF,瑞士的SiN,加拿大的TRIUMF,苏联的Dubna等实验室, $\mu$ 子原子的研究活动仍很活跃。

每当人们谈论 $\mu$ 子原子,都会首先提到张文裕先生在1948年的开创性工作。