

迟来的原子核裂变

(中国科学院近代物理研究所 左 维 编译自 J. Michael Pearson. *Physics Today*, 2015, (6):40)

一系列不同寻常的失误、不幸和疏忽导致核裂变的发现一直推迟到二战前夕，或许因此改变了历史的进程。

与其他的物理发现不同，裂变的发现完全是出人意料的。当哈恩和斯特拉斯曼发现铀元素被中子轰击后会导致钡元素的出现时，他们是如此震惊，以至于在宣布这一发现的论文中写道：“我们还没有准备好迈出如此巨大的一步，它与所有已知的核物理实验相背离”。

哈恩和斯特拉斯曼的发现刚好发生在二战爆发前9个月，一个历史命运的关键时刻。六年后，恰恰是这一来自纳粹德国的发现直接导致了核武器的诞生，从而终结了这场战争。

裂变对于世界历史进程蕴含的影响是如此巨大。对于裂变的发现，长达四年的迟误确实显得非同寻常。

罗马

1932年剑桥大学的查德威克发现了中子，从此开启了现代核物理实验的大门。费米很快就意识到中子是探测原子核的强有力工具。因此，费米及其团队于1934年在罗马开始了利用中子轰击原子核的实验。对于比钍($Z=90$)轻的大部分核素，实验结果是紧随中子俘获后发生 β 衰变过程，其净效果是靶核最终增加一个质子。费米试图通过中子轰击质子数为92的铀合成93号元素。他和同事们成功地在铀核中产生了 β 放射性，但是，观测到的衰变图像远远要比他们的预期复杂。他们不是记录到对应于93号元素形成的一种半衰期，而是观测到至少四种以上的半衰期。

费米重点研究了13分钟半衰期

的放射性，发现它不可能来源于质子数在86到92之间的任何元素。由于坚信任何比 α 粒子重的集团都不可能从受到中子辐照的靶核中弹射出来，费米认为有十分充分的证据可以排除敲出反应。结果这一放射性不得不与质子数为93或更重的元素联系起来。

巴黎和柏林

尽管几乎无人对于费米宣称已经产生了超铀元素提出质疑，但费米观测到的所有其他半衰期仍然有待澄清。1935年，当费米及其团队放弃了铀元素方面的工作后，另外两个研究小组(巴黎的居里和萨维奇以及柏林的迈特纳、哈恩和斯特拉斯曼)开始在这一领域活跃起来。随着放射化学技术的发展，两个小组都发现，受到中子辐照的铀的衰变图像变得越来越复杂，从而使得实验结果更加难以理解。到1937年，柏林的研究者分辨出至少9种半衰期。为了解释这些衰变，他们被迫假定某些处于中间过程的核具有几个亚稳激发态。

在有着犹太人血统的迈特纳被迫逃离柏林后不久，哈恩和斯特拉斯曼重新开始了他们的实验。1938年11月，他们发现了三条以前没有探测到的 β 衰变链。他们认为这三条衰变链可能来源于镭元素($Z=88$)不同的同质异能态。然而，这一解释似乎更加难以置信。

由于分辨率迅速提高，哈恩和斯特拉斯曼得以证据确凿地显示，他们曾经认为来自镭的放射性实际

上来自于化学性质相似的钡元素($Z=56$)。哈恩当时就给迈特纳写信，希望她能够对上述观测到的奇异结果提供合理的物理解释。然而，迈特纳当时还无法即刻对哈恩的实验结果给予解释。哈恩和斯特拉斯曼的论文在第二个月就发表了，文章没有提到迈特纳的名字。

为何裂变曾经是那样不可预见

阻碍裂变发现的最大障碍在于，当时核物理界坚信任何比 α 粒子重的东西都不可能从受到中子轰击的原子核中放射出来。特别是，伽莫夫1928年的 α 衰变理论所取得的成功为这一信念提供了有力理论支持。

根据伽莫夫的理论，当低能中子轰击铀核时，发射出一个 α 粒子的几率比对称裂变成两个相等质量碎片的几率要大 10^{453} 倍，为上述信念提供了坚实的基础。这一计算基于直接反应机制。在直接反应机制中，炮弹只与靶核中一个粒子集团直接发生作用，显然这一假设过于理想化。真实的核反应必定会涉及比直接反应模型假设的核子数目更多的核子，入射能量将在入射粒子以及这些核子间共享。哥本哈根的玻尔于1936年提出的复合核模型完美实现了这一物理思想。在玻尔的模式中，通过统计涨落，核内核子间大量的碰撞能够将足够的能量集中于一个核子或一个集团上，从而导致其逃离出去。

然而，玻尔的复合核机制面临与直接反应同样的问题：带电粒子的出射仍然需要穿越库仑位垒。也就是

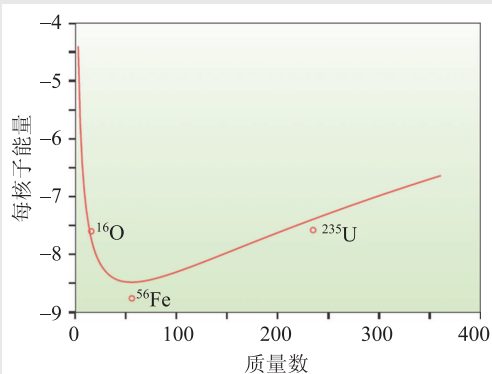


图1 半经验质量公式预言的 β 稳定原子核的每核子能量随原子核质量数变化关系

说，复合核形成也只是裂变的必要条件，而不是充分条件。因此，解释裂变需要复合核的其他衰变机制。

液滴模型

玻尔的复合核可以看作是伽莫夫1930年提出的原子核液滴模型的自然扩展。在液滴模型图像中，原子核内能的最低阶近似正比于其质量数。

到1936年，魏茨泽克等人已经从几个方面改进和完善了液滴模型，这些改进包括：考虑原子核具有表面张力；计入质子的库仑相互作用；考虑泡利效应。

改进后的模型就是著名的原子核半经验质量公式。这个仅仅包含4个参数的模型能够系统刻画出原子核结合能的关键特征。首先，它解释了 β 稳定线上原子核中中子数与质子数之比随原子序数的变化趋势。这一变化趋势暗示着重核裂变应当伴随着中子发射。这些中子反过来将进一步诱发更多的重核裂变，从而导致链式反应。其次，根据这一质量公式的预言， β 稳定原子核的每核子能量在铁元素附近存在一个极小值(图1)。这一特性意味着铀核裂变会释放出巨大能量。这一点直到裂变发现后才受到重视。

尽管1936年的液滴模型取得了

巨大成功，但其本质上是一个统计模型，还不能用来阐明裂变问题。理解裂变的关键在于需要容许液滴振动。

迈特纳和弗里西

哈恩和斯特拉斯曼的论文投寄于1938年12月22日。到1939年1月6日这篇论文印刷发表时，裂变之谜就已经被解开了。1938年圣诞期间，在哥本哈根工作的弗里西看望

了姑妈迈特纳，并开始与她讨论哈恩和斯特拉斯曼的实验结果。

迈特纳与弗里西以纯经典的方式来设想裂变如何才可以发生。他们假设入射中子不是将靶核明显地切割成两块，而是被靶核俘获形成一个玻尔曾经提出的复合核。然而，他们超越了玻尔，将原子核描述为一个吸收中子形成激发态后能够振动的液滴。这样，通过图2所示的组态，液滴就可以发生裂变。

1939年，回到哥本哈根的弗里西不仅完成了与姑妈的论文，还完成了一个简单的电离室实验，观测到了从裂变碎片放出的强脉冲。这两项工作均投寄于1月16日，确凿无疑地证实了哈恩和斯特拉斯曼犹豫不决的结论。

实际上，玻尔和卡尔卡已经在复合核模型中讨论过集体振动的可能性。遗憾的是，当时他们将复合核作为一个固体球来处理。假如采用液滴来检验集体振动的话，很可能已经预言了裂变现象。

错失的机遇

当费米于1934年发表了铀元素的实验结果后，他的超铀表述几乎得到普遍认可。然而，一个德国的女化学家诺达克立刻就提出质疑。

她指出费米并没有排除受到轰击的铀核破裂成两个或多个大小相当的碎片的可能性。费米知道她的评议，当时在费米的小组内曾经对诺达克的文章有过讨论，但无从得知费米为何决定忽视她的建议和这些讨论。

哈恩和斯特拉斯曼也知道诺达克的建议，但他们并没有在意。在他们具有标志性的论文中没有提到诺达克的建议。如果当时的科学界对诺达克的建议稍微重视一些，可能远在1939年之前人们就会产生电离室实验的想法。

另一个错失的机会来自1936年。当作为化学家的斯特拉斯曼宣称她已经在中子辐照的铀中发现了钡元素的证据时，迈特纳对这一结论没有予以考虑。

裂变的后话

在经历了裂变发现前具有传奇色彩的机遇错失和令人震惊的疏漏之后，接下来的事情进展要快得多。裂变的链式反应迅速被证实，为裂变能大规模的释放扫清了障碍。1942年12月，费米在芝加哥1号核反应堆上实现了可控形式下裂变能的大规模释放。1945年，裂变以一种剧烈和强暴的形式再次引起世界的关注。

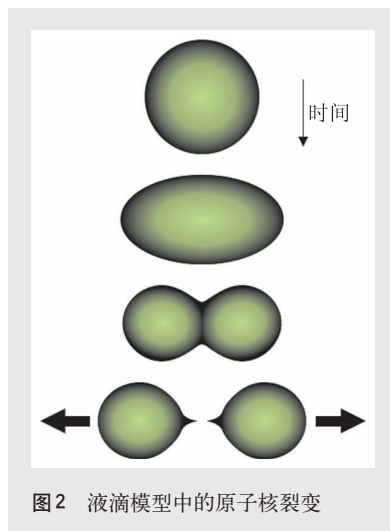


图2 液滴模型中的原子核裂变