

原子核裂变的发现:历史与教训*

——纪念原子核裂变现象发现 60 周年

何泽慧 顾以藩

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

摘要 回顾了原子核裂变发现走过的一段弯路,讨论了这段历史提供的启发和教训。

关键词 原子核裂变,历史,教训

DETOURS AND LESSONS IN THE DISCOVERY OF NUCLEAR FISSION

He Zehui Gu Yifan

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract We look back on the detours encountered and lessons to be drawn in the research leading to the discovery of nuclear fission.

Key words nuclear fission, history, lesson

(一)

原子核裂变现象,作为本世纪的一项伟大发现,其科学意义以及对于人类社会的深刻影响早已得到充分评说。至于对这一发现过程本身,固然不乏当事人与知情者的回忆与反思,但多数侧重于对史料的查证梳理以及对有关人物具体贡献的估价方面,而缺乏深一层的剖析与检讨;对于如何从中汲取从事科学研究的有益教训,偶有涉及,总嫌未能尽意。

原子核裂变的发现走过了曲折的道路。这段历史在当时令人感觉扑朔迷离,事后看来却又一目了然。令人感叹的是,这个本有可能在 1934—1935 年间取得的成就竟迟至 1938 年底才得以实现。实际生活中的认识过程也许就是如此。然而认真分析起来,其间除客观方面的因素外,更有主观上的原因值得总结,以为后人借鉴。

说原子核裂变可能在 1934—1935 年间发

现是以下实际情况为依据的^[1]。

1934 年 3 月,费米开始了利用中子轰击原子核诱发人工放射性的实验研究。两个月后,当他和他的合作者用氡-铍中子源照射铀样品时,他们实际上是在实验室中首次实现了铀核裂变;当他们采用自制的盖革计数管在照射后的铀样品上测得多种感生的强放射性时,他们实际上观测到的是裂变产物的放射性;当他们采用淀积方法分离出了半衰期为 13min 的放射性元素并排除其为铅、铋以及从钍到铀的同位素的可能性时,他们实际上得到的(根据事后的推断)是裂变碎片钨的同位素¹⁰¹Tc。

虽然费米本人对于他们观察到的实验事实作出了错误的解释^[2]——认为实现了生成超铀元素的反应,而半衰期为 13min 的放射性产物是第 93 号元素(也可能是 94 或 95 号元素),但是关于重核裂变的正确答案实际上就在那时

* 1998-09-17 收到

已经被提出来了。

猜到了正确答案的是德国化学家伊达·诺达克 (Ida Noddack)。她在发表于 1934 年 9 月《应用化学杂志》(Zeitschrift für Angewandte Chemie) 上针对费米小组实验所写的文章^[3]中直言不讳地指出,费米等人采用“排除其他可能性的方法”来证明第 93 号元素的存在是“决非成功的”;她以明确无误的语言设想了一种“全新的核反应”的图像,即重核在中子轰击下“破裂成为若干大的碎片”;她还具体指明了化学分析的正确做法是“将新放射性元素与所有已知元素进行比较”,而不是像费米小组做的那样,仅仅比较了从铀下行到铅为止的几个元素。

如果诺达克的这些意见在当时提出后受到足够重视的话,那么在物理学家(包括理论家与实验家)和化学家的共同努力下,核裂变现象的发现会是指日可待的事。然而,历史却是按照另外一种方式发展了下去。

(二)

诺达克尖锐批评费米小组工作的这篇题为“论第 93 号元素”的论文,我们特予以全文译出,作为本文的附录,放在文后供读者一览。伊达·诺达克早在 1925 年(时年 29 岁)和她丈夫沃尔特·诺达克合作发现第 75 号元素铼 (Re),于 1934 年获得德国化学学会颁发的莱别克 (Leibig) 奖章。与发现铼的同时,她们还在铼的 X 射线谱中观察到若干弱的谱线,曾经认为是原子序数为 43 的另一个新元素,并命名为 marsurium。以后证明这个发现是不对的^[4]。

诺达克的这篇论文在今天读来仍然让人感觉笔锋犀利,一针见血。论文中的一些基本论点实在是无懈可击的。在当时超铀元素寻找热中,她是唯一的一个能客观冷静地抓住费米实验中的关键问题所在的人,并且提出了事实证明是正确的建议。当她指出费米小组利用排除其他可能性的方法来反证新的放射性是超铀元素这一做法是不充分的而应当与更多已知元素比较时,她在化学上是十分高超的。当她提出重核裂

变的图像时,她在物理上确实是大胆的,但是却是正确的。诺达克的论文在当时是极富启发性的,它给实验与理论物理学家和化学家们都留出了很大的研究空间。上述任何一个方面循着她的思路走下去,都有可能取得进展而导致核裂变的发现。例如,理论物理学家可以从液滴模型出发来讨论核裂变的可能性及其特征表现;实验物理学家可以利用核物理的手段来寻找核裂变存在的证据;化学家可以在更大范围里比较新放射性元素与已知元素(包括稀土与碱土元素)的性质来证认核裂变产物...就像在 1938—1939 年间发生的那样^[5,6]。

然而,诺达克的论文始终没有得到重视。费米小组实际上拒绝了诺达克的批评,没有公开的回答或任何其他反应。在费米小组之后,柏林从事同样研究工作的哈恩-迈特纳 (O. Hahn - L. Meitner) 小组和巴黎的居里 (I. Curie) 小组也都看到了这篇论文,诺达克还曾多次与哈恩等人主动接触,申述自己的观点,但他们也从未在公开发表的文章中予以评论或者引用。从一些当事人的回忆可以看到,人们对这篇论文是否定的^[1,5-10]。

弗里施 (O. R. Frisch, “核裂变”名称的首创者) 的意见可能是最为全面、典型地概括了这种态度的。他在回忆时这样写道^[9]: “我认为任何读过它的化学家都可能认为它是毫无意义的,是吹毛求疵的批评,而读过它的物理学家可能更是如此,因为他们会说:‘如果不能说出道理表明批评是正确的,那么批评又有什么作用呢?’”。

原费米小组的成员阿马尔迪 (E. Amaldi) 作了比较具体的分析^[1]。他说:“两个原因,或者说,两个作为事后辩解的理由..是这样的。她的现已成为正确解释的建议表现为其目的更多地在于指出生成第 93 号元素的论点是缺乏严密性的一种猜测,而不是作为对观察结果的认真解释。这种意见看来为以下事实所支持,即她从来没有亲自或者和她丈夫一起去做她们肯定能够做的辐照铀的实验...此外,在那些年里,诺达克夫妇因为她们声称发现了第 43 号元素

而有损信誉。他又补充道：“较之这些半有意识半下意识考虑更为重要的是，来自柏林及巴黎的对我们结果的证实，产生了费米和我们大家都相信的用超铀元素来诠释铀的疑案很可能是正确的效果。阿马尔迪还说：“因为诺达克提出了一个全新的反应形式，而费米及其合作组成员不愿意轻易地采纳一个未经证明的新现象，一个新的假设。”

原费米小组的另一位成员塞格雷 (E. Segrè) 在总结这个小组当年的教训时则对诺达克的论文作出了恰当的评价^[10]：“如果我们中间的任何一个人真正把握了它的重要性，就会容易地在 1935 年发现裂变。阿马尔迪也承认：“费米和我们所有人在这种情况下都过于保守了”^[11]。

无论如何评说，我们必须遗憾地承认的一个事实是：诺达克的论文在核裂变发现的过程中确实未能起到它应起的任何作用^[5]。在她的论文发表以后，物理学家和化学家们丝毫没有改变原来的错误方向，而在 4 年逡巡于超铀元素的误区，当实验事实越来越接近于非用裂变不能解释的时候，却仍旧没有一个人及时地想起诺达克当初的忠告来。

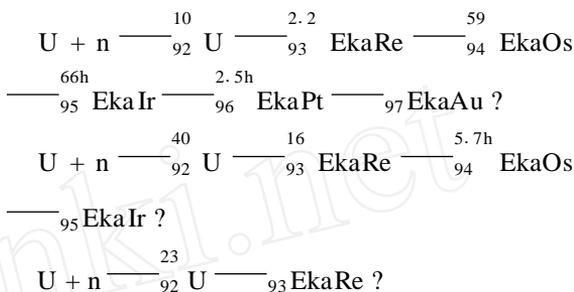
(三)

那么，在 1934 年以后一直到 1938 年底的这段时间里，人们究竟做了些什么呢？

费米小组是提出在中子轰击铀的实验中观察到“超铀元素”的“始作俑者”^[1,2]。但是这个小真正花在这方面的只是 1934 年春至 1935 年夏之间总共不过五六个月的时间，他们先后用快中子和慢中子照射，在铀和钷上分别测得 4 种和 2 种放射性。在保持了一阵审慎的态度之后，因为得到了其他实验组结果的支持，他们就确信发现了超铀元素。

继费米小组之后开展研究的是哈恩小组。哈恩先是与迈特纳合作，后来又有斯特拉斯曼 (F. Strassmann) 加入。在 1935 年到 1938 年的 4 年时间里，他们接连发表了 10 余篇论文。他们

在证实了费米小组观察结果^[11]的基础上不断增加了测得的放射性数目，并对它们的半衰期反复进行了修订。他们还在证认“超铀元素”的同时，试图弄清各放射性之间的亲子关系，想方设法将它们纳入已知核反应模式的框架当中。在 1937 年 5 月发表的一篇总结性文章中^[12]，他们一共报道了 9 种新的放射性，确认了至少 4 种“超铀元素”，其原子序数分别为 93—96 (可能还有 97)。他们设想这些“超铀元素”是通过以下 3 个衰变过程生成的：



为此不得不假设几种同位素同时具备多达 3 个不同半衰期 (三重同质异能素) 的不寻常性质。

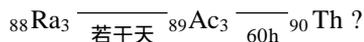
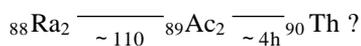
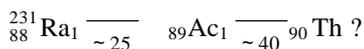
伊莱娜·居里在 1935 年间也开始了这方面的研究。她和她的合作者首先进行了中子照射钷的实验，确认了在钷上出现与铀类似的复杂现象^[13]。正是她们和哈恩小组的工作，促使费米小组于 1936 年底公开宣布发现了超铀元素，并命名第 93 号元素为 ausonium (Ao)，第 94 号元素为 hesperium (Hs)^[14]。

居里接着与萨维奇 (P. Savitch) 合作在 1937—1938 年间先后发表了 4 篇论文，报道了令人惊讶的结果。她们改变了哈恩小组的一贯做法，对经过快中子及慢中子照射的铀样品的全部放射性 (而不是仅仅分离出具有过渡元素性质的放射性成分) 进行研究，发现了一个先前未曾报道过的新放射性，其半衰期为 3.5h，而化学性质似乎与钷相仿 (1937 年 8 月 1 日)^[15]。由于哈恩和迈特纳的强烈质疑，她们作了进一步的研究，肯定了 3.5h 放射性 (她们把它称作 R_{3.5h}) 的存在而放弃了认为是钷的看法。随后，又根据 R_{3.5h} 在进行化学分离时随同镧载体沉淀出来的特点将它设想为镅 (1938 年 3 月 21 日)^[16]。当她们进一步试行把设想为镅

的 $R_{3.5h}$ 与镭分离时,却得到了 $R_{3.5h}$ 浓集在镭的那部分中的意外结果(1938年5月30日)^[17].

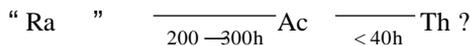
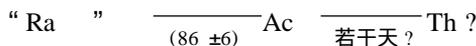
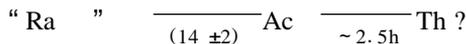
但是,居里和萨维奇没有因此得出 $R_{3.5h}$ 正是镭(裂变产物!)的结论.她们在采用分步结晶法时发现 $R_{3.5h}$ 至少可以部分地和镭分离,因此又偏离了这个实际上是正确的结论而返回到超铀元素的解释上来,同时又不知道把它放在周期表中的什么位置上(1938年7月12日)^[18](事后分析,她们的 $R_{3.5h}$ 很可能混有另一种性质与镭类似但不是镭的裂变产物即钷的同位素,因而通过分步结晶法能够从镭分离出来^[5,6]).

这个新的疑案激发哈恩小组去重复居里与萨维奇的实验.他们按照居里小组采用的化学分离及测量方法进行了过细的研究,证实了具有类似镭的性质的 $3.5h$ 放射性的存在,并使观察到的放射性数目增加到了16种.但是,他们排除了 $R_{3.5h}$ 是超铀元素的想法,而设想 $^{238}\text{U} + n$ 通过接连两次的 α 粒子发射这种不寻常方式产生镭的3个同质异能素,然后进行衰变而成为钷的3个同质异能素,又进行 β 衰变而成为钷的同位素.于是,在原来(1937年5月)提出的3个生成超铀元素的过程之外又增加了以下3个过程:



他们于1938年11月发表的论文^[19]标志着“铀疑案”造成的混乱局面达到了顶点.

但是,“物极必反”.哈恩和斯特拉斯曼的下一篇文章^[20](完成日期是1938年12月22日;发表于1939年1月6日),原本是为了“不容怀疑地证认”那些来源奇特的镭同位素而进行的严格检验,却成为否定它们而宣告铀核裂变发现的第一篇历史性文献.在文章第一部分,作者将他们在前一篇文章中建议的3个过程修订成为以下4个过程:



作者随后叙述他们“颇费踌躇地发表”的新实验结果.文章宣称:“我们得出了我们的‘镭同位素’具有钷的性质的结论.”在接着的讨论中,若明若暗地点到了核裂变的概念,说“ $\text{Ba} + \text{Ma}$ [钨]质量数之和, $138 + 101$, 得到了 $239!$ ”文章结尾生动地描绘出了作者在确认核裂变的历史性时刻从核物理旧框框中挣脱出来的惶惑心情:“作为化学家,我们实在应该修订上面给出的衰变纲图,在 Ra , Ac 和 Th 的地方写上 Ba , La 和 Ce 的符号.然而,作为工作十分接近物理学领域的‘核化学家’,我们还不能迈出这么大的一步,因为它违反了核物理的所有以往经验.或许这里有一系列不寻常的巧合给我们造成了假象.”

哈恩在这篇论文发表以前将结果寄给了那时已经流亡到瑞典的原合作者迈特纳.后者和她的外甥弗里施进行了深入的讨论,从物理上确认了铀核在中子作用下分解为两部分的反应形式,并在不久发表在《自然》(Nature)杂志上的文章^[21]中首次使用了“裂变”(fission)这个名词.于是,哈恩和斯特拉斯曼在他们的下一篇文章^[22](发表日期1939年2月10日)中,一改上一篇文章的不肯定的保留语气,开始信心十足地根据核裂变的图像来报道他们的实验结果了.

现在回过头来重看上面这段持续了4年多的历史,在此期间实验上出现的各种疑难自然地消除了.原来观测到的许多放射性其实是核裂变的产物.当时正是因为将这些放射性物质和铀的附近元素(首先是超铀元素)硬凑到了一起,就不可避免地出现了重重矛盾.为了解决矛盾,不得不借助于三重同质异能素以及接连粒子发射那样的奇特假设.后人指出^[6,10],哈恩小组这几年里发表的一系列论文经常是正确与错误夹杂在一起,回过头去解读已不值得.在

则曾于 1934 年指出第 93 号元素可能与稀土元素相似^[26];人们一直到 40 年代才确定 89—103 号元素(96 号后面的元素当时尚未合成)构成一个新的“稀土”系列,即锕系元素,与 57—71 号元素镧系对应,占据周期表中一个位置^[27]。

放射化学方法在 30 年代已经有了很好的发展。不同元素的放射性同位素通常表现为痕量且很快衰变,需彼此分离并借助于载体元素淀积出来,而后再用计数管对核素的衰变率及半衰期进行测定。这里需要依靠化学家的经验,来区分少数非特征地吸附放射性离子的沉淀物和构成晶格一部分的沉淀物;只有在后面这种情况下,载体元素才能够提供有关放射性核素原子序数的一定信息。在证认超铀元素时,根据当时的周期表来看,过渡元素就是合适的载体了。这正是哈恩等人多年寻找超铀元素导致一片混乱的原因所在。

(五)

但是,如上分析的客观历史条件的限制并不足以完全说明人们对待诺达克的论文的那种断然拒绝、不屑一顾的态度,不但没有起码的学术上的意见交换,反而质问“为什么不去自己验证(自己的想法)”,甚至简单武断地斥之以“毫无根据”、“吹毛求疵的批评”、“荒谬”,等等。这里可以看到一些主观的因素在起作用,是很值得认真剖析而引以为戒的。

阿马尔迪曾以“过于保守”来解释费米小组当年对诺达克意见的拒绝。说保守容或有之,但是单纯的保守不能解释费米对于诺达克关于裂变的设想认为是“未经证明”的猜测,并以她“没有亲自去做辐照铀的实验”为怪,而对于泡利(W. Pauli)的也是未经证明的中微子假说(1931 年)却毫不犹豫地接受并且用于构筑他的衰变理论(1934 年)。联系到 30 年代正是核物理在实验上有许多发现、在理论上不断变革的时期,在这种背景下提出这样和那样的新想法(即使是纯粹的猜测),用以启发、开拓思路,更是值

得充分鼓励而不是排斥的事。

科学活动中确实不乏这样的情况:人们看一个意见是否值得重视不是根据意见本身而是以很大权重取决于这个意见是谁提出来的。作为化学家(甚至在学术上出现过差错)的诺达克,提出一个在物理上看来缺乏根据的新见解,想必是难以被一些物理学家们接受的。事实上,人们尽可以不相信铀核裂变;但是,为要严格证明费米小组观察到的 13min 放射性是第 93 号元素,有必要将之与尽可能多(即使不是全部)的已知元素进行比较、证认,这从最浅显的道理来看也是完全正确的。看来费米想要坚持他一贯简洁明快的研究风格,在当时并不完备的核反应理论知识和一位化学家的合理忠告之间宁肯选择了前者,将他们的排他法建立在了恰恰是靠不住的物理基础上面。

在哈恩小组中,迷信理论与迷信权威的思想尤有突出的表现。在这个被人评论为最佳组合的研究集体中,物理学家迈特纳是研究工作的灵魂。她笃信原子核在中子轰击下只能嬗变为邻近核素的教条并坚持致力于超铀元素的寻找。她在组里常以这样的口气对哈恩说:“去你的,你什么物理也不懂。”^[8]斯特拉斯曼回忆起他在 1936 年间有一次做的实验,就曾经观察到过铀经中子照射后生成钡的结果^[29]。当他把数据拿给迈特纳看时,迈特纳让他把数据扔进废纸篓里,并对他说:“从测量中得出什么结果的事还是让我们物理学家来考虑吧!”斯特拉斯曼承认他相信权威,对迈特纳更是特别崇敬^[29]。在迈特纳的思想主宰下,哈恩小组分离和研究的长期限于具有过渡元素性质的放射性成分,并囿于寻找超铀元素的框框,是决非偶然的。只是由于居里与萨维奇实验的激发,才远非自觉地转向碱土及稀土元素载体,而使研究出现了根本性的转机。

在科学史上,新的正确的东西在开始的时候得不到人们承认而被看作是错误的东西的现象是常常发生的。即使像核裂变这样一个对于核理论发展仅有局部意义并不带来革命性变革的观念,从提出到为人们所接受,竟也经历了几

年艰难的路程.从这里可以看到:已经建立起来的理论和公认的权威既可能在科学探索的过程中起到指导和促进的作用,又可能成为束缚与压制科学发展的消极力量,而对于权威与理论的迷信则又对这种消极力量起到了推波助澜的作用.出现这种情况的原因,归根到底,在于传统观念、旧道德因素以及认识论方面的局限.科学工作者有必要自觉地树立起科学的世界观和方法论,敢于向传统和权威挑战,把自己从各种狭隘的限制和盲目性中解放出来.

(六)

从核裂变发现的历史,我们还可以在科学研究的基本态度与方法方面得到其他的启发和借鉴.

自然科学研究必须以实验事实为本,而实验工作者第一位的事是以老老实实的态度来采集实验数据,使之经受得起任何严格的推敲,并且客观无偏地揭示其中的事实真相,然后坚持用实验事实去检验理论,而不是反过来以实验事实去迎合理论.但是实际上,我们经常会遇到本末倒置的现象,并且对之习以为常.这里说一个阿尔伐雷茨(L. Alvarez)举过的例子^[30].许多人知道,弱相互作用中宇称守恒破坏的实验证明是吴健雄(C. S. Wu)等在1957年首先实现的.但是,很少人知道,早在1928年考克斯(R. T. Cox)等曾经报道过他们观察到来自放射源的电子纵向极化的实验结果.那时理论家基于宇称守恒的考虑断定考克斯的结果是不对的;在他们的压力之下,考克斯从此不提这个结果(虽然他并未撤回已经发表的论文).在见诸科学史的众多成功事迹背后,这种因理论“专政”而被扼杀的大小实验成果可能不在少数,当初迈特纳要斯特拉斯曼把他取得的钡的结果扔到废纸篓去就是一例.哈恩小组的教训正是在长时间内他们按照超铀元素假设的要求片面地采集实验数据并竭力将它们纳入旧的核反应理论框框中去.然而,哈恩终究是杰出的化学家,他和斯特拉斯曼以精湛的技术得到的实验数据本

身是准确可靠的.一旦反复确证了裂变产物物的存在时,他们坚持住了尊重实验事实的科学态度.

诺达克关于核裂变设想的遭遇向我们提出了一个应该怎样对待科学想象的问题.科学研究显然是需要想象力的.爱因斯坦说过:“想象力比知识更为重要”^[31].为了延拓已有的知识领域以及用新的知识取代旧的知识,除了实验还需要猜想.一种猜想,不管是谁以什么形式提出,最终要看它是否符合实验事实.一个完整的过程应当是:提出猜想,继之以理论计算及科学推论,而后与实验比较.但是,这整个过程并不必须由一个人来完成.历史上,不少著名的猜测曾经推动了科学前进的过程,泡利关于中微子的假设就是一例.然而中微子假说在提出时仅仅基于衰变中能量守恒的要求,泡利自己既没有作进一步的理论计算,更没有提出任何可以证实中微子存在的实验方案建议.是费米在泡利提出假设的基础上建立了衰变理论,是雷恩斯(F. Reines)和考温(C. Cowan)最后完成了自由状态中微子的实验证明.因此,人们实在没有理由对诺达克提出过分的要求,要求她在提出核裂变设想的同时去作理论上的分析和实验上的验证.

在实验研究人员中间,有时出现一种不恰当的认识.一些人认为:产生重大应用价值成果的研究工作总是可以预先设想和规划的,而花钱愈多的大项目就愈是重要,得到的成果也会愈大.核裂变发现的过程和这种认识形成了鲜明的对照.我们看到,这个具有划时代意义的重大发现并不是一开始就有宏伟目标的,哈恩等人开展研究的起因只是为了弄清中子轰击铀出现的反应产物是否是超铀元素,而工作也只是两三个人利用简单的实验条件以标准的化学与物理方法进行着常常是重复性的实验操作.

诚然,现代科学领域的一些前沿研究需要借助于大型实验设备和复杂的实验条件,以期取得突破性的进展.然而,科学发展的历史经验告诉我们:在很多情况下,常常是一些在当时看起来不起眼的研究工作导致了意义重大的发

物理

现,纯粹基础研究成果的长期积累最终打开通向应用的广阔道路,而刻意追求大的项目却未必总能带来等价的回报.在这个意义上,与实验条件相比,科研工作者的素养是更具根本重要性的.哈恩曾经谦虚地谈到自己幸运地成为核裂变的发现者.确实,在裂变发现过程中,不少人都有机会,但是哈恩之所以成为第一人,他的丰富经验、高超技术以及严格细致、一丝不苟的科学作风被公认是起了决定性的作用的^[7,8].

核裂变的发现已经过去 60 年了.回顾这段历史以及它所提供的生动教训,可以从中得到启发和借鉴,在科研工作中用来端正我们的态度,指导和改进我们的实践.

致谢 感谢王大珩、杨承宗、黄胜年、钱惠进对本文提出宝贵意见.

参 考 文 献

- [1] E. Amaldi, *Phys. Rep.*, **111** - 1—4 (1984), 1.
 [2] E. Fermi, *Nature*, **133** (1934), 898;
 E. Fermi et al., *Proc. Roy. Soc.*, **46** (1934), 483.
 [3] I. Noddack, *Z. Angew. Chem.*, **47** (1934), 653.
 [4] F. Habashi, *Chemistry*, **44** - 2 (1971), 14.
 [5] L. A. Turner, *Rev. Mod. Phys.*, **12** - 1 (1940), 1.
 [6] H. G. Graetzer, D. L. Anderson, *The Discovery of Nuclear Fission*, Van Nostrand Reinhold Company, (1971), 1, 21, 30, 36, 49.
 [7] W. R. Shea ed., *Otto Hahn and the Rise of Nuclear Physics*, D. Reidel Publishing Company, (1983), 91, 135.
 [8] K. Starke, *J. Chem. Educ.*, **56** - 12 (1979), 771.
 [9] R. Rhodes 著,李汇川等译,原子弹出世记(1986 年版),世界知识出版社,(1990), 252.

- [10] E. G. Segrè, *Phys. Today*, No. 7 (1989), 38.
 [11] O. Hahn, L. Meitner, *Naturwiss.*, **23** (1935), 37.
 [12] L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, *Z. Phys.*, **106** (1937), 249.
 [13] I. Curie, H. von Halban, P. Preiswerk, *C. R., Acad. Sci.*, Paris, **200** (1935), 1841.
 [14] O. M. Corbino, *Nuovo Antologia*, **71** (1936), 454;
 E. Amaldi, *Phys. Zeit.*, **38** (1937), 692;
 E. Fermi, in *Nobel Lectures: Physics, 1922—1941*. Elsevier Publishing Co., Amsterdam, (1965), 413, 417.
 [15] I. Curie, P. Savitch, *J. Phys. et Radium*, **8** (1937), 385.
 [16] I. Curie, P. Savitch, *C. R., Acad. Sci.*, Paris, **206** (1938), 906.
 [17] I. Curie, P. Savitch, *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **206** (1938), 1643.
 [18] I. Curie, P. Savitch, *J. Phys. et Radium*, **9** (1938), 355.
 [19] O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.*, **26** (1938), 755.
 [20] O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.*, **27** (1939), 11.
 [21] L. Meitner, O. R. Frisch, *Nature*, **143** (1939), 239.
 [22] O. Hahn, F. Strassmann, *Naturwiss.*, **27** (1939), 89.
 [23] G. Gamow, *Z. Phys.*, **51** (1928), 204.
 [24] N. Bohr, *Nature*, **137** (1936), 344.
 [25] N. Bohr, D. Coster, *Z. Phys.*, **12** (1923), 342.
 [26] A. von Grosse, *J. Am. Chem. Soc.*, **57** (1935), 440.
 [27] G. T. Seaborg, *Man - made Transuranium Elements*. Prentics Hall, Englewood Clifis, N.J., (1964).
 [28] F. Herneck, *Bahnbrecker des Atomzeitalters*, Buchverlag der Morgen, Berlin, (1970), 452.
 [29] F. Strassmann, *Bild der Wissenschaft*, **12** (1978), 84.
 [30] L. Alvarez, *Voice of a Physicist, an invited Commentary*, in *Adventure in Experimental Physics*, Volume (1973).
 [31] 许良英、范岱年编译,爱因斯坦文集第一卷,商务印书馆,(1976), 284.

附录 论第 93 号元素¹⁾

大约 4 个月之前²⁾,在《Zeitschrift fur Angewandte Chemie》期刊上登载了一篇涉及周期表中丢失元素的文章.该文结尾中讨论了发现超铀元素(即周期表中铀以后的元素)的可能性.几周以后,先是在报纸上,随后又在技术刊物上,报道了两位科学工作者(罗马的费米教授和乔姆斯坦尔的考勃立克先生)独立地发现了原子序数为 93 的元素.

我们先来讨论费米的工作.费米研究了利用中子感生放射性的可能性.所谓感生放射性是居里与约里

奥以 粒子轰击原子核而发现的.

费米将铍粉与镭射气(即氦气,第 86 号元素)一起放进一个玻璃容器中.氦气发射 粒子,当其打在铍核上时,中子得以释放出来.中子穿过玻璃容器壁后作用于放在附近的物质材料上.费米将一大批物质材料(包

1) 译自 Ida Noddack, *Zeitschrift fur Angewandte Chemie*, **47** (1934), 653

2) 指 1934 年本文发表前 4 个月

括处在元素状态的和化合物状态的材料),放到中子源近旁进行照射.经过辐照后的物质材料随即放在一个盖革计数管前面.发现许多元素在照射以后一段时间里发射 α 粒子,由此证实了感生放射性.我们不在这里讨论费米对其相当复杂的观察结果所提出的解释方案,我们感兴趣的只是他设想生成第93号元素的一个例子.为了研究铀的感生放射性,费米采用硝酸铀溶液,除去其所有放射性子产物,放到中子源附近.他用盖革计数管证明了溶液在辐照后变成放射性并放射 α 粒子.衰变曲线的分析显示:生成了不止一个而是至少5个不同的放射性半衰期.费米强调,还不能确定各种放射性衰变究竟是顺序发生的还是平行发生的.

费米采用化学方法分离了某一新放射性元素,其半衰期为13min.他的做法是将锰盐及浓硝酸加入到硝酸铀溶液中,然后加热至沸点并添加加酸钠.结果发现所得的二氧化锰沉积物包含了差不多全部半衰期为13min的放射性元素.接下来费米试图证明相应于此放射性的放射性元素不是任何与铀相邻的已知元素的同位素.为此,他将下列元素发射 α 粒子的已知同位素加入到硝酸铀的酸溶液中,它们是:镉(91),钍(90),铀(89),镭(88),铷(83)以及铅(82).如费米所说,当加入加酸钠以沉积二氧化锰时,在沉积物中未见任何发射 α 粒子的此类同位素.鉴于未得证认的新放射性元素是同锰一起沉积出来的,并鉴于从其性质来看不可能是钷(86)或钷(87)的同位素,费米就断定它可能是未知的第93号(或者可能是第94或95号)元素.

这种证明方法是不正确的.费米将新的发射物不仅与铀的紧邻元素即镉进行比较,而且考虑了其他若干元素一直到铅为止.这表明他认为一系列接连的衰变(伴以电子、质子及 α 核的发射)是可能的,这些衰变最终形成了半衰期为13min的放射性元素.不清楚的是他为什么没有研究也处于铀(92)与铅(82)之间的元素钷(84),以及他为什么选择在铅上停下来.那种认为放射性元素组成一个终止于铅或钷(81)的连续系列的老看法正是前面提到的居里与约里奥的实验所否定了的.因此费米理应将他的新放射性元素与所有已知元素进行比较.从分析化学我们知道,许多元素,如果它们以化合物、原子或胶体存在于硝酸溶液中的话,会同二氧化锰一起沉积出来.

为了检验不同的元素在费米的沉积方法中是怎样表现的,我们配制了100cm³的55%硝酸溶液,其中含有几毫克处于不溶解状态或胶体状态的几乎所有稳定元素.在此溶液中加入200mg硝酸锰,加热至沸腾,然后缓缓加入2g氯化钾(干燥).接着将所得二氧化锰沉积物用化学方法及光谱方法进行检验,分析其中是否存在其他元素.检测结果发现沉积物含有下列元素:

Ti, Nb, Ta, W, Ir, Pt, Au 和 Si, 它们在溶液中差不多以全部含量沉淀出来,而 Sb, Pb, Bi, Ni 和 Co 则沉积出部分含量.

如上面所指出的,费米也未曾研究钷(84)是否进入到了锰沉积物中.对镉所做的一个实验表明,这个元素确实几乎全部进入了MnO₂沉积物中.所以,关于新的(13min)放射性元素具有原子序数为93的证明是决非成功的,因为费米采用的排除其他可能性的方法并没有进行到底.

人们可以同样假设:在用中子来产生核蜕变的时候,会出现某些先用质子或 α 粒子轰击原子核时所未曾观察到的全新的核反应.过去人们发现核的嬗变只是通过发射电子、质子或 α 核时发生,因而重元素仅仅稍为改变其质量而形成邻近的元素.当重核受到中子轰击时,人们可以设想核破裂成为若干大的碎块,它们当然是已知元素的同位素而非受辐照元素的邻近元素.

发现新放射性元素与硫化镉一起从酸溶液中沉积出来的事实同样不能说明它就是第93号元素.首先,硫化镉很容易吸收其他物质.其次,有关93号元素性质的预言绝对不能肯定这个元素会形成一种在酸中稳定的硫化物.

此外,如果费米对其实验的诠释是正确的话,那么他没有给出的一个附加的必要结论是元素93的衰变将会生成元素94.这个元素应当相对容易地与元素93在化学上分离开来.

在我们能够宣称元素93真正发现之前,还必须等待进一步的实验结果.如前面所提到的,费米本人对此是谨慎的,但是在一篇涉及他的实验的论文以及见诸报端的报道中,可以说结果已经确凿无疑了.

第二个有关发现第93号元素的报道来自考勃立克.按其报道,他在乔奇姆斯坦尔从焙烧的沥青铀矿的洗矿水中获得了相当数量的元素93...

通过斯佩特博士的介入,考勃立克先生把他的两份样品材料寄给了我,要求就元素93的存在予以研究.化学分析与X射线谱两者均表明他的材料并不含有任何元素93,而是含有银、钷酸铀与钷酸盐的混合物而带有超量钷酸.在被告知这些情况后,考勃立克开始信服钷的存在并撤消了关于发现元素93的说法.这里就没有必要再去讨论考勃立克归因于设想中的新元素的那些反应了,因为它们都可以用钷钷混合物引起的反应得到解释.

不久前(1934年8月11日)来自美国的新闻报道了新泽西州的史密斯与斯坦贝奇成功地找到了原子序数高于铀的元素.但是所能获得的只是若干不太清楚的报纸报道,因此无法知道他们迄今为止做了些什么.