



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

经 典 系 列 · 9

核裂变物理学

重排本

胡济民 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

经 典 系 列 · 9

核裂变物理学

重排本

胡济民 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

核裂变物理学:重排本/胡济民著. —北京:北京大学出版社,2014.8
(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-24560-6

I. ①核… II. ①胡… III. ①裂变—核物理学 IV. ①O571.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 170640 号

书 名:核裂变物理学(重排本)

著作责任者:胡济民 著

责任编辑:王 艳 王剑飞

标准书号:ISBN 978-7-301-24560-6/O·0988

出版者:北京大学出版社

地址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址:<http://www.pup.cn>

新浪微博:@北京大学出版社

电子信箱:zpup@pup.cn

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014 出版部 62754962

印刷者:北京中科印刷有限公司

经 销 者:新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 18 印张 325 千字

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

定 价:54.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系”

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理研究 and 积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20 世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在 2006 年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任

中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010 年 5 月于燕园

前 言

原子核裂变作为利用原子能的基础,在核物理学中备受人们的注意。核裂变也是核体系的一种极端复杂的运动形态。在二十多年前,由于核数据计算的需要,我才开始注意各种裂变现象和理论,此后陆续做了些工作。关于裂变的研究,是在技术物理系原子核理论教研室王正行、郑春开等以及重离子研究所包尚联、樊铁栓等的多年合作以及历届研究生努力工作中完成的,特别是和我妻子钟云霄的长期合作,完成了大部分的研究工作。这里,也要感谢中国核数据中心、国家教委博士点基金和中国自然科学基金对这些研究经费上的支持。

在编写《原子核理论》一书时,在第二卷专门编写了原子核裂变一章,对有关核裂变的知识,做了有选择的介绍。但是由于篇幅的限制,许多重要方面,未能逐一论列;总希望能把重要的实验和理论知识以及一些史实收集编成一书。感谢北京大学出版社提供了这样一个机会。

在本书的写作过程中,也得到我妻子钟云霄的鼓励与协助,并帮助我整理了全部书稿。

核裂变的研究是一个长期的任务,希望本书的出版将有利于进一步开展裂变研究工作,并对其他感兴趣的读者也有所帮助。

作者 胡济民

1997年6月

内 容 简 介

核裂变是核科学的一个重要方面。研究核裂变不仅对国防建设与经济建设有重大意义,而且对原子核内部运动的深入了解也有极大帮助。

本书是作者在 20 多年来对核裂变物理做的许多研究工作的基础上写成的。它比较全面、系统地介绍了核裂变物理学的研究现状、各种理论与模型,并引用了大量的实验事实与理论相比较。由于人们对核裂变的了解还远没有达到完善的地步,因此作者在介绍核裂变理论模型时,也常对理论发展方向做些推测,提出了需要继续深入研究的问题。

本书内容深入浅出,理论比较系统全面,所用公式均有说明或详细推导,适合于核科技研究人员参考和研究生阅读。

目 录

第一章 核裂变的发现	1
§ 1.1 发现核裂变的前奏——人工放射性 with 中子核反应	1
§ 1.2 铀的困惑与裂变的发现	3
1.2.1 罗马实验室的开创性工作	3
1.2.2 德国和法国实验室的后续工作	4
1.2.3 深刻的科学洞察力和精密的实验最终导致裂变的发现	6
§ 1.3 核裂变的机制	8
§ 1.4 链式反应的实现	10
§ 1.5 核裂变研究的意义与内容	14
参考文献	16
第二章 裂变位能曲面	17
§ 2.1 形变参量的选择	17
2.1.1 用球坐标描写的形变参量	17
2.1.2 用柱坐标描写的形变参量(Funny Hills 参量)	18
2.1.3 小形变的描述——轴对称椭球	20
2.1.4 卵形线 (Cassinian Ovaloids)	20
2.1.5 非轴对称形状	21
§ 2.2 液滴模型的位能曲面	21
§ 2.3 有限力程模型	25
§ 2.4 转动核的裂变位垒	29
§ 2.5 位能曲面的壳修正理论	30
§ 2.6 位能曲面的微观计算	42
参考文献	47
第三章 惯性及耗散	49
§ 3.1 液滴模型计算动能	49
3.1.1 无旋液滴的方法	49
3.1.2 Werner-Wheeler 方法	50

§ 3.2 耗散函数的经典模型	52
3.2.1 一体模型	52
3.2.2 二体模型	54
§ 3.3 质量张量的微观计算	55
§ 3.4 转动惯量的微观理论	58
§ 3.5 核的能级密度	60
参考文献	65
第四章 裂变几率	66
§ 4.1 自发裂变	66
4.1.1 关于自发裂变的实验状况	66
4.1.2 自发裂变半衰期的理论计算方法	68
§ 4.2 重离子放射性衰变与冷裂变	74
4.2.1 重离子放射性的发现	74
4.2.2 模型理论简况	74
4.2.3 冷裂变现象	76
§ 4.3 激发核的裂变几率	77
4.3.1 实验情况	78
4.3.2 裂变道理论	79
4.3.3 裂变几率的统计公式(Bohr-Wheeler 公式)	80
§ 4.4 裂变同质异能素 ^[17]	85
4.4.1 裂变同质异能素的发现与测定	85
4.4.2 双峰位垒的穿透几率与共振	86
4.4.3 裂变同质异能态的核谱	90
§ 4.5 位垒参数的确定	94
4.5.1 同质异能态的半衰期	94
4.5.2 裂变同质异能素产生的激发曲线	96
4.5.3 低激发能裂变截面的拟合	101
§ 4.6 理论与实验的比较	106
4.6.1 关于位垒参数计算与拟合值的比较	106
4.6.2 Th 异常和位能曲面第三谷	108
参考文献	111

第五章 裂变后现象	113
§ 5.1 裂变的全过程	113
§ 5.2 碎片的质量和电荷分布的测定方法	114
5.2.1 放射化学方法	115
5.2.2 测定质量的物理方法	115
5.2.3 测定电荷的物理方法	116
§ 5.3 裂变碎片的质量分布	117
5.3.1 铀系区	118
5.3.2 较高激发能的铀系核裂变	122
5.3.3 比 Es 更重的核的裂变质量分布	125
5.3.4 Ra-Ac 核素的裂变质量分布	126
5.3.5 裂变质量数 $A_f = 213 \sim 200$ 核的质量分布	128
§ 5.4 裂变碎片的电荷分布	132
5.4.1 总体电荷分布 $Y(Z)$	133
5.4.2 同质量数碎片的电荷分布	136
§ 5.5 裂变碎片动能	139
5.5.1 裂变总动能的分布及其平均值	140
5.5.2 碎片动能与质量的关系	146
5.5.3 规定碎片质量的碎片动能分布	153
§ 5.6 裂变碎片的角分布	155
5.6.1 低能粒子引起的裂变碎片的角分布	156
5.6.2 光致裂变的碎片角分布	158
5.6.3 高激发态裂变的碎片角分布	160
5.6.4 垒下熔合裂变的碎片角分布	164
§ 5.7 裂变中子与 γ 射线	164
5.7.1 裂变瞬发中子	165
5.7.2 裂变瞬发 γ 射线	176
5.7.3 裂变缓发中子及 γ 射线	179
参考文献	181
第六章 裂变动力学	183
§ 6.1 原子核裂变的动力学方程和裂变碎片总动能的计算	183
§ 6.2 朗之万方程及其应用	184

§ 6.3	Fokker-Planck 方程	186
§ 6.4	一维 Fokker-Planck 方程和 Smoluchouski 方程	190
6.4.1	一维 Fokker-Planck 方程	190
6.4.2	Smoluchouski 方程及其解	191
§ 6.5	裂变几率的近似计算方法	193
6.5.1	Bohr-Wheeler 公式	193
6.5.2	Kramers 公式	195
§ 6.6	裂变后的能量分布与质量分布	199
参考文献		203
第七章 裂变的理论模型		204
§ 7.1	裂变的微观理论	204
7.1.1	HF 近似及时间有关 HF(TDHF) 近似	204
7.1.2	Hartree-Fock-Bogoliubov 方法 (HFB 方法)	208
§ 7.2	裂变的统计模型	212
§ 7.3	裂变的模式理论	216
7.3.1	质量分布与裂变模式	216
7.3.2	多模式裂变的其他证据	219
7.3.3	裂变的模式理论	226
参考文献		233
第八章 其他裂变现象		234
§ 8.1	重离子裂变	234
8.1.1	裂变碎片的质量分布与动能分布	234
8.1.2	裂变与粒子发射	235
8.1.3	线性动量转移	238
§ 8.2	多重裂变	240
8.2.1	轻粒子发射的几率	240
8.2.2	粒子的动能分布	243
8.2.3	轻粒子的角分布	246
8.2.4	轻粒子发射与其他裂变变量的关联	248
8.2.5	稀有的裂变事件	251
8.2.6	轻粒子释放机制	252
§ 8.3	轻核的裂变	254

8.3.1 与发射离子有关的位能曲面	254
8.3.2 裂变几率	256
8.3.3 碎片的动能分布与角分布	257
8.3.4 角动量的影响及碎片的角分布	259
8.3.5 理论的实验验证	261
§ 8.4 介子引起的裂变	266
8.4.1 μ 介子引起的裂变	266
8.4.2 π 介子引起的裂变	268
参考文献	270

第一章 核裂变的发现

20 世纪是科学技术迅速发展的时代,但是,也只有很少几项基础研究的重大发现能像核裂变那样对人类文明和科技进步产生这样迅速而深刻的影响,而发现核裂变的历史又那样错综复杂.从核裂变发现的历史,我们可以看到,一个新事物的出现总是伴随着冲破人们脑子里的旧的概念,而对旧概念的冲破是那么的不易;我们也可以看到,核裂变的发现是许多著名实验室之间的国际合作和不同学科之间通力合作的结果.对发现核裂变的简要回顾,将有助于了解核裂变研究的现状和对其发展的展望.实际上,本书所叙述的,也不过是一部尚未完成的核裂变研究的历史和一些关于发展的推测.

§ 1.1 发现核裂变的前奏——人工放射性与中子核反应

20 世纪 30 年代初,核物理得到迅速的发展.1932 年 2 月, J. Chadwick 在剑桥发现了中子.作为研究手段,较强的放射源已不难获得,盖格计数器已普遍应用,少数几个实验室已有了几种低能加速器.人们对核结构已有了初步的了解,知道核是由质子与中子组成,初步掌握了研究原子核的必要知识与手段.在这种条件下,1934 年 1 月, F. Joliot 和 I. Curie 夫妇在巴黎发现了由 α 粒子引起的人工放射性.他们用 α 粒子轰击 Al 而得到如下的反应:



${}^{30}\text{P}$ 是通过核反应所形成的具有 β 放射性的新核素,它是第一个由人工合成的、在自然界不存在的核素.过去,人们一直认为只有重元素可以具有放射性,而 P 是很轻的元素,是没有天然放射性同位素的. P 是在生物、医学、农业等科技领域里常见的元素,现在它有了化学性质完全相同的放射性同位素.放射性是很容易识别的,可以作为示踪原子,因此, P 的放射性同位素有可能在生物、医学、农业等领域得到广泛应用.发现人工放射性元素在科技界是一件引起轰动的大事.

这时, E. Fermi 对这类核反应产生了很大的兴趣. Fermi 生活的年代,正是物理学处于很富有魅力的年代.他诞生于 1902 年,在 1926 年,他已经在现代物理,特别是在相对论与原子物理方面,发表了不少有份量的文章.这些文章中最重要的是,对由遵从泡里原理的粒子组成的理想气体,考虑了量子化后得出了一种新的统计规律,这规律在几个月后,也被 Dirac 完全独立地得到,这就是著名的 Fermi-

Dirac 统计.

O. M. Corbino 是实验物理的教授、罗马大学的物理系主任. 他非常折服 Fermi 的能力, 在 1926~1927 年, 这学术蓬发的年代开始的时候, 在几位数学家的支持下成功地在罗马大学申请到一个理论物理的讲座, 专门邀请了 Fermi.

Fermi 与 Corbino 联合在罗马建立了一个近代物理学派. 首先, 他们争取到一个新的讲座, 邀请了 F. Rasetti. 他是 Fermi 在比萨大学的同学, 后来成为 Fermi 在佛罗伦萨大学的合作者. 他是一个出色的实验物理学家, 特别在原子与分子光谱方面有着出色的成绩.

由于法西斯的统治, Fermi 在罗马只待了 12 年, 1938 年夏, 公布了种族法律. 虽然不直接影响 Fermi, 但他的妻子 L. Capon 出身于犹太家庭. 结果, 在 1938 年 12 月初, Fermi 带着全家到斯德哥尔摩去领取诺贝尔奖金, 不再回意大利, 从瑞典直接到了纽约, 他已经在哥伦比亚大学获得一个教授位置.

1936 年秋天到 1938 年 12 月, 实验方面在 Rasetti 的协助下, Fermi 在罗马成功地聚集了相当数量的科学工作者, 他们中一半人从事实验, 一半人从事理论工作. Fermi 自己则以惊人的毅力白天做实验, 晚上进行理论研究.

在 Joliot 和 I. Curie 发现人工放射性的最初两篇文章发表以后, Fermi 立刻开始去做类似的工作. 他不是和 I. Curie 一样用 α 粒子去轰击各种原子, 而是用中子去轰击, 观察由中子引起的效应. 中子源用的是 $\text{Rn}(\alpha) + \text{Be}$ 的形式, 基于 Chadwick 所发现的反应:



这里 α 粒子是 Rn 放射的, 这种 $\text{Rn}(\alpha) + \text{Be}$ 中子源每秒能发射 10 兆中子. 他系统地照射各种元素, 当用中子打 F 和 Al 时, 成功地在 Geiger-Muller 计数器上获得几个 β 粒子的记数. Fermi 决定尽快进行这项工作, 于是邀请他的同事与朋友 Rasetti、他的学生 E. Segre、E. Amaldi 等来帮助做这一实验, 后来又请到化学教授 O. D'Agostino, 1934 年 9 月他们的学生 B. Pontecorvo 也加入了他们的集体, 他在 1934 年 7 月刚通过了博士论文考试.

在 1934 年 4~6 月期间, Fermi 领导下的集体进行了以下一系列工作: 用中子照射了 60 个元素, 其中有 35 个元素发现了 44 种不同的放射性. 反应产物中有 16 种的化学性质已被载体沉淀法确定. 照射 Th, 发现了两种以上不同半衰期的放射性; 照射 U, 则发现了 4 种以上不同半衰期的放射性.

用中子照射元素引起的一系列反应通常用这样的符号来表示:



$Z \leq 30$ 的 11 个元素中发现有 6 个 (n, p) 反应和 5 个 (n, α) 反应, 44 个放射性中除去上述的 11 个外, 剩下的 33 个均为 (n, γ) 反应. 他们认为, 除了发射氢核与氦核外, 不可能再有其他核反应能被观察到. 这结论从 Gamow 的位垒穿透理论来看似乎是很合理的, 因为带电粒子从核分离必须穿过库仑位垒, 不可能有比 α 粒子更大的粒子放出. 可是当时没有想到, 正是这种思想在 U 发生裂变的问题上使他们走入歧途.

§ 1.2 铀的困惑与裂变的发现

1.2.1 罗马实验室的开创性工作^[1]

Fermi 领导的研究组, 在获得了以上所说的一系列成功以后, 开始致力于中子轰击 U 的工作. 但这工作首先就碰到了技术上的麻烦, 在 20 世纪 30 年代中子源的强度比较弱的情况下, 要准确地确定反应物的化学性质不是一件容易的事. 因为 U 本身具有放射性, 必须不断地用化学方法清理表面来除去它的衰变产物; 另外还发现中子轰击 U 后出现了很复杂的放射性, 其产物为具有不同半衰期的混合物. 1934 年 5 月 10 日, 他们关于 U 的第一份报告是给《La Ricerca Scientifica》杂志的编辑的信, 信中写道: “U 被中子轰击后出现了好几种不同半衰期的放射性, 一种为 1 min, 一种为 13 min, 另外还有更长的半衰期不能很准确地测定.”

在中子轰击 U 所得的四个放射性中, 他们对半衰期为 15 min 及 90 min 的两个放射性研究得最为详细. 他们发现, 用化学方法能将这两个元素与原子序数从 82(Pb)到 92(U)的元素分开, 而且它们两个也能彼此分开. 按照 Fermi 等对 $Z \leq 83$ 的所有元素研究的结果得出的经验, 他们认为, 这两个元素可能是超 U 元素. 由 (n, γ) 反应, 再经过 β 衰变就能获得原子序数为 93 与 94 的超 U 元素 ${}^{239}_{93}\text{X}$ 与

${}^{239}_{94}\text{Y}$, 即



当时只知道 ${}^{238}\text{U}$ 作为靶子是很自然的, 因为一年以后, Dempster 才发现 ${}^{238}\text{U}$ 的同位素 ${}^{235}\text{U}$. 对半衰期为 15 min 的物质是用 MnO_2 作为载体与 NaClO_2 一起在硝酸溶液中共沉淀得到.

这里, 他们犯了一个可以理解的错误, 他们预期 93 号元素应该与 Re 相似, 当时还不知道锝系族存在, 则 93 号正好排在 Re 下面, 与序数为 43 的 Tc 以及原子序数为 25 的 Mn 同属 VII B 系, 用 Mendeleev 的话说, 为一准 Re 元素, 通常记为 Eka

Re;但实际上,这是裂变的产物,是原子序数为 43 的 Tc 的同位素,当时周期表上 Tc 的位置还空着,3 年后由 Perier 与 Segre 用其他方法发现了 Tc,证明了其性质的确与 Re 很相似。

芝加哥大学 Kent 化学实验室的 V. Grosse 与 Agruss 用同样共沉淀的方法研究未经中子照射的硝酸铀,从他们的实验结果得出,罗马实验室所得到的可能是 91 号元素 Pa,而不是 93 号元素. 因此他们指出要证明是 93 号与 94 号元素必须用其他的化学方法来检验。

新的化学方法很快被罗马实验室所采用,发现两种化学方法都能把半衰期为 15 min 及 90 min 的两种元素与 91 号元素 Pa 分开. 这时,柏林 Dahlem 实验室的 O. Hahn 与 L. Meitner 也开始做这项工作,他们与罗马得出同样的结果. 这使得 Fermi 研究集体更坚定了自己的看法。

在罗马实验室里,他们还曾想中子轰击 U 可以形成短寿命的 α 发射体. 为了验证这一假设,他们把 U 包上铝箔放在电离室里,并用慢中子轰击. 他们设想,对于短寿命的物质,放射的 α 粒子一定能量高,有较长的射程,铝箔挡住由 U 放出的射程较短的 α 粒子,让能量高而射程长的 α 粒子通过铝箔. 但实验失败了,不但看不到穿过铝箔的 α 粒子,实际上铝箔也挡住了由裂变碎片引起的大的电离脉冲,使他们失去观察到裂变的机会. 当然,当时不知原子核会裂变,同样的实验在瑞士与柏林做过,有人说在瑞士确实看到了大的脉冲,但大家不信,以为是探测仪器出了毛病。

罗马实验室证明了中子轰击 U 出现的放射性元素不是 Pb 与 U 之间的元素的同位素,这是正确的. 从这开始,他们试图从复杂的放射性产物中去萃取一单独物质,结果找到一种与准 Re 类似的物质,用的主要反应是 MnO_2 与 NaClO_2 在硝酸溶液中的共沉淀法. 很多年后,在意大利有人用同样的方法得出了 Tc 的同位素,情况与当时一样,可是在 1934 年还不知有 Tc 这个元素,Tc 是裂变产物,而且性质与 Re 是相似的. 当时他们既不知有核裂变,也不知有 Tc,只是感到有些怀疑,因为按照他们的分析,93 号元素应该只占很小的比例,不应该有那么多. 到了 1934 年 6 月,他们有了足够的自信,认为已经发现了超铀元素,就发表了他们的结果. 但作为优秀科学家,总觉得存在某些缺陷,因而也没有给新元素命名;Fermi 还对新闻界对他们的结果大肆宣传感到困惑。

1.2.2 德国和法国实验室的后续工作

正当罗马实验室的工作告一段落,Fermi 转向慢中子的研究时,以 Hahn, Meitner(德国)和 I. Curie(法国巴黎)为首的两组人马进入了对 U 的研究,这都是在核物理和核化学方面取得巨大成就的工作队伍. Hahn 是著名的核化学家,是