

实验反应堆物理学

A. E. 普罗菲奥 著

原子能出版社

内 容 简 介

本书概括了实验反应堆物理的主要方面，选材较全也较新，重点放在阐明各问题的物理特性。为便于读者自学，用七章篇幅介绍了核辐射测量方面的基础知识。从第九章起较为详细地论述了慢化剂装置、次临界装置、临界装置和进行反应堆物理实验的各种方法。可作为高等学校的教学参考书，也可供从事反应堆实验和运行以及核辐射测量方面工作的科技人员参考。

A. Edward Profio

EXPERIMENTAL REACTOR PHYSICS

John Wiley & Sons, Inc., 1976

实 验 反 应 堆 物 理 学

A. E. 普罗菲奥 著

徐济璠 刘竞成 译

杨钧陶 罗璋琳 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷二厂印刷

(建国门外郎家园)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 ¹/₁₆·印张 26¹/₂·字数 630 千字

1980年12月第一版·1980年12月第一次印刷

印数 001—2,000·统一书号: 15175·261

定价: 3.75 元

前 言

本书是为核辐射测量学和核反应堆物理学方面的毕业生或高年级学生而写的，也可作为从事反应堆物理学实验工作、反应堆运行工作或者分析和使用反应堆测量结果的专业科学工作者和工程师的参考书。由于设备和教师教学思想的差异很大，而且本人希望强调普遍的方法和裂变反应堆及慢化剂的中子行为的物理学，所以避免写成实验手册。本书收集了广泛分散在政府报告和杂志上以及在少量专题论文或绝版书内的材料。也概括了我的同事们的原始资料以及我自己关于脉冲源方法、能谱测量、指数装置、临界装置、研究反应堆和加速器等方面的原始资料。

本书对那些没有什么理论和数学基础的读者应是能够接受的，虽然事先或同时学习核物理学和反应堆理论会有帮助。对理论结果一般不作推导性叙述，仅在为理解实验和解释结果所需要时才进行说明。所作的极大部分分析是用近似扩散理论体系，如由拉马什 (Lamarsh) 著的核反应堆理论教材中所详细阐明的理论，但是我已努力指出何处更精致的分析是必要的。书中既介绍了有关先进处理方法的参考书，也介绍了实验论文。虽然实验中许多内容同样适用于快中子反应堆和热中子反应堆，但我在编入慢化剂和热中子反应堆的经典结果的同时，也编入了取自快中子反应堆物理学方面最新研究的方法和测量。

● 本书以历史回顾和引言作为第一章。随后的七章，即第二章到第八章可在核仪器和放射性测量方面的实验课程内学习。第二和第三章复习放射性、辐射与物质的相互作用、统计学和其它基本知识。反应堆物理学方面的大多数实验都涉及中子源、实验装置、辐射探测器和处理探测器信号的电子学系统。第四章论述源，第五章论述探测器，第六章论述核电子学。第七章介绍基本的中子测量：源强、通量密度、能谱和反应率等的测定。第八章涉及活性和截面测量。第九章到第十二章详细地论述实验装置：慢化剂装置、次临界装置和临界装置或反应堆，以及在这些装置上所做的测量。所有的实验人员都应熟悉概括在附录中的放射性辐射安全标准和操作。

在整本书内，我努力突出问题的物理方面，并强调估计被测物理量的平均值及其误差的重要性。假如没有指出误差，那么别人很难评价测量的价值或将它与计算比较。学生应该懂得，好的、记载完整的实验数据会比许多理论更能经久。还有，时时出现着新的发展，衷心地希望学生们及时掌握期刊文献上发表的新内容。

我向斯坦福大学的鲁道夫·谢尔 (Rudolph Sher) 教授表示感谢，他对我提出了有益的批评和鼓励。我的秘书多年来一直对我有很大帮助，尤其是谢里·塞尔曼 (Sherry Sellman)、兰塞·菲什 (Lancia Fish) 和罗森马赖·基塞尔 (Rosemary Kissel)。托德·斯蒂尔 (Tod Still) 在打照相制版的原稿方面做了突出的工作。我向我家属的大多数：珍妮特 (Janet)、克里斯 (Chris)、克劳迪娅 (Claudia) 和修宰 (Suzy) 在这本书的写作过程中表现出的耐心，表示赞赏。

加利福尼亚州，圣巴巴拉

A.E. 普罗菲奥

1975年10月

目 录

第一章 引言	1
1.1 放射性衰变中释放的核能	1
1.2 中子的发现	1
1.3 早期的中子实验	2
1.4 裂变的发现	5
1.5 链式反应	7
1.6 铀和第一批反应堆	10
1.7 铀-235和铀-233	15
1.8 反应堆物理学的任务	18
第二章 核粒子及其与物质的相互作用	21
2.1 粒子和核	21
2.2 粒子场的描述	21
2.3 产额和截面概念	23
2.4 重带电粒子和物质的相互作用	26
2.5 电子和物质的相互作用	32
2.6 γ 射线和物质的相互作用	37
2.7 中子的性质及其与物质的相互作用	44
2.8 反应力能学	57
2.9 共振	62
2.10 热化现象.....	66
第三章 放射性衰变及统计学	75
3.1 放射性衰变	75
3.2 中子激活	80
3.3 放射性同位素源	82
3.4 核过程中的统计学	85
3.5 符合校正	91
第四章 中子源	96
4.1 放射性同位素中子源	96
4.2 粒子加速器.....	100
4.3 产生中子的核反应.....	109
4.4 研究反应堆.....	115
第五章 辐射探测器和剂量计	130
5.1 探测原理和剂量学.....	130
5.2 气体电离探测器.....	137
5.3 半导体探测器.....	145
5.4 闪烁探测器.....	150

5.5	激活探测器	157
5.6	热释光剂量计	161
5.7	核乳胶	162
第六章	核电子学	166
6.1	核电子学系统	166
6.2	脉冲计数系统	167
6.3	能谱测量系统	169
6.4	定时系统	174
6.5	脉冲形状甄别系统	176
6.6	直流系统	178
6.7	脉冲成形和传输	181
6.8	线性脉冲放大器	187
6.9	甄别器和时间择取	196
6.10	逻辑电路	201
第七章	基本测量	207
7.1	源强测量	207
7.2	箔片激活法测量通量密度	211
7.3	用中子计数法测量通量密度	221
7.4	用飞行时间法测量中子能谱	229
7.5	核反应展开法测量中子能谱	236
7.6	反应率	244
第八章	活性、剂量和截面的测量	250
8.1	活性测量	250
8.2	γ 射线探测器的效率	254
8.3	剂量和屏蔽实验	257
8.4	截面测量	261
第九章	慢化剂实验	267
9.1	年龄实验	267
9.2	扩散长度实验	274
9.3	扩散系数和反照率实验	282
9.4	调制源实验	291
9.5	慢化时间和热化时间实验	304
第十章	次临界实验	314
10.1	次临界增殖实验	314
10.2	指数实验	318
10.3	α 衰减实验	326
10.4	反应堆噪声	337
10.5	与时间相依的能谱实验	341
第十一章	临界实验	346

11.1	临界研究室的设计	346
11.2	临界质量实验	349
11.3	通量密度和价值实验	357
11.4	动态实验	366
11.5	控制棒刻度	375
11.6	反应堆动力学	377
第十二章	反应实验	386
12.1	热中子反应堆的栅元参数	386
12.2	热中子反应堆能谱测量	402
12.3	快中子反应堆参数	404
12.4	快中子反应堆能谱的实验	407
附录	实验室辐射安全	415

第一章 引言

1.1 放射性衰变中释放的核能

1896年亨利·贝克勒尔在一次试图寻求伦琴阴极射线管发射的x射线与荧光之间关系的实验中，偶然地发现了铀的辐射性质。他的x射线探测器是一种包有黑纸的照相底片，实验时将荧光化合物放在底片上置于阳光下受紫外线照射，然后检查冲洗后的底片是否变黑。被试验的化合物之一硫酸钾铀酰使底片变黑了，那时以为神秘的x射线就是一种荧光辐射。但是有一天，虽然连续的阴天影响了正常曝光，贝克勒尔仍如往常一样冲洗底片，底片也变黑了。他还证明了此效应仅是铀本身的性质，与铀的化学状态无关，因而也与荧光毫无关系。耐人寻味的是铀矿物的荧光帮助人们在野外鉴定这种矿物的存在。

人们发现，和x射线一样，铀辐射会引起静电放电，这是因为它能使空气电离从而使其导电的缘故。玛丽和皮埃尔·居里在他们的静电计内应用了此原理，发现钍也有放射性。居里夫妇对沥青铀矿物进行了一系列化学分离和电离测量，发现了两种新元素并命名为钋和镭。从那以后，在铀和钍的矿物中发现了大量放射性核素，它们都是铀-238、铀-235和钍-232的衰变产物。

欧内斯特·卢瑟福将铀的辐射按照它们的穿透本领进行了分类： α 射线，是一种强电离粒子，用一层薄纸就可把它挡住； β 射线，要用几毫米厚的铝片才能挡住； γ 射线，可以穿透几厘米厚的铅板。电磁偏转实验表明： α 粒子带正电，不容易偏转； β 射线带负电，较容易偏转； γ 射线不带电，笔直地穿过电磁场。根据荷质比和实验中收集到的氦气（用光谱分析法测定）证实了 α 射线就是 ^4He 离子。 β 射线是电子。晶体衍射实验证明 γ 射线象x射线一样，是一种波长极短的电磁辐射，不同的是 γ 射线来自核跃迁，而x射线来自核外电子云的跃迁或来自带电粒子的减速（轫致辐射）。

后来又陆续地发现了一些其它类型的放射性衰变：正 β 衰变、电子俘获、同质异能跃迁、内转换和自发裂变。各种类型放射性的特性将在第三章进行论述。

从某个未知源释放能量、产生新的放射性物质和存在氦气等物理现象，使卢瑟福和索迪（Soddy）认为放射性是由一种核自发地转变成另一种核的反应过程。他们力图加速或延缓这个过程，但是没有成功。虽然人类有了这种由核转变提供的新能源，但是天然核素衰变时的能量释放率太小，没有工艺开发价值（每居里约30毫瓦）。直到发现了铀的中子裂变链式反应，才有可能使开发丰富的核能变为现实。

1.2 中子的发现

1930年博思（W.Bothe）和贝克尔（H.Becker）利用钋发射的5兆电子伏的 α 粒子去轰击铍、硼和其它轻元素，他们用尖端式盖革计数管（一种对 γ 射线灵敏的探测器）探

测到一种贯穿辐射。艾琳和弗里德里克·约里奥-居里利用一个强得多的钋源（100 毫居里，而博思和贝克尔的仅几个毫居里），进一步研究了铍的辐射现象。约里奥-居里夫妇使用充气的薄壁电流型电离室，这种电离室恰好既对带电粒子灵敏，也对 γ 射线灵敏。借助测量辐射通过铅后的衰减，他们证实了存在一种能量为几个兆电子伏的 γ 射线，此能量高于当时已经观测到的天然放射性衰变中所释放的任何 γ 射线的能量。根据能量强的辐射可以引起核转变的假设，他们将各种物质制成的箔片放置在源和探测器之间进行试验，希望观察到次级辐射。大多数物质几乎没有发生什么作用，唯有石蜡使电离室的电流增加了一倍。约里奥-居里夫妇确认这是由能量大约为 5 兆电子伏的反冲质子引起的，并猜测该质子是由高能 γ 射线（50 兆电子伏）的康普顿散射击出的。但是这样高的能量又很象是由铍和 α 粒子发生反应时放出来的，并且反冲质子产生率比克莱因-仁科关于康普顿散射理论的预示值大得多。

1932年在剑桥大学卡芬迪希实验室(the Cavendish Laboratory)工作的詹姆斯·查德威克 (James Chadwick) 证明了铍辐射引起的次级贯穿辐射是一种新的基本粒子，并命名为中子。图1.1是查德威克使用的实验装置。图中左边的小室内，安放了一块涂钋的银片和一块直径为 2 厘米的铍圆片，右边

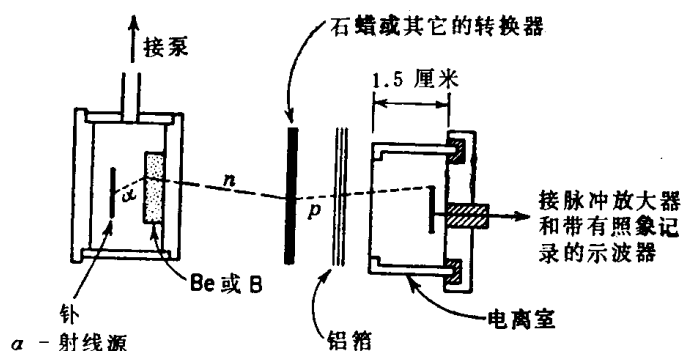
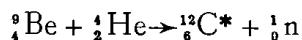


图1.1 发现中子时用的实验装置

钋源释放的 α 粒子轰击铍片而释放出中子，该中子在位于右侧的电离室内导致气体原子反冲，或在石蜡转换器内形成反冲质子，因而被探测到（引自 R. D. Evans, *The Atomic Nucleus*, McGraw-Hill, New York, 1955）。

而且能够探测到从锂、铍、硼、碳和氮发射的次级辐射。测定它们的射程和能量后，证明计数是由上述各物质的反冲离子引起的。用一束单能 γ 射线的康普顿散射无法解释此能量转移关系。相反地，测量值与质量大约等于质子质量的一种粒子之弹性散射一致。此粒子必须是中性的，这样才能解释其巨大的穿透本领。于是 α -Be 反应应为



反应式中 C 右上角的星号表明碳核处于激发态，它发射曾由博思和贝克尔观察到的、几个兆电子伏的 γ 射线。

和一块直径为 2 厘米的铍圆片，右边是一种原为研究 α 粒子引起的人工衰变而发展的脉冲电离室，电离室与一个刚发明的线性脉冲放大器连接，然后接到带有照象记录的示波器。此装置的优点是能够探测到单个致电离粒子，而且可以按照示波器的偏转幅度大小来定量测定粒子在室内释出的能量。查德威克将各种物质制成的箔片分别置于源和探测器之间，并在探测器内充以不同的气体，因而他不但能够探测到从氢发射的次级辐射，而且

1.3 早期的中子实验

二十世纪三十年代是核物理飞跃发展的时期。在发现中子的同一年，卡尔·安德森 (Carl Anderson) 在宇宙射线中发现了另一种基本粒子——正电子。考克饶夫特 (J.D. Cockcroft) 和沃尔顿 (E.T.S. Walton) 利用一个高压加速管和电压倍增器成功地实现了由加

速器产生的第一个核反应，即 ${}^7\text{Li} (p, \alpha) {}^4\text{He}$ ，它的质子能量为600千电子伏，束流为5微安。E.D. 劳伦斯和利汶斯顿 (M.S. Livingston) 用回旋加速器也证实存在这一核反应，并且将反应扩展到了更高能量。1934年约里奥-居里夫妇进行用钋发射的 α 粒子轰击硼的实验时，发现了一种新的放射性——氮-13的正电子衰变。这是第一批产生中子的那些反应中的一种反应，但是那时没有观测到这种伴随的延迟辐射。

罗马大学的恩里科·费米及其同事们，根据中子具有较长的射程和不受库仑势垒排斥的特性，预见到中子应比质子或 α 粒子更易引起核反应。他们将50毫居里的氡渗透在铍粉中，然后封入一支玻璃管内，制备成一个中子源（后来制备成一个800毫居里的中子源）。做了一个长为5厘米的圆柱形薄壁盖革-弥勒计数管来探测 β 辐射。费米、埃米利奥·西格雷 (Emilio Segrè)、爱德华多·阿马尔迪 (Eduardo Amaldi)，后来还有拉塞蒂 (F. Rasetti) 和化学家达戈斯蒂诺 (O. D'Agostino) 商定从氢开始按元素周期表系统地进行试验。他们将待测的物质用中子源照射几个小时，然后很快地移到 β 计数管进行测量。试验到氟时终于第一次观测到中子引起的放射性，接着又有约40个元素被活化。大多数情况下，使用了化学分析法鉴定这些放射性核素。原子序数比靶核小1或2的一些轻元素产物，可用 (n, p) 或 (n, α) 反应进行解释，与靶核化学性质相同的一些辐照产物可用 (n, γ) 反应即辐射俘获解释。而且还观察到了中子转变成一个质子和电子的负电子 β 衰变反应。负电子 β 衰变过程中，核的中子数减少1而质子数或原子序数 Z 增加1。

最后罗马研究小组用中子源照射除去了放射性子代产物的铀，他们观测到了半衰期分别为15秒、40秒、13分和100分的四种放射性。一些化学测试表明此类放射性无法归因于原子序数处于86到92之间的任一个元素，也不可能来自铋或铅，他们推断产生了超铀元素 ($Z > 92$)。我们现在知道这个推断是正确的，但是那时他们观测到的放射性并不是超铀元素，而是裂变产物。

1934年庞蒂科沃 (Pontecorvo) 和阿马尔迪 (Amaldi) 在力图确立一种定量测定活性的标准几何条件时，发现了活化强度与周围环境条件有关，甚至与桌子的结构成分也有关系。对铅进行了一些初步试验后，费米建议他们试用一种轻物质——石蜡进行试验。置于石蜡内的中子源使银箔活性增加了10到100倍，而铅对活性几乎没有什么影响，这使他们大为惊奇。于是又决定将中子源浸于大量水内，观测常见元素氢是否是上述现象的原因所在。为了方便，在试验中利用了物理大楼后院的金鱼池，活性确实又大大增加！费米认为这是由于中子与氢碰撞发生减速或慢化，而能量减弱后的中子与银发生 (n, γ) 反应的截面会增加。但在带电粒子引起的反应中，由于库仑势垒的作用使反应截面随能量减少而减少。图1.2是比杰格 (T. Bjerger) 和韦斯科特 (C. H. Westcott) 稍后所做的一些测量的结果。图 a 所示的实验布置中，银活化探测器 D 布置于中子源 S 周围，然后将整个装置浸于充有慢化剂为普通水的球形桶 M 内，桶的外径可以改变。起初活性随桶半径 r 之增加而增加，当 $r - r_0$ 约为8厘米时活性饱和；图 b 所示的实验布置中将涂硼电离室布置于桶外，它的计数率也随半径 r 之增加而增加，当水层厚度达8厘米时活性达到饱和，然后随着水层厚度增加，计数率反而因快中子衰减而减少，因为这些快中子就是电离室探测到的慢化中子的中子源。

费米计算后指出：平均来说中子大约经20次碰撞后到达热能区 (~ 0.025 电子伏)，这样活性可能会随慢化剂温度变化而变化。由于慢化剂内中子通量密度之变化和探测器俘获

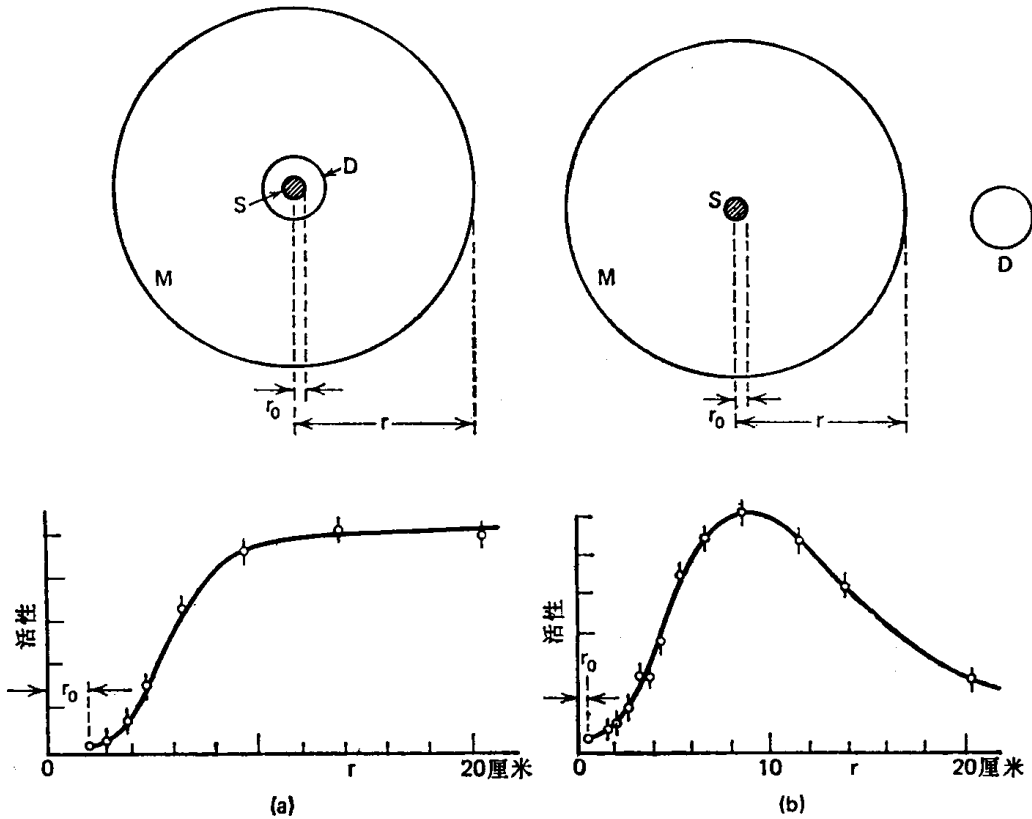


图1.2 慢中子活化实验 [引自 T.Bjerge and C.H.Westcoff, Proc. Roy. Soc. London 150, 709, (1935)]

S: 中子源; D: 探测器; M: 慢化剂。

截面的变化彼此相反而互相补偿, 使最初的一些实验没有立刻证实这个论断。稍后, 由一些激活测量、一些用移动的慢化剂所进行的实验 (包含有多普勒效应) 和用速度选择器所做的能谱测量均表明了俘获截面小的慢化剂内中子确实到达热能。象镉这样一些元素的活化对中子能谱敏感, 因而对慢化剂的温度敏感, 因为它们的截面当中子能量小于 1 电子伏时变化极大。

银、铯、碘和其它吸收体和探测器的透射测量表明这些核素有选择地吸收处于某些特定窄能带内的慢中子。当同一物质既作为吸收体又作为探测器时观测到了极大的中子衰减率, 这是选择性吸收的最初例证。早已指出镉是良好的热中子吸收体, 当使用包镉探测器进行透射测量时, 衰减效应更为显著。散射测量和活性的空间分布测量指出在每一个能带内选择吸收区非常窄小。玻尔以及布赖特和维格纳用复核概念解释这一现象, 他们认为这种复核处于一种寿命比较长的亚稳激发态, 按照测不准原理, 应有一个相当狭小的能带宽度。这种截面共振现象将在第二章进行论述。

研究了慢化剂内热中子的扩散现象, 并从气体扩散现象类推而发展了一种理论。由测量慢化剂-空气边界附近的中子通量密度确定了中子平均自由程和扩散系数, 还测定了从慢化剂表面射出的中子的角分布 (用以解释边界处通过箔片的衰减现象), 以及慢化剂的反射系数即反照率。费米引入了一个年龄概念来定量地表征中子从源到慢化到热能时所经过的距离, 这将在第九章中论述。用年龄这个名词是从下面的一个说法想像出来的: 一个船长的年龄可从他的船上的桅杆长度来估计。从上可见, 中子物理学, 至少是慢中子物理学, 在二十世纪三十年代已经发展得相当完善。1938年12月费米因其中子研究成就获得了

诺贝尔物理学奖金。

1.4 裂变的发现

在研究热中子轰击铀后形成的放射性核素过程中，人们终于发现了裂变反应。当时按照周期表对所怀疑的超铀元素进行化学分离，图 1.3 是一份最新的元素周期表。在二十世纪三十年代，人们并不知道有一个对应于镧系 ($Z = 57-71$) 的锕系 ($Z = 89-103$)，那时元素钍列于第 IV 族，镤列于第 V 族，而铀列于第 VII 族并估计它的化学性质类似于锰和铕。在放射化学中，对于微量放射性物质，往往加入几毫克相同元素或相似元素将放射性物质载带进入沉淀相中，如果不是同一种元素，则马上可以设法使该放射性物质与载体分离。费米及其同事们曾用锰做载体，但由于许多元素都可和锰一起沉淀下来，所以他们关于该沉淀的放射性物质或许是超铀元素的结论遭到怀疑。

在柏林威廉皇家研究院工作的莉泽·迈特纳 (Lise Meitner)、奥托·哈恩 (Otto Hahn) 和弗里茨·斯特拉斯曼 (Fritz Strassmann) 等的研究工作证明半衰期为 23 分的 β 放射性是因铀-238 俘获中子后形成的铀-239 所释放的。他们认为别的放射性是一些超铀元素引起的，但是当时未能证实。同时期，巴黎镭研究所的 I·约里奥-居里观测到一种半衰期为 3.5 小时的新放射性元素与镭载体一起沉淀下来，他推断这是镭的一种同位素。哈恩和斯特拉斯曼发现了与钡载体一起沉淀的放射性元素转而衰变成和镭一起沉淀的放射性元素。他们认为钡载体的放射性元素为镭的同位素。虽然如由铀变成镭，就必须发生 ($n, 2\alpha$) 反应，而这种反应是难以设想的。但是，仅从三个铀同位素 (234, 235 和 238) 产生如此多的放射性同位素是不可思议的。最后哈恩和斯特拉斯曼经过辛勤努力，采用分步结晶法，仍然没有从钡载体中分离出所设想的“镭”，随于 1938 年 8 月 22 日发表了一篇文章，断定此放射性物质实际上就是钡，所以它必然衰变成镭。迈特纳和奥托·弗里希 (Otto Frisch) 迅即指出这是由复核分裂成两部分的一种反应造成的，它类似于生物细胞的再生过程中的分裂，被命名为裂变反应。

迈特纳和弗里希根据裂变前后核的质量差计算出裂变反应过程中会释放 200 兆电子伏的能量，与化学反应能 (几个电子伏) 或者甚至与普通的核反应能 (几个兆电子伏) 相比较，这是一种巨大的能量。弗里希用中子照射载铀电离室观测到了这些预期的大脉冲。几年前有人曾做过类似的实验，奇怪的是没有立即发现裂变。因为铀的放射性本底太强，为了消除 α 粒子的干扰，通常用箔片 (例如 0.001 厘米厚的铝片) 将铀覆盖起来，这样一来箔片也就挡住了裂变碎片。在那个时期，探测器噪声大，可靠性也不高，因此每当忽略覆盖箔而探测到这些大脉冲时，总认为探测器工作不正常。

特纳 (L.A. Turner) 在《近代物理学评论》 (the Review of Modern Physics) 上发表一篇文章，评论了到 1939 年 12 月为止的裂变研究现状。那时，已经用电离室和量热计测定了裂变释放的能量，已用捕集技术将裂变碎片与铀和其它超铀元素的产物分开，也就是使从铀涂层发射的裂变碎片阻留在箔片内或气流中。利用化学方法鉴定了从钍到镭等裂变产物。发现钍可以由快中子引起裂变，而铀既可由快中子也可由慢中子引起裂变，从理论上推断，此慢中子裂变应归之于稀少的铀-235 (0.71%) 而不是铀-238 (不久就由质谱仪分离得到的同位素的试验测量中得到证实)。重元素的中子-质子比大于中等元素的中子-

族

	0	I	II	III										IV	V	VI	VII	VIII			
1		1H																			
2	2He	3Li	4Be		5B									6C	7N	8O	9F				
3	10Ne	11Na	12Mg		13Al									14Si	15P	16S	17Cl				
4	18Ar	19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni			29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	
5	36Kr	37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd			47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	
6	54Xe	55Cs	56Ba	57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb	71Lu			
7	86Rn	87Fr	88Ra	89Ac	90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf	99Es	100Fm	101Md	102No	103Lw			
				81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Po	87At	88Po	89At	90Po	91At	92Po	93At	94Po	95At	96Po	97At	98Po

图1.3 元素周期表

质子比，所以预计裂变产物将会发射负电子，还可能发射自由中子而回复为稳定态。

1939年汉斯·冯·哈尔邦(Hans von Halban)、F.约里奥-居里和卢·科瓦尔斯基(Lew Kowarski)在第一个次临界实验中证实了裂变反应过程中伴随释放出中子。他们将 Ra- γ -Be 光中子源放入大体积的硝酸铀酰溶液中，又放入一个具有相同氢密度的硝酸铵溶液中。用激活镓箔来测量热中子空间分布，活性在整个溶液体积的积分应正比于各种源发射的中子数之和。比较各测量结果后证明硝酸铀酰溶液也在产生中子。Ra- γ -Be 源的光中子能量太低，不能形成 $(n, 2n)$ 反应，因而中子数的增加决不是 $(n, 2n)$ 反应的贡献，而一定是裂变反应的贡献。后来的测量证明每次裂变产生 2—3 个中子。

捕集技术测量表明铀核在吸收中子后的很短时间内即发生裂变，计数实验表明大多数中子在裂变瞬时发射，但一小部分中子(约为 1%)是在断开中子束流以后释放的，这些缓发中子衰减的半衰期为 3 到 45 秒。使用阈探测器活化法和记录反冲核的方法大致测定了裂变中子的能量，其平均值约为 1 兆电子伏。从此，研究链式反应的可能性成为铀研究领域中最令人鼓舞的课题。

1.5 链式反应

放能裂变反应过程中放出多于一个中子的现象使人们立即联想到可以实现链式反应。在这种反应过程中，次级中子又会引起铀核裂变同时释放出更多的中子，使反应持续不断地进行下去。人们知道这种反应可能进行得异常迅速并释放出巨大的能量。然而，1939年时所能得到的反应截面或者反应几率太不可靠，以致无法预示究竟能否实现链式反应。

那时已在哥伦比亚大学工作的费米，试图利用慢中子和天然铀实现链式反应。那种冯·哈尔邦型试验看来已无很大前途。现在大家知道对于普通水天然铀系统，由于氢容易俘获热中子，无法实现链式反应。虽然 H/U 比减少可使氢俘获中子几率减小，但中子散射到共振能以下的几率亦减小，使铀-238 的寄生俘获增加，故仍然无法实现链式反应。与费米一起工作的利奥·西拉德(Leo Szilard)建议用纯碳(石墨)代替普通水做慢化剂，并提议将铀制成块状，使共振吸收比热吸收减少得更多。差不多在同一时期德国的哈特克(Harteck)和海森伯，法国的冯·哈尔邦、约里奥-居里和科瓦尔斯基也提出了采用铀块的设想，但是他们认为石墨吸收中子太强而采用重水做慢化剂。

如果实现了链式反应，便有可能利用它来制成核弹或设计用于潜艇的新动力源，这些可能的军事应用使西拉德不愿公开发表铀的研究工作，而且自愿将研究“保密”。1940年夏天，美国的保密政策生效。与此同时，费米、维格纳及其他学者多次提醒美国政府，并要求拨款资助用石墨和铀进行大规模实验。

石墨是否具有小的中子俘获截面对试验成败起决定作用。在一个西格马(Σ)柱测量装置内测定了当时能搞到的最纯石墨的慢化和俘获性质。 Σ 柱是一个用镅皮包覆起来的石墨棱柱，尺寸为 $122 \times 122 \times 152.5$ 厘米³，一端布置了一个镅-铍中子源。用包镅和不包镅箔的激活测定共振中子和热中子的空间分布。正如第九章所指出的那样，热中子密度随着离源距离的增加按指数规律减少，其指数衰减率与逸出边界的中子数、中子散射截面和俘获截面等有关。实验发现石墨的热中子俘获截面仅为氢的 1%，这就更加鼓舞人们去实现链式反应。

铀-238的共振吸收是另一个重要因素。在1941年和1942年，爱德华·克伦茨 (Edward Creutz) 及其同事们测定了直径为2.25—8英寸的包镉铀球的吸收。他们将铀球放入一个大石墨块内接受中子照射，中子来自普林斯顿回旋加速器，利用β计数管记录铀-239的活性。实验结果表明随着铀球直径增加，每个铀核的共振吸收减少，但是铀-235的热中子裂变也减少，因而必须选择一个恰当的直径。另一方面，实验证明共振吸收随温度增加而增加，使人们推测此效应将会有助于控制链式反应。

将链式反应装置设计成一个由嵌有铀球的石墨块组成的有规则栅阵，或称栅格。必须尽一切努力减少中子损失，因而要求提供大量高纯致密的材料以及确定圆球的最佳尺寸和间距。增殖系数 k 可以定量地衡量一个装置接近自持链式反应的程度，其定义为一个初始中子产生的平均第二代中子数。于是 k 个第二代中子就产生 k^2 个第三代中子，如此继续下去，其中子总数应为 $1 + k + k^2 + k^3 + \dots$ ，这一过程称为中子增殖。如果 $k < 1$ ，此级数收敛于 $1/(1-k)$ ，这时原始中子虽然增殖了，但一旦取走外中子源（非裂变中子源）反应就会停止，这样的装置称为次临界装置；如果 $k > 1$ ，级数发散，即使取走外中子源，反应仍会继续进行且中子也继续增加，这时装置处于超临界；如果 $k = 1$ ，装置处于临界，此时一旦有一个中子进入装置，便被保存下来，其泄漏（逃逸）和寄生吸收损失的中子数恰好等于裂变产生的中子数。

如果增大装置尺寸，中子泄漏就减少（如果装置密度不变），因而对一给定的栅格布置，可用增加栅元（或称栅格，即铀块和慢化剂的组合体）数的方法来求得临界大小和相应的临界质量。

在1941年和1942年，费米、赫伯特·安德森 (Herbert L. Anderson)、沃尔特·津恩 (Walter H. Zinn) 和他们的同事进行了29次指数实验来测定各种铀-石墨栅格的增殖系数。所用的指数实验装置类似于Σ棱柱，但是研究对象为铀-石墨栅格而不是纯慢化剂。图1.4是第一个指数实验装置，8英寸氧化铀立方体栅元的中心距为16英寸，源S是2克Ra-Be中子源。图内也标出了布置探测箔片的槽孔位置。无限大栅格装置的 k 即 k_{∞} 为0.87，如果提高石墨的密度和纯度，设计更好的栅格布置预计可使 k_{∞} 增加到大于1。大多数指数实验是当费米研究小组从哥伦比亚迁往芝加哥后，在芝加哥冶金实验室完成的。

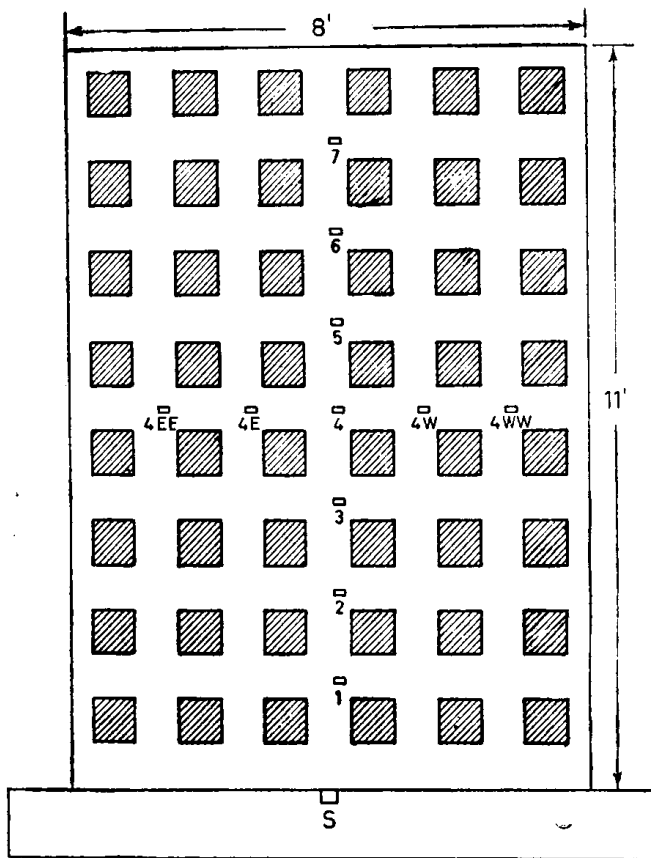


图1.4 石墨-铀栅格指数实验装置1号[引自 H.L. Anderson, B.T. Feld, E. Fermi, G.L. Weil, and W.H. Zinn, Report C-20, March 26, 1942, in Collected Works of Enrico Fermi Vol. II., E. Segre (Ed.), Univ. of Chicago Press, Chicago, 1962]
阴影块为边长8英寸氧化铀立方体，S 为中子源，带有标号的槽孔供布置探测箔片。

直到1942年10月，才得到了为组合一个链式反应堆所需的充裕材料。那时所以命名为“堆”*是因为该装置由许多层石墨组成，而且含有铀块的石墨彼此堆垒。当时仅有六吨可用的金属铀，被浇铸成许多圆柱体。圆柱体的直径为2.25英寸，重为6磅，布置于堆的中心区域。在其余栅格中，布置了由二氧化铀粉末压制成的准球形体，直径为3.25英寸。基本栅元每边长8.25英寸。最纯的石墨用于装置中心区域，其外布置次纯石墨，最外围用一英尺厚的石墨作为中子反射层。这就是世界上第一座反应堆 CP-1（芝加哥堆1号），当时座落于芝加哥大学被废弃的足球场西看台下的一个小院落内。原计划准备建造一个直径为26英尺的球形装置，但在堆垒过程中发现将在一个较低的高度处达到临界，因而最后的形状近似一个椭球体。建造过程中仅拍摄了几张照相，其中之一（图1.5）是第十八层和部分堆好的第十九层。

在堆内散插了一些钉有镉皮的木棒作为控制棒。补偿棒即粗调控制棒或则完全抽出，或则插入并锁扣定位；此外还有一些作为紧急停堆用的安全棒，当三氟化硼电离室的计数太高时，它们会自动地投入堆芯；另有一根细调节用的控制棒，可以手控也可通过伺服系

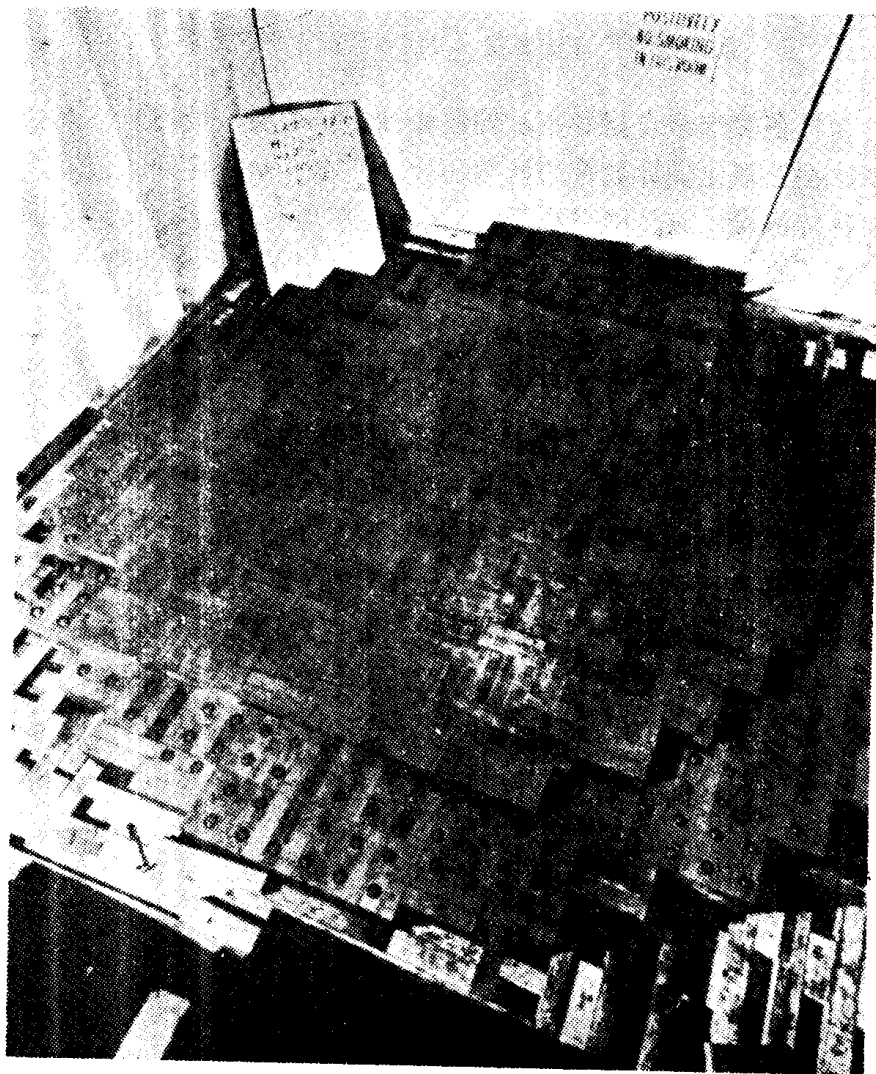


图1.5 CP-1堆的第18层和第19层[美国阿贡国立研究所 (ANL)]

* Pile, 现在已普遍采用 Reactor 一词。——译者注

统进行控制。通过布置在第11层中心处的三氟化硼正比计数管监测中子增殖，同时由堆中心处受照射的标准铀箔的激活监测逼近临界程度的程度。图 1.6 是 CP-1 堆的概貌，图示一个运行人员正在抽控制棒。

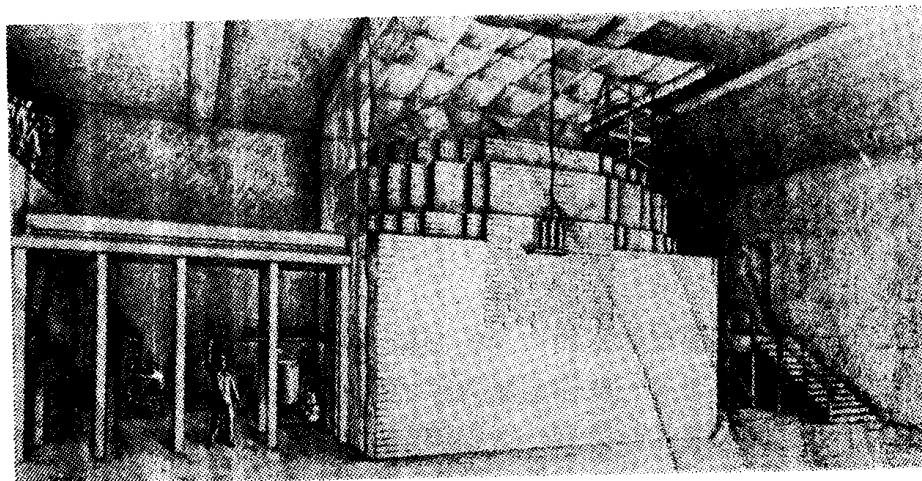
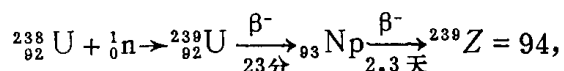


图1.6 CP-1 堆概貌 (美国阿贡国立研究所)

1942年12月2日在费米亲自指导下，控制棒被逐根抽出，最后一根则分为几次、一段段地往外抽，每次按三氟化硼计数管的读数估计到达临界时棒应处的位置，最后终于实现了历史上第一次自持链式反应。堆以小于0.5瓦的功率运行了28分钟，然后投入安全棒停堆。从此人类跨入了原子时代。图1.7是第一次运行时记录的中子密度。

1.6 钚和第一批反应堆

1940年在伯克利加利福尼亚大学辐射实验室工作的埃德温·M. 麦克米伦 (Edwin M. McMillan) 和菲利普·H. 艾贝尔森 (Phillip H. Abelson) 终于鉴定了第一个难以捉摸的超铀元素。麦克米伦在试图测定裂变碎片的能量时，照射了涂铀箔片。他注意到有一种2.3天半衰期的β放射性存留在铀内，而不是由于裂变碎片的反冲。照射包镅的铀箔时，裂变产物放射性大大减少，而2.3天的β放射性并不降低。麦克米伦和艾贝尔森通过一系列化学试验最后证实存在一个新元素，此元素的原子序数为 $Z = 93$ ，它在周期表上位于元素铀之后，故命名为镎，正如太阳系的海王星位于天王星之外*一样。此反应假定为



1941年格伦·T. 西博格 (Glenn T. Seaborg)、约瑟夫·W. 肯尼迪 (Joseph W. Kennedy)、阿瑟·C. 沃尔 (Arthur C. Wahl) 和埃米莉奥·西格雷等亦在加利福尼亚大学确凿证实了存在 $Z = 94$ 的239同位素 (命名为钚，也由类比于太阳系而得名)。西博格和肯尼迪那时为化学讲师，沃尔是研究生。早在两个月前，他们利用 ${}^{238}\text{U} (d, 2n) {}^{238}\text{Np}$ 反应、经β衰变生产了钚-238。钚-238是一种半衰期为86.4年的非裂变α发射体，而且是一种有用的热源。钚-239是可裂变物质，既可由热中子也可由快中子引起裂变。特别重

* 英语中 Uranium (铀) 一词系从 Uranus (天王星) 衍生的，这里的 Neptunium (镎) 一词系从 Neptune (海王星) 衍生的。——译者注

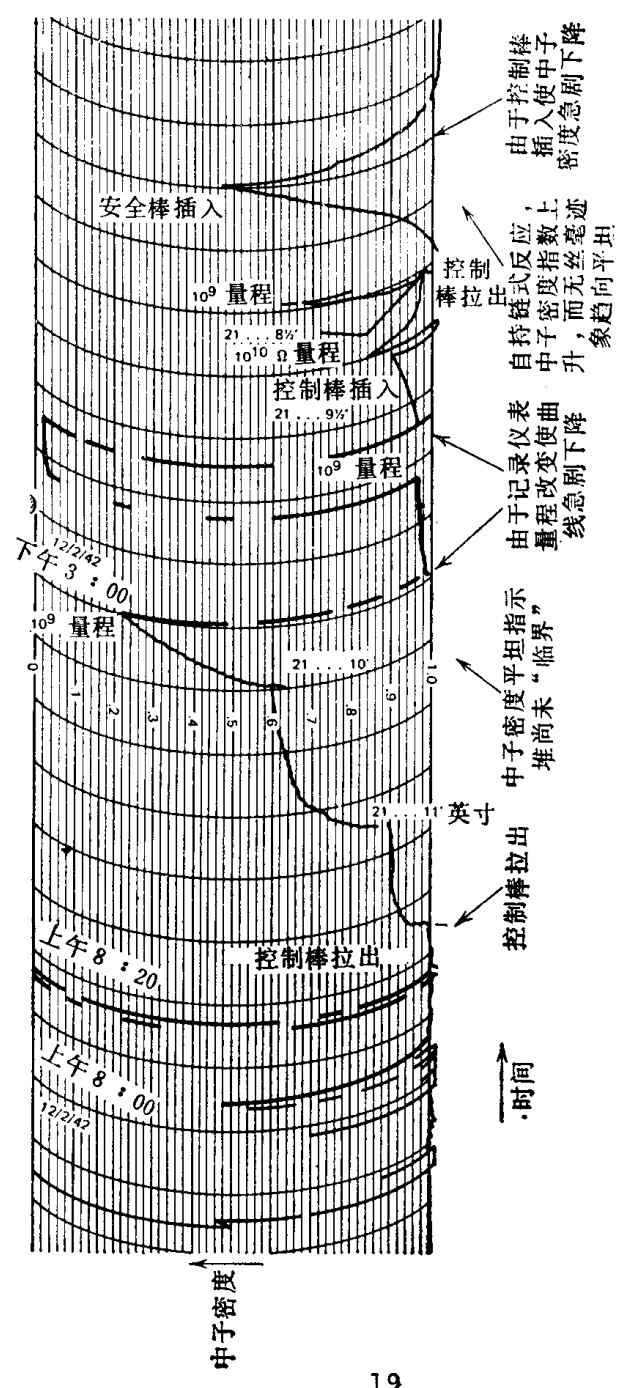


图1.7 1942年12月2日第一次自持链式反应的记录 (美国阿贡国立研究所)
堆内的中子强度系用检流计记录的。