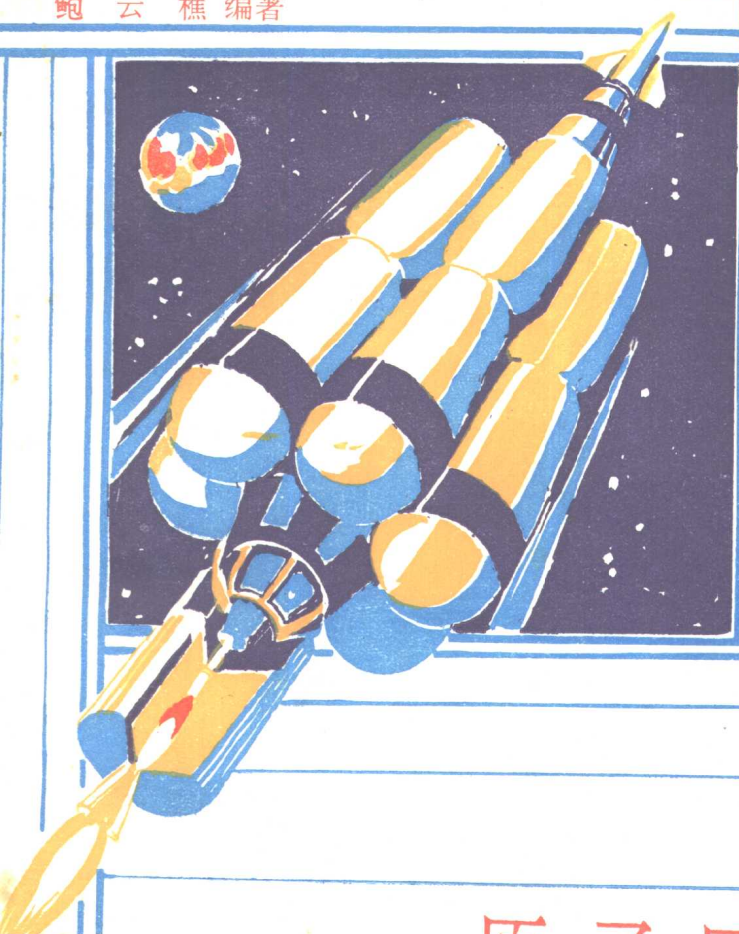


鲍云樵 编著



人堆巨子 ——核反应堆

科学出版社

原子巨人——核反应堆

鲍云樵 编著

科学出版社

1984

内 容 简 介

本书是一本饶有兴味的原子科学普及读物。全书以探索原子世界奥秘为开端，引出了奇妙的核裂变，随后介绍核反应堆的来历和它的工作原理，最后较为具体地介绍了各种用途的堆的特点和应用情况。

奇异的远古核反应堆的秘密，第一座反应堆的出世，原子炸药是怎样生产出来的，核电站是怎样工作的，核能炼钢是怎么一回事，核舰艇的今昔，太空核电源，原子动力火箭，以及新奇的中子照相和脉冲反应堆……这些关于反应堆的趣事，读者都可以在书中读到。

全书内容新颖有趣，插图形象生动。适合于具有中等文化程度的广大青年、学生、教师、科技人员、干部阅读和参考。

原子巨人——核反应堆

鲍云樵 编著

责任编辑 王玉生 姚平录

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1984年2月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1984年2月第一次印刷 印张：7 1/16 插页：2

印数：0001—3,800 字数：159,000

统一书号：15031·546

本社书号：3375·15—9

定价：1.00 元

前 言

从一九三八年科学家发现原子核裂变至今的四十多年，原子科学已进入一个崭新的时代，原子能的应用也遍及各个科学领域和各个部门，以反应堆为主体的原子科学和原子工业已经蓬勃地发展起来了。

一九四二年，在杰出的科学家费米主持下，建成了世界上第一座原子核反应堆，人类从此真正掌握了原子能。反应堆技术以建造生产堆为开端，到五十年代加入发电行列，六十年代达到了兴盛时期。目前，反应堆已在近代科学技术中扮演着重要角色，成为原子舞台上的“巨人”。现在，全世界正在运行的各类反应堆总数达八百多座。

在原子科学的发展史上，反应堆曾立过汗马功劳。在研制核武器中，它为世界上第一颗原子弹提供了核炸药——钚；被人誉为“水下蛟龙”的核潜艇，就是用反应堆推进的；举世瞩目的核电站，也是用反应堆作为“原子锅炉”的；资格最老的研究反应堆，正是科学研究的强有力武器；还有为人类供热、为宇宙飞船提供动力的特种反应堆，更是反应堆家族中的佼佼者。

随着我国原子科学技术的发展，关心反应堆的人也越来越多，除直接从事原子科学技术工作的同志们外，还包括从事电力、机械、冶金、宇航、造船及其他行业的科技工作者。

为使广大读者了解种类繁多的核反应堆，作者编写了本书。全书共分十四章，它以探索原子世界奥秘为开端，引出

112-1-57 •••

奇妙的核裂变，介绍反应堆的来历，阐明反应堆的基本概念。接着以大量篇幅描述了各式各样反应堆的结构特点、应用状况及发展前景。

在编写本书过程中，曾得到陈维敬和罗安仁同志的指导和帮助，本人由衷致谢。由于水平有限，不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

1982年11月于北京

目 录

前 言	Ⅱ
第一章 探索原子世界的奥秘	1
第一节 启蒙时期的原子学说	1
第二节 原子世界的黎明	5
第三节 崭新的原子模型诞生	8
第二章 奇妙的核裂变	11
第一节 击破原子的尝试	11
第二节 核力之谜	12
第三节 原子核的轰然开裂	14
第四节 自持链式裂变反应	21
第五节 裂变能的释放	26
第三章 反应堆的来历	29
第一节 奇异的天然核反应堆	29
第二节 世界第一座人造反应堆的诞生	32
第四章 核反应堆基本概念	39
第一节 多才多艺的核反应堆	39
第二节 分类	40
第三节 工作原理	43
第四节 基本组成	45
第五节 燃料和材料	52
第五章 原子弹装料钚和生产反应堆	56
第一节 钚的发现和特殊用途	56
第二节 反应堆生产钚	58
第三节 军用生产堆的建造情况	60

第四节 军用钚生产堆结构及其技术改进	62
第六章 能源中的明珠——核电站	70
第一节 核能的开发和利用	70
第二节 核电站的基本概念	76
第三节 堆型组成	83
第七章 核电站中的主角——轻水反应堆	91
第一节 压水反应堆	91
第二节 沸水反应堆	98
第八章 独具一格的重水反应堆	107
第一节 天然铂压力管式重水堆	107
第二节 沸腾轻水冷却重水堆	114
第三节 发展前景	115
第九章 向高温迈进的石墨气冷堆	117
第一节 改进型气冷堆	117
第二节 多用途的高温气冷堆	121
第十章 热中子增殖反应堆	138
第一节 为什么需要增殖堆	138
第二节 新兴的轻水增殖堆	141
第三节 熔盐增殖堆	144
第十一章 快中子增殖反应堆	150
第一节 基本构造	151
第二节 技术的特殊性	163
第三节 发展快堆的意义	165
第十二章 核舰艇动力反应堆	168
第一节 核潜艇的崛起	168
第二节 动力堆型的选定	170
第三节 核动力舰艇和核动力船	174
第四节 技术改进	182
第十三章 初露锋芒的航天反应堆	185
第一节 太空核电源反应堆	185

第二节	核火箭动力反应堆·····	194
第十四章	用途甚广的研究性反应堆·····	200
第一节	高通量研究反应堆·····	201
第二节	中子照相与脉冲反应堆·····	207

第一章 探索原子世界的奥秘

宇宙万物，天地间的一切是由什么组成的？要弄清这个问题，你可以去拜访一下小小的原子王国。人类在历史的长河中，不但一直在追究离我们很远的太空世界的秘密，而且从古以来都在不断地探索着离我们很近的原子世界的奥秘。深入研究原子世界的意义，不仅在于逐步揭示物质内在的关系，掌握它们的规律，使之造福于人类。而且在于人类在认识和改造客观世界的同时，也改造了主观世界，使认识逐步接近实际。在原子科学发展的漫长进程中，由于无数科学家的艰辛劳动和顽强努力，打开了一个又一个原子宝库的大门，才唤来了原子科学万紫千红的春天。现在，原子核裂变能的利用已经走上了工业推广的道路，人们把小小原子核中蕴藏的巨大能量，巧妙地引出来为人类发电、供热和开动船只。未来可能用核动力来推动火箭，为人类远征宇宙服务。

原子物理的研究与任何一门学科一样，旧的矛盾解决后，又不断地出现新的矛盾，一浪推一浪向前发展着。今天来回顾原子物理发展过程，对我们向原子科学的广度和深度进军是大有益处的。

第一节 启蒙时期的原子学说

原子这一词起源于古希腊，原来指的是“看不见的”或“浑然一体不可分割”的意思。根据历史考证，在二千五百年前，古希腊对物质本性流行着两种概念。一种认为世上万

物只不过由少数简单的物质或元素构成；另一种认为物质是由一种看不见的粒子——原子组成的。

当时比较杰出的科学家要算是德谟克利特。他指出：“宇宙由无数看不见的粒子以及空旷的空间组成……”。他还指出，原子有它的特征、大小、形状，但它们都是看不见的，它既无细孔，又很坚硬，不可压缩，不能破碎，而且是永无止境地运动着的。宇宙中的一切都是原子运动的结果，它们会结合成看得见的物体，也能分散开来。德谟克利特的原子论，已经触及了物质结构本质，带有朴素唯物论的特色。但是由于受当时历史条件的限制，他把在一定条件下不能分割的东西，看成了绝对不可分的东西了。

在物质的可分性上，也有人主张物质是绝对连续的，因而是无限可分的。如我国古代有“一尺之棰，日取其半，万世不竭”的说法。这种说法闪耀着朴素辩证法的思想光芒。它虽然涉及了物质分割的无限性，但却把物质看成是绝对连续的东西，因而所主张的是一种抽象的可分性，是单纯的分割，而没有看到物质结构不同层次间质的差别。

刚萌芽不久的原子学说曾受到一些唯心主义学派的反对，在整整一个世纪后，德谟克利特的原子学说才重新得到承认。又隔两个世纪以后，罗马的著名拉丁诗人卢克莱西斯把原子称之为“物质的本源”。在后来的漫长岁月里，曾出现过各种猜想，有些还带着神秘的色彩。例如亚里士多德认为物质都是由某些“原料”组成的，不同种物质只不过混有不同份量的基本“原料”而已（即指冷、暖、干、湿），这就是四元质理论。这种假说还一直盛行到十七世纪。在一些带神秘色彩理论的影响下，到第三世纪，在亚历山大里亚盛行着一种试图把贱金属点成金的“炼金术”，出现过梦想“点铁成金”的热潮，许多炼金术士们废寝忘食地奔忙在摆满了

容器、火炉、风箱、水漏的工场里。有人称“炼金术”为假科学。金自然没有炼成，最后这种理论破了产。一六六一年，波义耳严厉地批驳了炼金术士们的主张。他呼吁化学应有其本身的研究课题。主张实验家们放弃四元质古老的理论，建议把所有物质分成化合物及元素两类。认为化合物能用化学方法将其分解成简单的物质，元素则不能再分解。当时，这一正确的观点没有很快被人们普遍接受，而受到一种所谓“燃素”的错误理论干扰。“燃素”理论最先是由德国化学家约翰·比赫提出来的，后来又被普鲁士王的御医斯陶耳进一步补充。他们认为一切含有“燃素”的物质均能燃烧；燃素在燃烧过程中跑走，剩下灰烬与渣滓。后来，法国卓越的化学家拉瓦锡经过一再实验指出：“燃烧过程中，物质与空气中的氧结合。燃烧不能在无氧的空气中发生”。拉瓦锡还系统地说明了“物质不灭定律”，他指出：“一切化学反应中的生成物，其重量同参与反应物质的重量绝对相等”。

中世纪，原子学说受到极度的轻视，直到欧洲文艺复兴时期又开始受到注意。十六、十七世纪，伽利略、笛卡儿、培根、波义耳及牛顿等都是原子学说的拥护者。

然而，早期对原子的描述是十分离奇和可笑的。例如，法国的伽桑迪认为铁之所以有高强度是因为它是由粗糙的原子结合而成的缘故。而水的流动性好是因为它的原子表面光滑的缘故。但是，意大利物理学家博斯科维奇受到牛顿的地心引力学说的影响，提出了原子位于吸力和斥力的中心的观点，驳斥了原子间只存在单纯物理接触的看法。

十九世纪初，英国的道尔顿为现代原子学说奠定了基础，他通过实验提出了“倍比定律”。他指出：“每个化学元素是由定量的原子组成的。”他还进一步指出：“一元素的原子能够和一、两个或更多的其他元素的原子，在不同状

况下组合成另一种元素。”他的重大贡献是想确定不同化学元素的原子间的相对重量。他以重量最轻的氢原子作标准为一，借氢氧结合成水所决定的重量比例来寻找氧原子的相对重量。不过道尔顿常把“分子”和“原子”混为一谈。直到一八五八年，卡尼扎罗才把分子和原子分别清楚，他认为原子是组成元素的最小单位，而分子是组成化合物的最小单位。

从一八二九年开始，许多化学家都企图找出化学元素特性与原子量之间的关系，也取得了一些进展。但真正解决问题的是俄国化学家门捷列夫，他于一八六九年发表了著名的“元素周期表”。他指出，如果将所有化学元素按原子量由小到大排列起来，元素性质存在着周期性的变化规律。例如第三、十一、十九号元素（锂、钠、钾）之间存在着许多相似的性质。当时他还在周期表中留下了一些空档，预言这些未知元素总有一天会被找到。后来发现的新元素证实了他的预言。尽管后人对元素周期表作过一些修改，但门捷列夫的元素周期表仍是现代化学和物理学的基础，也是研究原子内部结构的依据之一。

瑞典化学家阿里尼阿斯进一步发展了原子学说。过去人们总是把原子看作一个不可分割的整体，对不同盐类及其它物质的水溶液性质很难理解。而阿里尼阿斯通过实验，在一八八七年发表了著名的“电离”学说。他指出，盐类物质溶于水的时候，它们的分子便分裂（或分散）成“离子”，一个离子可以是单一原子，也可以是原子群，它与原子所不同之处是离子带电，原子不带电。他的“电离”学说为现代化学和物理学奠定了又一块基石。

分子和原子以实体存在于世的思想为人们接受之后，就有人试图估计分子和原子的大小。最先想估计分子和原子大

小的是十九世纪初的汤姆斯杨，后来的克劳休斯、麦克斯韦、阿基米德、开尔文等人也探索过这一课题。

二十世纪初，佩林制成了厚度为二千万分之一厘米的油膜（当然油分子的直径比油膜厚度还要小）经过一再实验，他得到的结论是，所谓分子的直径为五千万分之一厘米。如果把一滴水放大成地球一样大，则水分子的大小也只不过像一个橙子。佩林对分子的估算还是十分粗浅的。当然分子的大小各有差异，它主要取决于组成分子的原子数。例如最简单的氢分子由两个原子组成，而复杂一些的淀粉分子却包含着二千五百个原子。它们的大小之差就相当悬殊。

原子的大小又如何呢？在原子学说发展初期，学者们还无法测得它的大小，只是证明它的存在。通过后来的科学实践才逐步发现原子大小与围绕原子核旋转的电子数多少有关。氢原子最简单，直径最小。而复杂的铀原子，直径最大。不过它们之间的差别不如分子之间相差得那么悬殊。例如，氢原子的直径为一亿分之一厘米，而铀原子直径也只不过为四千万分之一厘米，后者只为前者的两倍半。由此可见原子内部比分子要坚实得多。

直到十九世纪末期，经过许多科学家的探索，已经使人们深信分子和原子的存在。但是，当时不少人认为，原子大概是构成物质的最小砖石了。至于原子内部的秘密，更没有人能搞清楚，这就是后来的科学家们所要攻克의堡垒。

第二节 原子世界的黎明

一八九一年，物理学家斯托尼提出了“电子”的概念。当时一些物理学家和化学家都认为原子并不是以往想象的单纯圆形小球，相反地，它的结构相当复杂，电子是原子的组

成部分之一。那时包括洛伦兹在内的一些物理学家都认为电子在原子中运动是产生光谱的原因。物理学家洛伦兹的电子学说是十九世纪杰出的科学成就之一。他认为导体（如金属）的电子极易从原子中跑出来，并认为电流是运动中的一道电子流。非导体中的电子则不容易从原子中跑出来。

到十九世纪末，从原子世界里传来了惊人的消息。一八九五年十月，物理学家伦琴在用雷诺管（一种阴极射线管，见图 1.1）做试验时，先用带锡箔的硬纸将管子套住，不让射线透出来，然后他又在铝窗上设置了一层镀有荧光涂料（氟化钡）的硬纸隔板，结果发现射线竟会使荧光涂料发光。接着在同年十一月八日的一次实验中，伦琴在黑暗的实验室里接通实验管电流。突然，他惊奇地发现黑暗的实验管中射出了长达一米的绿光。他划着火柴一看，光原来是从工作台的隔板上射出来的，将隔板移远一些，发光现象依然如故。通常雷诺管发出的阴极射线的射程只有 $2 \sim 3$ 厘米。异常地发现使伦琴喜出望外，他意识到自己正和崭新的物理现象打交道。于是，他在实验室里狂热地工作了七个星期，终于在当年的十二月八日写出了他第一次发现 X 光的科学报告。在几个星期内，许多物理学家实验证明了伦琴的发现。伦琴发现 X 光，不但为后人找到了一种用途广泛的探测工具，更重要的是为当时迈入原子世界大门发现了第一把钥匙。

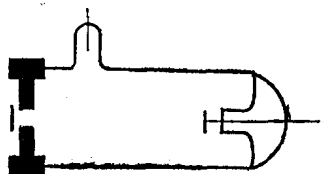


图 1.1 雷诺管结构简图

一八九六年，法国物理学家贝克勒耳最先发现了铀的放射性。他出身于科学世家，父亲是研究荧光的物理学家。因为许多荧光物质必须经阳光曝晒后，才能在黑暗中发光。贝克勒耳因怀疑

荧光可能与X光有相似之处，于是在帮助父亲晒铀盐晶体时，用黑纸将照相底片包严密，纸上放了一块剪成花样的金属片，片上又铺了一张薄纸，纸上撒了一层铀盐，然后送去日晒。傍晚底片经显影处理后，出现了黑白分明的金属片图案。这一事实说明铀盐会发出类似于X光的不可见射线。

贝克勒耳为了弄清原由，他又准备了一份相同的样品进行验证。不巧那天太阳被乌云遮住，他只好把样品收进箱子，连纸上的铀盐都没取掉，以便次日取出来做试验比较方便。不料第二、三、四天连续阴天。到第五天清早，贝克勒耳抱着好奇的心情将底片显了影。满以为没有阳光激发X光，底片上的阴影一定很模糊。但事实完全相反，底片上的图案与上次一样黑白分明。后来，经过反复验证，确认铀一直在放射类似于X光的射线，这就是后来被居里夫人命名为“放射性”的现象。

在贝克勒耳发现“放射性”后，居里夫人很想找出除铀以外到底还有哪种放射性物质。她在一间由贮藏室改成的简陋实验室里，经过了许多试验，终于找到了另一种叫钍的结晶体，它与铀一样具有“放射性”。于是她给这种特殊现象取名叫“放射性”，而象铀和钍一类能放出射线的元素被称为“放射性元素”。在发现钍以后，居里夫人不满足于已得的成果，象一个海关检查员一样坚守着岗位，用她自己制造的仪器继续检查着各类物质，受检的物质从简单的氧化物到复杂的矿物，无所不有。在一次检查中，她惊奇地发现沥青铀矿的矿石中放射性比按纯铀含量计算的放射性要强得多。开始时，她怀疑试验是否弄错了，重复试验了一、二十次，结果还是一样。从此，她认为沥青铀矿中一定存在着一种比铀和钍的放射性强得多的放射性元素。但当时还不知道这种元素究竟是什么。

一八九八年，居里夫妇才从沥青铀矿的矿石中分离出一

种新的微量元素，这种元素的放射性要比铀大二百五十万倍，他们给它取名为镭。这种物质有新奇的特性，它能自动地发热，并使附近空气带电，能使许多接近它的物质发出荧光，而且它还具有杀菌的能力。镭的发现震动了当时的科学界，也为人类闯入原子深处打开了又一扇大门。迎来黎明，驱散晨雾之后，原子世界的真实面貌才渐渐地显现出来，但是真正深究原子内部奥秘的攻坚战还是在二十世纪中展开的。

第三节 崭新的原子模型诞生

十九世纪内，科学家们都普遍认为原子是不变的，包括十九世纪末的新发现在内，也只是形成了关于原子的初步概念。当时人们知道了原子的相对质量；初步测定了原子的大小；知道原子有电的性质。特别是阴极射线通过稀薄气体时产生放电现象，使得人们知道原子内存在着电子。但是，电子在原子内处于何等地位？原子内部的情形又是如何？却没人能清楚地解释。

二十世纪中，对原子物理贡献较大的要算是杰出的物理学家卢瑟福。在居里夫妇发现镭后不久，他通过实验证明，镭会放出两种射线，一种是只能贯穿厚度在0.02毫米以内的铝箔，并有显著的电效应，被命名为 α 射线。另一种是能贯穿厚度在0.5毫米以内的铝片，但强度减少了一半，它还能使包着黑纸的胶片感光，这种射线被命名为 β 射线。当时他还没有发现镭还能放出的第三种射线—— γ 射线。一九〇二年他提出了放射性元素会自然蜕变成另一种元素的带革命性的理论。这一理论刚提出来的时候，曾遭到一些人的反对和斥责，但后来的实践充分证明了这一理论的正确性。人们逐

渐明白了铀经过一连串蜕变后会变成镭，镭又经多次蜕变最后成为铅。也弄清了放射性元素会放出三种射线，一种叫 α 射线，带正电；另一种叫 β 射线，带负电；第三种叫 γ 射线，不带电。卢瑟福的“蜕变”学说揭开了现代原子物理学的序幕。

一九〇六年，卢瑟福在做镭放射的 α 粒子穿过云母片的实验时，发现粒子的方向有细微的改变。几年后，他用高能的 α 粒子束轰击金属箔时，发现了一种奇特的现象，即大多数 α 粒子穿过金属箔后仍然沿直线方向前进，但有少数 α 粒子偏离了原来方向，个别粒子尤如弹球碰上坚硬的石头一样被弹射回来了。卢瑟福经过了反复实验之后，否定了他老师汤姆逊曾经提出过的原子“西瓜模型”的猜测。因为按照“西瓜模型”假说，阳电荷与带负电的电子是均匀分布的，这样 α 粒子应该很容易穿过原子，不应该出现被弹回来的现象。从个别 α 粒子被弹回的情况分析可知， α 粒子的质量是电子的八千倍，因此电子与它碰撞不可能使它弹回。于是卢瑟福于一九一一年提出了崭新的概念——原子核。他认为原子中存在着一个很小但很坚硬、很重的中心核，这就是原子核。同时他假设环绕核的大量电子是靠着它们与核之间的电磁引力的作用而旋转的。这与太阳系的行星靠万有引力作用环绕太阳旋转的情形很相似。所以，后人称卢瑟福的原子模型为“小太阳系”。后来，经过玻尔等物理学家的努力，对核外电子的分布和运动规律作了更深入的理论和实验研究，逐渐建立起比较完整的原子模型。但是，近代原子结构学说都是在原子核概念的基础上建立和发展起来的。因此，卢瑟福不愧是近代原子物理学的奠基者之一。

从卢瑟福-玻尔原子学说可以知道，每一原子是一个太阳系的缩影。最简单的氢原子核只有一个质子，核外只有一