



顾以藩

科学的预言和悲观的论断

“击碎原子所产生的能量是极其可怜的。谁要期望原子的转变会成为动力的来源，那是妄想。”这是英国杰出的原子核物理学家卢瑟福于1933年9月在英国不列颠学会的演说中所讲的一段话。同一个卢瑟福早在1920年预言了中子的存在。1932年在他所领导的卡文迪许实验室里这个预言得到了证实。

卢瑟福正确地预言了中子的存在，却对原子能的开发和应用作了完全错误的论断。这是并不偶然的。卢瑟福未能目睹中子发现之后接踵而来的全部重要发现；正是这些发现为原子能时代的到来作了必不可少的理论准备。

新时代前夜的重要发现

1934年，约里奥·居里夫妇发现人工放射性。他们用 α 粒子轰击铝靶，产生具有放射性的磷-30，这是历史上第一种人造的同位素。

同年，费米及其意大利小组发展了约里奥·居里夫妇的工作，第一次用中子代替 α 粒子去轰击各种元素做的靶子。他们在金鱼池里做的著名实验澄清了中子慢化的途径，并且发现慢中子比快中子更加有效地为各种原子核所吸收而产生人工放射性。他们还第一次用中子轰击铀，企图获得第93号元素的原子核。出乎意料的是，在被中子轰击过的铀上测量到了四种 β 粒子。这个令人困惑的现象好几年里没有得到恰当的

解释，然而激发了进一步的研究热情。

1938年末，哈恩和施特拉斯曼终于通过化学分析方法确定中子轰击铀后有中间质量的元素（例如钡）产生。梅特涅和弗里施（哈恩和施特拉斯

曼随即也独立地）提出用铀原子核裂成两半的机制来解释哈恩和施特拉斯曼的分析结论。弗里施他们首先正式采用了裂变的名称。

1939年，约里奥·居里夫人对于核裂变现象作了进一步的研究，发现每次裂变能够放出两个到三个中子。

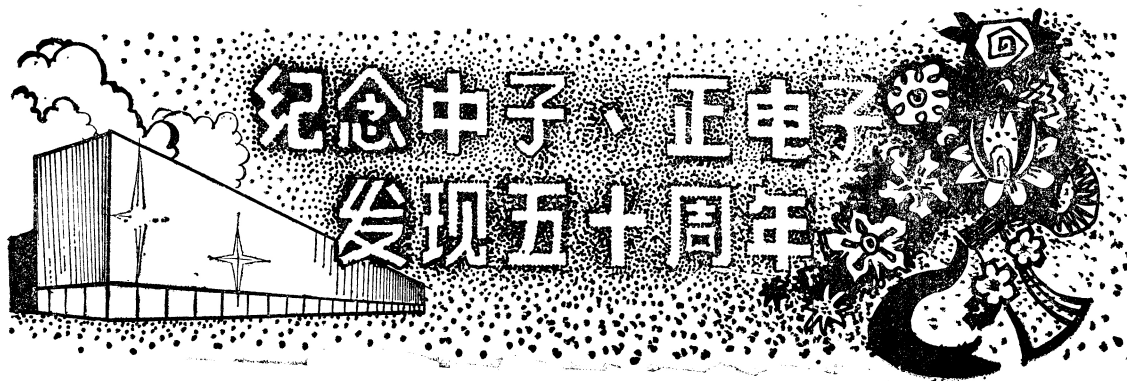
可以看到：以上列举的这些历史性发现都是纯粹基础研究的成果。人们在从事这些研究的时候，并不存着解决实际应用的明确目标，但是，基础研究付出努力的积累最终打开通向应用的道路；这是科学技术发展过程中经常见到的一条辩证法则。在重核裂变现象发现以后不久，实际应用原子能的构思就趋于成熟了。

实现原子核链式反应

物理学家们不约而同地想到通过原子核链式反应



图1 爱因斯坦致美国总统罗斯福信



实现大规模释放原子能。设想一个慢中子打到一块铀上引起一个铀核裂变，同时产生两个以上的中子。它们在铀块里慢化下来，又各自引起新的裂变。如此继续下去，中子数目愈来愈多，铀核裂变的数目也就愈来愈多，就会形成自持的链式核反应。考虑到一次裂变要释放 200 兆电子伏的能量，一克铀通过链式反应完全裂变所释放的能量将相当于燃烧三吨煤。而且，这么多的能量如果不加控制的话可以在远远不到一秒钟之内就释放出来。

根据已经积累的实验研究资料，物理学家对于实现链式核反应在原则上的可行性已经不存任何怀疑了。这从 1939 年 8 月 2 日由西拉德等起草由爱因斯坦署名的致美国总统罗斯福的历史性信件中可以看到：

“在过去四个月里，由于约里奥在法国以及费米与西拉德在美国所做的工作，已经产生了这样的希望，即有可能在大量的铀中引起链式核反应，由此产生巨大的能量以及大量类镭新元素。现在看来，在不久的将来实现这一点，几乎是确定无疑的了。”信中接着写道，“这个新现象也可以用来制造炸弹，而且可以设想，虽则还不怎么有把握，这样制造成功的会是威力极大的新式炸弹。”



图 2 世界上第一个反应堆成功运行场面

在科学家们的推动下，美国政府拨出二十亿美元的巨款，组织了庞大的研究队伍，开展发展核武器的秘密研究工作。

第一步实现的是受控的链式核反应。在费米领导下在芝加哥大学斯塔格运动场看台底下建立了世界上第一座裂变反应堆：一个用大量填装着金属铀和氧化铀的空心石墨块堆砌起来的立方体，大约 30 英尺见方，21 英尺多高。反应堆中有一些孔道，可以容纳又大又长的镉棒。镉是一种易于吸收中子的金属物质。调节镉棒插进反应堆内的位置可

以控制链式核反应的速率，达到使链式核反应持续稳定进行的工作状态。1942 年 12 月 2 日下午三点四十五分，在这个装置上，受控链式核反应实现了。在重核裂变现象发现之后四年，人类制服了原子能。

但是，这个标志着新时代到来的伟大事件却是在与世隔绝的情况下发生的。科学家们紧接着转向了原子弹的研制工作。

又过了不到三年的时间，1945 年 7 月 16 日，在美国新墨西哥州实现了历史上第一次核爆炸。与原子核反应堆不同，在核爆炸中实现的是瞬时的不受控的链式核反应。三周之后，两颗原子弹相继在日本的广岛和长崎爆炸。就这样，中子通过显示原子能的破坏性的一面公开宣告它走出实验室来到人类生活中间。

从重核裂变现象发现到第一颗原子弹爆炸总共用了六年零八个月的时间。新的发现到应用之间如此短暂的间隔，这在科学技术发展史上是很少的。战争激发了人们将基础研究成果转变为应用的自觉性。

从核武器到和平利用

核武器成了原子能的第一种应用。继美国之后，苏联、英国、法国和中国先后发展了自己的核武器。在原子弹的基础上发展起了氢弹，还有中子弹。处在绝密状态下为发展核武器所作的努力几乎一天也没有停止过。

但是，中子所诱发的原子能终究很快冲破各种人为的束缚，进入广阔的和平利用领域。第二次世界大战过去大约一个年代以后，保密范围放松了，一些早期的研究成果公开了。人们很快发现，原子能以及中子的其它应用作为当代世界的一个特色，已经深深地扎下根来。一个新兴的工业部门——原子能工业迅速发展起来了。今天，中子的应用领域空前地扩大了。它渗入工农业生产、科研和国民经济其它许多部门，由之发展起来的各种新方法和新技术越来越为各行各业所重视和采用。中子实实在在地来到我们的生活中间。

新型的动力来源

在中子和原子能的利用上，原子核反应堆是一种极为有用的装置。从费米领导建造第一个反应堆以来，反应堆技术有了很大的发展。现在世界上建造了数以百计的反应堆，满足各种不同的用途。

利用反应堆产生的热能提供动力成为一种新型的动力来源。在潜艇、航空母舰、破冰船和商船上先后采用了原子核动力，其中以核潜艇的使用最为广泛。利用核动力开动潜艇，携带几公斤核燃料，就可以环游全球。核燃料不需要氧，核潜艇可以长时间在水下潜航。世界上第一艘核潜艇是美国的“鹦鹉螺号”，于 1954 年建成下水。目前总共将近有二百艘核潜艇在海洋中游弋。

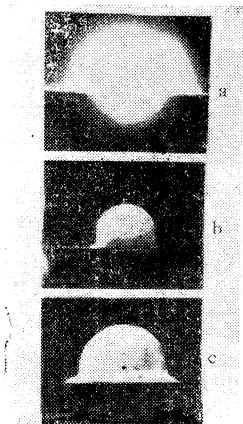


图 3 第一次核爆炸景象，

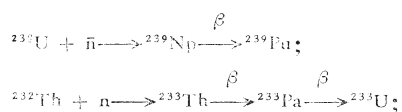
- a. 开始时间；
- b. 经过 0.006 秒；
- c. 经过 0.016 秒

核反应堆也用来生产电力。1954年苏联建成了第一座核电站,发电能力为5000千瓦。第一座真正具有工业规模的民用核发电厂则是1958年在美国建成投入运行的。原子能发电的发展速度很快。有人预计到2000年的时候全世界核电站的总装机容量将会达到10多亿千瓦,人类生活中的一半电力将要来自原子能发电站。比较起来,常规电站从开始发展到达到1亿千瓦一共用了一百多年时间。

同位素及核燃料的生产

利用反应堆里的大量中子可以高产量、多品种、低成本地制备同位素。中子不带电,很容易同原子核发生作用,慢中子尤其容易被原子核俘获,原来的原子核添加了中子以后变成新的同位素,它们通常都具有放射性。现在可以人工制备的放射性同位素有一千多种,其中很大一部分是利用中子产生的。放射性同位素应用范围广泛:作为示踪原子,在临床诊断和生物、化学研究等方面发挥作用;也可以作为射线源,用在从工业探伤、生产流程控制到农产品保藏和食物无菌消毒等各个方面。

利用中子生产核燃料也是原子能工业的重要项目。将铀-238和钍-232放在反应堆里照射,通过中子俘获引起下列过程:



最后转变成为在自然界里几乎不存在的两种核燃料:钚-239和铀-233。能够增殖核燃料的反应堆称做增殖反应堆。

利用反应堆的中子还可以生产超铀元素。这些元素具有不少有趣的性能,有的对于未来的原子能动力来说还是很有希望的新型燃料。大量生产超铀元素设有专门的工厂,装备着中子流特别强的反应堆,用钚做原料放在反应堆里照射。例如,100克的钚-242同位素连续照射两年可以获得0.01克镅-242同位素。

中子治癌

中子在医学上也得到了应用。一个很有前途的应用方向是治癌。这个方向早在30年代就曾有人进行过尝试,当时由于对中子辐照剂量的知识不足,剂量应用不当而宣告失败。1971年重新分析当年的病历档案,弄清楚那时每次实际照射剂量相当于2000—3200拉德 γ 剂量。这个剂量太高了。

中子治癌重新受到重视的一个重要原因是,六十年代以来的研究发现快中子对缺氧癌细胞(按:肿瘤中癌细胞过度繁殖,血液供氧不足,其中不少癌细胞是缺氧细胞)的杀伤能力比电子及X射线和 γ 射线要强

得多。快中子不仅能够杀死普通癌细胞,也能杀死缺氧癌细胞。

目前,采用快中子及慢中子治癌的研究工作都在继续进行,临床试验也在不断开展中。不少试验结果是令人鼓舞的。

活化分析技术及其它

利用中子容易同各种原子核发生作用使稳定原子核变成放射性核(这个过程称为活化)的特点发展了一种先进的分析技术——中子活化分析。进行分析时,要用中子源照射样品,使样品中所包含的各种元素的原子核活化,分别放出特征的 γ 射线(或其它射线)。测定这些特征的射线,可以判断样品中存在哪些元素,而从射线的强度又可以判断这些元素的含量。这种方法灵敏度高,是痕量(10^{-6} — 10^{-9} 克)和超痕量(10^{-9} — 10^{-12} 克)元素分析的重要手段。它还具有分析速度快,样品用量小,可以多元素同时分析等优点。它还是一种非破坏性的分析方法。它也特别适合于对化学性质相近的元素例如稀土元素的分析。

中子还可以用于测井,寻找石油和其它金属及非金属矿藏。中子还可以用于测量农田土壤、土木建筑材料和工业原料及产品的水分。中子照相和X射线照相配合,应用在工业部门的材料元件非破坏性检验以及病理学研究方面。使用中子进行辐照,在培育作物新种、提高蚕茧产量、生产新型半导体器件、实现中子掺杂工艺、研制耐磨性能高的模具等等方面发挥作用。

庞大的核数据库

在中子发现五十周年之际,面对着中子如此丰富多采的应用(以上仅是一些例子),人们有理由感到满意和欣慰。是先行的物理研究结出了丰硕的应用之果;但是,应用反过来又向物理工作提出新的要求。例如,在反应堆设计上,为了降低原子能发电及其它动力

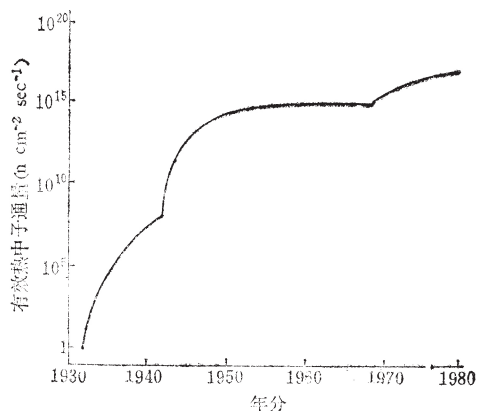


图4 中子源强度增长趋势示意图

应用的成本，需要有关中子与原子核作用更高精度的实验数据：一项钚-239 的中子数据精度的提高，就可能节省几亿美金。

鉴于中子核数据在应用上的重要性，世界各国对于这些数据的测量、搜集、整理和评价工作给了很大的重视。各个中子物理实验室努力发展实验技术，认真从事着核数据的测量和复测工作。还成立了国际性的

和国家性的核数据中心，专门从事搜集整理以中子数据为主的核数据资料，贮入大容量的计算机，随时取用。数据贮存量逐年增加，总数早已达到百万以上。

前景光明

展望中子应用的前景，我们也许可以从中子源的发展趋势得到启示。要获得中子必须借助于核裂变或其它产生中子的核反应。因此，无论在中子的研究和应用中，中子源是必不可少的条件。半个世纪以来，物理学家在发展 neutron 源技术方面作出了许多努力。从 neutron 发现到今天，中子源的强度提高了 10^{15} 倍还多。当前，以散裂反应为基础的新的一代加速器中子源正在若干实验室中建造起来，其强度比已有的加速器中子源可以提高一个到两个数量级左右。更高强度的新型中子源也开始从理论上进行探讨和估算。可以期望：愈来愈强的中子源的实现将为中子的应用提供更多新的可能性。