

# 快中子束及其应用

田宇絃 陈 峰

(中国科学院近代物理研究所)

自三十年代初发现中子以来,人们一直对中子进行仔细的研究,使之在许多领域中得到广泛应用。例如原子弹、氢弹等武器的应用、反应堆工程、同位素技术以及受控聚变技术等。由于中子应用在科学及经济中的重要作用,它引起世界上许多国家的重视。除利用已有的中子设备外,纷纷建立新的、性能更好的强中子源,以适应各种重要技术发展的需要。

本文主要叙述加速器中子源发展现状及应用,重点说明在应用领域、特别是用于活化分析工作上的趋势。

## 一、加速器中子源的现状

目前全世界有数以百计的可用做快中子源的加速器。例如,利用(D,T)反应的14MeV中子源,利用(P,Be)、(D,Be)的可变中中能。但是随着科学技术的发展,许多国家也都竞相建立更强的中子源,以适应受控聚变研究、基本核参数研究、材料科学、微电子学以及治疗癌症等研究的需要。下面即是目前为开展应用已建立的或计划建立的强快中子源的情况。表 I 给出了某些高强中子源

表 I 目前世界上一些高强快中子源

装置名	国家	基本应用	加速器类型	中子源强	时 间
NEVIS	美国	核截面	回旋	$6 \times 10^{12}$ /秒	
WNR	" "	" "	直线	$2 \times 10^{15}$ /秒	已运行
KENS	日本	材料、固体	同步回旋	$2 \times 10^{14}$ /秒	" "
IPNS1	美国	" "	" "	$2 \times 10^{15}$ /秒	
IPNS2	" "	" "	" "	$9 \times 10^{16}$ /秒	准备
SNS	英国	" "	" "	$3 \times 10^{16}$ /秒	1984
TRIUMF	加拿大	辐照、材料	回旋	$3 \times 10^{15}$ /秒	已运行
SIN	瑞士	固体分析	" "	$6 \times 10^{16}$ /秒	列入计划
SNQ	法国	" " "	直线	$\sim 10^{18}$ /秒	准备
ING	加拿大	" " "	" "	$8 \times 10^{18}$ /秒	
LLL	美国	裂变燃料生产	" "	$4.6 \times 10^{18}$ /秒	研究
ANL	" "	" " "	" "	$\sim 3 \times 10^{19}$ /秒	" "
LAFR, LAFP	" "	" " "	" "	$1 \times 10^{21}$ /秒	" "
ABACS	" "	" " "	" "	$\sim 5 \times 10^{19}$ /秒	" "

的性能。表 II 给出了一些用于治疗及分析的加速器中子源。

表 I 一些用于治疗及分析的快中子源

地 点	反 应	粒子能量 (MeV)	最大束流 mA
阿姆斯特丹	D + T	.27	7
” ”	D + T	.25	18
格拉斯哥	D + T	.25	30
汉 堡	D + T	.5	8
海 德 堡	D + T	.25	500
曼彻斯特	D + T	.25	30
海 德 堡	D + D	11	.07
东 京	D + Be	14	.1
爱 丁 堡	D + Be	15	.1
伦 敦	D + Be	16	.1
西 特 里	D + Be	21.5	.04
东 京	D + Be	30	.03
华 盛 顿	D + Be	35	.01
休 斯 敦	D × Be	50	.007

从两表中可以看到，中子源强近几年来有了飞快的增强。它是采取以下方法进行增强的。一、采用改进设备和技术来达到。例如提高加速器束流强度，采用环形束流注入，以提高反应产额。英国哈威尔核中心把质子流增到3000mA，海德堡的(D, T)中子源的氘束为500mA，GKSS中心的为350mA。其次采用旋转靶技术，增加靶的总含氘量，解决靶冷却问题，以提高单位时间的氘利用率及使用寿命。美国利弗莫尔实验室，日本大坂大学核工程系都采用这种技术。近代物理研究所采用每分钟壹千转的低速旋转靶。在常用束流下，延长了靶寿命，并使源强提高近一倍。这是由于束流照射部分移动产生的直接冷却效果和水冷效果，从而使照射位置上的中子强度增加，中子源稳定性增强。再有是采用喷射靶技术，其原理

是增加反应密度，提高单位时间中子产额，美国洛斯阿拉莫斯，日本原研等单位采用此技术，使(D, T)中子源达到 $10^{15}$ 中子/秒以上。二、利用不同的核反应截面，产生不同能量、不同产额的强中子源。例如对每单位离子而言，不同反应产生的中子数如下： $(T, D)$ 反应为： $8 \times 10^{-5}$ 中子/D； ${}^9\text{Be}(D, n)$ 大约为 $1.7 \times 10^{-2}$ 中子/D； $(P, \alpha)$ 碎裂反应为40中子/P。因此采用不同类型的加速器，选择适当的反应即可达到增强中子源的目的。LAFR采用Pb—Bi靶，P离子，使中子源强达 $1 \times 10^{21}$ 中子/秒。

## 二、快中子束的应用

许多高强中子源都是为适应聚变研究、相应材料及元素性质、反应特点、基本核数据、材料的辐照损伤、军事及材料分析、治疗等目的而建造的。例如，美国的利弗莫尔、布鲁克海文、橡树岭等实验室，英国的哈威尔核中心，日本的大坂、原研等。据不完全统计，近年主要对Fe、Tm、Ta、Li、Ti、Be、Nb、Ni、V、Cu、Bi、Mo等元素进行分析，主要反应道及测量粒子有：带电粒子发射、非弹性散射截面、全截面、激发函数、 $\gamma$ 谱学等。对材料科学，主要用于对不同材料的辐照损伤的分析研究，例如对不同种类不锈钢及不同种水泥等辐照效应研究。

由于快中子具有强的穿透能力，并且具有比 $\gamma$ 射线或x射线强的生物效应，因此利用快中子进行许多疾病的治疗，特别是对癌症的治疗是具有特别意义的。表 II 中许多中子源是利用于该方面的。目前大量应用的是 $10^{12}$ 中子/秒量级的。电子技术的发展无疑是现代化水平的标志，电子器件的质量和耐用则是非常重要的。许多电子器件经快中子辐照后，其性能会变化，那么不同类型的电子器件经受多大剂量的辐照，性能变化如何？知道这些则对于许多环境下的应用是非常重要的，特别是在军事、核科学及应用领

域中。有的实验室对常规三极管、高频三极管、FET管、MOS、CMOS管，开关二极管、极纳二极管、隧道二极管及一系列集成线路 $14\text{MeV}$ 中子的损伤界线进行详细的研究。

### 三、快中子束在活化分析领域中的应用

快中子活化分析是一种重要的分析方法。随着技术的进步、分析的灵敏度、精度、准确度、分析的元素范围及样品种类都在不断变化和提高，又由于方法本身具有快速分析，无损等固有优点，使得它在工农业生产，电子、生物、环境、地质、考古等领域内得到广泛应用。据最近两年的不完全统计有20多个国家，其中包括主要发达国家、东欧、苏联以及诸如印度、巴西、埃及等发展中国家将这种分析技术应用于象空气、水、其他环境样品、地质、煤、土壤、种子、植株、肥料、示踪剂、铊尘、铝、化石燃料、铀钍、古铁器、古币、古陶器、古化石等分析中。其分析大约近八十种元素，即元素周期表中绝大多数元素。

由于快中子活化分析采用 $(n, \alpha)(n, p)(n, 2n)(n, n')$ 等核反应产生短寿命同位素，然后测量这些核素放出的 $\gamma$ 射线，因而方法本身具有快速分析的优点。又由于快中子具有强的贯穿能力，适于进行体分析，并且制样简单，或可进行原品分析（此点非常有别于质子荧光分析，热中子活化分析）因而特别适于象考古、文物、种子等不能取样、不能破坏的样品分析。由于利用快中子分析、反应本身不产生长寿命核素，也就不会由于分析而造成对外界环境的影响。因此在这些领域中，快中子活化分析就存在明显的优势。例如近代物理所在进行植物种子分析时，辐照剂量控制于半致死剂量之下，分析过的种子即可以种植，这就满足了育种筛选等农业方面的要求。苏联、匈牙利、利比

亚、埃及等国也都对植物、种子等进行了分析。法国奥塞实验室、印度普那大学等对古代铁器古币等进行了原品的详细分析。

由于快中子活化分析在轻元素范围具有比其他核分析方法更强的竞争能力。目前采用常规中子活化分析的单位也均把分析的重点放在N、O、F、Si、Ag、Mg、Al、Na、S、Ce、K、Mn、Cu等较轻元素的快速分析上。

快中子活化分析，其分析灵敏度一般情况下低于堆中子活化分析或质子荧光分析，特别是在中重元素区间。也就是说从灵敏度角度，分析范围受到了限制。当然采取诸如循环活化分析技术，叠加活化法等可以改善分析灵敏度从而扩大分析范围，在这方面就不多述。主要叙述从设备的改进，反应道的选取等方面目前国际上所采取的措施以及其效果。①德国GKSS中心物理所采用名字叫KORONA的快速样品传输系统在120ms内输入距离16米。配以 $5 \times 10^{12}$ 中子/秒的中子发生器，几年来共分析了近八十种元素，其中包括半寿命在0.2秒至1秒间的多种核素以及半寿命在2秒至10秒之间的56种核素。1984年又对空气样品中的39种元素进行了分析，其中秒级寿命的8种，分级寿命的11种，测量最短同位素寿命是0.8秒。因此与常规快中子活化分析相比，大大地扩大了可分析核素范围。半寿命在10ms到10秒之间的核素大约为440种，用类似KOMONA装置进行分析，无疑地将会进一步扩大可分析领域。②由于快中子活化分析的分析灵敏度是与中子强度有关的，增加中子流强即可以提高分析灵敏度。因此高强度中子源的出现使得快中子活化分析成为重要的工具。美国俄亥俄大学的欧莫等对此有详细的研究。他们采用同步回旋加速器、加速氘束打靶产生强中子流。中子能量是入射氘束能量的函数，中子能量和强度随入射氘束能量的增加而迅速地增加。80MeV的氘所产生的中子流强度，比同样束流强度16MeV的氘束产生强十几倍的

高能中子流。他们用 $0.8\mu\text{A}$ 的 $80\text{MeV}$ 氘束对环境样品中的重元素进行分析,其分析灵敏度是: Pb等于3; Sr为0.4; Ba为0.5; Ti为1.7; Ca为0.04; Sc为0.9; Cs为0.05,单位为每微克每秒 $10^3$ 计数。比利时国家核科学研究所的姆·依斯皮特等对此也进行了详细地研究。他们用 $20\mu\text{A}$ 的 $14\text{MeV}$ 氘束轰击铍靶,对一克样品进行饱和辐照,用20%效率的锗探测器进行分析,死时间低于10%,测量一个半寿命时间,对所分析的样品灵敏度分别为: 低于0.1微克: Ca、In。

介于0.1微克和1微克间: F、Sc、Se、Br、Sr、Ru、Sb、I、Cs、Ba、Nd、Sm、Zu、Gd、Re、Au、Hg。

介于一微克和10微克: Si、Cl、K、Nd、Zn、Gd、Ge、Rb、y、Zr、Mo、Ag、Te、Ce、Dy、Tm、yb、Ti、Pb。

美国Miami医学中心,英国伯明翰,比利时等实验室也对此进行了研究。因此,利用回旋,串列静电,直线等加速器、采用不同反应道产生不同能量,强度更强的中子是提高快中子活化分析能力的一个重要趋势。①分析样品中干扰元素的存在是使分析灵敏度不高的原因,因此选用不同的反应道,避开干扰,提高探测极限也是非常有意义的。例如分析F是快中子活化分析的重要工作,尤其在环境科学、地质科学中。但常规 $14\text{MeV}$ 中子分析, $^{18}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ ,而在有氮本底时则有反应 $^{18}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ ,这样对分析将产生严重干扰,但由于前一种反应阈能为 $1.6\text{MeV}$ ,而后一种为 $10.2\text{MeV}$ ,这样用能量低于 $10\text{MeV}$ 中子进行分析,就可以排除氧干扰。英国伯明翰大学辐射中心的科·让得勒采用3

$\text{MeV}$ 氘束及铍靶产生 $4.5\sim 6.5\text{MeV}$ 的中子对F进行了成功的分析。

## 四、结 论

不难看出,快中子束的应用在目前和未来仍然是重要的和具有广泛用途的,它的发展也是迅速的。快中子活化分析在国际上仍然是一种重要的分析手段,并且正在不断地发展和完善中;快中子活化分析的快速,无损特点在农业、文物、考古等领域中的应用,具有其他分析方法不能取代的优点,因而也必将成为快中子活化分析的重要方向。今后采用更强的中子源、除利用 $(D, T)$ 中子源外,广泛采用串列静电、电子直线、回旋加速器等,在保持快中子活化分析特点前提下,提高分析灵敏度,扩大分析范围以及普遍采用快速样品传输系统将是这一方法改进的重要方向。

### 参考文献

- 一、Z. John, Nuclear Science and Engineering, 91(1985)173.
- 二、K. KoH, Nucl. Znstr. and meth. B 10/11(1985)1058.
- 三、J. H. KLIE, J. Radiochem. 71 (1982)256.
- 四、J. Alstad, INIS 15(1985)033431
- 五、I. Olmer et. al, J. Radio Nucl. chem. Letter, 94(1985)391.
- 六、V. N. Bhoraska, J. Radio. Nucl. chem, Letter, 95(1985)219.
- 七、S. I. Kafala, et. al, J. Radio. Nucl. chem. 97(1986)341.
- 八、M. Esprit et. al, J. Radio. Nucl. chem, 88(1985)31