

## 以核能为中心的中子工作

唐洪庆

(中国原子能科学研究院核物理所 北京 102413)

**摘要** 本文简要地介绍并评述了中国原子能科学研究院现在正在进行的和将要进行的与核能相关的、特别是与聚变能相关的中子实验工作。

**关键词** 中子, 中子实验, 中子核数据.

中子是一个用途很广的中性粒子. 除核能和核物理外, 它已用于核天体物理、凝聚态物理、生物、医学、地质、探矿等方面. 目前冠以“中子”的应用, 诸如中子测井、中子测水、中子照相、中子治癌、中子探雷、中子活化分析以及中子辐照鱼、虾、蚕等正在不断增加, 其应用前景是可想而知的. 本文仅结合我室的专业领域, 谈谈我院与核能有关的中子实验工作.

中子, 自 1932 年发现以来, 一直紧紧地与核能的开发利用联系在一起. 裂变连锁反应的实现、裂变能的利用、原子弹的爆炸成功, 中子起着神秘的作用. 威力强大的氢弹、小巧玲珑的中子弹的巨大杀伤力, 主要也是靠中子. 将来取之不尽、用之不竭的核聚变能的和平利用, 更需要对中性子性质、中子与物质作用的各种参量, 即各种反应截面、反应产物的能谱和角分布、衰变性质等, 有一个全面透彻的了解, 要精确测量和计算出这些物理量的数值.

有人说:“目前的核数据已够用了. 而且世界上的五大核数据库(美国的 ENDF, 西欧的 JEF, 俄罗斯的 BROND, 日本的 JENDL 和我国的 CENDL)已经公开, 不像冷战时期那样互相保密”. 言外之意, 我国的核数据测量工作可以止步了. 乍听起来, 似乎很有道理. 不错, 至今已经测量、编评了大量核数据. 可以说, 对于一般的裂变堆, 数据已基本够用; 对于聚变堆, 主要的关键数据也已具备. 但是聚变堆至今尚未实现. 随着聚变能利用接近工程阶段和聚变装置的小型化, 很多实际应用的核数据和核测试技术的要求将会被提出. 近几年发现的情况正是如此.

近些年来, 国际原子能机构集中各国核科学家的建议, 组织了几个与聚变能工程有关的 CRP (Coordinated Research Program), 即协调研究项目. 因为聚变堆主要是 d-T 反应, 产生大量 14MeV 中子, 这些中子将与燃料核、结构材料核发生反应, 形成长寿命的放射性产物. 这些长寿命的放射性产物衰变缓慢, 日积月累, 越来越多, 如果一台聚变反应堆运行多年后需要维修, 将会对人体造成极大的危害. 如果这种反应堆退役, 对放射性废物的处理也是一个问题. 因此, 国际原子能机构组织了 CRP, 组织有基础的实验室测量快中子引起的生成长寿命放射性核的反应截面, 以选取放射性产物核生成截面小、寿命短的核素用作聚变堆的结构材料和屏蔽材料. 另外, 国际原子能机构组织的关于次级中子双微分截面的 CRP、结构材料核的  $(n, \alpha)$  反应截面的理论计算的 CRP 及聚变核数据库的编评 FENDL (Fusion Evaluated Nuclear Data Library) 都是为将来聚变能的利用服务的. 我院的中子物理研究、中子核数据测量目前已以聚变能的开发利用为中心布局, 少而精地开展实验测量工作. 根据聚变核装置设计及核测试的需要, 我院的快中子实验工作, 经过不断调整压缩, 目前只集中在如下四个方面, 即次级中子双微分截面, 快中子和带电粒子的活化截面, 快中子引起的高能  $\gamma$  射线及裂变产额和裂变中子谱. 另外, 根据需要, 打算开展 14MeV 中子的积分实验、结构材料核的  $(n, \alpha)$  反应双微分截面及低能聚变  $\gamma$  射线的实验测量等工作. 在分述这些课题之前, 首先介绍一下我院中子工作的实验基础.

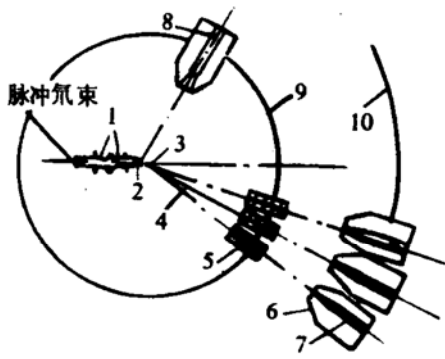


图 1 HI-13 串列加速器上的多探测器快中子飞行时间谱仪。  
1—拾取筒, 2—氘气靶, 3—样品, 4—准直器, 5—准直器;  
6—屏蔽体, 7—中子探测器, 8—中子源监视器, 9—3m 轨道;  
10—6m 轨道。

高强度的直流中子束和脉冲中子束(14MeV 直流中子束强度约为  $10^{12}$ n/s), 而且在这些设备上已配置了或将配置属于世界先进水平的测量设备. 例如 HI-13 串列加速器上的常规和非常规多探测器快中子飞行时间谱仪和带有太碘化钠-塑料反符合屏蔽探头的  $\gamma$  角分布仪, 其示意图如图 1、2、3 所示. 在倍加器上也配备了三探头飞行时间谱仪. 此外还配有离线测量设备. 除仪器设备外, 我院还有长期的技术积累和人才积累. 因此, 可以自成体系地进行各种中子实验研究工作和某些核测试技术的探索研究(这在全国可能是唯一的).

下面分述各课题的设置及目前状况.

### 1 1.8~14MeV 能区次级中子双微分截面测量

这方面的数据是聚变核装置设计所需要的, 在新近国际上提出的 7 项核数据要求中, 其中六项是关于 6~12MeV 能区次级中子双微分截面测量.

在 9~13MeV 之间, 由于缺乏合适的单能中子源, 实验数据极少. 至今只有 Li、Be、B、C 四个元素被美国洛斯·阿拉莫斯国家实验室(LANL)用加速氘的方法, 通过  $H(t, n)$  反应产生的中子源测量 10MeV 的次级中子双微分截面<sup>[1]</sup>.  $^7\text{Li}$  在比利时的 Geel 实验室也被测量过<sup>[2]</sup>, 用的是白光中子源和测量反冲质子脉冲高度分布然后解谱的方法. 由于白光源的高能中子成份较小, 入射中子的能量分散相当大(达 2.1MeV), 其能量分辨和数据精度都是相当差的. 由于加速氘对人体的危害以及实验的昂贵, LANL 早就停止了实验. 因此至今没有一个有效的测量 9~13MeV 能区次级中子双微分截面的好方法, 这也是为什么新近提出的 7 项核数据要求中有 6 项是 6~12MeV 能区次级中子双微分截面测量的原因. 为解决这一难题, 国外许多实验室进行了探索, 但都未能成功. 我们在常规快中子飞行时间谱仪<sup>[3]</sup>的基础上首创了非常规快中子飞行时间谱仪<sup>[4]</sup>, 消除了常规中子源(例

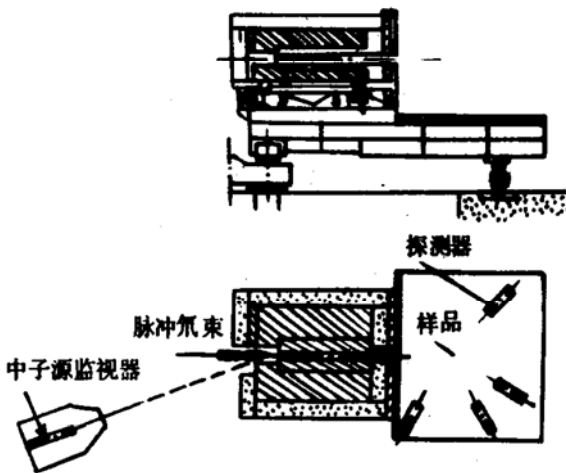


图 2 非常规多探测器快中子飞行时间谱仪的几何安排

我院在全国具有最好的中子设备, 具有能量配套的单能中子源. 两台大型反应堆(重水反应堆和游泳池反应堆)能为中子工作提供堆谱中子、裂变谱中子和铁、硅、钨的过滤束中子. 三台加速器(HI-13 串列加速器, 新建的强流毫秒脉冲倍加器和将要配置的小型串列加速器)能产生直到 40MeV 的单能中子. 其中, HI-13 串列配备氘气体靶以后可覆盖的中子能区为 4~40MeV; 小串列覆盖的能区为 6MeV 以下和 14~20MeV; 倍加器能在 14MeV 和 2.5MeV 给出

如 d+D 中子源)的破裂中子对次级中子能谱测量的干扰,并采用将常规谱仪测量与非常规谱仪测量结合起来的办法<sup>[4]</sup>,成功地解决了用高强度的常规中子源(D(d,n))测量 9~13MeV 能区次级中子双微分截面的难题.至今已用这种方法测量了 10MeV 中子与<sup>238</sup>U、<sup>209</sup>Bi、<sup>9</sup>Be 等核的次级中子双微分截面.

14MeV 次级中子双微分截面数据,虽有几家测量,但比较好的只有 A. Takahashi<sup>[5]</sup>一家,而且在它的测量中,轻核数据的误差较大,同一些数据库的评价数据相比,差别也较大.由于至今没有成功的理论模型来计算轻核的次级中子双微截面的数据,因此实验数据就显得更为重要.我们以前用伴随粒子飞行时间法测量过<sup>238</sup>U、<sup>209</sup>Bi 等核的数据,今后准备在新建脉冲倍增器上着重对轻核进行高水平的测量,提供一批高质量的实验数据,对已有的数据进行检验.

## 2 活化截面测量

快中子引起的长寿命放射性产物核的生成截面是国际上聚变堆研究中极为关心的一个问题.由于我们过去多年来在快中子激发曲线方

面作了大量的高质量测量和编评工作,国际原子能机构再次邀请我们参加长寿命放射性产物核生成截面测量的 CRP. 我们承担了一部分测量研究工作.至今已完成了 14MeV 能点下述反应截面的测量<sup>[6]</sup>:<sup>109</sup>Ag(n,2n)<sup>108m</sup>Ag, <sup>182</sup>W(n,n' $\alpha$ )<sup>178m2</sup>Hf, <sup>193</sup>Ir(n,2n)<sup>192m</sup>Ir, <sup>151</sup>Eu(n,2n)<sup>150m</sup>Eu, <sup>153</sup>Eu(n,2n)<sup>152m</sup>Eu, <sup>159</sup>Tb(n,2n)<sup>158</sup>Tb, <sup>179</sup>Hf(n,2n)<sup>178m2</sup>Hf 和 <sup>187</sup>Re(n,2n)<sup>186m</sup>Re. 这些数据中,不少是我们首次测量给出的.在参与 CRP 的工作中,我们的测量较多,而且质量也是相当好的,因而受到了国外同行的重视和好评.另外,在快中子和带电粒子的活化截面测量方面,还进行了指示剂反应的研究,为核测试提供了许多极为有用的数据.

## 3 裂变产额和裂变谱测量方面

产额数据在核测试中极为重要.它与燃耗因子和衰变热的确定密切相关.单能中子引起的<sup>238</sup>U和<sup>235</sup>U的裂变产物产额的数据在 9.1MeV 以下和 14MeV 有不少测量,但有的测量精度不是太高.在 9.1~14MeV 之间除了我们测量之外,没有别的实验测量.因此,我们在裂变产额

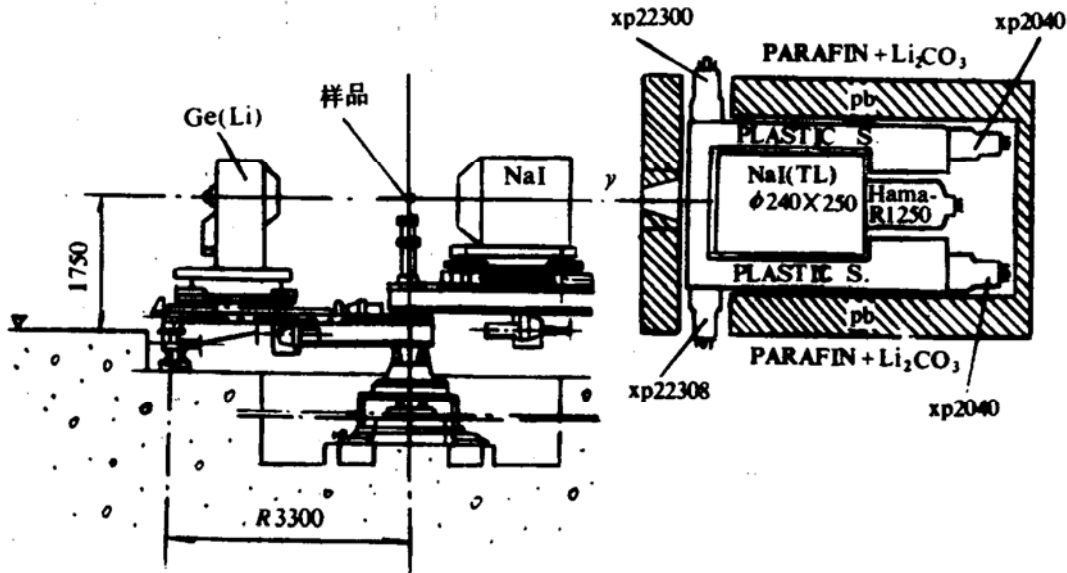


图 3 带有碘化钠—塑料反符合屏蔽探头的  $\gamma$  角分布仪

测量方面的目标是:根据需要,进行精细的测量,误差在 3% 以下,并填补一些空白能区的数据,研究某些裂变产物产额随入射中子能量的变化趋势<sup>[7]</sup>。

裂变瞬发中子能谱,对裂变材料的链式反应率及裂变耦合的热核区的造氙率都有重要影响.此能谱参数对于了解裂变机制也是有意义的.我们已建立了多层(103 层)分组(8 组)快裂变室,<sup>238</sup>U(天然铀)载重量约 5 克.已经测量了 12MeV 和 10MeV 中子引起的<sup>238</sup>U 的瞬发裂变中子谱<sup>[8]</sup>.现正准备测量 5.4MeV 中子的数据.

#### 4 快中子辐射俘获高能 $\gamma$ 射线测量

快中子辐射俘获产生的高能  $\gamma$  射线具有重要的实际应用和理论研究意义,是快堆、聚变堆及裂变-聚变混合堆等设计、测试及辐射防护设计不可缺少的数据.但目前能量 7~18MeV 能区的数据奇缺.我们在 HI-13 串列加速器上已开展了这方面的实验工作,测量了中子能量 7~18 MeV<sup>238</sup>U、<sup>56</sup>Fe、<sup>16</sup>O、<sup>12</sup>C 等核的  $(n, \gamma)$  反应截面,并在某些能量点测量了  $\gamma$  射线的角分布,得到了很好的结果<sup>[9]</sup>,受到国际原子能机构的重视.

除了上述四个方面的中子实验工作之外,我们还打算开展如下三方面的工作.

#### 5 14MeV 中子的积分实验

积分检验是核数据评价工作不可缺少的一环.国际上一些大的核数据库评价推荐的数据都需要经过积分实验的检验,发现其中存在的问题,提高数据质量和可信度.过去,由于实验条件的限制,中国核数据库推荐的核数据没有经过这种检验.新的强流毫微秒脉冲倍加器的建成将给我们提供开展这一工作的良好的实验条件.我们打算在这台倍加器上进行评价数据的基准积分实验工作.通过用库数据的计算值与积分实验值的比较分析,找出各类数据存在的问题,提出微分实验新的测量要求,指导核模型理论的改进方向,不断更新库数据,提高其质量,满足核工程的需要.这是我们进行积分实验

的内容之一.

积分实验的第二项内容是:检验核装置的物理设计思想和中子学计算的理论模型.随着聚变装置日益接近工程阶段,这种装置的概念设计将会提上议事日程,对不同的概念设计进行积分实验以优化设计是非常必要的.国际上的一些实验室根据需要,一般对各反应道的积分截面、定向中子谱、泄漏中子谱、某些专项积分量(如裂变率  $P_f(\infty)$ 、氙增殖率 TBR、中子倍增率  $M$  等)中的一项或几项进行测量.

为了配合核聚变工程项目的进行,打算在新建倍加器上重点开展这一工作,除了燃料核和中子增殖核之外,着重对结构材料核和屏蔽材料核进行实验研究.

#### 6 结构材料核的 $(n, \alpha)$ 反应双微分截面测量

这一工作的难度大.它集中了中子工作入射粒子注量率低、带电粒子工作样品小的缺点,因而其计数率低、即效应本底比差,计数时间长.因此国际上这方面的实验数据很少.但这方面的数据很重要,它牵涉到结构材料抗中子辐照的性能. $(n, \alpha)$  反应截面大的核素,不适合用于结构材料,因为  $(n, \alpha)$  反应在材料中产生的氦气会使之变脆.为了安全可靠地为聚变堆选用材料,国际原子能机构接连几次组织了结构材料理论计算的 CRP,并要求进行关于  $(n, \alpha)$  反应的实验测量.我们打算在 HI-13 串列加速器上开展这项工作,以适应我国聚变能开发利用选用材料的需要.

#### 7 低能核聚变产生的高能 $\gamma$ 射线测量

测量核聚变产生的高能  $\gamma$  射线在基础和应用两个方面都是十分有意义的.它对聚变能的利用和天体物理研究有重要的价值.核聚变过程中发射的高能  $\gamma$  射线测量是核聚变高温等离子体诊断的重要工具.由于高能  $\gamma$  射线穿透力强,受周围物质的干扰小,因此,用它比用中子和其它射线作为诊断工具更为优越.特别是在

无中子发射的核聚变的情况下,聚变产生的高能 $\gamma$ 射线将是唯一的诊断手段.我们将根据核聚变能应用的需要在新建的强流毫微秒脉冲倍加器上开展这一工作.

以上是中国原子能科学研究院目前和最近将来中子实验工作的主要内容,也是目前国际上核能相关的核数据测量最感兴趣的一些课题.这些课题都是根据国际国内需要而设置的.不少是国际上的前沿课题,已加入了国际原子能机构组织的CRP.其测试技术也进入了国际先进水平的行列.有的课题我们在方法上,在测试技术上已有所突破,已属国际领先水平.

### 参 考 文 献

1 Drake D M, et al. Nucl. Sci. and Eng. ,1977,63 : 401

- Drosg M, et al. Rad. Effect, 1986, 92 : 145  
 Lisowski P W, et al. LANL, 1980, LA8342  
 2 Dekempeneer E, et al. Nucl. Sci. and Eng. , 1987, 97 : 353  
 3 Sa Jun, et al. Chinese J. of Atomic Energy Sci. and Tech. , 1992, 26-6 : 1  
 4 Qi Bujia, et al. Chinese J. of Nucl. Phys. , 1992, 14 : 147  
 Tang Hongqing, et al. Proc. of Beijing Inter. Symp. on Fast Neutron Phys. , Beijing; China, Sep. 1991, P32  
 5 Takahashi A, et al. *ibid*, P. 3  
 6 Lu Hanlin, et al. Chinese J. of Nucl. Phys. , 1991, 13 : 203  
 Chinese J. of Nucl. Phys. , 1993, 15 : 71  
 7 Li Ze, et al. Proc. of Beijing Inter. Symp. on Fast Neutron Phys. , Beijing, China, Sep. 1991, P. 100  
 8 Li Anli, et al. *ibid*, P. 68  
 9 Huang Zhengde, 8th Inter. Symp. on Capture  $\gamma$  ray Spectroscopy and Related Topics, Sep. 20~24, 1993  
 Chinese J. of Nucl. Phys. , 1991, 13 : 97

## Neutron Experimental Work on Nuclear Energy Development in CIAE

Tang Hongqing

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** Neutron experiments related to the development of nuclear energy, especially fusion energy, in CIAE at present and in the near future are briefly introduced and reviewed.

**Key Words** neutron, neutron experiment, neutron nuclear data.