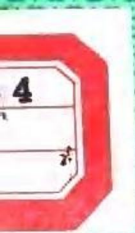


轻核反应截面测量

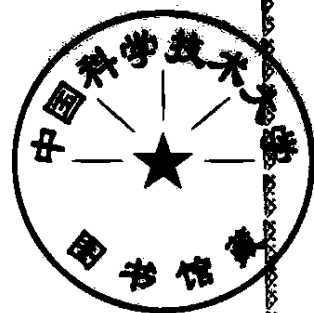
中国科学院近代物理研究所 编



科学出版社

轻核反应截面测量

中国科学院近代物理研究所 编



科学出版社

1989

内 容 简 介

本书介绍作者所做的低能氘-氘、氘-氘反应截面的测量,阈能至 14 兆电子伏中子引起的锂-6、锂-7 反应截面和次级中子能谱的测量,以及相应的实验技术。作者在前人的基础上,对这些测量及实验技术有所发展,有一定参考价值。

本书可供核科学和核工程科技人员以及有关大专院校师生参考。

轻核反应截面测量

中国科学院近代物理研究所 编

责任编辑 陈菊华

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989 年 11 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1989 年 11 月第一次印刷 印张: 8

印数: 0001—360 字数: 208,000

ISBN 7-03-001229-1/O·271

定价: 11.00 元

序

中国科学院近代物理研究所于 1965 年接受了上级下达的两项任务: 1 号任务——低能氘-氘和氘-氘反应截面测量; 2 号任务——阈能至 14 MeV 中子对 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的非弹性碰撞截面及次级中子能谱测量。

为了完成这两项任务, 近代物理研究所领导和著名核物理学家杨澄中组织该所的主要科技力量进行了攻关。

先后参加 1 号任务课题的人员有(按姓氏笔画为序):

王 经	王义芳	王志国	王树芬
王素芳	王菊梅	牛木林	牛鸣远
尹全民	车芳裕	包守海	叶维祯
刘 愷	刘建业	朱怀安	苏荫权
李长林	李俊生	李振坤	杨尚运
杨澄中	吴美珍	沈志清	时吉中
余楠生	张 立	张长栓	张春华
张贵文	张集泉	张慧敏	陈 厚
陈克良	陈克勤	陈务忠	周 勳
郑志钦	郑金山	范存英	赵竹庭
赵进华	赵贵堂	赵俊刚	胡志煜
郝斌干	姜厚德	钟纪泉	徐荣辉
徐国俊	郭干城	郭箕弟	凌川弟
袁双贵	唐 林	常更福	梁国照
曾文炳	程 洁	游承伦	葛凌霄
繆競威	魏正观		

先后参加 2 号任务课题的人员有(按姓氏笔画为序):

才景祥	王友桐	王正大	王秀英
王纪海	王有德	尹建华	龙 敖
冯恩普	冉启惠	邬恩九	邢纯洁
刘文达	刘文海	刘平京	刘补生
刘洪业	刘国兴	刘德庭	冷长庚
沈菊生	苏荫权	芦雪球	肖钦羨
李天佑	李长吉	李长林	李芳著
李振坤	杨 宇	杨银珠	杨澄中
张光阳	张振康	吴义国	吴玉明
吴作哲	吴钟立	吴美珍	吴国华
陈巨声	陈务忠	郑纪文	周嗣信
钟纪泉	姚宗伦	侯明东	赵彦森
诸永泰	徐均心	徐树威	夏国中
秦有伦	黄业成	龚定夫	曾文炳
谢元祥	葛素仙	蒋游华	焦敦庞
戴光曦	魏宝文		

以两个课题组为主,在杨澄中的统一指导并亲自参加下,在迴旋加速器组、高压倍加器组、核电子学组、核探测器组、近代物理研究所实验工厂和广大职工、以及各有关兄弟单位的大力协同下,于1970年全面完成了任务,为我国核工程研制提供了热核材料可靠的第一手数据。同时,对于检验当时国外文献相应数据的可靠性,澄清存在的某些分歧,也起了很好的作用。

本工作已于1983年解密。编辑出版本书是已故的近代物理研究所名誉所长杨澄中教授的宿愿。在他的倡导下,1986年由魏宝文召集有关人员拟定了编写纲目,并商定在原研究报告的基础上,分别委托参加1号任务和2号任务的有关人员撰稿。在本书即将付印之际,愿借此机会向为1号任务和2号任务做出贡献的近代物理研究所内外同志表示谢意,对杨澄中教授表示怀念。

魏宝文 闵 亚 冉启惠

1988年

目 录

序.....	i
第一章 引言.....	魏宝文 1
第二章 低能 D-D 和 D-T 反应	12
2.1 15—150 keV $D(d,p)T$ 和 $D(d,n)^3He$ 反应截面测量.....	张 立 12
2.2 20—160keV $D(d,p)T$ 和 $D(d,n)^3He$ 反应角分布测量.....	尹全民 39
2.3 D-T 反应截面测量.....	王 径 王志国 46
2.4 低能 D-D 和 D-T 反应实验技术.....	59
2.4.1 无窗气体靶及靶室系统	郝斌干 59
2.4.2 气体压强的绝对测量	车芳裕 65
2.4.3 用量热器测量加速器粒子流强度	徐荣辉 72
2.4.4 热阀与氚罐	徐国俊 87
2.4.5 纯度分析.....	
..... 张 立 袁双贵 刘建业 车芳裕	91
2.4.6 D-D 反应中截面计算的立体角修正	陈务忠 97
第三章 阈能至 14 MeV $^6Li(n,dn')\alpha$ 和 $^7Li(n,tn')\alpha$ 反应	105
3.1 球壳透射法测定 $^6Li(n,dn')\alpha$ 及 $^7Li(n,tn')\alpha$ 反应截面.....	诸永泰 李长吉 冯恩普 105
3.2 9—12MeV 的 $^6Li(n,dn')\alpha$ 和 $^7Li(n,tn')\alpha$ 反应截面测量.....	魏宝文 吴钟立 杨银珠 李天佑 刘平京 126
3.3 用载锂分辨乳胶测量 $^6Li(n,nd)^4He$ 和 $^7Li(n,nt)^4He$ 反应截面及次级中子能谱.....	郭恩九 155

3.4 单能中子源 230

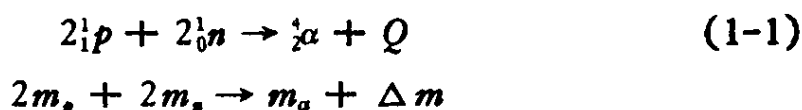
3.4.1 1.5m 回旋加速器 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反应单能中子源.....

..... 魏宝文 杨银珠 刘平京 谢元祥 230

3.4.2 9-12MeV D-D 单能中子源..... 徐树威 242

第一章 引言

轻核聚变反应可以释放出巨大的能量。例如，我们可以设想将两个质子和两个中子熔合成一个 α 粒子，其反应方程式是



由质量亏损

$$\begin{aligned} \Delta m &= 2 \times (1.007825) + 2 \times (1.008665) - 4.002603 \\ &= 0.030377 \text{ amu}^{1)} \end{aligned}$$

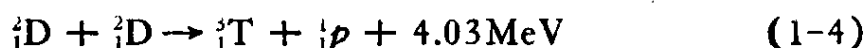
可以推算出反应 (1-1) 所释放出的能量 $Q = 28.2 \text{ MeV}^{1)}$ 。还可以设想将四个质子熔合成一个 α 粒子，其反应方程式是



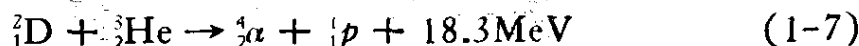
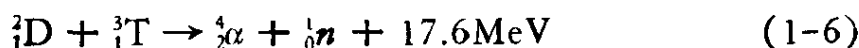
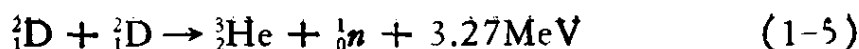
反应 (1.2) 释放出的能量 $Q = 25.7 \text{ MeV}$ 。这个反应是太阳上有碳、氮、氧和氢等元素的同位素参与的复杂的链式反应，即所谓碳链中的一环。碳链是太阳能的主要来源。然而，巨大的太阳能靠的是巨大的太阳质量，而不是靠高的聚变反应率。事实上，碳链的过程进行得非常缓慢，以至于它在地球上对人类没有多大实用价值。缓慢的原因在于，在太阳的温度下，像 (1-2) 那样的反应，发生的几率是很小的。

同碳链相反，氢弹则是另一种情况。它靠裂变反应产生的高温，使聚变反应率极高乃至失去控制。介于碳链和氢弹二者之间的是受控聚变反应。这时，聚变反应率是可以控制的，可以利用它建成聚变反应堆，为人类提供新的能源。

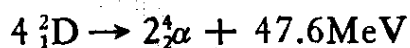
从氢弹或者聚变反应堆的角度出发，以下一些轻核聚变反应的研究，特别引起人们的兴趣：



1) $1 \text{ amu} = 1.66057 \times 10^{-27} \text{ kg}$. $1 \text{ eV} = 1.602189 \times 10^{-19} \text{ J}$. 下同。



这里D代表氘, T代表氚. 把以上的反应加起来, 我们有



这就是说, 用氘作燃料的轻核聚变反应, 每个质量单位约产生6MeV的能量. 在用 ${}^{235}\text{U}$ 作燃料的裂变反应中, 每个质量单位仅产生约0.85 MeV的能量. 此外, 氘的同位素丰度是0.015%, 自然界有丰富的贮量.

两种核熔合的聚变反应率 R 由下式定义:

$$R = n_1 n_2 \nu \sigma \quad \text{cm}^{-3}\text{s}^{-1} \quad (1-8)$$

其中 $n_1, n_2 =$ 核密度 cm^{-3}

$\nu = 1, 2$ 两种核的相对运动速度 cm s^{-1}

$\sigma =$ 反应截面 cm^2

σ 随能量 E 而变化. 事实上, 当 $E < 1\text{keV}$ 时, σ 很小. $\sigma(E)$ 叫聚变反应的激发函数. 由于核之间的库仑排斥力, 在聚变反应发生之前, 必须将原子核加速到一定的能量, 以克服库仑位垒的阻挡. 在 $E > 1\text{keV}$, 例如, $E = 10\text{keV}$ 时, 由 $E = \frac{3}{2} kT$ 可以

计算出气体温度 $T = 0.77 \times 10^8\text{K}$, k 是 Boltzmann 常数. 在这样的高温下, 核燃料气体将全部被电离, 形成高温等离子体. 所以, 轻核聚变反应又叫热核反应. 它的实现同高温等离子体物理连系在一起. 这时, 速度 ν 遵循 Maxwell 分布, R 改为

$$R = n_1 n_2 \langle \sigma \nu \rangle \quad (1-9)$$

聚变反应能量释放率 P_R 是

$$P_R = RQ \quad (1-10)$$

令 P_{rad} 代表等离子体的电磁辐射能量损耗率, 则

$$P_R = P_{rad} \quad (1-11)$$

给出点火条件. 例如, 反应 (1-4) 和 (1-5) 的点火温度约为35keV, 反应 (1-6) 的点火温度约为4 keV. 令 τ 表示等离子体约

束时间,则

$$\tau P_R = \frac{3}{2} (n_1 + n_2) kT + \tau P_{rad} \quad (1-12)$$

给出过程自持的 Lawson 判据. 令 $P_{rad} = 0$, $n_1 = n_2$, 式 (1-12) 可化为

$$n\tau = \frac{3kT}{\langle \sigma v \rangle Q} \quad (1-13)$$

式 (1-13) 给出了过程自持的最低条件. 例如, $kT = 10\text{keV}$ 时, 反应 (1-6) 的自持条件是 $n\tau > 10^{14}\text{s cm}^3$.

由式 (1-13) 可以看出, 在氢弹或聚变反应堆研制中, 低能轻核聚变反应的激发函数 $\sigma(E)$ 是一个重要的数据.

实验室测量 $\sigma(E)$ 的方法是使用带电粒子加速器, 将入射核加速到一定的能量, 另一种核制成气体或固体靶子固定在一定位置. 一定能量的核入射到固定的靶核上产生聚变反应. 同加温等离子体产生聚变反应不同, 这时, 式 (1-8) 改为

$$R = \phi n \sigma \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1} \quad (1-14)$$

其中 $\phi =$ 入射核通量 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

测定 R , ϕ 和 n 可计算 σ . 加速器的束流能量单色性好, 调节方便, 改变 E , 可得到 $\sigma(E)$. $\sigma(E)$ 由下式计算:

$$\sigma(E) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_1^{-1} \sigma(E, \phi, \mu) d\mu \quad (1-15)$$

$$\text{或} \quad \sigma(E) = \sigma(E, \phi, \mu_0) \int_0^{2\pi} d\phi \int_1^{-1} \frac{\sigma(E, \phi, \mu)}{\sigma(E, \phi, \mu_0)} d\mu$$

故实际测量的是某一个立体角 $d\phi d\mu$ 上的微分截面值 $\sigma(E, \phi, \mu_0)$ 和微分截面的相对角分布 $\frac{\sigma(E, \phi, \mu)}{\sigma(E, \phi, \mu_0)}$. 一般选 $\mu_0 = 0$,

$\sigma(E, \phi, \mu)$ 对方位角 ϕ 是各向同性的. R 是通过测定相应反应的发射粒子而得到的, 例如, 反应 (1-4) 的 1_0p , 反应 (1-5) 和 (1-6) 的 1_0n 等. 这里说的角分布指的也是这些反应的发射粒子相对于入射束方向的角分布. 反应 (1-4), (1-5) 和 (1-6) 可以分别表示

成 ${}^2\text{D}(d,p){}^3\text{T}$, ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 和 ${}^2\text{D}(t,n){}^4\alpha$ 。符号的意义按顺序分别为靶核、入射粒子、发射粒子和剩余核。

低能 D-D 反应的研究可以追溯到人类用加速器研究原子核反应的早期阶段^[1.1-1.4]。第一个各向异性角分布就是对 ${}^2\text{D}(d,p){}^3\text{T}$ 反应观察到的^[1.3]。低能 D-T 反应的实验研究于 1949 年在文献上也报道过^[1.4]。

从 40 年代末开始,美国、英国和苏联的一些重要的核物理实验室都相继开展了 D-D 和 D-T 反应的截面测量工作,实验技术不断得到改进。这些改进主要致力于消除由于低轰击能量而导致的系统误差,提高截面数据的测量精度。到 60 年代初, D-D 和 D-T 反应的截面数据已经积累得相当多了。大体上说,不同作者提供的 ${}^2\text{D}(d,p){}^3\text{T}$ 反应截面数据一致性较好。而对于 ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 和 ${}^2\text{D}(t,n){}^4\alpha$ 反应,则由于中子的探测精度比带电粒子差,反应截面数据的偏离较大。例如, ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 反应截面数据偏离高达 20%, ${}^2\text{D}(t,n){}^4\alpha$ 反应截面数据偏离高达 25%。从能区看, $E \geq 45 \text{ keV}$ 时一致性较好, $E < 45 \text{ keV}$ 时,由于低能区的测量困难较多,一致性也较差。

如上所述,既然低能 D-D 和 D-T 反应截面数据还有分歧,而它们又是那么的重要,所以,有必要以精密的实验对国际上已发表的数据进行检验,提供出我们自己的数据。60 年代中,我们开展了低能 D-D 和 D-T 反应的实验研究。在感兴趣的能区内,对反应 (1-4), (1-5) 和 (1-6) 的 $\sigma(E)$ 进行了测量。这些测量构成了 1 号任务的主要内容。

实验采用无窗气体靶^[1.5],通过测量气体压强计算靶核数^[1.6],用量热法测定加速器束流强度^[1.7],发展了氘加速技术和氘、氚气体的贮存技术^[1.8],对气体进行了纯度分析^[1.9],对结果进行了立体角修正^[1.10]。在 $E_d = 15-160 \text{ keV}$ 的能区内,对 ${}^2\text{D}(d,p){}^3\text{T}$ 和 ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 反应进行了 $\sigma(E)$ 测量和角分布测量,其结果分别示于图 1-1—1-4^[1.11,1.12]。

在 $E_t = 20.7-171.5 \text{ keV}$ 的能区内,对 ${}^2\text{D}(t,n){}^4\alpha$ 反应进行了

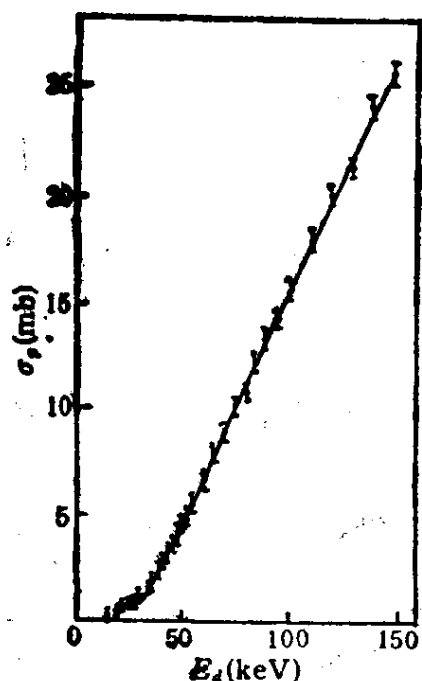


图 1-1 ${}^2\text{D}(d,p){}^3\text{T}$ 反应的 $\sigma(E)$

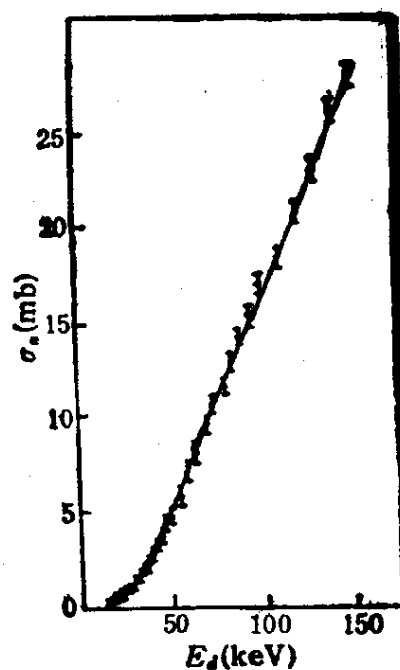


图 1-2 ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$ 反应的 $\sigma(E)$

$\sigma(E)$ 和角分布测量, $\sigma(E)$ 的结果示于图 1-5^[1,13]。角分布测量表明, 低能 D-T 反应的角分布是各向同性的。表 1-1 给出了 $\sigma(E)$ 的测量误差。

表 1-1 低能 D-D 和 D-T 反应 $\sigma(E)$ 的测量误差

$E_d(\text{keV})$	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$		$E_d(\text{keV})$	$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$
	$\text{D}(d,p)\text{T}$	$\text{D}(d,n){}^3\text{He}$		$\text{D}(d,n)\alpha$
20	4.8	4.8	13.8	5.0
45	4.0	4.3	45.1	4.5
100	3.6	3.8	84	3.5
150	3.6	3.7	108.2	3.2

我们看到, 反应 (1-5) 和 (1-6) 都发射快中子。对低能轻核反应, 由反应运动学可计算发射中子的动能 E_n 。

$$E_n = \frac{M}{m + M} Q \quad (1-16)$$

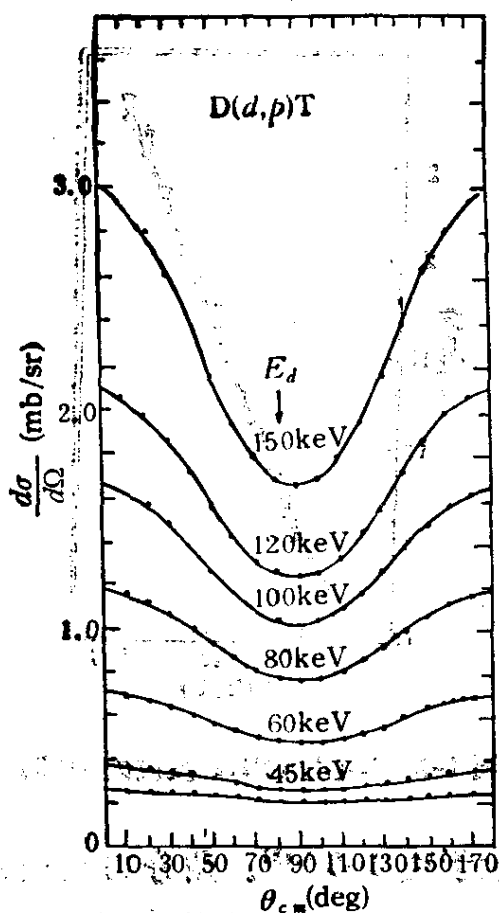


图 1-3 $D(d,p)T$ 反应质子角分布

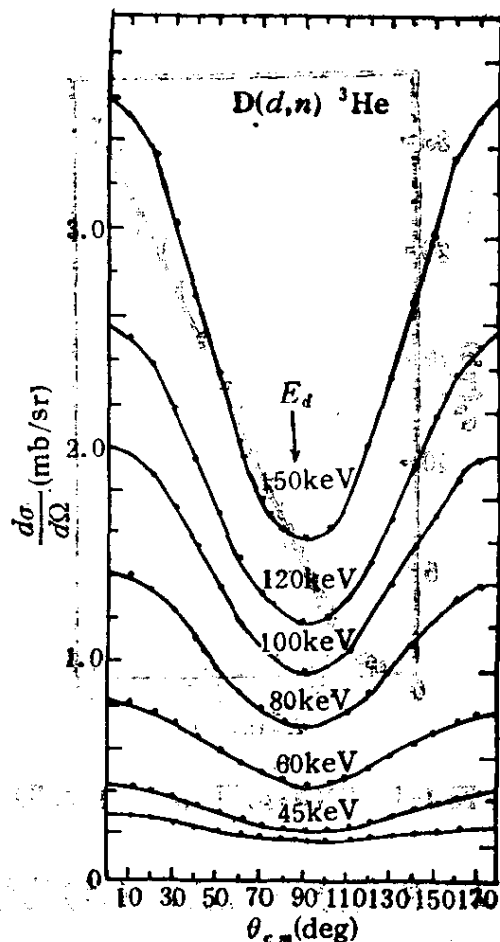
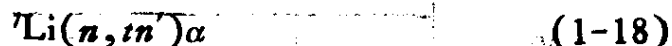


图 1-4 $D(d,n)^3\text{He}$ 反应中子角分布

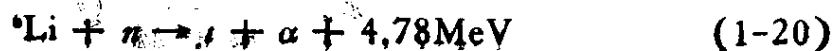
这里 m 和 M 分别表示中子和剩余核的质量。例如，反应 (1-5) 和 (1-6) 所发射中子的动能分别为 2.5 和 14.1 MeV。这使我们想到另两个轻核反应



这两个反应都是吸能反应，即 Q 值为负，存在着反应阈 E_{th}

$$E_{th} = -\frac{m_1 + M_1}{M_1} Q \quad (1-19)$$

这里 m_1 和 M_1 分别表示入射粒子和靶核的质量。通过反应 (1-17) 和 (1-18)，中子被慢化，慢中子同 ${}^6\text{Li}$ 相碰撞又可以产生氚并释放出能量，其反应方程式为



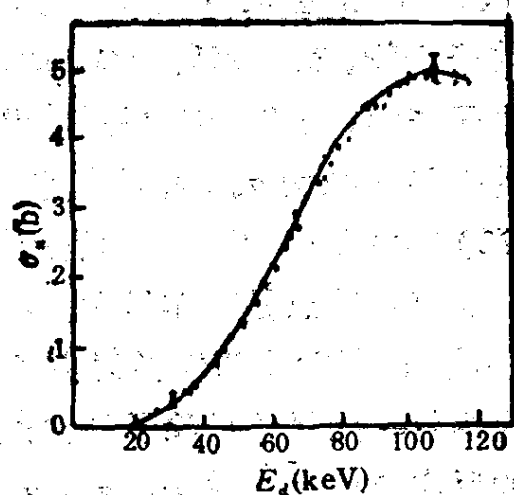
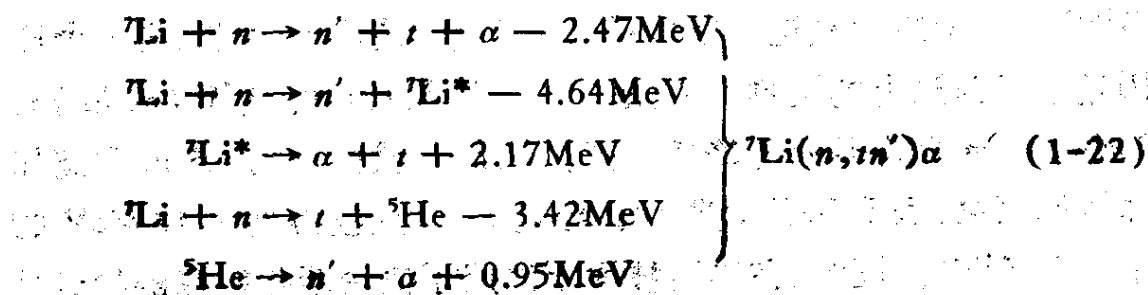
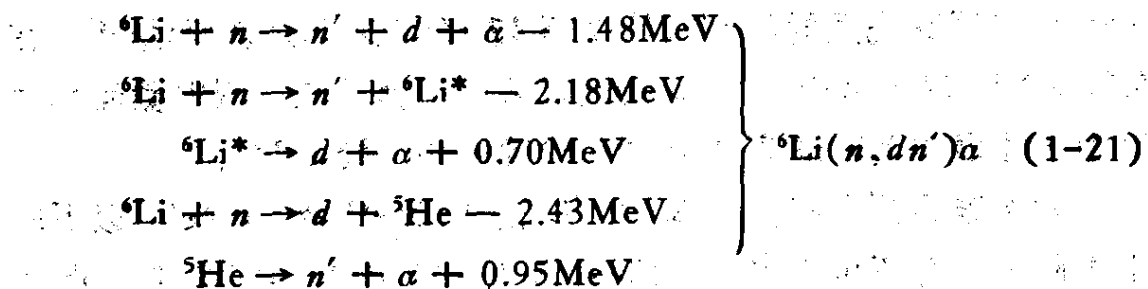


图 1-5 ${}^2\text{D}(t,n){}^4\alpha$ 反应的 $\sigma(E)$

反应 (1-17), (1-18) 和 (1-20) 说明, D-D 和 D-T 反应产生的快中子, 在被锂层慢化的过程中可以再生出聚变核燃料氘和氚并释放出一部分能量。所以, 这些反应的 $\sigma(E)$ 同样也是氢弹或聚变反应堆研制的基本核数据。60 年代中, 我们开展了阈至 14.1 MeV 中子对天然锂的两个同位素 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的非弹性碰撞截面及次级中子能谱的研究。这些研究构成了 2 号任务的主要内容。

在感兴趣的能区内, 反应 (1-17) 和 (1-18) 包含有以下的反应机制, 它们在实验测量上是难以区分的:



反应 (1-21) 和 (1-22) 的截面测量方法可分为三类。第一类是测量反应的带电粒子产物, 有载锂乳胶法和测氚活性法^[1.14, 1.15]。第二类是测量次级中子能谱, 如飞行谱仪法等^[1.16]。第三类是用球壳透射法测量中子的去弹性截面 σ_{sc} , 扣除其它反应道, 间接得到反应 (1-21) 和 (1-22) 的截面值^[1.17]。载锂乳胶法的优点是直接, 并能推算出次级中子能谱, 缺点是工作量大。测氚活性法只适用于 ${}^7\text{Li}$ 。飞行谱仪法测量的是除了弹性散射中子外的所有发射中子的反应截面。球壳透射法测量的是除了弹性散射中子外, 包括带电粒子发射在内的反应总截面。令 $\sigma_t, \sigma_{el}, \sigma_{sc}, \sigma_{n,n}, \sigma_{n,n'} \gamma$ 和 σ_{np} 分别表示总截面、弹性散射截面、去弹性散射截面、发射一个以上中子的截面、非弹性散射截面和带电粒子发射总截面, 在我们所研究的能区内, 对 ${}^6\text{Li}$ 或 ${}^7\text{Li}$ 有

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \sigma_{el} + \sigma_{sc} \\ \sigma_{sc} &= \sigma_{n,n} + \sigma_{np} \\ \sigma_{n,n'} &= \sigma_{n,dn'} (\text{或 } \sigma_{n,t_n'}) + \sigma_{n,n'} + \sigma_{n,n'} \gamma\end{aligned}\quad (1-23)$$

飞行谱仪法测量的是 $\sigma_{n,n'}$, 球壳透射法测量的是 σ_{sc} 。利用这两个方法测量 $\sigma_{n,dn'}$ 或 $\sigma_{n,t_n'}$ 的依据是, 在所研究的能区内, 其它反应道的截面数据较全, 并且占的比例较小。例如, 当 $E_n = 9\text{MeV}$ 时, 其它反应道占 σ_{sc} 的比例: ${}^6\text{Li}$ 约为 11%, ${}^7\text{Li}$ 约为 20%。鉴于以上分析, 我们对于反应 ${}^6\text{Li}(n, dn')\alpha$ 和 ${}^7\text{Li}(n, t_n')\alpha$ 的研究, 从阈至 9 MeV 采用球壳透射法^[1.18], 从 9 至 12 MeV 采用球透射法^[1.19], 在 5.6, 9.2 和 14.1 MeV 三个能量点, 采用载锂乳胶法测出截面和次级中子能谱作为对球壳透射法和球透射法的检验^[1.20]。

天然锂的两个同位素 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$ 的 14 MeV 及 14 MeV 以下的中子截面, 有不少人进行了研究, 但 9—12 MeV 能区的实验点不多^[1.21]。一个原因是这一段能量缺少合适的单能中子源, 另一个原因是中子探测上的困难。但是, 这一段能量正好是 ${}^6\text{Li}(n, dn')\alpha$, ${}^7\text{Li}(n, tn')\alpha$ 反应截面的峰值能区。为此, 我们利用 1.5 m 迴旋加速器的氘束, 配以降能吸收片, 经过 D-D 反应得到 9—12 MeV 的单能中子^[1.22]。同时, 在实验技术上发展了使用活化探测器的球透

射法来测量 σ_{sc} , 从而避免了 γ 本底的干扰^[1.19]. 2—9 MeV 的单能中子是利用 1.5 m 迴旋加速器的质子束, 配以降能吸收片, 用 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反应产生的^[1.23]. 14.1 MeV 中子是利用高压倍加器的氘束, 由 D-T 反应产生的^[1.20]. 关于 14.1 MeV 中子的 ${}^6\text{Li}(n,dn')\alpha$ 和 ${}^7\text{Li}(n,tn')\alpha$ 反应截面及次级中子能谱示于图 1-6—图 1-9.

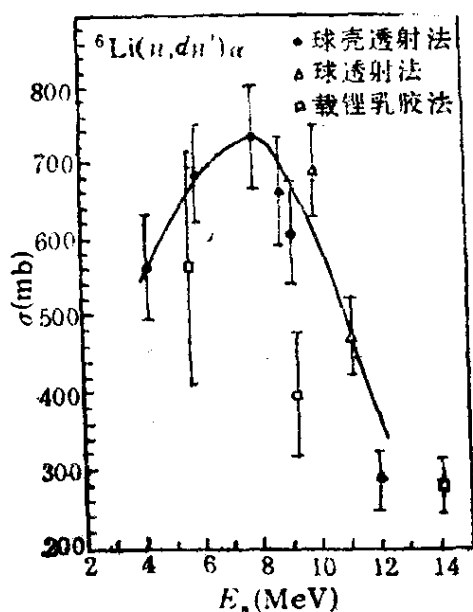


图 1-6 ${}^6\text{Li}(n,dn')\alpha$ 反应截面

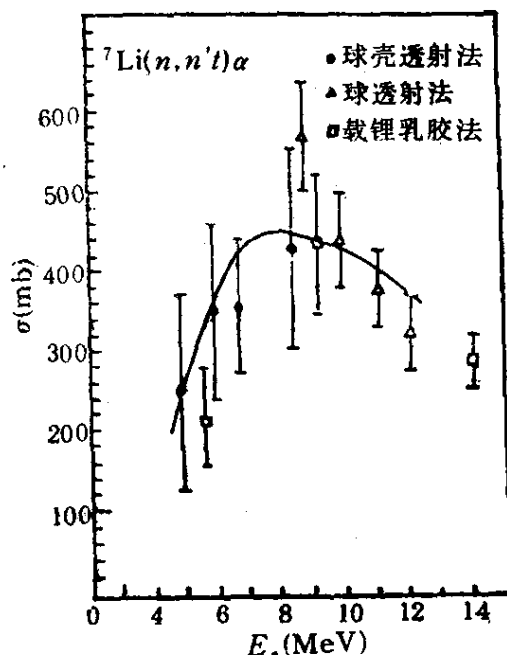


图 1-7 ${}^7\text{Li}(n,tn')\alpha$ 反应截面

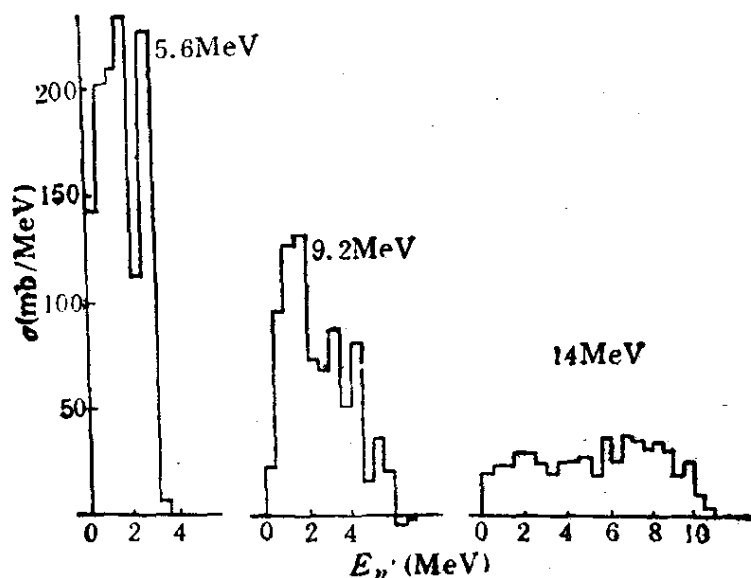


图 1-8 ${}^6\text{Li}(n,dn')\alpha$ 反应的次级中子能谱

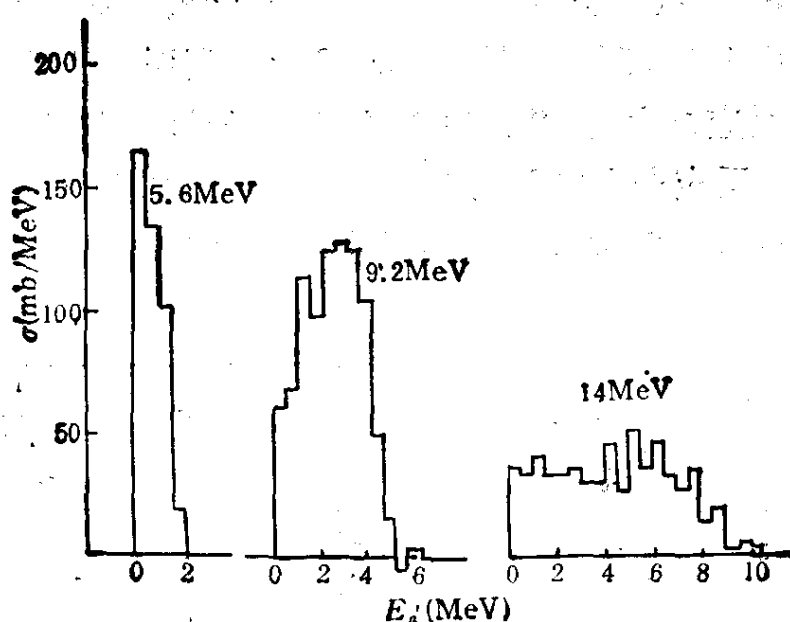


图 1-9 ${}^7\text{Li}(n, tn')\alpha$ 反应的次级中子能谱

本书第二章叙述了低能 D-D 和 D-T 反应的研究成果, 以及相关技术。第三章叙述了快中子对天然锂的两个同位素的非弹性碰撞截面和次级中子能谱研究成果以及相关技术。除了低能 D-D 和 D-T 反应的结果在文献^[1,24]上曾作过简短报道外, 其余均为首次发表。

魏宝文

参 考 文 献

- [1.1] E. O. Lawrence et al., *Phys. Rev.*, 44(1933), 56
- [1.2] M. L. E. Oliphant et al., *Proc Roy Soc. (London)*, A144 (1934), 692.
- [1.3] A.E. Kempton et al., *Proc. Roy. Soc. (London)*, A157(1936), 386.
- [1.4] E. Bretcher et al., *Phys. Rev.*, 75(1949), 1154.
- [1.5] 郝斌干, 无窗气体靶及靶室系统, 本书 §2.4.1.
- [1.6] 车芳裕, 气体压强的绝对测量, 本书 §2.4.2.
- [1.7] 徐荣辉, 用量热器测量加速器粒子流强度, 本书 §2.4.3.
- [1.8] 徐国俊, 热阀与氦罐, 本书 §2.4.4.
- [1.9] 张立等, 纯度分析, 本书 §2.4.5.
- [1.10] 陈务忠, D-D 反应中截面计算的立体角修正, 本书 §2.4.6.
- [1.11] 张立, 15--150 keV $\text{D}(d, p)\text{T}$ 和 $\text{D}(d, n){}^3\text{He}$ 反应截面测量, 本书 §2.1.
- [1.12] 尹全民, 20--160 keV $\text{D}(d, p)\text{T}$ 和 $\text{D}(d, n){}^3\text{He}$ 反应角分布测量, 本书 §2.2.