

利用载轧大液体闪烁探测器测量 (n, 2n)和(n, 3n)反应截面

向正瑜

(四川大学原子核科学技术研究所)

摘要: 本文首先简单介绍了实验测量 (n, 2n) 和 (n, 3n) 反应截面的意义、国外使用大液体闪烁探测器进行测量的情况, 然后重点介绍了四川大学计划利用载轧大液体闪烁探测器进行实验测量的各种考虑。

一、前言

(n, 2n)和(n, 3n)反应是能量为6—30 MeV中子与原子核作用产生的重要反应之一, 其反应截面是核工程和核武器设计的重要核数据, 也是重要的活化及剂量学反应截面。

实验测量 (n, 2n), (n, 3n)截面的方法有四种: 活化法、球壳透射法, 中子能谱法和大液体闪烁探测器方法。第四种方法使用的载轧大液体闪烁探测器实际上是中子探测器, 因具有较高的探测效率、能够探测中子数目, 所以能直接测量 (n, 2n)和(n, 3n)截面。这种方法可用于任何核素, 只要求提供一定量的材料作为测量样品。

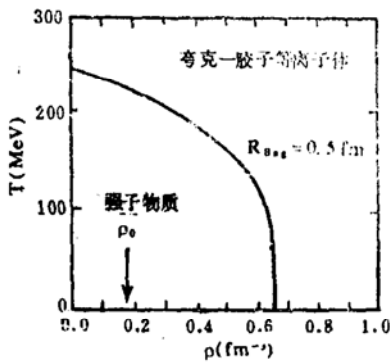


图4. 强子物质与夸克-胶子等离子体的相变图, 实线为相变分离线

其重迭区至少一个袋中有一个夸克, 这样就可得到像图中大 $R_{0.1}$ 值时给出的相变情形一样的一些条件。图中给出的极限相变参量可用下式表示:

$$T = 270(\rho_c - \rho)^{1/4} \quad (6)$$

三、结论

本文已用一些简单的思想对核物理学中

出现的一些临界现象的认识进行了描述。就相互关联的核的热与压缩分开讨论而言, 就会发现:

1. 核物质的多重碎裂是一种平均场涨落变大的结果。
2. 对核的破裂而言, 压缩要比热激发更有效。
3. 对一个处于正常密度的系统而言, 只要热激发能大于系统结合能的70%, 便可达到破裂所需要的能量。

4. ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ 的密度不稳定点的值是0.1核子/ fm^3 。

类似的观点可用来计算形成夸克-胶子等离子体的条件。尽管这一方法简单, 但只有得到更完善的模型才可得到同样的条件。这很可能表明, 几何性质在很大程度上主宰了这一过程。

(景成祥摘译自 Rapport
DPh-N/Saclay n°2445
03/1987 刘国兴校)

国内对 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 反应截面的研究作了大量工作。第一、对一些重要核素的 $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$ 截面数据进行仔细的编纂和评价。第二, 反应系统学研究, 即从已有的大量实验数据预测至今没有数据的一些核素的 $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$ 截面。第三、用活化法测量 $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$ 截面。其中有中国原子能科学研究院卢涵林等人的工作^[1, 2]。他们在高压倍加器和静电加速器上, 通过 $T(d, n)^4He$ 反应产生中子, 用伴随粒子法和标准截面法测量中子通量, 使用 $NaI(Tl)$ 谱仪和 $Ge(Li)$ 谱仪测量生成核的活性, 对一系列核素测量了12—18MeV的 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 截面。其次有西南核物理与化学研究所王秀元的工作。他们测量了7个核素, 13.5—14.8MeV能区的 $(n, 2n)$ 截面。实验是在高压倍加器上进行的, 中子通量测量采用标准截面法, 活性测量用高纯锗谱仪和 $Ge(Li)$ 谱仪。

总之, $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$ 截面数据比较缺乏、精度不高, 几种方法测量的数据还存在某些系统偏差。我国核数据中心把 ^{235}U 、 ^{238}U 、 Np 、 ^{239}Pu 、 D 、 Be 和一些重要结构材料的 $(n, 2n)$ 、 $(n, 3n)$ 截面的高精度测量以及活化及剂量学反应截面中若干核的 $(n, 2n)$ 截面测量列为重要实验课题。国内正酝酿采用载钷大液体闪烁探测器测量 $(n, 2n)$ 和 $(n, 2n)$ 反应截面。

二、国外情况

国外使用大液体闪烁探测器所作的测量总计有四家。

1958年美国加州大学Ashby^[3, 4]首先采用这种方法测量了一些核素的14MeV的 $(n, 2n)$ 截面。探测器为载钷大液体闪烁体(810升)。由高压倍加器提供脉宽为0.5 μs 、重复频率2kHz的脉冲氘束, 经 $T(d, n)^4He$ 反应产生中子, 用伴随粒子法测量入射中子通量。

1969年英国AWRE实验室Mather^[5, 6]用

载钷大液体闪烁探测器(240升)在静电加速器上测量了20个核素几个能量点的 $(n, 2n)$ 截面。加速器产生脉宽为1 μs 、重复频率为9kHz的脉冲氘束, 经 $T(d, n)^4He$ 产生中子, 用 ^{238}U 裂变截面作标准来测定入射中子通量。

1976年法国Frehaut的测量^[7, 8]。该工作使用直径为76cm的球形载钷大液体闪烁探测器, 在串列静电加速器上经 $D(d, n)^3He$ 反应产生6—15MeV中子, 其氘能为3—12MeV。当入射氘能大于4.5MeV时, 产生了三体反应: $D(d, n + p)D$, 这时的中子已不是单能中子, 为了精确测量入射中子能谱, 他们使用两个脉冲调制系统。第一系统用以产生脉宽为2ns、重复频率为2.5MHz的脉冲, 使之可用飞行时间法测量中子能谱。第二个系统是测量 $(n, 2n)$ 截面所要求的, 在第一系统的基础上, 加一静电偏转板进行 μs 级脉冲调制, 其脉宽为1 μs , 重复频率约16.7KHz, 这里1 μs 宽的脉冲包括3个2ns宽的窄脉冲(参见图1)。

测得的入射中子能谱见图2, 低能中子不会产生 $(n, 2n)$ 反应, 但成为一种本底,

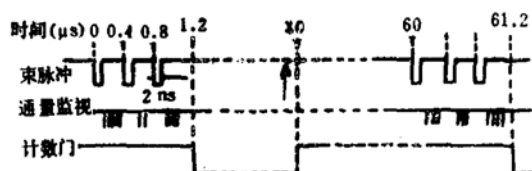


图1. 束流脉冲与计数门的时间关系

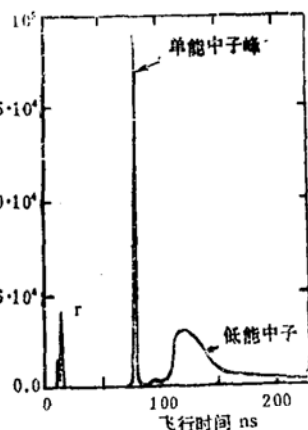


图2. 测得的入射中子飞行时间谱 ($E_d = 11.5$ MeV)

对通量测量影响很大。因为这里是用 ^{238}U 的裂变截面来定中子通量，所有中子（包括低能中子）都能使 ^{238}U 裂变。所以在计算中子通量时，要将裂变截面视为入射中子能谱确定的积分裂变截面。

第四家测量是1977年美国 Los Alamos 实验室 Veaser 的工作^[9]。探测器为75cm的球形载钷大液体闪烁探测器，测量能区为14.7—24MeV，入射中子由脉冲化静电加速器通过T(d,n) ^4He 反应产生，其脉宽为1 μs ，重复频率为25KHz。实验中，有一小液体闪烁探测器放在大探测器后面，测量入射中子脉冲幅度谱，从而确定入射中子通量。该工作测量了一系列核素的(n,2n)、(n,3n)截面，还作了理论计算。

总之，使用大液体闪烁探测器测量(n,2n)、(n,3n)截面是一种较好的方法，不受生成核有无放射性的影响，能用于任何核素。另外，据估计，国外继续使用上述设备还测量了不少数据，但没有公开发表。

三、实验测量的考虑

四川大学现有一台不载钷的大液体闪烁探测器，长期进行(n, γ)截面测量。不久，此工作就要告一段落。在原有工作的基础上，拟将闪烁液体载钷，开展(n,2n)和(n,3n)截面测量。这里提出了该测量对加速器脉冲调制的要求，以及闪烁液体载钷、探测器效率、测量用的电子学线路、中子通量测量、实验步骤、截面计算、结果修正等方面

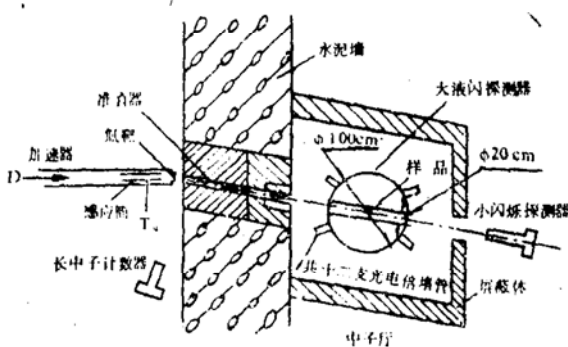


图3. 实验测量装置

的考虑。

整个测量布置见图3。左边是加速器管道、中间是水泥墙和准直器，右边是探测器和屏蔽体。

1. 加速器和中子源

实验要求将我所2.5MV静电加速器进行微秒级脉冲调制，提供脉宽为1 μs 、重复频率为10KHz、束流强度为0.5 μA 的脉冲氘束。氘束打在氘靶上产生中子，经准直器到测量样品。氘能为0.6—2.5MeV时，中子能量为16—18.9MeV，在这一能区，多数核都有(n,2n)和(n,3n)反应。

2. 探测器和测量用的电子学线路

探测器由两个半球组合成，直径约100cm，球壳上装有12支光电倍增管，中心有一直径为20cm的管道，样品及样品交换器安放在那里。探测器内装680升标准闪烁液体，现在需将已酸钷载入闪烁液中。载钷的方法与许谨诚的工作^[10]有一些差别。我们拟采用一种新的助溶剂：烷基磷酸二烷酯(TR-PO)代替常用的TOPO，从小样试验来看，闪烁液性能较好。

电子学线路见图4。脉冲中子束的周期为100 μs ，一束中子轰击样品后，由T₀信号打开中子数目分析器^[11]，分析器先开启一30 μs 的门以记录2n和3n事件，50 μs 以后再开另一个30 μs 的门以记录本底。大液体闪烁探测器的信号分三组相加、甄别和符合，进入中子数目分析器。开门期内记录的脉冲数经数模变换后送入多道分析器。计算机作数据的存储和处理用。

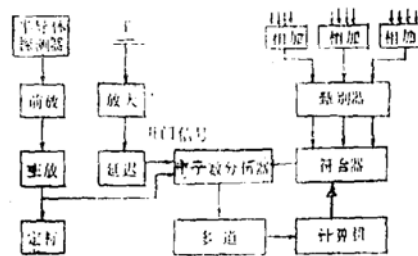


图4. 电子学线路

3. 探测器效率

探测中子的效率决定于探测器的体积、

计数门的长度和甄别器的阈值。效率应选择适当, 预计为70%。

拟用 ^{252}Cf 源来测量探测器的平均效率。 Cf 源放在大探测器中心, 用一半导体探测器测量裂变事件, 大探测器测量裂变中子数, 从观测的中子多次性, 作死时间修正和扣除本底后, 用 ^{252}Cf 的 ν 值相除, 就得到此平均效率。由于裂变中子能谱和 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 中子能谱之间的差异, 在使用此平均效率时应作修正。首先用蒙特卡罗方法计算探测效率随能量变化的曲线; 计算反应中子能谱; 最后算出 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 的探测效率和 ^{252}Cf 的探测效率; 将两者的比值乘上测量的平均效率就得到修正效率。通常修正量小于5%^[9]。

4. 中子通量的测量和截面计算

中子通量拟用小圆柱形液体闪烁探测器测量(该监视器放在大探测器后面)。事先应对小探测器进行 $n-\gamma$ 甄别调试和探测器效率绝对刻度^[12], 使之从记录的脉冲幅度谱中直接求得中子通量。

在通量的绝对测量实现之前, 把上述的小液体闪烁探测器作为相对中子通量监视器。另外拟用 ^{235}U 的裂变截面作为标准, 进行相对测量。入射中子在 ^{235}U 样品中, 引起 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 反应和核裂变。从大液体闪烁探测器观测的中子多次性分布 $F(n)$ 中, 大于和等于4的分布是由裂变产生的, 参照已知 ^{235}U 裂变多次性分布 $P(\nu, E)$ 可算出产生裂变的次数 N_F , 即

$$N_F = \sum_{n \geq 4} F(n) / \sum_{n \geq 4} P(\nu)$$

如果已知 ^{235}U 的裂变截面 $\sigma_F(E)$, 那么从 ^{235}U 样品和待测样品的原子数 N_u 、 N_s 和两次测量的相对中子通量 ϕ_u 、 ϕ_s , 就可求出 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 截面, 即

$$\sigma(n, 2n) = \frac{F(2)}{N_F} \cdot \frac{N_u}{N_s} \cdot \frac{\phi_u}{\phi_s} \cdot \sigma_F$$

$$\sigma(n, 3n) = \frac{F(3)}{N_F} \cdot \frac{N_u}{N_s} \cdot \frac{\phi_u}{\phi_s} \cdot \sigma_F$$

其中 $F(2)$ 、 $F(3)$ 为实测的、并经探测效率等修正的待测样品的 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 事件数。

5. 测量样品和测量步骤

样品制成薄圆片, 按放到有机玻璃架上, 用电动的样品交换器送入探测器中心。

对每一个能量点, 需轮流交替地将待测样品和 ^{238}U 标准样品送入探测器进行测量, 每轮测量约1小时。还要作碳样品、水样品和无样品的实验, 以测量开机本底。另外要进行停机实验, 测量天然本底和 ^{238}U 的放射性本底, 这时开门脉冲由一台10KHz的振荡器提供。

6. 数据处理

对实验测量 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 事件数 $F(2)$ 、 $F(3)$ 必须进行各种修正。首先作死时间修正。

其次扣除本底。在中子数目分析器中本身就有两个门, 专门记录真实事件和本底计数。但由于加速器产生的本底是随时间变化的, 即在一束中子轰击之后, 前 $30\mu\text{s}$ 门和后 $30\mu\text{s}$ 门中的本底数有一定的差异, 为了使扣除本底更合理, 需要在 $(n, 2n)$ 测量前后, 进行无样品的实验, 求出两个门的计数(都认为是本底)之比 R , 供修正正常测量中的本底计数。

第三、探测效率问题。因为 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 反应对不同的核有不同形状的能谱, 因而有不同的探测效率。设 ϵ_n 是探测 n 个中子的平均效率, C_i 是探测到 i 个中子的次数, $F(n)$ 是实际的产生 n 个中子的次数, 那么 C_i 为^[9]

$$C_i = \sum_{n=i}^{\infty} \frac{n!}{i! (n-i)!} \epsilon_i^i (1-\epsilon_n)^{n-i} F(n)$$

只考虑 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 反应情况,

$$C_3 = \epsilon_3^3 F(3)$$

$$C_2 = \epsilon_2^2 F(2) + 3\epsilon_3^2 (1-\epsilon_3) F(3)$$

$$\therefore F(3) = C_3 / \epsilon_3^3$$

$$F(2) = [C_2 - 3C_3(1-\epsilon_3)] / \epsilon_2^2$$

7. 对结果的修正

第一、入射中子通量在样品中的衰减和次级中子引起的 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 反应, 需用蒙特卡罗方法计算^[7]。

第二、对探测器中心轴管影响的修正。

$(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 的次级中子角分布是各向异性的, 并随样品而变化, 对于轴管的存在, 探测效率也发生变化, 文献[13]引入了一有效损失锥角, 进行了修正计算, 修正量为1—2%。

第三、通量测量的进一步修正。实验测量中氚靶上会堆积氘, 经 $D(d, n)$ 反应产生几MeV的低能中子, 虽然它不会引起 $(n, 2n)$ 反应, 但会使 ^{238}U 裂变, 对通量测量产生影响, 文献[14]计算了通量测量的误差 $< 2\%$ 。对截面的修正为1%。

第四、钢轴管对 $(n, 2n)$ 截面测量的影响。散射中子可以与轴管的Fe原子核作用产生 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 反应, 为了检验其影响, 可用碳、水样品测量其 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 截面, 然后与计算的截面比较, 比如水分子的 $(n, 2n)$ 截面计算值为1.5mb, 测量值为15mb。

总的看来, 在国内利用载轧大液体闪烁探测器测量 $(n, 2n)$ 和 $(n, 3n)$ 反应截面是非常必要的, 并且在设备和技术方面有了一定基础, 有利于开展此项工作。

参考文献

- [1] 卢涵林等, 《原子能科学技术》2 (1975) 113
- [2] 黄建周等, 《原子能科学技术》3 (1977) 211
- [3] V. J. Ashby, Phys. Rev. 111 (1958) 616
- [4] V. J. Ashby, Phys. Rev. 129 (1963) 1771
- [5] D. S. Mather, AWRE Report No. 047/69 (1969)
- [6] D. S. Mather, AWRE Report No. 072/72 (1972)
- [7] J. Frehaut, Nucl. Instr. Methods, 135 (1976) 511
- [8] J. Frehaut, "Nuclear Cross Sections and Technology" Proceedings of a Conference, Washington, D. C. P855 (1975)
- [9] L. R. Veaser, Phys. Rev. 16 (1977) 1792
- [10] 许谨诚等, 《原子能科学技术》1 (1978) 14
- [11] 李新等, 《核仪器与方法》2 (1983) 33
- [12] V. V. Verbinski, Nucl. Instr. Methods, 65 (1968) 8
- [13] D. S. Mather, Phys. Rev. 133, B1403 (1964)
- [14] D. S. Mather, Nucl. Phys. 66 (1965) 149