

(12)

hsj-77131(bp)

内 部

科学技术成果报告

$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 截面及其分支比

庄友祥

中国科学院原子能研究所

一九七八年十月

$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反应截面及其分支比

摘 要

本编评报告尽可能全面地收集了实验测量数据,经分析评价后,用样条函数拟合给出了 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha_1 \gamma)$ 及其分支比的推荐数据,并对它们进行联立拟合,得到了自洽的推荐值。本编评还与其他编评作了比较。

一、概 况

$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 截面早在 1935 年就开始测量了。长期以来,它被用做中子截面的参考标准。 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 截面和分支比也不断进行过编评^[1-7]。根据近几年的发展情况, $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha_1 \gamma)^7\text{Li}$ 截面越来越多地用于中子通量监督,所以我们这次编评增加了 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha_1 \gamma)$ 反应截面。入射中子能量包括热能和 $1\text{keV}-20\text{MeV}$ 。

我们查阅了 1950—1976 年有关资料目录,现能找到的 65 篇,其中有数据或曲线的约 45 篇(包括编评文章)。

值得注意的是,不同地区的天然硼中 ^{10}B 的丰度并不完全相同,可以从 18.4% 变化到 20.0%。1962 年以前 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 截面之所以分歧较大,一个重要的原因就是天然硼中 ^{10}B 的丰度未能精确地测定。1963 年以后硼同位素分析的精度稳定地达到好于 $\pm 0.1\%$,才解决了这个问题。因此,对于 1960 年以前发表的实验数据,尤其是使用天然硼的数据,在本编评中一般地不予采用。

测量 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反应截面所使用的实验技术一直在发展着。包括各种单能中子源和白光中子源。较近代的中子飞行时间谱仪以及带电粒子分辨系统也被用于测量。

较早期的测量常存在的两个较大的问题:一是热中子和超热中子本底的干扰,除非运用飞行时间方法,否则它们的影响相当大,不容易准确地扣除。例如, E. A. Davis (1961)^[8] 的测量比大多数测量明显偏低约 110mb,有可能是分离出 α_0 和 α_1 时本底扣得太多了。二是长中子计数管的效率没有详细加以刻度。即使同样结构的长中子计数管,其效率曲线也很少可能完全一样,必须逐个进行校验。例如, H. Bichsel (1957)^[9] E. G. Bilpuch (1960)^[10] 和 E. A. Davis (1961)^[8] 的测量,他们假定了效率曲线是一常数,致使实验结果不可靠。

$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 反应截面和分支比的实验测量归纳起来有三种方法:

1. 间 接 测 量

1. 吸收截面法:在 $E_n \leq 1.2\text{MeV}$ 时,一般认为其他反应道的截面远远小于 (n, α)

截面,因而可以近似地认为吸收截面 $\sigma_{\text{abs}}(^{10}\text{B}) = \sigma_{\text{p},\alpha}(^{10}\text{B})$ 。测量 σ_{abs} 也有两种方法:由全截面扣去散射截面,用球壳法直接测量 σ_{abs} 。

2. 逆反应法:首先测量逆反应 $^7\text{Li}(\alpha, \text{n})^{10}\text{B}$ 截面,然后应用细致平衡原理计算出 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 截面。

2. 相对测量

$^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)\text{T}$ 也是一种中子标准截面,所以测量 ^6Li 和 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 截面的相对比值,从 $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)$ 截面得到 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$ 截面。

3. 直接测量

1. 用含硼探测器直接测量全部 4π 空间的 α 粒子,称为积分测量。

2. 测量 α 粒子的角分布,通过对角度求积分而得到总截面,这是所谓微分测量。

上述几种方法中,微分测量的误差较大,一般大于 15%;逆反应法在低能区误差也较大,这是因为低能区 (n, α) 截面小〔约占总的 (n, α) 截面的 6.3%〕,还要用分支比来推算出总的 (n, α) 截面,进一步增大了误差; $\sigma_{\text{int}} - \sigma_{\text{as}} = \sigma_{\text{ns}}$ 的方法,当 $E_{\text{n}} < 500\text{keV}$ 时,由于吸收截面中包含其他反应的成份越来越大,其准确性变差了。

二、编评简述

1. (n, α) 截面

1. Q 值

$$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha_0)^7\text{Li} \quad Q_0 = 2.791\text{MeV};$$

$$^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha_1)^7\text{Li}^* \quad Q_1 = 2.313\text{MeV};$$

$$^7\text{Li}^* \rightarrow ^7\text{Li} \quad E_{\gamma} = 0.4776\text{MeV}.$$

以上所引用的 Q 值取自 *Nucl. Phys.*, 227, 1 (1974)。

2. 热能 (n, α) 截面

这里所说的热能系指 $E_{\text{n}} = 0.02526\text{eV}$, 其截面和分支比分别用 σ^0 和 R^0 表示。 (n, α) 反应表示 $(\text{n}, \alpha_0 + \alpha_1)$ 反应。

到目前为止热能 (n, α) 截面全部测量的情况见下表:

参 考 资 料	实 验 方 法	结果(b)
Safford(1960) ^[11]	晶体谱仪,透射测量, NaBO_2 样品溶解于 D_2O 中, ^{10}B 浓缩到 $(99.88 \pm 0.01)\%$ 和 $(92.84 \pm 0.06)\%$ 。	3838 ± 11
Block(1962) ^[12]	快选择器飞行时间谱仪,透射测量,浓缩的 B_2O_3 样品溶解于 D_2O 中, ^{10}B 的成分为 $(99.89 \pm 0.05)\%$, BF_3 计数管组。	3846 ± 40

续表

参 考 资 料	实 验 方 法	结果(b)
Prosdoci(1963) ^[13]	慢选择器飞行时间谱仪透射测量, B ₂ O ₃ 样品溶解于 D ₂ O 中, 天然硼((19.838 ± 0.030)% ¹⁰ B)和浓缩硼((96.525 ± 0.006)% ¹⁰ B)两种, BF ₃ 计数管组。	8836 ± 7
Als-Nielsen(1964) ^[14]	晶体谱仪, 透射测量, 天然硼样品((19.838 ± 0.030)% ¹⁰ B)。	3827 ± 12
Meadows(1970) ^[15]	在 H ₃ BO ₃ 的 H ₂ O 溶液中做中子寿命测量, 使用 BF ₃ 计数管。在 1961 年和 1970 年各做了一次测量, 结果为它们的加权平均, 样品的浓缩度分别为(93.0 ± 0.3)%和(94.41 ± 0.20)%。	3842 ± 18

我们把以上各个测量结果加权平均, 误差为加权均方根误差乘以 2, 信任程度 95%。得到的热能 (n, α) 截面的推荐值为:

$$\sigma_{n, \alpha}(^{10}\text{B}) = (3835 \pm 10)\text{b}$$

3. 1keV以上的 (n, α) 截面

有数据或曲线的主要有 12 家, 我们采用了 5 家数据, 一家做为参考数据, 去掉 6 家。所采用的 5 家数据情况是这样的:

E.P. Mooring(1966)^[16] 使用两个准直的 4π 型计数系统, 每个系统由置于慢化剂中的 34 个 BF₃ 计数管组成, 一个系统用做监督器, 另一个做为计数器。样品置于准直器顶部或探测器中心。测量 σ_{n1} 和 σ_{n2} , 由此得到 $\sigma_{na} = \sigma_{n1} - \sigma_{n2}$ 。作者认为 $E_n = 10 - 500\text{keV}$ 时, $\sigma_{na} - \sigma_{n, \alpha} \ll 100\text{mb}$ 。看来此实验本底影响较小, 测量较为准确。数据是从图上读出来的, 误差应适当放大些。

K.M. Diment(1967)^[17] 用飞行时间法做透射测量求 σ_{n1} 飞行管道 120 米和 300 米, 白光源, 中子束宽度 140ns。黑探测器测中子能谱。由 σ_{n1} 扣去 σ_{n2} 得到 σ_{na} : $E_n < 100\text{keV}$, 应用 Asami 和 Moxon(1969) 的散射截面数据; $E_n > 100\text{keV}$, 应用 Mooring 等人(1966) 的散射截面数据。此工作的全截面数据是可靠的, 但和 Mooring 的工作一样都依赖于同一散射截面, 可以认为这两个工作并不完全独立。但其 σ_{na} 数据我们还是采用了。Diment 本人的文章没有找到, 数据是从 Sowerby(1976)^[5] 和 Gubernator(1968)^[2] 所给图上读下来的, 误差要增大些, 鉴于上述理由基本上按 Mooring(1966) 的误差来给出。

D. Bogart(1969)^[18] 使用无屏蔽 ¹⁰BF₃ 正比管, 一个用望远镜刻度过的长计数管监督相对中子通量, 测得的相对截面归一到由热中子截面按 $1/u$ 规律外推到 80keV 以下的截面值。此工作较详细地考虑了管壁效应和热中子超热中子的影响。我们编评时, 凡是能量是重复的均作算术平均, 按一点参加拟合。

M.G.Sowerby (1970)^[5], 用飞行时间谱仪, 测量 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 和 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面的比率, 以准确的 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 截面求出 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面。文章给出测得的比率。我们应用自己编评的 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 截面得到 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面, 误差为 $\pm 2\%$ 。这是较准确的测量。

S.F.Friesenhahn (1974)^[19] 用飞行时间方法, ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面用两个 BF_3 正比管和一个带无底衬 ${}^{10}\text{B}$ 膜的平行板电离室进行测量, 考虑了各种修正量。在 1972 年发表的文章中^[20] ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面采用的是 60keV 以下的 BF_3 正比管数据和较高能区的电离室数据的一个混合。标明的误差都较小。其结果在 100keV 以上高于以前的其他测量, 尤其在 450keV 附近显著高出 60—70%。其 1974 年发表的文章对前面的数据作了重大修改, 不采用 BF_3 正比管的数据, 而统一用电离室的数据, 给的误差也扩大了。结果基本上与以前的其他测量符合了。

鉴于此家数据前后变化如此之大, 变化的理由说明尚不够清楚; 而在 1—1700keV 能区中, Friesenhahn 的数据点比其他测量要多 2—4 倍, 所以我们在使用他们的数据时把它们的误差 (统计误差和系统误差算术相加) 扩大 1 倍。

在 $E_n = 1\text{keV} - 1.7\text{MeV}$ 能区, 共取得 5 家数据, 287 个实验点, 用样条函数拟合, 其结果见表 1 和图 1。

我们去掉 6 家数据, 把 1 家做为参考数据, 理由如下:

Bichsel (1957)^[9] 使用硼屏蔽的 ${}^{10}\text{BF}_3$ 正比计数管, 长中子管作通量监督。严重缺点是没有刻度长中子管的效率曲线, 而简单假定其效率为常数。此外, Bichsel 把长中子管放在同一方向上的 BF_3 计数管后面测通量, 但距离太近, 对 BF_3 计数管有严重的热中子和超热中子本底干扰。实验结果不可靠。

Bilpuch (1960)^[10] 用 122° 中子准直-探测器系统, 18 个 ${}^{10}\text{BF}_3$ 正比管并联在一起, 长中子管作中子通量监督。 122° 的靶头散射中子影响比较大, 本底严重。同样的缺点是没有刻度长中子管的效率曲线, 而假定其效率不随能量变化。因此结果是不可靠的。

Davis (1961)^[8] 也用长中子管监督通量。 Cd 屏蔽栅网型电离室, 其中充以浓缩到 96% ${}^{10}\text{B}$ 的 BF_3 气体。电离室的本底相当大。Davis 虽然用 $\text{Pu}-\text{Be}$ 源对长中子管作了一个能点的刻度, 但未做整个响应曲线的刻度。所以实验结果也是不可靠的。

S.A.Cox (1966)^[21] 用球壳透射法测吸收截面, 对探测器效率随中子能量的变化, 有限的计数管尺寸和源对于探测器位置, 中子源的非各向同性, 多次散射和中子能量衰减都作了修正。但是由于这种方法本身修正量多且大, 结果误差比较大 (从 10keV 的 5% 变化到 250keV 的 14%), 截面值比多数准确测量明显地偏高。作者用同样方法测得的 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ 截面也系统偏高。因此我们的编评不采用这一套数据。

R.L.Macklin (1968)^[22]、 $E_n = 30 - 500\text{keV}$, 应用石墨 4π 型中子探测器测量逆反应 ${}^7\text{Li}(\alpha, n){}^{10}\text{B}$ 的截面, ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面应用细致平衡理论和 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 分支比算得。我们认为, 在这一能区 (n, α_0) 截面太小 (约占总的 (n, α) 的 6.3%), 由它推算出来的 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 截面的误差较大, 另外还依赖于分支比的测量精度。事实上结果也显著偏低, 我们在编评时就不采用了。

B.Antolkovic (1969)^[23], $E_n = 14.4\text{MeV}$, 用计数管望远镜测量 10 个角度

$(\alpha_0 + \alpha_1)$ 的微分截面, 再积分得到总截面, 结果为 $(8.2 \pm 2.5) \text{mb}$, 误差 $\pm 30\%$ 。其 $(\alpha_0 + \alpha_1)$ 总截面甚至小于 14.8MeV 的 α_1 截面 $(34 \pm 3) \text{mb}$ [24]。我们认为这一结果误差太大, 不予采用。

R.M. Sealock (1976) [25] 用金硅面垒型探测器测量 $0^\circ - 150^\circ$ 之间 8 个角度上 $(\alpha_0 + \alpha_1)$ 的角分布, 中子谱用飞行时间法测量, α 粒子由同时测量 α -粒子和中子的飞行时间总和以及 α 粒子本身能量来区分。也是从微分截面积分得到总截面, 所以误差较大。因此这套数据只作为参考, 不参加拟合。

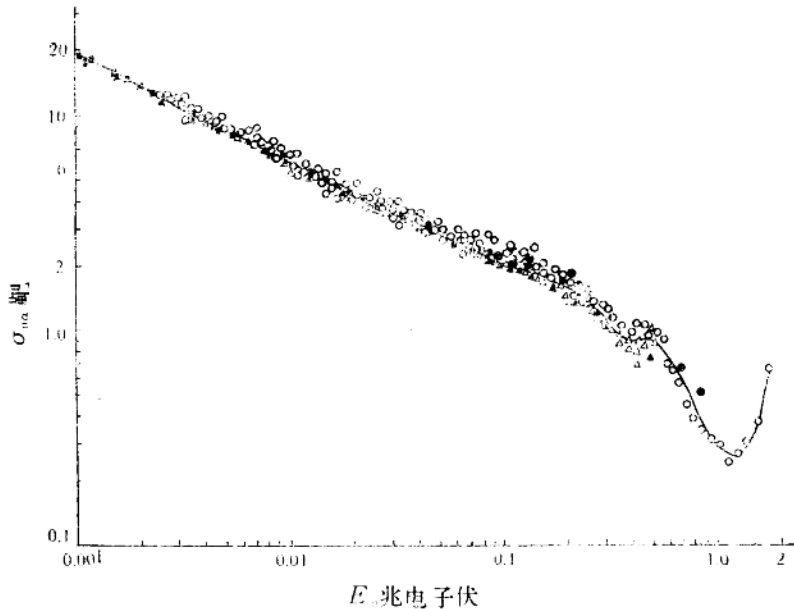


图1 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应截面

△ — Mooring (66), ▲ — Diment (67), ■ — Sowerby (70),
● — Bogart (64), ○ — Friesenhahn (74), — — 本编评值。

2. 1Kev 以上的 $(n_1, \alpha_1 \gamma)$ 截面

$(n, \alpha_1 \gamma)$ 截面共有 5 家数据, 我们去掉 Davis (1961) 的一家, 把 Sealock (1976) 的数据作为参考数据, 理由与 1.3 节 $(\alpha_0 + \alpha_1)$ 编评叙述的一样。被采用的 3 家情况如下:

D.O. Nellis (1970) [24] 在 1965 年和 1966 年做过初步测量。能区从 50keV 到 5MeV 和 14.8MeV , 测量 $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}^*$ 产生的 478keV 的 γ 射线, 应用两个飞行时间晶体反符合 γ 射线谱仪。通常使用 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 晶体作中心探测器, 也用 $\text{Ge}(\text{Li})$ 作中心探测器, 以校对可能的没分辨出的 γ -射线。在 $E_n = 4 \text{MeV}$ 时, 测量 30° , 40° , 55° , 和 90° 的 γ 射线谱, 发现 0.478MeV γ 射线是各向同性的, 所以可以由 55° 的微分截面乘以 4π 得到积分截面。按原误差参加拟合。

Friesennahn(1974)^[19]运用飞行时间法,无底衬 ^{10}B 膜,用 $\text{Ge}(\text{Li})$ 谱仪测量 $0.478\text{MeV}\gamma$ 射线。在1974年发表的文章中,没有修改1972年的 $(n, \alpha_1\gamma)$ 数据。 $(n, \alpha_1\gamma)$ 和 $(n, \alpha_0 + \alpha_1)$ 是独立的测量,所以我们按原误差采用了。

M.S.Coates(1974)^[26],也用飞行时间谱仪,但样品是 $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ 圆盘,用 NaI 晶体探测 $0.478\text{MeV}\gamma$ 射线。此为初步测量结果,没有详细给出误差,只在三个实验点上画出了误差:1.54keV, 23.1KeV和150KeV,我们从图上读得分别为5.1%, 2.6%和3.8%。在1—300keV范围内,Coates的数据点比别人多得多,为95个,而Friesennahn和Nellis的数据分别为43和6个点。Friesennahn的误差约为 $\pm 6\%$,按平等一家参加拟合Coates的误差应改为 $\pm 9\%$ 。

(n, α_1) 截面的编评共取得3家数据,182个实验点, $E_n = 1\text{keV} - 14.8\text{MeV}$,用样条函数拟合,结果见表1和图2。

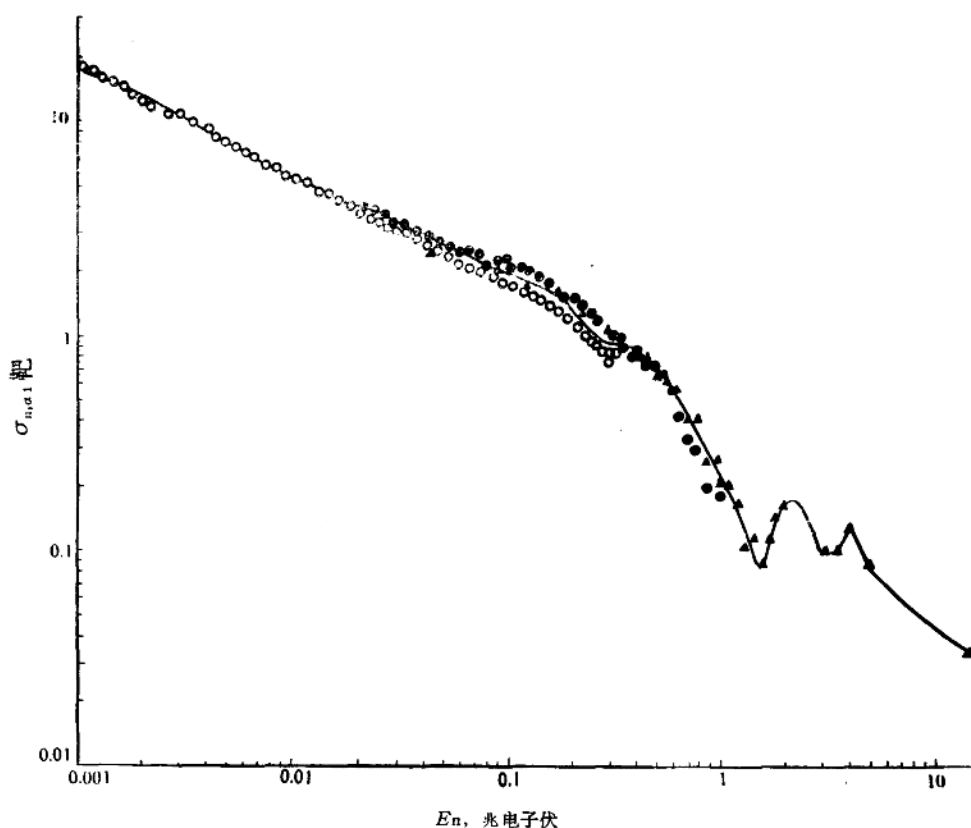


图2 $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)^7\text{Li}^*$ 反应截面

○ — Coates(74), ▲ — Nellis(70),
● — Friesennahn(74), — 本编评值(76).

3. 分支比 $\sigma_{n,\alpha_1}/\sigma_{n,\alpha_0+\alpha_1}$

1. 热能分支比

迄今为止热能分支比全部测量的情况见表。

从表中结果看来分歧相当大。我们认为分支比测量的准确性很大程度上决定于能量分辨率的高低,到目前为止,半导体探测器的分辨率为最高。另一方面从数据之间一致的情况来看,半导体探测器的结果均在测量的误差内符合。所以我们的编评就取半导体探测器的测量结果。我们把 Toney(1966)、Deruytter(1967) 和 Macklin(1968) 的结果加权平均,误差为加权均方根误差乘以 2,信任程度 95%。得到推荐的热能分支比为:

$$R^2 = 0.93691 \pm 0.00174$$

2. 1keV 以上的分支比:

由于分支比一般都是同时测量得到 α_0 和 α_1 , 不需要监督中子通量, 所以系统误差可以避免, 只要 α_0 和 α_1 能很好地分开, 数据都可用。事实也是如此, 分支比的测量结果比较一致, 我们均采用了。不过我们编评的是 $\sigma_{n,\alpha_1}/\sigma_{n,\alpha_0+\alpha_1}$, 这是因为 α_1 比 α_0 更多地用于实验测量。凡是给出 $\sigma_{n,\alpha_0}/\sigma_{n,\alpha_0+\alpha_1}$ 的都加以换算。

共有 6 家数据, 我们采用 5 家参加拟合, 1 家作为参考。情况是这样的:

Davis(1961)[8] 的测量, 虽然 $\alpha_0 + \alpha_1$ 和 α_1 的结果都不好, 但分支比由于系统误差可以消除, 与其他测量符合也较好, 结果还是可以用的。在编评时按比一般测量稍次的权重参加拟合。估计误差: $En < 1.5\text{MeV}$ 为 $\pm 10\%$, $En > 4.5\text{MeV}$ 为 $\pm 15\%$ 。 α_0 和 α_1 的数据是从 BNL-325(1964) 和 NP27, 448(1961) 的图中读出来的。

R.L. Mackin(1965)[39] 用两个面对面硅面垒型探测器夹着 $^{10}\text{B}_2\text{H}_6$, 探测反应出射的 ^7Li 和 α 粒子并进行符合。测量较为准确的是热中子, 30keV, 110keV 和 160keV 4 个点, 在 160keV 以上, 由于能量分辨变差, 没有发表结果。我们在编评时按原误差采用了。

M.G. Sowerby(1966)[42] 用飞行时间法, $^{10}\text{BF}_3$ 正比管, 测量的是一定能量间隔中的分支比。我们的编评取其能量中点作代表参加拟合。

Friesenhahn(1974)[19] 实验方法如前面两节编评所述。1972 年发表的文章中, 由于 $\sigma_{n,\alpha_0+\alpha_1}$ 过高, 分支比也相应偏低了。1974 年发表的数据随着 $\alpha_0 + \alpha_1$ 截面的修改, 分支比就基本上与以前的其他测量一致了。基于与 $\sigma_{n,\alpha_0+\alpha_1}$ 同样的理由, 按普通一家数据参加拟合的原则, 我们也把其误差扩大 1 倍参加拟合。其中有 5 个点的分支比大于 1, 虽然从误差范围看来是允许的, 但是不合理, 影响拟合, 因此把它们去掉了。

G.P. Lomase(1975)[43] 为了解决 1972 年 Friesenhahn 发表的结果与 ENDF/B-III 的矛盾, 进行了这次新的测量。 $E_n = 790\text{keV}$, 使用飞行时间法, $^{10}\text{BF}_3$ 正比管。结果为 0.66 ± 0.03 。再次验证了 Friesenhahn 之前的其他分支比测量的准确性。

Sealock(1976)[24] 实验方法如前面所述, 由于与 $(\alpha_0 + \alpha_1)$ 截面同样的理由, 我们把这一家作为参考数据, 不参加拟合。

分支比的编评共采用 5 家数据, 181 个实验点, $E_n = 1\text{keV} - 7.56\text{MeV}$, 用样条函数拟合, 结果见表 1 和图 3。

热能分支比测量情况表

参 考 资 料	实 验 方 法	$\sigma_{n,ao}/\sigma_{n,ao+a1}$	$\sigma_{n,ai}/\sigma_{n,ao+a1}$
Boggild (1945)[27]	云 室	0.063	0.837
Gibbert (1948)[28]	充 $B(OCH_3)_3$ 气体的云室	0.086	0.914
Hanna (1950)[29]	充 98%A ₂ , 2%BF ₃ 的电离室	0.058 ± 0.001	0.942 ± 0.016
Cuer (1951)[30]	载硼核乳胶	0.0408 ± 0.0015	0.9592 ± 0.0353
Rhodes (1952)[31]	带浓缩到 96% ¹⁰ B 的薄硼层圆柱形电离室	0.059 ± 0.009	0.941 ± 0.144
Bichsel (1952)[32]	充BF ₃ 平行板电离室	0.065 ± 0.007	0.935 ± 0.101
Hauser (1952)[33]	置于石蜡中的 B(CH ₃) ₃ 正比管	0.058 ± 0.001	0.942 ± 0.016
Dejuren (1954)[34]	薄硼层脉冲电离室	0.0652 ± 0.0005	0.9348 ± 0.0072
Seghal (1957)[35]	BF ₃ 正比管	0.038 ± 0.014	0.962 ± 0.396
Bujdoso (1958)[36]	载硼核乳胶	0.079 ± 0.009	0.921 ± 0.105
Brinkman (1960)[37]	BF ₃ 正比管, 微分测量	0.0651 ± 0.0005	0.9349 ± 0.0072
Malmekeg (1963)[38]	BF ₃ 正比管, 微分谱	0.0608 ± 0.0007	0.9392 ± 0.0108
Macklin (1965)[39]	面对面半导体, 0.1 大气压的 ¹⁰ B ₂ H ₆ 靶	0.063 ± 0.002	0.937 ± 0.030
Toney (1966)[40]	¹⁰ B 层置于面垒型探测器前面	0.0643 ± 0.0011	0.9357 ± 0.0160
Deruytter (1967)[41]	¹⁰ B 层置于面垒型探测器前面	0.06308 ± 0.00006	0.93692 ± 0.00089
Macklin (1968)[22]	面对面半导体, 无底衬 ¹⁰ B 膜	0.0632 ± 0.0003	0.9368 ± 0.0044

表1 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反应截面及分支比的推荐值

$E_n(\text{keV})$	$\sigma_n, \alpha(\text{b})$	$R(\sigma_n, \alpha / \sigma_n, \alpha)$	$\sigma_n, \alpha(\text{b})$
0.2526×10^{-4}	3835 ± 10	0.93691 ± 0.00174	
1.0	18.75 ± 0.20 (18.68)	0.9472 ± 0.0243 (0.9264)	16.87 ± 0.48 (17.30)
1.2	17.43 ± 0.16 (17.39)	0.9461 ± 0.0218 (0.9328)	15.95 ± 0.41 (16.22)
1.4	16.24 ± 0.12 (16.22)	0.9449 ± 0.0196 (0.9379)	15.08 ± 0.35 (15.22)
1.6	15.19 ± 0.10 (15.19)	0.9439 ± 0.0176 (0.9424)	14.28 ± 0.31 (14.31)
1.8	14.25 ± 0.10 (14.26)	0.9429 ± 0.0159 (0.9457)	13.54 ± 0.27 (13.48)
2.0	13.43 ± 0.10 (13.45)	0.9419 ± 0.0145 (0.9473)	12.85 ± 0.24 (12.74)
2.2	12.71 ± 0.10 (12.74)	0.9411 ± 0.0135 (0.9480)	12.22 ± 0.22 (12.08)
2.4	12.08 ± 0.10 (12.12)	0.9402 ± 0.0128 (0.9479)	11.64 ± 0.20 (11.49)
2.6	11.54 ± 0.10 (11.58)	0.9394 ± 0.0124 (0.9463)	11.11 ± 0.20 (10.95)
2.8	11.07 ± 0.10 (11.10)	0.9387 ± 0.0123 (0.9444)	10.62 ± 0.20 (10.48)
3.0	10.67 ± 0.10 (10.69)	0.9380 ± 0.0124 (0.9422)	10.18 ± 0.20 (10.08)
3.2	10.32 ± 0.09 (10.33)	0.9374 ± 0.0127 (0.9399)	9.776 ± 0.206 (9.711)
3.4	10.02 ± 0.09 (10.02)	0.9368 ± 0.0132 (0.9374)	9.412 ± 0.210 (9.396)
3.6	9.756 ± 0.080 (9.752)	0.9362 ± 0.0137 (0.9349)	9.084 ± 0.214 (9.117)
3.8	9.519 ± 0.073 (9.511)	0.9357 ± 0.0143 (0.9324)	8.789 ± 0.216 (8.868)
4.0	9.301 ± 0.066 (9.291)	0.9352 ± 0.0148 (0.9302)	8.525 ± 0.218 (8.642)

续表 1 ①

E_n (keV)	$\sigma_{n,a}$ (b)	$R(\sigma_{n,a1}/\sigma_{n,a})$	$\sigma_{n,a1}$ (b)
4.2	9.093 ± 0.061 (9.083)	0.9348 ± 0.0154 (0.9283)	8.289 ± 0.217 (8.431)
4.4	8.894 ± 0.056 (8.884)	0.9344 ± 0.0159 (0.9269)	8.078 ± 0.216 (8.235)
4.6	8.703 ± 0.052 (8.694)	0.9341 ± 0.0164 (0.9259)	7.890 ± 0.213 (8.050)
4.8	8.521 ± 0.056 (8.513)	0.9338 ± 0.0168 (0.9253)	7.723 ± 0.208 (7.877)
5.0	8.347 ± 0.048 (8.340)	0.9335 ± 0.0172 (0.9250)	7.573 ± 0.203 (7.714)
5.5	7.943 ± 0.047 (7.938)	0.9329 ± 0.0180 (0.9261)	7.259 ± 0.187 (7.351)
6.0	7.584 ± 0.047 (7.581)	0.9325 ± 0.0184 (0.9288)	7.000 ± 0.168 (7.041)
6.5	7.265 ± 0.048 (7.264)	0.9323 ± 0.0184 (0.9317)	6.762 ± 0.151 (6.768)
7.0	6.981 ± 0.048 (6.983)	0.9322 ± 0.0183 (0.9342)	6.539 ± 0.135 (6.523)
7.5	6.730 ± 0.047 (6.734)	0.9323 ± 0.0178 (0.9360)	6.328 ± 0.121 (6.303)
8.0	6.506 ± 0.045 (6.511)	0.9324 ± 0.0173 (0.9372)	6.131 ± 0.108 (6.102)
8.5	6.306 ± 0.043 (6.379)	0.9326 ± 0.0166 (0.9379)	5.947 ± 0.096 (5.919)
9.0	6.126 ± 0.040 (6.131)	0.9328 ± 0.0159 (0.9379)	5.774 ± 0.086 (5.750)
9.5	5.961 ± 0.036 (5.965)	0.9331 ± 0.0152 (0.9376)	5.613 ± 0.078 (5.593)
10	5.809 ± 0.034 (5.812)	0.9334 ± 0.0146 (0.9373)	5.463 ± 0.070 (5.448)
12	5.275 ± 0.028 (5.278)	0.9344 ± 0.0132 (0.9385)	4.964 ± 0.049 (4.953)
14	4.848 ± 0.028 (4.856)	0.9352 ± 0.0132 (0.9443)	4.601 ± 0.038 (4.585)

续表 1 ②

E_n (keV)	$\sigma_{n,\alpha}$ (b)	$R(\sigma_{n,\alpha 1}/\sigma_{\alpha,n})$	$\sigma_{n,\alpha 1}$ (b)
16	4.513 ± 0.029 (4.530)	0.9358 ± 0.0140 (0.9546)	4.342 ± 0.029 (4.324)
18	4.251 ± 0.030 (4.284)	0.9362 ± 0.0149 (0.9671)	4.155 ± 0.019 (4.143)
20	4.056 ± 0.029 (4.123)	0.9365 ± 0.0156 (0.9713)	4.009 ± 0.011 (4.005)
22	3.902 ± 0.027 (4.022)	0.9366 ± 0.0161 (0.9633)	3.876 ± 0.007 (3.875)
24	3.777 ± 0.024 (3.857)	0.9365 ± 0.0163 (0.9716)	3.750 ± 0.008 (3.748)
26	3.665 ± 0.022 (3.707)	0.9364 ± 0.0162 (0.9786)	3.632 ± 0.010 (3.628)
28	3.559 ± 0.021 (3.586)	0.9361 ± 0.0158 (0.9798)	3.521 ± 0.012 (3.514)
30	3.458 ± 0.020 (3.480)	0.9358 ± 0.0152 (0.9736)	3.395 ± 0.012 (3.388)
32	3.362 ± 0.019 (3.383)	0.9354 ± 0.0146 (0.9725)	3.297 ± 0.012 (3.290)
34	3.271 ± 0.019 (3.293)	0.9350 ± 0.0139 (0.9713)	3.207 ± 0.012 (3.199)
36	3.184 ± 0.018 (3.205)	0.9346 ± 0.0133 (0.9713)	3.124 ± 0.013 (3.113)
38	3.102 ± 0.018 (3.125)	0.9341 ± 0.0128 (0.9708)	3.046 ± 0.013 (3.034)
40	3.025 ± 0.019 (3.051)	0.9337 ± 0.0125 (0.9692)	2.972 ± 0.014 (2.957)
42	2.951 ± 0.019 (2.978)	0.9333 ± 0.0123 (0.9684)	2.902 ± 0.015 (2.884)
44	2.882 ± 0.019 (2.910)	0.9329 ± 0.0123 (0.9677)	2.836 ± 0.016 (2.816)
46	2.817 ± 0.019 (2.844)	0.9325 ± 0.0125 (0.9670)	2.773 ± 0.017 (2.751)
48	2.755 ± 0.019 (2.782)	0.9322 ± 0.0127 (0.9664)	2.713 ± 0.018 (2.688)

续表 1 ③

$E_n(\text{keV})$	$\sigma_{n,a}(\text{b})$	$R(\sigma_{n,a}/\sigma_{n,a1}(\text{b}))$	$\sigma_{n,a1}(\text{b})$
50	2.698 ± 0.019 (2.724)	0.9319 ± 0.0129 (0.9656)	2.657 ± 0.019 (2.630)
55	2.568 ± 0.018 (2.590)	0.9312 ± 0.0135 (0.9652)	2.529 ± 0.020 (2.500)
60	2.459 ± 0.017 (2.478)	0.9307 ± 0.0141 (0.9646)	2.418 ± 0.020 (2.390)
65	2.367 ± 0.016 (2.383)	0.9302 ± 0.0144 (0.9631)	2.322 ± 0.020 (2.295)
70	2.291 ± 0.015 (2.305)	0.9298 ± 0.0145 (0.9608)	2.240 ± 0.020 (2.214)
75	2.228 ± 0.015 (2.241)	0.9295 ± 0.0143 (0.9574)	2.170 ± 0.020 (2.146)
80	2.175 ± 0.015 (2.187)	0.9292 ± 0.0139 (0.9526)	2.110 ± 0.022 (2.083)
85	2.132 ± 0.015 (2.143)	0.9289 ± 0.0134 (0.9484)	2.059 ± 0.023 (2.032)
90	2.095 ± 0.016 (2.106)	0.9286 ± 0.0127 (0.9435)	2.014 ± 0.025 (1.987)
95	2.063 ± 0.017 (2.073)	0.9283 ± 0.0120 (0.9393)	1.974 ± 0.027 (1.947)
100	2.032 ± 0.018 (2.042)	0.9278 ± 0.0112 (0.9360)	1.938 ± 0.029 (1.911)
110	1.972 ± 0.019 (1.981)	0.9268 ± 0.0099 (0.9318)	1.869 ± 0.030 (1.846)
120	1.912 ± 0.018 (1.919)	0.9254 ± 0.0088 (0.9291)	1.804 ± 0.029 (1.783)
130	1.852 ± 0.016 (1.859)	0.9237 ± 0.0079 (0.9269)	1.743 ± 0.027 (1.723)
140	1.794 ± 0.015 (1.800)	0.9217 ± 0.0072 (0.9244)	1.683 ± 0.026 (1.664)
150	1.738 ± 0.016 (1.743)	0.9195 ± 0.0067 (0.9213)	1.624 ± 0.028 (1.606)
160	1.686 ± 0.017 (1.690)	0.9169 ± 0.0065 (0.9179)	1.564 ± 0.031 (1.551)

续表 1④

$E_n(\text{keV})$	$\sigma_{n,\alpha}(\text{b})$	$R(\sigma_{n,\alpha}/\sigma_{n,\alpha})$	$\sigma_{n,\alpha}(\text{b})$
170	1.636 ± 0.018 (1.638)	0.9141 ± 0.0063 (0.9144)	1.503 ± 0.032 (1.498)
180	1.591 ± 0.018 (1.589)	0.9111 ± 0.0063 (0.9106)	1.438 ± 0.032 (1.446)
190	1.549 ± 0.017 (1.542)	0.9078 ± 0.0064 (0.9060)	1.371 ± 0.030 (1.397)
200	1.509 ± 0.017 (1.494)	0.9043 ± 0.0066 (0.9006)	1.305 ± 0.027 (1.346)
210	1.470 ± 0.019 (1.444)	0.9006 ± 0.0067 (0.8955)	1.240 ± 0.026 (1.293)
220	1.433 ± 0.022 (1.391)	0.8966 ± 0.0069 (0.8902)	1.178 ± 0.025 (1.239)
230	1.394 ± 0.025 (1.339)	0.8925 ± 0.0070 (0.8860)	1.120 ± 0.026 (1.187)
240	1.355 ± 0.027 (1.295)	0.8882 ± 0.0071 (0.8821)	1.069 ± 0.028 (1.142)
250	1.313 ± 0.028 (1.250)	0.8837 ± 0.0072 (0.8778)	1.026 ± 0.028 (1.097)
260	1.269 ± 0.027 (1.210)	0.8791 ± 0.0073 (0.8731)	0.9912 ± 0.0265 (1.056)
270	1.223 ± 0.027 (1.169)	0.8744 ± 0.0073 (0.8691)	0.9649 ± 0.0245 (1.016)
280	1.175 ± 0.026 (1.136)	0.8695 ± 0.0073 (0.8655)	0.9457 ± 0.0237 (0.9832)
290	1.128 ± 0.027 (1.106)	0.8645 ± 0.0073 (0.8625)	0.9322 ± 0.0253 (0.9542)
300	1.082 ± 0.030 (1.079)	0.8594 ± 0.0073 (0.8592)	0.9233 ± 0.0291 (0.9268)
310	1.038 ± 0.034 (1.053)	0.8542 ± 0.0073 (0.8551)	0.9177 ± 0.0335 (0.9005)
320	0.9977 ± 0.0367 (1.030)	0.8489 ± 0.0073 (0.8504)	0.9143 ± 0.0372 (0.8757)
330	0.9618 ± 0.0377 (1.008)	0.8435 ± 0.0073 (0.8456)	0.9118 ± 0.0391 (0.8526)

续表 1 ⑤

E_n (keV)	$\sigma_{n,\alpha}$ (b)	$R(\sigma_{n,\alpha 1}/\sigma_{n,\alpha})$	$\sigma_{n,\alpha 1}$ (b)
340	0.9313 ± 0.0368 (0.9895)	0.8381 ± 0.0073 (0.8408)	0.9090 ± 0.0388 (0.8320)
350	0.9075 ± 0.0345 (0.9732)	0.8326 ± 0.0073 (0.8360)	0.9046 ± 0.0371 (0.8137)
360	0.8909 ± 0.0343 (0.9604)	0.8271 ± 0.0073 (0.8307)	0.8979 ± 0.0375 (0.7979)
370	0.8809 ± 0.0379 (0.9514)	0.8216 ± 0.0074 (0.8247)	0.8892 ± 0.0419 (0.7847)
380	0.8764 ± 0.0409 (0.9455)	0.8161 ± 0.0075 (0.8188)	0.8790 ± 0.0456 (0.7741)
390	0.8762 ± 0.0406 (0.9414)	0.8106 ± 0.0076 (0.8132)	0.8676 ± 0.0458 (0.7656)
400	0.8792 ± 0.0374 (0.9387)	0.8050 ± 0.0077 (0.8079)	0.8552 ± 0.0429 (0.7584)
410	0.8841 ± 0.0323 (0.9361)	0.7995 ± 0.0079 (0.8031)	0.8419 ± 0.0381 (0.7518)
420	0.8897 ± 0.0272 (0.9338)	0.7941 ± 0.0081 (0.7987)	0.8277 ± 0.0331 (0.7458)
430	0.8949 ± 0.0239 (0.9321)	0.7887 ± 0.0083 (0.7940)	0.8129 ± 0.0298 (0.7401)
440	0.8985 ± 0.0238 (0.9314)	0.7833 ± 0.0085 (0.7883)	0.7975 ± 0.0293 (0.7342)
450	0.8993 ± 0.0258 (0.9293)	0.7781 ± 0.0088 (0.7823)	0.7817 ± 0.0308 (0.7270)
460	0.8964 ± 0.0276 (0.9239)	0.7729 ± 0.0090 (0.7764)	0.7656 ± 0.0322 (0.7173)
470	0.8899 ± 0.0284 (0.9154)	0.7678 ± 0.0093 (0.7710)	0.7494 ± 0.0326 (0.7058)
480	0.8806 ± 0.0284 (0.9049)	0.7628 ± 0.0095 (0.7660)	0.7330 ± 0.0318 (0.6932)
490	0.8689 ± 0.0279 (0.8931)	0.7580 ± 0.0097 (0.7614)	0.7165 ± 0.0299 (0.6800)
500	0.8553 ± 0.0276 (0.8808)	0.7533 ± 0.0099 (0.7571)	0.7001 ± 0.0274 (0.6669)

续表 1 ⑥

E_n (keV)	$\sigma_{n,\alpha}$ (b)	$R(\sigma_{n,\alpha}/\sigma_{n,\alpha})$	$\sigma_{n,\alpha}$ (b)
510	0.8403 ± 0.0278 (0.8686)	0.7487 ± 0.0101 (0.7530)	0.6839 ± 0.0248 (0.6510)
520	0.8246 ± 0.0287 (0.8569)	0.7442 ± 0.0102 (0.7487)	0.6679 ± 0.0224 (0.6417)
530	0.8086 ± 0.0300 (0.8448)	0.7399 ± 0.0104 (0.7448)	0.6522 ± 0.0206 (0.6293)
540	0.7923 ± 0.0314 (0.8321)	0.7357 ± 0.0105 (0.7407)	0.6368 ± 0.0194 (0.6163)
550	0.7758 ± 0.0327 (0.8182)	0.7317 ± 0.0106 (0.7366)	0.6217 ± 0.0188 (0.6027)
560	0.7592 ± 0.0338 (0.8038)	0.7277 ± 0.0107 (0.7326)	0.6069 ± 0.0184 (0.5889)
570	0.7424 ± 0.0346 (0.7885)	0.7239 ± 0.0107 (0.7287)	0.5924 ± 0.0181 (0.5745)
580	0.7255 ± 0.0350 (0.7725)	0.7202 ± 0.0108 (0.7250)	0.5782 ± 0.0185 (0.5601)
590	0.7086 ± 0.0352 (0.7565)	0.7165 ± 0.0108 (0.7212)	0.5643 ± 0.0187 (0.5456)
600	0.6916 ± 0.0350 (0.7398)	0.7130 ± 0.0109 (0.7178)	0.5506 ± 0.0189 (0.5310)
650	0.6075 ± 0.0306 (0.6566)	0.6964 ± 0.0111 (0.7024)	0.4870 ± 0.0186 (0.4612)
700	0.5273 ± 0.0245 (0.5783)	0.6811 ± 0.0115 (0.6905)	0.4304 ± 0.0159 (0.3993)
750	0.4553 ± 0.0229 (0.5194)	0.6664 ± 0.0124 (0.6807)	0.3807 ± 0.0123 (0.3535)
800	0.3954 ± 0.0244 (0.4755)	0.6515 ± 0.0137 (0.6694)	0.3376 ± 0.0098 (0.3183)
850	0.3504 ± 0.0233 (0.4295)	0.6356 ± 0.0152 (0.6576)	0.3008 ± 0.0091 (0.2824)
900	0.3186 ± 0.0208 (0.3882)	0.6181 ± 0.0165 (0.6445)	0.2695 ± 0.0088 (0.2502)
950	0.2970 ± 0.0212 (0.3640)	0.5981 ± 0.0174 (0.6244)	0.2429 ± 0.0081 (0.2272)

续表 1 ⑦

$E_n(\text{keV})$	$\sigma_{n,a}(\text{b})$	$R(n,a)/\sigma_{n,a}$	$\sigma_{n,a1}(\text{b})$
1000	0.2825 ± 0.0241 (0.3517)	0.5748 ± 0.0176 (0.5966)	0.2202 ± 0.0072 (0.2098)
1100	0.2637 ± 0.0214 (0.3246)	0.5179 ± 0.0159 (0.5382)	0.1830 ± 0.0058 (0.1747)
1200	0.2557 ± 0.0244 (0.3114)	0.4532 ± 0.0137 (0.4650)	0.1513 ± 0.0057 (0.1448)
1300	0.2678 ± 0.0254 (0.2983)	0.3891 ± 0.0133 (0.3954)	0.1205 ± 0.0046 (0.1180)
1400	0.3056 ± 0.0276 (0.2926)	0.3340 ± 0.0138 (0.3311)	0.09590 ± 0.00443 (0.09691)
1500	0.3738 ± 0.0383 (0.3076)	0.2959 ± 0.0126 (0.2883)	0.08472 ± 0.00502 (0.08867)
1600	0.4766 ± 0.0442 (0.3540)	0.2803 ± 0.0117 (0.2690)	0.09173 ± 0.00387 (0.09522)
1700	0.6187 ± 0.0673 (0.4313)	0.2801 ± 0.0151 (0.0265)	0.1112 ± 0.0045 (0.1143)
1800		0.2854 ± 0.0154	0.1346 ± 0.0055
1900		0.2884 ± 0.0139	0.1547 ± 0.0039
2000		0.2909 ± 0.0177	0.1683 ± 0.0046
2100		0.2983 ± 0.0169	0.1745 ± 0.0082
2200		0.3223 ± 0.0217	0.1743 ± 0.0136
2300		0.3691 ± 0.0199	0.1690 ± 0.0200
2400		0.4164 ± 0.0185	0.1598 ± 0.0268
2500		0.4350 ± 0.0225	0.1481 ± 0.0328
2600		0.4054 ± 0.0203	0.1351 ± 0.0372
2700		0.3473 ± 0.0160	0.1221 ± 0.0390
2800		0.2898 ± 0.0171	0.1103 ± 0.0370
2900		0.2623 ± 0.0159	0.1010 ± 0.0304
3000		0.2778 ± 0.0127	0.09553 ± 0.01819
3100		0.2954 ± 0.0140	0.09506 ± 0.00317
3200		0.3077 ± 0.0122	0.09902 ± 0.00230
3300		0.3196 ± 0.0118	0.1026 ± 0.0331
3400		0.3347 ± 0.0133	0.1022 ± 0.0213
3500		0.3528 ± 0.0140	0.1010 ± 0.0035