

加速器单能中子源 常用数据手册

5-62

中国科学院原子能研究所

编 者 的 话

各种能量的单能中子源是开展中子物理实验工作的基本条件之一。利用加速器上的带电粒子核反应产生的单能中子，因为它单色性好、产额高以及能量可变等许多优点，所以作为单能中子源得到了广泛的应用。比如，在进行中子核数据的测量、堆用材料的屏蔽试验、各种中子探测器和剂量仪表的刻度，以及辐照实验和放射性治疗等工作中都要用到它。无产阶级文化大革命以来，随着我国原子能事业的发展，用中子源开展了多方面的工作。在从事这些工作时，往往需要查阅有关加速器单能中子源的数据，为此，我们编纂了这本加速器单能中子源常用数据手册，以备查用。

作为单能中子源，常用的带电粒子核反应主要是轻核反应，本手册列出了 $T(d, n)^4He$ 、 $D(d, n)^3He$ 、 $T(p, n)^3He$ 、 ${}^7Li(p, n){}^7Be$ 和 $H(t, n)^3He$ 五种反应的中子能量、反应的全截面和微分截面的数据，还对平均中子能量、能散度、中子产额和中子通量的计算，以及加速器能量刻度的方法作了一般的介绍。另外，一些有关探测器、靶和窗材料的阻止本领也列在附录里。

本手册所列数据有一部分是我们工作中积累和计算的，其余数据引自我们获得的最新资料。

由于我们经验不足，水平有限，计算、收集的数据可能有错误，希望读者提出宝贵意见。在编纂过程中我们得到了许多同志的帮助，在此一并表示感谢。

目 录

编者的话

前 言..... (1)

一、核反应运动学参数..... (4)

T(d, n)⁴He 反应 E_d : 0.02—15 兆电子伏..... (7)

D(d, n)³He 反应 E_d : 0.02—15 兆电子伏..... (51)

D(d, p)T 反应 E_d : 0.02—0.6 兆电子伏..... (87)

T(p, n)³He 反应 E_p : 阈能附近..... (102)

1.2—15 兆电子伏..... (105)

⁷Li(p, n)⁷Be 反应 E_p : 阈能附近..... (124)

1.95—7.0 兆电子伏..... (127)

⁷Li(p, n)⁷Be^{*} 反应 E_p : 2.5—7.0 兆电子伏..... (135)

H(t, n)³He 反应 E_t : 3.5—25 兆电子伏..... (141)

二、核反应全截面和微分截面..... (147)

T(d, n)⁴He、D(d, n)³He、D(d, p)T、T(p, n)³He

反应全截面 $\sigma_T(E)$ 推荐值..... (153)

⁷Li(p, n)⁷Be、⁷Li(p, n)⁷Be^{*} 反应全截面 $\sigma_T(E)$ 推荐值..... (154)

T(d, n)⁴He 反应微分截面 $\sigma(\theta, E)$ 推荐值..... (155)

D(d, n)³He 反应微分截面 $\sigma(\theta, E)$ 推荐值..... (163)

T(p, n)³He 反应微分截面 $\sigma(\theta, E)$ 推荐值..... (171)

⁷Li(p, n)⁷Be 反应微分截面 $\sigma(\theta, E)$ 推荐值..... (176)

⁷Li(p, n)⁷Be^{*} 反应微分截面 $\sigma(\theta, E)$ 推荐值..... (183)

T(p, n)³He 反应阈能附近中子相对角分布..... (189)

⁷Li(p, n)⁷Be 反应阈能附近中子相对角分布..... (192)

D(d, n)³He 反应角分布修正因子 $h_n(\theta')$ 值..... (196)

D(d, p)T 反应角分布修正因子 $h_p(\theta')$ 值..... (199)

三、平均中子能量, 中子能散度和总中子产额的计算..... (202)

氘核在氘靶中的能量损失率 $\left(\frac{dE}{dX}\right)_{T \rightarrow T}$ (202)

中子能量分布, 平均中子能量 $\bar{E}_n$ 和中子能散度 ΔE_n (203)

入射氘核的平均能量 $\bar{E}_d$ 的计算..... (207)

总中子产额 Y 的计算..... (211)

用伴随粒子法测量快中子通量.....	(213)
四、静电加速器刻度能量的方法.....	(220)
参考文献.....	(224)
附录1 带电粒子在物质中的能量损失率.....	(225)
附录2 带电粒子在物质中的射程.....	(230)

前 言

$T(d, n)^4He$, $D(d, n)^3He$, $T(p, n)^3He$, ${}^7Li(p, n){}^7Be$, $H(t, n)^3He$ 这五个核反应是用作单能中子源的常用核反应, 在各种加速器上通过用不同的核反应, 可以获得从几十千电子伏直到 20 兆电子伏的能区很广的单能中子源。如表 1 所示:

表 1 加速器单能中子源

加速器类型	核反应	入射粒子能区, 兆电子伏	中子能区, 兆电子伏
400千伏 高压倍加器	$T(d, n)^4He$	0.1—0.4	13.5—15.6
	$D(d, n)^3He$	0.1—0.4	2.0—3.3
2.5兆伏 静电加速器	${}^7Li(p, n){}^7Be$	阈能—2.37	0.03—0.6
	$T(p, n)^3He$	阈能—2.5	0.20—1.7
	$D(d, n)^3He$	0.6—2.5	2.5—5.7
	$T(d, n)^4He$	0.6—2.5	13.0—18.5
1.2米可变能量 回旋加速器	$T(p, n)^3He$	3—12	1.0—10.0
	$D(d, n)^3He$	3—12	5.0—10.0
	$T(d, n)^4He$	3—12	18.0—20.0以上
串列式加速器	$H(t, n)^3He$	3.06—25	0.575—18

在使用这些中子源时, 一般要知道: 1. 中子能量 (它与入射的带电粒子能量、中子的出射角有关); 2. 中子能量的单色性 (它与所用中子束的张角、靶或窗材料的吸收性能、是否有三体反应、反应产物是否处于激发态有关); 3. 中子产额 (它与核反应截面、靶厚、靶物质对入射粒子的阻止本领有关)。考虑到这些因素, 一般在 400 千伏的高压倍加器上, 利用 $T(d, n)^4He$ 反应获得 13.5—15.6 兆电子伏的单能中子, 这个反应的反应截面大, 中子产额高。利用 $D(d, n)^3He$ 反应获得 2—3.3 兆电子伏的单能中子, 此反应有一反应截面几乎相等的竞争反应 $D(d, p)T$ 。在 2.5 兆伏静电加速器上, 利用 ${}^7Li(p, n){}^7Be$ 反应获得 0.030—0.60 兆电子伏的单能中子 (质子能量不能大于 2.37 兆电子伏, 否则有 ${}^7Li(p, n){}^7Be^*$ 反应产生的中子干扰, 7Be 核的第一激发态能量为 0.431 兆电子伏; 更高的入射质子能量, 还有 ${}^7Li(p, n){}^7Be^{**}$ 反应, 7Be 核的第二激发态能量为 4.55 兆电子伏)。利用 $T(p, n)^3He$ 反应获得 0.2—1.7 兆电子伏的单能中子。利用 $D(d, n)^3He$ 反应获得 2.5—5.7 兆电子伏的单能中子。利用 $T(d, n)^4He$ 反应获得 13—18.5 兆电子伏的单能中子。在 1.2 米可变能量回旋加速器上, 利用 $T(p, n)^3He$ 反应获得 1—7.5 兆电子伏的单能中子 (质子能量大于 8.35 兆电子伏时, 有三体反应产生的中

子干扰)。此反应除非用气体氚靶, 否则产额较低。利用 $D(d, n)^3\text{He}$ 反应可获得 5—8 兆电子伏的单能中子 (氚能大于 4.45 兆电子伏时, 有三体反应的干扰)。利用 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应可获得 18—20 兆电子伏的单能中子 (氚能大于 3.71 兆电子伏时 有三体反应的干扰)。一般说来, 三体反应产生的连续中子其能量较小, 产额较低, 在一些对中子源的单色性要求不高的实验中, 或使用有阈的中子探测器, 那么, 中子源的能区还可以扩展些。

在串列式加速器上用 $H(t, n)^3\text{He}$ 反应是一个很有用的中子源, 它可以弥补以上所述的 $D(d, n)^3\text{He}$ 反应中三体反应的干扰和 $T(p, n)^3\text{He}$ 反应中的产额较低的不足, 因而是 8—13 兆电子伏的中子能区中较理想的中子源。 $H(t, n)^3\text{He}$ 反应有以下一些特性:

1. 对任何入射氚能, 此反应产生的中子均分布在向前方向的圆锥体内, 圆锥体的半张角 θ 为: $\sin\theta \simeq (E_t - E_{\text{阈}})^{\frac{1}{2}} E_t^{-\frac{1}{2}}$ 。式中 E_t 为入射氚能, $E_{\text{阈}}$ 为反应阈能, 随着 E_t 的增加, 半张角 θ 接近 90° 的限度。

2. 对任何入射氚能, 在可发射中子的角度内, 中子能量都具有高能和低能两组中子。但是, 在入射氚能大于 6 兆电子伏时, 低能组的中子能量和产额远比高能组的中子能量和产额要低得多, 因此, 在许多实验中, 这一点不会是严重的不利条件。

3. 此反应的产额较高, 例如在 0° 方向, $H(t, n)^3\text{He}$, $T(p, n)^3\text{He}$, $D(d, n)^3\text{He}$ 反应同样产生 5 兆电子伏的中子的截面分别为: 500, 45, 40 毫靶/单位立体角。

4. 此反应所产生的中子能量随中子发射角的变化而变化较大, 例如在 0° 方向, $H(t, n)^3\text{He}$, $T(p, n)^3\text{He}$, $D(d, n)^3\text{He}$ 反应产生 5 兆电子伏能量中子的 0° 方向中子能量和 10° 方向中子能量之差分别为: 190, 56, 40 千电子伏, 因此, 在需要能量分辨率较高的实验中, 它不是一个很好的中子源。

对于以上这些核反应的阈能及 Q 值见表 2^[1, 2]。

表 2 用作单能中子源的常用核反应的阈能和 Q 值

核 反 应	阈能, 兆电子伏	Q 值, 兆电子伏	三 体 反 应	阈能, 兆电子伏
$T(d, n)^4\text{He}$	—	+ 17.590	$T(d, np)T$ $T(d, 2n)^3\text{He}$	3.71 4.92
$D(d, n)^3\text{He}$	—	+ 3.269	$D(d, np)D$	4.45
$D(d, p)T$	—	+ 4.033		
$T(p, n)^3\text{He}$	1.019 正向 1.147 反角	- 0.764	$T(p, np)D$	8.35
$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$	1.881 正向 1.921 反角	- 1.644	$^7\text{Li}(p, n^3\text{He})^4\text{He}$	3.692
$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}^*$	2.373 正向 2.423 反角	- 2.075		
$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}^{**}$	7.08	- 6.194		
$H(t, n)^3\text{He}$	3.06	- 0.764	$H(t, np)D$	25

这些常用核反应所产生的中子的能量, 反应的全截面和微分截面等等以及其它有关数据已有很多人进行了理论计算、实验测量以及对这些数据进行评价和推荐。例如, 布

卢姆伯格 (L. Blumberg) [3] 等人用核反应运动学相对论公式计算了以上反应的运动学参数, 利斯金 (H. Liskien) [1, 2] 等人对以上核反应产生的中子能量、反应的全截面和微分截面等给出了推荐值。然而在一些能区 (如入射氘能 ≤ 600 千电子伏) 这些计算的能区间隔太大, 应用时要内插, 不仅应用上不方便, 而且会带来不必要的误差。

我们用核反应运动学的非相对论公式计算了 $T(d, n)^4\text{He}$, $D(d, n)^3\text{He}$, $D(d, p)T$, $T(p, n)^3\text{He}$ 和 $^1\text{H}(t, n)^3\text{He}$ 反应的运动学参数, 在氘能 ≤ 600 千电子伏时, 能量间隔尽可能分得细些, 以尽量避免内插, 而且采用了近期发表的原子质量 [4] 和 Q 值, 并与利斯金等人用相对论公式计算的中子能量值作了比较。以 0° 方向的中子能量为例, E_n 和 E_L 分别表示用非相对论公式和利斯金等人用相对论公式计算的中子能量, 比较结果见表 3。

表 3 计算的 0° 方向中子能量的比较

入射 粒子 兆电 子能 量伏	反应 类型 中 子 能 量	$T(p, n)^3\text{He}$			$D(d, n)^3\text{He}$			$T(d, n)^4\text{He}$		
		E_n , 兆电子伏	E_L , 兆电子伏	$\frac{E_n - E_L}{E_n}$, ‰	E_n , 兆电子伏	E_L , 兆电子伏	$\frac{E_n - E_L}{E_n}$, ‰	E_n , 兆电子伏	E_L , 兆电子伏	$\frac{E_n - E_L}{E_n}$, ‰
0.1					2.853	2.851	0.4	14.780	14.759	1.4
0.5					3.513	3.511	0.4	15.117	15.096	1.4
1.5		0.683	0.683	0	4.705	4.703	0.4	17.564	17.543	1.2
5.0		4.225	4.225	0	8.241	8.241	0	21.999	21.981	0.7
10.0		9.230	9.230	0	13.022	13.026	-0.3	27.440	27.428	0.4

从表中可见, 对 $T(p, n)^3\text{He}$ 反应来说, 两者计算结果是一致的, 对 $D(d, n)^3\text{He}$ 反应, 两者差别在所有能区都小于万分之五, 对 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应, 两者差别除了在 $E_d < 1$ 兆电子伏时稍大于千分之一外, 其余能区都在千分之一以内。因此, 在实际应用中, 用非相对论公式计算是完全可以的。由于对 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应来说, 两者差别稍大些, 鉴于某些应用中要求更精确的中子能量值, 我们把利斯金等人用相对论公式计算的 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应的中子能量推荐值列在表 5 附表中。

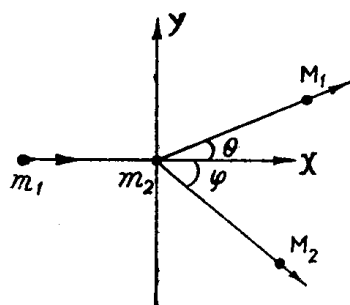
核反应的全截面和微分截面以及 $^7\text{Li}(p, n)$ 反应的中子能量值采用利斯金等人给的推荐值。

$^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 和 $T(p, n)^3\text{He}$ 反应在阈能附近也具有类似 $^1\text{H}(t, n)^3\text{He}$ 反应的一些特性, 因此可以作为能量为 30 和 64 千电子伏的“运动学准直中子束”。随着入射质子能量的增高, 中子发射角也增大, 这两个反应当质子能量分别达到 1.921 和 1.147 兆电子伏时, 中子发射方向增至全空间。我们用核反应的运动学公式计算了这两个反应在阈能附近的中子能量, 计算的结果与国外发表的数据是一致的。

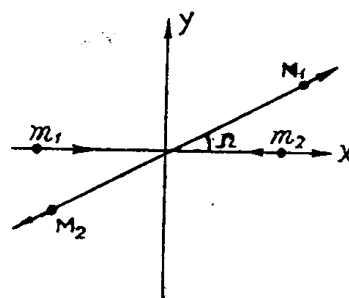
最后, 对平均中子能量、能散度、中子产额和中子通量的计算, 以及加速器能量刻度的方法作了一般的介绍。

一、核反应运动学参数

核反应运动学参数的非相对论计算公式如下^[6]：



实验室坐标系



质心坐标系

m_1 ：入射粒子质量。

m_2 ：被轰击粒子质量。

M_1 ：轻反应产物质量。

M_2 ：重反应产物质量。

θ ：实验室系轻反应产物角度。

φ ：实验室系重反应产物角度。

Ω ：质心系轻反应产物角度。

E_0 ：实验室系入射粒子能量。

E_1 ：实验室系轻反应产物能量。

E_2 ：实验室系重反应产物能量。

E_T ：总动能 $E_T = E_0 + Q$ 。

$\frac{d\omega}{d\omega'}(\theta)$ ：轻反应产物的实验室系对质心系的立体角元的变换率。

$\frac{d\omega}{d\omega'}(\varphi)$ ：重反应产物的实验室系对质心系的立体角元的变换率。

(带撇的表示质心系)

$$\text{令 } A_1 = \frac{m_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \left(1 - \frac{Q}{E_T}\right),$$

$$A_2 = \frac{m_1 M_1}{(M_1 + M_2)^2} \left(1 - \frac{Q}{E_T}\right),$$

$$B_1 = \frac{m_2 M_1}{(M_1 + M_2)^2} \left(\frac{M_1 + M_2 - m_1}{m_2} + \frac{m_1}{m_2} \frac{Q}{E_T} \right),$$

$$B_2 = \frac{m_2 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \left(\frac{M_1 + M_2 - m_1}{m_2} + \frac{m_1}{m_2} \frac{Q}{E_T} \right),$$

$$\text{则 } E_1 = E_T A_2 \left[\cos\theta \pm \left(\frac{B_2}{A_2} - \sin^2\theta \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$E_2 = E_T A_1 \left[\cos\varphi \pm \left(\frac{B_1}{A_1} - \sin^2\varphi \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2, \quad (2)$$

$$\sin\varphi = \left(\frac{B_1}{E_2/E_T} \right)^{\frac{1}{2}} \sin\Omega, \quad (3)$$

$$\sin\theta = \left(\frac{B_2}{E_1/E_T} \right)^{\frac{1}{2}} \sin\Omega, \quad (4)$$

$$\sin\varphi = \left(\frac{M_1}{M_2 A_1 + B_1 + A_2 + B_2 - E_1/E_T} \right)^{\frac{1}{2}} \sin\theta, \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{d\omega'}(\varphi) = \frac{(A_1 B_1)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{B_1}{A_1} - \sin^2\varphi \right)^{\frac{1}{2}}}{E_2/E_T}, \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{d\omega'}(\theta) = \frac{(A_1 B_1)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{B_2}{A_2} - \sin^2\theta \right)^{\frac{1}{2}}}{E_1/E_T}. \quad (7)$$

注意式(1)中,若 $A_2 \leq B_2$, 仅用正号;若 $A_2 > B_2$, 用正、负号,在此情况下,

$$\theta_{\text{最大}} = \arcsin \left(\frac{B_2}{A_2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

式(2)中,若 $A_1 \leq B_1$, 仅用正号;若 $A_1 > B_1$, 用正、负号,在此情况下,

$$\varphi_{\text{最大}} = \arcsin \left(\frac{B_1}{A_1} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

在计算中所采用的原子质量见表4所示,表中所列的元素的原子质量中,除中子外,都包括核外的电子质量,在计算中应是原子核的质量,即原子质量减去核外电子的质量。

表4 元素的原子质量表

元 素	原 子 质 量
n	1.00866522
H	1.00782522
^2H	2.01410222
^3H	3.01604972
^3He	3.01602970
^4He	4.00260326
^7Li	7.0160048
^7Be	7.0169299
~	0.00054858

非相对论公式计算的结果见表5—10和13,在这些表中:

(1) 下角码n, p, d, t, ^3He , α , ^7Li , ^7Be 分别表示中子、质子、氦核、氦核、氮-3核、氮-4核、锂-7核和铍-7核。

(2) 第一列 θ (度)为轻反应产物的实验室系出射角,第二列、第三列分别为与 θ 角

有关的轻反应产物的能量、立体角元变换率 $\frac{d\omega}{d\omega'}(\theta)$ ，第四列为与 θ 角相关联的重反应产物的实验室系出射角 φ （用弧度表示），第五列为与 θ 角相应的轻反应产物质心系出射角 Ω （用弧度表示）。第六列 φ （度）为重反应产物的实验室系出射角，第七列和第八列分别为与 φ 角有关的重反应产物的能量和立体角元变换率 $\frac{d\omega}{d\omega'}(\varphi)$ 。

表 5—13 可以简要地用图 1 表示。

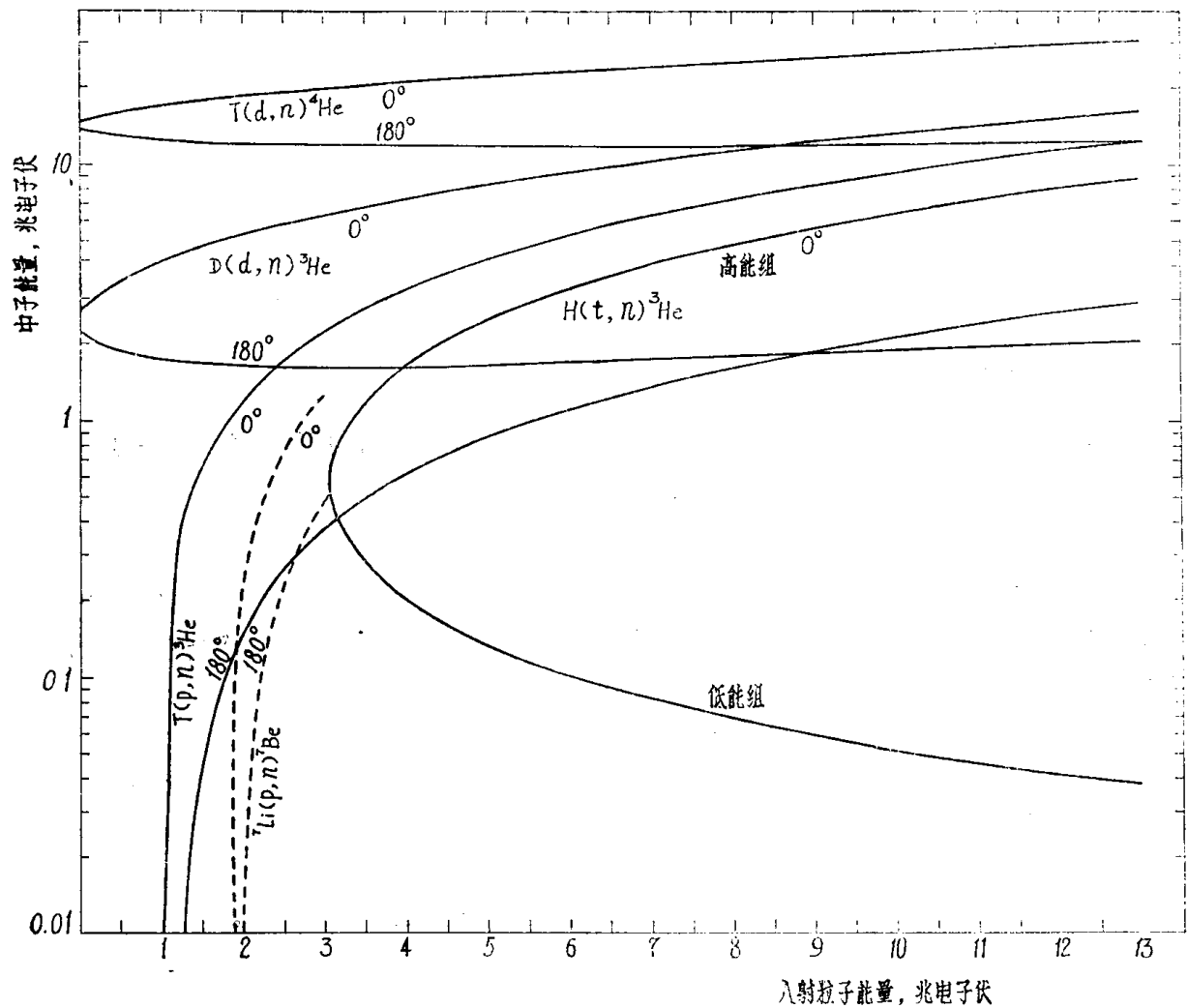


图 1 不同的核反应所产生的中子能量

表5 T (d,n)⁴He 反应(E_d: 从 0.02 至 15 兆电子伏)

θ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$	φ , 弧度	Ω , 弧度	φ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$
$E_d = 0.02$ 兆电子伏							
0	14.3615	.978883	π -.000000	.000000	0	3.85176	.920017
10	14.3569	.979200	π -.184188	.176393	10	3.84679	.921182
20	14.3430	.980144	π -.368054	.352740	20	3.83204	.924654
30	14.3203	.981687	π -.551259	.528964	30	3.80808	.930360
40	14.2896	.983786	π -.733526	.705026	40	3.77580	.938175
45	14.2716	.985026	π -.824244	.792997	45	3.75689	.942823
50	14.2519	.986382	π -.914619	.880889	50	3.73637	.947926
60	14.2083	.989399	π -1.09432	1.05649	60	3.69120	.959384
70	14.1602	.992751	π -1.27248	1.23178	70	3.64187	.972262
80	14.1091	.996340	π -1.44913	1.40687	80	3.58998	.986238
90	14.0567	1.00006	1.51755	π -1.56006	90	3.53727	1.00091
100	14.0044	1.00379	1.34424	π -1.38573	100	3.48533	1.01585
110	13.9539	1.00743	1.17247	π -1.21171	110	3.43570	1.03061
120	13.9066	1.01086	1.00203	π -1.03790	120	3.38975	1.04470
130	13.8641	1.01397	.832975	π -.864474	130	3.34878	1.05764
135	13.8450	1.01538	.748826	π -.777806	135	3.33048	1.06354
140	13.8275	1.01667	.665028	π -.691296	140	3.31382	1.06897
150	13.7978	1.01886	.497900	π -.518228	150	3.28571	1.07827
160	13.7761	1.02048	.331567	π -.345423	160	3.26517	1.08518
170	13.7627	1.02147	.165708	π -.172729	170	3.25266	1.08944
180	13.7582	1.02181	.000000	π -.000000	180	3.24845	1.09089

 $E_d = 0.04$ 兆电子伏

0	14.4978	.970341	π -.000000	.000000	0	3.98569	.889708
10	14.4911	.970785	π -.188436	.177164	10	3.97841	.891287
20	14.4713	.972105	π -.376376	.354258	20	3.95686	.895999
30	14.4390	.974265	π -.563321	.531184	30	3.92193	.903763
40	14.3953	.977206	π -.748856	.707880	40	3.87499	.914439
45	14.3696	.978945	π -.840997	.796135	45	3.84758	.920809
50	14.3416	.980847	π -.932638	.884289	50	3.81788	.927825
60	14.2796	.985087	π -1.11437	1.06034	60	3.75276	.943646
70	14.2113	.989804	π -1.29386	1.23595	70	3.68200	.961550
80	14.1389	.994865	π -1.47115	1.41124	80	3.60799	.981118
90	14.0646	1.00012	1.49559	π -1.55562	90	3.53326	1.00182
100	13.9907	1.00540	1.32299	π -1.38135	100	3.46007	1.02306
110	13.9194	1.01056	1.15253	π -1.20754	110	3.39056	1.04420
120	13.8528	1.01543	.983932	π -1.03406	120	3.32659	1.06454
130	13.7930	1.01986	.817180	π -.861073	130	3.26986	1.08333
135	13.7661	1.02186	.734335	π -.774667	135	3.24461	1.09193
140	13.7415	1.02370	.651927	π -.688442	140	3.22167	1.09988
150	13.6999	1.02683	.487803	π -.516009	150	3.18310	1.11353
160	13.6693	1.02914	.324707	π -.343905	160	3.15500	1.12372
170	13.6506	1.03056	.162238	π -.171958	170	3.13792	1.13002
180	13.6443	1.03104	.000000	π -.000000	180	3.13218	1.13215

θ , 度	E_n , 兆电子伏	$(-\frac{d\omega}{d\omega'})_n$	φ , 弧度	Ω , 弧度	φ , 度	E_a , 兆电子伏	$(-\frac{d\omega}{d\omega'})_a$
--------------	--------------	---------------------------------	----------------	---------------	---------------	--------------	---------------------------------

$E_0 = 0.06$ 兆电子伏

0	14.6051	.963869	$\pi-.000000$	.000000	0	4.09060	.867477
10	14.5968	.964408	$\pi-.191799$	.177755	10	4.08146	.869350
20	14.5724	.966011	$\pi-.382953$	.355422	20	4.05441	.874943
30	14.5326	.968636	$\pi-.572826$	.532885	30	4.01062	.884177
40	14.4787	.972212	$\pi-.760889$	.710067	40	3.95192	.896912
45	14.4470	.974328	$\pi-.854117$	.798542	45	3.91770	.904532
50	14.4126	.976644	$\pi-.946715$	.886896	50	3.88070	.912941
60	14.3363	.981810	$\pi-1.12996$	1.06328	60	3.79976	.931973
70	14.2525	.987565	$\pi-1.31040$	1.23915	70	3.71216	.953620
80	14.1636	.993748	$\pi-1.48807$	1.41459	80	3.62094	.977413
90	14.0725	1.00017	1.47880	$\pi-1.55222$	90	3.52924	1.00273
100	13.9821	1.00665	1.30682	$\pi-1.37800$	100	3.43987	1.02886
110	13.8949	1.01298	1.13743	$\pi-1.20434$	110	3.35539	1.05502
120	13.8136	1.01897	.970290	$\pi-1.03111$	120	3.27799	1.08032
130	13.7405	1.02441	.805321	$\pi-.858466$	130	3.20963	1.10382
135	13.7077	1.02688	.723473	$\pi-.772261$	135	3.17930	1.11461
140	13.6778	1.02914	.642120	$\pi-.686255$	140	3.15180	1.12460
150	13.6270	1.03300	.480264	$\pi-.514308$	150	3.10565	1.14182
160	13.5898	1.03586	.319593	$\pi-.342741$	160	3.07211	1.15470
170	13.5671	1.03761	.159655	$\pi-.171367$	170	2.05175	1.16268
180	13.5594	1.03820	.000000	$\pi-.000000$	180	3.04492	1.16538

$E_0 = 0.08$ 兆电子伏

0	14.6973	.958469	$\pi-.000000$	.000000	0	4.18052	.849395
10	14.6878	.959086	$\pi-.194706$	.178252	10	4.16973	.851500
20	14.6594	.960924	$\pi-.388630$	.356402	20	4.13785	.857791
30	14.6132	.963934	$\pi-.581010$	.534318	30	4.08630	.868195
40	14.5507	.968039	$\pi-.771216$	.711909	40	4.01732	.882580
45	14.5139	.970469	$\pi-.865355$	.800568	45	3.97718	.891207
50	14.4740	.973130	$\pi-.958750$	.889092	50	3.93383	.900744
60	14.3856	.979069	$\pi-1.14323$	1.06577	60	3.83922	.922394
70	14.2885	.985693	$\pi-1.32441$	1.24184	70	3.73716	.947126
80	14.1857	.992818	$\pi-1.50235$	1.41741	80	3.63126	.974437
90	14.0805	1.00023	1.46469	$\pi-1.54935$	90	3.52523	1.00364
100	13.9760	1.00771	1.29330	$\pi-1.37518$	100	3.42230	1.03394
110	13.8755	1.01503	1.12485	$\pi-1.20165$	110	3.32538	1.06441
120	13.7818	1.02197	.958959	$\pi-1.02863$	120	3.23693	1.09402
130	13.6977	1.02828	.795498	$\pi-.856271$	130	3.15909	1.12164
135	13.6599	1.03114	.714488	$\pi-.770235$	135	3.12464	1.13437
140	13.6255	1.03377	.634016	$\pi-.684413$	140	3.09345	1.14617
150	13.5672	1.03825	.474046	$\pi-.512875$	150	3.04121	1.16654
160	13.5244	1.04157	.315380	$\pi-.341761$	160	3.00332	1.18183
170	13.4983	1.04360	.157528	$\pi-.170869$	170	2.98036	1.19131
180	13.4895	1.04429	.000000	$\pi-.000000$	180	2.97266	1.19452

θ , 度	E_n , 兆电子伏	$(-\frac{d\omega}{d\omega'})_n$	φ , 弧度	Ω , 弧度	φ , 度	E_n , 兆电子伏	$(-\frac{d\omega}{d\omega'})_n$
--------------	--------------	---------------------------------	----------------	---------------	---------------	--------------	---------------------------------

$E_d = 0.10$ 兆电子伏

0	14.7800	.953753	π -.000000	.000000	0	4.26086	.833944
10	14.7693	.954439	π -.197324	.178690	10	4.24857	.836242
20	14.7374	.956481	π -.393735	.357264	20	4.21228	.843116
30	14.6854	.959827	π -.588352	.535579	30	4.15366	.854501
40	14.6153	.964391	π -.780453	.713530	40	4.07535	.870278
45	14.5740	.967095	π -.875391	.802352	45	4.02984	.879758
50	14.5292	.970056	π -.969476	.891024	50	3.98076	.890255
60	14.4301	.976671	π -1.15501	1.06795	60	3.87385	.914147
70	14.3213	.984055	π -1.33680	1.24421	70	3.75884	.941545
80	14.2061	.992007	π -1.51493	1.41990	80	3.63991	.971926
90	14.0884	1.00029	1.45231	π -1.54683	90	3.52122	1.00455
100	13.9716	1.00865	1.28148	π -1.37270	100	3.40640	1.03855
110	13.8594	1.01685	1.11388	π -1.19928	110	3.29868	1.07289
120	13.7548	1.02462	.949105	π -1.02644	120	3.20069	1.10640
130	13.6610	1.03170	.786975	π -.854338	130	3.11475	1.13778
135	13.6189	1.03492	.706698	π -.768451	135	3.07679	1.15227
140	13.5806	1.03787	.626998	π -.682791	140	3.04247	1.16573
150	13.5156	1.04290	.468669	π -.511614	150	2.98508	1.18902
160	13.4680	1.04663	.311742	π -.340898	160	2.94354	1.20652
170	13.4389	1.04892	.155693	π -.170431	170	2.91840	1.21739
180	13.4291	1.04969	.000000	π -.000000	180	2.90998	1.22108

$E_d = 0.11$ 兆电子伏

0	14.8187	.951586	π -.000000	.000000	0	4.29836	.826949
10	14.8074	.952304	π -.198553	.178892	10	4.28537	.829333
20	14.7739	.954439	π -.396128	.357663	20	4.24699	.836466
30	14.7193	.957938	π -.591789	.536162	30	4.18502	.848289
40	14.6455	.962714	π -.784768	.714279	40	4.10231	.864690
45	14.6022	.965543	π -.880072	.803176	45	4.05428	.874554
50	14.5551	.968642	π -.974474	.891917	50	4.00250	.885485
60	14.4510	.975568	π -1.16048	1.06896	60	3.88981	.910394
70	14.3367	.983302	π -1.34254	1.24531	70	3.76877	.939008
80	14.2159	.991634	π -1.52075	1.42104	80	3.64376	.970800
90	14.0924	1.00032	1.44661	π -1.54567	90	3.51921	1.00500
100	13.9699	1.00909	1.27604	π -1.37155	100	3.39893	1.04073
110	13.8522	1.01769	1.10884	π -1.19818	110	3.28625	1.07688
120	13.7426	1.02585	.944591	π -1.02543	120	3.18393	1.11223
130	13.6444	1.03329	.783077	π -.853446	130	3.09430	1.14538
135	13.6003	1.03667	.703137	π -.767627	135	3.05476	1.16071
140	13.5601	1.03977	.623793	π -.682042	140	3.01903	1.17495
150	13.4922	1.04506	.466215	π -.511031	150	2.95934	1.19963
160	13.4423	1.04898	.310083	π -.340499	160	2.91617	1.21820
170	13.4119	1.05139	.154856	π -.170229	170	2.89005	1.22973
180	13.4016	1.05220	.000000	π -.000000	180	2.88130	1.23365

θ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$	φ , 弧度	Ω , 弧度	φ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$
$E_d = 0.12$ 兆电子伏							
0	14.8559	.949524	π -.000000	.000000	0	4.33441	.820350
10	14.8441	.950271	π -.199738	.179086	10	4.32072	.822814
20	14.8090	.952495	π -.398435	.358043	20	4.28032	.830190
30	14.7518	.956140	π -.595097	.536718	30	4.21512	.842423
40	14.6746	.961116	π -.788916	.714995	40	4.12814	.859409
45	14.6293	.964065	π -.884571	.803963	45	4.07768	.869634
50	14.5800	.967296	π -.979273	.892769	50	4.02329	.880973
60	14.4712	.974517	π -1.16573	1.06992	60	3.90504	.906842
70	14.3517	.982584	π -1.34804	1.24636	70	3.77818	.936610
80	14.2254	.991280	π -1.52631	1.42214	80	3.64736	.969744
90	14.0963	1.00034	1.44116	π -1.54455	90	3.51721	1.00546
100	13.9685	1.00951	1.27085	π -1.37045	100	3.39170	1.04284
110	13.8456	1.01850	1.10405	π -1.19714	110	3.27433	1.08074
120	13.7312	1.02703	.940302	π -1.02447	120	3.16789	1.11786
130	13.6287	1.03482	.779377	π -.852593	130	3.07480	1.15273
135	13.5828	1.03835	.699759	π -.766840	135	3.03377	1.16887
140	13.5408	1.04159	.620752	π -.681327	140	2.99672	1.18388
150	13.4700	1.04713	.463889	π -.510475	150	2.93486	1.20991
160	13.4180	1.05124	.308511	π -.340119	160	2.89016	1.22951
170	13.3863	1.05376	.154063	π -.170035	170	2.86313	1.24170
180	13.3756	1.05461	.000000	π -.000000	180	2.85409	1.24584

$E_d = 0.13$ 兆电子伏							
0	14.8919	.947553	π -.000000	.000000	0	4.36918	.814097
10	14.8795	.948329	π -.200885	.179271	10	4.35482	.816637
20	14.8429	.950637	π -.400666	.358408	20	4.31245	.824240
30	14.7833	.954422	π -.598294	.537252	30	4.24410	.836859
40	14.7028	.959589	π -.792919	.715680	40	4.15300	.854396
45	14.6555	.962652	π -.888908	.804717	45	4.10016	.864963
50	14.6042	.966008	π -.983896	.893586	50	4.04325	.876687
60	14.4907	.973512	π -1.17077	1.07085	60	3.91963	.903467
70	14.3662	.981898	π -1.35332	1.24736	70	3.78715	.934333
80	14.2347	.990942	π -1.53163	1.42319	80	3.65073	.968749
90	14.1003	1.00037	1.43595	π -1.54349	90	3.51520	1.00592
100	13.9672	1.00992	1.26590	π -1.36940	100	3.38471	1.04489
110	13.8394	1.01928	1.09948	π -1.19613	110	3.26285	1.08447
120	13.7204	1.02817	.936210	π -1.02355	120	3.15251	1.12331
130	13.6138	1.03628	.775850	π -.851776	130	3.05613	1.15985
135	13.5661	1.03996	.696541	π -.766086	135	3.01370	1.17679
140	13.5225	1.04334	.617856	π -.680641	140	2.97539	1.19255
150	13.4489	1.04912	.461675	π -.509941	150	2.91149	1.21990
160	13.3949	1.05340	.307015	π -.339754	160	2.86536	1.24051
170	13.3619	1.05604	.153309	π -.169850	170	2.83748	1.25333
180	13.3508	1.05692	.000000	π -.000000	180	2.82815	1.25769

θ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$	φ , 弧度	Ω , 弧度	φ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$
--------------	--------------	--------------------------------	----------------	---------------	---------------	--------------	--------------------------------

$E_d = 0.14$ 兆电子伏

0	14.9267	.945663	π -.000000	.000000	0	4.40281	.808151
10	14.9138	.946466	π -.201998	.179449	10	4.38780	.810762
20	14.8757	.948856	π -.402829	.358759	20	4.34351	.818579
30	14.8138	.952774	π -.601392	.537765	30	4.27210	.831562
40	14.7301	.958124	π -.796792	.716340	40	4.17697	.849620
45	14.6810	.961296	π -.893102	.805443	45	4.12184	.860510
50	14.6276	.964773	π -.988363	.894372	50	4.06248	.872602
60	14.5097	.972547	π -1.17564	1.07174	60	3.93364	.900247
70	14.3804	.981240	π -1.35840	1.24832	70	3.79573	.932163
80	14.2437	.990618	π -1.53676	1.42420	80	3.65390	.967810
90	14.1043	1.00040	1.43095	π -1.54246	90	3.51320	1.00638
100	13.9662	1.01031	1.26115	π -1.36839	100	3.37791	1.04688
110	13.8335	1.02003	1.09510	π -1.19517	110	3.25176	1.08810
120	13.7102	1.02926	.932294	π -1.02266	120	3.13770	1.12861
130	13.5997	1.03769	.772477	π -.850990	130	3.03820	1.16679
135	13.5502	1.04152	.693464	π -.765360	135	2.99443	1.18450
140	13.5051	1.04503	.615088	π -.679981	140	2.95494	1.20099
150	13.4287	1.05104	.459561	π -.509428	150	2.88911	1.22962
160	13.3728	1.05549	.305586	π -.339403	160	2.84162	1.25123
170	13.3387	1.05823	.152589	π -.169672	170	2.81294	1.26468
180	13.3272	1.05916	.000000	π -.000000	180	2.80334	1.26925

$E_d = 0.15$ 兆电子伏

0	14.9605	.943847	π -.000000	.000000	0	4.43543	.802479
10	14.9471	.944675	π -.203080	.179621	10	4.41979	.805156
20	14.9076	.947143	π -.404933	.359097	20	4.37362	.813176
30	14.8434	.951188	π -.604400	.538259	30	4.29922	.826503
40	14.7566	.956715	π -.800550	.716976	40	4.20017	.845056
45	14.7057	.959992	π -.897168	.806142	45	4.14280	.856254
50	14.6503	.963584	π -.992691	.895130	50	4.08105	.868694
60	14.5281	.971619	π -1.18035	1.07259	60	3.94713	.897168
70	14.3942	.980607	π -1.36331	1.24925	70	3.80396	.930088
80	14.2526	.990306	π -1.54170	1.42518	80	3.65689	.966919
90	14.1082	1.00043	1.42612	π -1.54147	90	3.51119	1.00683
100	13.9653	1.01068	1.25658	π -1.36742	100	3.37130	1.04883
110	13.8281	1.02075	1.09089	π -1.19424	110	3.24103	1.09164
120	13.7005	1.03032	.928534	π -1.02180	120	3.12340	1.13378
130	13.5862	1.03905	.769242	π -.850232	130	3.02092	1.17355
135	13.5351	1.04302	.690514	π -.764661	135	2.97588	1.19201
140	13.4884	1.04667	.612436	π -.679345	140	2.93526	1.20922
150	13.4095	1.05290	.457534	π -.508934	150	2.86761	1.23912
160	13.3517	1.05752	.304218	π -.339065	160	2.81883	1.26170
170	13.3164	1.06036	.151900	π -.169500	170	2.78939	1.27577
180	13.3046	1.06132	.000000	π -.000000	180	2.77955	1.28055

θ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$	φ , 弧度	Ω , 弧度	φ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$
--------------	--------------	--------------------------------	----------------	---------------	---------------	--------------	--------------------------------

$E_d = 0.16$ 兆电子伏

0	14.9933	.942095	$\pi-.000000$	.000000	0	4.46715	.797052
10	14.9796	.942949	$\pi-.204136$	.179787	10	4.45087	.799792
20	14.9387	.945491	$\pi-.406983$	.359425	20	4.40287	.808004
30	14.8722	.949660	$\pi-.607329$	.538737	30	4.32555	.821658
40	14.7824	.955356	$\pi-.804204$	.717591	40	4.22266	.840683
45	14.7298	.958734	$\pi-.901119$	.806819	45	4.16310	.852173
50	14.6725	.962437	$\pi-.996893$	.895863	50	4.09903	.864947
60	14.5461	.970724	$\pi-1.18492$	1.07342	60	3.96017	.894213
70	14.4077	.979996	$\pi-1.36806$	1.25015	70	3.81187	.928100
80	14.2614	.990006	$\pi-1.54647$	1.42612	80	3.65972	.966071
90	14.1122	1.00046	1.42147	$\pi-1.54051$	90	3.50919	1.00729
100	13.9646	1.01105	1.25217	$\pi-1.36647$	100	3.36484	1.05073
110	13.8229	1.02145	1.08683	$\pi-1.19334$	110	3.23061	1.09509
120	13.6912	1.03134	.924916	$\pi-1.02097$	120	3.10956	1.13882
130	13.5733	1.04037	.766131	$\pi-.849499$	130	3.00424	1.18015
135	13.5205	1.04448	.687678	$\pi-.763984$	135	2.95798	1.19936
140	13.4724	1.04825	.609886	$\pi-.678730$	140	2.91629	1.21727
150	13.3910	1.05470	.455588	$\pi-.508455$	150	2.84690	1.24842
160	13.3315	1.05948	.302905	$\pi-.338737$	160	2.79691	1.27195
170	13.2951	1.06242	.151238	$\pi-.169334$	170	2.76675	1.28663
180	13.2829	1.06341	.000000	$\pi-.000000$	180	2.75666	1.29162

$E_d = 0.17$ 兆电子伏

0	15.0254	.940403	$\pi-.000000$	.000000	0	4.49803	.791847
10	15.0112	.941281	$\pi-.205167$	.179948	10	4.48114	.794647
20	14.9690	.943895	$\pi-.408984$	.359741	20	4.43135	.803042
30	14.9003	.948183	$\pi-.610186$	.539201	30	4.35115	.817007
40	14.8076	.954042	$\pi-.807764$	.718186	40	4.24452	.836482
45	14.7532	.957518	$\pi-.904965$	.807474	45	4.18281	.848252
50	14.6941	.961329	$\pi-1.00098$	.896573	50	4.11647	.861345
60	14.5637	.969858	$\pi-1.18936$	1.07422	60	3.97278	.891373
70	14.4209	.979405	$\pi-1.37268$	1.25102	70	3.81949	.926190
80	14.2700	.989716	$\pi-1.55110$	1.42703	80	3.66241	.965264
90	14.1162	1.00049	1.41697	$\pi-1.53959$	90	3.50718	1.00775
100	13.9640	1.01141	1.24791	$\pi-1.36556$	100	3.35853	1.05260
110	13.8180	1.02213	1.08292	$\pi-1.19247$	110	3.22048	1.09846
120	13.6824	1.03233	.921426	$\pi-1.02017$	120	3.09615	1.14375
130	13.5610	1.04166	.763132	$\pi-.848789$	130	2.98809	1.18661
135	13.5066	1.04589	.684945	$\pi-.763329$	135	2.94068	1.20655
140	13.4571	1.04979	.607430	$\pi-.678135$	140	2.89796	1.22516
150	13.3733	1.05645	.453714	$\pi-.507992$	150	2.82691	1.25753
160	13.3120	1.06138	.301640	$\pi-.338421$	160	2.77576	1.28201
170	13.2746	1.06442	.150602	$\pi-.169173$	170	2.74492	1.29728
180	13.2620	1.06545	.000000	$\pi-.000000$	180	2.73461	1.30247

θ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$	φ , 弧度	Ω , 弧度	φ , 度	E_n , 兆电子伏	$(\frac{d\omega}{d\omega'})_n$
--------------	--------------	--------------------------------	----------------	---------------	---------------	--------------	--------------------------------

$E_d = 0.18$ 兆电子伏

0	15.0567	.938765	$\pi-.000000$	.000000	0	4.52816	.786844
10	15.0420	.939667	$\pi-.206176$	.180104	10	4.51067	.789701
20	14.9985	.942350	$\pi-.410940$	.360049	20	4.45911	.798271
30	14.9277	.946753	$\pi-.612976$	.539650	30	4.37610	.812532
40	14.8322	.952770	$\pi-.811237$	.718764	40	4.26579	.832437
45	14.7762	.956341	$\pi-.908716$	.808110	45	4.20199	.844477
50	14.7153	.960256	$\pi-1.00497$	.897262	50	4.13342	.857876
60	14.5810	.969020	$\pi-1.19367$	1.07500	60	3.98501	.888636
70	14.4338	.978833	$\pi-1.37716$	1.25187	70	3.82685	.924351
80	14.2785	.989436	$\pi-1.55559$	1.42792	80	3.66496	.964493
90	14.1201	1.00052	1.41260	$\pi-1.53869$	90	3.50517	1.00821
100	13.9636	1.01175	1.24379	$\pi-1.36468$	100	3.35236	1.05443
110	13.8134	1.02280	1.07913	$\pi-1.19162$	110	3.21061	1.10177
120	13.6739	1.03330	.918054	$\pi-1.01939$	120	3.08312	1.14859
130	13.5491	1.04291	.760237	$\pi-.848100$	130	2.97244	1.19295
135	13.4932	1.04727	.682307	$\pi-.762693$	135	2.92391	1.21361
140	13.4423	1.05129	.605060	$\pi-.677557$	140	2.88022	1.23289
150	13.3562	1.05815	.451906	$\pi-.507542$	150	2.80758	1.26647
160	13.2932	1.06324	.300421	$\pi-.338113$	160	2.75533	1.29189
170	13.2548	1.06637	.149987	$\pi-.169017$	170	2.72383	1.30775
180	13.2418	1.06743	.000000	$\pi-.000000$	180	2.71330	1.31314

$E_d = 0.19$ 兆电子伏

0	15.0873	.937177	$\pi-.000000$	.000000	0	4.55760	.782026
10	15.0722	.938101	$\pi-.207165$	.180256	10	4.53952	.784938
20	15.0274	.940852	$\pi-.412856$	.360348	20	4.48622	.793673
30	14.9546	.945366	$\pi-.615707$	.540087	30	4.40045	.808219
40	14.8563	.951537	$\pi-.814631$	.719326	40	4.28652	.828536
45	14.7986	.955199	$\pi-.912379$	.808728	45	4.22067	.840834
50	14.7360	.959214	$\pi-1.00885$	.897932	50	4.14992	.854528
60	14.5978	.968207	$\pi-1.19788$	1.07576	60	3.99689	.885993
70	14.4465	.978278	$\pi-1.38152$	1.25269	70	3.83397	.922577
80	14.2868	.989164	$\pi-1.55995$	1.42878	80	3.66738	.963755
90	14.1241	1.00054	1.40836	$\pi-1.53781$	90	3.50317	1.00867
100	13.9632	1.01209	1.23979	$\pi-1.36381$	100	3.34631	1.05623
110	13.8090	1.02344	1.07546	$\pi-1.19080$	110	3.20099	1.10501
120	13.6658	1.03424	.914789	$\pi-1.01863$	120	3.07044	1.15333
130	13.5377	1.04412	.757435	$\pi-.847430$	130	2.95723	1.19917
135	13.4803	1.04861	.679755	$\pi-.762075$	135	2.90764	1.22054
140	13.4280	1.05274	.602767	$\pi-.676995$	140	2.86301	1.24049
150	13.3397	1.05981	.450158	$\pi-.507105$	150	2.78885	1.27527
160	13.2751	1.06504	.299242	$\pi-.337814$	160	2.73554	1.30160
170	13.2357	1.06827	.149394	$\pi-.168865$	170	2.70343	1.31805
180	13.2224	1.06936	.000000	$\pi-.000000$	180	2.69269	1.32344