

輕 原 子 核 的 質 量*

李 整 武

(中國科學院物理研究所)

提 要

近年原子核反應能量(包括核衰變能)的精密測定的累積,使我們有可能單獨從核反應能的測量來確定輕原子核的質量。本文用近似的最小二乘統計平差,由原子核實驗數據得出從中子到 Ca^{41} 各同位素的原子量。主要結果如下:

(1) 由核反應能導出的、質量差 $2\text{D}^2 - \text{He}^4$ 的數值和質譜測定的比較,給質量和能量聯系公式, $E=mc^2$, 提供了最精確的實驗證明。準確度為 $\frac{1}{6000}$ 。

(2) 從 $A=1$ 到 41 一共 79 個同位素的原子量(表 8), 和統計平差後的 Q 值(表 1)。這是現在由原子核轉變的數據所能得到的,一組最可靠的質量值。主要的質量是:

$$\begin{aligned} n &= 1.008\ 9342 \quad (\pm 17), \\ \text{H}^1 &= 1.008\ 1440 \quad (\pm 17), \\ \text{D}^2 &= 2.014\ 7381 \quad (\pm 29), \\ \text{He}^4 &= 4.003\ 8732 \quad (\pm 21), \\ \text{C}^{12} &= 12.003\ 807 \quad (\pm 5), \\ \text{S}^{32} &= 31.982\ 188 \quad (\pm 26), \\ \text{Ca}^{40} &= 39.975\ 204 \quad (\pm 39). \end{aligned}$$

(3) 本文所得的結果顯示作者所用的方法,在現階段原子核實驗知識的限度下,和全盤的最小二乘平差方法具有同樣意義,達到同等的精密度,而手續較為簡單有利,且便於發現實驗結果中的系統偏差。

(4) 核反應能測定和最近質譜測定的比較表明,對於 H^1 , D^2 , He^4 的質量,這兩種方法已經符合。至於 C^{12} 的質量,則仍有確定的差異; S^{32} 和 Ca^{40} 則兩種測定差異較大,尚未一致。

一. 引 言

原子核質量的測定是原子核物理中的一個基本問題。由原子核反應能¹⁾得出來的質量和質譜結果的比較為質量和能量間的關係, $E=mc^2$, 提供了精確的實驗證明。在

* 1956 年 8 月 20 日收到。

1) 這裏核反應能一詞包括通常的核反應能和衰變能。

確立了這個關係後,有一系列重要的結果。知道了一個原子核的組成後,它的結合能可以由精密測定的質量計算出來。這些結合能是研究原子核的構造和核內作用力的基礎知識。同時,也是原子能利用的基礎。由於原子核的建築性的結構,輕原子核在原子核質量的確定及理論研究上是首先要注意到的。在精密測定的核質量的應用中還包括電離粒子在各種介質中運動時的射程和能量的關係,分子帶光譜的詮釋,化學原子量標度的確定等。

拿 O^{16} 作標準的原子核質量是原子核物理中實驗測定的精密度最高的基本常數。

精密測定原子核質量的主要方法是:(一)質譜學,和(二)原子核反應能的測定。由於近年微波技術的進展,分子帶光譜的測定也給原子核質量的測定帶來新的可能。在個別的情況,這方法所達到的精密度和上述二類相仿。但到現在為止,這方面的結果還是比較片斷的,因此不在這裏討論。

在以往,確定原子核質量的辦法是先由質譜儀的測定得出一些基礎質量,尤其是 H^1 , D^2 , C^{12} 等。然後拿其他質量的質譜雙線的測定和原子核反應能來作補充計算,決定其他原子核的質量。戰後,實驗工作者開始拿分辨率較前更高的質譜儀來測定質量。首先出現的是 Nier 和 Roberts^[1] 的測定。同時,在 1950 年底,由於原子核譜儀等測定的核反應能的精密數據的累積,使作者等^[2] 有可能不用質譜結果,而單獨用原子核反應能得出從 n 到 F^{20} 各核的精密質量,準確度普遍地超過從前的質量值,如 Bethe (1947)^[25] 所定的。而且,這樣得出來的結果,出乎意外地,和質譜測定值有系統的差異。接着出現的 Ewald (1951)^[3] 的質譜測定,主要的質量却和核反應的結果符合而和 Nier 等的不同。此後 Nier 和共同工作者^[4] 修正了他們的測量。作者^[2] 將核反應能確定的質量推進到 O^{16} 以上,到 S^{33} 為止的各原子核,比 Bethe (1947)^[25] 的質量值一般地準確了一個數量級。質譜方面, Ogata 和 Matsuda (1953)^[5], Mattauch 和 Bieri (1954)^[6], 還有 Smith 和 Damm (1953)^[7] 等陸續作了測定。這些質譜測定互相之間的差異,以及他們和核反應測定之間的差異,主要在於 C^{12} 。而 C^{12} 却是全部質譜測定中關鍵性的質量。同時,其他質量也有許多不符合的地方。大致說起來,質譜結果較為紛歧,不及核反應測定的互相一致。而兩種測定之間,又有顯然的差異。

在這個時期,除了分別處理質譜值和核反應值外,還可以暫時不計兩者間的差別,而統一平均。Джелепов 和 Зырянова^[8] (1952) 用所有質譜儀和核反應的測定統一地作最小二乘的平差計算得出輕原子核質量。後來 Drummond (1955)^[9] 也作了一個統一的計算。但他的計算所用的原始數據中,含有一些錯誤^[10]。

最近 Wapstra (1955)^[11] 重作了由核反應能確定質量的工作。在 Na^{23} 以下用全

盤的最小二乘平差。他並引用作者的辦法，加以改進。但不幸所給的結果， B^{10} 以下有錯誤^[10]，而最近 S^{32} 和 Ca^{40} 之間又得到了一些新的，較準確的核反應能測定，使我們有可能比以前更精確地定出這一段的質量。

質譜方面，也有了顯著的推進。Демирханов, Гуткин, Дорохов 和 Руденко (1956)^[12] 用分辨率為 70 000—100 000 的質譜測定 H^1 , D^2 , He^4 和 C^{12} 的質量。Quisenberry, Scolman 和 Nier, 以及 Kettner (1956)^[13, 10, 14] 用分辨率為 30 000—60 000 的質譜重新測定了 H^1 , D^2 , C^{12} , S^{32} 及 $10 \leq A \leq 30$ 之間的各穩定同位素的質量，在精密度上較以前的質譜測定有顯著的增加。

上面這些情況，加上 C^{12} 等質量的各種測定結果的不一致，以及 $E=mc^2$ 關係的實驗證明的重要性，使作者覺得有必要作本文的分析，得出現在由核反應能所可確定的原子核質量的最可幾值，並且拿來和質譜值比較。由這一些分析進一步可以明確核反應能的實驗知識的現狀，和可以改進的方向。

二. 由原子核反應能量確定的原子核質量

在下述的討論中，所有的質量都是拿 $O^{16}=16.000\ 000$ 原子質量單位做標準的物理標度。原子核反應（包括衰變）能量普通用 Q 表示。用能量的關係來表示，

$$\sum_i M_i - \sum_f M_f = Q; \quad (1)$$

式中 M_i 表示反應前有關各核的靜止質量¹⁾， M_f 表示反應完了後各核的靜止質量，實際測定的是 Q 值； M 是我們的未知數。當然，在測量時，首先得由質譜或其他方法知道各個有關質量的大略數值，然後才能用各個核在反應前和反應後的動能來定 Q 值。所有質量的數值，依照通常的用法，都是指整個中性的原子的。電子的靜止質量在式 (1) 中已包括進去。由於電子在原子裏的結合能在式 (1) 中引起的差別，在現階段的輕原子核質量的實驗確定中，可以忽略不計。在本文中，除非特別指明，將任意混用原子核質量，同位素的原子量等，但所用的數值都是指的整個中性原子的質量。中微子的可能有的微小質量也忽略不計。

表 1 列舉了本文中用來計算同位素原子量的核反應能的實驗數據。除作為標準的 O^{16} 外，從 $A=1$ 到 41 一共有 78 個同位素的質量。連結這 78 個未知數的核反應 Q 值有 135 種（圖 1）。所以像式 (1) 所表示的觀測所得的關係，多於求解的未知數，構成統計學上的多餘觀測。如果知道這些多餘觀測就統計上說是互相一致的話，那麼，就

1) 為書寫簡便起見，這裏混用質量和能量兩詞。嚴格地講應該用哪個名詞，由文義是顯然的，以下同。

表1. 用來計算質量的核反應能

反 應	實 驗 Q 值 (Mev)	實 驗 Q 值的 計權平均 (Mev)	平差後的 Q 值 (Mev)	參 考 文 獻
$n(\beta^-)H^1$	0.783 ± 0.013 (a)	2.227 ± 0.002	0.7824 ± 0.001	Robson 51 ^[127]
$H^1(n, \gamma)D^2$	2.230 ± 0.007		2.2255 ± 0.0015	Bell 50a ^[45]
$D^2(\gamma, n)H^1$	-2.226 ± 0.003			Mobley 50 ^[117]
	-2.227 ± 0.003			Noyes 54 ^[121]
$D^2(p, n)2H^1$	-2.225 ± 0.010			Smith 50, Li 51a ^[138, 2]
$D^2(n, \gamma)T^3$	6.251 ± 0.008	4.031 ± 0.005	6.258 ± 0.004	Kinsey 50a ^[101]
$D^2(d, n)He^3$	3.265 ± 0.009		3.268 ± 0.004	Tollestrup 49, Li 51a ^[145, 2]
$D^2(d, p)T^3$	4.036 ± 0.012		4.032 ± 0.003	Tollestrup 49, Li 51a ^[145, 2]
	4.030 ± 0.006			Strait 51 ^[141]
$T^3(\beta^-)He^3$	0.0186 ± 0.0002	0.0182 ± 0.0002	0.0182 ± 0.0002	Jenks 49, Slack 49 ^[64, 136]
	0.0183 ± 0.0003			Curran 49 ^[68]
	0.0180 ± 0.0005			Graves 49 ^[81]
	0.0183 ± 0.0003			Cecarelli 49 ^[57]
	0.01895 ± 0.0005			Hanna 49 ^[86]
	0.0194 ± 0.0004			Hamilton 51 ^[84]
	0.01795 ± 0.00010			Langer 52 ^[108]
	0.0176 ± 0.0004			Hamilton 53 ^[85]
$T^3(p, n)He^3$	-0.7637 ± 0.001		-0.7642 ± 0.001	Taschek 49 ^[142]
	-0.7647 ± 0.001			Bonner 51 ^[46]
$Li^6(p, \alpha)He^3$	4.017 ± 0.012	4.023 ± 0.002	4.021 ± 0.002	Tollestrup 49a, Li 51a ^[146, 2]
	4.021 ± 0.006			Strait 51 ^[141]
	4.024 ± 0.005			Williamson 51 ^[156]
	4.023 ± 0.003			Collins 53 ^[51]
$Li^6(d, p)Li^7$	5.019 ± 0.007	5.027 ± 0.003	5.027 ± 0.002	Strait 51 ^[141]
	5.028 ± 0.003			Collins 53 ^[51]
$Li^6(d, \alpha)He^4$	22.396 ± 0.012	22.386 ± 0.010	22.368 ± 0.006	Collins 53 ^[51]
	22.375 ± 0.014			Phillips 53 ^[125]
$Li^6(t, p)Li^8$	0.790 ± 0.011	-1.6453 ± 0.0005	0.804 ± 0.006	Allen 54 ^[40]
$Li^6(t, d)Li^7$	0.986 ± 0.007		0.995 ± 0.003	Allen 54 ^[40]
$Li^7(p, n)Be^7$	-1.6457 ± 0.0016		-1.6453 ± 0.0005	Herb 49 ^[30]
	-1.6450 ± 0.0016			Shoupp 49a ^[122]
	-1.6451 ± 0.0006			Sturm 51 ^[142]
	-1.6462 ± 0.0010			Jones 54 ^[99]
	-1.6447 ± 0.0010			Jones 54 ^[98]
$Li^7(p, \alpha)He^4$	17.340 ± 0.014	17.345 ± 0.006	17.341 ± 0.004	Strait 51 ^[141]
	17.338 ± 0.011			Whaling 51 ^[155]
	17.352 ± 0.009			Collins 53 ^[51]
	17.344 ± 0.013			Famularo 53 ^[74]
$Li^7(d, p)Li^8$	-0.192 ± 0.001	-0.192 ± 0.001	-0.191 ± 0.001	Williamson 51 ^[159]
	-0.191 ± 0.001			Allen 54 ^[40]
$Li^7(t, \alpha)He^6$	9.79 ± 0.03		—	Dewan 52 ^[65]

(續表1)

$\text{Be}^7(\text{eK})\text{Li}^7$	0.860 $\pm$ 0.008		0.863 $\pm$ 0.001	Smith 51 ^[127]
$\text{Be}^8(\alpha)\alpha$	0.089 $\pm$ 0.005	0.094 $\pm$ 0.0014	0.094 $\pm$ 0.0014	Tollestrup 49a ^[146]
	0.0945 $\pm$ 0.0014			Jones 53 ^[97]
$\text{Be}^9(\gamma, \text{n})\text{Be}^8$	-1.666 $\pm$ 0.002	-1.665 $\pm$ 0.002	-1.6665 $\pm$ 0.002	Mobley 50 ^[117]
	-1.662 $\pm$ 0.003			Noyes 54 ^[121]
$\text{Be}^9(\text{n}, \gamma)\text{Be}^{10}$	6.816 $\pm$ 0.006		6.812 $\pm$ 0.004	Kinsey 53 ^[109]
$\text{Be}^9(\text{p}, \text{n})\text{B}^9$	-1.852 $\pm$ 0.002		—	Richards 50 ^[126]
$\text{Be}^9(\text{p}, \text{d})\text{Be}^8$	0.558 $\pm$ 0.003	0.559 $\pm$ 0.001	0.559 $\pm$ 0.001	Tollestrup 49a ^[146]
	0.562 $\pm$ 0.004			Strait 51 ^[141]
	0.558 $\pm$ 0.005			Carlson 51 ^[56]
	0.558 $\pm$ 0.002			Williamson 51 ^[156]
	0.560 $\pm$ 0.003			Collins 53 ^[61]
$\text{Be}^9(\text{p}, \alpha)\text{Li}^6$	2.121 $\pm$ 0.007	2.126 $\pm$ 0.002	2.125 $\pm$ 0.002	Tollestrup 49a Li 51a ^[146, 2]
	2.130 $\pm$ 0.010			Carlson 51 ^[56]
	2.1265 $\pm$ 0.004			Williamson 51, Craig 52 ^[156, 62]
	2.126 $\pm$ 0.003			Collins 53 ^[61]
$\text{Be}^9(\text{d}, \text{p})\text{Be}^{10}$	4.585 $\pm$ 0.008	4.588 $\pm$ 0.006	4.586 $\pm$ 0.004	Strait 51 ^[141]
	4.591 $\pm$ 0.008			Klema 51 ^[106]
$\text{Be}^9(\text{d}, \text{t})\text{Be}^8$	4.597 $\pm$ 0.013		4.591 $\pm$ 0.003	Strait 51 ^[141]
$\text{Be}^9(\text{d}, \alpha)\text{Li}^7$	7.150 $\pm$ 0.008	7.153 $\pm$ 0.003	7.152 $\pm$ 0.002	Strait 51 ^[141]
	7.151 $\pm$ 0.010			Whaling 51 ^[155]
	7.159 $\pm$ 0.009			Williamson 51 ^[156]
	7.153 $\pm$ 0.004			Collins 53 ^[61]
$\text{Be}^{10}(\beta^-)\text{B}^{10}$	0.553 $\pm$ 0.015	0.557 $\pm$ 0.003	0.557 $\pm$ 0.003	Fulbright 49 ^[80]
	0.555 $\pm$ 0.005			Feldman 50 ^[76]
	0.560 $\pm$ 0.005			Hughes 50 ^[93]
$\text{B}^{10}(\text{n}, \alpha)\text{Li}^7$	2.793 $\pm$ 0.027	2.787 $\pm$ 0.008	2.791 $\pm$ 0.002	Hanna 50 ^[87]
	2.788 $\pm$ 0.010			Jesse 50, Elliott 48 ^[86, 69]
	2.775 $\pm$ 0.02			Bichsel 52 ^[46]
	2.781 $\pm$ 0.025			Hauser 52 ^[88]
$\text{B}^{10}(\text{p}, \text{He}^3)\text{Be}^8$	-0.536 $\pm$ 0.003		-0.534 $\pm$ 0.003	Craig 52 ^[62]
$\text{B}^{10}(\text{p}, \alpha)\text{Be}^7$	1.148 $\pm$ 0.006	1.148 $\pm$ 0.002	1.146 $\pm$ 0.002	Chao 49, Brown 51 ^[58, 82]
	1.152 $\pm$ 0.004			Van Patter 50 ^[147]
	1.147 $\pm$ 0.010			Burcham 50 ^[54]
	1.147 $\pm$ 0.0025			Craig 52 ^[62]
$\text{B}^{10}(\text{d}, \text{p})\text{B}^{11}$	9.235 $\pm$ 0.011	9.228 $\pm$ 0.005	9.228 $\pm$ 0.004	Strait 51 ^[141]
	9.227 $\pm$ 0.006			Elliott 54 ^[70]
$\text{B}^{10}(\text{d}, \alpha)\text{Be}^8$	17.829 $\pm$ 0.010		17.813 $\pm$ 0.006	Elliott 54 ^[70]
$\text{B}^{11}(\text{p}, \text{n})\text{C}^{11}$	-2.762 $\pm$ 0.003		-2.763 $\pm$ 0.003	Richards 50 ^[128]
$\text{B}^{11}(\text{p}, \alpha)\text{Be}^8$	8.567 $\pm$ 0.011	8.586 $\pm$ 0.005	8.585 $\pm$ 0.004	Strait 51 ^[141]
	8.574 $\pm$ 0.014			Li 51a ^[2]
	8.589 $\pm$ 0.005			Collins 53 ^[61]
$\text{B}^{11}(\text{d}, \text{p})\text{B}^{12}$	1.136 $\pm$ 0.005	1.137 $\pm$ 0.004	—	Strait 51 ^[141]
	1.140 $\pm$ 0.008			Elkind 53 ^[68]
$\text{B}^{11}(\text{d}, \alpha)\text{Be}^9$	8.018 $\pm$ 0.007	8.025 $\pm$ 0.005	8.026 $\pm$ 0.004	Van Patter 51 ^[148]

(續表 1)

$B^{11}(d, \alpha)Be^8$	8.029 ± 0.005			Elliott 54 ^[70]
$C^{11}(\beta^+)B^{11}$	1.990 ± 0.008		1.981 ± 0.003	Wong 54 ^[158]
$C^{12}(n, \gamma)C^{12}$	4.949 ± 0.006		4.946 ± 0.003	Kinsey 53 ^[108]
$C^{12}(d, n)N^{12}$	-0.281 ± 0.003		-0.282 ± 0.002	Bonner 49 ^[48]
$C^{12}(d, p)C^{13}$	2.716 ± 0.005	2.720 ± 0.002	2.721 ± 0.002	Strait 51 ^[141]
	2.722 ± 0.004			Famularo 53 ^[74]
	2.720 ± 0.003			Elliott 54 ^[70]
$C^{13}(p, n)N^{13}$	-3.003 ± 0.003		-3.003 ± 0.002	Richards 50 ^[126]
$C^{13}(d, p)C^{14}$	5.948 ± 0.008	5.943 ± 0.004	5.947 ± 0.004	Strait 51 ^[141]
	5.940 ± 0.004			Li 51 ^[109]
	5.953 ± 0.010			Ahnlund 54c ^[87]
$C^{13}(d, t)C^{12}$	1.310 ± 0.006	1.310 ± 0.003	1.311 ± 0.003	Strait 51 ^[141]
	1.310 ± 0.003			Li 51 ^[109]
$C^{13}(d, \alpha)B^{11}$	5.160 ± 0.010	5.165 ± 0.004	5.165 ± 0.004	St 51 ^[141]
	5.164 ± 0.006			Li 51 ^[109]
	5.166 ± 0.005			Phillips 53 ^[128]
$C^{14}(\beta^-)N^{14}$	0.1563 ± 0.001	0.155 ± 0.001	0.155 ± 0.001	Cook 48 ^[80]
	0.155 ± 0.002			Berggren 48 ^[44]
	0.155 ± 0.001			Feldman 49 ^[78]
	0.155 ± 0.001			Warshaw 50a ^[162]
$C^{14}(p, n)N^{14}$	-0.620 ± 0.009	-0.628 ± 0.004	-0.627 ± 0.001	Shoupp 49 ^[122]
		(和 $N^{14}(n, p)C^{14}$ 平均)		
$N^{13}(\beta^+)C^{13}$	2.220 ± 0.006	2.222 ± 0.004	2.221 ± 0.002	Lyman 39 ^[110]
	2.224 ± 0.005			Hornyak 50 ^[82]
$N^{14}(n, \gamma)N^{14}$	10.832 ± 0.008		10.838 ± 0.005	Kinsey 53 ^[108]
$N^{14}(n, p)C^{14}$	0.63 ± 0.01	(見 $C^{14}(p, n)N^{14}$)	0.627 ± 0.001	Stebler 48 ^[140]
	0.630 ± 0.006			Franzen 50 ^[78]
$N^{14}(d, p)N^{15}$	8.615 ± 0.009	8.614 ± 0.007	8.613 ± 0.005	Strait 51 ^[141]
	8.613 ± 0.011			Mileikowsky 52 ^[114]
$N^{15}(p, n)O^{15}$	-3.539 ± 0.007		—	Kington 55 ^[109]
$N^{15}(p, \alpha)C^{12}$	4.960 ± 0.007	4.961 ± 0.003	4.961 ± 0.003	Strait 51 ^[141]
	4.961 ± 0.006			Li 51a ^[2]
	4.962 ± 0.004			Collins 53 ^[61]
$N^{15}(d, \alpha)C^{12}$	7.681 ± 0.006		7.682 ± 0.003	Strait 51 ^[141]
$O^{16}(d, n)F^{17}$	-1.631 ± 0.003		-1.630 ± 0.003	Bonner 51 ^[49]
$O^{16}(d, p)O^{17}$	1.917 ± 0.007	1.917 ± 0.005	1.920 ± 0.004	Strait 51 ^[141]
	1.918 ± 0.008			Klema 51 ^[108]
$O^{16}(d, \alpha)N^{14}$	3.112 ± 0.006	3.115 ± 0.002	3.115 ± 0.002	Strait 51 ^[141]
	3.119 ± 0.005			Li 51a ^[2]
	3.113 ± 0.0035			Craig 52 ^[82]
	3.119 ± 0.005			Famularo 53 ^[74]
$O^{17}(d, p)O^{18}$	5.821 ± 0.010		5.832 ± 0.008	Ahnlund 54c ^[87]
$O^{17}(d, \alpha)N^{15}$	9.807 ± 0.012		9.808 ± 0.007	Pauli 54 ^[124]
$O^{18}(p, n)F^{18}$	-2.453 ± 0.004		-2.453 ± 0.004	Richards 50 ^[126]
$O^{18}(p, \alpha)N^{16}$	3.967 ± 0.009		3.976 ± 0.008	Ahnlund 54c ^[87]
$O^{18}(d, p)O^{20}$	1.730 ± 0.008	1.732 ± 0.005	—	Ahnlund 54b ^[86]

(續表 1)

$O^{18}(d, p)O^{18}$	1.732 ± 0.008			Thirion 54 ^[144]
	1.735 ± 0.008			Holmgren 55 ^[21]
$F^{17}(\beta^+)O^{17}$	2.770 ± 0.006		2.768 ± 0.004	Wong 54 ^[158]
$F^{18}(\beta^+)O^{18}$	1.657 ± 0.015	1.667 ± 0.008	1.671 ± 0.004	Blaser 49 ^[47]
	1.671 ± 0.009			Ruby 51 ^[129]
$F^{19}(n, \gamma)F^{20}$	6.599 ± 0.011		6.600 ± 0.007	Campion 56 ^[55]
$F^{19}(p, n)Ne^{20}$	-4.022 ± 0.005	-4.024 ± 0.004	-4.023 ± 0.004	Marion 55 ^[112]
	-4.027 ± 0.007			Kington 55 ^[20]
$F^{19}(p, \alpha)O^{16}$	8.113 ± 0.011	8.116 ± 0.007	8.124 ± 0.007	Chao 50, Millar 51 ^[59, 116]
	8.118 ± 0.009			Strait 51 ^[141]
$F^{19}(d, p)F^{20}$	4.373 ± 0.007		4.375 ± 0.006	Strait 51 ^[141]
$F^{19}(d, \alpha)O^{17}$	10.050 ± 0.010		10.044 ± 0.007	Strait 51 ^[141]
$F^{20}(\beta^-)Ne^{20}$	7.038 ± 0.018	7.044 ± 0.009	7.046 ± 0.008	Alburger 52 ^[39]
	7.047 ± 0.014			Wong 54 ^[158]
$Ne^{19}(\beta^+)F^{19}$	3.20 ± 0.03		3.241 ± 0.005	Schrank 52 ^[121]
$Ne^{20}(d, p)Ne^{21}$	4.529 ± 0.007	4.528 ± 0.006	4.530 ± 0.005	Van Patter 52 ^[149]
	4.526 ± 0.009			Ahnlund 54 ^[24]
$Ne^{20}(d, \alpha)F^{18}$	2.78 ± 0.02	2.789 ± 0.008	2.784 ± 0.008	Middleton 51 ^[112]
	2.791 ± 0.009			Mileikowsky 54 ^[115]
$Ne^{21}(d, p)Ne^{22}$	8.137 ± 0.011		—	Mileikowsky 52 ^[114]
$Ne^{21}(d, \alpha)F^{19}$	6.432 ± 0.010		6.446 ± 0.008	Mileikowsky 52 ^[114]
$Ne^{22}(d, p)Ne^{23}$	2.964 ± 0.007	2.966 ± 0.005	—	Van Patter 52 ^[149]
	2.968 ± 0.008			Ahnlund 54a ^[26]
$Na^{21}(\beta^+)Ne^{21}$	3.52 ± 0.03		—	Schrank 52 ^[121]
$Na^{22}(\beta^+)Ne^{22}$	2.840 ± 0.006		—	Alburger 49, Macklin 50, ^[20, 111]
				Wright 53 ^[159]
$Na^{23}(p, n)Mg^{23}$	-4.841 ± 0.009		—	Kington 55 ^[20]
$Na^{23}(p, \alpha)Ne^{20}$	2.372 ± 0.008	2.378 ± 0.003	2.376 ± 0.003	Van Patter 52 ^[149]
	2.379 ± 0.003			Donahue 53 ^[66]
$Na^{23}(d, p)Na^{24}$	4.731 ± 0.007	4.728 ± 0.005	4.733 ± 0.005	Sperduto 52 ^[122]
	4.723 ± 0.008			Mileikowsky 52 ^[114]
$Na^{23}(d, \alpha)Ne^{21}$	6.902 ± 0.010		6.906 ± 0.006	Strait 51 ^[141]
$Na^{24}(\beta^-)Mg^{24}$	5.511 ± 0.015 ⑥		5.526 ± 0.005	Siegbahn 46, Hedgran 52, ^[125, 89]
				Kinsey 53, Wolfson 50, ^[102, 157]
$Mg^{23}(n, \gamma)Mg^{24}$	7.334 ± 0.007		7.330 ± 0.005	Kinsey 53a ^[104]
$Mg^{24}(d, p)Mg^{25}$	5.097 ± 0.007		5.104 ± 0.005	Van Patter 52 ^[149]
$Mg^{25}(n, \gamma)Mg^{26}$	11.086 ± 0.025		11.108 ± 0.011	Campion 56 ^[55]
$Mg^{25}(p, n)Al^{26}$	-5.084 ± 0.024		—	Kington 55 ^[20]
$Mg^{25}(d, p)Mg^{26}$	8.880 ± 0.012		8.882 ± 0.009	Van Patter 52 ^[149]
$Mg^{25}(d, \alpha)Na^{23}$	7.019 ± 0.013		7.034 ± 0.008	Van Patter 52 ^[149]
$Mg^{26}(n, \gamma)Mg^{27}$	6.440 ± 0.008		6.438 ± 0.005	Kinsey 53a ^[104]
$Mg^{26}(p, n)Al^{26}$	-5.006 ± 0.009		—	Kington 55 ^[20]
$Mg^{26}(d, p)Mg^{27}$	4.207 ± 0.006		4.212 ± 0.005	Van Patter 52 ^[149]

(續表 1)

$Mg^{27}(\beta^-)Al^{27}$	2.591 ± 0.007		2.602 ± 0.007	Daniel 54 ^[64]
$Mg^{28}(\beta^-)Al^{28}$	1.809 ± 0.02		—	Olsen 54, Sheline 53 ^[122, 124]
$Al^{27}(n, \gamma)Al^{28}$	7.724 ± 0.006		7.724 ± 0.005	Kinsey 53 ^[102]
$Al^{27}(p, n)Si^{27}$	-5.584 ± 0.009		—	Kington 55 ^[99]
$Al^{27}(p, \alpha)Mg^{24}$	1.595 ± 0.007	1.594 ± 0.002	1.596 ± 0.002	Van Patter 52 ^[140]
	1.594 ± 0.002			Donahue 53 ^[60]
$Al^{27}(d, p)Al^{28}$	5.494 ± 0.010		5.498 ± 0.005	Enge 51 ^[72]
$Al^{27}(d, \alpha)Mg^{25}$	6.694 ± 0.010		6.700 ± 0.006	Enge 51 ^[72]
$Al^{28}(\beta^-)Si^{28}$	4.651 ± 0.012		4.656 ± 0.009	Motz 52a, Sheline 53 ^[119, 124]
				Olsen 54 ^[122]
$Si^{28}(n, \gamma)Si^{29}$	8.468 ± 0.008	8.471 ± 0.007	8.472 ± 0.006	Kinsey 53 ^[102]
	8.482 ± 0.015			Адьясевич 56 ^[21]
$Si^{28}(d, p)Si^{29}$	6.246 ± 0.008		6.247 ± 0.006	Strait 51 ^[141]
$Si^{29}(n, \gamma)Si^{30}$	10.601 ± 0.011		10.608 ± 0.008	Kinsey 53 ^[102]
$Si^{29}(d, p)Si^{30}$	8.388 ± 0.013		8.382 ± 0.008	Van Patter 52 ^[140]
$Si^{29}(d, \alpha)Al^{27}$	5.994 ± 0.011		5.996 ± 0.009	Van Patter 52 ^[140]
$Si^{30}(d, p)Si^{31}$	4.364 ± 0.007		4.375 ± 0.007	Van Patter 52 ^[140]
$Si^{30}(d, \alpha)Al^{28}$	3.120 ± 0.010		3.112 ± 0.009	Strait 51 ^[141]
$Si^{31}(\beta^-)P^{31}$	1.486 ± 0.012	1.476 ± 0.007	1.480 ± 0.007	Wapstra 52 ^[153]
	1.471 ± 0.008			Motz 52 ^[118]
$P^{30}(\beta^+)Si^{29}$	4.967 ± 0.005		—	Roderick 53, 55 ^[120]
$P^{31}(n, \gamma)P^{32}$	7.94 ± 0.03		7.931 ± 0.008	Kinsey 52 ^[102]
$P^{31}(d, p)P^{32}$	5.704 ± 0.008		5.705 ± 0.008	Van Patter 52 ^[140]
$P^{31}(p, \alpha)Si^{28}$	1.909 ± 0.010	1.913 ± 0.008	1.913 ± 0.007	Van Patter 52 ^[140]
	1.92 ± 0.015			Van Patter 56 ^[160]
$P^{31}(d, \alpha)Si^{29}$	8.158 ± 0.011		8.160 ± 0.008	Van Patter 52 ^[140]
$P^{32}(\beta^-)S^{32}$	1.712 ± 0.008	1.709 ± 0.003	—	Siegbahn 46 ^[125]
	1.718 ± 0.01			Agnew 50 ^[22]
	1.708 ± 0.008			Warsaw 50 ^[151]
	1.704 ± 0.008			Jensen 52 ^[95]
	1.697 ± 0.010			Motz 52 ^[118]
	1.712 ± 0.008			АНТОНЬЕВА 54 ^[22]
$P^{32}(\beta^-)S^{32}$	0.246 ± 0.005	0.249 ± 0.002	—	Westermarck 52 ^[154]
	0.249 ± 0.002			Nichols 54 ^[120]
	0.251 ± 0.004			Elbek 54 ^[87]
$S^{32}(n, \gamma)S^{33}$	8.64 ± 0.02		8.646 ± 0.010	Kinsey 52 ^[102]
$S^{32}(d, p)S^{33}$	6.422 ± 0.011		6.420 ± 0.010	Strait 51 ^[141]
$S^{35}(\beta^-)Cl^{35}$	0.169 ± 0.003	0.1671 ± 0.0005	—	Berggren 48 ^[44]
	0.1683 ± 0.004			Gross 50 ^[82]
	0.1670 ± 0.0005			Langer 52 ^[107]
$Cl^{35}(n, \gamma)Cl^{36}$	8.56 ± 0.03	8.565 ± 0.02	8.578 ± 0.008	Kinsey 52 ^[102]
	8.57 ± 0.03			Hamermesh 52 ^[93]
$Cl^{35}(p, \alpha)S^{32}$	1.865 ± 0.015	1.863 ± 0.007	1.861 ± 0.006	Almquist 55 ^[41]
	1.863 ± 0.008			Endt 56 ^[72]
$Cl^{35}(d, p)Cl^{36}$	6.354 ± 0.008		6.352 ± 0.008	Paris 55 ^[123]

(續表 1)

$\text{Cl}^{35}(\text{d}, \alpha)\text{S}^{32}$	8.277 ± 0.010		8.281 ± 0.008	Paris 55 ^[128]
$\text{Cl}^{35}(\beta^-)\text{A}^{36}$	0.714 ± 0.005		—	Feldman 52 ^[77]
$\text{Cl}^{37}(\text{n}, \gamma)\text{Cl}^{38}$	6.11 ± 0.03		6.106 ± 0.008	Kinsey 50 ^[100]
$\text{Cl}^{37}(\text{p}, \text{n})\text{A}^{37}$	-1.598 ± 0.004	-1.598 ± 0.002	-1.598 ± 0.002	Richards 50 ^[126]
	-1.598 ± 0.002^b			Schoenfeld 52 ^[126]
$\text{Cl}^{37}(\text{p}, \alpha)\text{S}^{34}$	3.015 ± 0.015	3.024 ± 0.007	—	Almqvist 55 ^[41]
	3.026 ± 0.008			Endt 56 ^[72]
$\text{Cl}^{37}(\text{d}, \text{p})\text{Cl}^{38}$	3.881 ± 0.008		3.881 ± 0.008	Paris 55 ^[128]
$\text{Cl}^{37}(\text{d}, \alpha)\text{S}^{35}$	7.783 ± 0.012		—	Paris 55 ^[128]
$\text{A}^{37}(\text{eK})\text{Cl}^{37}$	0.818 ± 0.015	0.818 ± 0.012	0.816 ± 0.002	Anderson 53 ^[42]
	0.818 ± 0.020			Emmerich 54 ^[71]
$\text{A}^{39}(\beta^-)\text{K}^{39}$	0.565 ± 0.005		—	Brosi 50 ^[51]
$\text{K}^{39}(\text{n}, \gamma)\text{K}^{40}$	7.789 ± 0.008		7.794 ± 0.007	Bartholomew 53 ^[48]
				Buechner 53 ^[52]
$\text{K}^{39}(\text{p}, \alpha)\text{A}^{36}$	1.267 ± 0.020		—	Almqvist 55 ^[41]
$\text{K}^{39}(\text{d}, \text{p})\text{K}^{40}$	5.576 ± 0.010		5.568 ± 0.007	Buechner 53 ^[52]
$\text{K}^{40}(\beta^-)\text{Ca}^{40}$	1.325 ± 0.015	1.323 ± 0.012	—	Feldman 52 ^[77]
	1.320 ± 0.020			Kono 55 ^[108]
$\text{K}^{41}(\text{p}, \text{n})\text{Ca}^{41}$	-1.22 ± 0.02		—	Richards 50 ^[126]
$\text{K}^{41}(\text{p}, \alpha)\text{A}^{38}$	4.002 ± 0.015		—	Almqvist 55 ^[41]
$\text{Ca}^{40}(\text{d}, \text{p})\text{Ca}^{41}$	6.138 ± 0.010		—	Braams 54 ^[60]

註：② 包括 H^1 的反衝能。③ 誤差由本文作者更改，原來為 ± 0.005 。

可以用最小二乘法等統計平差的辦法來從這些多餘觀測中確定未知數的最可靠的答數。由於多餘觀測間互相的制約，這些得數的最後誤差一般比用剛剛足夠的觀測得出來的要小。

表 1 只包括作者所見的實驗 Q 值中精密度較高的一部分。有少數顯然有誤或由下述的反應循環檢驗顯示可能有誤的測定值，已經除外。詳盡的實驗 Q 值彙集見 Джелепов 和 Зырянова^[8]，King^[15] 和 Van Patter 和 Whaling^[16] 的論文。表 1 所列的 Q 值大半是用磁譜儀或靜電分析譜儀來測定加速和反應產生的帶電重粒子，正負電子或 γ 射線產生的電子的能量得來的。此外還有熱中子被俘獲時所放出來的能量測定，核反應產生中子的閾能測定等。實驗誤差不大於 30 keV，絕大多數在 15 keV 以下。實驗者報告的這些誤差一律當作標準誤差看待¹⁾。實驗 Q 值最小的是 $\text{T}^3(\beta^-)\text{He}^3$

1) 在文獻 [2]，[8] 中假定它們都是可幾誤差，在文獻 [11]，[15]，[16] 中假定它們是標準誤差。因為實驗作者對於誤差的標準和取裁不一律，而且常不加說明，我們只能採取一種一致的假定，而無法在實際上一一辨別。基於核反應數據互相一致的程度，可以假定這些都是標準誤差。如果把它們當作可幾誤差，那麼，本文的結果中的誤差也應該當作可幾誤差。

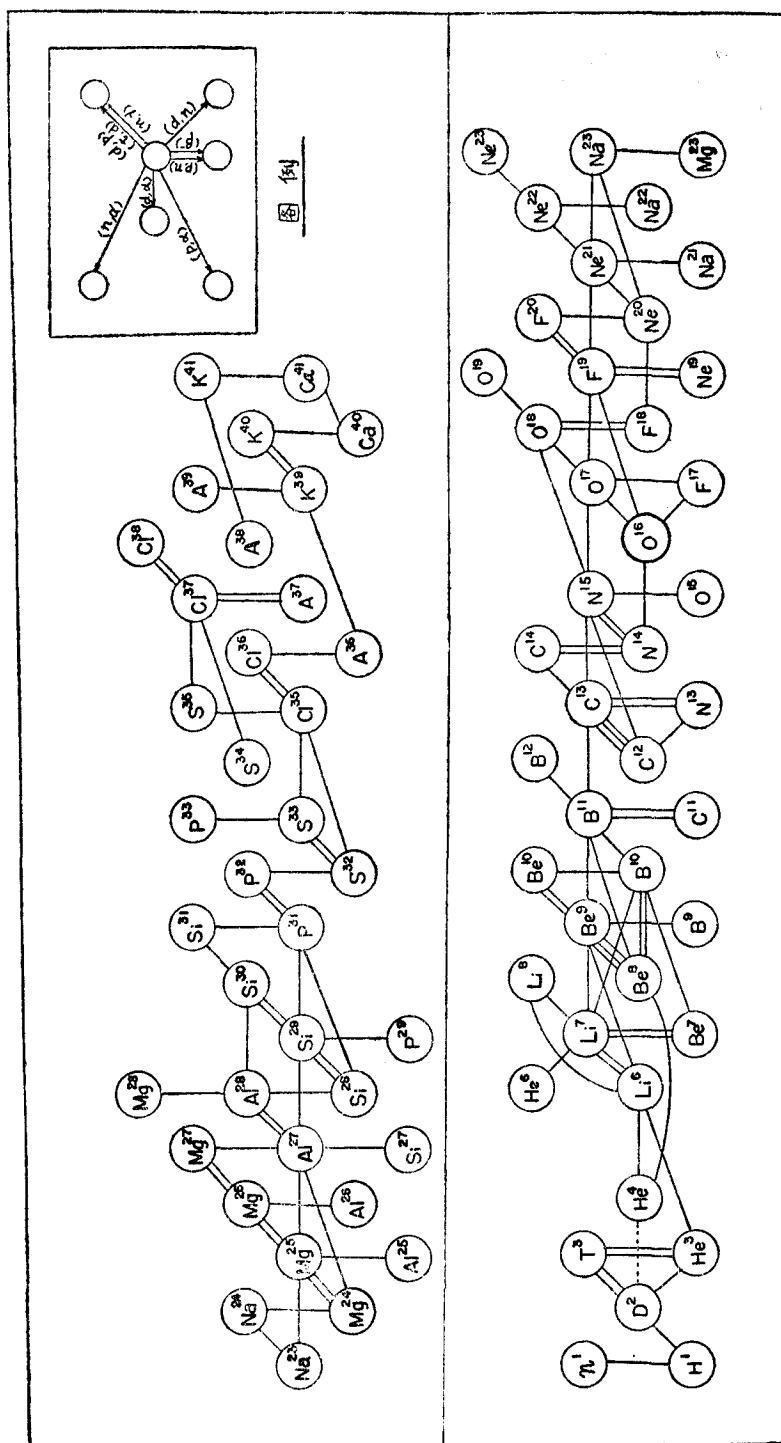


圖 1.

的 18kev. 最大的是 $\text{Li}^6(d, \alpha)\text{He}^4$ 的 22Mev.

許多 Q 值都經過好幾個實驗室測定. 爲了避免系統誤差的影響, 同一個實驗室對同一 Q 值所作的測定, 本文一般只採用精密度最高的, 或最近做的一個測定值.

表 1 所列 Q 值的各實驗測定, 計權平均, 平均值列於表 1 第 3 欄. 平均值的誤差採用外誤差和內誤差二者中較大的一個. 由於實驗結果的符合, 採用外誤差的例子只有二個, 而且這二個每個都和內誤差相差無幾.

在深入分析各實驗 Q 值時出現了能量標準的問題. 在不同年代, 不同的實驗者所用的能量標準互有差異. 尤其是最近 Collins, McKenzie 和 Ramm^[17] 測定 $\text{Th } C'$, $\text{Th } Ca_1$, $\text{Th } Ca_0$ 和 $\text{Po } \alpha$ 粒子的能量, 所得結果和一向用來作標準的 Briggs^[18] 的 $\text{Ra } C'\alpha$ 粒子能量有系統的差異, 0.1%. Wapstra^[11] 對能量標準有細緻的討論, 並且折中地採用了 Collins 等的測定值和 Briggs^[18] 及 Rutherford^[19] 等的舊值, 拿來作根據, 改正各實驗 Q 值. 但是這樣的折中辦法, 在沒有更確定的實驗根據以前, 是一種任意的手續. 而且這樣一來, 就會過分偏重 Collins 等對自然 α 粒子能量的測定, 而這些測定的實驗誤差還是比較大的. 作者起初也打算把自然 α 粒子的能量以及和它們相聯系的能量標準加以改正, 但是無法客觀地選取最可靠的標準值. 而且即使選取了一種, 再將實驗 Q 值加以改正, 所得的結果和不加能量標準的改正而逕直將實驗 Q 值用下面討論到的統計平差處理後所得的結果, 沒有實質上的差別. 因爲平差時已自動地把一些實驗 Q 值間的差異調節平均. 這樣的調節在現階段的實驗精密度內, 似乎是更爲合式的, 不至於過分偏重一些未確定的結果. 因此, 在本文計算中, 能量標準一概沒有加以改正.

如圖 1 所表示的, 因爲核反應的數目多於未知質量的原子核的數目, 所以構成了許多反應循環. 表 2—6 列舉了所有互相獨立的反應循環. 在這裏, 互相獨立的意思是說沒有一個循環是可以由另外幾個循環合併得出來的. 獨立循環可以有好多種選法. 這裏所選的是每個循環包含的核反應數目最少而結果最互相一致的一系列. 這些循環可以歸成 5 類:

- (1) 總和應等於零的循環, 18 個;
- (2) 總和等於 $n - \text{H}^1$ 的循環, 10 個;
- (3) 總和等於 $n + \text{H}^1 - \text{D}^2$ 的循環, 17 個;
- (4) 總和等於 $2\text{D}^2 - \text{H}^1 - \text{T}^3$ 的循環, 3 個;
- (5) 總和等於 $2\text{D}^2 - \text{He}^4$ 的循環, 10 個;

一共 58 個獨立的循環. 這些循環有好幾種用處. 首先, 它們可以用來查驗各個實驗 Q

表2. 總和等於零的反應循環

反 應 循 環	和 (Mev)
$D^2(d, p) T^3 - D^2(d, n) He^3 + T^3(p, n) He^3$	0.0018 ± 0.010
$Li^6(d, \alpha) He^4 - Li^6(d, p) Li^7 - Li^7(p, \alpha) He^4$	0.014 ± 0.012
$Li^6(t, d) Li^7 + Li^7(d, p) Li^8 - Li^6(t, p) Li^8$	0.004 ± 0.013
$Be^9(d, \alpha) Li^7 - Li^6(d, p) Li^7 - Be^9(p, \alpha) Li^8$	0.000 ± 0.005
$B^{10}(p, \alpha) Be^7 - Li^7(p, n) Be^7 - B^{10}(n, \alpha) Li^7$	0.0063 ± 0.008
$B^{11}(p, \alpha) Be^8 - Be^9(p, d) Be^8 - B^{11}(d, \alpha) Be^9$	0.002 ± 0.007
$B^{10}(d, \alpha) Be^8 - B^{11}(p, \alpha) Be^8 - B^{10}(d, p) B^{11}$	0.015 ± 0.012
$C^{12}(d, p) C^{13} - N^{12}(d, \alpha) C^{13} + N^{12}(p, \alpha) C^{12}$	0.000 ± 0.007
$C^{12}(d, n) N^{12} - C^{12}(d, p) C^{13} - C^{12}(p, n) N^{12}$	0.002 ± 0.005
$N^{14}(d, p) N^{15} - O^{17}(d, \alpha) N^{15} - O^{16}(d, p) O^{17} + O^{16}(d, \alpha) N^{14}$	0.005 ± 0.015
$O^{17}(d, \alpha) N^{15} - O^{17}(d, p) O^{18} - O^{16}(p, \alpha) N^{15}$	0.019 ± 0.018
$F^{19}(d, \alpha) O^{17} - O^{18}(d, p) O^{17} - F^{19}(p, \alpha) O^{16}$	0.017 ± 0.013
$Ne^{20}(d, p) Ne^{21} - Na^{22}(d, \alpha) Ne^{21} + Na^{22}(p, \alpha) Ne^{20}$	0.004 ± 0.012
$Al^{27}(d, \alpha) Mg^{25} - Mg^{24}(d, p) Mg^{25} - Al^{27}(p, \alpha) Mg^{24}$	0.003 ± 0.012
$Si^{28}(d, p) Si^{29} - P^{31}(d, \alpha) Si^{29} + P^{31}(p, \alpha) Si^{28}$	0.001 ± 0.016
$Si^{29}(n, \gamma) Si^{30} + Si^{30}(d, \alpha) Al^{27} - Al^{27}(n, \gamma) Al^{28} - Si^{29}(d, \alpha) Al^{27}$	0.003 ± 0.019
$S^{32}(d, p) S^{32} - Cl^{35}(d, \alpha) S^{32} + Cl^{35}(p, \alpha) S^{31}$	0.008 ± 0.016
$F^{18}(d, p) F^{20} + F^{20}(\beta^-) Ne^{20} + Ne^{20}(d, \alpha) F^{18} - O^{18}(p, n) F^{18} - O^{17}(d, p) O^{18} - F^{18}(d, \alpha) O^{17} - (n-H^1)^*$	0.0056 ± 0.020

* $n-H^1=0.7824 \pm 0.001$ Mev.表3. 總和等於 $n-H^1$ 的反應循環

反 應 循 環	和 (Mev)
$n(\beta^-) H^1$	0.783 ± 0.013
$T^3(\beta^-) He^3 - T^3(p, n) He^3$	0.7824 ± 0.001
$-Be^7(eK) Li^7 - Li^7(p, n) Be^7$	0.7853 ± 0.008
$-C^{11}(\beta^+) B^{11} - B^{11}(p, n) C^{11}$	0.772 ± 0.009
$-N^{12}(\beta^+) C^{12} - C^{12}(p, n) N^{12}$	0.781 ± 0.005
$C^{14}(\beta^-) N^{14} - C^{14}(p, n) N^{14}$	0.783 ± 0.004
$O^{16}(d, p) O^{17} - O^{16}(d, n) F^{17} - F^{17}(\beta^+) O^{17}$	0.778 ± 0.008
$-F^{18}(\beta^+) O^{18} - O^{18}(p, n) F^{18}$	0.786 ± 0.009
$-Ne^{19}(\beta^+) F^{19} - F^{19}(p, n) Ne^{19}$	0.824 ± 0.03
$-A^{27}(eK) Cl^{27} - Cl^{27}(p, n) A^{27}$	0.780 ± 0.012
$Be^{10}(\beta^-) B^{10} + B^{10}(n, \alpha) Li^7 - Be^9(d, \alpha) Li^7 + Be^9(d, p) Be^{10}$	0.779 ± 0.011
平 均 值	0.7823 ± 0.001

值互相一致的程度。其次，它們給出這些基礎質量差的數值， $n-H^1$ ， $n+H^1-D^2$ ， $2D^2-H^1-T^3$ 和 $2D^2-He^4$ 。再其次，像本文所作的，可以利用這些循環來進行統計平

表 4. 總和等於 $n+H^1-D^2$ 的反應循環

反 應 循 環	和 (Mev)
$H^1(n, \gamma)D^2$	2.227 ± 0.002
$D^2(n, \gamma)T^3 - D^2(d, p)T^3$	2.220 ± 0.009
$Be^9(p, d)Be^8 - Be^9(\gamma, n)Be^8$	2.224 ± 0.002
$Be^9(n, \gamma)Be^{10} - Be^9(d, p)Be^{10}$	2.228 ± 0.008
$C^{12}(n, \gamma)C^{13} - C^{12}(d, p)C^{13}$	2.229 ± 0.006
$N^{14}(n, \gamma)N^{15} - N^{14}(d, p)N^{15}$	2.218 ± 0.011
$F^{19}(n, \gamma)F^{20} - F^{19}(d, p)F^{20}$	2.226 ± 0.013
$Mg^{24}(n, \gamma)Mg^{25} - Mg^{24}(d, p)Mg^{25}$	2.237 ± 0.010
$Mg^{25}(n, \gamma)Mg^{26} - Mg^{25}(d, p)Mg^{26}$	2.206 ± 0.028
$Mg^{26}(n, \gamma)Mg^{27} - Mg^{26}(d, p)Mg^{27}$	2.233 ± 0.010
$Al^{27}(n, \gamma)Al^{28} - Al^{27}(d, p)Al^{28}$	2.230 ± 0.012
$Si^{28}(n, \gamma)Si^{29} - Si^{28}(d, p)Si^{29}$	2.225 ± 0.011
$Si^{29}(n, \gamma)Si^{30} - Si^{29}(d, p)Si^{30}$	2.213 ± 0.017
$P^{31}(n, \gamma)P^{32} - P^{31}(d, p)P^{32}$	2.236 ± 0.03
$S^{32}(n, \gamma)S^{33} - S^{32}(d, p)S^{33}$	2.218 ± 0.023
$Cl^{35}(n, \gamma)Cl^{36} - Cl^{35}(d, p)Cl^{36}$	2.211 ± 0.021
$Cl^{37}(n, \gamma)Cl^{38} - Cl^{37}(d, p)Cl^{38}$	2.229 ± 0.03
$K^{39}(n, \gamma)K^{40} - K^{39}(d, p)K^{40}$	2.213 ± 0.013
平 均 值	2.2258 ± 0.0014

表 5. 總和等於 $2D^2-H^1-T^3$ 的反應循環

反 應 循 環	和 (Mev)
$D^2(d, p)T^3$	4.031 ± 0.005
$Li^6(d, p)Li^7 - Li^6(t, d)Li^7$	4.041 ± 0.008
$C^{12}(d, p)C^{13} + C^{12}(d, t)C^{12}$	4.030 ± 0.004
$Be^9(d, t)Be^8 - Be^9(p, d)Be^8$	4.038 ± 0.013
平 均 值	4.032 ± 0.003

差,求得精密度較高的 Q 值和原子核質量。

表 2—6 的結果表示核反應實驗 Q 值間一致的程度。在 58 個循環中有 11 個循環的不符值或和平均數的差值,大於相對應的誤差。不符的數目都不超過相對應的誤差的 1.5 倍。依照標準誤差的定義,三個裏面可有一個,它的不符值超過相對應的誤差。由此可見實驗 Q 值的內部一致性,總起來說是良好的。當然,實際上,這種循環檢查有時就是用來發現某一實驗值的不符的辦法。但是用這樣的比較查出不符後,我們還是應該進一步分析原來的實驗。除非有充足的理由,不要隨便把一個實驗值除外,而造成一種人爲的一致。

表 6. 總和等於 $2D^2 - He^4$ 的反應循環

反 應 循 環	和 (Mev)
$D^2(d, n) He^3 - Li^6(p, \alpha) He^3 + Li^6(d, \alpha) He^4 + (n + H^1 - D^2)^*$	23.853 ± 0.014
$Li^7(p, \alpha) He^4 - Be^8(\alpha, \alpha) Be^8(p, d) Be^8 + Be^8(d, \alpha) Li^7$	23.845 ± 0.007
$B^{10}(d, \alpha) Be^8 - B^{10}(p, He^3) Be^8 + D^2(d, n) He^3 + (n + H^1 - D^2)^*$	23.855 ± 0.014
$Be^9(n, \gamma) Be^{10} + Be^{10}(\beta^-) B^{10} + B^{10}(d, p) B^{11} + B^{11}(d, \alpha) Be^9 - (n - H^1)^*$	23.844 ± 0.010
$C^{13}(d, p) C^{14} + C^{14}(p, n) N^{14} + N^{14}(d, p) N^{15} + N^{15}(d, \alpha) C^{12} + (n + H^1 - D^2)^*$	23.835 ± 0.011
$F^{19}(d, p) F^{20} + F^{20}(\beta^-) Ne^{20} + Ne^{20}(d, p) Ne^{21} + Ne^{21}(d, \alpha) F^{19} + (2H^1 - D^2)^*$	23.820 ± 0.016
$Na^{23}(d, p) Na^{24} + Na^{24}(\beta^-) Mg^{24} + Mg^{24}(n, \gamma) Mg^{25} + Mg^{25}(d, \alpha) Na^{23} - (n - H^1)^*$	23.810 ± 0.022
$Mg^{25}(d, p) Mg^{26} + Mg^{26}(n, \gamma) Mg^{27} + Mg^{27}(\beta^-) Al^{27} + Al^{27}(d, \alpha) Mg^{25} - (n - H^1)^*$	23.823 ± 0.019
$Al^{27}(n, \gamma) Al^{28} + Al^{28}(\beta^-) Si^{28} + Si^{28}(d, p) Si^{29} + Si^{29}(d, \alpha) Al^{27} - (n - H^1)^*$	23.833 ± 0.019
$Si^{29}(d, p) Si^{30} + Si^{30}(d, p) Si^{31} + Si^{31}(\beta^-) P^{31} + P^{31}(d, \alpha) Si^{29} + (2H^1 - D^2)^*$	23.829 ± 0.020
平 均 值	$2D^2 - He^4 = 23.840 \pm 0.004$

* $n - H^1 = 0.7824 \pm 0.001$ Mev, $n + H^1 - D^2 = 2.2255 \pm 0.0015$ Mev,

$2H^1 - D^2 = 1.4431 \pm 0.0018$ Mev.

表 3 中,除 10 個循環外,還包括 $n(\beta^-) H^1$ 的直接測定值. 質量差 $n - H^1$ 的平均值主要由表中的第 2 項決定. 把第 2 項除外,所得的平均數是 0.7818 ± 0.002 Mev. 總的平均是 0.7823 ± 0.001 Mev. 由於第 2 項的絕對權重,而且和總平均差別的微小,我們採用它,得 $n - H^1 = 0.7824 \pm 0.001$ Mev.

表 4 中,除了 17 個循環外,還包含 $H^1(n, \gamma) D^2$ 的測定值. 質量差 $n + H^1 - D^2$ 的平均值主要由表中第 1 項和第 3 項決定. 這兩項的平均是 2.2255 ± 0.0015 Mev. 把這兩項除外所得的平均數是 2.2262 ± 0.003 Mev. 總的平均是 2.2258 ± 0.0014 Mev. 我們採用 $n + H^1 - D^2 = 2.2255 \pm 0.0015$ Mev.

表 5 的 4 個項目,總的平均給出 $2D^2 - H^1 - T^3 = 4.032 \pm 0.003$ Mev. 我們採用這個值,認為它是這質量差的實驗上最可靠的值.

表 6 的 10 個循環顯示一種系統偏差的傾向. 包含較重各核的循環所給的質量差 $2D^2 - He^4$ 的值都比包含較輕各核的循環所給的來得小. 這一點 Wapstra 已經指出過. 表 6 各循環的結果的總平均是 $2D^2 - He^4 = 23.840 \pm 0.004$ Mev. 這質量差是本文計算中具有關鍵性的一個. 而且由原子核實驗數據中求這個質量差時,用上述反應

$w_1, \dots, w_n$ 是實驗 Q 值的統計權重. 再用 $Q^* \pm q^*$ 表示平差後的 Q 值和它的誤差. 依照最小二乘法的原理, 我們假定被觀察到的一組 Q 值是出現幾率最大的一組, 這就要求

$$\sum_{i=1}^n w_i \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n w_i (Q_i^* - Q_i)^2 = \text{最小}. \quad (3)$$

由此得到

$$\frac{\partial}{\partial M_1} (\sum w_i \Delta_i^2) = \frac{\partial}{\partial M_2} (\sum w_i \Delta_i^2) = \dots = \frac{\partial}{\partial M_k} (\sum w_i \Delta_i^2) = 0, \quad (4)$$

k 個“法方程”. 用矩陣的寫法,

$$\underline{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nk} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\underline{M} = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_k \end{pmatrix}, \quad \underline{Q} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix}, \quad \underline{\Delta} = \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$q^2 = \begin{pmatrix} q_1^2 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & q_2^2 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & q_n^2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\underline{w} = (q^2)^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{q_1^2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{1}{q_2^2} & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{q_n^2} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

觀察方程成爲

$$\underline{A} \underline{M} = \underline{Q} + \underline{\Delta}, \quad (9)$$

由式 (4) 可得法方程爲

$$\underline{A}^* \underline{w} \underline{A} \underline{M} = \underline{A}^* \underline{w} \underline{Q}. \quad (10)$$

這裏

$$A_{ij}^* = A_{ji}.$$

兩邊乘 $(A^* w A)^{-1}$, 得

$$M = (A^* w A)^{-1} A^* w Q, \quad (11)$$

給出質量的最可幾值和實驗 Q 值的關係.

寫出矩陣 M 的各成分, 得

$$M_i = \alpha_{i1} Q_1 + \alpha_{i2} Q_2 + \cdots \alpha_{in} Q_n, \quad i = 1, \cdots k. \quad (12)$$

M_i 的誤差是

$$m_i = \sqrt{\alpha_{i1}^2 q_1^2 + \alpha_{i2}^2 q_2^2 + \cdots \alpha_{in}^2 q_n^2}. \quad (13)$$

平差後的 Q 值, Q_i^* , 可以從這些最可幾的 M_i 值得到, 誤差 q_i^* 可以證明是一個矩陣的對角元素,

$$(q_i^*)^2 = (A(A^* w A)^{-1} A^*)_{ii}. \quad (14)$$

在全盤的平差中, 包括的參數數目很大, 而且每有一個新的實驗 Q 值出現, 就得重新計算, 手續較繁. 而且在這裏有幾個情況使全盤的最小二乘法的平差減少它的意義. 在一個嚴格的最小二乘法計算中, 需要假定: (1) 所有實驗 Q 值的誤差有同樣的意義, 這樣才能無偏差地計算各實驗 Q 值的統計權重. (2) 所有的實驗數據是“在觀測上互相獨立”的, 就是說, 在各個 Q 值的實驗測定過程中, 沒有任何度量是共同的. 但事實上能量標準和其他常數是共同的, 同一個儀器測定不同 Q 值時所用的幾何安排和物理安排, 例如, 角度、位置等, 常是共同的, 系統誤差也是共同的. 關於第 (1) 個假定, 事實上各實驗者所用誤差的意義可以相差很大, 給的審慎與否也看人而不同. 基於上述兩個假設的不能滿足, 又基於能量標準的不一致, 和原始數據中包含的其他假設, 在現階段的計算中, 不一定要作全盤的最小二乘法的平差, 而可以用本文所用的、近似的部分平差. 所得的結果應該和全盤平差有同等的意義, 但計算較為簡單, 可以省去繁複的計算程序問題. 另一有利的地方是, 可以逐步檢查, 比全盤調節不易發生錯誤, 而且便於發現實驗中的一些系統偏差.

本文所用的近似的部分平差的辦法是拿反應循環和表 7 所列的質量差做基礎的. 我們不作全盤的最小二乘的要求, 而只把這個要求用到每個循環上去, 就是, 對每個循環說, 平差後的核反應值, Q^* , 適合

$$\sum_i w_i \Delta_i^2 = \sum_i \frac{1}{q_i^2} (Q_i^* - Q_i)^2 = \text{最小} \quad (15)$$

的條件。這裏 j 指一個循環內的各個核反應。另一個條件是每個循環內改正後的核反應值的總和應該等於我們所採用的質量差, 即

$$\sum_j Q_j^* = C; \quad (16)$$

$C = 0$, 總和為零的循環;

$C = 0.7824 \pm 0.001 \text{ Mev}$, 總和為
n-H¹ 的循環, 等等。

用 Δ 表示一個循環中各實驗 Q 值總和的不符值, 即

$$\Delta = C - \sum_j Q_j. \quad (17)$$

由式 (15), (16) 和 (4) 相當的式子, 可以得到 Q 值的改正數和平差後的誤差 q^* , 例如

$$\Delta_1 = -\frac{q_1^2}{\sum_j q_j^2} \Delta, \quad (18)$$

$$q_1^{*2} = q_1^2 \left\{ 1 - \frac{q_1^2}{\sum_j q_j^2} + \frac{q_1^2}{\sum_j q_j^2} \cdot \frac{q_c^2}{\sum_j q_j^2} \right\}. \quad (19)$$

就是說, 每個 Q 值的改正數和它的權重成反比, 或和它的實驗誤差的平方成正比。而平差 Q 值的誤差是循環內各實驗 Q 值的誤差和所用基礎質量差的誤差—— q_c 的函數。總和等於零的各循環, $q_c = 0$ 。總和是 n-H¹ 和 n+H¹-D² 的循環, q_c 也可忽略不計。

由於權重的手續, 誤差小的實驗 Q 值平差後改變也小, 或沒有什麼改變。有一些 Q 值在不只一個循環內出現。由各個不同循環得出來的平差值或者相同, 或者不同。如果有二個循環共有一個 Q 值, 那麼, 我們可以把這二個循環放在一起來作最小二乘平差。除觀測方程外, 所用的像 (16) 式的附屬條件也是二個。所需的改正值很容易得到, 或者就用觀察和嘗試代入的辦法, 或者把觀測方程解出來。在有的地方, 情況比較複雜, 就用折中的辦法, 拿最小二乘的原則作為指導, 使改正後有關各反應的 $\sum_j w_j \Delta_j^2$ 儘可能地小。計權地把幾個在第一次平差後有矛盾的 Q 值的改正數平均後, 代回原來的各循環, 把循環中其餘的 Q 值再加改正, 這樣有時要反覆幾次, 但結果總是易得的。如果進行有困難, 反覆的次數需要多, 就表示實驗數據裏面, 有數值相差不大然而確定存在的、不一致的地方。因此, 這也成為深入地檢查實驗數據的一個辦法。這種不一致

的情形,在 $H^2(d, n) He^3$, $Li^6(p, \alpha) He^3$, $Be^9(\gamma, n) Be^8$, $B^{10}(d, \alpha) Be^8$, $Li^6(d, \alpha) He^4$, $O^{18}(p, \alpha) N^{15}$, $Ne^{21}(d, \alpha) F^{19}$ 和表 6 的第 7 項上都出現。這時作者所用的辦法是部分地捨棄實驗報告的誤差而仍力求依照最小二乘原則選取較合適的一組改正值。在反覆平差時,最後所得 Q 值的誤差仍採用第一次平差後所得的誤差,以免因反覆平差而把誤差不斷地形式地改低。上述平差結果,最大的改正值是實驗報告誤差的 1.8 倍,核反應 $Li^6(d, \alpha) He^4$ 。

連結較 Na^{23} 重的各核的 Q 值也用同樣的方法處理。至於不構成循環的單個 Q 值當然是不平差的。

在平差後各 Q 值的數值互相一致。數值一致的 Q 值得到後,質量的計算是逕直的。隨便採取哪樣的計算路線都是相同的,除了有時會因四捨五入的關係,結果相差 1 kev。但誤差的計算却需注意。本文所用辦法如下:用平差後的各 Q 值和誤差, $Q^* \pm q^*$, 和上述採用的基礎質量差 $n - H^1$, $n + H^1 - D^2$, $2H^1 - D^2$, $2D^2 - He^4$ 適當組合,得出每一個核質量,例如

$$\begin{aligned} H^1 - \frac{1}{16} O^{16} &= H^1 - 1 = \\ &= \frac{1}{16} [9(2H^1 - D^2) + 5(2D^2 - He^4) + R], \end{aligned} \quad (20)$$

這裏

$$\begin{aligned} R &= -O^{16}(d, \alpha) N^{14} + C^{14}(\beta^-) N^{14} + C^{13}(d, p) C^{14} - \\ &\quad - C^{13}(d, \alpha) B^{11} - B^{11}(p, \alpha) Be^8 - Be^8(\alpha) \alpha. \end{aligned}$$

同樣,

$$D^2 - 2 = \frac{1}{8} [(2H^1 - D^2) + 5(2D^2 - He^4) + R], \quad (21)$$

$$He^4 - 4 = \frac{1}{4} [(2H^1 - D^2) + (2D^2 - He^4) + R], \quad (22)$$

等等。然後假定各 Q 值在觀測上互相獨立,而用誤差平方的總和計算最後所得質量的誤差。因為 $2D^2 - He^4$ 等的數值也是由實驗 Q 值得出來的,所以這裏所用的計算,會使誤差偏小一點,不過偏差很小,可以忽略不計。

上面這樣得出來的質量盈餘 $M - A^{11}$ 用能量的單位表示。到此為止,我們只假定

1) 在文獻 [2] 中 $M - A$ 叫做質量虧損。

了原子核反應時的能量守恆的原理(式(1)),還沒有用到質量和能量聯系的公式。所得 $M-A$ 的值見表 8。

表 8. 原 子 量

同位素	$M-A$, 質量盈餘 (kev)	M , 原 子 量	同位素	$M-A$, 質量盈餘 (kev)	M , 原 子 量
n	8 365.6 $\pm$ 1.6	1.008 9842 ($\pm$ 17)	Na ²²	1 320 $\pm$ 12	22.001 417 ($\pm$ 13)
H ¹	7 583.2 $\pm$ 1.6	1.008 1440 ($\pm$ 17)	Na ²³	-2 734 $\pm$ 13	22.997 064 ($\pm$ 14)
D ²	13 723.2 $\pm$ 2.7	2.014 7381 ($\pm$ 29)	Na ²⁴	-1 327 $\pm$ 13	23.998 575 ($\pm$ 14)
T ³	15 831 $\pm$ 5	3.017 002 ($\pm$ 6)	Mg ²⁴	1 324 $\pm$ 16	23.001 422 ($\pm$ 17)
He ³	15 813 $\pm$ 5	3.016 983 ($\pm$ 6)	Mg ²⁴	-6 853 $\pm$ 14	23.992 640 ($\pm$ 15)
He ⁴	3 606.5 $\pm$ 2.0	4.003 8732 ($\pm$ 21)	Mg ²⁵	-5 817 $\pm$ 14	24.993 753 ($\pm$ 15)
He ⁶	19 406 $\pm$ 30	6.020 841 ($\pm$ 32)	Mg ²⁶	-8 559 $\pm$ 18	25.990 808 ($\pm$ 19)
Li ⁶	15 858 $\pm$ 5	6.017 030 ($\pm$ 5)	Mg ²⁷	-6 632 $\pm$ 18	26.992 878 ($\pm$ 19)
Li ⁷	16 971 $\pm$ 5	7.018 226 ($\pm$ 5)	Mg ²⁸	-6 783 $\pm$ 25	27.992 715 ($\pm$ 27)
Li ⁸	23 302 $\pm$ 5	8.025 025 ($\pm$ 5)	Al ²⁵	-1 515 $\pm$ 30	24.998 373 ($\pm$ 32)
Be ⁷	17 834 $\pm$ 5	7.019 152 ($\pm$ 5)	Al ²⁶	-4 336 $\pm$ 18	25.995 344 ($\pm$ 19)
Be ⁸	7 307 $\pm$ 4	8.007 847 ($\pm$ 4)	Al ²⁷	-9 234 $\pm$ 15	26.990 083 ($\pm$ 16)
Be ⁹	14 006 $\pm$ 5	9.015 042 ($\pm$ 5)	Al ²⁸	-8 592 $\pm$ 17	27.990 772 ($\pm$ 18)
Be ¹⁰	15 560 $\pm$ 5	10.016 711 ($\pm$ 6)	Si ²⁷	-4 432 $\pm$ 16	26.995 240 ($\pm$ 17)
B ⁹	15 076 $\pm$ 5	9.016 191 ($\pm$ 5)	Si ²⁸	-13 248 $\pm$ 17	27.985 772 ($\pm$ 18)
B ¹⁰	15 003 $\pm$ 5	10.016 112 ($\pm$ 6)	Si ²⁹	-13 355 $\pm$ 18	28.985 657 ($\pm$ 19)
B ¹¹	11 915 $\pm$ 5	11.012 796 ($\pm$ 5)	Si ³⁰	-15 597 $\pm$ 19	29.983 249 ($\pm$ 20)
B ¹²	16 918 $\pm$ 5	12.018 170 ($\pm$ 5)	Si ³¹	-13 832 $\pm$ 19	30.985 145 ($\pm$ 20)
C ¹¹	13 896 $\pm$ 5	11.014 924 ($\pm$ 5)	P ²⁰	-8 388 $\pm$ 19	28.990 992 ($\pm$ 20)
C ¹²	3 545 $\pm$ 4	12.003 807 ($\pm$ 5)	P ³¹	-15 312 $\pm$ 21	30.983 556 ($\pm$ 23)
C ¹³	6 964 $\pm$ 4	13.007 479 ($\pm$ 4)	P ³²	-14 877 $\pm$ 23	31.984 023 ($\pm$ 25)
C ¹⁴	7 157 $\pm$ 3	14.007 686 ($\pm$ 3)	P ³³	-16 617 $\pm$ 26	32.982 155 ($\pm$ 28)
N ¹²	9 184 $\pm$ 4	13.009 863 ($\pm$ 4)	S ³²	-16 586 $\pm$ 24	31.982 188 ($\pm$ 26)
N ¹⁴	7 002 $\pm$ 3	14.007 520 ($\pm$ 3)	S ³³	-16 866 $\pm$ 25	32.981 887 ($\pm$ 27)
N ¹⁵	4 529 $\pm$ 6	15.004 864 ($\pm$ 6)	S ³⁴	-19 915 $\pm$ 28	33.978 612 ($\pm$ 30)
O ¹⁵	7 285 $\pm$ 7	15.007 824 ($\pm$ 8)	S ³⁵	-18 534 $\pm$ 25	34.980 095 ($\pm$ 27)
O ¹⁶	0	16.000 000	Cl ³⁵	-18 701 $\pm$ 25	34.979 916 ($\pm$ 27)
O ¹⁷	4 220 $\pm$ 4	17.004 532 ($\pm$ 4)	Cl ³⁶	-18 913 $\pm$ 26	35.979 688 ($\pm$ 28)
O ¹⁸	4 528 $\pm$ 8	18.004 863 ($\pm$ 9)	Cl ³⁷	-20 868 $\pm$ 28	36.977 589 ($\pm$ 30)
O ¹⁹	8 936 $\pm$ 9	19.009 597 ($\pm$ 10)	Cl ³⁸	-18 609 $\pm$ 28	37.980 015 ($\pm$ 30)
F ¹⁷	6 988 $\pm$ 3	17.007 505 ($\pm$ 3)	A ³⁶	-19 627 $\pm$ 26	35.978 921 ($\pm$ 28)
F ¹⁸	6 199 $\pm$ 8	18.006 657 ($\pm$ 9)	A ³⁷	-20 052 $\pm$ 28	36.978 465 ($\pm$ 30)
F ¹⁹	4 147 $\pm$ 7	19.004 454 ($\pm$ 8)	A ³⁸	-23 549 $\pm$ 40	37.974 709 ($\pm$ 43)
F ²⁰	5 912 $\pm$ 9	20.006 350 ($\pm$ 10)	A ⁴⁰	-21 772 $\pm$ 34	38.976 618 ($\pm$ 37)
Ne ¹⁸	7 388 $\pm$ 8	19.007 935 ($\pm$ 9)	K ³⁹	-22 337 $\pm$ 33	38.976 011 ($\pm$ 35)
Ne ²⁰	-1 134 $\pm$ 9	19.998 783 ($\pm$ 10)	K ⁴⁰	-21 765 $\pm$ 34	39.976 625 ($\pm$ 37)
Ne ²¹	476 $\pm$ 9	21.000 512 ($\pm$ 10)	K ⁴¹	-23 524 $\pm$ 41	40.974 736 ($\pm$ 44)
Ne ²²	-1 520 $\pm$ 12	21.998 367 ($\pm$ 13)	Ca ⁴⁰	-23 088 $\pm$ 36	39.975 204 ($\pm$ 39)
Ne ²³	1 654 $\pm$ 12	23.001 776 ($\pm$ 13)	Ca ⁴¹	-23 086 $\pm$ 37	40.975 206 ($\pm$ 40)
Na ²¹	3 996 $\pm$ 31	21.004 292 ($\pm$ 33)			

用 Cohen, DuMond, Layton 和 Rollett^[21] 最近的質能聯系值,

$$1 \text{ 原子質量單位} = 931.141 \pm 0.010 \text{ Mev} \quad (23)$$

把 $M-A$ 轉換, 再加上質量數, 得到用原子質量單位表示的質量. 所有的結果列在表 8 中.

表 1 所列的平差後的 Q 值和由表 8 所列質量再計算 Q 值所得, 有時會相差 1 kev. 這是因為計算完畢後進位的關係, 原來的計算是用較多的位數的. 讀者求任何未知 Q 值時, 最好由調節後的 Q 值適當地組合得出, 而不用質量值, 以免結果誤差過大. 只能用精密度較差的實驗 Q 值來確定的核, 如 He^5 , Li^5 等等, 因本文目的所限, 都未列入.

和作者等^[2] (1951) n 到 F^{20} 的計算及作者^[2] (1952) O^{16} 到 S^{33} 的計算比較, S^{33} 到 Ca^{41} 一段是新定的. S^{33} 以下, 尤其是比 O^{16} 輕的同位素, 精密度顯著地提高, 為從前的 2—5 倍. 這一方面是由於核反應實驗測定的增多和改善, 一方面是由於計算方法的改變. 質量值方面, 除開個別新定的質量外, 一般都有增加. 但除了 O^{15} , Ne^{19} , Mg^{23} 三種同位素, 其餘同位素質量值的改變都在原來誤差之內, 大半只是誤差的小部分. O^{15} , Ne^{19} , Mg^{23} 的改變是由於實驗 Q 值的修正. O^{15} 的舊值由 $\text{O}^{15} (\beta^+) \text{N}^{15}$ 確定, 而現在由 $\text{N}^{15} (p, n) \text{O}^{15}$ 確定. $\text{O}^{15} (\beta^+) \text{N}^{15} = 2.705 \pm 0.005 \text{ Mev}$ 的舊測定可能有誤. 但 O^{15} 由單個 Q 值和其餘的核相連結, 所以它的改變不影響其他質量.

由核反應能所得質量數據的改變主要的表現在 $2\text{D}^2 - \text{He}^4$ 上面, 它的舊值是 $23.834 \pm 0.007 \text{ Mev}$, 現在的是 $23.840 \pm 0.004 \text{ Mev}$. 可以注意的是 He^4 的質量幾乎完全沒有改變.

和 Wapstra^[11] (1955) 最近用核反應能的計算相比, O^{16} 以下各質量的誤差, 幾乎一樣, 或稍小. 既然所用的原始數據大致相同, 而 Wapstra 所用的是全盤的平差, 所以這結果可以表示本文所用較為簡單的方法的效能. 在 S^{32} 以上, 本文結果的精密度較高, 反映最近核反應能測定的成就. 至於質量的數值方面, 本文結果和 Wapstra 的有一些差異, 一般在誤差之內. 但他的結果, B^{10} 和更輕的各同位素, 一律較本文結果為高, B^{11} 以上各同位素, 和本文結果比, 則較為參差. 可以和 Scolman, Quisenberry, Nier^[10] 所論及的 Wapstra 的 B^{10} 以下各質量的錯誤一點參照.

和 Джелепов 及 Зырянова^[8] (1952) 統用質譜及核反應能測定的計算相比, 本文結果質量值普遍地較低, 這顯著的差別主要的是反映各重要質量的質譜值和核反應值的差別, 一部分是由於最近實驗數據的增多及改進.

三. 討 論

1. $E=mc^2$ 關係的實驗證明的最高精確度. 2 D^2-He^4 結果的比較

拿核反應能的數據和質譜測量所得的質譜雙線的數值相對照, 是這兩種結果間最直接的比較, (表 9)。這樣的比較給 $E=mc^2$ 的關係一個實驗上的考驗。

表 9. 質譜雙綫 (10^{-6} 原子質量單位)

雙 綫	$H_2^+ - D^2$	$D_2^+ - He^4$	$D_2^+ - \frac{1}{2} C^{12}$	$C^{12} H_4^+ - O^{16}$	$O_2^{16} - S^{32}$
本文結果(核反應)	$1,549.8 \pm 1.7$	$25,603 \pm 4$	$42,311 \pm 9$	$36,382 \pm 9$	$17,812 \pm 26$
(質譜測定)					
Nier, Roberts, Collins, Johnson (1951) ^[1,4]	$1,551.9 \pm 1.7$	$25,612 \pm 9$	—	$36,427 \pm 8$	$17,764 \pm 7$
Ewald (1951) ^[13]	$1,550.3 \pm 1.5$	$25,604 \pm 8$	$42,292 \pm 12$	$36,371 \pm 12$	$17,716 \pm 20$
Ogata, Matsuda (1953) ^[15]	$1,549.2 \pm 0.8$	$25,603 \pm 6$	$42,301 \pm 9$	$36,419 \pm 6^*$	$17,725 \pm 8$
Engler, Hintenberger (1953) ^[12]				$36,399 \pm 28$	—
Smith, Damm (1953) ^[7]				$36,387.7 \pm 4.1$	$17,762.9 \pm 7.1^*$
Mattauch, Bieri (1954) ^[6]	$1,547.3 \pm 0.76$	$25,606.0 \pm 4.7$	$42,325.4 \pm 5.2$	$36,408.6 \pm 3.8$	—
Демирханов, Гуткин, Дорохов, Руденко (1956) ^[12]	$1,548.3 \pm 1$	$25,600 \pm 2$	$42,298 \pm 7$	$36,388 \pm 4$	—
Quisenberry, Scolman Nier (1956) ^[12]	$1,547.7 \pm 0.4^*$	—	—	$36,393.1 \pm 0.9$	$17,759.9 \pm 0.9$
質譜測定的平均 (除開第一項)	$1,548.0 \pm 0.3$	$25,601 \pm 2$	—	—	—

* 幾種雙綫的平均. * 暫定.

表 9 所列的, 從核反應數據得到的, 用原子質量單位表示的質譜雙綫值中, 相對誤差最小的一項是 $2D^2 - He^4$. 這是根據上一節的反應循環的辦法所給的平均值 23.840 ± 0.004 Mev 和式 (23) 的質能聯系常數得出來的, 25.603 ± 0.004 毫質量單位. 和質譜測定各值比較, 除了 Nier 和 Roberts^[1] (1951) 的, 互相都很符合. 比較 Nier 和他的共同工作者^[1, 4, 10, 13, 14] 所測的質譜雙綫的先後各值, 後來重新測定的都比 1951 所定的要改低. 他們在 1951 所定的 $2D^2 - He^4$ 後來還沒有重測, 顯然也是偏高了. 如果也改低 0.05%, 就和別人測定的相合. 除開 Nier 和 Roberts 這個測定值, 質譜測定各值的平均是 25.601 ± 0.002 毫質量單位, 主要由 Демирханов, Гуткин, Дорохов 和 Руденко^[12] (1956) 的測量決定. 核反應值和質譜平均值相差為 2 ± 4 微質量單位.

表 10. 主要質量的核反應值和質譜值的比較*

	H ¹	D ²	He ⁴	C ¹²	S ³²	Ca ⁴⁰
(核反應)						
本 文 結 果	1.008 1440 (±17)	2.014 7381 (±29)	4.003 8732 (±21)	12.003 807 (±5)	31.982 188 (±26)	39.975 204 (±39)
(質譜測定)						
Ewald (1951) ^[3]	1.008 141 (±2)	2.014 732 (±4)	4.003 860 (±12)	12.003 807 (±11)	31.982 272 (±19)	—
Collins, Nier, Johnson (1952) ^[4]	1.008 146 (±3)	2.014 740 (±6)	—	12.003 842 (±4)	31.982 236 (±7)	(見文中)
Ogata, Matsuda (1953) ^[5]	1.008 145 (±2)	2.014 741 (±3)	4.003 879 (±9)	12.003 844 (±6)	31.982 274 (±8)	—
Mattauch, Bieri (1954) ^[6]	1.008 1459 (±5)	2.014 7444 (±9)	4.003 8797 (±16)	12.003 8231 (±33)	—	—
Демирханов, Гуткин, Дорохов, Руденко(1956) ^[12]	1.008 142 (±1)	2.014 736 (±2)	4.003 872 (±4)	12.003 820 (±5)	—	—
Quisenberry, Scolman, Nier (1956) ^[13]	1.008 1442 (±2)	2.014 7406 (±6)	—	12.003 8167 (±8)	31.982 2401 (±9)	—
Smith (1955) ^[10, 7]	—	—	—	12.003 8212 (±38)	31.982 2371 (±71)*	—

* 表中每一質量值後面括弧中的誤差的末一位相當於該質量值的末一位。

* 暫定。

和 Демирханов 等的質譜值相差為 3 ± 4 微質量單位。 $2D^2 - He^4$ 的兩種測定值之間的誤差， $\frac{1}{6000}$ ，是現在 $E = mc^2$ 關係實驗證明達到的最高精確度。因為質譜值的實驗誤差較小，這關係的實驗準確度的更進一步的提高首先將依靠核反應能的更準確的測定。

2. 包含 H¹, D², C¹² 和 S³² 的幾個基礎質譜雙線

表 9 列舉幾種重要的質譜雙線的核反應值和近年主要的質譜測定。核反應值是用本文平差 Q 值和一些基礎質量差組合而成的。 $2D^2 - He^4$ 一項上面已經討論過。包含 H¹, D² 和 C¹² 的三種雙線中，雙線 $H_2^2 - D^2$ 的各值，質譜測定的各值符合尚佳，除去 Roberts^[11] (1951) 值，平均數是 $1,548.0 \pm 0.3$ 微質量單位。核反應能值和這些都符合。雙線 $D_3 - \frac{1}{2}C^{12}$ 各值，Mattauch 和 Bieri 的較高，其他質譜值相合，核反應值介於 Mattauch 和 Bieri 值及其餘值之間。 $CH_4 - O$ 各值不一致。 Nier 等舊值，Ogata 和 Matsuda, Mattauch 和 Bieri 各值都大得多，核反應值和其他質譜測定值尚相符合。雙線 $O_2 - S^{32}$ ，質譜各值相差很多，遠過於誤差。核反應結果又比所有質譜測定高出很多，差異為誤差的一倍或更多，顯示各值之間，尚有系統偏差。包含其他各核的質量雙

線, 符合的程度也不一律. 不在此一一討論. 讀者可以參看 Duckworth, Hogg, Pennington^[22] 的總結和文獻 [10], [13], [14] 和本文比較.

3. H^1 , D^2 , He^4 , C^{12} , S^{32} 和 Ca^{40} 的質量

表 10 是一些關鍵質量的核反應值和質譜值的比較. 各值符合程度不齊, 但 H^1 , D^2 的質量基本上已互相符合. C^{12} 各值比以前互相接近, 但仍不一致, 顯著地分成三羣. 最低值為 12.003 807, 包括核反應值和 Ewald 值, 其次為 12.003 820 左右, 最高的一羣為 12.003 840 左右. 中間一羣看起來是最可信的. S^{32} 核反應值比質譜各值都低. 質譜值又互不一致. 不符的數目超過誤差的一倍. Ca^{40} 則相差更大. 關於 Ca^{40} , 質譜儀有兩個測定值, Nier 和 Roberts^[1] 測定的是 $C_2H_4 - Ca^{40} = 68.539 \pm 0.046$ 毫質量單位, 比由核反應能得出來的 68.793 ± 0.042 毫質量單位約小 250 微質量單位. Johnson^[24] 測定的是 $C_2O - Ca^{40} = 32.557 \pm 0.009$ 毫質量單位, 比核反應值的 32.410 ± 0.040 毫質量單位又大 150 微質量單位. 核反應值和質譜值的差異, 原因在哪里, 還不能確定. 改變能量標準或改變某一個 Q 值都不能使這兩種數據互相符合. 上述的分析, 指明在核反應能方面, 需要重新確定的問題很多. 這兩組實驗結果的差異, 似乎沒有什麼基本的原因, 但進一步的解決, 還得等待核反應能和質譜測定的繼續改進.

參 考 文 獻

- [1] Nier, A. O. and Roberts, T. R., *Phys. Rev.* **81** (1951), 507; Nier, A. O., *Phys. Rev.* **81** (1951), 624; Roberts, T. R., *Phys. Rev.* **81** (1951), 624.
- [2] Li (李整武), Whaling, Fowler, and Lauritsen, *Phys. Rev.* **83** (1951), 512.
Li, C. W. (李整武), *Phys. Rev.* **88** (1952), 1038; **90** (1953), 1131.
- [3] Ewald, H., *Zeit. Naturforsch.* **6a** (1951), 293.
- [4] Collins, Nier, and Johnson, *Phys. Rev.* **84** (1951), 717; **86** (1952), 408.
- [5] Ogata, K. and Matsuda, H., *Phys. Rev.* **89** (1953), 27.
- [6] Mattauch, J. and Bieri, R., *Zeit. Naturforsch.* **9a** (1954), 303.
- [7] Smith, L. G. and Damm, C. C., *Phys. Rev.* **90** (1953), 324; 及文獻 [22].
- [8] Джелепов, Б. С. и Зырянова, Л. Н., *УФН*, **48** (1952), 465.
- [9] Drummond, J. E., *Phys. Rev.* **97** (1955), 1004.
- [10] Scolman, Quisenberry, and Nier, *Phys. Rev.* **102** (1956), 1076.
- [11] Wapstra, A. H., *Physica*, **21** (1955), 369; 385.
- [12] Демирханов, Гуткин, Дорохов, Руденко, *Атомная Энергия*, No. 2 (1956), 21.
- [13] Quisenberry, Scolman, and Nier, *Phys. Rev.* **102** (1956), 1071.
- [14] Kettner, M. E., *Phys. Rev.* **102** (1956), 1065.
- [15] King, R. W., *Revs. Mod. Phys.* **26** (1954), 327.
- [16] Van Patter, D. M. and Whaling, W., *Revs. Mod. Phys.* **26** (1954), 402.
- [17] Collins, McKenzie, and Ramm, *Proc. Roy. Soc.* **A216** (1953), 219.
- [18] Briggs, G. H., *Proc. Roy. Soc.* **A139** (1933), 638; **A157** (1936), 183.
Briggs, G. H., *Revs. Mod. Phys.* **26** (1954), 1.
- [19] Rutherford, Wynn Williams, Bowden, and Lewis, *Proc. Roy. Soc.* **A142** (1933), 347.
Lewis, W. B. and Bowden, B. V., *Proc. Roy. Soc.* **A145** (1934), 235.

- [20] Li, C. W. (李整武) (1950, 未發表).
- [21] Cohen, DuMond, Layton, and Rollett, *Revs. Mod. Phys.* **27** (1955), 363.
- [22] Duckworth, Hogg, and Pennington, *Revs. Mod. Phys.* **26** (1954), 463.
- [23] Engler, A. and Hintenberger, H., *Helv. Phys. Acta*, **26** (1953), 657.
- [24] Johnson, W. H., *Phys. Rev.* **88** (1952), 1213.
- [25] Bethe, H. A., *Elementary Nuclear Theory* (John Wiley & Sons, Inc. 1947), 124.

表 1 中的參考文獻

- [31] Адыяевич, Грошев, Демидов, *Атомная Энергия* No. 2 (1956), 40.
- [32] Антоњева, Башнилов, Джелепов, и Орлов, *Известия АН СССР, сер. физ.* **18** (1954), 93.
- [33] Agnew, H. M., *Phys. Rev.* **77** (1950), 655.
- [34] Ahnlund, K., *Arkiv Fysik*, **7** (1954), 155.
- [35] Ahnlund, K., *Arkiv Fysik*, **7** (1954), 459.
- [36] Ahnlund, K. and Mileikowsky, C., *Arkiv Fysik*, **8** (1954), 161.
- [37] Ahnlund, K., Thulin, and Pauli, *Arkiv Fysik*, **8** (1954), 489.
- [38] Alburger, D. E., *Phys. Rev.* **76** (1949), 435.
- [39] Alburger, D. E., *Phys. Rev.* **88** (1952), 1257.
- [40] Allen, Almqvist, Dewan, and Pepper, *Phys. Rev.* **96** (1954), 684.
- [41] Almqvist, Clarke, and Paul, *Phys. Rev.* **100** (1955), 1265.
- [42] Anderson, Wheeler, and Watson, *Phys. Rev.* **90** (1953), 608.
- [43] Bartholomew and Kinsey, *Canad. J. Phys.* **31** (1953), 927.
- [44] Berggren and Osborne, *Phys. Rev.* **74** (1948), 1240.
- [45] Bell and Elliott, *Phys. Rev.* **79** (1950), 282.
- [46] Bichsel, Halg, Huber, and Stebler, *Helv. Phys. Acta*, **25** (1952), 119.
- [47] Blaser, Boehm, and Marmier, *Phys. Rev.* **75** (1949), 1953.
- [48] Bonner, Evans, and Hill, *Phys. Rev.* **75** (1949), 1398.
- [49] Bonner and Butler, *Phys. Rev.* **83** (1951), 1091.
- [50] Braams, C. M., *Phys. Rev.* **94** (1954), 763.
- [51] Brosi, Zeldes, and Kettelle, *Phys. Rev.* **79** (1950), 902.
- [52] Brown, Snyder, Fowler, and Lauritsen, *Phys. Rev.* **82** (1951), 159.
- [53] Buechner, Sperduto, Browne, and Bockelman, *Phys. Rev.* **91** (1953), 1502.
- [54] Burcham and Freeman, *Phil. Mag.* **41** (1950), 337.
- [55] Campion and Bartholomew, *Bull. Am. Phys. Soc.* **1**, 28 (1956), 28.
- [56] Carlson, R. R., *Phys. Rev.* **84** (1951), 749.
- [57] Cecarelli, Merlin, and Rostagni, *Nuovo Cimento*, **6** (1949), 151.
- [58] Chao (趙忠堯), Lauritsen, and Tollestrup, *Phys. Rev.* **76** (1949), 586.
- [59] Chao (趙忠堯), Tollestrup, Fowler, and Lauritsen, *Phys. Rev.* **79** (1950), 108.
- [60] Cook, Langer, and Price, *Phys. Rev.* **74** (1948), 548.
- [61] Collins, McKenzie, and Ramm, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A216** (1953), 242.
- [62] Craig, Donahue, and Jones, *Phys. Rev.* **88** (1952), 808.
- [63] Curran, Angus, and Cockcroft, *Phys. Rev.* **76** (1949), 853.
- [64] Daniel, Koester, and Mayer-Kuckuk, *Zeit. Naturforsch.* **9a** (1954), 104.
- [65] Dewan, Pepper, Allen, and Almqvist, *Phys. Rev.* **86** (1952), 416.
- [66] Donahue, Jones, McEllistrem, and Richards, *Phys. Rev.* **89** (1953), 824.
- [67] Elbek, Nielson, and Nielson, *Phys. Rev.* **95** (1954), 96.
- [68] Elkind, M. M., *Phys. Rev.* **92** (1953), 127.
- [69] Elliott and Bell, *Phys. Rev.* **74** (1948), 1869.
- [70] Elliott and Livesey, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A224** (1954), 129.
- [71] Emmerich, Singer, and Kurbatov, *Phys. Rev.* **94** (1954), 113.
- [72] Enge, Buechner, Sperduto, and Van Patter, *Phys. Rev.* **83** (1951), 31.

- [73] Endt and Paris, *Bull. Am. Phys. Soc.* **1** (1956), 223.
[74] Famularo and Phillips, *Phys. Rev.* **91** (1953), 1195.
[75] Feldman and Wu, *Phys. Rev.* **75** (1949), 1286.
[76] Feldman and Wu, *Phys. Rev.* **78** (1950), 318.
[77] Feldman and Wu, *Phys. Rev.* **87** (1952), 1091.
[78] Franzen, Halpern, and Stephens, *Phys. Rev.* **77** (1950), 641.
[79] Freeman, J. M., *Proc. Phys. Soc. (London)* **A63** (1950), 668.
[80] Fulbright and Milton, *Phys. Rev.* **76** (1949), 1271.
[81] Graves and Meyer, *Phys. Rev.* **76** (1949), 182.
[82] Gross and Hamilton, *Phys. Rev.* **80** (1950), 484.
[83] Hamermesh and Hummel, *Phys. Rev.* **88** (1952), 916.
[84] Hamilton, Alford, and Gross, *Phys. Rev.* **83** (1951), 215.
[85] Hamilton, Alford, and Gross, *Phys. Rev.* **92** (1953), 1521.
[86] Hanna and Pontecorvo, *Phys. Rev.* **75** (1949), 983.
[87] Hanna, G. C., *Phys. Rev.* **80** (1950), 530.
[88] Hauser, U. H., *Zeit. Naturforsch.* **7a** (1952), 781.
[89] Hedgran and Lind, *Arkiv Fysik*, **5** (1952), 177.
[90] Herb, Snowdon, and Sala, *Phys. Rev.* **75** (1949), 246.
[91] Holmgren, Hanscome, and Willett, *Phys. Rev.* **98** (1955), 241.
[92] Hornyak and Lauritsen, *Phys. Rev.* **77** (1950), 160.
[93] Hughes, Egger, and Alburger, *Phys. Rev.* **77** (1950), 726.
[94] Jenks, Ghormley, and Sweeton, *Phys. Rev.* **75** (1949), 701.
[95] Jensen, Nichols, Clement, and Pohm, *Phys. Rev.* **85** (1952), 112.
[96] Jesse, Forstat, and Sadauskis, *Phys. Rev.* **77** (1950), 782.
[97] Jones, Donahue, McEllistrem, Douglas, and Richards, *Phys. Rev.* **91** (1953), 879.
[98] Jones, Douglas, McEllistrem, and Richards, *Phys. Rev.* **94** (1954), 947.
[99] Kington, Bair, Cohn, and Willard, *Phys. Rev.* **99** (1955), 1393.
[100] Kinsey, Bartholomew, and Walker, *Phys. Rev.* **78** (1950), 481.
[101] Kinsey and Bartholomew, *Phys. Rev.* **80** (1950), 918.
[102] Kinsey, Bartholomew, and Walker, *Phys. Rev.* **85** (1952), 1012.
[103] Kinsey and Bartholomew, *Canad. J. Phys.* **31** (1953), 537.
[104] Kinsey and Bartholomew, *Canad. J. Phys.* **31** (1953), 901.
[105] Klema and Phillips, *Phys. Rev.* **83** (1951), 212.
[106] Kono, S., *J. Phys. Soc. Japan* **10** (1955), 495.
[107] Langer, Motz, and Price, *Phys. Rev.* **77** (1950), 798.
[108] Langer and Moffet, *Phys. Rev.* **88** (1952), 169; 689.
[109] Li (李整武) and Whaling, *Phys. Rev.* **82** (1951), 122.
[110] Lyman, E. R., *Phys. Rev.* **55** (1939), 234.
[111] Macklin, Lidofsky, and Wu, *Phys. Rev.* **78** (1950), 318.
[112] Marion, Bonner, and Cook, *Phys. Rev.* **100** (1955), 91.
[113] Middleton and Tai (戴傳曾), *Proc. Phys. Soc. (London)* **A64** (1951), 801.
[114] Mileikowsky and Whaling, *Phys. Rev.* **88** (1952), 1254.
[115] Mileikowsky, C., *Arkiv Fysik*, **7** (1954), 117.
[116] Millar, Bartholomew, and Kinsey, *Phys. Rev.* **81** (1951), 150.
[117] Mobley and Laubenstein, *Phys. Rev.* **80** (1950), 309.
[118] Motz, H. T., *Phys. Rev.* **85** (1952), 501.
[119] Motz and Alburger, *Phys. Rev.* **86** (1952), 165.
[120] Nichols and Jensen, *Phys. Rev.* **94** (1954), 369.
[121] Noyes, Van Hoomissen, Miller, and Waldman, *Phys. Rev.* **95** (1954), 396.
[122] Olsen and O'Kelley, *Phys. Rev.* **93** (1954), 1125.
[123] Paris, Buechner, and Endt, *Phys. Rev.* **99** (1955), 1317.

- [124] Pauli, Ahnlund, and Milcikowsky, *Arkiv Fysik*, **8** (1954), 213.
[125] Phillips, Famularo, and Gossett, *Phys. Rev.* **91** (1953), 462.
[126] Richards, Smith, and Browne, *Phys. Rev.* **80** (1950), 524.
[127] Robson, J. M., *Phys. Rev.* **83** (1951), 349.
[128] Roderick and Wong, *Phys. Rev.* **92** (1953), 204.
Roderick, Lönsjö, and Meyerhof, *Phys. Rev.* **97** (1955), 97.
[129] Ruby and Richardson, *Phys. Rev.* **83** (1951), 698.
[130] Schoenfeld, Duborg, Preston, and Goodman, *Phys. Rev.* **85** (1952), 873.
[131] Schrank and Richardson, *Phys. Rev.* **86** (1952), 248.
[132] Shoupp, Jennings, and Sun, *Phys. Rev.* **75** (1949), 1.
[133] Shoupp, Jennings, and Jones, *Phys. Rev.* **76** (1949), 502.
[134] Sheline and Johnson, *Phys. Rev.* **90** (1953), 325.
[135] Siegbahn, K., *Phys. Rev.* **70** (1946), 127.
[136] Slack, Owen, and Primakoff, *Phys. Rev.* **75** (1949), 1448.
[137] Smith and Allen, *Phys. Rev.* **81** (1951), 381.
[138] Smith and Martin, *Phys. Rev.* **77** (1950), 752.
[139] Sperduto and Buechner, *Phys. Rev.* **88** (1952), 574.
[140] Stebler and Huber, *Helv. Phys. Acta* **21** (1948), 59.
[141] Strait, Van Patter, Buechner, and Sperduto, *Phys. Rev.* **81** (1951), 747.
[142] Sturm and Johnson, *Phys. Rev.* **83** (1951), 524.
[143] Taschek, Argo, Hemmendinger, and Jarvas, *Phys. Rev.* **76** (1949), 325.
[144] Thirion, Cohen, and Whaling, *Phys. Rev.* **96** (1954), 850.
[145] Tollestrup, Jenkins, Fowler, and Lauritsen, *Phys. Rev.* **75** (1949), 1947.
[146] Tollestrup, Fowler, and Lauritsen, *Phys. Rev.* **76** (1949), 428.
[147] Van Patter, Sperduto, Strait, and Buechner, *Phys. Rev.* **79** (1950), 900.
[148] Van Patter, Sperduto, Huang, Strait, and Buechner, *Phys. Rev.* **81** (1951), 233.
[149] Van Patter, Sperduto, Endt, Buechner, and Enge, *Phys. Rev.* **85** (1952), 142.
[150] Van Patter, Swann, Porter, and Mandeville, *Bull. Am. Phys. Soc.* **1** (1956), 39.
[151] Warshaw, Chen (陳仁烈), and Appleton, *Phys. Rev.* **80** (1950), 288.
[152] Warshaw, S. D., *Phys. Rev.* **80** (1950), 111.
[153] Wapstra, A. H., *Phys. Rev.* **86** (1952), 562.
[154] Westermarck, T., *Phys. Rev.* **88** (1952), 573.
[155] Whaling and Li (李整武), *Phys. Rev.* **81** (1951), 150.
[156] Williamson, Browne, Craig, and Donahue, *Phys. Rev.* **84** (1951), 731.
[157] Wolfson, J. L., *Phys. Rev.* **78** (1950), 176.
[158] Wong, C., *Phys. Rev.* **95** (1954), 761; 765.
[159] Wright, B. T., *Phys. Rev.* **90** (1953), 159.

MASSES OF LIGHT NUCLEI

LI CHENG-WU

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The masses of nuclei from n to Ca^{41} have been derived from nuclear Q values exclusively, without recourse to mass spectrometric results, by an approximate least-squares adjustment. Main results are:

(1) The comparison of the value of the mass difference $2\text{D}^2 - \text{He}^4$ derived from nuclear data with that from mass spectrometric data furnishes the most accurate experimental verification of the relation $E=mc^2$. The accuracy of this verification is $1/6000$.

(2) Tables are given for the most probable mass values from nuclear data of the 79 nuclei from n to Ca^{41} . Fundamental mass differences

$$\begin{aligned} n - \text{H}^1 &= 0.7824 \pm 0.001 \text{ Mev,} \\ n + \text{H}^1 - \text{D}^2 &= 2.2255 \pm 0.0015 \text{ Mev,} \\ 2\text{H}^1 - \text{D}^2 &= 1.4431 \pm 0.0018 \text{ Mev,} \\ 2\text{D}^2 - \text{He}^4 &= 23.840 \pm 0.004 \text{ Mev.} \end{aligned}$$

Mass values include

$$\begin{aligned} n &= 1.008\,9842(\pm 17) \\ \text{H}^1 &= 1.008\,1440(\pm 17) \\ \text{D}^2 &= 2.014\,7381(\pm 29) \\ \text{He}^4 &= 4.003\,8732(\pm 21) \\ \text{C}^{12} &= 12.003\,807(\pm 5) \\ \text{S}^{32} &= 31.982\,188(\pm 26) \\ \text{Ca}^{40} &= 39.975\,204(\pm 39). \end{aligned}$$

(3) The result of the present calculation demonstrates that the method used by the author, within the limitations of present-day nuclear experiments, has the same significance as an overall least-squares adjustment, attains same degree of accuracy, but is simpler in procedure and more convenient in the examination of the experimental results for systematic errors.

(4) Comparison of nuclear results with recent mass spectrometric results shows that the masses of H^1 and D^2 are in agreement for the two systems, but definite discrepancy exists for C^{12} and much larger ones for S^{32} and Ca^{40} .