

第二屆和平利用原子能國際會議文獻



原子核物理學及 儀器設備

2

中國科學院原子核科學委員會編輯委員會編

科學出版社出版

目 录

P/984	用中子活化的方法微量测定同位素的丰度·····	(1)
P/1481	原子核的能级密度·····	(7)
P/1631	关于质量约 $550m_e$ 的粒子的存在的实验·····	(15)
P/2030	原子核对快中子的散射及俘获·····	(20)
P/2084	核反应堆用硼电离室·····	(33)
P/2141	应用随机试验方法(蒙特卡罗法)解运动方程·····	(38)
P/2249	多体问题及其在核物质理论中的应用·····	(43)
P/2299	重离子引起的核反应·····	(50)

用中子活化的方法微量測定同位素的丰度*

美茲(E. Merz) 赫尔(W. Herr)

在过去的十年中,对于同位素丰度分析的方法的兴趣已經增长起来了,因为在許多科学的和技术的問題中,参与反应的元素同位素組成的知識是很重要的: 依靠它們各別的不同核性質,分开的、特别是浓聚的同位素,对于实验室中的許多目的及对于核反应堆的建造和运轉都是需要的。很明显,現在需要一个进行同位素丰度分析的迅速而簡單的方法。

长期以来,同位素組成的分析似乎是质谱仪所专有的实验对象,但是中子活化作为一个探测微量元素的强有力的工具,現在已經能够和质谱仪竞争,而且常常能够同时给出所要测定的元素同位素組成的定量数值。

如所周知,中子俘获过程的结果,常形成放射性同位素,这些同位素各有其特征的半衰期和輻射能。在中子被一元素俘获而产生几个放射性同位素的情况下,各个放射性同位素的活化强度决定于稳定同位素的丰度、它們的俘获截面及对 β 及 γ 射线的探测系数等等。如果每一毫克元素所产生的放射性改变了(虽然照射和探测的条件紧紧保持全同)那么,放射性的改变可能是直接和該元素同位素組成相連系着的,因此,有可能通过比較衰变曲线而算出未知样品中同位素的丰度。

与我們处理的是由很多种同位素所組成的元素时,在大多数场合下,都不可能构成丰度分布的直接而完全的图景。饶幸的是,常常借量度某一元素的一两种同位素就可能間接地找出該元素同位素組成。虽然这个間接办法是有局限性的,但是,它有一个优点,这就是只要用很小量的被研究的物质(微克)就够了,而且这些小量的物质还可以回收。不仅如此,这种放射性测量法不需要象质谱仪那样大量的设备;今天中子源已在大多数的实验室中应用。

这个方法的原理与效率将用 Hf, Os, W, Ru 及 Br 这些元素来说明。在这些微量元素中,由于天然放射衰变过程的结果,我們能够预料到正常的同位素組成有所改变(溴是例外,因为先前做过了分离实验)。

在所有的场合中,放射性测量法分析的结果都同质谱仪检验的结果作了比較,証明它們有良好的一致性。

值得提起的是,应用放射性测量法分析丰度的基本条件是高度的化学純和該小量物质的定量測定。

1. 鎔

可以預期,鎔的天然 β^- 衰变要导致稳定的 Hf 同位素^[1]。在研究这个衰变产物时,我

* “第二届和平利用原子能国际會議文献”編号A/CONF. 15/P/984,西德,原文为英文。

們成功地从含鎢的矿石中分离出小量的純 HfO_2 。从挪威产的硅铈钨矿分离出来的 HfO_2 ，用中子轰击，并同“正常的” HfO_2 样品(来自鎢石)比較之后，証明了在硅铈钨矿中有大量由衰变生成的 Hf^{176} 存在^[2,3]。

正常的 Hf 由 6 种同位素組成，其中质量数为 174, 178 及 180 的同位素适于由俘获热中子而生成放射性同位素，如果我们照射純的正常 Hf，我們得到 Hf^{181} 的某种放射性，而当有大量的稳定的由衰变生成的 Hf^{176} 存在时， Hf^{181} 的放射性将要降低 [$\text{Hf}^{176}(n, \gamma)\text{Hf}^{177}$ 的反应导致稳定同位素]。放射性的差异可以归于由衰变生成的 Hf 的存在之量。

在实验方面，应该提起，Hf 是用离子交换技术从 Lu 矿中分离出来的。堆活化的进行是以大約 0.05—1 毫克 HfO_2 样品置于 10^{12} 中子/厘米²·秒的中子流中三天。为了消除干扰的放射性物质(可能来自迹量的希土元素)，将被照射过的样品溶解，加入非放射性的 Hf (或 Zr) 作为载体，并用苯胂酸定量地沉淀。La 用作“反”载体。所有的样品都用同样的方法处理，并在完全同样的条件下用盖革-弥勒计数管或 γ 谱仪测量。

用质谱仪的研究由玻恩大学的埃柏赫脱(Eberhardt)和西格纳(P. Signer)用另一部分分离的 HfO_2 进行。两个方法的结果示于图 1。

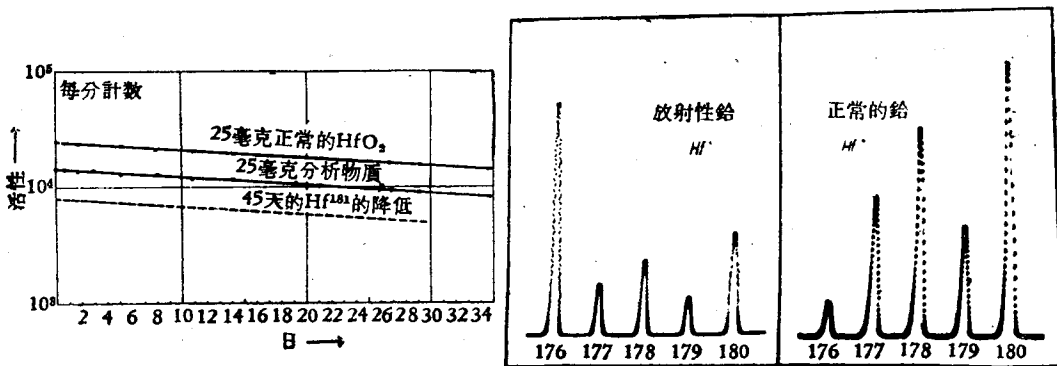


图 1 铪的同位素富量分析的结果。放射性测量法(左)，质谱仪检验(右)

数值在实验范围内很好地符合。在两种场合中，活性曲线均证明有 Hf^{181} ($T = 45$ 天) 存在。然而，由硅铈钨矿分离出的 HfO_2 表示放射性降低仅为正常的 HfO_2 标准值之一半。它在“正常的” Hf 中的含量能够从未知样品同标准样品的放射性的比值计算出来。“正常的”或标准的 Hf 的同位素组成的恒定性得到了肯定。

Hf^{178} 由 (n, γ) 过程产生了可观量的 Hf^{179m} ^[4]，后者的放射性也用放射性测量的丰度分析进行过研究。

2. 钨

Re^{187} 的天然 β^- 放射性仅在数年前才被发现^[5]，这个放射性导致产生稳定的钨同位素^[6]。所以，在含 Re 的矿石中应该有衰变生成的 Os^{187} 存在，其量依赖于矿石的年龄。在先前的一篇论文中，在衰变常数已经很好的确定了的前提下，我们报告了纯由衰变生成的 Os^{187} 自辉钼矿的分离及 Re^{187} 活性用于地质年龄的测定^[7]。

直到今天， Re^{187} 还是具有最低能量的 β^- 发射体 ($E < 7$ 千电子伏)；借计数法直接测量半衰期，由于有很大的自吸收而遇到巨大的困难。我们处理这个问题是靠定量化学分

新母体及子体,也靠计算矿石的年龄。在这个研究中必须测量钷元素的同位素组成(常常存在约1微克/克之量)。Os¹⁸⁷的丰度分析最常用中子活化法,因为质谱仪需要大量的材料。

丰度分析法在这同已说明过的钷的相似。“正常的”钷底7个同位素中只有质量数为184, 190及192的三个同位素俘获热中子而产生放射性核Os¹⁹¹(T=16天), Os¹⁹³(T=1.3天)及Os¹⁸⁵(T=95天)。其他4个稳定同位素Os¹⁸⁶, Os¹⁸⁷, Os¹⁸⁸及Os¹⁸⁹俘获热中子仅仅导致生成稳定的钷同位素。

在我们的来自含Re矿石的Os样品中,我们仅仅必须对待增加的Os¹⁸⁷量。衰变生成的Os¹⁸⁷的丰度(它常常近乎100%)是由中子感生的放射性的不足而得到的。

适量的Os是用特别的烘烤和蒸馏过程定量地分离出来的^[3]。挥发出来的OsO₄用饱和了SO₂的HCl吸收,然后用分光光度计测定红色的硫脲络合物。蒸发出来的Os-硫脲络合物置于中子流为10¹²中子/厘米²·秒的反应堆中照射3天。计数之前,Os样品再度蒸馏,并在载体面前用H₂S沉淀。

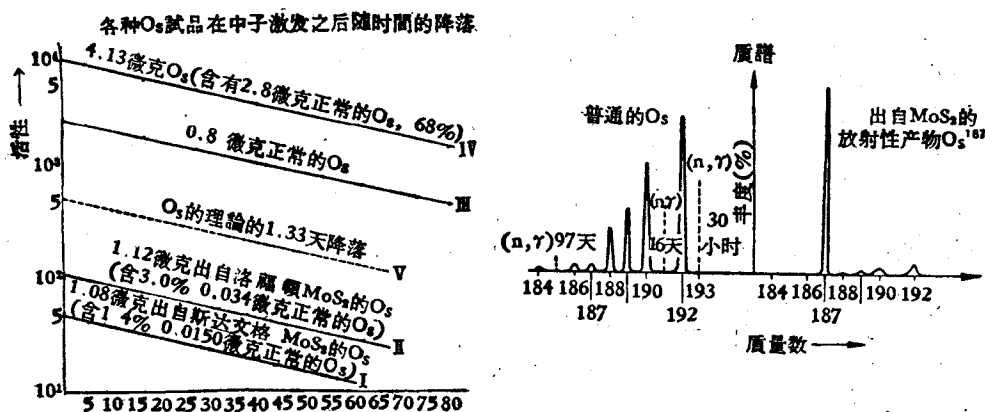


图2 钷的同位素丰度分析的结果。放射性测量法(左),质谱仪检验(右)

放射性测量与质谱仪检验的结果示于图2。左边的图给出来源不同而同时受到照射的Os样品底4条衰变曲线。半衰期为1.33天的Os¹⁹³底衰变曾被严格追踪过。样品I(1.08微克Os)及样品II(1.12微克Os)表现出只有微弱的感生放射性。它们实际上只含有衰变生成的Os¹⁸⁷,并且在这些样品中,“正常的”Os之量是由它们的放射性对“正常的”样品III的放射性之比值推算得到的。依照同样的方法,Os¹⁹¹(T=16天)及Os¹⁸⁵(T=95天)的放射性也可用于Os¹⁸⁷丰度分析法来校正。

辉钼矿-Os的质谱只在质量数为187处有一个峰;这表明有一纯由衰变生成的产物。

放射性测量法的结果是钷中含有98.6%的Os¹⁸⁷在这个特别的场合中,放射性测量法的精确度较质谱仪测定的为佳,因为衰变生成的Os¹⁸⁷中杂有极低浓度的“正常的”Os时,极易由它们的放射性察觉出来。

在表1中列出Os¹⁸⁷丰度分析的结果(这些数据可供地质年龄的测定用),可以看到,在几乎所有的样品中,Os¹⁸⁷的含量都是很高的。

因为大多数这些矿石的来源都是熟知的,也因为年龄能用其他的方便的方法计算出来,天然β⁻放射体Re¹⁸⁷的半衰期能够确定^[9]。半衰期的范围为

$$5.5 \leq T \leq 6.8 \times 10^{10} \text{年.}$$

表 1

样品 序号	矿 样 来 源	矿石量 (克)	Re 的含量 (%)	Os 的含量 (%)	辐生的分 数 (%)	矿石年龄(年) $T(Re^{187}) = 6.2 \times 10^{10}$ 年
辉 钼 矿						
16	挪威, 德列马克, 达林	10.0	0.0517	2.50×10^{-4}	98.7	6.87×10^8
20	挪威, 利瑟, 荷萨斯	5.6	0.0344	1.70×10^{-4}	96.5	6.79×10^8
29	挪威, 培基, 利察米仑	5.9	0.0405	1.97×10^{-4}	97.6	6.76×10^8
32	挪威, 纽梅达耳, 罗拉格 I	18.0	0.0347	1.75×10^{-4}	98.6	7.09×10^8
39	挪威, 洛福顿	20.0	0.0509	7.75×10^{-4}	97.0	2.08×10^9
48	挪威, 斯达文格	1.4	0.3360	1.93×10^{-3}	98.6	8.04×10^8
2B	挪威, 涝京, 苏仑萨森	19.5	0.0108	1.77×10^{-5}	98.9	2.35×10^8
10B	挪威, 基耳德斯卡耳, 奥脱斯特兰	20.0	0.0157	0.67×10^{-4}	99.3	5.65×10^8
15B	挪威, 伊维兰, 特维特	16.3	0.0133	0.82×10^{-4}	99.0	8.82×10^8
18B	挪威, 卑克萊, 柯貝細頓	26.0	0.0083	0.50×10^{-4}	98.7	8.62×10^8
35B	挪威, 諾兰, 瓦特約德	20.3	0.0272	4.34×10^{-4}	99.9	2.29×10^9
36B	挪威, 瓦第格, 吐利卑	25.4	0.0075	3.24×10^{-5}	99.4	6.15×10^8
38B	挪威, 伊維兰, 吐弗丹	17.6	0.0155	7.98×10^{-5}	99.1	9.62×10^8
45	智利, 圣安托尼奥	50.0	0.0519	$< 6 \times 10^{-6}$	—	$< 2.5 \times 10^7$
57	加拿大, 拉柯涅, 普利薩克	22.2	0.0055	3.70×10^{-5}	99.0	9.68×10^8
60	非洲, 納曼夸兰, 克三察珀	16.1	0.0795	1.02×10^{-3}	99.3	1.82×10^9
62	非洲, 果布斯, 納塔斯明	13.8	0.0502	2.02×10^{-4}	98.9	5.51×10^8
硅 鉍 钨 矿						
1	挪威, 伊維兰, 弗利克斯达德	400.0	5.2×10^{-5}	2.75×10^{-7}	12.1	8.38×10^8

在我們測定地質年齡的工作中, 我們採用的數值為

$$T = 6.2 \times 10^{10} \text{年.}$$

3. 錳

為了研究臆測為不穩定的 Ta^{180} 的 β^- 衰變的證據^[10] (瞬間存在的 Ta 的第二個同位素), 我們測量了自老鉍鐵礦中提取出的錳中, W^{180} 的可能的增加。在“正常的”W 中, W^{180} 的存在量僅達 0.14%。 (n, γ) 反應產生 W^{181} , 這是一個 K 發射體, 其半衰期為 140 天。“正常的”W 系由 5 種同位素組成; 如果獲得了反應 $W^{186}(n, \gamma) W^{187}$ ($T = 24$ 小時) 的活性的改變, 間接地測定 W^{180} 也是可能的。這個反應的截面相當高。因此, 可以用中子流較小的中

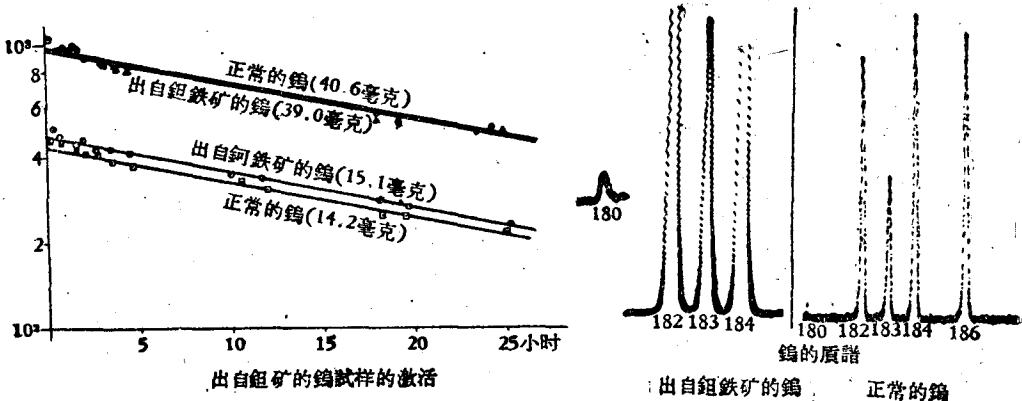


图 3 錳的同位素丰度分析的结果。放射性测量法(左), 质谱仪检验(右)

子源进行活化。

图 3 中给出了中子活化实验及质谱仪检验的实验数据。在实验误差的范围内,每毫克 WO_3 样品(来自钽铁矿和正常的 W 矿)均表现相同的 W^{187} 放射性。

我们必然要得出结论说, W^{180} 的可能的增加量小于 2%。质谱仪分析证实了这个结果。

$$\text{比值 } \frac{W^{180}(\text{衰变产生的})}{Ta^{180}} \text{ 发现为 } 1.8 \times 10^{-3}, Ta^{180} \text{ 衰变常数的上限据此为}^{[11]}$$

$$\lambda_{\beta^-} < 7 \times 10^{-13} \text{年}^{-1}.$$

4. 钌

由中子活化实验得来的关于地壳中存有 Tc 的证据最近已有发表^[12]。为了得到这些发现的独立的校验,我们研究了长寿的 Tc 同位素的可能的衰变产物。

钌是自 24 公斤的前寒武纪钨铁矿、硅铈钨矿及钽铁矿提取出来的,也有自 24 公斤的“卡尔巴”(Carbo)和“卡努第亚布罗”(Canyon Diablo)陨铁中提取出来的。对微量元素钌的同位素组成进行了研究。被中子活化的 Ru 样品(约 20 微克)的衰变曲线表现了正常的 Ru^{106} ($T = 4.5$ 小时)及 Ru^{103} ($T = 40$ 天)的放射性,并且它们的比放射性同由 Pt 矿得来的 Ru 的放射性是完全一样的。

质谱仪的精确的测量证实了这个结果,得到每一克矿石中可能的衰变生成的 Ru^{98} 的含量的上限为 2.0×10^{-12} 克^[13] 衰变生成的 Ru^{99} 底相应数值为 9×10^{-12} 克/克。我们必须作出结论说,在这些矿石中,自从地壳形成以来,没有 β^- 放射半衰期比矿石年龄更短的“Tc”存在。

5. 溴

最后,用放射性测量法分析了溴同位素的丰度^[14]。 $PbBr_2$ 样品用电解部分分开。溴作为 AgBr 用重量法进行定量化学分析。两种溴同位素中的每一个能用中子感生的 Br^{80} ($T = 8.5$ 分), Br^{80m} ($T = 4.5$ 小时)及 Br^{82} ($T = 35.9$ 小时)的三种放射性来校正。值得注意的是,铅没有干扰放射性。

为了计算 Br^{79} 的含量,已知量的 $PbBr_2$ 样品被置于瀑布式的中子源发生器中照射一个短的时期,并且用液体计数管测量 Br^{80m} 的放射性。

另一方面,把微量的 $PbBr_2$ 样品置于反应堆中照射三天,并且将 Br^{82} 置于 10% 的 NaBr 溶液中用相同的方法计数。对于 14 种半衰期,样品均表现合适的 Br^{82} 衰变。这个结果同质谱仪检验测量的结果有良好的符合,并示于表 2。

表 2 用放射性测量法及质谱仪法的同位素丰度分析的结果
 Br^{79} 的含量(%)

样品编号	用中子活化 Br^{80m} 的放射性	用中子活化 Br^{82} 的放射性	用质谱仪
1	55.5 ± 1.0	55.6 ± 1.0	56.500 ± 0.008
2	52.7 ± 1.0	53.4 ± 0.9	53.621 ± 0.009
3	51.4 ± 1.0	51.6 ± 0.9	51.699 ± 0.007
4	51.2 ± 1.5	51.0 ± 1.0	50.868 ± 0.004
正常的样品	—	—	50.414 ± 0.002

如同多数场合一样,利用核反应测定的方法是优越的。值得提出,定量的微量化学分析的可靠性是必须要求的。放射性测量丰度分析的简单就在于消耗的时间相对地较短,并且只要用微克量的样品就能成功地进行分析,这使得放射性测量法成为同位素丰度分析的有价值的实用工具。

参 考 文 献

- [1] Mattauch, J. u. Lichtblau, H. Ein bemerkenswertes Isotop des Cassiopeiums, *Z. Physik*, **111**, 514 (1938).
- [2] Herr, W. u. Merz, E. The Natural Radioactivity of Lutetium-176 and its Possible Application in Geological Age Determination. Proc. Int. Conf. on Radioisotopes in Scientific Research UNESCO/NS/RIC/218, Pergamon Press, London, 1957.
- [3] Herr, W., Merz, E., Eberhardt, P. u. Signer, P. Zur Bestimmung der β -Halbwertszeit des ^{176}Lu durch den Nachweis von radiogenem ^{176}Hf . *Z. Naturforschg.* **13a**, 268 (1958).
- [4] Aten jr., A. H. W. Onderzoek van Hf-Zr mengsels door activeering mit snelle neutronen. *Nederl. Tijdschr. Natuurkunde* **10**, 257 (1943).
- [5] Nalderet, S. N. a. Libby, W. F. Natural Radioactivity of Rhenium. *Phys. Rev.* **73**, 487 (1948); Sugarman, N. a. Richter, H. Note on the "Natural Radioactivity of Rhenium". *Phys. Rev.* **73**, 1411 (1948).
- [6] Hintenberger, H., Herr, W. a. Voshage, H. Radiogenic Osmium from Rhenium-containing Molybdenite. *Phys. Rev.* **95**, 1690 (1954); Herr, W., Hintenberger, H. a. Voshage, H. Half-Life of Rhenium. *Phys. Rev.* **95**, 1691 (1954).
- [7] Herr, W. u. Merz, E. Eine neue Methode zur Altersbestimmung von rheniumhaltigen Mineralien mittels Neutronenaktivierung. *Z. Naturforschg.* **10a**, 613 (1955).
- [8] Merz, E. Untersuchungen über die natürliche Radioaktivität des Lutetiums und des Rheniums und ihre Eignung zur geologischen Datierung. Dissertation Universität Mainz, 1957.
- [9] Herr, W. u. Merz, E. Zur Bestimmung der Halbwertszeit des ^{187}Re . Weitere Datierungen nach der Re/Os-Methode. *Z. Naturforschg.* **13a**, 231 (1958).
- [10] White, F. A., Collins, T. L. a. Rourke, F. M. New Naturally Occuring Isotope of Tantalum. *Phys. Rev.* **97**, 566 (1955); Evans, S. E., Soki, E. G. a. Smith, R. R. Evidence for a Second Naturally Occuring Isotope in Tantalum. *Phys. Rev.* **97**, 565 (1955).
- [11] Eberhardt, P., Geiss, J., Lang, Ch. Herr, W. u. Merz, E. Zur Frage des Zerfalls von ^{180}Ta . *Z. Naturforschg.* **10a**, 796 (1955).
- [12] Herr, W. Über natürliches Technetium. *Z. Naturforschg.* **9a**, 907 (1954); Alperovitch, E. a. Miller, J. M. Occurrence of Tc^{98} in Nature. *Nature* **176**, 299 (1955); Anders, E., Sen Sarma, R. N. a. Kato, P. H. Search for Tc^{98} by neutron activation analysis. *J. Chem. Physics* **24**, 622 (1956).
- [13] Herr, W., Merz, E., Eberhardt, P., Geiss, J., Lang Ch. a. Signer, P. Search for Decay Products of Natural Technetium. Symposium de Geochimie, IUPAC-Congress, Paris, 22. July 1957; *Angew. Chem.* **69**, 690, resp. 768 (1957).
- [14] Cameron, A. E., Herr, W., Herzog, W. u. Lunden, A. Isotopen-Anreicherung beim Brom durch elektrolitische Überführung in geschmolzenem Bleibromid. *Z. Naturforschg.* **11a**, 203 (1956).

原子核的能級密度*

耶尔·納第(M. El-Nadi)† 華菲克 (M. Wafik)†

1. 引 言

最早对于原子核能級密度进行計算的是柏特 (Bethe)^[1], 繼此之后又有不少人做了一系列的工作来改进柏特的理論^[2-5]. 柏特曾利用統計力学的方法解释了能級密度与质量数 A 以及激发能的关系. 一般說来, 这些理論都是与实验很好地符合的^[6], 但它們却无法表明奇偶核^[7]及幻数^[8]核中所观察到的不規則性. 同时还有一个值得我們注意的事实, 这就是近来一些关于核能級密度的測量^[9]在費米气体模型(Fermi gas model)的正确性这一点上作出了各种相互矛盾的結論, 而这个模型正是用以作为上述各种理論的基础的. 在这些实验^[10]中激发能通常是从基态算起的. 可以看到, 研究一下把在原子核基态上由于奇偶及幻数效应而引起偏差归結为涨落的可能性是十分合理的事. 只有在基态能量上消去这些涨落, 我們才有可能研究費米气体模型对于原子核可否应用的問題. 休尔維次 (Hurwitz) 及柏特提出了一个原子核的經過修正的基态能級^[11], 并把它称做“特性能級”(characteristic level). 馮^[12]在他关于非对称裂变問題的工作中曾把休尔維次及柏特的假設应用到裂变产物区域以內的諸原子核上. 实验成功地証明了費米气体模型对这一区域内的原子核的可应用性, 我們曾把馮的工作进一步推广, 計算了质量数在 10 至 250 之間几个全部的原子核, 包括裂变区域在內. 液滴模型的质量公式对于每一类的原子核都进行了修正. 因此特性能級的位置便决定了下来. 借助于对于快中子俘获截面的实验数据的分析, 并利用上述的方法, 我們对費米气体模型的公式进行了驗証, 并定出其中諸参数的数值. 最后并对結果及它們之間可能的相互关系进行了討論.

2. 理論处理

我們假定一个简单的核模型, 在核中包含有 A 个全同的費米-狄拉克粒子, 它們的簡併性很强, 而且彼此之間沒有相互作用. 設令 ϵ_i 表示分立能級(individual energy level), 而 E 表示原子核的激发能. 我們所感兴趣的是对这样的一个问题进行計算: 在总能量为 E' 条件下, A 个核子在各个允許的能級 ϵ_i 上有多少种不同的分布. 我們將以 $p(A, E')$ 来代表这些不同分布种数. 这一問題的严格解是下列的著名的达尔文(Darwin)-否勒(Fowler)积分^[13]:

$$p(A, E) = \frac{1}{(2\pi i)^2} \oint \oint \exp[\alpha A + \beta E + \sum_i \ln(1 + e^{-\alpha - \beta \epsilon_i})] d\alpha d\beta \quad (1)$$

此处 α 及 β 为两个常数, 可由粒子总数及原子核总能量 E' 定出. 我們可以把方程(1)的

* “第二届和平利用原子能国际會議文献”编号 A/CONF.15/P/1481, 阿联, 原文为英文.

† 埃及开罗市埃及原子能委员会理論物理部.

指数中之最后一个改写成积分,依照索末菲(Sommerfeld)的计算^[14],我们有

$$\begin{aligned} \sum_i \ln(1 + e^{-\alpha - \beta \epsilon_i}) &= \int_0^\infty p(\epsilon) \ln(1 + e^{-\alpha - \beta \epsilon}) d\epsilon \\ &= -\alpha A - \beta E_0 + \frac{\pi^2}{6\beta^2} p(\epsilon_0), \end{aligned} \quad (2)$$

于此 $p(\epsilon_0)$ 为在费米能级 ϵ_0 上之能级密度,而 E_0 为整个系统的基态能量.

利用鞍点法(saddle point method)对式(1)的积分进行计算,我们可得

$$p(A, E) = e^S / (2\pi D^{1/2}), \quad (3)$$

其中“ S ”为方程(1)的指数在鞍点处的值, D 是由 S 对于 α 及 β 的二次导数所组成的行列式.

经过简单的计算最后可得出能级密度之表式如下:

$$p(A, E) = (48)^{-1/2} E^{-1} \exp \left[\pi \left(\frac{2E}{3S} \right)^{1/2} \right], \quad (4)$$

其中 $\delta^{-1} = p(\epsilon_0)$ 为各个核子之能级密度,它与质数 A 是线性相关的,即

$$\delta^{-1} = \text{常数} \times A. \quad (5)$$

为了更好地把上面的讨论应用到原子核上去,我们作了一个修正,我们假定原子核是一个由中子和质子所组成的混合系统. 这样一个组合体的问题同样地可以用达尔文-否勒方法来求解,其结果为

$$p(A, E) = \frac{1}{2} \left[\frac{\delta}{216E^5} \right]^{1/4} \exp \left\{ \pi \left(\frac{2E}{3\delta} \right)^{1/2} \right\}, \quad (6)$$

方程(6)式可写作如下形式:

$$p(A, E) = c \exp \left[\pi \left(\frac{2E}{3\delta} \right)^{1/2} \right], \quad (7)$$

其中 c 为一随 E 及 A 变化很慢之函数.

为了和实验相比较从而得出一些推论,我们把式(7)写作如下形式:

$$\delta = \frac{2E}{3} [\pi / (\ln p - \ln c)]^2. \quad (7')$$

方程(6)也可以写成我们所熟悉的形式:

$$p(A, E) = c \exp [2(aE)^{1/2}], \quad (8)$$

其中参数 a 及 c 由下列两式给出:

$$c = \frac{1}{2} [\delta / (216E^5)]^{1/4}, \quad (8')$$

$$a = \frac{\pi^2}{6\delta}.$$

3. 分析与结果

依照核反应的连续理论^[15], 柏特表明^[16]平均辐射中子俘获截面 $\langle \sigma(n, \gamma) \rangle$ 与辐射宽度 Γ_γ 及能级密度 (E) 之关系如下:

$$p(E) = \langle \sigma(n, \gamma) \rangle / (2\pi^2 v^2 \Gamma_\gamma). \quad (9)$$

胡格斯 (Hughes), 等人曾对有效能量为 1 兆电子伏的快裂变中子俘获截面进行了测量。海德曼 (Heidmann) 及柏特^[13]研究了諸辐射宽度, 并证明了它們与 A 平滑相关 (smooth dependence)。

借助于这些数据, 我們便有可能来由式(9)估計激发能 $E = E_n + 1$ 时的能級密度, 此处 E_n 为在复合核中最后一个中子的分离能。

我們將假定^[12]两个相邻的原子核类 A 及 A' 实质上具有同样的参数 δ, c 及 Γ_r 。这个假設只能应用在激发能 E 及 E' 有明显差别的情形。

相应地, 各个核子的能級間隔 (level spacing) 可由式(8') 及式(9) 决定如下:

$$\delta = \frac{2}{3} \left[\pi (\sqrt{E} - \sqrt{E'}) / \{ \ln \sigma(A) / \sigma(A') \} \right]^2 \quad (10)$$

由于奇偶效应及幻数效应的关系, 基态的位置随质量数 A 而作不連續的变化。休尔維次及柏特^[11]认为必須指出, 激发能不能从这些基态算起, 而必須从“特性能級”算起, 它是随着从一个同位素到另一个同位素而平滑变化的。

他們指出, 这个特性能級不能用一个从液滴质量公式所計算出来的能級来表示, 因为它沒有把奇偶能項包含进去。

因此为了对激发能的数值进行計算, 我們就必须先用著名的費米-魏沙格尔 (Weizsäcker) 半理論质量公式来定出特性能級的位置。

这个公式的形式为

$$M(A, Z) = M_A + B_A(Z - Z_A)^2 + \delta_A, \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} M_A &= 1.01461A + 0.014A^{2/3} - 0.041905Z_A, \\ B_A &= 0.041905/Z_A, \\ Z_A &= A / (1.980670 + 0.014962A^{2/3}) \\ &= \frac{0.036}{A^{3/4}} \begin{cases} 1 & \text{奇-奇,} \\ 0 & \text{奇}A, \\ -1 & \text{偶-偶.} \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

將由此公式所得出的质量值与质谱学所得的公式相比較, 可以看到有一个数量級为 10 千电子伏¹⁾ 之誤差。費米-魏沙格尔公式只不过是一个近似, 而且它並沒有考虑到原子核壳层结构之存在。

为了考虑到这些局部的偏离, 一般的方法是对 M_A 及 Z_A 引入某些半經驗的改正 (假定 B_A 及 δ_A 是正确的)。同时为了考虑到在壳层边缘上的突然变化, 我們可以引入一个和 δ_A 相类同的不連續項 μ 。由此可得一个經過修正的质量公式如下:

$$M(A, Z) = M_A + \Delta M_A + B_A(Z - Z_A - \Delta Z_A)^2 + \delta_A + \mu. \quad (13)$$

为了决定 ΔZ_A , 我們把方程(12)所給出的 Z_A 之諸数值与实验上所得出的 β 衰变能之同質异荷曲綫之底部位置相比較^[19]。几乎是对于在 11 至 243 之間的所有奇质量数的同質异荷素都进行了比較。偏离 ΔZ_A 可正可負, 如图 1 所示。电荷修正 ΔZ_A 可画成如图 2 所示之光滑曲綫。

1) 原文为 Nov, 显然系打字誤打, 今試譯为 Kev (千电子伏)——譯者注。

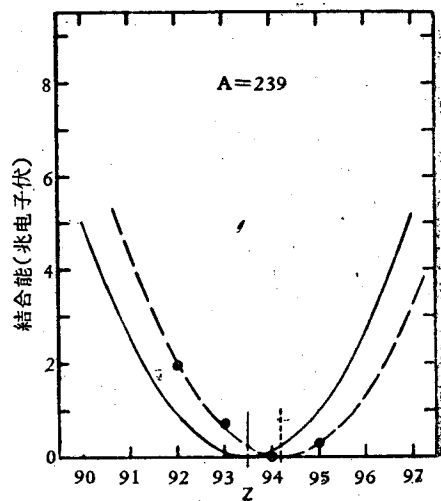
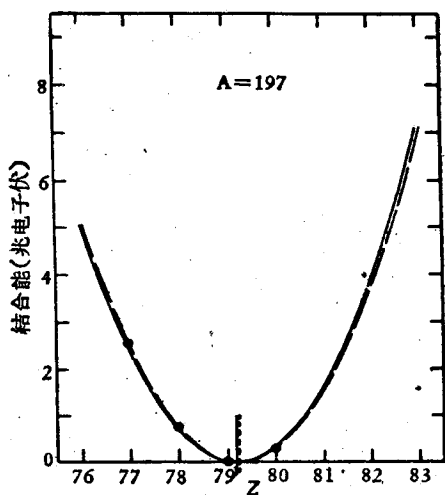
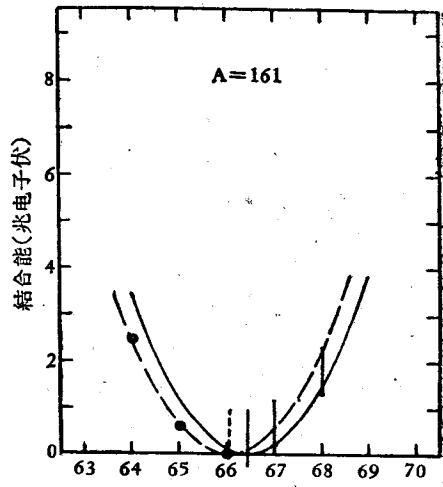
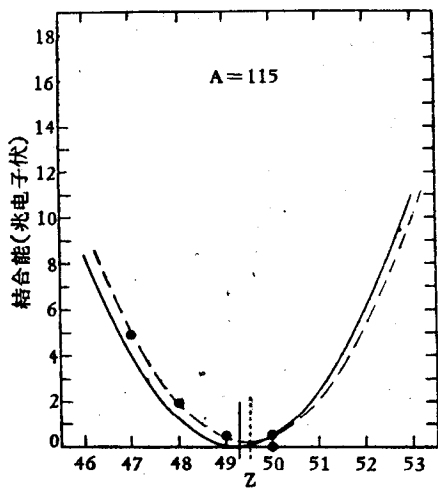
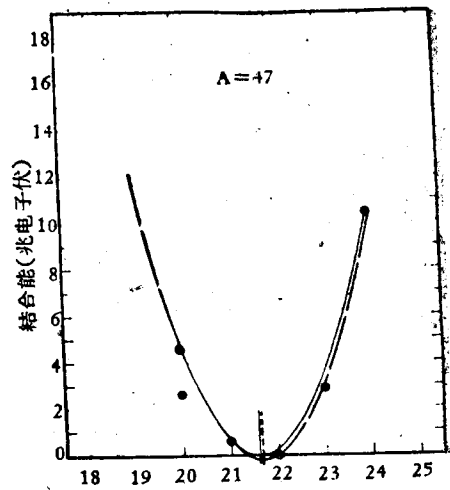
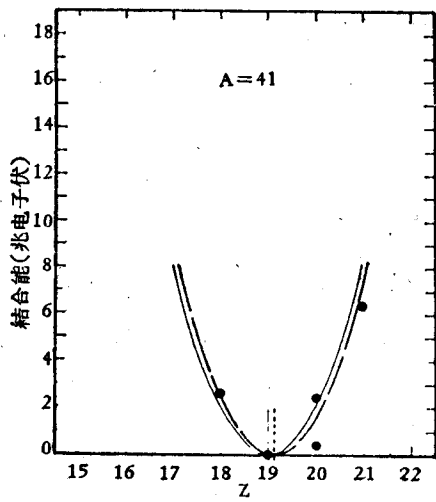
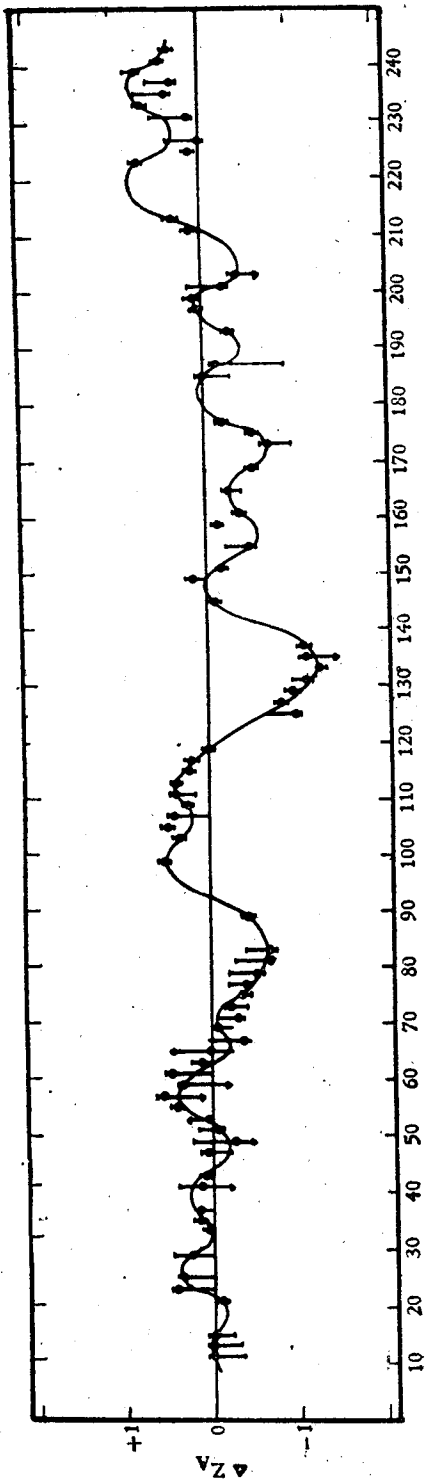
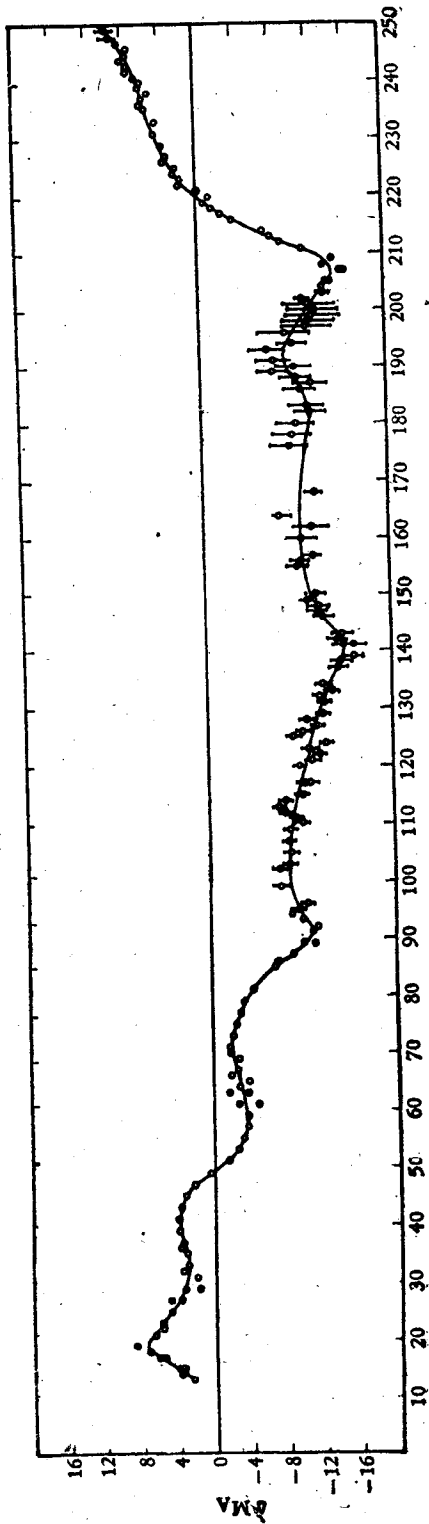


图 1



质量数A
图2 电荷校正曲线



质量数A
图3 质量校正曲线: ○——非幻数核, ●——幻数核, {——加上μ后的幻数核

为了决定 ΔM_A , 我們把式(12)所給出之諸 M_A 值与由质谱学方法所决定的稳定同位素的諸质量相比较。所用的数据是魏伯斯特拉(Wapstra)^[20]的。我們把质量校正 ΔM_A 及其估計的誤差作成一對质数 A 的曲綫, 除在幻数核的各点外, 这条曲綫的絕大部分是光滑的。在原子核壳层附近 ΔM_A 有偏离。因此, 为了考虑这些与幻数相关联的不連續性, 我們引入 μ 。已經求出 μ 之数值在 -0.25 至 -2.0 兆电子伏之間。包含有幻数核在內同質异荷曲綫一般地不能用一个光滑的抛物綫来代表, 如同我們在图 1 中所看到那样。

如果我們把幻数核的质量經過 3μ 項的修正, 我們可以得到一个較好的符合。

若除去 δ_A 及 μ 項, 則式(13)随 A 及 Z 而光滑的变化。这样我們就除去了奇偶效应及与幻数相关联的不規則性的影响, 因之可以作为任一个原子核的特性能級的定义。

可以假定, 所有原子核的特性能級都与奇奇核的基态相重合, 因此給出

$$M_C(A, Z) = M_A + \Delta M_A + B_A(Z - Z_A - \Delta Z_A)^2 + 0.036/A^{3/4}. \quad (14)$$

E 值可由下式求出:

$$E = 931.162[M(A, Z) + M_n + 1 - M_C(A + 1, Z)] \text{兆电子伏}. \quad (15)$$

其中质量的单位为原子质量单位, 能量的单位为兆电子伏。

現在我們可以把激发能的数值代入式(10), 并利用胡格斯等人的实验数据^[17]来定出各个核子能級間隔 δ (对于上面所指的特別选择出的諸对原子核), 其中胡格斯等人的实验数据是指对于相应核的快中子俘获截面的数据。

对于这些核, 我們作成数量“ a ” ($= \frac{\pi^2}{6\delta}$) 对质量数 A 的曲綫, 对于絕大多数点來說¹⁾ 它

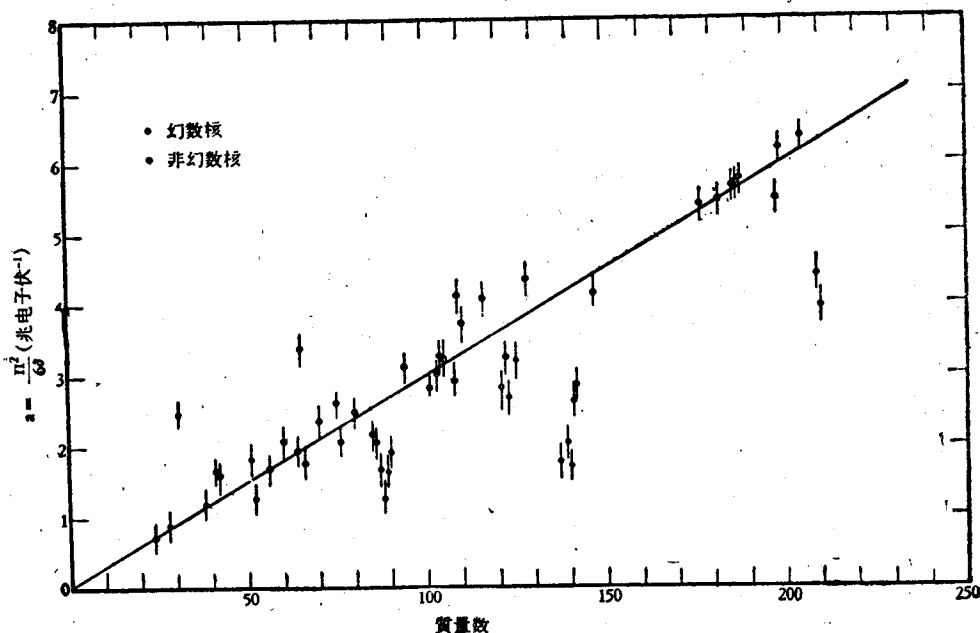


图 4 費米气体模型的适用性: 数量“ a ” $= \frac{\pi^2}{6\delta}$ 对质数 A 之曲綫

1) 这儿是与馮^[21]在质量区域 71—165 之間所得之数值 $a=0.05A$ 相比較而来的。

是一根直線。这条直線是

$$a = 0.03A \text{ 兆电子伏}^{-1}. \quad (16)$$

为了决定对于其他核“ a ”之真正数值,我們將假定式(16)所表之綫性关系在一級近似下是正确的。利用(15), (8)两式及能級密度的測量值,我們可以决定另一个参数“ c ”的值。显然,从“ c ”与“ a ”和質数 A 之关系可以看到,依照費米气体模型,参数“ c ”的数值随 A 的变化不是非常灵敏的。因此,“ c ”的計算值可以用一个簡單的光滑曲綫来代表,而不致在“ a ”的数值上引起更多的誤差。

在馮^[12]的工作中这条曲綫被取作直綫。在現在这个工作中把“ c ”的数值表示成一根輕度弯曲的綫:

$$c = 0.082 \exp[0.071A - 0.00026A^2], \quad (17)$$

因而得到了对于“ a ”及“ c ”二者数值的更好的表式。借助于这些我們认为是正确的“ c ”的数值、以前所定出的能級密度以及式(8),我們可以計算参数“ a ”对于所有原子核的值。这些在图4中表示了出来。这张图清楚地表明了“ a ”与質数 A 的綫性关系,这是与費米气体模型的預測完全一致的。

考虑到特性能級的存在,計算那些我們认为与費米气体模型相矛盾的原子核的参数 a 的工作正在进行中。

我們希望,通过这样一个方法,那些矛盾可以获得解决。

参 考 文 献

- [1] H. A. Bethe, *Phys. Rev.*, **50**, 332 (1936); *Revs. Modern Phys.*, **9**, 69 (1937).
- [2] G. Van Lier and G. E. Uhlenbeck, *Physica*, **4**, 531 (1937).
- [3] J. M. B. Lang and K. J. Le Couteur, *Proc. Phys. Soc. (London)*, **A 67**, 585 (1954).
- [4] C. Block, *Phys. Rev.*, **93**, 1094 (1954).
- [5] N. Rosenzweig, *Phys. Rev.*, **105**, 950 (1957).
- [6] P. C. Gugelot, *Phys. Rev.*, **81**, 51 (1951); *Ibid*, **93**, 425 (1954).
- [7] Feld, Feshbach, Goldberger, Goldstein, and Weisskopf, U. S. Atomic Energy Commission NYO-636 (Unpublished) pp. 176, 185.
- [8] H. W. Newson and R. H. Rohrer, *Phys. Rev.*, **87**, 177 (1952).
Asaro and I. Perlman, *Phys. Rev.*, **87**, 393 (1952).
P. Staehelin and P. Preiswerk, *Helv. Phys. Acta*, **24**, 623 (1952).
P. J. Grant, *Proc. Phys. Soc. (London)*, **A65**, 150 (1952).
B. B. Kinsey, Report to the Brookhaven Conference on Neutron Physics, November 1950, (Unpublished).
- [9] G. Igo and H. E. Wegner, *Phys. Rev.*, **100**, 1364 (1955).
- [10] K. G. Porges, *Phys. Rev.*, **101**, 225 (1956).
Eisberg, Igo and Wegner, *Phys. Rev.*, **100**, 1309 (1955).
G. Igo, *Phys. Rev.*, **106**, 256 (1957).
- [11] H. Hurwitz and H. A. Bethe, *Phys. Rev.*, **81**, 898 (1951).
- [12] P. Fong, *Phys. Rev.*, **102**, 434 (1956).
- [13] R. H. Fowler, *Statistical Mechanics* (MacMillan Company, New York, 1936).
- [14] A. Sommerfeld, *Z. Physik*, **67**, 1 (1923).
- [15] J. M. Blatt and V. F. Weisskopf, *Theoretical Nuclear Physics* (John Wiley and Sons, Inc. New York, 1952).
- [16] H. A. Bethe, *Phys. Rev.*, **57**, 1125 (1940).
- [17] Hughes, Garth and Levin, *Phys. Rev.*, **51**, 1423 (1953).
- [18] J. Heidmann and H. A. Bethe, *Phys. Rev.*, **84**, 274 (1951).
- [19] Way, Fano, Scott and Thew, Nuclear Data, National Bureau of Standards Circular No. 499 (U. S.

Government Printing Office, Washington, D. C., 1950) and Supplements; Way, King, McGinnis and Van Lieshout, Nuclear Level Schemes ($A=40 - A=92$), U. S. Atomic Energy Commission.
[20] A. H. Wapstra, *Physica*, **21**, 367 (1955).

关于質量約 $550m_e$ 的粒子的存在的实验

杜尔伽·普拉薩德(N. Durga Prasad) 夏尔馬(O. P. Sharma)

I. 引 言

1956年在莫斯科高能物理會議上, 阿里罕梁 (Alikhanian) 等人^[1]作了关于有質量約为 $550m_e$ 的粒子存在迹象的报告。观测是在阿拉杰茲山上 (Mt. Alagez, 3250 公尺) 研究慢宇宙綫粒子的質譜时进行的。实验的布置包括一个测量粒子动量用的时距記錄磁譜仪 (hodoscoped magnetic spectrometer) 和两个多板云室 (multi-plate cloud chambers), 一个在磁譜仪上面, 一个在下面。每个粒子的質量由在磁譜仪中测得的动量和在下面的云室中测得的射程来确定。这样得到的質譜有属于 μ 介子、 π 介子、K 介子、以及質量大于或等于质子質量的粒子的; 此外, 还有一个峯 (包含 11 个粒子), 它是属于以前所不知道的、質量約为 $550m_e$ 的粒子的。这个峯只在从宇宙綫束进入仪器的慢粒子的質譜中被观察到; 在位于磁譜仪上边的多板云室里面由核的相互作用而产生的慢粒子質譜中未曾出現。在这 11 个粒子中, 9 个是負的, 2 个是正的。

这些粒子如果真的存在, 就应当具有下列性質:

質量: $\sim 550m_e$; (每个粒子的質量測定誤差在 40—50 m_e 內);

丰度: 在 2—5 厘米鉛板的相同範圍內, 与 μ 介子相比为 1/2%。

寿命: 可和 μ 介子寿命相比較或更长些, 即 $\geq 10^{-6}$ 秒。

品类: 可能是 μ 介子型, 因为在核的相互作用中沒有看出产生什么。

电荷: 主要是負的 (負的与正的之比約 5)。

衰变: 一个可能的、但是可疑的例式被看作一个小的电子簇射, 連同这种粒子的駐点。

这样質量的粒子在早期文献中^[2-5]曾被报导过, 那时宇宙綫粒子的質譜是在海平面或山頂高度測定的。可是, 鉴于統計的不充足和質量測定的可靠性有限, 这些观测沒有多少重要的意义。

必須老实地指出, 尽管質量相同, 阿里罕梁等所报导的粒子^[1]完全有别于带电的 ξ 介子^[6-8]。在照相乳胶中明显地观察到后者是由核的相互作用产生的, 而且其中有一些以极短的寿命和极少的能量释放而衰变。关于 ξ 介子的証据从来未被証实过, 而且关于它的存在的早期观测实质上已經被收回。

苏联科学家所观察到的那种粒子, 有着微小的相对丰度, 只有在关于宇宙綫粒子質譜的系統实验中才观察得到。有着上举的若干性質, 在前几年所进行的云室实验中, 那是很难把它們探察出来的, 那些云室实验实质上是针对重的不稳定的粒子 (K 介子和超子) 的性質及研究貫穿簇射的; 对于这些研究, 云室由于有快速原粒子所引起的核相互作用而被

* “第二届和平利用原子能国际會議文献”編号 A/CONF.15/P/1631, 印度, 原文为英文。

† 孟买塔塔基本科学研究所。