

中間成象式 β 譜儀*

周月華 翁培焜 鄭林生

本文所报导的中間成象式 β 譜儀是縱向磁譜儀的一種。它具有比雙磁鏡譜儀更理想的磁場分布,因此,在同樣分辨率的条件下透射率更大。儀器達到的性能:當放射源直徑為1毫米時,分辨率为1.5%,透射率为2.5%。這儀器供放射性同位素的 β , γ 射線能譜研究之用,可以測定的電子能量范围从几个千电子伏特到2.5兆电子伏特左右。

一、引 言

β 磁譜儀是研究原子核能譜的重要工具。利用這種儀器可以精確地測定原子核放射的 β 、 γ 射線的能量,以及原子核能級的其他重要性質,如宇稱和自旋等。

β 磁譜儀大体上可分为二類,一類是橫向磁譜儀,另一類是縱向磁譜儀。我們所建造的中間成象式 β 譜儀是属于后一類的。縱向磁譜儀和橫向磁譜儀相比較的特点是透射率較大,但是分辨率較差。由于透射率大,就可以測量較弱的放射性,从而可以利用較薄的放射源,減少源本身的自吸收与自散射,这对于研究低能电子譜來說是一个很大的优点。

关于縱向磁譜儀的种类及特性,在其它論文中已有較詳的介紹,所以不再重复。雙磁鏡譜儀比長或短磁鏡譜儀來說,具有較理想的磁場分布,因此分辨率較好。1949年西格帕恩(Siegbahn)与茲累提茲(Slatis)^[1]設計的中間成象式 β 譜儀,使磁場分布更趨于理想磁場。這種譜儀的聚焦环是在垂直于譜儀軸綫的中心平面上(电子軌道如图1所示),所以第二“点象”的象差較雙磁鏡譜儀的小,在同樣分辨率的情况下,透射率要比雙磁鏡的大。

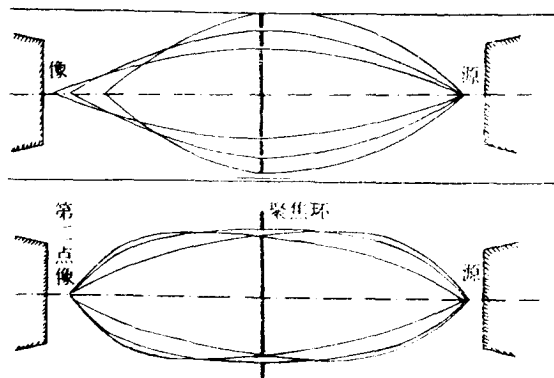
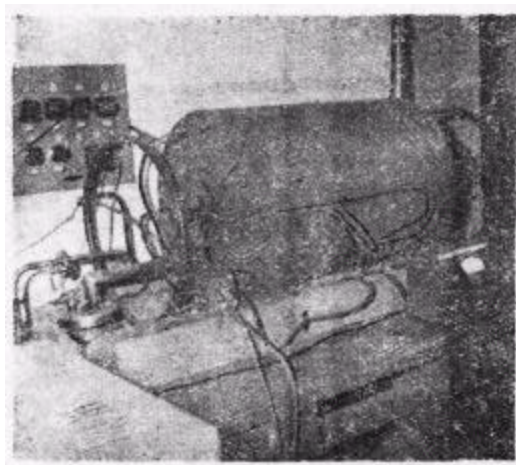
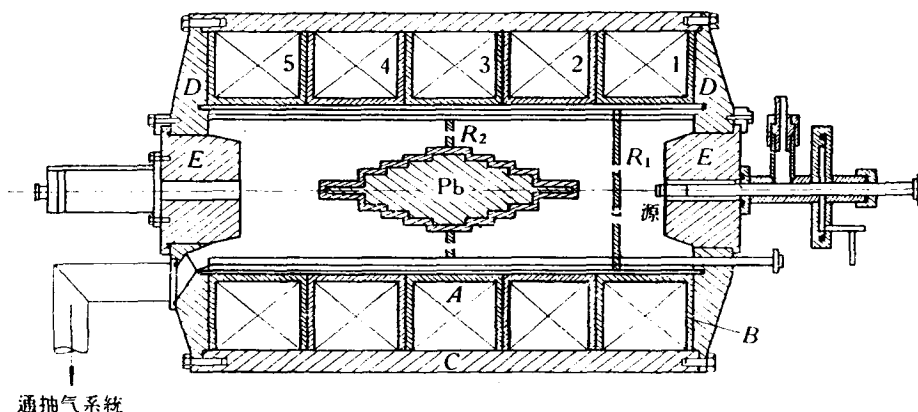


图1 上图:在均匀磁場中的电子軌道
下图:中間成象磁場中的电子軌道

二、建 造

我們建造的中間成象譜儀的全貌如图2所示,总装配图如图3所示。主要部分包括有五个綫圈和鋼壳組成的磁迴路,和放在綫圈中心部分的真空室。真空室内部有两个障板。譜儀的两端分別安裝放射源架和計数管。在計数管同端的圓盘极板上有連接抽气系

* 1961年5月3日收到。

图 2 中间成象式 β 谱仪外貌图 3 中间成象式 β 谱仪总装配图

A——谱仪线圈；B——线圈铜架；C——圆筒形钢壳；D——圆盘形钢壳；
E——精极； R_1 ——出射障板； R_2 ——中间障板；Pb——铅体。

统的通路。谱仪的供电电源用直流发电机再加上磁场电流稳定器。现把各部分的详细结构分述如下：

1. 线圈和冷却系统

谱仪共有五个大小相同的线圈，它们的作用是使通电流后产生所需要的磁场分布。每个线圈绕在用黄铜制成的架子上，铜架的两壁用厚 9 毫米的黄铜板制成，在铜架的内壁用烘干绝缘漆粘上一层黄蜡绸作绝缘保护。线圈采用 3.51×5.1 毫米的国产双纱包扁铜线绕成，每个线圈有 28 层，共 585 匝。每个线圈的电阻为 0.73 欧姆。五个线圈台在一起的总长度为 790 毫米，总重量为 800 公斤左右。

考虑到磁场分布的要求，通过谱仪每个线圈电流的大小相差很大。通过中间三个线圈的电流为总电流的 $1/16$ ，所以实际上中间三个线圈所通电流很小，不加冷却装置仍然不致有过高的温升。靠两旁的两个线圈，通过的电流很大，所以采用了特殊的水冷却装置，使在测量的能量范围内，线圈通电流后不致有过高的温升。

2. 鋼壳

鋼壳的作用是为了增加磁場強度, 實驗結果測定在有鋼壳時比沒有鋼壳時的磁場強度增加四倍左右; 而且它有屏蔽外磁場干擾的作用。鋼壳由三部分組成: (1) 厚度為 30 毫米, 長為 804 毫米的圓筒形鋼壳。為了安裝及檢修時方便起見, 把鋼壳橫切為兩半, 並留有小空隙來通冷却水管用; (2) 兩個圓盤形磁極板, 中間各開一圓孔, 用來安裝精極。以上兩部分的材料採用文尤 1 號鋼; (3) 精極。兩個精極置於譜儀兩端, 它的大小剛能裝入極板的圓孔內。精極要求有高的磁導率, 因為產生的磁力綫全通過它。如果這部分很快趨于飽和, $I \sim H$ 直綫性關係就不能維持。採用的材料是用 0.8 弗鋼加鍛後製成的, 加工要求很精細。同時極面要非常光滑, 這樣可使磁場分布軸向對稱。

3. 真空室、障板與抽氣系統

真空室是用無縫黃銅管製成的, 它的直徑為 254 毫米。真空室的內壁包上一層 2 毫米的鋁板來減少散射。在圓盤狀的極板上挖一個圓圈的方槽, 墊上橡皮圈, 真空室就頂在槽上。另外精極上也開槽, 加“O”圈密封構成真空室, 這樣做的效果很好, 不會漏氣。

真空室內有二個障板 R_1 和 R_2 。 R_1 障板由厚為 8 毫米的鋁板製成, 作為射綫的出射光闌。 R_2 是中央環聚焦的障板。 R_2 中間夾一鉛體外包鋁, 主要作用是擋住放射源的 γ 射綫。鋁板的厚度可以利用西格帕恩(Siegbahn)書^[2]中的公式計算, 根據譜儀所要測的 β 射綫的不同能量計算決定所需鉛板的厚度。

抽氣系統接在計數管同端的圓盤極板上, 在極板上開一斜入圓孔接擴散抽氣機和機械抽氣機。機械抽氣機的抽氣速率為 100 立升/秒, 經 20 分後可以使真空室內抽空到 2×10^{-2} 毫米水銀柱; 然後再把擴散泵加熱, 大約再抽 15—20 分鐘後真空度達到 $\sim 10^{-5}$ 毫米水銀柱, 這樣已適合實驗的要求了。擴散抽氣機冷却設備裝有自動停水保險設備, 防止水中斷所引起的事故。

4. 穩流裝置

為了得到恆定磁場, 要求通過綫圈的直流電流是穩定的。我們採用一套負反饋伺服控制的辦法來穩定電源。綫圈電流的穩定度達到五分鐘內為 0.02—0.05%, 能夠連續地由 1 安培到 60 安培之間自由調節所需電流值, 電流的相對數值通過電位計讀出。

穩流裝置的作用原理如下: 首先將輸出電流通過標準電阻, 所產生的電壓與參考電壓比較, 把形成的誤差訊號加以放大, 並以負反饋系統來補償譜儀綫圈迴路的電流, 使其維持原來的穩定狀態。穩流器的方塊圖表示在圖 4。

穩流器的整體結構可分為以下幾部分:

(1) β 譜儀綫圈。由五個綫圈串、並聯而成。綫圈外面圍以鋼壳。每個綫圈的電阻為 0.73 歐姆, 聯接起來後總電阻為 1.4 歐姆。

(2) 大發電機。大發電機的最大輸出電壓為 110 伏特, 最大電流為 96 安培, 功率為 11 瓩。勵磁綫圈電阻為 27.2 歐姆, 並附有一個補償起動器。輸出電流為 90 安培時, 勵磁電流約為 3 安培。在工作範圍內的電流增益約為 30 倍。

(3) 電機放大機。電機放大機系用蘇聯 9MV-5A 型的、勵磁綫圈電阻為 2000 歐姆, 最大輸出電流為 4.56 安培。當勵磁電流為 5 毫安時, 輸出電流為 3 安培, 所以電流增益約為 600 倍。

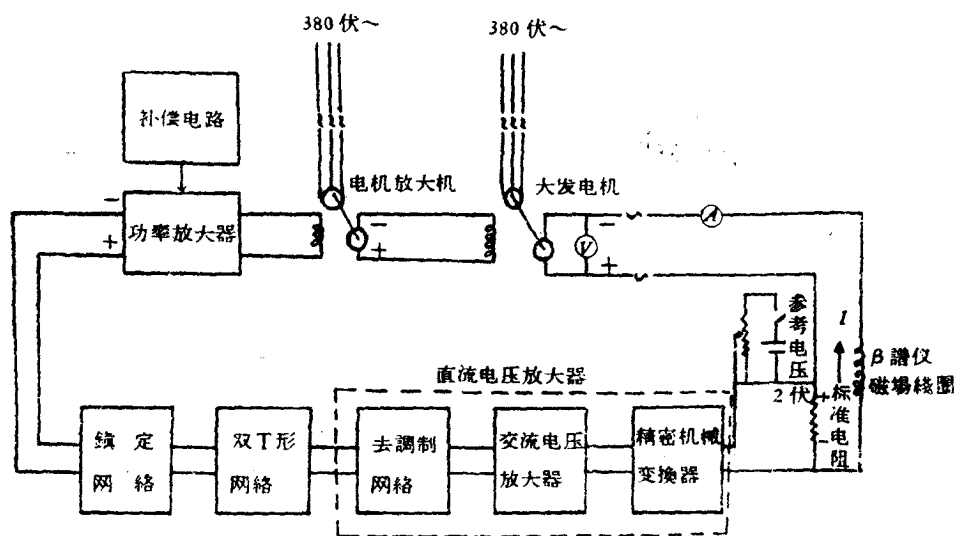


图 4 稳流器方块图

(4) 参考电压. 参考电压用 2 伏特的玻璃装酸性蓄电池. 这种蓄电池的电压稳定度约为 0.001%.

(5) 标准电阻. 标准电阻用锰铜带做成, 每根锰铜带宽约 1 厘米, 长为 89 厘米, 电阻值为 0.04 欧姆, 用两个并联成为 0.02 欧姆的标准电阻.

(6) 直流电压放大器, 包括精密机械变换器、交流电压放大器及去调制网络. 精密机械变换器可以把输入的直流讯号变为交流讯号输出. 变换器用 PII-5 型, 输出的讯号为 50 周/秒的矩形波. 矩形波输入第一放大级经放大后, 再输入第二放大级. 这时为了使矩形波所含的 50 周/秒的谐波除去, 加了一个 T 形网络. 调节 T 形网络的电阻值, 可以达到去除谐波的要求, 这样便于以后的去调制. 50 周/秒的正弦波输入到第三放大级, 经板极变压器输出后, 利用 6AL5 二极管去调制, 整流后的直流讯号输入到双 T 形网络中去.

(7) 双 T 形网络. 由于直流电压放大器的输出讯号中有纹波. 这纹波经过两级镇定网络放大后, 将产生较大的交流讯号输入于功率放大器的栅极. 这样, 就妨碍了功率放大器的正常工作, 所以必须使纹波减至最小. 这种纹波中以 100 周/秒的振幅为最大,

所以必须设法去除或减少 100 周/秒的讯号. 去除的措施就是采用双 T 形网络. 这种网络的特点是, 如果网络中元件配置适当时, 则可对某一频率产生最大的阻抗, 使输出纹波讯号大为减少. 在我们设计中所采取的线路如图 5 所示.

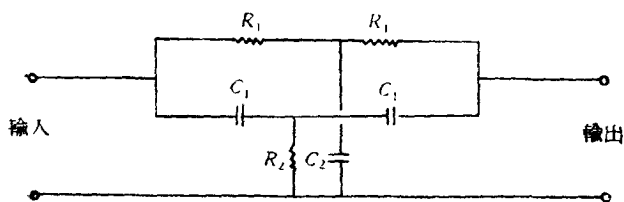


图 5 双 T 形网络线路图

其中 $R_1 = 2R_2$, $C_1 = \frac{1}{2} C_2$, 产生最大阻抗的频率 $\omega = \frac{1}{R_2 C_2} = \frac{1}{R_1 C_1}$. 我们选用的

电容、电阻值为 $C_1 = 2000$ 微微法, $C_2 = 4000$ 微微法, $R_1 = 1$ 兆欧姆, $R_2 = 500$ 千欧姆, 此线路可以使 100 周/秒的交流讯号电压减弱 40 倍。

(8) 鎮定网络。在我們描述的系統中有四个時間常数, 即直流电压放大器的時間常数、电机放大机的励磁繞圈的時間常数、大发电机励磁繞圈的時間常数、 β 譜儀磁場繞圈的時間常数。这将可能发生低頻振蕩, 試驗結果証明了这一点。所以加入了兩級鎮定网络。我們所采用的是超前鎮定网络, 采用的時間常数第一級是 0.025 秒, 第二級是 0.035 秒。为了不使接上鎮定网络后減少放大倍数, 所以用了二級放大器以补偿鎮定网络輸出的損失。

(9) 功率放大器。电机放大机所要求的励磁电流很小, 只要几个毫安就够了, 所以功率放大器只用一个三极管 6SN7 的单管阴极輸出器就已足够。

(10) 补偿电路。补偿电路是用来产生一反向直流电流通过功率放大器的輸出端, 使功率放大器在低电流輸出时有一反向电流。因此, 总的輸出电流为負。这样, 可以抵消由于电机放大机, 大发电机的剩磁所产生的起始电流。于是, 我們就可以使大发电机的輸出电流从 1 安培变到 60 安培。我們所采用的补偿电路并有負反饋控制作用, 可以得到較稳定的电流。

5. 計数管

通常我們采用二种 β 計数管进行測量。用云母窗厚度約为 3 毫克/厘米² 的钟罩形 β 計数管測得 Cs^{137} 的能量如图 6 所示, 由图中可看出低能部分的計数由于窗的吸收而損失。我們还用克罗旬 (collodion) 薄膜做計数管的窗測量过 Cs^{137} 、 Tm^{170} 、 Gd^{159} 等的能譜, 得到的能譜的低能部分損失較小。8 千电子伏特以上的电子都可以通过計数管的薄窗。

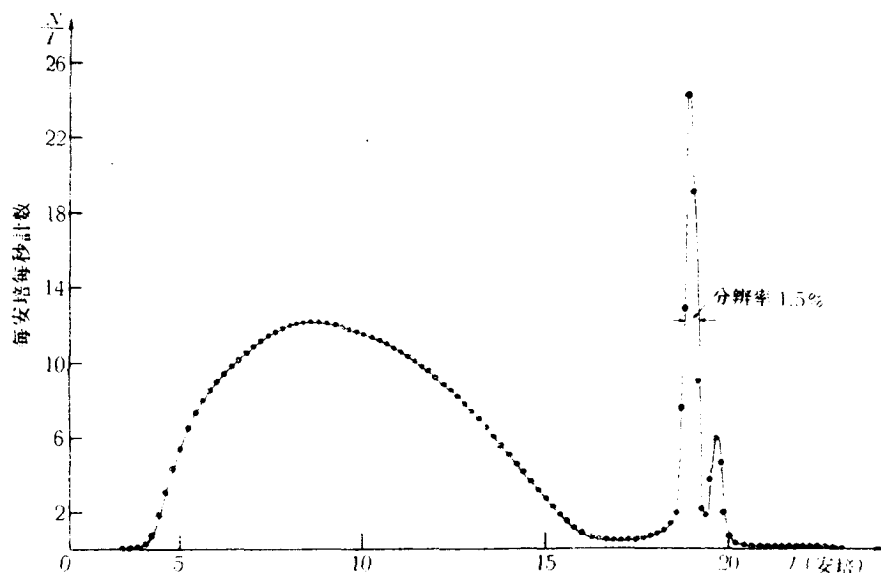


图 6 Cs^{137} 的 β 能譜

三、磁場測量与仪器的校准

1. 磁場測量

中間成象的磁場分布表示在图 7 中。設 I 为总电流, 則采用电流比为 $\frac{I}{I_{2,3,4}} = 16$ 时可得到中間成象式的磁場分布。磁場測量是采用一个小試驗綫圈放在中心軸綫上, 磁場強度变化由零到某定值 H 时, 試驗綫圈中产生感应电流, 用冲击电流計观察感应电流的大小, 便可以測量磁場准确到 0.5% 左右。

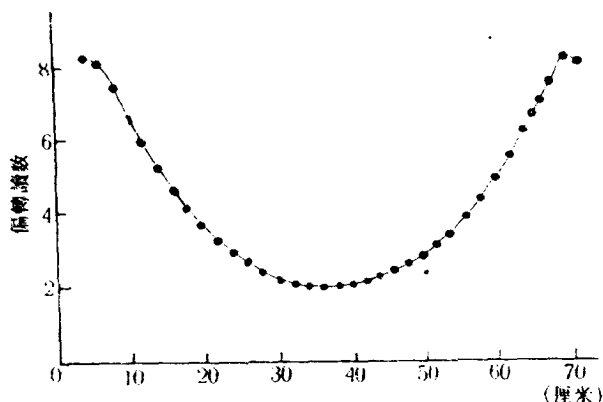


图 7 中間成象的磁場分布

2. 分辨率的校准

譜仪調整到最好的情况是: 当放射源的直径为 1 毫米时, 中間障板 R_2 的縫为 2 毫米时, 得到分辨率为 1.5%, 透射率为 2.5% 左右。譜仪分辨率的校准是用 Cs^{137} 的放射源来进行的(見图 6)。 Cs^{137} 的連續譜測量結果如图 8 曲綫 a 所示, 費米 (Fermi) 标繪如图 8 曲綫 b 所示。 Cs^{137} 的 521 千电子伏特的 β 射綫能量定得很好。

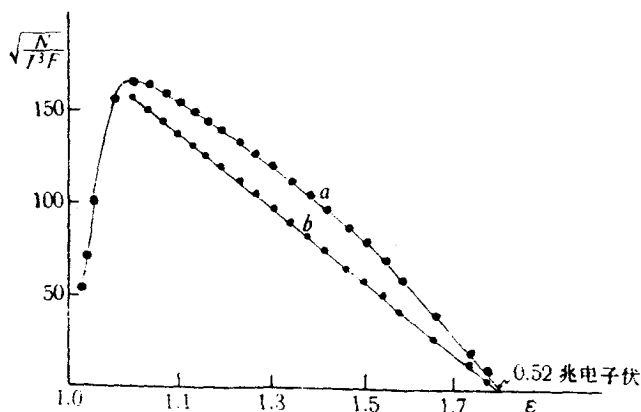


图 8 Cs^{137} 的費米标繪

曲綫 a ——未加校正时的情况; 曲綫 b ——经过一級 α 型禁戒跃迁校正的情况。

校准时发现計数管与放射源的位置对称时,分辨率与透射率都較好。放射源与計数管位置在磁場最高处条件最好。放射源位置对于分辨率的影响很大,源位置从最佳处移动 1 毫米时分辨率由 1.5% 变化为 1.8%。計数管位置的变动沒有这样灵敏,这是由于計数管的窗口大的緣故(半径为 1 厘米左右)。放射源大小对于分辨率的影响如下表所示:

放射源直径(毫米)	分辨率%
1	1.5
1.5	1.7
2	2.1
3.5	4

源的直径大,計数率增高,但分辨率变坏,单位面积的透射率沒有改变。

障板 R_1 对透射率影响大, R_1 向中間部分移动 20 毫米,透射率减小几十倍;中間障板 R_2 对分辨率的影响也很大。

中間障板 R_2 縫寬(毫米)	分辨率%
8	7.3
3	2

我們采用了西格帕恩(Siegbahn)书^[3]中的方法进行对譜仪透射率的測定,測量結果在分辨率为 1.5% 时透射率为 2.5% 左右。

利用中間成象式 β 譜仪,我們已进行过 Cs^{134} 、 Gd^{159} ^{[4][5]} 放射性同位素 β 能譜和 γ 射綫內轉換綫的能譜的測定,測定結果已发表。

中間成象式 β 譜仪目前仍在发展阶段,現在这类譜仪已能改进性能到达測量能量范围为 1 千电子伏特到 8.3 兆电子伏特左右的电子,在透射率为 1% 时分辨率达到 0.7%。

最后,我們对在譜仪建造过程中工厂工作同志們所給予的协助以及在譜仪調整过程中实驗室工作同志們所給予的帮助,表示感謝。

参 考 文 献

- [1] H. Slatius, K. Siegbahn: *Ark. f. Fysik* **1**, 17, (1949) 339.
- [2] K. Siegbahn: *Beta-and Gamma-Ray Spectroscopy*, Chap. 1, p. 21, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, (1955).
- [3] K. Siegbahn: *Beta-and Gamma-Ray Spectroscopy*, Chap. XXVI, §3, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, (1955).
- [4] 周月华等: *物理学报* **16** (1960), 401.
- [5] 謝寬仲等: 将在物理学报上发表。

β -СПЕКТРОМЕТР С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЕМ

Чжоу Юе-хуа, Вун Пэй-кунь, Чжэн Линь-шэн

Резюме

β -спектрометр с промежуточным изображением, представляет собой один из видов продольных магнитных спектрометров. В нём имеется лучшее распределение магнитного поля, чем в обычных двухлинзовых магнитных спектрометрах. По этой причине при одинаковой величине разрешающей способности он обладает более высокой светосилой.

Характеристики данного прибора следующие:

Для источника с диаметром 1мм его разрешающая способность равна 1,5% и светосила—2,5%.

Этот прибор применяется к исследованию β , γ -спектров радиоактивных изотопов. Область измерения энергий электронов распространяется примерно от нескольких кэв до 2,5 Мэв.