

双磁鏡 β 譜儀*

梅鎮岳 徐英庭

本文所述的双磁鏡 β 譜儀供研究放射性同位素以及核反应产物的 β , γ 能譜之用。儀器的性能如下:分辨率 1.5%,透射率~1%。綫圈通过的最大电流約 50 安培,可以測量 9 兆电子伏左右以下的电子的能量。

一、引言

在原子核能譜学中磁性 β 譜儀占有很重要的地位。它的发展历史很久,到現在磁性 β 譜儀的种类已很多。根据磁場的分布和它聚焦的特性, β 譜儀可以分为两大类:横向磁場 β 譜儀与纵向磁場 β 譜儀。前者电子在磁場中的軌迹主要是与磁場方向相垂直的,后者主要是与磁場方向相平行的。由于磁場的分布和聚焦特性不同,横向磁場可以分为: 180° 半圓式、三級单向聚焦式、双聚焦式等,纵向磁場可以分为:螺綫管式、短磁鏡式、长磁鏡式、双磁鏡式等。

分辨率与透射率是 β 譜儀的主要性能。分辨率 $\frac{\Delta P}{P}$ 是单值能量譜綫的半寬度 ΔP 与它动量 P 的比值。透射率是放射源放出的 β 粒子能够聚焦后被探测器記錄的百分数。由于象差,分辨率与透射率是 β 譜儀互相矛盾的二个性能,改进 β 譜儀的分辨率,时常只能牺牲它的透射率。实验的正确性不仅仅与 β 譜儀的分辨率有关,在很多情况下,如不能得到足够強度的放射性同位素,我們时常宁愿牺牲 β 譜儀的分辨率而提高它的透射率。

最早用磁場方法来分析 β 能譜的要算 Baeyer 和 Hahn^[1],1910 年他們用均匀磁場使放射源 S 放出的 β 粒子偏轉,用照相机記錄(图 1)。由于 β 粒子的能量不同,通过狭縫 B 后,記錄

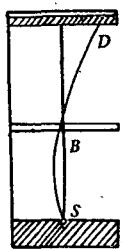


图 1 直接偏轉法

S —放射源; B —狭縫; D —照相机板

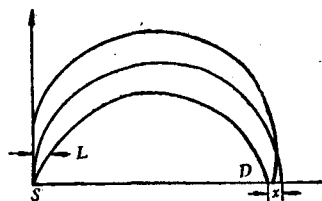


图 2 半圓型 β 譜儀內的单值能量 β 粒子的軌道

在照相机 D 不同的位置上。在直接偏轉法的装置中沒有聚焦作用,因此分辨率不好。从这个实验可以看出,横向磁場在分析 β 射綫时的作用,与三稜鏡分析日光光譜的作用一样。

1911 年 Danysz^[2] 指出,在均匀磁場中用半圓形軌道可以得到聚焦。半圓型 β 譜儀比直接偏轉法分辨率提高很多。图 2 是半圓型 β 譜儀聚焦的原理。从放射源 S 中放出的 β 粒子經過狭縫 L 后聚焦在照相机 D 上。根据計算,如果 ΔS 是放射源的寬度,而从放射源 S 射出、被狭縫 L 限制的 β 粒子束,在垂直磁場方向与平行磁場方向的张角分别为 ϕ , ψ 时,則单值能量

* 本文于 1956 年 7 月写成。

β 粒子在照相片 D 上綫譜的底寬度为:

$$\Delta x = \Delta S + \rho(\phi^2 + \psi^2),$$

式中 ρ 是軌道的半径, $\rho(\phi^2 + \psi^2)$ 二項是由于电子光学系統聚焦不完善所造成的象差而引起的。由于象差項 $\rho(\phi^2 + \psi^2)$, 尤其是在平行于磁場方向沒有聚焦作用而引起的象差項 $\rho\psi^2$, 使半圓型的 β 譜儀的透射率很小。1946 年 K. Siegbahn 和 N. Svartholm^[3] 提出改正均匀磁場, 消去象差項 $\rho\psi^2$, 在平行于磁場方向上也有聚焦作用的双聚焦原理。它的作用原理最初是从研究电子在电子迴旋加速器中的运动軌道而得到的^[4]。如果在 r_0 处的磁場强度为 H_0 , 磁場 H 跟 r 变化的情形为

$$H = H_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \quad (0 < n < 1)$$

时, 电子的径向与軸向振动角速度分别为

$$\omega_r = (1 - n)^{1/2} \omega_0,$$

$$\omega_a = n^{1/2} \omega_0,$$

其中

$$\omega_0 = \frac{ecH}{m}$$

当 $n = \frac{1}{2}$ 时,

$$\omega_r = \omega_a = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}},$$

所以聚焦的角度为 $\sqrt{2}\pi$ 。因为有二个方向聚焦, 所以双聚焦的 β 譜儀比半圓型 β 譜儀透射率增加很多。双聚焦 β 譜儀除了透射率大以外, 并且还有另外一个优点: 双聚焦 β 譜儀的磁場强度是随 r 增加而減小的, 当 β 粒子的能量高时, 它的軌道半径也大, 因此 β 粒子在磁場較弱的区域运动。这使运动半径更大, 并使不同能量的 β 粒子分得更开。在半圓式 β 譜儀中, 只有前一原因的作用。这样就增加了双聚焦 β 譜儀的色散率, 而使它的分辨率比半圓式的增加一倍。

另一种改正磁場的 β 譜儀就是三級单向聚焦的 β 譜儀^[5], 主要是消去象差項 $\rho\phi^2$, 磁場垂直方向上 β 射綫束的角度 ϕ 可以增加很大。

利用磁透鏡的色象差来分析 β 能譜最早是 Kapitza^[6] 提出的, Tricker 在 1924 年实现的。Tricker 做的是螺綫管式 β 譜儀, 用螺綫管来产生均匀磁場。图 3 是螺綫管 β 譜儀, C 是螺綫管綫圈, B 是选择从放射源 S 放出来的 β 射綫束的出射环形狹縫。由于色象差, 只有經過环形狹縫一定动量的 β 粒子, 才可以进入探测器的入射狹縫 D 。螺綫管式 β 譜儀的优点是电子軌道可以正确計算, 調节容易, 受外界的磁場影响小, 缺点是磁鏡綫圈的安培匝数多, 体积大。

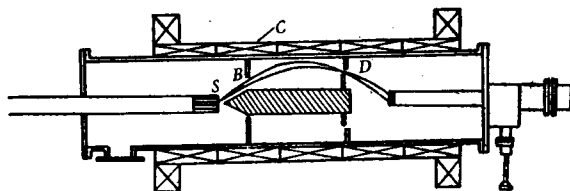


图 3 螺綫管式 β 譜儀

C —螺綫管綫圈; S —放射源; B —出射环形狹縫; D —入射狹縫

其次是短磁鏡式 β 譜儀, 它与螺綫管式的差別是磁鏡綫圈比較短, 因此磁場集中在中間比較狹窄的区域内。Deutsch、Elliot 和 Evans^[8] 对短磁鏡式 β 譜儀做过理論上的分析, 把磁場綫圈看做只具象差的薄透鏡。象与实物服从薄透鏡公式

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$$

其中 v, u 为象和实物与透镜的距离, f 是透镜的焦距,

$$f = C \left(\frac{P}{ni} \right)$$

P 为粒子的动量, ni 为线圈的安培匝数, C 为与线圈几何形状相关的常数. 对很靠近轴的射线

$$f = \frac{4P^2}{\int_{-\infty}^{\infty} H_z^2 dz}$$

式中 H_z 是镜轴上的磁场强度. 因为焦距 f 与轴上的磁场强度 H_z^2 的积分成反比, 所以磁场较集中的短磁镜β谱仪对聚焦一定能量的β粒子, 线圈所需的安培匝数比磁场分布在较广区域内的长磁镜β谱仪和螺线管式β谱仪要少得多.

图4所表示的为在同样的动量, 不同的出射角的β粒子束在磁镜线圈的作用下的轨道. 从图4中可以知道, 出射角大的β射线束聚焦在离线圈近的A点, 出射角小的聚焦在离线圈远的B点. 这就是磁镜式β谱仪的象差. 它的产生是由两个原因引起的^[9]. 1. 出射角大的β粒子束, 它在镜轴方向上的分量比出射角小的要小, 即cos的作用(cos effect). 2. 出射角大的β射线束在弯折区域(bending zone)中经过磁场强度较大的区域. 图5是短磁镜轴上的磁场分布. 轴外的磁场强度可由下式得到

$$H_z(z, r) = H_z(z, 0) - \frac{r^2}{4} \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} \dots$$

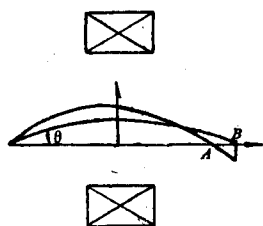


图4 短磁镜式β谱仪的象差

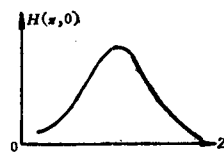


图5 短磁镜β谱仪的磁场分布

对于短磁镜和长磁镜的β谱仪的磁场 $H_z(z, r) > H_z(0, z)$ (H_z 是镜轴方向上的磁场强度) 这两个原因所引起的象差都是正的. 螺线管式β谱仪产生象差的原因只是cos的作用, 因此它的象差要比短磁镜的要小. 减小短磁镜β谱仪的象差的办法就是用长磁镜线圈, 将磁场分布在一个较大的范围内, 使 $\frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2}$ 尽量小, 以及弯曲区域磁场分布曲线的斜率小.

理论计算得到没有象差的磁场分布如图6所示.

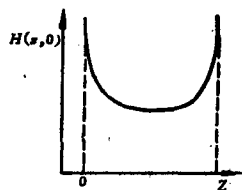


图6 理想的磁场分布

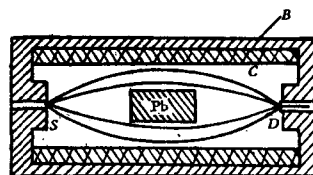


图7 Siegbahn β谱仪

C—线圈; B—铁壳; S—放射源; D—计数管

Siegbahn^[10] 做过一β谱仪(如图7), 线圈用铁包起来, 使磁场分布尽量减小象差.

线圈中用铁的优点是能聚焦一定能量的 β 射线,可以减小线圈的安培匝数,缺点是失去了 $H \propto i$ 的关系,要用另外方法测定磁场,并且还有剩磁等问题,使磁场的分布与电流大小有关。

Quade 和 Halliday^[11]用相距一定距离的双磁镜线圈(图8),使在弯折区域中的磁场分布曲线中间有一低下去的部分,使 $\frac{\partial^2 H}{\partial z^2}$ 为正,以减小象差。他们也研究了线圈的距离与象差的关系。

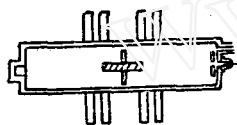


图8 Quade Halliday 双磁镜 β 谱仪

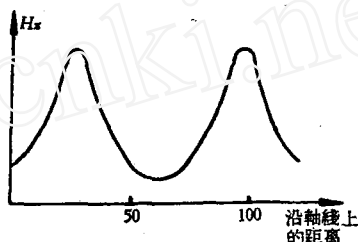


图9 双磁镜 β 谱仪的磁场分布

不同类型的 β 谱仪有它自己的特点。直到现在为止,各种类型的 β 谱仪都在应用。现在发展的趋向用得最多的是双聚焦 β 谱仪。用哪一类 β 谱仪主要是由实验的目的与它特殊的要求决定的。双聚焦 β 谱仪的分辨率接近半圆型 β 谱仪,透射率接近短磁镜的 β 谱仪,因此目前研究同位素的 β 、 γ 能谱多用这种型式的 β 谱仪。它的缺点是放射源在磁场内,不便做散射实验。我们的目的是建造供测量核反应产物的 β 、 γ 能谱之用的 β 谱仪。选择双磁镜 β 谱仪的原因是因为它具有与长磁镜 β 谱仪或螺线管 β 谱仪相接近的性能,比短磁镜式的好。放射源与计数管在磁场外面,加速器出来的离子流很少受到谱仪磁场的作用。放射源与计数管之间的距离很远,中间有一块很厚的铅可以减少加速器和核反应产物的高能 γ 射线本底。因为核反应产物的 β 、 γ 能量一般较高,因此希望谱仪能量到10兆电子伏左右电子的能量。同时也希望它具有一般的分辨率(1—2%)和高透射率($\sim 1\%$)。

二、建 造

图10是我们建造的双磁镜 β 谱仪的照片。图11是它主要部分的切面图,它的主要组成部分是产生轴对称磁场的二个磁镜线圈,放在放射源与GM计数管中间对称的位置上。二线圈

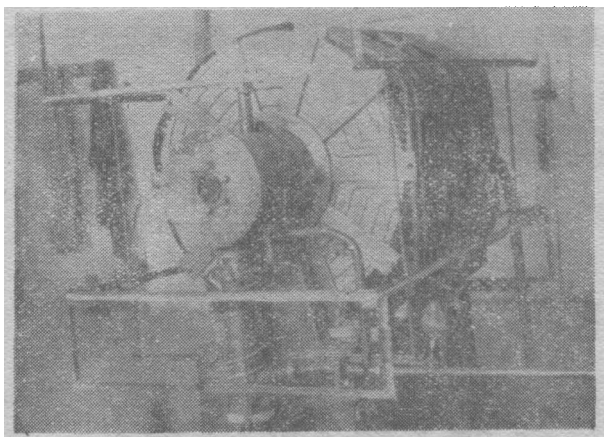


图10 双磁镜 β 谱仪外貌

中心相距的距离为54.5厘米(二者距离在需要时可以改变,把二个线圈靠在一起,则双磁镜 β 谱仪变成了短磁镜 β 谱仪),每个线圈的厚度为21厘米,内径为28.2厘米,外径约为80.5厘米。线圈扁铜线的截面为 7.2×3.4 毫米²,用包二层厚度约0.03毫米的薄网绝缘起来。每个线圈分为TA和BE二部分,每一部分由六薄饼(pancake)组成,每一薄饼共有140匝,二个线圈总共3360匝。因此线圈总共分开T、A、B、E四部分(图11),每一部分的电阻分别为1.074;1.074₂;1.074₃;1.074。为了使磁场的

分布尽量对中心对称, TE, BA 分别串联在一起, 使通过 TE 的电流相等, 通过 BA 的电流相等。 TE 与 BA 串联时线圈的总电阻为 $4\ \Omega$, TE 与 BA 并联时总电阻为 $1\ \Omega$ 。 因此对一定的磁鏡线圈电源电压, TE 与 BA 并联时通过线圈的电流比 TE, BA 串联时可以增加一倍。 二线圈分别装在鑄铜制的铜盒子内, 铜盒子中加入变压器油, 用以冷却线圈通电时发生的热量。 变压器油用油泵循环。 当油经过热交换器时, 油被通过热交换器中的螺旋形紫铜管中的水所冷却。 线圈通过的最大电流为 50 安培, 因此消耗的功率为 10 瓦。 线圈电源是 17.5 瓦的直流发电机 (125 伏特, 140 安培)。 控制直流发电机的激磁发电机的激磁电流达到线圈磁场的稳定, 在十分分钟内稳定度可以达到 0.02%。 通过线圈的电流用电位计测定与线圈串联的标准电阻 (康铜线) 的电压降来测量。

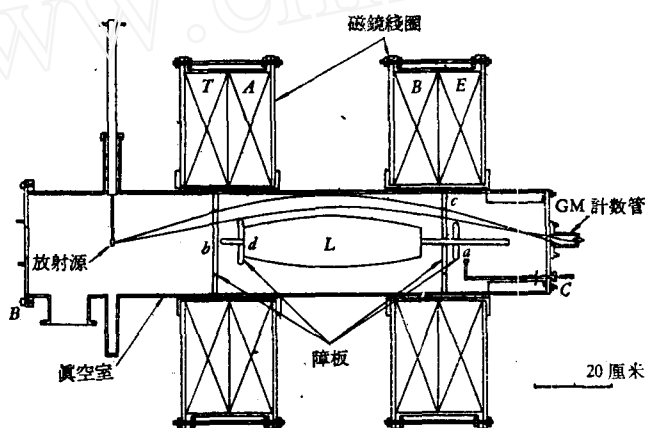


图 11 双磁鏡 β 譜儀主要部分剖面图

铜盒子放在木架上面的铜框子上, 可以用螺丝调节线圈的几何位置 (图 10)。 线圈的重量约 1800 公斤, 谱仪的总重量约 2500 公斤。 鑄铜盒子的材料有显著的顺磁性, 用强的马蹄形磁铁在距离 2—3 毫米内能够吸住铜盒子加工时切削下来的铜屑。 因此当谱仪用在低能区域时, 它的磁场分布可能受到铜盒子中含有铁磁性物质的影响*。

线圈的磁场分布用直径 1 厘米的探察线圈 (searching coil) 和冲击电流计测定。 把探察线圈放在线圈中心轴的各个位置上, 探察线圈的轴与线圈的轴相合。 当通过线圈的电流由 1.5 安培变到零, 读出冲击电流计的偏转数 d (毫米)。 探察线圈的面积和电流计常数用标准螺线管校正。 图 12 中的实线是实验测得的二个磁鏡线圈磁场分布结果。 从实验测得的二个线圈的磁场分布曲线的迭加而得的虚线, 表示二线圈的距离为 54.5 厘米时, 磁场的分布情形。 放射源与计数管间的距离为 110 厘米, 因此磁场分别在谱仪中心与放射源计数管中间处为最大, 约为 42.25 高斯/安培。 实验测得的结果与计算所得的结果很相符合。

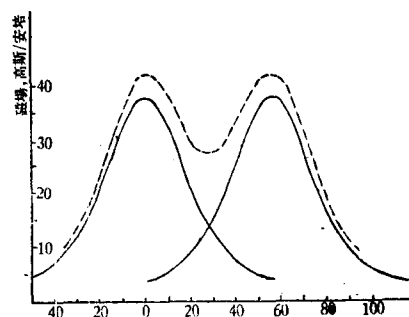


图 12 双磁鏡 β 譜儀的磁場分布

地磁场的垂直强度与水平强度用转动探察线圈的方法测定, 得结果为 $H_{\perp} = 0.365$ 高斯, $H_{\parallel} = 0.205$ 高斯。 地磁场的垂直强度用相距 55 厘米、大小为 96 厘米 \times 165 厘米的二个矩形中和线圈所产生的磁场抵消。 当中和线圈的电流为 0.65 安培时, 谱仪中

实线是实验测得结果, 虚线是实线迭加的结果

* 对仪器在低能时的影响还没有发现, 在试验时发现谱仪下面的钢筋对磁场分布有影响。

心的磁場強度为零。

放射源衬托 (backing)、真空室壁、障板系統以及真空室中的剩余气体都能引起 β 粒子的散射,尤其是低能区域散射是影响实验結果的主要因素。为了减少剩余气体中和真空室壁的散射,真空室必須要达到足够高的真空度。真空室要大,这样可以使容易引起散射的物质与放射源的距离較远,并且尽量用原子序数較小的元素作材料。譜仪的真空室为一长131厘米、内径25.4厘米、厚0.476厘米的黄銅管,用銅架固定在銅底板上。法兰盘B的圓銅板中心开了一个直径8厘米的玻璃窗,从这玻璃窗可以看到悬挂在放射源支架上的放射源。玻璃窗的主要目的是当譜仪用来研究核反应产物的 β 、 γ 能譜时,玻璃窗的圓孔可以直接与加速器的真空室相接,使离子流通过圓孔打在放射源支架上的靶子上。法兰盘C的中心有一直径3.8厘米的圓孔,可以套上具有不同直径的中心孔的圓銅板。在沒有調焦圈 (ring focus) 时,中心孔作为計数管的入射孔。中心孔的直径應該等于放射源的直径^[6]。

放射源的支架(图13)固定于直径为1吋的銅棍W上。W再套上一端密封的銅管M,放射源支架S装上放射源后,W与M用絲扣套紧,沿H管向下插。当M上的小孔O与銅管H上的小孔O'相合时,在M中的空气由F管被机械抽气机抽走。因此O孔經過最下面一个O形圈时,不会影响整个真空室的真空度。W完全插下后M即套在J管内,J管底部凸出的小銅块V鑲入M底部的槽U,使轉动W时M不会轉动。轉动W使W絲扣退出M管的絲扣,再提起W。当放射源在譜仪的中心軸上时,用夹具把W夹住。此时M留在J内。要把放射源从譜仪的真空室中取出,可把W插下,与留在J内的M管套住,然后再提起W。等到M已抽出1厘米后,用夹具把M夹住。退出W与M的絲扣,就可以把W从M上取开。这时M仍留在H管内,使真空室不致漏气。I是压O形圈用的螺絲帽。經過試驗,象图所用的装置,換一次放射源只需一分鐘左右的时间,并不影响譜仪的真空。螺絲帽I不把O形圈压紧,抽动W时阻力很小,也沒有一次发見漏气。这种設計的优点是用銅管J与三个O形圈代替真活閥,因此构造比較簡單,使用时也很方便。

真空室經過真空閥直接与机械抽气机相接的分路,它的作用是打开真空室后,扩散抽气机不需要停止加热,可以用分路V直接抽真空室。用1立升/秒抽气速率的抽机,花13分鐘左右的时间,可以把真空系統从大气压力抽到几百 μ ,达到使扩散抽机工作的真空度。机械抽机能够达到 20μ 至 5μ ,扩散抽机能够达到 2×10^{-5} 毫米水銀柱以下。

真空閥的設計,考虑了真空閥关启时的方便、通气的阻力,以及机械結構上的簡化。直径1吋的真空閥是根据Wahl^[13]的真空閥設計的,它的主要优点是关启方便,通气阻力小,缺点是O形圈容易被活板(vane)磨損或挤出。为了防止O形圈被活板挤出,Wahl用了直径比橡皮槽直径小的O形圈。我們的主要改正是把橡皮槽开成外面小里面大。O形圈槽深为O形圈直径的 $4/5$,槽外面寬度为O形圈直径的 $4/5$ 。最里面寬度使O形圈鑲入橡皮槽后完全或很少受到压挤,即仍旧保持O形圈截面的大小与形状。如果活板厚度适当、均匀而光滑,則不論活板的哪一边是大气压力,真空閥都不会漏气。

4吋真空閥是根据King^[14]的真空閥設計的。为了防止真空閥漏气时打不开,在平板上不用O形圈,并且开了小孔。

为了确定 β 射綫的軌道和减小电子的散射,在真空室中接上障板abcd(图11)。bc分别为内径180毫米、160毫米,厚3.5毫米的环形圓銅板。ad分别为直径115毫米、104毫米,厚3.5毫米的圓銅板。它們的位置与大小从考虑用电子枪測定的軌道而确定的。ab二障板所确定的 β 粒子束的范围略大于cd所确定的范围。障板d可以用銅杆使它在銅棍上面前后滑动,以調节譜仪的分辨率与透射率(图11)。鉛块L的长度为45厘米,用以挡住 γ 射綫,尤其是核

反应产生的高能 γ 射线。障板 $abcd$ 二面都贴有与障板大小相同的有机玻璃,用来减少 β 粒子在障板上的散射。用电子枪代替放射源试验时,发现电子打到有机玻璃上后,由于板的绝缘性能很好,吸收电子以后得到很高的电位,使电子束不能通过障板所确定的环形狭缝。考虑到放射源强度大时可能也有类似的情况,因此把障板 abc 靠近放射源一面的有机玻璃都蒸发上一层铝,使它表面导电。障板 d 的有机玻璃用铝板代替。用放射源 Cs^{137} 做实验时,障板 a 可以减少本底20%。如果考虑到散射在低能区域时严重,得到减少本底20%所用的计数管的云母窗的厚度只能透过能量大于40千电子伏的 β 粒子。因此研究低能区域的 β 能谱时,障板 a 减少散射更有显著的作用。

探测器为钟形薄窗计数管。用谱仪本身的真空系统抽气及用与它相接的储气桶充气的 β 计数管充气系统的工作也已完成。盖革计数管输出的脉冲经过阴极跟随器后,再输入64进位器。

三、调节

β 谱仪磁镜线圈的轴与地磁的南北方向相合,放射源与计数管的入射孔在线圈的轴上,地磁场的垂直强度用中和线圈抵消。 β 谱仪对各种不同单值能量电子的线谱曲线才是对称的,峰值计数率也为最大。如果放射源或计数管的位置不在磁镜线圈的轴上,峰值计数率可以减少很多,线谱曲线(window curve or line profile)不对称,甚至每一线谱有二个峰,使谱仪的分辨率不好。电子枪提供调节线圈位置一个方便的方法,先把线圈的轴对准磁针所指的南北方向,根据几何形状,真空室圆筒对准线圈的中心轴,电子枪放在放射源的位置上。电子枪放出的电子束经过磁场线圈聚焦后成象于计数管处的荧光板上。调节线圈的位置与方向,使磁镜线圈所产生的磁场方向与地磁场水平分量的

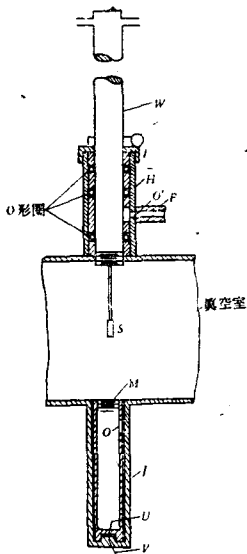


图13 放射源支架与真空室

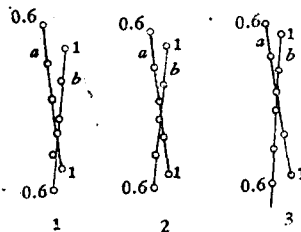


图14 变更中和电流时,电子束在荧光板上亮点的轨迹
a为磁镜线圈的电流,为aiding(即磁镜线圈产生的磁场与地磁场南北方向相同)时所得轨迹,b为backing(即磁镜线圈产生的磁场与地磁场南北方向相反)时所得轨迹

方向相同与相反时,在荧光板上聚焦的电子束的光点的位置不变。磁镜线圈对电子束的作用与透镜对光线的作用一样。当物不在透镜的光轴上时,它的象也不在光轴上。电子束在磁场线圈作用下,除了光轴象对实物有一转角外,也有类似的情形。通过磁镜线圈的电流方向相反时,象对实物旋转的角度也相反,因此使电子枪与荧光板中心不在线圈轴上时,磁镜线圈电流方向不同,荧光板上光点的位置也不同。只有当二者都在磁镜线圈磁场的对称轴上时,光点的位置才不变。线圈的轴没有在地磁的南北方向时,不同电流方向线圈产生的磁场与地磁场相加的合磁场的方向不同,因此在荧光板上光点的位置也不相同。所以可以调节线圈的位置,使电流方向变更时,电子束在荧光板上亮点的位置不变,这时候线圈的轴就在南北方向上,电子枪与电子束在荧光板上的亮点就在线圈的轴上。

根据 Van Atta^[12] 变更中和电流在不同磁鏡綫圈的电流方向得到图 14 所示的电子束在荧光板上亮点的軌迹。1 是綫圈的位置未經調节时所得的结果。中和电流的数值由 0.6, 0.7, … 1 安培变更。光点的軌迹 ab 二条直綫交点的中和电流, 根据不同綫圈电流方向, 分别为 0.9, 0.76 安培。經過一次位置調节后, 交点的中和电流值分别为 0.84, 0.81 安培。經過第二次位置調节后, 交点的中和电流值分别为 0.825; 0.825 安培。这时候电子的能量为 1 千电子伏。提高电子枪能量为 4.7 千电子伏, 中和电流为 0.825 安培时, 不同磁鏡綫圈电流方向光点位置变更 1 毫米。

綫圈通过 50 安培电流以后, 譜仪下面鋼筋水泥梁有很強程度的磁化, 等于在譜仪下面放了一条很大的条形磁铁, 产生比地磁場垂直強度大好几倍的不均匀扰乱磁場, 电子束受到这样大的不均匀磁場作用后, 不能聚焦在荧光板的中心, 同时有很大程度的象散性。通以适当的相反方向的电流以后(約 15—20 安培), 能够把鋼筋的磁性显著地去掉。經过去磁后, 能够完全恢复到原来的情况。鋼筋对磁鏡綫圈磁場分布的軸对称性有很坏的影响, 它的主要问题是当綫圈通过大电流使它磁化后, 磁化所产生的磁場严重地影响綫圈通小电流时的磁場分布。所以每通一次大电流(20 安培以上)后, 当譜仪用在低能区域时, 必須要經过去磁的手續。

用在真空室中可以前后移动的荧光屏 S (图 15), 可以确定在磁鏡綫圈作用下, 不同出射角电子束的軌道, 以及軌道的旋轉角度。从軌道可以設計障板系統和确定調焦圈的位置。图 15 表示确定 β 譜仪的电子軌道的装置。真空室譜仪中間按上开有几組中心綫的直径分别为 204、186、168、150 毫米的小孔的圓銅板 PP' 。从电子枪 g 中射出的电子束, 通过小孔 OO' 后, 再投到荧光屏上。荧光屏 S 可以用杆子在真空室的軸上前后移动, 測定在不同位置时通过各組小孔的电子束在荧光屏上所成圓的直径, 結果測定在探测器一侧电子束的軌道如图 16 所示。通过中心綫直径为 204 毫米、150 毫米的小孔的电子束, 它們在靠近探测器处的軌道很接近与譜仪中心軸成 $18^\circ 30'$, $12^\circ 30'$ 的二条綫段。在它們相交的位置上, 前后移动荧光屏, 可以发見二組电子束打在荧光屏上发荧光的二个圓, 由分开而逐渐重合, 重合的位置就是調焦圈的位置。測量的結果表明, 調焦圈的直径为 37.7 毫米, 与計数管孔的距离为 67 毫米。通过另外二組中心綫直径为 186 毫米与 168 毫米的小孔的电子軌道与通过中心綫直径为 204、150 毫米的小孔的电子束, 軌道不同, 因此它們的調焦圈的位置也不相同。出射角愈是大的电子束, 它們調焦

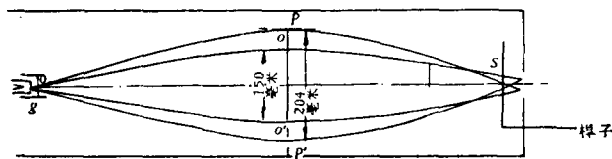


图 15 确定 β 譜仪电子軌道的装置

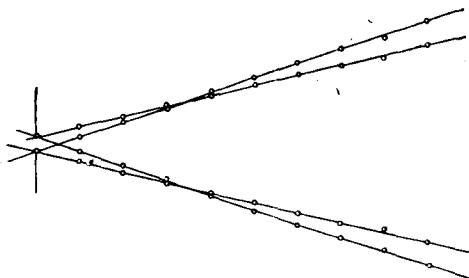


图 16 β 譜仪的电子軌道

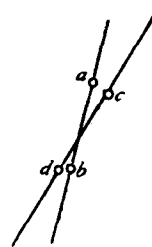


图 17 象的旋轉

圈的直径也愈大,与計数管孔的距离也愈远。調焦圈的位置与选择电子束的出射角范围很有关系。

用电子枪也同时测量了磁鏡綫圈所組成的电子光学系統,象对实物的旋轉角度 θ 。在电子枪前面装上开有二个对中心对称直径为 13.3 毫米小孔的铜套子,观察在計数管处的荧光屏上这二个孔成象的位置。图 17ab 为当磁鏡綫圈的磁場与地磁場的水平方向相合时象的位置,cd 为磁場方向相反时的位置。因为磁場方向相反时,象的轉角相等而方向相反,因此可以从图中得出象的轉角 $\theta = 99^\circ$ 。象的旋轉主要发生在磁鏡綫圈电子光学系統的弯折区域内(bending zone)。

四、校正

所有利用磁場的 β 譜仪都是利用 β 粒子的动量不同,在磁場中的运动軌道也不同。与运动軌道直接相关的是粒子的动量 $H\rho$,所以譜仪測定的也是粒子的动量。利用动量与能量相关的公式

$$E = E_0 \left\{ \sqrt{\left(\frac{e B \rho}{m_0 c} \right)^2 + 1} - 1 \right\}$$

$$E_0 = m_0 c^2 = (510,984 \pm 0.016) \text{千电子伏}$$

$$\frac{e}{m_0} = (1.75888 \pm 0.00005) \cdot 10^7 \text{电磁单位-克}^{-1}$$

$$c = (2.997929 \pm 0.000008) \cdot 10^{10} \text{厘米-秒}^{-1}$$

可以求出 β 粒子的能量。所有 β 譜仪中,只有 180° 半圓型的 β 譜仪。理論上与几何上的条件最簡單,可以用来绝对測定 β 粒子的动量,其他型式的 β 譜仪一般都用能量已知的 γ 射綫內轉

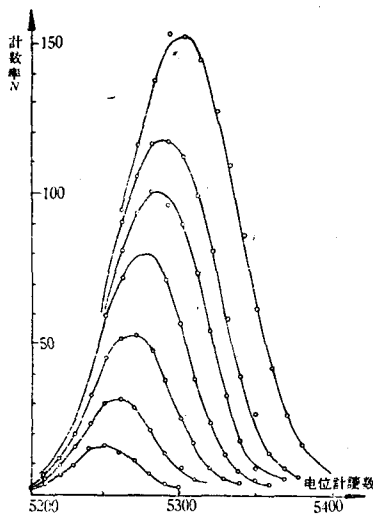


图 18 不同障板調节下的 Cs^{137} γ 內轉換譜綫

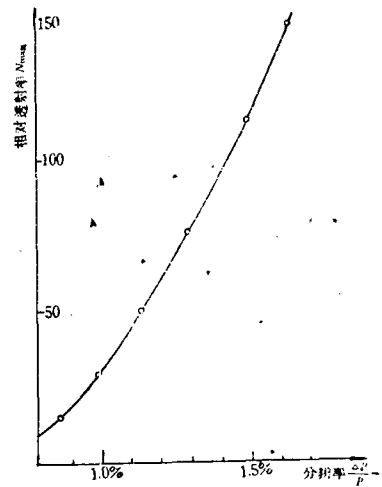


图 19 透射率与分辨率的关系
(放射源面积的直径为 6 毫米)

換或外轉換譜綫校正。用绝对測定方法定出的 γ 能量或內轉換譜綫能量都可以当作标准譜綫。标准譜綫的能量差不多分布在不同能量区域内,因此可以应用不同能量区域的譜綫来校正含有鉄磁性物質的 β 譜仪,研究鉄磁性物質影响 β 譜仪直綫性的程度。我們所用的标准放射源为 Cs^{137} ,它的优点是容易得到足够的強度, γ 能量为 661.65 千电子伏^[15]的內轉換电子的能量大

于含量 95% β 連續譜的最大能量 518 千电子伏, 內轉換譜綫在連續譜外面, 內轉換系数 $\alpha_k = 0.095$. 放射源的直径为 6 毫米, 盖革計数管入射孔的直径为 6 毫米. 改变障板 d 的位置, 得到在不同透射率时 Cs^{137} 的 K 內轉換譜綫 (图 18). 图 19 为从图 18 的內轉換譜綫而得的相对透射率与分辨率的关系. 分辨率由 0.86% 改变到 1.64%, 相对透射率約增加十倍. 根据放射源一端障板的几何位置, 估計譜儀的立体角約 1.6%. 但是透射率主要被計数管一端的障板限制, 故透射率要比 1.6% 小*. 如果用調焦圈 (ring focus), 則有希望在分辨率为 1.5% 时, 透射率可以提高一倍.

从图 18 可以看出, 透射率与分辨率不同时, 由于象差 Cs^{137} K 譜綫峯的位置也不同. 因此儀器的校正常数 $K \left(K = \frac{P}{i} \right)$ 与障板的調节有关. 当分辨率为 1.5% 时, $K = 639.2$ 高斯-厘米/安培.

参 考 文 献

- [1] Bayer, G., Hahn, O., *Physik Zeits*, **11** (1910), 488.
- [2] Danysz, J., *Comptes Rendus*, **153** (1911), 339, 1066.
- [3] Svartholm, K., Siegbahn, K., *Arkiv. Mat. Astron. Phys.*, **33A** (No. 4) (1946), 21.
- [4] Kerst Serber, *Phys. Rev.*, **60** (1941), 53.
- [5] Langer, L., Cook, G., *Rev. Scient. Instr.*, **19** (1948), 257.
- [6] Kapitza, P., *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **22**, 3.
- [7] Tricker, R. A. R., *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **22** (1925), 454.
- [8] Deutsch, Elliot, Evans, *Rev. Sci. Instr.*, **15** (1944), 178.
- [9] Runcle, G. P., *Proc. Phys. Soc.*, **409B** (1954), 52.
- [10] Siegbahn, K., *Phil. Mag.*, **37** (1946), 162.
- [11] Quade, Halliday, *Rev. Sci. Instr.*, **19** (1948), 234.
- [12] Van Atta, *Rev. Scient. Instr.*, **21** (1950), 985.
- [13] Wahl, *Rev. Scient. Instr.*, **23** (1952), 379.
- [14] King, *Rev. Scient. Instr.*, **19** (1949), 83.
- [15] Lindström, G., Siegbahn, K., Wapstra, A. H., *Proc. Phys. Soc.*, **66** (1953), 54.

* 求透射率需要知道放射源的绝对强度. Cs^{137} 的 518 千电子伏的 β 射綫不与 661 千电子伏的 γ 射綫符合 (coincidence), 故不能用符合技术測定它的绝对强度.