

用于测量中微子静止质量的静电 减速谱仪的研究*

阎辰 赵裕民 孙汉城

(中国原子能科学研究院, 北京)

杨长根 唐孝威

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

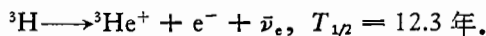
本文提出一种从氚衰变 β 谱确定电子反中微子静止质量的新型结构 β 谱仪。球面栅静电减速谱仪具有后聚焦系统。预计电子能量分辨率好于5 eV, 最大亮度为0.26 cm²。

引 言

泡里于1933年提出 β 衰变伴随发射中微子的假说, 成功地解释了 β 谱的连续分布^[1], 且已为实验证实^[2]。但是, 中微子的一些性质至今并未搞清, 其中中微子质量问题更为引人注目。

尽管有许多方法可用于测量中微子质量, 但是目前主要方法还是测量氚衰变的 β 能谱, 原因是氚 β 谱具有较低的端点能量及相对简单的初始与终止原子态。

氚的 β 衰变为:



β 谱正比于统计因数与费米函数, 统计因数又正比于跃迁能量 E_0 处的态密度:

$$dn/dE_0 = \text{const } p_e^2 p_\nu^2 (dp_\nu/dE_0) dp_e,$$

此处 p_e 与 p_ν 分别是电子与中微子的动量。考虑库仑修正后, 费米函数可写为:

$$F(E) = \chi(1.002037 - 0.00013086/\chi)/(1 - \exp(-\chi)),$$

其中 $\chi = 4\pi\alpha/\beta$, α 是精细结构常数。由能量守恒 $E_0 = E + E_\nu$ 即可得到 β 谱:

$$N(E) = \text{const } F(E) W p_e (E_0 - E)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{m_\nu c^2}{E_0 - E}\right)^2},$$

其中 $W = E + m_0 c^2$ 是电子总能量。由测量近端点区的谱形即可得到中微子质量 m_ν 的信息。图1中分别给出质量为零与质量为35 eV的谱形, 图中右上角是放大2500倍的近端点 β 谱。

* 本工作是中国科学院科学基金资助课题。

本文1986年5月10日收到, 1987年7月28日收到修改稿。

721)
726)
731)
737)
742)
749)
754)
761)
766)
773)
82)
16)
33)
39)
17)
4)
2)
9)
3)
0)
8)
2)
7)
1)

为测准 β 谱求出 m_r , 谱仪的性能应该是: 能量分辨率高, 亮度大, 本底低和畸变小。

目前, 各实验室测 β 谱仪大多是双聚焦(有铁或无铁)或螺旋 β 谱仪, 使用静电补偿大面积 β 源以增大亮度^[3], 分辨率通常为几十 eV。瑞士用减速法使螺旋形 β 谱仪分辨率达 10 eV^[4], 日本双聚焦 β 谱仪也达 10 eV^[5]。

据国内外现况, 为进一步提高谱仪性能, 我们设计了下述静电减速谱仪。国外也有类似的设计^[6], 但各具特色。

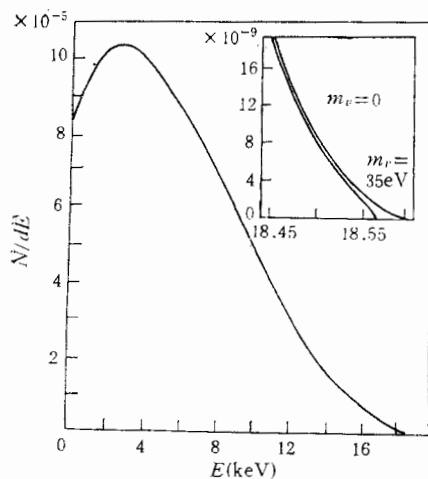


图1 $m_r = 0$ 与 $m_r = 35$ eV 的氡衰变 β 谱
右上角为近端点的 2500 倍放大图

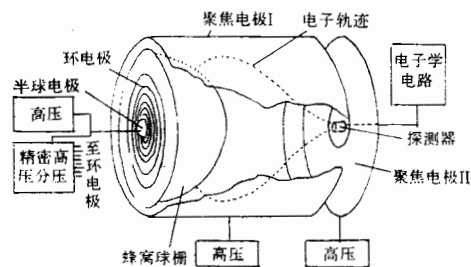


图2 球栅减速静电积分谱仪结构示意图

谱仪设计

图2是谱仪示意图, 整个装置圆筒轴对称。氡源位于半球形减速栅的球心, 源半径 0.53 cm, 球面减速栅半径 53 cm。在相应于球面栅过源点的大圆平面上, 有一组由同心环电极组成的电场成形环。减速电压经精密分压后, 按同心球壳电容器的电位分布馈电给每个成形环, 从而保证此减速场分布与理论计算值一致。由于在源心附近电场极强, 故采用反向半球壳代替成形环。球面分析栅的有效球面角为 $45^\circ-60^\circ$ 。从源出发, 进入减速电场区的电子能量高于减速电压者能够通过分析栅, 由后聚焦电极 I, II 会聚到电子灵敏探测器上; 能量低于减速电压者不能通过分析栅。源到探测器的直线距离为 1200 mm。聚焦后的电子束集中在探测器平面上半径为 2 cm 的范围内。分析栅及后聚焦电极由独立的电源分别供电。电极 I 为金属网, 它使能量很高而不能会聚到探测器上的电子穿过, 再由外壳吸收, 改善了聚焦条件并降低了本底。

设计中, 为保证谱仪的高性能, 对谱仪各部分有如下规定: 几何上保证同心电容器减速过程中的几何分辨好于 10^{-4} ; 分析栅固有分辨好于 10^{-4} ; 高压电源长期稳定性对分辨的影响好于 10^{-4} ; 系统内泄漏地磁场对电子轨迹扰动引起分辨恶化小于 10^{-4} , 从而使整体谱仪分辨好于 2×10^{-4} , 即好于 5 eV。

减速积分法分析电子能量属于高通滤波测量,配以后聚焦系统,故可采用大立体角工作状态。亮度定义为 $L = S\Omega/4\pi$, S 是谱仪系统内氚源有效面积, Ω 是谱仪探测电子的立体角也即透射率。预计本谱仪亮度达 0.26cm^2 ,为通常谱仪的数十倍。若由 β 谱端点逆推 100eV 为中微子质量灵敏区,计数道宽 5eV ,则有效计数率约为 $0.1/\text{道}\cdot\text{s}$ 。

整套系统全部采用静电分析与静电聚焦,从而结构简单,各部件加工与装配误差对分辨率的影响都是二次间接影响,加工工艺简单。

减速栅的几何分辨与本征分辨

由于源是有限的球面源面非点源,其电子在同心球壳电容器减速场内运动的轨迹并非沿电力线方向,而是在减速场中做椭圆运动,其远日点距离小于或等于减速栅半径时,电子不能通过栅网。由理论计算,球栅的几何分辨率为 $\Delta E/E = (a/b)^2$,其中 a 是源球面半径, b 是减速栅球面半径。对本谱仪,几何分辨为 10^{-4} 。此外,栅网附近电场等位面受到减速栅孔的影响而使其电场分布呈调制状,从而必须考虑栅网自身的本征分辨。

对于均匀栅网,限制能量分辨的主要因素,是近栅网区的“洗衣板状”的电位起伏,即栅网等位线的渗透与由此引起的电子轨迹的偏斜。若采用互相平行的双层栅,可使分辨改善一个量级^[7],但本谱仪要求大尺度栅网的情况下,无论单栅或双层栅,技术上都很难实现。为解决大尺度、高分辨分析栅问题,本工作提出一种新的特殊栅网——蜂窝结构分析栅。图 3 给出单栅,双层栅和蜂窝结构分析栅的二维电场模拟计算电位分布,其结果与用电阻纸模拟实测的电位分布一致^[8]。结果表明,使用边长 3mm 的大网孔蜂窝结构,能够得到与 $2\text{线}/\text{mm}$ 的精密双层栅相似的电位分布。

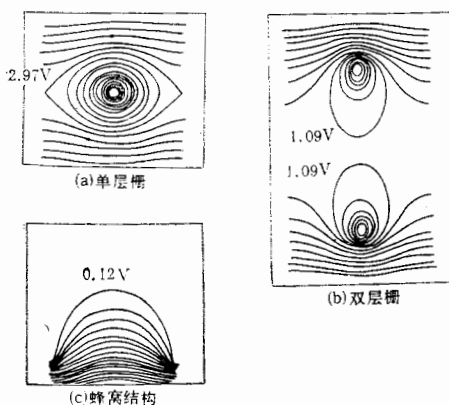


图 3 不同结构栅网归一尺度下的二维电位分布对比

a. 单层栅; b. 双层栅; c. 蜂窝结构

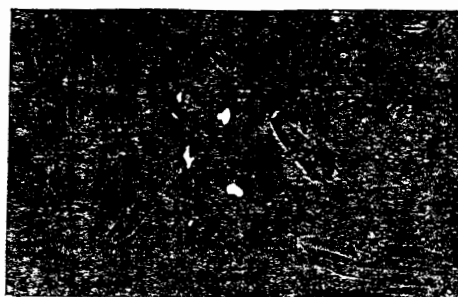


图 4 通过蜂窝结构分析栅的电子注荧光照片

计算表明,不同厚度的蜂窝结构(平均孔径 6mm),对单能平行入射的电子,本征分辨

都好于 0.2 eV,且与单能电子能量无关。

我们曾对蜂窝结构栅和 2 线/mm 双层铜栅网用 1—6keV 单能平行电子束进行分辨测量,两者结果相近^[9]。

使用蜂窝栅作分析栅不仅可获得大面积高分辨球面栅,而且,由于蜂窝栅孔本身是筒状静电透镜,电子通过时自动向孔轴线上会聚,减少了电子碰到孔壁而产生本底的可能性。图 4 是近似平行电子束通过蜂窝栅后在荧光屏上的成象,可清晰看到电子束的会聚现象。

蜂窝栅是用纯铝箔制成。

高通电子的后聚焦系统

后聚焦系统的作用,既是聚焦又是单色器。它仅把刚刚能通过分析栅的极慢速电子聚集到探测器上;而通过分析栅的高速电子则聚集到筒状电极上而被吸收,从而使高通型谱仪成为带通型谱仪,有效地降低了冲击噪声并提高了信噪比。

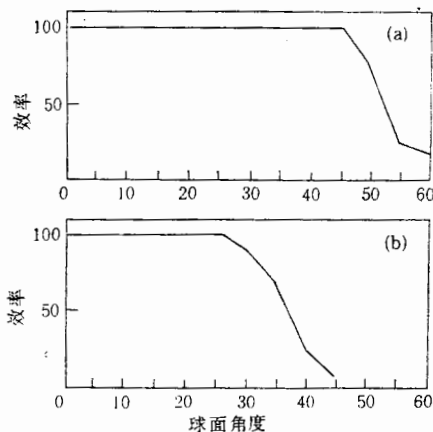


图 5 不同能量范围电子对分析栅球面张角通过响应的计算机模拟图。

(a) $E = 0 - 50 \text{ eV}$; $V_1 = -30000 \text{ V}$; $V_2 = -29958 \text{ V}$; $V_g = -29988 \text{ V}$; (b) $E = 0 - 100 \text{ eV}$; $V_1 = -29005 \text{ V}$; $V_2 = -29050 \text{ V}$; $V_g = -29000 \text{ V}$

实际测量时要求严格测准一定能量范围的电子收集效率,这样才能保证谱形畸变最小。通过电子轨迹计算,可求出不同能量不同球面发射角电子的通过曲线。图 5 表示在设定聚焦条件下,不同能域电子可在不同角度内得到 100% 的效率。图中 V_1 , V_2 分别是聚焦电极 I、II 上的电压, V_g 是分析栅电压。

谱仪磁屏蔽

高分辨低能电子谱仪的性能受地磁场影响很大。为消除谱仪内泄漏地磁场对分辨率的影响,需在谱仪真空室内用 μ 金属层屏蔽。

对于本谱仪,不影响电子轨迹的电场扰动最大允许值为 2 V/m ,相应于 $\Delta\beta = 3.5 \times 10^{-8} \text{ T}$ 。北京地磁平均强度为 $5.2 \times 10^{-5} \text{ T}$,

最大波动 $5 \times 10^{-7} \text{ T}$ 。计算得出谱仪内允许杂散磁场强度为 $B_{\max} \leq 3.7 \times 10^{-6} \text{ T}$ 。

用二维静磁计算程序 DE2D^[10]对直径为 1m 的 PB 与 PC 两种 μ 金属屏蔽筒进行计算,结果如下表:

屏蔽材料及厚度(mm)	45 PB		78PC	
	1	2	1	2
筒内最大磁场 (10^{-7} T)	191	40	12	10

小 结

与目前各实验室运行的低能电子谱仪相比,本工作方案有高分辨,高亮度、效率可准确刻度及结构简单加工方便等特点,我们希望本工作方案会有助于中微子静止质量的研究。

胡济民、何祚麻、黄胜年、张焕乔等同志参加了本工作的讨论并提出了有价值的建议,在此向他们致谢。

参 考 文 献

- [1] W. Pauli Solvay Congress, Brussels, p. 234(1933) (Gauthier-Villars, Paris, 1934).
- [2] J. S. Allen, *Phys. Rev.*, **61**(1942), 692.
- [3] V. S. Kozik et al, *Yad. Fiz.*, **32**(1980), 309.
Phys. Lett., **94B**(1980), 266.
- [4] R. Roberson et al, Proc. Intern. Conf. Neutrino, Vol. 1(1982), 51(Balatonfured, Budapest, 1982), W. Kundig et al, *Massive Neutrinos in Astrophysics and Particle Physics*, (1984), 261. Ed. J. Tran Thanh Van.
- [5] H. Kawakami et al., INS-REP-561, Nov. (1985).
- [6] O. Fackler p. 17, UCRL-93808, Preprint (1985).
- [7] N. J. Taylor, *Rev. Sci. Instru.*, **40**(1969), 792.
- [8] 赵振鲁等人, 原子能科学研究院内部资料.
- [9] 阎辰等人, 原子能科学技术, **2**(1988), 129.
- [10] Fan Mingwu et al., IEEE trans. Mag-21, (1985).

THE STUDY OF AN ELECTROSTATIC SPHERICAL GRID RETARDING SPECTROMETER FOR THE STUDY OF NEUTRINO REST MASS BY MEASURING BETA SPECTRUM FROM TRITIUM DECAY

YAN CHEN ZHAO YUMIN SUN HANCHENG
(*Institute of Atomic Energy, Beijing*)

YANG CHANGGEN TANG XIAOWEI
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

ABSTRACT

A method is described for measuring the beta spectrum from tritium decay in order to determine the electron-antineutrino rest mass. This method includes an electrostatic spherical grid retarding spectrometer with a post focusing system. The resultant energy resolution will be better than 5 eV and a maximum luminosity of 0.26 cm^2 is expected.