

# 海平面宇宙射线重粒子的质量谱及通量的测量

王殿荣 王朝俊 王孝良 王德武 刘念宗  
李云山 李自平 李成泽 李志刚 林建峰  
徐雨林 陈元柏 陈芝萍 徐蓉芬 奚基伟  
尧宗元 赵海泉 姜婴媛 楼家恕 谢一岡  
张家铨

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

本文介绍了一个由飞行时间测量系统构成的实验装置, 描述了这个实验装置的各个组成部分和它的性能, 并给出了海平面宇宙射线重粒子的质量谱及通量的测量结果。

## 一、引 言

飞行时间测量是鉴别粒子的一种重要技术, 已经在粒子物理实验中得到广泛的应用。我们研制了一套用大面积闪烁计数器, 时间测量电路, CAMAC 接口和微型计算机组成的飞行时间测量系统。我们用这套系统和适当厚度的铅吸收体构成的实验装置测量了北京地区海平面宇宙射线中的质子和比质子更重的带电粒子的质量谱, 一方面检验这套系统的性能, 另一方面也试图给出北京地区海平面宇宙射线重粒子(质子、氘, 氦和 $\alpha$ 粒子等)的质量谱和垂直通量。这些物理量是一些重要的基本数据。

这样一套飞行时间测量系统可以与其他探测器组合成各种不同的实验装置, 用来测量宇宙射线中各种成分的通量和能谱<sup>[1,2]</sup>, 也可以用于在宇宙射线中寻找稳定的奇异重粒子的实验。粒子物理学和宇宙学中的流行模型和理论都预言有一些质量很大的稳定粒子存在, 例如层子和磁单极子等。这些模型和理论已经得到了越来越多的实验证据的支持<sup>[3,4]</sup>。但是, 过去许多实验寻找自由层子和磁单极子都没有得到肯定的结果<sup>[3,5,6,7]</sup>。在宇宙射线中寻找稳定的奇异重粒子仍然还是一个很好的途径, 用各种不同的实验方法继续进行这一类实验探索是值得的。

## 二、实验装置

实验装置的示意图如图1所示。它是由两对飞行时间测量闪烁计数器和铅吸收体组成的。在图1中， $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 和 $S_4$ 是大面积闪烁计数器，每块闪烁体面积为 $100 \times 20\text{cm}^2$ ，厚 $1\text{cm}$ 。Pb是铅吸收体，厚约为 $2.5\text{cm}$ 。 $S_1$ 和 $S_2$ 以及 $S_3$ 和 $S_4$ 构成两组飞行时间测量系统，分别测量带电粒子在穿过吸收体之前的速度 $\beta_{12}$ 和穿过吸收体之后的速度 $\beta_{34}$ 。根据带电粒子在穿过吸收体前后速度的改变，可以用下面的公式确定粒子的质量 $M$ 为：

$$M = \frac{d_A \cdot M_p}{R_p(\beta_{12}) - R_p(\beta_{34})}, \quad (1)$$

式中， $d_A$ 是铅吸收体厚度， $M_p$ 是质子的静止质量， $R_p(\beta_{12})$ 是相应于速度 $\beta_{12}$ 质子在铅中的射程， $R_p(\beta_{34})$ 是相应于速度 $\beta_{34}$ 质子在铅中的射程。由测量的速度值，通过查表得到相应速度的质子的射程<sup>[8]</sup>。

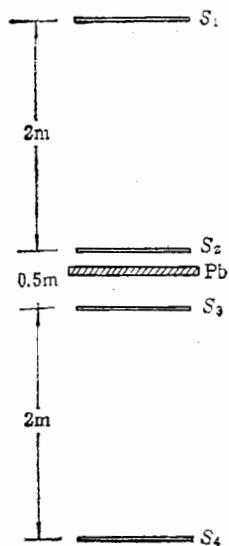


图1 实验装置示意图

$S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 和 $S_4$ 是塑料闪烁计数器，  
Pb是铅吸收体

从上面的公式很容易看出，在本实验装置中飞行时间测量系统的时间分辨是一个关键性因素。

影响时间分辨的因素很多，在对这些因素进行仔细的研究之后，选择适当的工作条件，可以获得较好的时间分辨<sup>[9]</sup>。在这套飞行时间测量系统中使用了我们自制的时间平均器，对时间分辨有明显的改善。

在实验之前，这套飞行时间测量系统在真实的实验条件下用宇宙射线 $\mu$ 子进行了计算机在线测量，对整个系统进行时间刻度和测定时间校正因子。在这样的条件下，时间分辨大约为 $0.5\text{ns}$ <sup>[10]</sup>。

对于一定种类的粒子，这个实验装置的可测速度范围由时间数字变换器的时间测量量程，飞行距离，飞行时间测量系统的时间分辨和吸收体的厚度决定。这些参数，除时间分辨之外，都是可以根据实验的目的进行选择的。在本实验中，选取时间测量量程为 $100\text{ns}$ ，飞行距离大约为 $2\text{m}$ ，铅吸收体厚度大约为 $30\text{g}/\text{cm}^2$ 。可测速度范围还与粒子的特性有关。在上述参量值的情况下，这个实验装置的可测速度下限由铅吸收体的厚度决定。不同质量粒子的可测速度下限值可用下列公式进行计算<sup>[8]</sup>。

$$R(T) = R(T_0) + \int_{T_0}^T \frac{1}{(dE/dx)} dT, \quad (2)$$

和

$$R_M(\beta) = \frac{M}{M_p} \cdot \frac{1}{z^2} \cdot R_p(\beta). \quad (3)$$

其中： $R(T)$ 是初始动能为 $T_0$ 的粒子通过一定厚度的物质之后动能减小到 $T$ 时粒子的

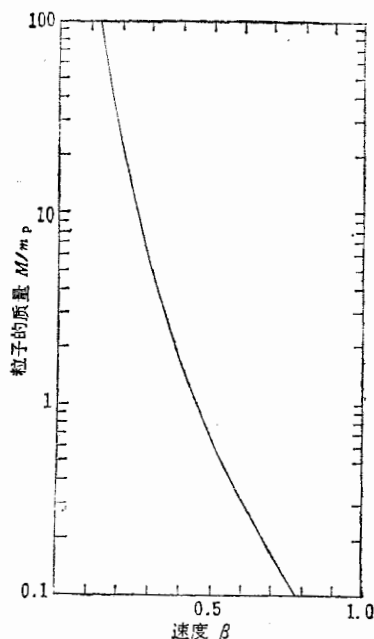


图 2 实验装置的可测速度下限与粒子质量的关系。曲线代表在铅吸收体为 2.5cm 的情况下不同质量粒子的可测速度下限值

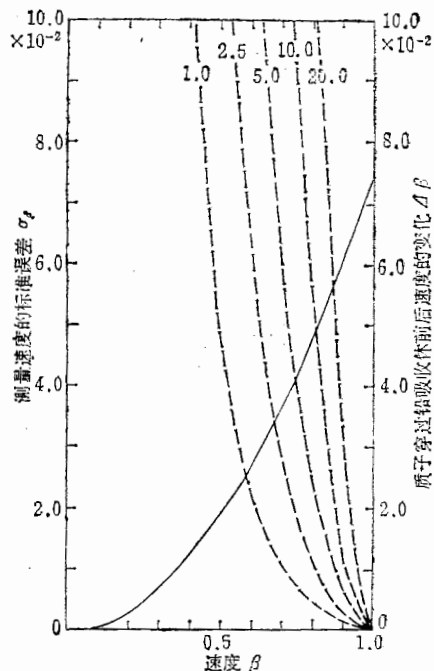


图 3 实验装置的可测速度上限与一些参量的关系。  
——飞行距离 2m, 时间分辨 0.5ns,  $\sigma_\beta$  与  $\beta$  的关系。  
----不同厚度的铅吸收体,  $\Delta\beta$  与  $\beta$  的关系。

射程;  $R(T_0)$  是动能为  $T_0$  时粒子的射程;  $(dE/dx)$  是粒子通过物质的能量损失率;  $M$  是粒子的质量;  $M_p$  是质子的质量;  $z$  是粒子的电荷数;  $\beta$  是粒子的速度与光速之比值。

对于 2.5cm 厚的铅吸收体, 不同质量粒子的可测速度下限值如图 2 中的曲线所示。实验装置的可测速度上限值决定于飞行时间测量系统的时间分辨和选定的飞行距离。在其他参量值都确定了的情况下, 可以通过改变铅吸收体的厚度扩展可测速度的范围。对于本实验装置我们用下列公式计算了测量速度的标准误差  $\sigma_\beta$  和速度  $\beta$  的关系曲线,

$$\sigma_\beta = \frac{\beta^2}{L} \sigma_t, \quad (4)$$

其中:  $L$  是选定的粒子飞行距离, 在这里  $L = 200\text{cm}$ ;  $\sigma_t$  是飞行时间测量系统测量时间的标准误差, 对于我们的实验装置,  $\sigma_t$  的测量值小于 0.6ns。

计算的结果如图 3 中的实线所示。带电粒子在穿过吸收体前后速度的变化  $\Delta\beta$  与速度  $\beta$  满足下列关系,

$$\Delta\beta \equiv \beta - \beta' = \beta - \left[ 1 - M^2 / \left( \frac{M}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \int_0^{d_A} \left( \frac{dE}{dx} \right) \cdot dx \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

其中:  $\beta$  是质量为  $M$  的粒子在穿过吸收体前的速度。  $\beta'$  是粒子在穿过吸收体后的速度。  $d_A$  是吸收体厚度。  $(dE/dx)$  是粒子通过吸收体的能量损失率。

我们用上面的公式计算了质子在穿过铅吸收体前后速度的变化  $\Delta\beta$  与速度  $\beta$  的关系曲线, 如图 3 中的一组虚线所示。虚线上的数字代表铅吸收体的厚度, 以厘米为单位。图 3 中的曲线是我们选定可测速度上限值的基础。不难看出, 在铅吸收体的厚度选定为

2.5cm 的情况下,如果要求  $\Delta\beta \geq \sigma_\beta$ , 质子的可测速度上限值应该是 0.67. 在本实验中, 兼顾到计数率和排除  $\mu$  子信号的要求, 通过获取数据逻辑电路的触发判选条件使速度测量的上限值小于 0.70.

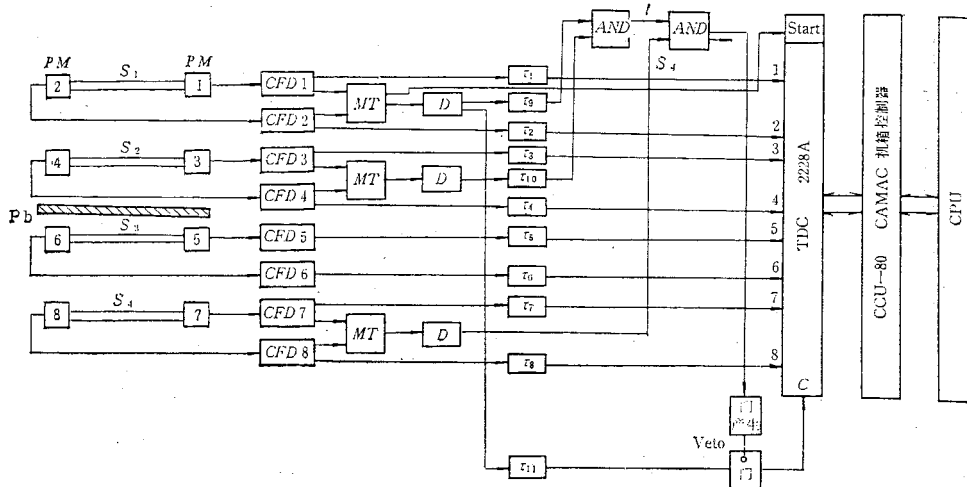


图4 宇宙射线质量谱测量方块线路

在图4中给出了本实验的计算机在线实验方块线路。用一台微型计算机在线获取数据,将数据记录在软磁盘上。计算机读取一个事例的数据需要时间大约为7ms。由两重“AND”电路组成事例判选线路。这里,事例判选条件是  $tS_4$ 。  $t$  表示穿过第一对闪烁计数器的粒子的速度  $\beta \leq 0.70$ ,  $S_4$  表示第4个闪烁计数器在限定的时间间隔内有输出信号。只有符合事例判选条件的信号才能向计算机发出请求计算机读取数据的 LAM 信号, 否则就将一个快清除信号送到时间数字变换器的外清除输入端,清除它的寄存器,使它处于重新等待数据的状态。

计算机在线数据获取和数据处理程序采用模块结构。其主要功能有: 建立格式化的数据文件, CAMAC 插件刻度, 飞行时间测量系统的性能测试, 在线获取数据和实验数据的离线分析。不同功能由不同模块组装完成。该程序为用户提供了一系列键盘命令。通过这些命令实现对实验的控制, 如重新启动, 统计当前磁盘文件中的数据和显示结果, 仪器监测, 关文件, 暂停和终止在线实验等。该程序还为自己的数据文件建立了数据文件操作语言, 实际上是一些子程序。通过对这些子程序的调用可以方便地对数据文件进行操作, 包括数据的显示, 检索, 拟合, 插入, 删除和排序等。在程序的设计中考虑了应用的通用性, 稍作修改就可以用于其它探测器系统的定标刻度和数据获取。

### 三、实验结果

我们用上述实验装置在北京测量了海平面宇宙线带电粒子的质量谱。在海平面宇宙线中的主要成分是  $\mu$  子, 质子的通量比  $\mu$  子的通量小3个数量级。为了测量质子和比质子更重的粒子, 需要排除  $\mu$  子产生的信号。这里通过获取数据的逻辑线路和适当的吸收

体厚度来选取合适的速度测量范围, 实现排除  $\mu$  子产生的本底信号. 在吸收体的厚度为  $30\text{g}/\text{cm}^2$  的情况下, 只有  $\mu$  子的动量  $P_\mu > 130\text{MeV}/c$  才能通过吸收体. 这相应于  $\mu$  子的速度  $\beta_\mu > 0.78$ . 在获取数据的逻辑线路中, 调整  $S_1$  路和  $S_2$  路之间的时间关系, 使只有速度  $\beta < 0.70$  的粒子产生的信号才能通过事例判选电路. 在上述两个条件都满足的情况下,  $\mu$  子产生的信号完全被排除, 而只有质子和比质子更重的粒子产生的信号可以通过事例判选电路. 实验结果表明, 这种排除  $\mu$  子信号的方法是很有效的.

利用上述实验装置测定的质子、氘、氦和  $\alpha$  粒子的质量谱, 如图 5 所示, 进而确定了这几种粒子的通量. 另外, 也测定了质子的动量谱和质子与  $\mu$  子的通量比, 并将本文的结果与国外几位作者的结果进行了比较.

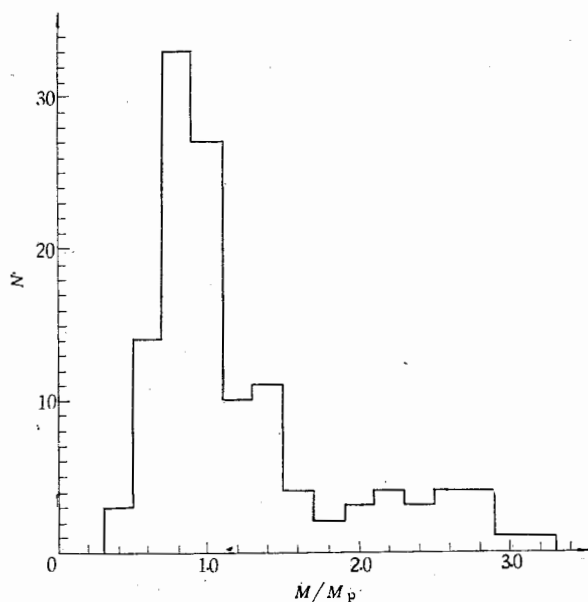


图 5 海平面宇宙射线重粒子质量谱

$$\text{通量 } I \text{ 根据下式计算: } I = N / (t \cdot A \cdot \eta \cdot \Delta P \cdot \epsilon), \quad (6)$$

其中:  $t$  是测量的总有效时间, 有效时间指计算机可靠的取数据时间,  $t = 224$  小时 35 分.  $N$  是  $t$  时间内测得的四种粒子的事例数, 如表 1 所示. 在  $5.8M_p$  处还测量到一个事例, 它与 Li 的质量相吻合, 但因统计较差, 这里未计及.

$A$  是实验装置的总接收度,  $A = 19.5\text{cm}^2\text{sr}$ .  $\eta$  是实验装置的总效率, 包括组成两套飞行时间系统的大面积闪烁计数器的效率及电子学系统修正.  $\eta = 0.89 \pm 0.03$ .

$\Delta P$  是为实验装置所限定的动量范围, 由速度的上下限  $\beta_{\max}, \beta_{\min}$  ( $P = m\beta/\sqrt{1-\beta^2}$ ) 决定. 速度下限由铅吸收体厚度决定. 上限由 CAMAC 插件 TDC 的时间量程、飞行距离、系统分辨时间以及必须剔除  $\mu$  子等条件决定. 选为  $\beta_{\max} = 0.7$ . 由速度上下限定出的动量范围见表 1.

表 1

粒子	$\beta_{\min}$	$P_{\min}-P_{\max}$	$\Delta P(\text{MeV})$	$N$	$I(\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}(\text{MeV}/c)^{-1})$
$P$	0.49	521-926	405	102	$(2.08 \pm 0.21) \times 10^{-8}$
$D$	0.41	842-1851	1009	16	$(1.22 \pm 0.31) \times 10^{-9}$
$T$	0.34	1284-2777	1493	6	$(3.22 \pm 1.29) \times 10^{-10}$
$\alpha$	0.32	1344-3676	2332	2	$(0.67 \pm 0.47) \times 10^{-10}$

$\epsilon$  是核作用修正因子, 取重粒子与铅在 GeV 能区的核作用截面为  $\sigma_l = 1760\text{mb}^{[11]}$  (相当核作用长度  $\lambda_l = 193.7\text{g}/\text{cm}^2$ ), 对 2.6cm 厚的铅吸收体得  $\epsilon = 0.86$ .

最后得到四种重粒子在相应的动量区间内的平均通量  $I$  如表 1 所示。

所得结果与某些作者的结果比较如图 6 所示。总的说来都是比较接近的。质子通量比 G. Brooke<sup>[11]</sup> 和 A. M. Bakich<sup>[1]</sup> 的结果稍小, 氦的结果介于 F. Ashton<sup>[12]</sup>, C. R. Alcock<sup>[13]</sup> 和 A. M. Bakich<sup>[1]</sup> 三作者的结果之间。氙的结果与 Bakich 的结果很接近。该作者由 16 个氙事例得到的氙通量为  $I = 1.1 \pm 0.3 \times 10^{-10}\text{cm}^{-2}\text{Sr}^{-1}\text{s}^{-1}(\text{MeV}/c)^{-1}$ 。Bakich 在其全部实验过程中仅找到一个  $\alpha$  粒子, 并作了  $I_p/I_\alpha \sim 10^4$  的估计。我们得到的  $I_p/I_\alpha \sim 10^3$ 。

关于动量谱, 由于我们测量的质子动量范围只有 400MeV, 因此只能粗略地说明问题。如图 6 中  $P_1P_2$  (对应于 600 和 800MeV) 所示, 动量分布略有下降的趋势。可与 Brooke 的质子动量谱比较。

质子通量与  $\mu$  子通量的比  $I_p/I_\mu$  也是一个重要的参量。利用本实验组两年前测量的  $\mu$  子

动量谱及绝对通量的数据<sup>[14]</sup>得到  $I_p/I_\mu$  值如表 2 及图 6 所示, 所得结果与 Brooke<sup>[11]</sup> 的结果是比较接近的。

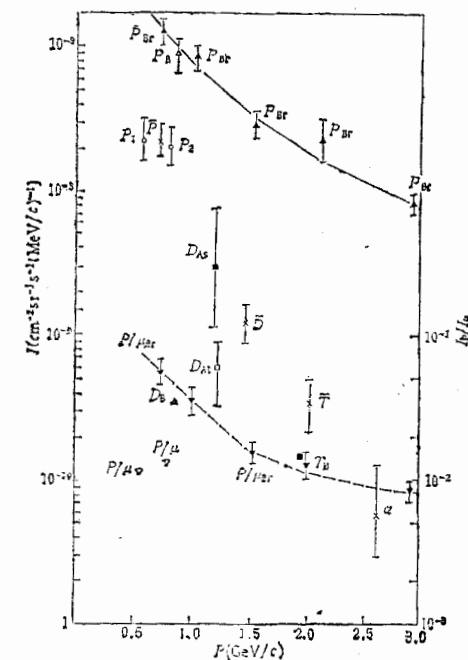


图 6 本实验结果与一些作者的结果的比较

$\times \bar{P}\bar{D}\bar{T}\bar{\alpha}$	$\blacktriangle P_{Br}$	$\blacktriangledown P/\mu_{Br}$	Brooke
$\circ P_1P_2$	$\square D_{Al}$		Alcock
$\nabla P/\mu$	$\triangle P_B D_B T_B$		Bakich
	$\blacksquare D_{As}$		Ashton

表 2

$P(\text{MeV}/c)$	$I_p$	$I_\mu$	$I_p/I_\mu$
	$(\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}(\text{MeV}/c)^{-1})$		
600	$(2.15 \pm 0.3) \times 10^{-8}$	$(2.02 \pm 0.2) \times 10^{-6}$	$(1.05 \pm 0.17) \times 10^{-2}$
800	$(2.02 \pm 0.3) \times 10^{-8}$	$(1.50 \pm 0.2) \times 10^{-6}$	$(1.33 \pm 0.28) \times 10^{-2}$

## 四、讨 论

根据前面对实验装置的描述和实验结果,可以得到下面几点看法:

1. 改变吸收体的厚度可以扩展测量速度的范围,吸收体厚度的选择是根据希望测量的粒子质量大小和速度下限值决定的.
2. 这个实验装置对于测量低速度大质量粒子是更有效的.
3. 这套飞行时间测量系统与其他探测器(例如磁云室或者量能器)配合,可以用来测量宇宙射线中各种成分的通量和能谱. 如果建成很大接受度的实验装置,也可以用来在宇宙射线中寻找稳定的奇异重粒子.

本工作得到了戴贵亮同志的支持和帮助,和计算机室的一些同志进行过有益的讨论,一并深致谢意. 感谢谢琦和张燕青在本实验中所做的工作.

## 参 考 文 献

- [1] A. M. Bakich et al., *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **11**(1978), 123.
- [2] A. M. Bakich et al., *J. Phys. G: Nuclear Phys.*, **5**(1979), 433.
- [3] S. L. Wu, DESY 84—028, March 1984.
- [4] J. Audouze and S. Vauclair, *An Introduction to Nuclear Astrophysics*, 1980.
- [5] C. R. Alcock et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **115**(1974), 245.
- [6] P. C. M. Yock, *Phys. Rev.*, **D18**(1978), 641.
- [7] F. Kajino et al., *J. Phys. G: Nuclear Phys.*, **10**(1984), 447.
- [8] C. Serre, CERN 67—5, 1967.
- [9] 王殿荣等, *高能物理与核物理*, **7**(1983), 529.
- [10] 王朝俊等, *高能物理与核物理*, **9**(1985), 147.
- [11] G. Brooke, *Proc. Phys. Soc.*, **83**(1964), 843.
- [12] F. Ashton, *Phys. Lett.*, **B29**(1969), 249.
- [13] C. R. Alcock, *Nuovo. Cim.*, **B22**(1974), 43.
- [14] 王孝良等, *高能物理与核物理*, **7**(1983), 401.

## MEASUREMENT OF HEAVY PARTICLE MASS DISTRIBUTION IN COSMIC RAY AT SEA-LEVEL

WANG DIAN-RONG WANG CHAO-JUN WANG XIAO-LIANG WANG DE-WU  
LIU NIAN-ZONG LI YUN-SHAN LI ZHI-PING LI CHENG-ZE LI ZHI-GANG LIN JIAN-FENG  
XU YU-LIN CHEN YUAN-BO CHEN ZHI-PING XU RONG-FEN XI JI-WEI YAO ZONG-YUAN  
ZHAO HAI-QUAN JIANG YING-YUAN LOU JIA-SHU XIE YI-GANG ZHANG JIA-QUAN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

The apparatus consisting of two time of flight systems and absorber and its performances are described. This apparatus has been used to measure heavy particle (p, d, t, and  $\alpha$ ) mass distribution in cosmic ray at sea-level, and the results compared with other works are given.