

15

99-102

地下 μ 子乳胶室的结构分析

李光炬

(基础科学系)

Tu 93

摘要 回顾了七年中所建的11个地下 μ 子乳胶室的结构概况及所获得的结果。从高能 μ 子与吸收物质的作用过程和乳胶室的探测效率分析,较为普遍被采用的厚型乳胶室并不明显地优于薄型室,因而薄室也是可供选择的室型。

关键词 乳胶室, 地下乳胶室, μ 子探测

结构分析

1 地下 μ 子乳胶室概况

对高能宇宙线 μ 子的探测,高山乳胶室囿于天顶角的范围,而地下乳胶室则不受天顶角大小的限制,因此是较为理想的 μ 子探测装置。我们从1979年起的七年时间里,共建了11个各种结构的地下 μ 子乳胶室,其概况如下表所示。

建室日期	解体日期	吸收材料	面积 (m^2)	曝光量 ($cm^2 \cdot sec$)	厚度 (c. u.)	地下深度 (m)
1979. 6. 28	1980. 5. 30	Pb	0.3	8.7×10^{10}	80	222
1979. 10. 8	1980. 5. 29	Pb	0.3	6.0×10^{10}	60	15
1980. 9. 11	1981. 11. 10	Pb	0.3	1.1×10^{11}	88	222
1980. 9. 15	1981. 11. 11	Pb	0.2	7.3×10^{10}	62	15
1981. 11. 10	1983. 4. 20	Pb	0.6	2.7×10^{11}	82	222
1981. 11. 11	1983. 4. 21	Fe	0.4	1.8×10^{11}	56	15
1984. 6. 25	1985. 5. 18	Pb	0.2	5.7×10^{10}	94	15
		Pb	0.4	1.1×10^{11}	84	15
		Fe	0.8	2.3×10^{11}	28	15
1985. 5. 18	1986. 5. 10	Pb	0.6	1.9×10^{11}	80	15

考虑到高能 μ 子与物质的作用截面较小,穿透能力较强,乳胶室的吸收层一般都设计得较厚,如前苏联的30 cm 铅厚^[1],日本奥只见(Okutadami)隧道的40 cm 铅厚^[2]和50 cm 铅厚^[3],我们亦取30 cm 到47 cm 的铅厚。

* 本文1993年2月17日收到。
国家自然科学基金资助的课题。

这些乳胶室的最大规模为3.2吨铅加4.4吨铁,总曝光量为 $1.57 \times 10^{12} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}$,但仅在1983年4月到1984年5月的铅室中,获得一个簇射能量大于10TeV、天顶角为 $m=4.29$ 的 μ 子事例^[1]。

2 μ 子在乳胶室中的能量损失

由于乳胶室的观测阈值为2TeV,因此应考虑高能 μ 子的行为。它与物质相互作用而产生能量损失,主要是由于韧致辐射、直接对产生和核相互作用。根据文献[5]和[6],选择全屏蔽条件,可以得到高能 μ 子在铅吸收层中的各种能量损失。

韧致辐射:

$$-(dE/dx)_{\text{brems}} = 0.37 \times 10^{-5} E \quad (\text{TeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$$

可见,按辐射长度的定义,高能 μ 子在铅中的辐射长度是非常大的:

$$\begin{aligned} X_{\mu} &= (m_p/m_e)^2 X_{\text{rad}} = 207^2 X_{\text{rad}} \\ &= 2.73 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 \quad (2.4 \times 10^4 \text{ cm}) \end{aligned}$$

直接对产生:

$$-(dE/dx)_{\text{prod}} \approx 0.88 \times 10^{-5} E \quad (\text{TeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$$

可见,由于质量为电子的207倍,很高能量的 μ 子,直接对产生的能量损失可以相当于、甚至超过韧致辐射的能量损失^{[5][6][7]}。

核相互作用:

$$-(dE/dx)_{\text{nucl}} \approx 0.5 \times 10^{-6} E \quad (\text{TeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$$

以上三种作用的总能量损失即为:

$$-(dE/dx)_{\text{total}} \approx 1.3 \times 10^{-5} E \quad (\text{TeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$$

于是,高能 μ 子在铅中的能量衰减长度(吸收长度)

$$L = 7.7 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 \quad (6.8 \times 10^3 \text{ cm 或 } 1.2 \times 10^4 \text{ c. u.})$$

3 对 μ 子探测效率的估计

对于在乳胶室中的能量损失达到其观测阈能2TeV以上的高能 μ 子,射程超过 $4 \times 10^5 \text{ m. w. e.}$ ^{[8][9]}(相当于 $3.5 \times 10^4 \text{ cm}$ 铅厚或 $6.25 \times 10^4 \text{ c. u.}$),见图1和图2。

可见对于在我们现有条件下实际可能建造的地下乳胶室而言,即使是通常意义上的“厚”室,也是极薄的,其对 μ 子的吸收介质厚度 h ,与由高能 μ 子在乳胶室内引起的簇射起始点位置分布的峰值所对应的介质深度(L 的数量级)相比,相差甚远。

μ 子在乳胶室的铅吸收层中的能量损失 $\Delta E \propto 1 - \exp(-h/L)$ 。因为 $h \ll L$,所以

$$\exp(-h/L) = 1 - h/L + 1/2! \cdot (h/L)^2 - 1/3! \cdot (h/L)^3 + \dots \approx 1 - h/L$$

则对不同的室厚 h_1, h_2 , μ 子的能量损失比为

$$\Delta E_2 / \Delta E_1 \approx h_2 / h_1$$

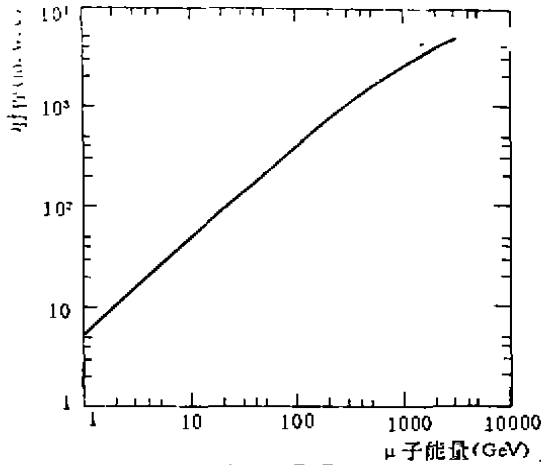


图1 [6]

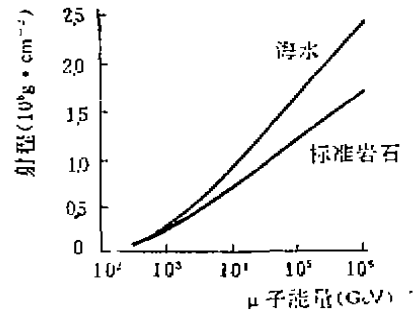


图2 [7]

高能μ子的射程—能量关系

大气中的高能μ子强度随天顶角增大而增大^[5],有 $I(\theta) \propto \sec\theta$ 的关系。在海平面高度的浅层地下乳胶室处,则可认为各种天顶角的母体介子都已衰变,除了极大天顶角的μ子由于穿越了过厚的地层而强度变小外,μ子的流强可以按不依赖天顶角而变化来处理^[7]。这样,乳胶室的侧面应具有与顶面相当的接受μ子的能力。基于这一点,地下μ子乳胶室的角度设置是很灵活的,有如我们所采用的水平设置,也有垂直设置和倾斜设置^[4]。

由前述的高能μ子在铅中的吸收长度、乳胶室的厚度等参数,参考[8]给出的乳胶室探测效率的计算和工作[2]、[3]给出的结果,地下乳胶室对μ子的探测效率约为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 数量级,且与室厚 h 基本成线性关系。

4 厚室与薄室的比较

前面给出我们的11个地下乳胶室的总曝光量,是仅按顶面积简单估算的。在地下222米深处的3个乳胶室,由于环境温度偏高,湿度较大,造成处理后的x光片质量较差,扫描寻找事例较为困难。若仅统计建于地下15米深处的8个乳胶室,根据具体的室结构,计入侧面的有效接收面积和顶面、侧面各自的有效立体角,则总曝光量约为 $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{sr}$ 。对于海拔高度略高于海平面的浅层地下,可选用海平面的μ子能谱,则簇射能量大于2TeV的μ子的平均流强不大于 $10^{-9} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 数量级^{[5][7]},见图3和图4。而乳胶室对μ子的探测效率为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$,则该8个乳胶室可接收到的μ子不多于 $10^0 \sim 10^1$ 数量级。再考虑到地下空间环境保持稳定的偏高温,导致x光片乳胶的潜影衰退,则我们的探测结果尚在涨落范围之内。

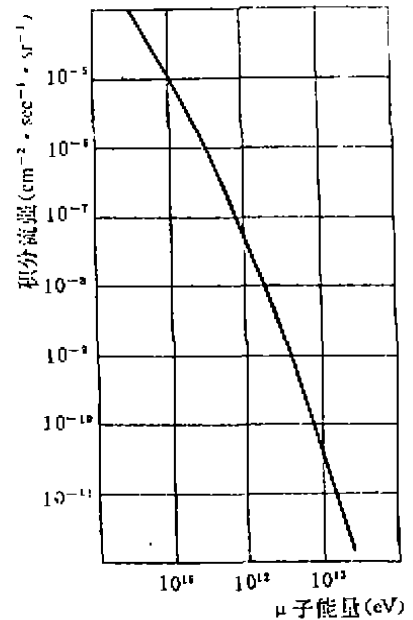


图3 高能μ子的积分能谱^[5]

根据以上的分析,地下 μ 子乳胶室的探测效率基本上正比于室厚,因而厚室的探测效率高于薄室,这也是通常采用厚室的原因。但在乳胶室的用铅量一定时,若选用薄室,总的探测结果由于室厚变薄而导致的探测效率下降的损失,将因为接收面积的相应增大而得到补偿。相同用铅量的薄室与厚室,侧面积基本相同,但薄室的顶面积按变薄的比例而增大。对常规厚度的乳胶室,厚室对薄室的探测效率比,不明显优于薄室对厚室的接收面积比。因此薄室也是可供选择的一种室型。

在地下空间允许的条件下,还可以考虑分离地放置各个单元,以便充分利用乳胶室侧面的接收作用。同时,若每层放置三张一袋的 x 光片,则可迅速剔除假事例点,大大加快扫描速度。

与刘中和、白光治同志进行了有益的讨论,谨此致以谢意。

参 考 文 献

- 1 M. A. Ivanova et al. 16th ICRC. Vol. 10(1979),35
- 2 K. Mizutani et al. 16th ICRC. Vol. 10(1979),40
- 3 M. Ichiju et al. 17th ICRC. Vol. 7(1981),27
- 4 Liu Z. H. et al. Proceedings of International Symposium on Cosmic Ray Superhigh Energy Interaction. Beijing (1986), p. 2~30
- 5 S. Hayakawa. Cosmic Ray Physics. New York, John Wiley (1969), 113~137, 359~402
- 6 A. O. Weissenberg. Muons. North-Holland Publishing Company, (1967), 306~327
- 7 O. C. Allkofer. 宇宙线入门. 徐春烟,朱清棋译. 科学出版社(1987), 79~84, 150~162
- 8 汤田利典. 用乳胶室研究超高能核作用. (1983), 12

(编辑:姚国安)

STRUCTURE ANALYSIS OF UNDERGROUND MUON EMULSION CHAMBERS

Li Guangju

(Dept. of Natural Science)

ABSTRACT This paper reviews structure and acquired outcomes of eleven underground muon emulsion chambers constructed within seven years. This paper holds that thick type emulsion chambers haven't an advantage over thin type emulsion chambers on the basis of interaction between high energy muons and absorbent mediums, and detective efficiency of emulsion chambers.

KEY WORDS emulsion chamber, underground emulsion chamber, muon detection

