

# 宇宙线超高能多核心族事例

邹宝堂 王承瑞  
(山东大学)

任敬儒  
(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

本文报道了甘巴拉山乳胶室在核乳胶片上记录的宇宙线超高能多核心族事例 KOE19 ( $\Sigma E_{\gamma} \approx 1530\text{TeV}$ )。分析了事例的族现象特征,并同其它大族事例进行比较。把事例中的几个主要核心的特性同加速器和 C-喷注的实验结果以及 TeV 能区唯象 QCD 理论计算结果作了比较,讨论了 TeV 能区超高能粒子强相互作用的一些特征。

## 一、引 言

高能宇宙线粒子产生的大气核作用,记录在高山乳胶室里,是一束方向相同的高能簇射,称为“族事例”。细致研究族现象,能得到有关超高能核作用中粒子产生的许多信息。在  $10^{15}\text{eV}$  以上能区,关于强相互作用的实验结果目前还只能利用宇宙线获得。特别是高山乳胶室实验,能提供比较可靠的实验数据。

本文研究的 KOE19 族事例是 1981 年由甘巴拉山(海拔 5,500 米)乳胶室的 KOE 19 单元获得的。它是一个超高能族事例。在乳胶片上测得的总观测能量为  $\Sigma E_{\gamma} \approx 1530\text{TeV}$  ( $E_{\min} = 1.5\text{TeV}$ )。原初宇宙线粒子(一般是质子)的能量估计有  $10000 \sim 15000\text{TeV}$ , 比 SPPS 的实验能量(静靶系  $155\text{TeV}$ ) 高两个数量级。KOE 19 事例是一个多核心事例。在强相互作用中,十年前理论工作者曾预言<sup>[1]</sup>,组成强子的部分子之间的相互作用,会产生喷注,并列出了宇宙线事例中的“多芯”现象。喷注是超高能粒子相互作用的重要特征。喷注型事例可以显示出喷注的各种产生和碎裂特性,有助于了解高能粒子的强相互作用。目前,在高于加速器能域,有关喷注的实验结果还相当稀少。KOE19 事例的产生点相当低,一般来说是一次核作用的产物,免除了多次作用的干扰,为超高能区喷注型事例的研究提供了条件。

本文下一节介绍实验概况和测量方法;第三节分析事例的族现象特征;第四节研究事例喷注的产生和碎裂特性;第五节同 TeV 能区的 QCD 理论计算结果比较;最后是简短小结。

## 二、实验概况和测量分析方法

甘巴拉山乳胶室的实验概况和 KOE 19 单元的细致结构见文献 [2]。该单元里的感光材料即有 X 光片,又有核乳胶片。文献 [2] 已经报道了在 X 光片上测量分析 KOE 19 族事例的结果。文献 [3] 也报道了在 X 光片上单面测量分析的结果。本文是在核乳胶片上测量分析的。用核乳胶片研究族事例,有很多优点,如记录阈能低、本底均匀、颗粒度好、空间分辨率高、没有双面斑交迭问题及可以数簇射电子径迹等。因此,测量分析核乳胶片上记录的 KOE 19 事例,能够得到准确的簇射能量和精确的簇射斑坐标。本文的主要测量分析工作是在 NGD 全自动测微光度计上进行的。该装置测量精度高,特别适宜于大族事例分析。为了更细致地研究 KOE 19 事例,全部扫描和作靶图工作都在显微镜下进行。借助显微镜,用数电子径迹的方法,比较精确地确定了许多低能簇射的能量,作出乳胶片上的黑度~电子径迹密度定标曲线<sup>[4]</sup>,并用它确定了 KOE 19 事例簇射粒子的能量。

为了确定 KOE 19 事例的产生高度和更好地分析事例的其它特性,文献 [3] 对 X 光片上记录的 KOE 19 事例进行了细致的单面测量和分析。测量每两个簇射在上、下层感光材料上簇射斑间的距离增量,利用几何法求得事例的产生高度,  $H = 70 \pm 25$  米。本工作在核乳胶片上测量,可以选择更小的测量光孔 ( $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ),更精确地测定簇射斑坐标。我们利用几何方法,分别在核心区域 ( $\leq 5 \times 5 \text{mm}^2$ ) 和外围区域 ( $5 \times 5 \sim 40 \times 40 \text{mm}^2$ ) 考察了事例的产生高度。由 20 个核心区域的簇射得到  $\langle H \rangle \approx 61$  米,由 16 个外围区域的簇射得到  $\langle H \rangle \approx 74$  米,与 X 光片上分析的结论一致。由于事例边远区域 ( $\geq 40 \times 40 \text{mm}^2$ ) 的 14 个簇射,远离中心,可能不是本次作用产生的,在分析粒子横向行为时应该略去。几个外围喷注都在核心区域,我们认为它们是在一次作用中产生的,具有同样的产生高度。如果假定 KOE 19 事例的  $\gamma$  线多数来自  $\pi^0$  介子衰变,利用运动学关系可以得到  $\pi^0$  介子的不变质量。当采取  $H = 70$  米时,不变质量分布同模拟计算结果比较,可以发现<sup>[5]</sup>,在实验分布的 150MeV 和 500MeV 处存在峰值,它们近似地分别对应  $\pi^0$  和  $\eta$ 。在以下分析中,我们假定事例产生高度是 70 米。这样,除边远区域外(只有极少数簇射),外围区域、尤其是核心区域的分析,在定性或半定量意义上,不会有很大误差。

## 三、KOE 19 事例的族现象特征及与其它事例的比较

1. 事例概述。KOE 19 事例边远部分 ( $\geq 40 \times 40 \text{mm}^2$ ) 有 14 个簇射,外围部分 ( $5 \times 5 \sim 40 \times 40 \text{mm}^2$ ) 有 133 个簇射,核心部分 ( $\leq 5 \times 5 \text{mm}^2$ ) 的垂向靶图如图 1,有 116 个  $\gamma$  簇射,能量为 1140TeV,占事例总能量的 74%。表 1 列举了各种能量截断下的族参数值。其中  $E_\gamma \geq 10 \text{TeV}$  的簇射 39 个,主要集中在 5 个喷注中,占有 732TeV 能量,是总能量的 48%。

2.  $\gamma$  线的积分能谱。积分能谱如图 2,呈现指数形式,  $\sim e^{-E_\gamma/\langle E_\gamma \rangle}$ ,其中  $\langle E_\gamma \rangle = 8.8$  TeV。低能部分上涨可能是事例外围部分电磁级联的结果。如果将事例核心区域的  $\gamma$  线积分能谱用指数曲线拟合,结果会更好。事例的分数能谱 ( $f$  谱)也呈现指数型,且有  $\langle f \rangle$

感  
族  
测  
空  
上  
量  
簇  
非  
交

宁  
化  
作  
空  
0  
图  
0  
立  
匀  
事  
之  
E  
卜

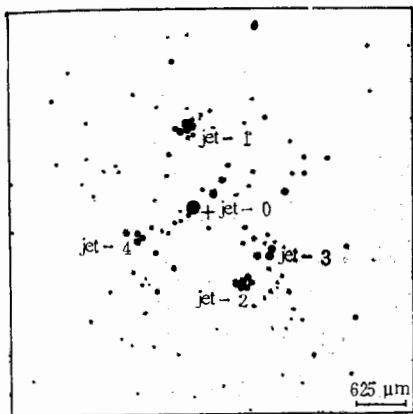


图 1 核心区域  $\gamma$  簇射靶图  
其中黑圆点面积与簇射能量相当

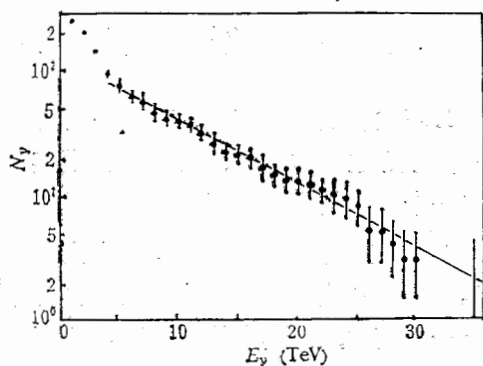


图 2  $\gamma$  线的积分能谱

表 1 不同能量截断簇参数值

参数	截断能量 (TeV)	13.0 (TeV)	10.0 (TeV)	7.5 (TeV)	5.0 (TeV)	3.0 (TeV)	1.5 (TeV)
$N_\gamma$		25	39	52	78	176	261
$\Sigma E_\gamma$ (TeV)		570	732	838	992	1348	1534
$\langle E_\gamma \rangle$ (TeV)		22.8	18.8	16.1	12.7	7.7	5.9
$\langle R_\gamma \rangle$ (MM)		0.936	3.588	3.195	3.244	5.675	7.367
$\sqrt{\langle R^2 \rangle}$ (MM)		1.04	10.218	9.077	8.151	13.066	14.892
$\langle E_\gamma R \rangle$ (TeVMM)		21.539	46.281	39.050	32.388	30.537	28.058
$\sqrt{\langle E^2 R^2 \rangle}$ (TeVMM)		25.084	110.665	97.534	81.842	72.484	63.550

$\approx 5.2$ .

3.  $\gamma$  线的横动量分布。横动量可以由公式  $P_{T\gamma} \approx E_\gamma R / (H / \cos\theta)$  近似求得。其中  $E_\gamma$ 、 $R$ 、 $H$  和  $\theta$  分别为  $\gamma$  簇射的能量、到事例中心的距离、事例产生高度和天顶角。横动量分布如图 3，“●”是乳胶片上测量的结果，“×”是 ISR 事例的平均结果，“○”是 C-喷注的平均结果<sup>[6]</sup>。在  $P_{T\gamma} \leq 1.2 \text{ GeV}/c$  范围，KOE19 事例与 C-喷注的分布及 ISR 数据都符合  $\sim P_{T\gamma} e^{-AP_{T\gamma}}$  形式。ISR 数据  $A = 6$ ，C-喷注和 KOE19 事例的  $A$  值近似相同。由此得到，当  $P_{T\gamma} \leq 1.2 \text{ GeV}/c$  时，KOE19 事例  $\gamma$  线的平均横动量为  $\langle P_{T\gamma} \rangle \approx 0.20 \text{ GeV}/c$ 。如前所述，若不考虑事例边远部分的 14 个簇射，在  $P_{T\gamma} > 1.2 \text{ GeV}/c$  区域，只有极个别粒子，它们属于外围喷注。这个

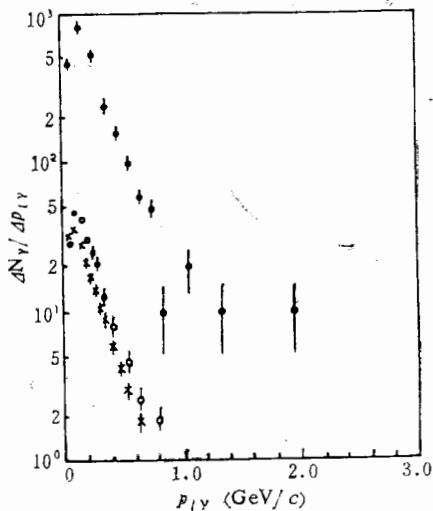


图 3  $\gamma$  线的横动量分布

● KOE19 ( $H = 70\text{m}$ ); ○ C-jet; × ISR

区域的统计涨落较大。

#### 四、KOE19事例的多喷注特征及与加速器实验结果的比较

1. 喷注和喷注型事例。喷注一般指强作用末态一束相当准直的强子，或认为是赝快度-方位角空间的集团。参照加速器实验分析有关喷注的团化算法<sup>[7]</sup>，给每个簇射能量定义一个能量矢量，由事例的产生顶点指向簇射的记录点。先寻找事例中的最高能量簇射，在 $\eta$ - $\varphi$ 空间计算其它簇射相对于最高能量簇射的 $d$ 值， $d = \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta\eta^2}$  ( $\varphi$ 是弧度)，将最小 $d$ 值的簇射与能量最高的簇射矢量相加，重复以上过程直到 $d \geq 1.0$ 为止，作为第一个喷注。在其余的簇射里，再寻找最大能量的簇射，重复以上作法，得到第二个喷注，等等。人们研究的喷注的横能量 $E_t$ 一般大于10、15、35或60GeV，各实验组的选择不尽相同。KOE19事例4个外围喷注的最大 $d$ 值在0.82~1.0之间，最大方位角 $\Delta\varphi$ 在 $38^\circ \sim 44^\circ$ 之间，最小横能量 $E_t$ 大于10GeV，最大半锥角 $\Delta\theta^*$ 在 $3.8^\circ \sim 6.1^\circ$ 之间。参照加速器实验分析，我们把喷注型事例的判据规定为 $\sum_i (E_{jet})_i / \Sigma E_T \geq 0.7$ 。为了宇宙线实验研究工作的方便，我们在实验室系定义上式。一般来说，实验室系的喷注型事例在质心系也是喷注型事例。KOE19事例5个喷注的能量和为900TeV ( $E_{\min} = 4\text{TeV}$ )，占事例总能量 $\Sigma E_T = 1138\text{TeV}$  ( $E_{\min} = 4\text{TeV}$ )的79%，KOE19事例可以称为喷注型事例。喷注型事例的许多特征与喷注的产生和碎裂特性有关，因此，区别喷注型事例是有意义的。

2. 喷注的亚结构。如图1，接近事例中心的jet-0是“束喷注”，几个超高能粒子能量几乎成倍递减，沿弧线近于等间距分布。四个“外围喷注”有“喷注芯”，这种“喷注芯”具有高能流密度和高多重数密度的特征。喷注亚结构的探测依赖于实验仪器和记录材料的颗粒度<sup>[8]</sup>。“束喷注”的亚结构在对撞机实验中因束流方向难以设置探测器而记录不完全。

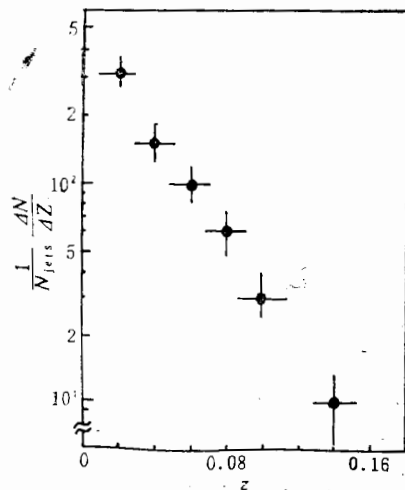


图4 喷注的碎裂变量分布

3. 外围喷注的横动量。喷注中每个 $\gamma$ 簇射的横动量方向假定由事例的能量中心指向簇射的记录位置。按矢量合成，可以得到每个喷注的横动量。如果只考虑喷注里的次级粒子是 $\pi$ 介子，4个外围喷注的横动量分别为12.8、11.2、6.8和8.6 GeV/c。4个外围喷注的横动量矢量近于平衡。

4. 半锥角分布。ISR和SPPS能区的结果<sup>[9]</sup>，前者最可几值在 $\theta^* \approx 7^\circ$ 处，后者峰值向 $\theta^*$ 更小的位置移动， $\theta^* \approx 2^\circ$ 。KOE19事例4个外围喷注的数据分布峰值在 $\theta^* \approx 0.5^\circ$ 处。

5. 喷注的碎裂变量及其分布。族事例喷注分析中，碎裂变量可以定义为 $z = 2E_{T\parallel} / 3(\Sigma E_T)_{jet}$ 。即 $\gamma$ 线的能量沿喷注轴的分量占喷注总观测能量的分数，其中2/3因子是考虑到次级粒子主要是

$\pi$  介子以及我们测量的  $\gamma$  光子主要来源于  $\pi^0$  介子衰变, 这样定义的  $z$  同加速器实验分析中定义的相当. 变量  $z$  的分布称为喷注的碎裂函数:  $D(z) = \frac{1}{N_{\text{jet}}} \frac{dN_{ch}}{dz}$ . 式中  $N_{\text{jet}}$  是

喷注数目,  $N_{ch}$  是喷注内荷电粒子多重数. ABCS 合作组在 ISR 能区研究  $\pi-\pi$  事例的结果<sup>[10]</sup>, 在低  $z$  区  $D(z)$  呈指数形式,  $\sim e^{-Bz}$ ,  $B \approx 7$ . CCOR 合作组在 ISR 较低能区得到  $B \approx 5.3$ <sup>[11]</sup>. 在 FNAL<sup>[12]</sup>, 应用比 ABCS 合作组更低的  $P_t$  喷注观察到  $B \approx 4.6$ . SPFS 的结果不是很好的指数型<sup>[13]</sup>, 但  $D(z)$  的变化比 ISR 能区陡,  $z$  的平均值比 ISR 的结果小. 图 4 表示 KOE19 事例 5 喷注的碎裂函数,  $z \geq 0.01$ . 小  $z$  区的  $D(z)$  近似于指数形式,  $B \approx 27$ . 如[10]指出的, 当散射部分子能量增加时, 碎裂的数目会增加,  $z$  就下降, 结果导致更陡的斜率. KOE19 事例是超高能事例,  $B$  较大,  $z$  的平均值很小, 尽管此处的统计性很差, 但同加速器数据变化趋势是一致的.

6. 喷注内荷电粒子多重数. KOE19 事例是超高能事例, 喷注的能量和碎裂粒子的能量都较高. 在乳胶片的测量分析中, 我们统计了显微镜下所能看到的属于喷注的所有簇

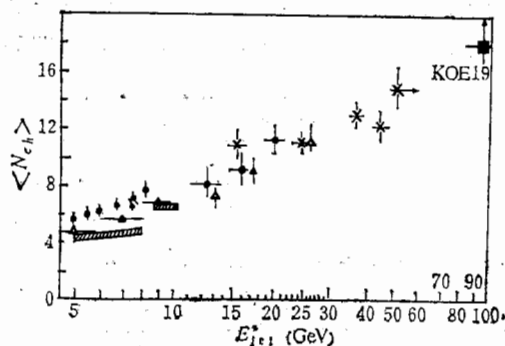


图 5 喷注内荷电粒子多重数随喷注能量的变化

× UA2(PP)    ● PP  
▲  $\nu$ P        ▨ cc  
△ PETRA    ■ KO

射, 最低能量是 4TeV. 喷注里的荷电粒子平均多重数  $\langle N_{ch} \rangle \approx 18$ , 质心系中 5 个喷注的平均能量是 95GeV, 它们的关系如图 5 所示<sup>[14]</sup>. 图中“×”表示 CERN SPFS 实验 UA2 组的数据<sup>[15]</sup>, 其中考虑到胶子喷注碎裂. 另外, 此处我们简单认为背靠背两喷注的不变质量近似等于两喷注能量. 由图可见, 对于不同类型的反应过程和不同能区, 结果相当类似. KOE19 事例喷注能量高,  $N_{ch}$  显著增大.

## 五、同 TeV 能区唯象 QCD 理论计算结果的比较

CERN 大型强子对撞机 (LHC) 喷注调研组最近研究了 TeV 能区强子碰撞产生的喷注的特性<sup>[8]</sup>. 理论计算中 10+10TeV 能区的  $z$  值普遍比 KOE19 事例的  $z$  值小, 这同前节的规律是一致的. 理论结果说明, 胶子喷注能量的 50% 都由  $z \leq 0.025$  的粒子携带. 夸克喷注的对应值是  $z \leq 0.06$ . KOE19 事例喷注能量的 50% 都由  $z \leq 0.045$  的粒子携带. 图 6 表示喷注内的粒子多重数随喷注能量的变化<sup>[8]</sup>. KOE19 事例  $\langle N_{ch} \rangle_{\text{jet}} \approx 18$ ,

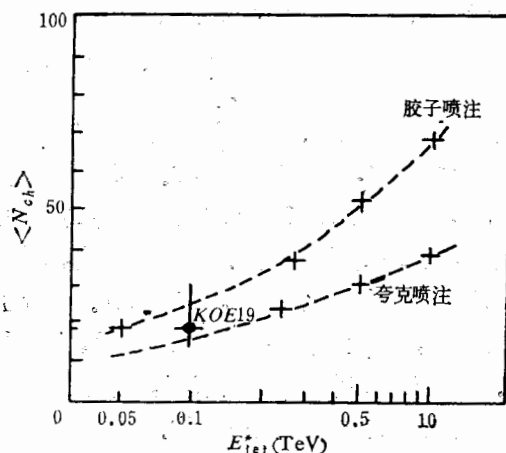


图 6 喷注中电荷粒子多重数

介于理论计算的胶子喷注和夸克喷注之间,同理论计算基本上一致。KOE19 事例喷注的最大半锥角是  $5^\circ \sim 6^\circ$ , 4 个外围喷注的粒子数是 67, 能量是 755 TeV。实验点落在已知喷注角锥外边粒子数分数和能量分数的理论曲线附近<sup>[5]</sup>。这说明喷注宽度同 TeV 能区的理论结果是可以比较的。应用 ISAJET 程序产生的超高能域蒙特卡罗事例<sup>[6]</sup>, 其亚结构具有喷注芯特征, 这同 KOE19 事例的“喷注芯”结构相似。另外, 应用团化技术<sup>[16]</sup>, 由 TeV 能区蒙特卡罗事例重建的喷注数目的分布,  $E_t > 100 \text{ GeV}$  时, 喷注数目在 2~6 之间, 峰值在 2~3 处。  $E_t > 10 \text{ GeV}$  时, 喷注数目在 2~12 之间, 峰值在 3~7 处<sup>[8]</sup>。KOE19 事例  $N_{jet} = 4$ , 在理论结果的峰值范围。以上事实说明, LHC 喷注调研组在 TeV 能区选取的“部分子簇射加弦碎裂模型”可能是接近实际的。

本文对于 KOE19 族事例的分析, 采取与加速器实验的处理相似、与强相互作用 QCD 理论相联系的分析方法。这样做一方面便于同加速器实验和唯象 QCD 理论计算相比较, 另一方面能更深入地分析和了解强子的结构及强相互作用的动力学机制。由 KOE19 事例分析中得到的初步结果, 可以看出这种方法是有意义的。但是, 由于事例的产生高度难以严格确定, 事例中也会混入少数更高处作用产生的簇射, 本文的部分实验结果只具有定性或半定量的意义。我们期待有更多的类似事例可供进一步研究。

本文得到本刊编审同志及合作组其他成员的热情帮助, 特此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] S. M. Berman, J. D. Bjorken and J. Kogut et al., *Phys. Rev.*, D4(1977), 3388; S. D. Ellis and M. B. Kislinger, *Phys. Rev.*, D9(1974), 2207.
- [2] 任敬儒等, 高能物理与核物理, 2(1984), 136.
- [3] 任敬儒, 山东大学学报(自然科学版), 3(1984), 44.
- [4] 邹宝堂等, 山东大学学报(自然科学版), 4(1984), 60.
- [5] 任敬儒等 19th ICRC (LA JOLLA USA) 6 (1985) 309, 313.
- [6] N. Arata, *Nucl. Phys.*, B211 (1983), 189.
- [7] G. Arnison et al., *Phys. Lett.*, 132B (1983), 214.
- [8] T. Akesson et al., CERN-EP/84-11 (1984).
- [9] R. Horgan and M. Jacob, CERN-Rop. 81-04 (1981); A. L. S. Angelis et al., CERN-EP/84-46

[10]  
[11]  
[12]  
[13]  
[14]  
[15]  
[16]

Te  
of  
tic  
ra  
ar  
Q  
di

- (1984).
- [10] C. Kourkoumelis et al., *Phys. Lett.*, **86B** (1979), 391.
- [11] A. L. S. Angelis et al., *Physica Scripta*, **19** (1979), 116.
- [12] C. Bromberg et al., *Nucl. Phys.* **B134** (1978), 189.
- [13] C. Rubbia, CERN-EP/84—55 (1984).
- [14] E. Leader and E. Pradazzi, "An Introduction to Gauge Theories and the 'New Physics', p. 421.
- [15] P. Bagnaia et al., *Z. Physik*, **C20** (1983), 117.
- [16] M. Banner et al., *Phys. Lett.*, **118B** (1982), 203; P. Bagnaia et al., CERN-EP/83—94 (1983).

1472a

## A COSMIC RAY SUPER HIGH ENERGY MULTIJET FAMILY EVENT

ZOU BAO-TANG WANG CHENG-RUI

(Shandong University)

REN JING-RU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

1472b

### ABSTRACT

A cosmic ray super high energy family event with visible energy of about 1500 TeV and five big cores is reported. This event was found in the 1980—1981 exposure of Mt. Kambala (5500 M a.s.l.) emulsion chamber experiment. The family characteristics are analyzed and compared with the other cosmic ray events in the same energy range. The production and fragmentation characteristics of the five jets are studied and compared with the experimental results of accelerators and C-jets as well as with QCD predictions up to TeV. Some features on hadronic interactions at TeV range are discussed.

multijet

above the TeV range