

# 族事例多心结构现象分析

范晓龄 任敬儒 陆德苓 苏实

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

王承瑞 何瑁 曹培园 李金玉

(山东大学物理系, 济南 250100)

## 摘 要

对传统的集团化方法进行了改进, 采用扫描集团化方法对族事例进行处理, 重新定义了多心结构事例的选择标准, 通过多心结构事例实验数据与模拟计算结果的比较, 研究超高能区核相互作用的规律. 本文同时提出了用主集团的能量份额来辨认由初级质子所产生的大族事例 ( $\sum E_{\gamma} \geq 500 \text{ TeV}$ ) 的方法.

## 一、引 言

用大面积高山乳胶室观测宇宙线超高能核作用, 是探索  $10^{14} - 10^{17} \text{ eV}$  能域核作用规律和寻找新现象的重要手段之一. 乳胶室实验所观测到的多心结构现象, 是指族事例中的次级粒子集中于空间几个不同的区域内, 形成若干个彼此独立的集团. 为了解释这种有趣的现象, 人们已经做了很多尝试, 如对所观测到的族事例进行集团化处理, 力求还原出其原初核作用的特征, 以及将实验数据和各种模型的模拟计算结果进行比较, 以求获得多心结构事例产生机制的信息等.

对于双心结构事例, 恰卡塔亚实验组曾提出一种假设<sup>[1]</sup>, 即在超高能相互作用中产生一种未知的“Geminion”重粒子, 它很快地衰变为横动量大于  $10 \text{ GeV}/c$  的两个粒子, 双心事例则为这两个粒子在大气中级联过程的产物. Dunaevsky 在 QCD 理论的框架下, 按大  $p_t$  jet 产生截面随能量的增加而增长, 在模拟计算中考虑碎裂区 jet 对双心事例的贡献<sup>[2]</sup>, 结果表明普通核作用机制 (不包含大  $p_t$  jet 产生过程) 不能解释实验上获得的  $x_{12} \geq 700 \text{ TeV} \cdot \text{cm}$  双心事例, 而在核作用模型中引入大  $p_t$  jet 产生后, 模拟计算可以完全解释大  $x_{12}$  值双心事例的产生. 中日甘巴拉山实验组在 HDSQI 模型中引入由 QCD 描写的大  $p_t$  jet 产生, 对实验上所观测到的多心结构事例进行分析<sup>[3]</sup>, 结果表明, 大  $p_t$  jet 对多心事例的贡献小于百分之几.

“lnS 物理”能否完全地解释高山乳胶室实验所观测到的多心结构现象? QCD jet 对多心结构事例究竟有多大贡献? 多心结构现象中是否蕴藏着新的物理? 本文对传统的集团

化方法进行了改进,尝试用扫描集团化方法对族事例进行集团化处理,重新定义了多心结构事例的选择标准,使之能有效地挑选出具有明显多心结构的事例.利用MPI模型<sup>[4,5]</sup>,对中日合作西藏甘巴拉山乳胶室实验所获得的部分族事例(选择无偏见)中的多心结构事例进行了分析.

## 二、多心结构事例的选择

实验上所观测到的多心结构事例是由彼此明显分离的集团构成的,因此在对多心结构事例进行分析之前,首先必须对族事例进行集团化处理,即确定族事例中哪些次级粒子属于同一个集团,共有多少个集团,每个集团所包含的次级粒子数目、能量及扩展范围等,然后定义合适的多心事例选择标准,使之能有效地挑选出具有明显多心结构的事例,再对所挑选出的多心事例进行分析.

### 1. 扫描集团化方法

传统的集团化方法参阅文献[3],本工作采用扫描集团化方法对族事例进行集团化处理.如图1所示,将 $40 \times 50 \text{cm}^2$ 的X光片等分为 $160 \times 200$ 格,每格面积 $D_s = 2.5 \times 2.5 \text{mm}^2$ .对于一个族事例,在X光片上进行扫描,首先找到能量沉积最大的一格,将该格的能量沉积标记为 $E_{\max}^{(0)}$ .扫描其周围第一圈格子,设其能量沉积之和为 $\Delta E_1$ ,如

$$\frac{\Delta E_1}{E_{\max}^{(0)}} > 0.1,$$

则将 $\Delta E_1$ 记入 $E_{\max}^{(0)}$ ,令 $E_{\max}^{(1)} = E_{\max}^{(0)} + \Delta E_1$ ,然后扫描周围第二圈格子,……,设扫描第 $i+1$ 圈格子时

$$\frac{\Delta E_{i+1}}{E_{\max}^{(i)}} \leq 0.1,$$

则此时的 $E_{\max}$ 为该集团的能量,其扩展面积为:

$$S_1 = [(2i+1) \times 2.5]^2 \text{ mm}^2.$$

按上述相同的方法再在余下的格子中去组合第2、3、…个集团,直到族中所有的次级粒子被组合完为止.

扫描集团化方法能有效地将集中在局部区域内的次级粒子组成一个集团,同时避免了将低能、分散的次级粒子组成一个集团的情况,弥补了传统集团化方法的不足.

### 2. 多心结构事例选择标准

传统的多心事例选择标准参阅文献[3],本工作对多心事例选择标准进行了重新定义.将集团的能量按大小顺序进行排列,即 $E_1 \geq E_2 \geq \dots \geq E_N$ ,如前 $N_c$  ( $N_c \geq 2$ )个集团满足如下标准,则定义该事例为多心结构事例,心的数目为 $N_c$ :

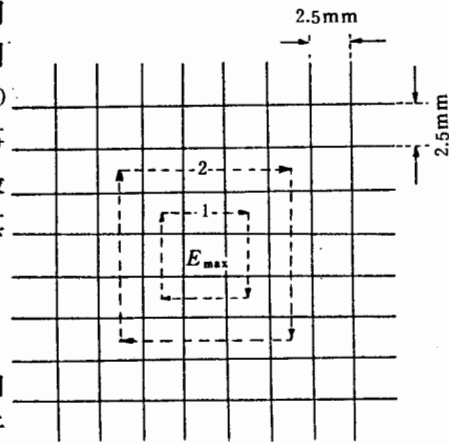


图1 扫描集团化方法示意图

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum E_i \geq 100 \text{ TeV}; \\ \frac{E_i}{E_1} \geq 0.2 \quad (i = 2, 3, \dots, N_c); \\ \sum E_i \geq 0.8 \sum E_j; \\ R_{ij} > \sqrt{S_i} + \sqrt{S_j} \quad (i < j, i \text{ 和 } j = 1, 2, \dots, N_c); \end{array} \right.$$

其中  $S_i, S_j$  分别为第  $i, j$  个集团的扩展面积. 与传统的标准相比较, 该标准对单个集团的能量作了一定的要求, 同时放松了对集团之间距离的限制, 弥补了传统标准的不足. 为方便起见, 将传统的多心结构事例选择方法称为方法 A, 将本工作所采用的方法称为方法 B, 图 2 给出了两种方法的比较.

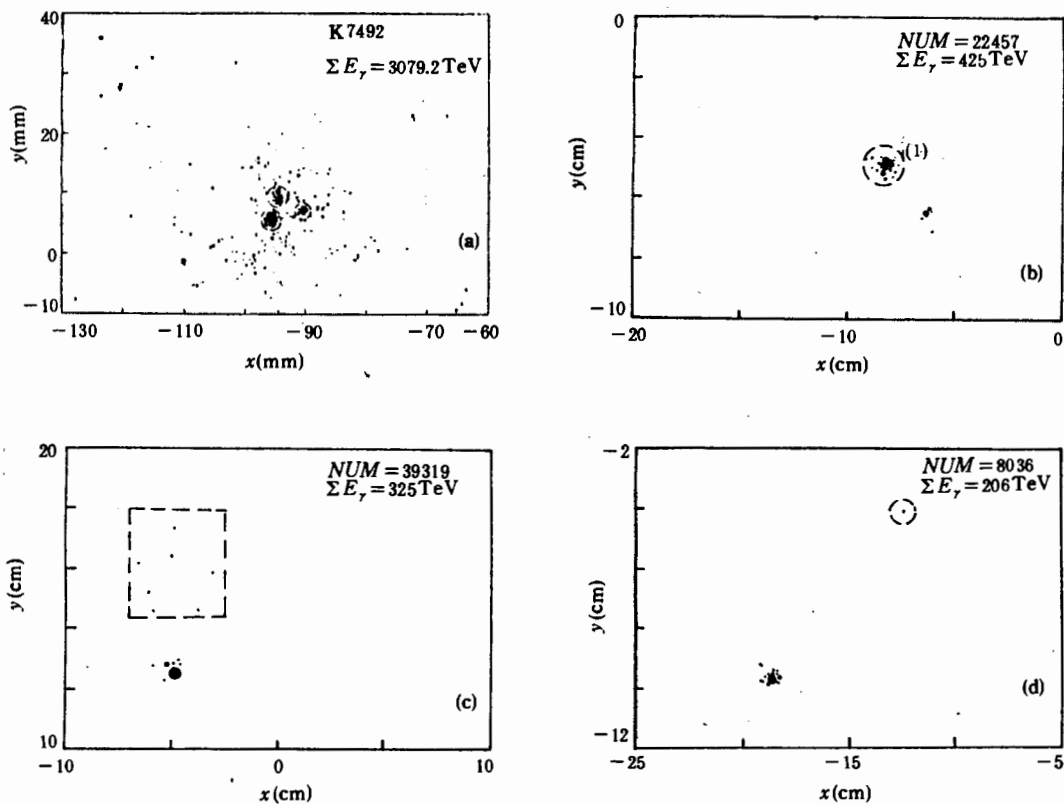


图 2 方法 A 与方法 B 的比较

图 2(a) 为 K7492 事例中心部分靶图, 它具有明显的三心结构, 由于集团之间相距较近, 被方法 A 漏选. 图 2(b) 是一个明显的双心事例, 但方法 A 将集团 (1) 组成了 2 个集团, 也被漏选. 图 2(c) 的事例不具有多心结构, 方法 A 将虚线所围区域内低能、分散的次级粒子组成了一个集团, 因而判断其为双心事例. 图 2(d) 是一个多心结构不明显的事例, 两个集团的能量相差太大, 由于方法 A 对单个集团的能量没作要求, 因而判断其为双心事例. 对模拟计算结果的分析表明, 方法 B 所挑选出的多心结构事例, 只有  $\sim 50\%$  能用方

法 A 挑选出来.

### 三、集团特性的分析

#### 1. 集团的产生高度

如集团中来自同一高度  $H$  的次级粒子能量之和占集团总能量的 80% 以上, 则定义  $H$  为该集团的产生高度. 模拟计算给出, 在传统的集团化方法下, 只有 ~40% 的集团有产生高度, 而在扫描集团化方法下, ~70% 的集团是有产生高度的. 扫描集团化方法能有效地将集中在局部区域内的次级粒子组成一个集团, 同时避免了将分散、低能的次级粒子组成一个集团的情况, 因此它较传统的集团化方法更合理地反映了族事例中集团产生的实质: 大部分集团的产生不是由于统计涨落造成的, 它们是核作用中

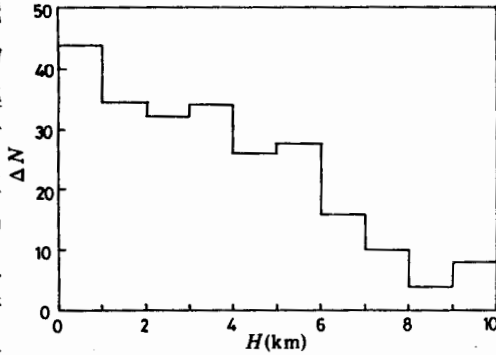


图 3 集团产生高度的分布

产生的高能次级粒子在大气中级联过程的产物. 图 3 给出了扫描集团化方法下集团产生高度的分布, 从图中可以看到, 集团的产生高度大部分分布在 0—5km 的区域. 高空产生的集团须在大气中传播较长的距离才能到达观测面, 集团中次级粒子与空气核发生多次核作用, 其能量迅速减小, 横向扩展增大, 很难再以集团的形式被乳胶室记录下来.

#### 2. 集团的能量

设  $E_c$  表示集团的能量,  $f_c = \frac{E_c}{\sum E_i}$  表示

集团占整个族事例能量的份额, 图 4 给出了  $\sum E_i \geq 100\text{TeV}$  族事例集团能量份额  $f_c$  的分布, 可见模拟计算与实验点吻合得很好.

由于轻核在大气中平均自由程较重核长, 第一次作用点高度低, 且非弹性度小, 所产生的次级粒子数目少, 因此一般来讲, 初级轻核产生族事例的效率较初级重核高, 所产生的族事例中次级粒子分布范围窄 (对  $\sum E_i \geq 100\text{TeV}$  族事例,  $\langle R \rangle_{Fe} \approx 4 \langle R \rangle_p$ ), 能量分布也较初级重核集中. 图 5 给出了初级质子与铁核

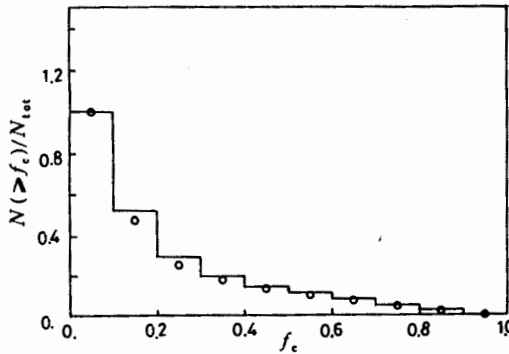


图 4  $\sum E_i \geq 100\text{TeV}$  族事例集团能量份额的分布

折线为 MPI 模型的结果, “·”表示实验点

入射时族事例集团能量份额  $f_c$  分布的比较, 可见初级铁核所产生族事例中集团的能量份额较初级质子小. 由于强子-核碰撞所产生的次级粒子数目为强子-强子碰撞的  $A^\delta$  倍 ( $A$  为核的质量数,  $\delta = 0.12 - 0.14$ )<sup>[6,7]</sup>, 随着能量的增加, 重核与空气核碰撞时次级粒子数目的增长较质子与空气核碰撞要快得多, 次级粒子的能量份额迅速下降, 更难以形成能量份额高的集团, 因此对于大族事例, 初级重核所产生的族事例中集团的能量份额较初级质子小的现象更加明显. 从图 5 可以看到, 对  $\sum E_i \geq 500\text{TeV}$  族事例, 初级铁核所产生的族事

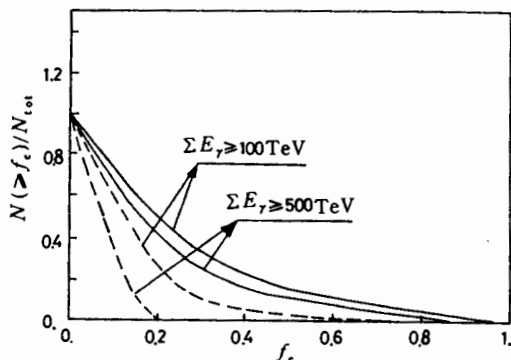


图5 质子原初与铁核原初族事例集团能量份额的比较

“—”质子原初，“---”铁核原初

例中集团的能量份额不超过0.2。

### 3. 利用主集团的能量份额辨认由初级质子产生的大族事例( $\Sigma E_\gamma \geq 500 \text{ TeV}$ )

在重核为主的混合初级宇宙线入射情形下,模拟计算给出, $\Sigma E_\gamma \geq 500 \text{ TeV}$ 族事例主要是由初级质子产生的.初级宇宙线中各种核成分对 $\Sigma E_\gamma \geq 500 \text{ TeV}$ 族事例的贡献如表1所示.利用上述族事例集团的能量份额与其初级粒子种类的关联,我们尝试利用主集团的能量份额来辨认由初级质子产生的大族事例( $\Sigma E_\gamma \geq 500 \text{ TeV}$ ),这对于由质子引起的高能核作用的研究是很有意义的.

表1 各种核成分对 $\Sigma E_\gamma \geq 500 \text{ TeV}$ 族事例的贡献

种类	p	He	CNO	LH	MH	VH	Fe
份额(%)	68.7	10.1	6.9	4.2	1.4	1.3	7.4

将族事例中集团按能量大小次序进行排列, $E_1 \geq E_2 \geq \dots \geq E_N$ ,定义:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{E_1}{\Sigma E_\gamma}; \\ F_2 = \frac{E_1 + E_2}{\Sigma E_\gamma}; \\ F_3 = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{\Sigma E_\gamma}; \\ \dots\dots\dots \end{cases}$$

分别表征前1、2、3、...团能量的份额.对于以上不同的 $F_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ ,分别寻找相应的特征值 $F_c$ ,当 $F_i > F_c$ 时,则判断该族事例的初级粒子为质子.设 $F_p$ 为由初级质子所产生的族事例中 $F_i > F_c$ 事例所占份额, $F_x$ 为利用 $F_i > F_c$ 标准辨认由初级质子所产生的族事例的误判几率,对 $\Sigma E_\gamma \geq 500 \text{ TeV}$ 族事例,关于 $F_1, F_2, F_3$ 的模拟计算结果分别如表2、表3、表4所示.

表2  $F_1 = \frac{E_1}{\Sigma E_\gamma}$ 

$F_c$	0.2	0.4	0.6
$F_p(\%)$	97.7	60.8	28.7
$F_x(\%)$	23.4	11.6	10.6

表3  $F_2 = \frac{E_1 + E_2}{\Sigma E_\gamma}$ 

$F_c$	0.2	0.4	0.6	0.8
$F_p(\%)$	100.0	94.7	66.4	33.6
$F_x(\%)$	29.5	18.8	9.7	8.2

表4  $F_3 = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{\Sigma E_\gamma}$ 

$F_c$	0.2	0.4	0.6	0.8
$F_p(\%)$	100.0	100.0	88.7	53.6
$F_x(\%)$	30.2	27.0	12.4	9.0

通过比较可以看到,对于  $F_1, F_2, F_3, F_3(F_c=0.6)$  标准为最好,它能挑选出88.7%由初级质子所产生的族事例,而误判几率只有12.4%。当集团数目继续增加时(即对  $F_4, F_5, \dots, F_N$ ),所得结果没有明显的改进,因此  $F_3(F_c=0.6)$  标准为用主集团的能量份额来辨认由初级质子产生的  $\Sigma E_\gamma \geq 500\text{TeV}$  大族事例的最佳标准。图6分别给出了混合初级核、初级质子及初级铁核所产生的  $\Sigma E_\gamma \geq 500\text{TeV}$  族事例的  $F_3$  分布。

由于实验上所观测到的大族事例稀少,统计量贫乏,该方法在实验上的检验是困难的。

#### 四、多心结构事例分析

模拟计算给出,方法B下多心结构事例出现的频率为~10.4%,略低于方法A下多心结构事例出现的频率(~11.6%)。图7给出了不同多心结构事例出现频率的分布。图8给出了双心结构事例  $x_{12}(=\sqrt{E_1 E_2} R_{12})$  的分布,图9给出了双心结构事例  $E_1 + E_2 - R_{12}$  散点图。可以看到,模拟计算较好地描述了多心结构事例的平均行为。

族事例中的多心结构现象,往往使人们联想到超高能相互作用中大横动量 jet 的产生。Dunaevsky 的计算结果表明,  $x_{12} \geq 700\text{TeV} \cdot \text{cm}$  的双心事例是来自大  $p_t$  jet 的贡献<sup>[2]</sup>。MPI 模型没有引入大  $p_t$  jet 产生过程,但仍能较好地解释双心事例的实验数据,表明 QCD 所描写的大  $p_t$  jet 不是产生大  $x_{12}$  值事例的主要原因。

甘巴拉山 Pb 乳胶室曾记录到一个远距双心事例 K5618<sup>[8]</sup>,其  $\Sigma E_\gamma = 523\text{TeV}$ ,天顶角  $\theta = 27^\circ$ ,  $E_1 = 421\text{TeV}$ ,  $E_2 = 102\text{TeV}$ ,集团外围没有一个散点,两个集团相距  $R_{12} = 25.5\text{cm}$ ,如图9中“ $\Delta$ ”所示。从图中可以看到,K5618事例远离模拟计算所预言的区域,它不可能是统计涨落的贡献。到目前为止,甘巴拉山实验所积累的  $\Sigma E_\gamma \geq 100\text{TeV}$  族事例~500个,而在~1500个  $\Sigma E_\gamma \geq 100\text{TeV}$  模拟事例中没有找到一个类似于 K5618的事例,K5618事例可能联系于尚未被人们认识的新的核作用机制。

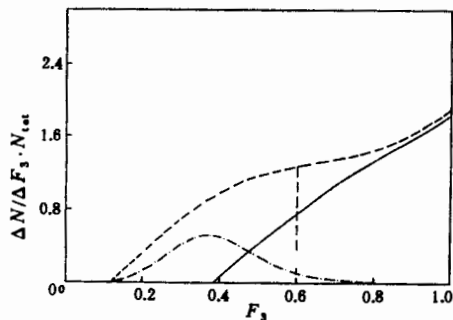


图6  $\Sigma E_7 \geq 500 \text{ TeV}$  族事例的  $F_3$  分布

“—”质子原初, “- - -”铁核原初, “- · -”混合原初

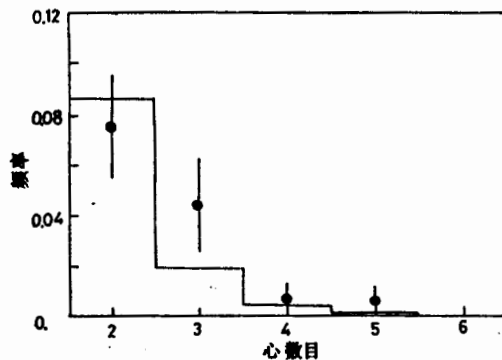


图7 不同多心结构事例出现频率的分布

“●”表示实验点, 折线为 MPI 模型的结果

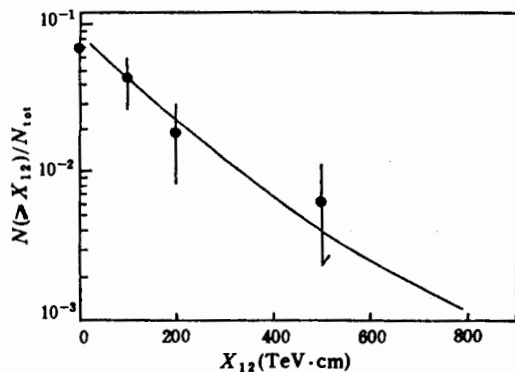


图8 双心结构事例  $X_{12}$  分布

“●”表示实验点, 实线为 MPI 模型的结果

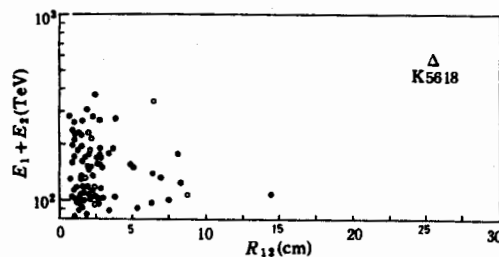


图9 双心结构事例  $E_1 + E_2 - R_{12}$  散点图

“○”表示实验点, “●”为 MPI 模型的结果

## 参 考 文 献

- [1] C. M. G. Lattes et al., *Phys. Reports (Review Section of Physics Letters)*, **65**(1980),151.
- [2] A. M. Dunaevsky, 18th ICRC, India, **5**(1983),449.
- [3] J. R. Ren et al., *Phys. Rev.*, **D38**(1988),1404.
- [4] 范晓舛、张春生, 高能物理与核物理, **2**(1992),97.
- [5] 范晓舛、张春生, 高能物理与核物理, **4**(1992),289.
- [6] J. E. Elias et al., *Phys. Rev.*, **D22**(1980),13.
- [7] F. Fumoro et al., *Nucl. Phys.*, **B152**(1979),376.
- [8] 任敬儒等, 高能物理与核物理, **13**(1989),97.

## Analyses of Multi-Core Family Events

FAN XIAOLING REN JINGRU LU SULLING SU SHI

*(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)*

WANG CHENGRUI HE MAO CAO PEIYUAN LI JINYU

*(Physics Department of Shandong University, Jinan 250100)*

### ABSTRACT

The traditional clustering method was improved, the family events were clustered in the scanning way, the criterion of multi-core event was redefined, through comparing the experimental results of multi-core events with simulation calculation, the nuclear interactions in the superhigh energy region were studied. Simultaneously, the method of using the energy fraction of main clusters to distinguish the big family event ( $\Sigma E_{\gamma} \geq 500 \text{ TeV}$ ) which is produced by primary proton was proposed by this work.