

60 A GeV ^{16}O 诱发乳胶核反应 慢粒子产生研究*

张东海^{1,2,1)} 孙汉城²

1 (山西师范大学物理系 临汾 041004)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 对 60 A GeV ^{16}O 诱发乳胶核反应靶核碎片多重数分布及其关联进行了实验研究,并与 FRITOF1.7 加级联机制模型和 DTUNUC 2.0 模型计算结果进行了比较.

关键词 灰粒子 黑粒子 重电离粒子 关联

1 引言

自 CERN SPS 及 BNL AGS 两台相对论性重离子加速器运行以来,人们对两能区相对论性核-核碰撞赝快度中心区域内的粒子产生进行了大量的实验研究,其主要原因是通过赝快度中心区域粒子产生的研究可以揭示高温高密极端条件下核物质的行为,寻找由强子物质向夸克物质过渡的相变信号.对于靶核碎裂区域内的粒子产生的研究相对较少,为了对高能核-核碰撞全过程物理图像进行全面的了解,对靶核碎裂区域粒子产生的研究也是非常重要的.

在相对论性核-核碰撞中次级粒子并不是随反应同时产生,在终态粒子强子化和核-核碰撞之间有时间间隔.由于相对论效应,在实验室系下快粒子的形成时间较长;而慢粒子的形成时间较短,他们在靶核内强子化并可能与周围靶核物质再次作用产生级联粒子.这两种情况的过渡区域相当混淆,一方面由于缺乏靶核碎裂区域内粒子产生的系统实验结果,另一方面是由于缺乏包含级联粒子产生的理论模型.理论上对于强子化过程粒子形成的时空演化过程缺乏较好的理解,我们只知在靶核内强子的能量沉积,它依赖于入射强子所撞击的靶核核子数,没有对级联核反应的正确估计,特别是在靶核碎裂区域内级联核反应的正确估计,很难对相对论性核反应的实验结果给出合理的解释.

现有高能核-核碰撞的理论模型可以很好地再现赝快度中心区域内的粒子产生,但

2000-07-10 收稿

* 山西省青年科学基金(991004)和山西省归国人员基金资助

1) E-mail: zhangdh@dns.sxtu.edu.cn

无法很好地解释靶核碎裂区的实验结果^[1,2], 主要由于这些理论没有考虑靶核旁观体内的级联效应. 一些模型考虑了靶核旁观体的级联效应, 但由于缺乏对强子化物质形成时间标度的确切知识的了解, 只有依赖一系列自由参数来解释实验结果. 为了限制这些参数, 增加对于核反应机制的了解, 对于靶核碎裂区域产生粒子的性质进行系统实验研究是非常重要的.

2 实验描述

本实验所用乳胶叠由 EMU-01 国际合作组提供. 乳胶叠体积为 $10 \times 10 \times 2 \text{cm}^3$, 每层乳胶厚度为 $600 \mu\text{m}$, 乳胶为 NIKFI BR-2 型全灵敏乳胶. 乳胶叠于 1986 年在西欧核子中心 CERN SPS 加速器上照射, 束流通量为 $10^3/\text{cm}^2$.

根据核乳胶技术惯例^[3], 所有末态粒子可以分为四大类:

1) 簇射粒子, 用 N_c 表示, 主要为速度 $\beta > 0.7$ 的 π 介子及少量质子, 其电离为 $1 \leq 1.4 I_{\text{min}}$. 这里 I_{min} 为极小电离. 簇射粒子多重数用 n_c 表示.

2) 灰径迹粒子, 用 N_g 来表示, 其多重数用 n_g 表示. 灰径迹粒子主要来源于碰撞后期靶核内的反冲质子, 其速度为 $0.3 \leq \beta \leq 0.7$, 相应的动能为 $26 \text{MeV} < E_K \leq 375 \text{MeV}$; 另外还有少量的 K 介子和 π 介子. 对于 K 介子, 其动能为 $20 \text{MeV} < E_K \leq 198 \text{MeV}$; 对于 π 介子, 其动能为 $12 \text{MeV} < E_K \leq 56 \text{MeV}$. 灰径迹粒子在乳胶中的电离为 $1.4 I_{\text{min}} < I \leq 9 I_{\text{min}}$.

3) 黑径迹粒子, 用 N_b 来表示, 其多重数为 n_b . 黑径迹粒子主要来源于碰撞较后期受激靶核的蒸发碎片, 主要为动能 $E_K \leq 26 \text{MeV}$ 的质子. N_b 在乳胶中的电离 $I > 9 I_{\text{min}}$, 射程 $L < 3 \text{mm}$.

灰径迹粒子 N_g 和黑径迹粒子 N_b 统称重电离粒子 N_h (或慢粒子), 其多重数 $n_h = n_g + n_b$.

4) 射弹碎片粒子 N_f , 为没有发生碰撞的射弹粒子剩余物, 其发射角 $\theta \leq \theta_f = 200/p \cdot \text{mrad} = 3.3 \text{mrad}$. 其中 p 为射弹粒子的动量, 单位为 $\text{GeV}/\text{nucleon}$.

3 实验结果及分析

我们利用沿径迹扫描的方法一共得到 1660 个核作用无偏事例. 根据核作用射弹碎片多重数把事例分为两大类: 中心作用事例为电荷 $Z \geq 2$ 的射弹碎片多重数 $n_f = 0$ 的事例; 边缘作用事例, 为电荷 $Z \geq 2$ 的射弹碎片多重数 $n_f \neq 0$ 的事例. 黑径迹粒子平均多重数 $\langle n_b \rangle$, 灰径迹粒子平均多重数 $\langle n_g \rangle$ 及重电离粒子平均多重数 $\langle n_h \rangle$ 如表 1 所示.

表 1 重电离径迹粒子平均多重数

事例类型	$\langle n_b \rangle$	$\langle n_g \rangle$	$\langle n_h \rangle$
无偏事例	5.29 ± 0.13	3.22 ± 0.11	8.46 ± 0.22
中心事例	8.82 ± 0.25	6.51 ± 0.25	15.27 ± 0.42
边缘事例	3.64 ± 0.12	1.68 ± 0.08	5.28 ± 0.19

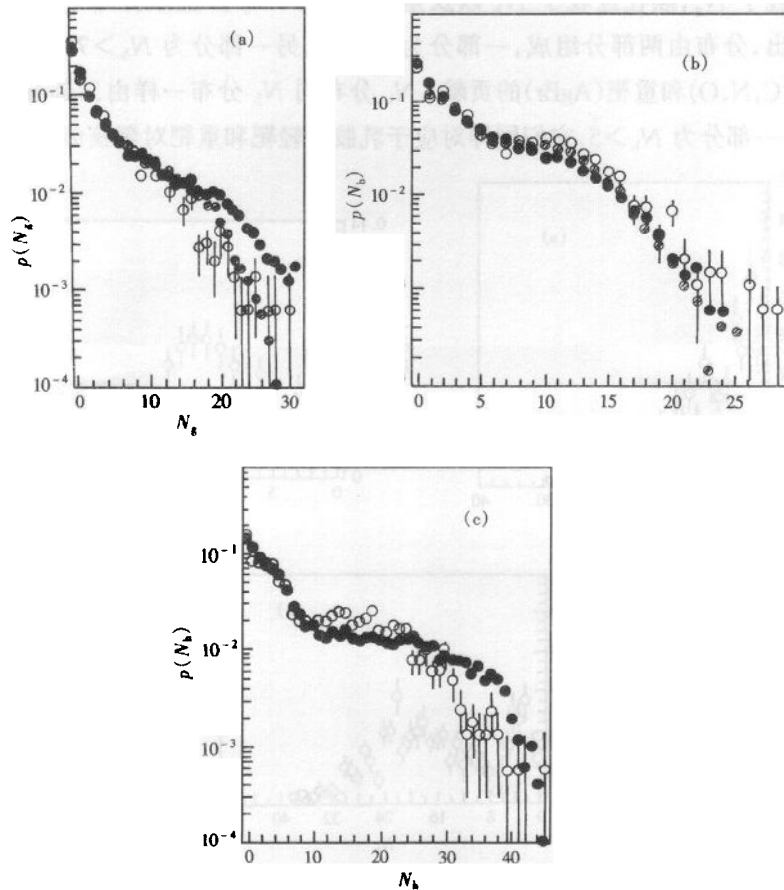


图 1 60 A GeV ^{16}O -Em 作用慢粒子多重数分布

(a) N_g 分布; (b) N_b 分布; (c) N_h 分布. \circ 实验结果,

\bullet FRITIOF1.7 加级联机制模型计算结果, \ominus DTUNUC2.0 模型计算结果.

图 1 给出灰径迹粒子、黑径迹粒子及重电离粒子多重数分布. 为了便于比较, 我们同时给出建立在核-核作用几何模型^[4,5]并考虑核内级联效应的影响(FRITIOF1.7 加级联效应)的计算结果^[6]以及建立在对偶部分子模型 DPM(Dual Parton Model)^[7]基础上的 DTUNUC2.0 模型计算结果^[8]. 由于慢粒子多重数分布的能量无关性以及 FRITIOF 模型本身只有在较高的人射能量下才能合理地运行, 所以采用在人射能量为 200 A GeV 的模拟结果. 由图可以看出 FRITIOF1.7 加级联机制模型和 DTUNUC2.0 模型计算可以很好地再现 n_b 的分布, 对于 n_g , DTUNUC2.0 模型计算结果和实验结果符合较好, 而 FRITIOF1.7 加级联机制模型计算结果在 $n_g > 15$ 时给出较高的估计, 同样对于 N_h 分布, FRITIOF1.7 加级联机制模型计算结果在 $N_h > 30$ 时也给出较高的估计. 以上结果说明, FRITIOF1.7 加级联机制模型在计算 ^{16}O 核与乳胶重靶中心作用时级联效应估计过高.

原子核乳胶靶为混合靶, 各种靶核对慢粒子产生都有贡献. 根据靶核碎片的多少我们把核作用分为三大类: $N_h \leq 1$ 主要为 ^{16}O 与乳胶 H 靶作用; $1 < N_h < 8$ 主要为 ^{16}O 与乳胶 C, N, O 靶作用; $N_h \geq 8$ 为 ^{16}O 与乳胶重靶 AgBr 作用. 图 2 给出 60 A GeV ^{16}O -Em 中心

作用灰径迹粒子 N_g , 黑径迹粒子 N_b 以及重电离粒子 N_h 多重数分布. 由 N_h 分布我们可以明显看出, 分布由两部分组成, 一部分为 $N_h \leq 7$, 另一部分为 $N_h > 7$, 它们分别相应于乳胶的轻靶(C, N, O)和重靶(AgBr)的贡献. N_b 分布同 N_h 分布一样由二部分组成, 一部分为 $N_b \leq 5$, 另一部分为 $N_b > 5$, 它们同样对应于乳胶中轻靶和重靶对靶核蒸发碎片的贡献.

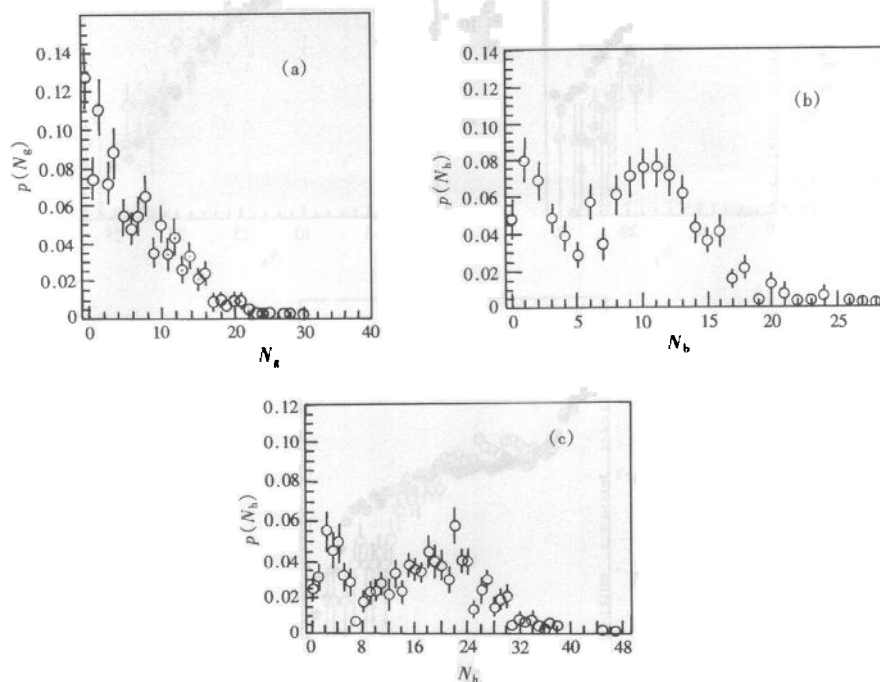


图2 60 A GeV ^{16}O -Em 中心作用慢粒子分布
(a) N_g 分布; (b) N_b 分布; (c) N_h 分布.

在相对论性重离子诱发乳胶核反应过程中, 灰径迹粒子主要来源于碰撞初期靶核反应体内被撞击的核子及其在靶核内产生的级联效应的产物; 而黑径迹粒子为碰撞后期受激靶核旁观体的蒸发碎片. 虽然两种粒子的产生机制不同, 但它们是相互联系的. 靶核旁观体受激而蒸发的激发能来源于碰撞初期被撞击核子在靶核旁观体内产生的级联效应的贡献. 所以对于黑径迹粒子与灰径迹粒子之间的关联的研究, 可以进一步帮助我们了解靶核内级联效应的强弱, 为建立在级联机制基础上解释慢粒子产生的理论模型提供实验基础. 图3给出60 A GeV ^{16}O -Em 作用无偏事例, 中心作用事例及边缘碰撞事例黑径迹粒子平均多重数 $\langle N_b \rangle$ 及离差 $D(N_b) = \sqrt{\langle N_b^2 \rangle - \langle N_b \rangle^2}$ 随灰径迹粒子 N_g 的变化. 由图看出在 $N_g \leq 10$ 情况下, $\langle N_b \rangle$ 随 N_g 的增加而增加; 当 $N_g > 10$ 时, $\langle N_b \rangle$ 在实验误差范围内基本保持不变, 即 $\langle N_b \rangle$ 在当 $N_g > 10$ 时达到饱和性质. 由于灰径迹粒子做为靶核旁观体内被射弹粒子所撞击的核子数的定量探针, 它的大小反应了靶核内被撞击核子数目的多少. 随着 N_g 的增加, 即随着靶核内被撞击核子数的增加, 靶核旁观体被激发的程度增加, 所以靶核旁观体碎裂的程度也增加, 则平均靶核蒸发碎片数 $\langle N_h \rangle$ 也增加, 但由于靶核大小本身的限制, 当被撞击的核子达到一定数目后, 靶核旁观体碎裂达到其极限值, 这

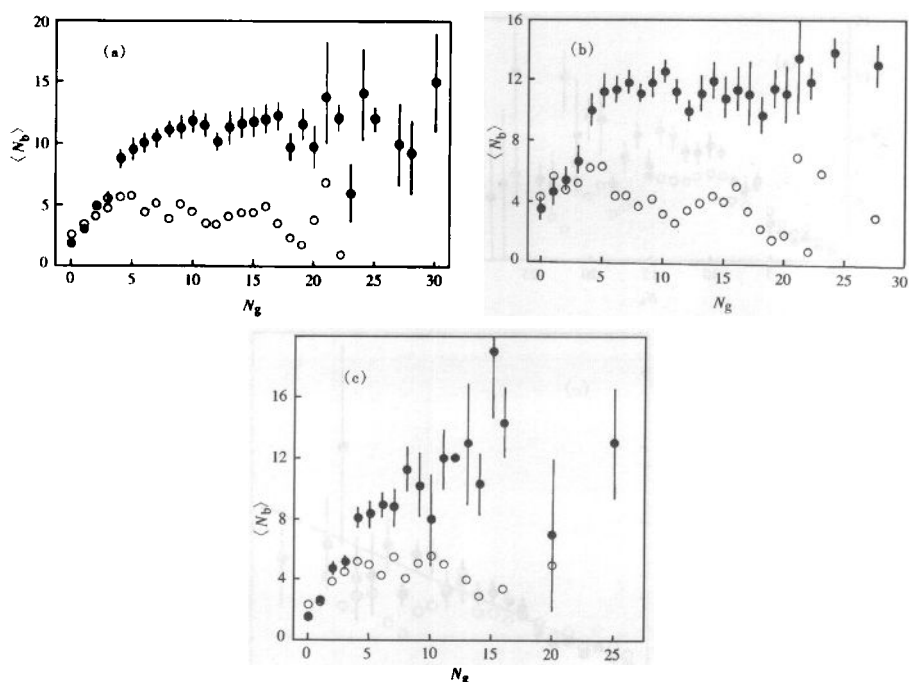


图 3 60 A GeV ¹⁶O-Em 作用 $\langle N_b \rangle$ 随 N_g 的变化
(a) 无偏事例; (b) 中心事例; (c) 边缘事例.

时随 N_g 的增加, $\langle N_b \rangle$ 保持不变. 离差 $D(N_b)$ 在 $N_g \leq 5$ 时随 N_g 的增加而增加, 而当 $N_g > 5$ 时, $D(N_b)$ 随 N_g 的增加缓慢减小.

60 A GeV ¹⁶O-Em 作用无偏事例, 中心作用事例及边缘碰撞情况下灰径迹平均多重数 $\langle N_g \rangle$ 及离差 $D(N_g)$ 随靶核蒸发碎片 N_b 的变化如图 4 所示. 由图可见随 N_b 的增加 $\langle N_g \rangle$ 逐渐增大, 并无饱和现象出现. 对于边缘碰撞情况, 利用最小二乘法拟合实验结果得出 $\langle N_g \rangle = 0.61 + 0.34N_b$. 由于靶核蒸发碎片 N_b 的大小反映了靶核旁观体受激程度的大小, N_b 增加表明靶核旁观体受激程度增加, 即靶核旁观体内被撞击的核子数增加, 所以做为定量描述被撞击核子数的实验观测量灰粒子数也随之增加.

图 5 给出 60 A GeV ¹⁶O-Em 作用无偏事例, 中心作用事例及边缘作用情况下靶核碎片平均多重数 $\langle N_b \rangle$ 随灰径迹粒子数的变化曲线. 由图看出在三种情况下靶核碎片平均多重数均随 N_g 的增加而增加, 利用公式 $\langle N_b \rangle = a(1 + N_g)^b$ 由最小二乘法拟合实验结果分别得出:

$$\begin{aligned} \langle N_b \rangle &= 2.64(1 + N_g)^{0.83} && \text{(无偏事例),} \\ \langle N_b \rangle &= 3.96(1 + N_g)^{0.69} && \text{(中心作用事例),} \\ \langle N_b \rangle &= 2.1(1 + N_g)^{0.95} && \text{(边缘作用事例).} \end{aligned}$$

对于边缘碰撞, 随着靶核内被撞击的核子数 (N_g) 的增加, 靶核碎片平均多重数趋于线性增加 ($b = 0.95$); 而对于中心碰撞, 靶核碎片平均多重数也随灰径迹粒子数的增加而增加, 但远离线性关系 ($b = 0.69$).

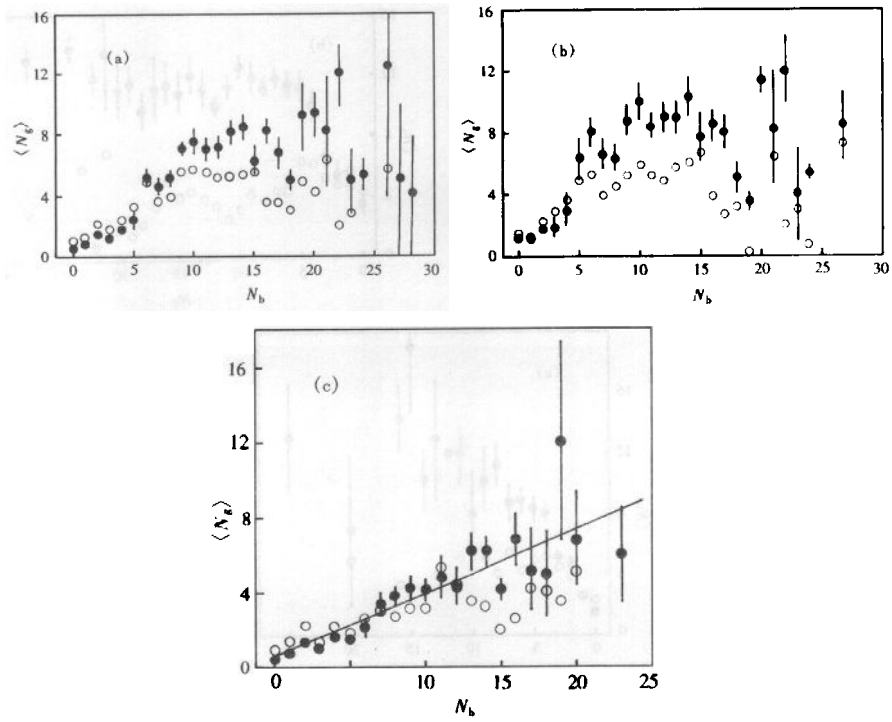


图 4 60 A GeV ^{16}O -Em 作用 $\langle N_p \rangle$ 及高差 $D(N_p)$ 随 N_b 的变化
(a) 无偏事例; (b) 中心作用事例; (c) 边缘碰撞事例.

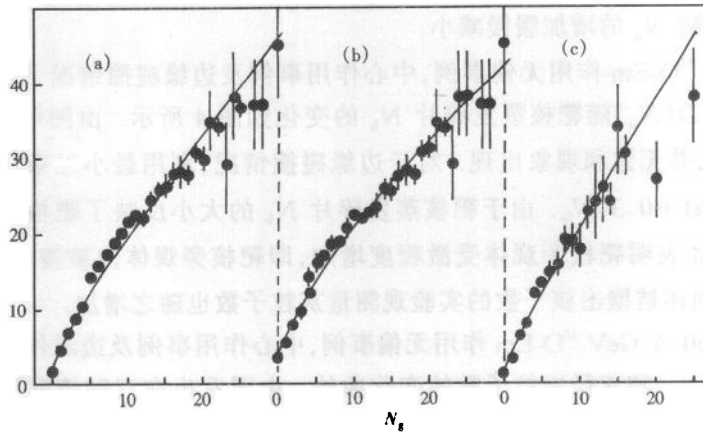


图 5 60 A GeV ^{16}O -Em 作用 $\langle N_p \rangle$ 随 N_p 的变化
(a) 无偏事例; (b) 中心作用事例; (c) 边缘作用事例.

4 结论

通过对 60 A GeV ^{16}O -Em 作用慢粒子多重数分布以及重电离径迹粒子, 黑径迹粒子与灰径迹粒子之间的关联的研究得到:

- 1) 黑径迹粒子多重数分布可以很好地用 FRITIOF 1.7 加级联机制模型和

DTUNUC 2.0 模型来解释;对于灰径迹粒子及重电离径迹粒子多重数分布,当多重数较高时,FRITIOF 1.7 加级联机制模型给出较高的估计,但 DTUNUC 2.0 模型给出和实验一致的结果.

2) 重电离粒子平均多重数随灰径迹粒子数的增加而增加,灰径迹粒子平均多重数随黑径迹粒子数的增加而增加,无饱和现象出现;但黑径迹粒子平均多重数随灰径迹粒子数的增加先增加后趋于饱和.

参考文献(References)

- 1 Adamovich M I et al. (EMU01 Collaboration). Phys. Lett., 1990, **B234**:180; 1991, **B262**:369
- 2 Awes T, Sorensen S P. Nucl. Phys., 1989, **A498**:123c
- 3 Barkas W H. Nuclear Research Emulsion, New York: Academic Press, 1963
- 4 Andersson B, Otterlund I, Stenlund E. Phys. Lett., 1978, **B73**:343
- 5 Stenlund E, Otterlund I. Nucl. Phys., 1982, **B198**:407
- 6 Adamovich M I et al (EMU01 Collaboration). Z. Phys., 1995, **C65**:421
- 7 Capella A, Sukhatme U, Tan C I et al. Phys. Rep., 1994, **236**:227
- 8 Ferrari A, Ranft J, Rosler S et al. Z. Phys., 1996, **C71**:75

Investigation of the Production of Slow Particles in 60 A GeV ^{16}O Induced Nuclear Emulsion Reaction *

ZHANG Dong-Hai^{1,2,1)} SUN Han-Cheng²

1 (Department of Physics, Shanxi Teachers' University, Linfen 041004, China)

2 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The multiplicity distributions and correlations of grey track producing particles (N_g), black track producing particles (N_b) and heavy track producing particles (N_h) have been studied in 60 A GeV ^{16}O induced nuclear emulsion reaction. The multiplicity distributions of grey particles, black particles and heavy track producing particles can be reproduced by FRITIOF (version 1.7) taking cascade mechanism into account and DTUNUC 2.0 with an incident energy of 200 A GeV. The mean multiplicity of black particles $\langle N_b \rangle$ increases with the number of grey particle N_g up to 10 and then exhibits a saturation for peripheral, central and mini-bias events; the average values of grey particles $\langle N_g \rangle$ (heavy track producing particles $\langle N_h \rangle$) increase with increasing values of black particle N_b (grey particle N_g).

Key words grey track producing particle, black track producing particle, heavily ionizing particle, correlation

Received 10 July 2000

* Supported by Shanxi Provincial Science Foundation for Youths(991004) and Shanxi Provincial Science Foundation for Returnees

1) E-mail: zhangdh@dns.sxtu.edu.cn