

# 高能重离子碰撞间歇行为的系统研究\*

EMU01 协作组

## 摘 要

本文用阶乘矩方法分析了几种入射能量(14.6, 60, 200 AGeV)下氧、硅和硫离子诱导乳胶核反应和硫离子与金靶相互作用过程的间歇行为。利用 EMU 01 组的实验数据发现,在快度间隔 1—0.1 范围内,这几种核反应过程都有间歇性。间歇指数随入射能量和末态相对论带电粒子平均多重数的增加而减少,随靶核质量的增加而增加。在实验误差范围内,观察到间歇指数随射弹核质量的增加有上升趋势。

## 一、引 言

近几年来,在宇宙线实验<sup>[1]</sup>和加速器实验<sup>[2]</sup>中观察到一些特殊的事例,这些事例中的某些小快度间隔内出现很高的粒子数涨落。这些涨落究竟是纯统计涨落,还是出于动力学的原因,成为一个普遍关心的问题。Bialas 和 Peschanski<sup>[3]</sup> 建议,用阶乘矩来消除统计涨落,考察隐藏在它背后的动力学。定义阶乘矩为

$$\langle F_i \rangle = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\langle K_m(K_m-1)\cdots(K_m-i+1) \rangle}{\langle K_m \rangle^i}, \quad (1)$$

其中,  $M$  是将快度区间  $\Delta y$  分割成的间隔数,  $K_m$  是第  $m$  个间隔内的带电多重数。如果在  $\Delta y$  范围内有平的快度平台,则  $\langle K_m \rangle = \langle N \rangle / M$ ,  $\langle N \rangle$  是  $\Delta y$  中的平均多重数。此时(1)式成为

$$\langle F_i \rangle = M^{i-1} \sum_{m=1}^M \frac{\langle K_m(K_m-1)\cdots(K_m-i+1) \rangle}{\langle N \rangle^i}. \quad (2)$$

文献[3]中证明了,如果当  $M$  增大,每个间隔的宽度  $\delta y = \Delta y / M$  减小时,  $\langle F_i \rangle$  指数地增长

$$\langle F_i \rangle \propto (\delta y)^{-\varphi_i} \quad \delta y \rightarrow 0, \quad (3)$$

其中指数  $\varphi_i > 0$ , 则表明存在由动力学原因引起的涨落;反之,如果只有纯统计涨落,则当  $\delta y$  足够小,使得通常的动力学因素(如团衰变)的影响消失时,  $\langle F_i \rangle$  将不再随  $\delta y$  而

本文1990年8月28日收到。

\* 本工作获得中国国家自然科学基金、国家教委优秀青年教师基金、霍英东教育基金会基金和瑞典 Swedish Natural Science Research Council, 联邦德国 German Federal Minister of Research and Technology, 印度 University Grants Commission Government of India, 美国 U. S. Department of Energy 和 NSF 的资助。

变,即  $\varphi_i = 0$ .

(3) 式类型的反常指数规律在湍流和混沌等非线性过程中都存在,称为间歇 (Intermittency) 或阵发混沌. 因此,也称多重产生中的这种反常指数规律为间歇. 指数  $\varphi_i$  标志间歇的程度,亦即动力学起伏的强度,称为间歇指数.

从那以后,陆续出现了一系列实验报导,证实在各种类型的碰撞: 强子-强子<sup>[4,5]</sup>, 强子-核<sup>[6]</sup>、核-核<sup>[6]</sup>和  $e^+e^-$ <sup>[7]</sup> 中都存在不为零的反常指数  $\varphi_i$ . 这表明,间歇现象在碰撞多重产生中是一个普遍存在的现象. 产生这一现象的原因是什么? 它反映什么物理机制? 成为引起人们极大关注<sup>[8]</sup> 的问题.

在已经肯定了间歇现象在多重产生中普遍存在以后,当前的任务是要更系统地对它进行研究,为探索它的本质提供更丰富的实验信息. 本文的目的就是利用 EMU 01 国际协作组的实验数据,对氧、硅、硫核与核乳胶以及硫核和金靶相互作用中的间歇现象进行系统的研究,探寻间歇指数对于碰撞能量、多重数和碰撞核质量的依赖关系.

第二部分里,将介绍 EMU 01 协作组的实验装置;第三部分讨论数据分析方法;第四部分给出结果和讨论.

## 二、实验装置

EMU 01 是一个以核乳胶作为靶和径迹探测器的大型国际实验协作组. 由于核乳胶具有很高的空间分辨本领,用于研究高能核反应中末态带电粒子多重数和精密测量粒子的散射角. EMU 01 实验的离子源来自 CERN/SPS 上 60, 200 A GeV 的氧离子, 200 A GeV 的硫离子和 BNL/AGS 上的 14.6 A GeV 的氧、硅离子束流.

EMU 01 实验采用两种曝光技术,一种

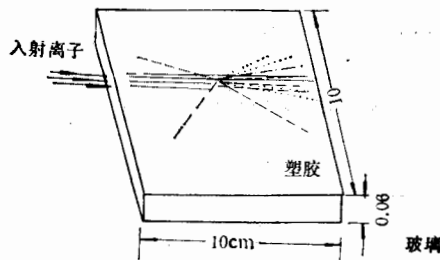


图1 EMU 01 乳胶叠示意图

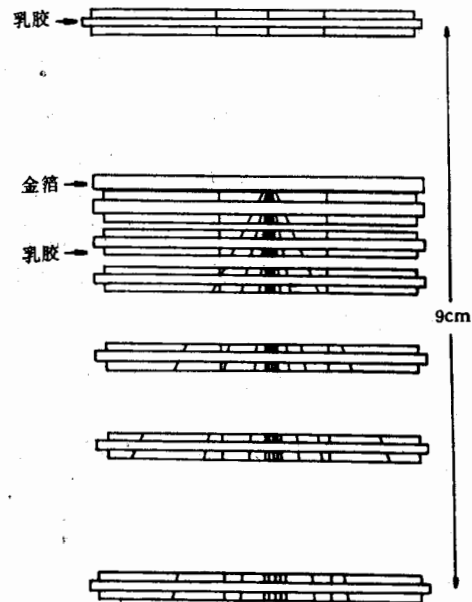


图2 EMU 01  $^{32}\text{S-Au}$  乳胶室剖面图

是将高能离子束流水平照射核乳胶,制成乳胶叠(H),另一种是让离子束流垂直照射乳胶,制成乳胶室(V).

乳胶叠所用乳胶类型为 BR-2,尺寸有  $20 \times 10 \times 0.06$  和  $10 \times 10 \times 0.06$  cm 两种,

束流密度为  $5 \times 10^3 \text{ nuclei/cm}^2/\text{sec}$ .  $^{16}\text{O-Em}$  和  $^{32}\text{S-Em}$  的乳胶灵敏度分别为 20~30 和  $32 \pm 2 \text{ grains}/100 \mu$ .

在乳胶叠的扫描测量过程中,采用沿径迹扫描的方法,从离子束流进入点扫描到 6—7 cm,寻找距边沿 2—5 cm 处的相互作用事例,然后测出所有末态带电粒子的出射角.为了消除乳胶畸变的影响,在测量小角度粒子的坐标时,还必须测出参考径迹的坐标(参考径迹是指相互作用事例附近没有发生核反应的原始入射径迹),以便精确地确定这些粒子的出射角.图 1 给出了乳胶叠中核作用事例的示意图.

EMU 01 协作组设计有两种类型的供氧离子照射的乳胶室和一种供硫离子照射的并且带有金箔(作为靶)的乳胶室.图 2 给出的是硫离子与金靶相互作用的标准乳胶室.它分为 7 层,每层以  $780 \mu\text{m}$  厚的塑胶作为衬垫,两面涂有核研究用乳胶 (Fuji ET7B).在第二片塑胶的上面放置  $250 \mu\text{m}$  厚的金箔,硫离子与金箔作用后产生的末态带电粒子径迹记录在乳胶中.这种设计可以使次级作用、光子作用和多次散射等背景减少到最低程度.

乳胶室经过高能重离子束流曝光和处理后,置于光学显微镜下作面积扫描,寻找相互作用星.只有那些角度  $\theta < 30^\circ$  (赙快度  $\eta > 1.32$ ) 的粒子径迹坐标被测量.为了消除乳胶畸变的影响,在乳胶室的测量过程中,也需要选择参考径迹,进行畸变修正.有关实验的详细情况请参考文献 [9].

### 三、数据分析方法

末态粒子在实验室系中的赙快度定义为  $\eta = -\ln \tan \theta / 2$ , 其中  $\theta$  是在这一参考系中的发射角.与此同时,定义“末态粒子在核子-核子质心系中的赙快度  $\eta_c$ ”为

$$\eta_c = \eta - \eta_0,$$

其中  $\eta_0$  是入射核在实验室系中快度的一半.在入射能量为 14.6, 60 和 200 A GeV 时的  $\eta_0$  值分别取为 1.7, 2.4 和 3.0.

在进行数据分析时,首先选定一个在  $\eta = \eta_0 (\eta_c = 0)$  周围对称分布的宽为  $\Delta\eta$  的窗口,将它分为  $M$  等份 ( $M = 2, 3, 4, \dots$ ),按 (2) 式计算阶乘矩  $\langle F_i \rangle$ .将结果画在  $\ln \langle F_i \rangle \sim \ln \delta\eta$  的图上,并用线性关系

$$\ln \langle F_i \rangle = \varphi_i (-\ln \delta\eta) + c_i \quad (4)$$

去符合  $0.1 \leq \delta\eta \leq 1.0$  的数据,得到斜率  $\varphi_i$ .如果  $\varphi_i > 0$  就表示存在间歇现象,间歇指数为  $\varphi_i$ .

需要指出两点:第一,(2)式适用于平的快度平台(在  $\Delta\eta$  范围内).为了消除快度平台不平的影响,可以按照 Fialkowski<sup>[10]</sup> 的建议用一个因子

$$R_i(\delta) = \frac{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left( \frac{1}{\delta_m} \int_{\delta_m} \rho(\eta) d\eta \right)^i}{\left( \frac{1}{\Delta} \int_{\Delta} \rho(\eta) d\eta \right)^i} \quad (5)$$

来修正.

第二,用来进行线性拟合的数据点,是从同一个数据样本中,对赝快度区间  $\Delta\eta$  进行不同的分割而得到的,相互之间有很强的关联。因此通常估计统计误差的方法不能应用。我们采用另一方法<sup>[11]</sup>。这一方法的基本要点是:假定  $\varphi_i$  值是由某种真实存在的间歇效应加上统计涨落得到的。为了估计统计涨落的影响,我们在  $\Delta\eta$  窗口中按真实样本同样的多重数产生同样多的事件。然后,利用从实验样本中得到的平均快度分布将每个事件中的粒子随机地分布在  $\Delta\eta$  窗口中。对由此得到的样本进行和真实数据一样的分析,得到相应的  $\varphi_i$  值。这一过程重复  $N$  次,得到  $\varphi_{i\alpha}$ ,  $\alpha = 1, \dots, N$ , 由此计算离散度

$$V(\varphi_i) = \langle \varphi_i^2 \rangle - \langle \varphi_i \rangle^2, \quad (6)$$

取它的平方根来作为实验的统计误差。如果假定  $\varphi_{i\alpha}$  遵从高斯分布,则这一误差估计的不确定度约为  $(2N)^{-1/2}$ 。在我们的计算中用  $N = 100$ , 相应的误差估计的不确定程度约为 7%。

#### 四、结果和讨论

表 1 和表 2 列出了作阶乘矩分析的数据样本。

表 1 EMU 01 实验数据样本

相互作用	入射能量 (A GeV)	事例数	平均多重数 ( $ \eta  < 1.5$ )	数据类型
Si-Em	14.6	485	18.9	无偏样本
O-Em	14.6	689	15.9	无偏样本
	60	592	26.7	无偏样本
	200	669	30.2	无偏样本
S-Em	200	741	41.9	无偏样本
		849	66.9	H + V
S-Au	200	188	259.7	V

表 2 200 A GeV  $^{32}\text{S-Em}$  相互作用在赝快度区间  $|\eta_c| < 1.5$  和不同多重数范围的事例数和平均多重数

多重数范围	事例数	平均多重数
$30 < n_r \leq 80$	143	49.2
$80 < n_r \leq 180$	112	124.2
$n_r > 180$	132	247.6

图 3 画出了不同能量下硅、氧、硫离子和乳胶相互作用在中心快度区  $|\eta_c| < 1.5$  中的阶乘矩。可以清楚地看到,阶乘矩随着间隔宽度的倒数  $1/\delta\eta$  的增大而增大,即间歇现象确实存在。

60 A GeV  $^{16}\text{O-Em}$  相互作用在赝快度窗口  $|\eta_c| < 1.25, 1.5, 1.75, 2.0$  的结果画在图 4。其中,圆圈是按 (5) 式修正后的结果,三角形是未作修正的数据。可以看到,作了这一修正后,  $\varphi_i$  基本上与窗口大小无关。

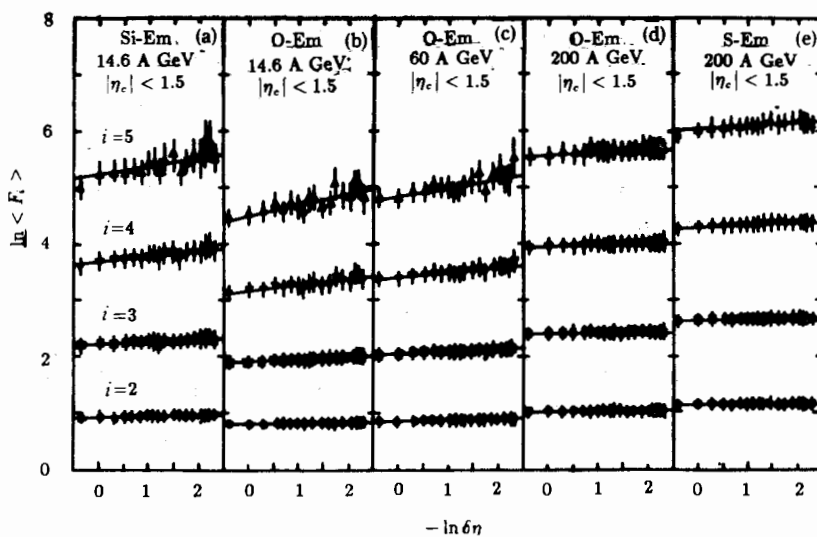


图 3 不同能量下氧、硅、硫离子与乳胶相互作用在赝快度区间  $|\eta_c| < 1.5$  的对数阶乘矩随负对数间隔的变化

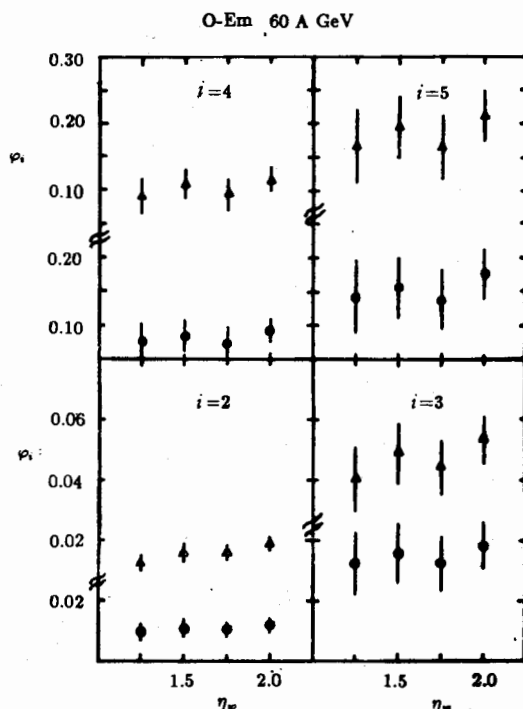


图 4 60 A GeV  $^{16}\text{O-Em}$  相互作用的间歇指数对赝快度窗口大小的依赖关系

在图 5—7 画出了  $\varphi_i$  和入射能量以及射弹(靶)核质量的关系。由图可以看到,  $\varphi_i$  随能量的升高有下降的趋势, 而随靶(射弹)核质量的增大有相反的变化趋势。值得指出, 文献 [6] 中给出的核-核碰撞和质子-核碰撞的  $\varphi_i$  对能量有相反的依赖性, 而我们的结果和

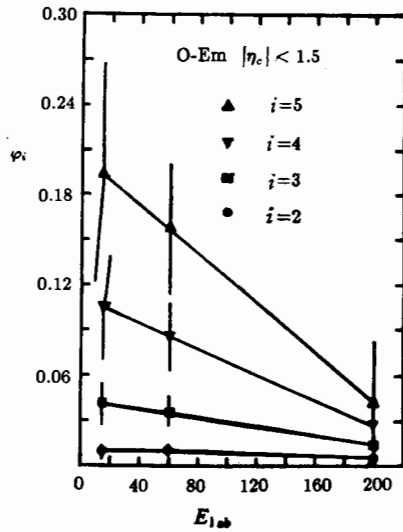


图5 不同能量下 $^{16}\text{O}$ -Em 相互作用在赧快速度区间 $|\eta_c| < 1.5$ 的间歇指数

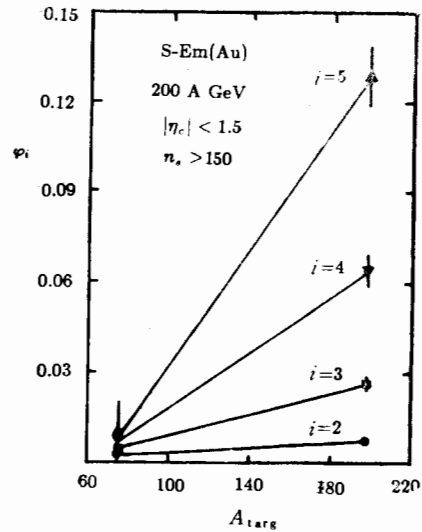


图6 200 A GeV  $^{32}\text{S}$ -Em (Au) 相互作用在赧快速度区间 $|\eta_c| < 1.5$ 的间歇指数对靶核质量的依赖关系

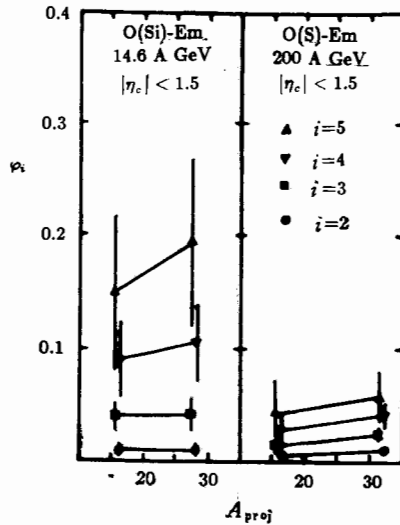


图7 14.6 A GeV O(Si)-Em 和 200 A GeV O(S)-Em 相互作用在赧快速度区间 $|\eta_c| < 1.5$ 的间歇指数对射弹核质量的依赖关系

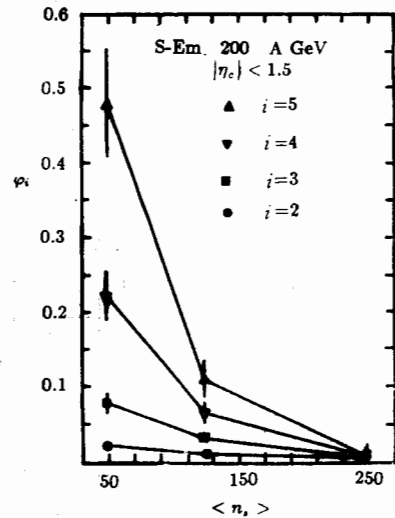


图8 200 A GeV  $^{32}\text{S}$ -Em 相互作用在赧快速度区间 $|\eta_c| < 1.5$ 的间歇指数对平均多重数的依赖关系

质子-核<sup>[6]</sup>以及质子-反质子<sup>[5]</sup>的结果一致。

图8中画出了200 A GeV的 $^{32}\text{S}$ -Em 相互作用在中心快速度区 $|\eta_c| < 1.5$ 不同多重数区间的 $\varphi_i$ 。可以看到,随着多重数的增加, $\varphi_i$ 减小。

在文献[3]中预言,间歇指数 $\varphi_i$ 对阶乘矩的级数 $i$ 的依赖性有如下关系

$$\frac{\varphi_i}{\varphi_2} = \frac{i(i-1)}{2} \quad (7)$$

在表3和表4中列出了我们的数据和这一预言的比较。可以看到,在低能,低多重数, $\varphi_i/\varphi_2$ 随*i*而增长比(7)式的预言要快。

表3 不同能量下,  $^{16}\text{O-Em}$  相互作用在赝快度区间  $|\eta_c| < 1.5$  的  $2\varphi_i/i(i-1)$

级次 <i>i</i>	入 射 能 量 ( <i>A</i> GeV)		
	14.6	60	200
2	0.0092±0.0041	0.0106±0.0029	0.0047±0.0018
3	0.0137±0.0046	0.0119±0.0031	0.0047±0.0021
4	0.0175±0.0058	0.0142±0.0037	0.0045±0.0025
5	0.0194±0.0073	0.0157±0.0043	0.0042±0.0030

表4 200 A GeV  $^{32}\text{S-Em}$  相互作用在赝快度区间  $|\eta_c| < 1.5$  和不同多重数范围的  $2\varphi_i/i(i-1)$

级次 <i>i</i>	多 重 数 范 围		
	$30 < n_s \leq 80$	$80 < n_s \leq 180$	$n_s > 180$
2	0.0197±0.0043	0.0093±0.0019	0.0015±0.0010
3	0.0261±0.0044	0.0101±0.0020	0.0012±0.0011
4	0.0369±0.0056	0.0108±0.0023	0.0008±0.0012
5	0.0481±0.0072	0.0109±0.0027	0.0006±0.0013

总结起来,在本文中,我们分析了不同能量下  $^{16}\text{O-Em}$ ,  $^{28}\text{Si-Em}$ ,  $^{32}\text{S-Em}$  和  $^{32}\text{S-Au}$  相互作用中的标度阶乘矩。当赝快度间隔减小直到  $\delta\eta \simeq 0.1$  时,标度阶乘矩呈现反常指数行为。反常指数(间歇指数) $\varphi_i$ 随入射能量和多重数的增加而减小,随靶和射弹核质量的增大而增加。

作者感谢与吴元芳博士的有益讨论。

#### EMU 01 协作组成员名单(按英文和汉语拼音字母顺序):

M. I. Adamovich<sup>11</sup>, M. M. Aggarwal<sup>4</sup>, Y.A. Alexandrov<sup>11</sup>, Z. U. Ameeva<sup>1</sup>, N. P. Andreeva<sup>1</sup>, Z. V. Anzon<sup>1</sup>, R. Arora<sup>4</sup>, S. K. Badyal<sup>7</sup>, K. B. Bhalla<sup>6</sup>, A. Bhasin<sup>7</sup>, V. S. Bhatia<sup>4</sup>, V.I. Bubnov<sup>1</sup>, T.H. Burnett<sup>13</sup>, 蔡勳<sup>16</sup>, I. Y. Chasnikov<sup>1</sup>, L. P. Chernova<sup>15</sup>, M. M. Chernyavski<sup>11</sup>, B. Dressel<sup>10</sup>, G.Z. Eligbaeva<sup>1</sup>, G.Z. Eremenko<sup>1</sup>, E.M. Friedlander<sup>3</sup>, S.I. Gadzhieva<sup>15</sup>, A.S. Gaitinov<sup>1</sup>, E. R. Ganssauge<sup>10</sup>, S. Garpman<sup>8</sup>, S. G. Gerassimov<sup>11</sup>, J. Grote<sup>13</sup>, K.G. Gulamov<sup>15</sup>, S.K. Gupta<sup>7</sup>, V. Gupta<sup>7</sup>, H.H. Heckman<sup>3</sup>, H.Huang<sup>16</sup>, B. Jakobsson<sup>8</sup>, B. Judek<sup>12</sup>, S. Kachroo<sup>7</sup>, F.G. Kadyrov<sup>15</sup>, G.S. Kalyachkina<sup>1</sup>, E.K. Kanygina<sup>1</sup>, G. L. Kaul<sup>7</sup>, M. Kaur<sup>4</sup>, S. P. Kharlamov<sup>11</sup>, T. Koss<sup>13</sup>, V. Kumar<sup>6</sup>, P. Lal<sup>6</sup>, V. G. Larionova<sup>11</sup>, P. J. Lindstrom<sup>3</sup>, 刘连寿<sup>16</sup>, S. Lokanathan<sup>6</sup>, J. Lord<sup>13</sup>, N. S. Lukicheva<sup>15</sup>, S.B. Luo<sup>9</sup>, L.K. Mangotra<sup>7</sup>, N.V. Maslennikova<sup>11</sup>, I. S. Mitra<sup>4</sup>, S. Mookerjee<sup>6</sup>, C. Mueller<sup>10</sup>, S.H. Nasyrov<sup>14</sup>, V.S. Navotny<sup>15</sup>, G.I. Orlova<sup>11</sup>, I.Otterlund<sup>8</sup>, H.S. Palsania<sup>7</sup>, N.G. Peresadko<sup>11</sup>, S. Persson<sup>8</sup>, N. V. Petrov<sup>14</sup>, 钱琬燕<sup>16</sup>, R. Raniwala<sup>6</sup>, S. Raniwala<sup>6</sup>, N.K. Rao<sup>7</sup>, J.T. Rhee<sup>10</sup>, N. A. Salmanova<sup>11</sup>, W. Shultz<sup>13</sup>, C. I. Shakhova<sup>1</sup>, B. Singh<sup>4</sup>,

D. Skelding<sup>13</sup>, K. Söderström<sup>8</sup>, E. Stenlund<sup>8</sup>, S.C. Strausz<sup>13</sup>, 孙君芬<sup>5</sup>, L.N. Svechnikova<sup>15</sup>, M. I. Tretyakova<sup>11</sup>, 王海桥<sup>16</sup>, 翁智群<sup>5</sup>, R.J. Wilkes<sup>13</sup>, 许国发<sup>2</sup>, 张东海<sup>9</sup>, 郑蒲英<sup>2</sup>, 周代翠<sup>16</sup>和周景晨<sup>16</sup>.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] T. H. Burnett et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 2062.
- [ 2 ] G. J. Alner et al., *Phys. Lett.*, **138B**(1984), 304;  
M. Adamus et al., *Phys. Lett.*, **185B**(1987), 185.
- [ 3 ] A. Bialas and R. Peschanski, *Nucl. Phys.*, **B273**(1986), 703;  
A. Bialas and R. Peschanski, *Nucl. Phys.*, **B308**(1988), 857.
- [ 4 ] B. Buschbeck and P. Lipa, UA1/TN 89-06.
- [ 5 ] W. Kittel, EHS/NA22 Collaboration, Talk at the Santa Fee Workshop on Intermittency in High-Energy Collisions, March 18—21, 1990.
- [ 6 ] R. Holynski et al., *Phys. Rev. Lett.*, **62**(1989), 733;  
R. Albrecht et al., *Phys. Lett.*, **B221**(1989), 427.
- [ 7 ] K. Sugano, ANL-HEP-CP-90-37.
- [ 8 ] For example, see Festschrift For Leon Van Hove and Proceedings, Eds, A. Giovannini and W. Kittel, World Scientific 1990 and Refs cited therein.
- [ 9 ] EMU01 Collaboration M. I. Adamovich et al., *Phys Lett.*, **B227**(1989), 285;  
S. Garpman et al., *Nucl. Instr. and Methods.*, **A269**(1988), 134.
- [ 10 ] K. Fialkowski, B. Wosiek and J. Wosiek, *Acta. Physica Polonica*, **B20**(1989), 639.
- [ 11 ] M. I. Adamovich et al., On the Multiplicity Fluctuations in Relative Heavy Ion Collisions, PrePrint LUIP-8912 (1989).

- 
- 1) Alma Ata, Inst. of High Energy Physics, USSR.
  - 2) 北京,中国科学院高能物理研究所.
  - 3) Berkeley, Lawrence Berkeley Lab, USA.
  - 4) Chandigarh, Panjab University, India.
  - 5) 长沙,湖南教育学院.
  - 6) Jaipur, University of Rajasthan, India.
  - 7) Jammu, University of Jammu, India.
  - 8) Lund, University of Lund, Sweden.
  - 9) 临汾,山西师范大学.
  - 10) Marburg, Phillips University, West Germany.
  - 11) Moscow, Lebedev Institute, USSR.
  - 12) Ottawa, NRC, Canada.
  - 13) Seattle, University of Washington, USA.
  - 14) Tashkent, Institute of Nuclear Physics, USSR.
  - 15) Tashkent, Physical-Technical Institute, USSR.
  - 16) 武汉,华中师范大学.



## The Systematical Investigation of Intermittency in High Energy Heavy Ion Collisions

EMU01 COLLABORATION

### ABSTRACT

The intermittency of multiparticle production processes in high energies oxygen, silicon and sulphur induced emulsion and sulphur gold interactions are investigated systematically. It is found that in the pseudorapidity region  $1 \sim 0.1$ , the EMU01 data exhibits the intermittent behaviour. The intermittent indexes are found to decrease with increasing the incident energy and mean multiplicity and to increase with increasing target mass. It seems also to increase as the projectile mass increases.