

高能重离子中心碰撞末态 多重数谱的局域特征*

CERN/EMU01 国际合作组

M. I. Adamovich¹³, M. M. Aggarwal⁴, Y. A. Alexandrov¹³, N.P. Andreeva¹, Z. V. Anson¹, R. Arora⁴, F. A. Avetyan²⁰, S. K. Badyal⁸, E. S. Basova¹⁷, I. K. Bazarov¹⁷, K. B. Bhalla⁷, A. Bhasin⁸, V. S. Bhatia⁴, V. G. Bogdanov¹⁵, V. I. Bubnov¹, T.H. Burnett¹⁶, 蔡勳¹⁹, D. A. Carshiev¹⁷, A.M. Ceitimbetov¹, I. Y. Chasnikov¹, L. P. Chernova¹⁸, M. M. Chernyavski¹³, G. Z., Eligbaeva¹, L. E. Eremenko¹, A. S. Gaitinov¹, E. Ganssauge¹², S. Garpman¹¹, S. G. Gerassimov¹³, J. Grote¹⁶, K. G. Gulamov¹⁸, S. K. Gupta⁷, V. K. Gupta⁸, H.H. Heckman³, B. Jakobsson¹¹, B. Judek¹⁴, L. Just⁹, S. Kachroo⁸, G. S. Kalyachkina¹, E. K. Kanygina¹, M. Karabova⁶, S. P. Kharlamov¹³, S. Kitroo⁸, S. A. Krasnov⁶, S. Kulikova⁶, V. Kumar⁷, P. Lal⁷, V.G. Larionova¹³, 刘连寿¹⁹, S. Lokanathan⁷, J. Lord¹⁶, N. S. Lukicheva¹⁸, 罗世彬¹⁰, T. N. Maksimkina⁶, L. K. Mangotra⁸, N. A. Marutyan²⁰, N. V. Maslennikova¹³, I. S. Mitra⁴, S. Mokerjee⁷, J. Musulmanbekov⁶, S. Z. Nasyrov¹⁷, V. S. Navotny¹⁸, M. Ochs¹², G. I. Orlova¹³, I. Otterlund¹¹, H. S. Palsania⁷, N. G. Peresadko¹³, N.V. Petrov¹⁷, V. A. Plyushchev¹⁵, 钱琬燕¹⁹, 秦玉明¹⁰, R. Raniwala⁷, S. Raniwala⁷, N. K. Rao⁸, J. Ravina¹⁷, V. M. Rappoport¹³, J. T. Rhee¹², M. Roesper¹², N. Saidkhanov¹⁸, N. A. Salmanova¹³, L. G. Sarkisova²⁰, V. R. Sarkisyan²⁰, G.S. Shabratova⁶, T.I. Shakhova¹, S.N. Shpilev¹⁸, D. Skelding¹⁶, K. Soderstrom¹¹, Z. I. Solovjeva¹⁵, E. Stenlund¹¹, S. C. Strausz¹⁵, E. L. Surin¹⁸, L. N. Svechnikova¹⁸, K.D. Tolstov⁶, M. Tothova⁹, M.I. Tretyakova¹³, T. P. Trofimova¹⁷, U. I. Tuleeva¹⁷, B. P. Tursunov¹⁷, S. Vokal⁶, J. Vrlakova⁹, 王海桥¹⁹, 翁智群⁵, R. J. Wilkes¹⁶, 许国发², 杨纯斌¹⁹, 张东海¹⁰, 郑蒲英², S. I. Zhochova¹⁸, 周代翠¹⁹, 周景晨¹⁹.

1 (Alma Ata, Inst. of High Energy Physics, Kazakhstan, CIS) 2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039) 3 (Berkeley, Lawrence Berkeley Lab, USA) 4 (Chandigarh, Panjab University, India) 5 (湖南教育学院 长沙 410012) 6 (Dubna, JINR, Russia, CIS) 7 (Jaipur, University of Rajasthan, India) 8 (Jammu, University of Jammu, India) 9 (Kosice, Safarik University, Czechoslovakia) 10 (山西师范大学 临汾 041004) 11 (Lund, University of Lund, Sweden) 12 (Marburg, Philipps University, Germany) 13 (Moscow, Lebedev Institute, Russia, CIS) 14 (Ottawa, NRC, Canada) 15 (St Petersburg, V G Khlopin Radium Institute, Russia, CIS) 16 (Seattle, University of Washington, USA) 17 (Tashkent, Institute of Nuclear Physics, Uzbekistan, CIS) 18 (Tashkent, Physical-Technical Institute, Uzbekistan, CIS) 19 (华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430070) 20 (Yerevan, Physical Institute, Armenia, CIS)

1993年6月21日收到

* 国家自然科学基金、国家教委优秀年轻教师基金、霍英东教育基金、瑞典 NFR 和 International Seminar in Uppsala、联邦德国 Minister of Research and Technology、第三世界科学院 TWRG-277、印度 Department of University Grants Commission、美国 USDOE 和 NSF 资助。

摘 要

在 14.6—200A GeV 的束流能区内,系统研究了氧离子 (^{16}O) 诱发乳胶核 (Em) 和硫离子 (^{32}S) 诱发金核 (^{197}Au) 中心相互作用中末态产生粒子多重数谱的局域特征,给出了离散 σ 对平均多重数、入射能量和碰撞中心度的依赖以及阶乘矩 F_2 随能量和中心度的变化,考查了局域赭快度窗口中多重数分布参数化的有效性,分析了归一化方差对窗口的依赖关系,估计了中心碰撞下粒子发射源数目。

关键词 中心碰撞,局域特征,发射源数目。

1 引 言

当两个重核在高速下碰撞时,它们的动能变成激发能,在末态出现大量的产生粒子。产生粒子的多重数 n 是首要的整体观测量,它的分布联系着重核的高能反应动力学和运动学过程,成为研究事例特征的有用工具。人们在对强子-强子 (h-h) 碰撞的研究中发现^[1],多重数分布的离散度 σ 与平均多重数 $\langle n \rangle$ 具有线性关系,而在各种赭快度 $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ 的窗口内,多重数分布能采用参数化的负二项式(NB)分布^[2]来作较好的描写。理论分析表明,导致 NB 分布的物理原因可能由于受激发射、级联过程或某种喷注碎裂过程等。最近对相同能量的 A-A 碰撞的研究表明^[3],在全相空间中产生粒子的多重数分布具有近似的能量标度无关性,常采用高斯 (GA) 分布^[4,5]来作参数化。

文献[5]虽然报道了 A-A 中心碰撞下在大赭快度窗口内的多重数分布服从 GA 型,但该结论尚缺进一步的实验报道。而 NB 分布的描述,对于 A-A 碰撞是否能对各种赭快度窗口保持有效,这两个分布适用的范围和条件,特别是在中心区进一步考查相当小的赭快度窗口内的多重数分布及其描写形式,以及对碰撞中心度的依赖性,都是高能重核碰撞中关注的课题。本文将利用 CERN/EMU01 的实验数据作分析。

2 实验概述

EMU01 实验以核乳胶室(垂直于束流方向曝光)和核乳胶叠(平行于束流方向曝光)为径迹探测器。由于核研究乳胶具有极高的空间分辨本领,利用计算机程序控制的现代测量设备,能精密地测量径迹坐标和发射角,有利于研究高能重核作用末态产生粒子的多重数及其相空间的关联^[6]。重核束流曝光分别在美国 BNL/AGS 和西欧 CERN/SPS 的大型加速器上进行,分别有 14.6、60 和 200A GeV 的氧,200A GeV 的硫^[7]。

重核作用的末态粒子径迹区分为如下几类: 1)簇射径迹 (n_s),它们是带单电荷但速度 $\beta \geq 0.7c$ 的粒子,绝大多数为产生的 π 介子。2)灰径迹 (n_g),它们是射程 $l \geq 3\text{mm}$ 的质子 ($0.3 < \beta < 0.7c$),能量范围约为 26—375 MeV。根据 Lund 模型的 Fritiof 模拟估计,其中包含约 10%左右的慢 π 介子 (12—56 MeV) 和 1%左右的 K 介子 (20—200

MeV)。3)黑径迹 (n_b)，射程 $l < 3\text{mm}$ ，主要是低能的靶碎片。定义 $n_g + n_b = n_h$ ，称为重叉径迹数。由于水平曝光的核乳胶叠采用混合核为靶， n_h 可用来作为区分入射束流作用在轻核或重核上的判据。对于相同类型的靶核， n_h 还可用作区分不同的碰撞中心度的判据。对于乳胶叠测量技术，分辨率 ~ 0.1 个快度单位。对于垂直方向曝光的乳胶室^[7]，以 $250\mu\text{m}$ 厚的金箔作靶。径迹测量采用半自动化手段，分辨率达 0.01 个快度单位。挑选中心与半中心事例，实验采用的判据是在向前方向的立体角内，射弹碎片的数目 $N_c = 0$ 和 $N_c \leq 2$ 。

3 数据分析

3.1 分析方法

考虑粒子的随机发射^[8]，即如果产生粒子在快度空间无关联，而是以确定的几率落在某一快度区间 $(\eta, \eta + \delta\eta)$ ，那么， n 个粒子落入区间 $(\eta, \eta + \delta\eta)$ 的几率 $P(n)$ 由下式给出

$$P(n) = \sum_N P(N) \cdot P(n|N) = \sum_N P(N) \cdot \binom{N}{n} \cdot p^n \cdot (1-p)^{N-n}. \quad (1)$$

这里， $P(N)$ 是 N 个粒子落入大快度窗口 $\Delta\eta$ 的几率， $P(n|N)$ 是在 N 一定下，有 n 个粒子落入小快度窗口 $\delta\eta$ 的几率， p 是一个粒子落入 $\delta\eta$ 的几率，即

$$p = \frac{\delta\eta \langle \rho(\delta\eta) \rangle}{\Delta\eta \langle \rho(\Delta\eta) \rangle} \quad (2)$$

这里， ρ 是相应窗口里的平均粒子密度。利用(1)式，归一化方差 $Q(\eta, \delta\eta) = \sigma^2(n) / \langle n \rangle^2$ 由下式给出：

$$Q(\eta, \delta\eta) = \frac{1}{\delta\eta \langle \rho(\delta\eta) \rangle} = \text{Const.} \quad (3)$$

因子化阶乘矩定义为

$$F_q = \frac{\langle n(n-1)\cdots(n-q+1) \rangle}{\langle n \rangle^q}, \quad (4)$$

对于 $q=2$ ，有

$$F_2 = 1 + \frac{\sigma^2}{\langle n \rangle^2} - \frac{1}{\langle n \rangle}. \quad (5)$$

如果平均多重数 $\langle n \rangle$ 很大，则有

$$\sigma \simeq \langle n \rangle \sqrt{F_2 - 1} + \frac{1}{2\sqrt{F_2 - 1}}. \quad (6)$$

因此，在随机发射假设下，当平均多重数 $\langle n \rangle$ 很大时， σ 与 $\langle n \rangle$ 具有近似的线性关系。

对于负二项式分布，归一化方差由下式给出

$$Q = \frac{1}{K} + \frac{1}{\langle n \rangle}. \quad (7)$$

它的含义在于： Q 作为 $1/\langle n \rangle$ 的函数，是线性关系，斜率等于 1。截距 $1/K$ 与因子化矩

F_2 有联系, 即 $1/K = F_2 - 1$. 方程(7)表明, 如果负二项式是实验的合适的参数化形式, K 值就能够描写其分布, 而与快度窗口的大小无关.

3.2 实验数据的离散特征与 χ^2 检验

采用水平入射的 14.6、60 和 200 A GeV 氧离子束流诱发原子核乳胶作用的无偏数据样本, 事例数分别是 697、420 和 534. 以重叉径迹 $n_h \geq 9$ 挑选出靶核为 AgBr 的子样本, 它与 $^{16}\text{O} + \text{Em}$ 无偏事例样本的比例为 34~44%; $n_h \geq 15$, 对应 $^{16}\text{O} + \text{AgBr}$ 半中心碰撞, 反应截面为 27~30%; $n_h \geq 26$, 对应 $^{16}\text{O} + \text{AgBr}$ 中心碰撞, 反应截面为 7~13%. 在核子-核子作用质心系, 选取的快度中心区 $\Delta\eta$, 三个能量分别是: $0.79 < \eta < 2.79$, $1.47 < \eta < 3.47$, $2.07 < \eta < 4.07$. 再把它等分成小间隔, 间隔的宽度 $\delta\eta = \Delta\eta/2^{i-1}$, $i = 1, \dots, 6$. 采用这种方式划分的目的在于增加统计量. i 的取值范围由实验分辨率限定.

对固定的快度区域 $\Delta\eta$, 当把它们等分为不同大小的间隔 $\delta\eta$, 其簇射粒子多重数分布的离散度 σ 随平均多重数 $\langle n_i(\delta\eta) \rangle$ 的变化, 显示出线性增长关系, 图 1 给出了直线拟合结果. 在相同能量下, 其拟合参量, 即斜率 $b = \sqrt{F_2 - 1}$ 明显地依赖碰撞中心度, 中心度越高, 斜率 b 越小. 在 14.6—200 A GeV 能量范围内, 斜率 b 近似与能量无关.

利用(7)式拟合得到的 K 值, 注意到在各种快度窗口中不变的要求, 用 NB 分布参数化, 考查每单位自由度的方差 χ^2/DOF 的大小. 图 2(a, b, c) 给出了 $^{16}\text{O} + \text{Em}$ 中心碰撞 ($n_h \geq 26$) 下拟合值 χ^2/DOF 随 $\delta\eta$ 的变化, 在三种能量下, NB 分布都能较好地描述各种快度窗口的实验数据. 图 3 是 200 A GeV $^{16}\text{O} + \text{Em}$ 相互作用在不同碰撞中心度下的比较, 对于 $n_h \geq 15$ 的半中心碰撞, NB 分布近似描述了数据; 对于 $n_h \geq 9$ 的 $^{16}\text{O} + \text{AgBr}$ 子样本, 当 $\delta\eta$ 不小于 0.5, NB 分布也能够近似描述数据; 但对于更小的窗口, χ^2/DOF 上升很快, NB 分布已不能适用. 唯有 $n_h \geq 26$ 的中心碰撞样本, 对各种大小的快度间隔, $\chi^2/\text{DOF} \sim 1$, NB 分布给出了较一致的描述.

3.3 归一化方差与粒子发射源数目的估计

粒子发射源数目的估计, 不仅联系着核碰撞几何, 而且联系着核碰撞机制的研究. 为尽可能减小核几何效应的影响, 只考虑中心与半中心碰撞. 以 200 A GeV $^{32}\text{S} + \text{Au}$ 相互作用事例为样本, 以 $N_c = 0$ 和 $N_c = 0, 1, 2$ 挑选中心和半中心样本, 事例数分别为 106 和 262. 图 4 给出了 200 A GeV $^{32}\text{S} + \text{Au}$ 的数据结果. 实验点几乎落在同一直线

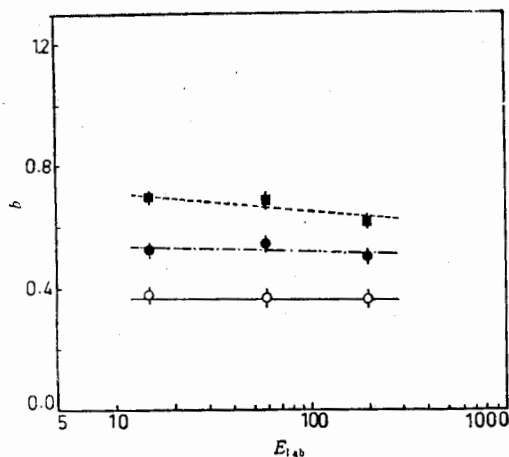


图 1 14.6、60 和 200 A GeV $^{16}\text{O} + \text{Em}$ 相互作用的多重数分布的离散 σ 对平均多重数 $\langle n \rangle$ 的依赖参量 b 随碰撞中心度和入射能量的变化
 \blacksquare $n_h \geq 9$, \bullet $n_h \geq 15$, \circ $n_h \geq 26$.

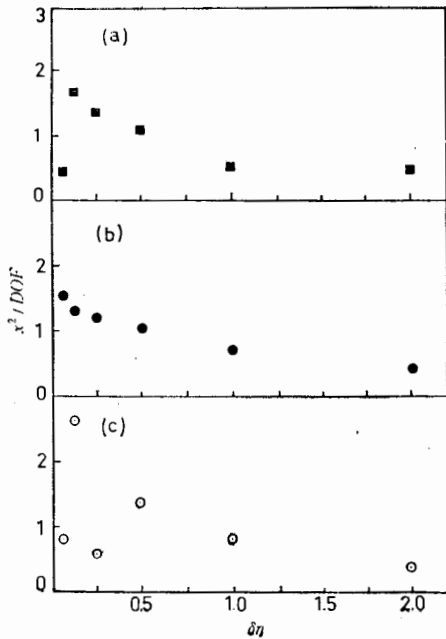


图2(a,b,c) 200, 60和14.6A GeV $^{16}\text{O} + \text{Em}$ 中心碰撞 ($n_h \geq 26$) 末态多重数分布的负二项式拟合对快度区间的依赖

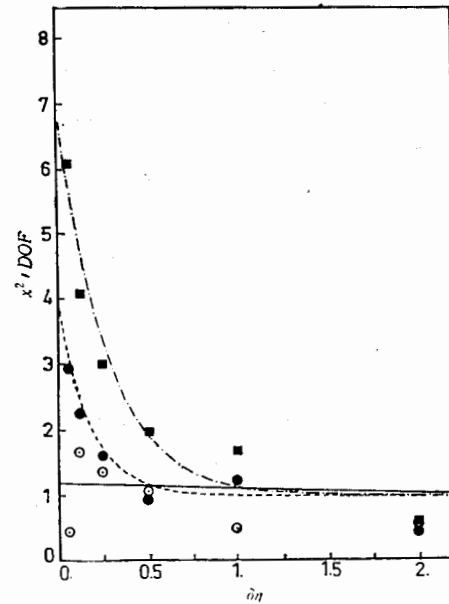


图3 200A GeV $^{16}\text{O} + \text{Em}$ 相互作用末态多重数分布的负二项式拟合对快度区间及其碰撞中心度的依赖

■ $n_h \geq 9$ (34%), ● $n_h \geq 15$ (27%), ○ $n_h \geq 26$ (7%).

上。数据表明,对更高的中心度 ($N_c = 0$),归一化方差更小些。直线拟合给出了截距和相应的参量 K 值。中心度越高, K 值越大。拟合给出 $1/K = 0.065 \pm 0.013$ 和 0.080 ± 0.012 。以此估计的粒子的平均有效发射源数目分别约为 15 和 13。

由于射弹与靶核内的核子密度有涨落等影响,发射源数目 ω 有分布 $P(\omega)$, 每个源对末态的贡献可采用几何分布描写。令 $\langle m \rangle$ 代表单个发射源贡献的末态平均粒子数目,那么 ω 个发射源,末态平均多重数为

$$\langle n \rangle = \sum P(\omega) \omega \langle m \rangle = \langle \omega \rangle \langle m \rangle, \quad (8)$$

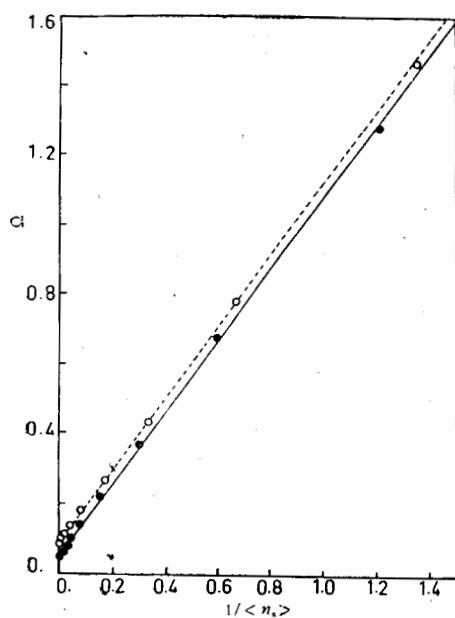
由此得出

$$\Omega(n) - \frac{1}{\langle n \rangle} = \Omega(\omega) + \frac{1}{\langle \omega \rangle} - \frac{1}{K}. \quad (9)$$

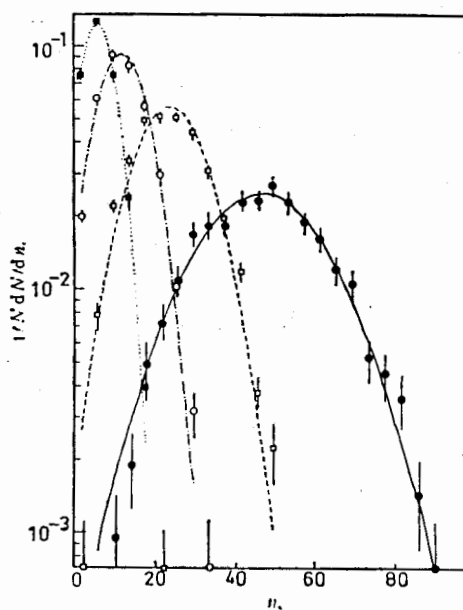
这样得出的 K 可作为发射源的有效数目 $\langle \omega \rangle_{\text{eff}}$,

$$\langle \omega \rangle_{\text{eff}} = \langle \omega \rangle \left(\frac{1}{1 + \frac{\sigma^2(\omega)}{\langle \omega \rangle}} \right). \quad (10)$$

若 $\sigma^2(\omega) \ll \langle \omega \rangle$, 有 $\langle \omega \rangle_{\text{eff}} \approx \langle \omega \rangle - \sigma^2(\omega)$ 。显然, $\langle \omega \rangle_{\text{eff}}$ 与核内发射源分布有关,发射源依赖于核子密度分布及其涨落,发射源的起伏越大,有效源数目越小。


 图 4 200A GeV $^{32}\text{S} + \text{Au}$ 中心相互作用的多重数分布的归一化方差随平均多重数倒数的变化

● $N_c = 0$, ○ $N_c = 0, 1, 2$.


 图 5 200A GeV $^{32}\text{S} + \text{Au}$ 作用的多重数分布及其高斯函数拟合

● $\delta\eta = 0.5$, □ $\delta\eta = 0.25$, ○ $\delta\eta = 0.125$,
■ $\delta\eta = 0.0625$, $N_c = 0, 1, 2$.

3.4 NB 分布与 GA 分布参数化及其比较

以 200A GeV $^{32}\text{S} + \text{Au}$ 相互作用的中心事例样本, 快度间隔从 $\delta\eta = 2.0$ 递减到 $\delta\eta = 0.0156$, 中心度截断 $N_c = 0$ 。用 NB 分布拟合实验数据, 表 1 中给出了相应间隔下的拟合参量, 即平均多重数 $\langle n_s \rangle$ 、参量 K 值及其 χ^2/DOF 的数值。

表 1 负二项式与高斯函数拟合 200A GeV $^{32}\text{S} + \text{Au}$ 中心碰撞 ($N_c = 0$) 多重数分布的 χ^2/DOF 值

NB 分布				GA 分布		
$\delta\eta$	$\langle n_s \rangle$	K	χ^2/DOF	$\langle n_s \rangle$	σ_{n_s}	χ^2/DOF
2.	221.94 ± 11.41	23 ± 2	0.61	220.95 ± 11.87	43.97 ± 5.46	0.59
1.	117.00 ± 2.47	17 ± 1	0.58	111.92 ± 4.43	34.57 ± 3.46	0.50
0.5	56.24 ± 0.45	15 ± 1	0.80	53.66 ± 0.75	15.47 ± 0.83	1.36
0.25	26.79 ± 0.86	16 ± 1	1.55	26.67 ± 0.29	8.51 ± 0.23	1.04
0.125	13.42 ± 0.64	15 ± 1	2.47	13.20 ± 0.12	4.89 ± 0.09	1.70
0.0625	6.66 ± 0.05	15 ± 1	2.54	6.52 ± 0.06	3.15 ± 0.05	3.26
0.0313	3.21 ± 0.02	15 ± 1	2.66	3.08 ± 0.03	2.15 ± 0.03	9.78
0.0156	1.68 ± 0.12	13 ± 1	1.78	1.49 ± 0.001	1.51 ± 0.18	58.01

显然, 当 K 为自由参量时, NB 分布较好地描述了 $^{32}\text{S}-\text{Au}$ 中心相互作用事例的数据。参量 K 取值范围为 $(13 \pm 1) \leq K \leq (23 \pm 2)$ 。图 5 给出了四组不同快度窗口的多重数分布的数据点。对这套数据, 再选用 GA 分布作拟合。分析表明, 当 $\delta\eta \geq 0.0625$

时, GA 分布也能较好地描述实验数据. 图 5 中的曲线是 GA 分布. 表 1 的右边是 GA 分布拟合给出的参量值及其 χ^2/DOF 的大小. 两种形式的参数化比较表明, 从较大的快度窗口 ($\delta\eta = 2.0$) 递减到中等快度窗口 ($\delta\eta \sim 0.0625$), 并不能明显区分 NB 分布与 GA 分布描述的差异. 当快度窗口继续变小直至实验分辨率, 只有 NB 分布继续保持有效.

4 结 论

在核-核碰撞中, 核几何和参与反应核子数起着重要作用. 为尽可能减少它们的影响, 分析主要集中在中心事例样本上. 实验结果表明, 产生粒子多重数分布的方差随平均多重数呈线性增长, 随碰撞中心度增加而减小, 并近似与能量无关. 阶乘矩 F_2 对能量依赖不敏感, 但随碰撞中心度增加而减小. 核-核中心碰撞末态产生粒子多重数谱服从 NB 分布. 归一化方差随平均多重数倒数线性增长, 中心度越高, 发射源数目越大. 多重数分布的涨落实际反应了核内核子密度的起伏. NB 和 GA 分布两种参数形式拟合的比较, 显示出在中等快度间隔 ($\delta\eta \geq 0.0625$) 以上, 两种参数形式描写实验无明显差别, 在更小的 $\delta\eta$ 中, 中心极限定理已不再成立.

参 考 文 献

- [1] P.K. Malhotra, *Nucl. Phys.*, **46**(1963)559; A. Wroblewski, *Acta Phys.*, **134**(1973)857.
- [2] A. Giovannini and L. Van Hove, *Z. Phys.*, **C30**(1986)391; CERN-TH. 4894/87; *Acta Phys. Pol.*, **B19**(1988)495; NA5 Collaboration, F Dengler et al., *Z. Phys.*, **C33**(1986)187.
- [3] EMU01 collaboration, M.I. Adamovich et al., *Phys. Lett.*, **B223**(1989)262.
- [4] NA34 Collaboration (HELIOS), T. Akesson et al., *Z. Phys.*, **C38**(1988)383; G. Baym, G. Friedman and I. Sarcevic, *Phys. Lett.*, **B219**(1989)205.
- [5] I. Otterlund et al., Proc. Int. Conf. on Physics and Astrophysics of Quark Gluon Plasma, Bombay, India 1988 B Sinha, S Raha, (eds.) Singapore: World Scientific; WA80 Collaboration, R. Albrecht et al., *Z. Phys.*, **C45**(1989)31.
- [6] S. Garpman et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A269**(1988)134; 蔡勳等, 核技术, **13**(1990)733.
- [7] EMU01 Collaboration, M.I. Adamovich et al., 高能物理与核物理, **13**(1989)865; *Phys. Lett.*, **B201**(1988)397; **B227**(1989)285.
- [8] EMU01 Collaboration, M.I. Adamovich et al., *Phys. Lett.*, **B223**(1990)512.

Local Characters of Finite State Multiplicity Spectra in High Energy Heavy-Ion Central Collisions

CERN/EMU01 Collaboration

Received on June 21, 1993

Abstract

Local characters of finite state multiplicity spectra in high energy ^{16}O -induced nuclear emulsion(Em) and ^{32}S -induced gold nuclei(^{197}Au) violent central collisions are investigated systematically. Both the dependences of dispersion σ on mean value $\langle n \rangle$, incident energy and centrality and factorial moment F_2 on energy and centrality are given out. The validity of parametrizations of multiplicity spectra in local rapidity windows are examined. The dependence of normalized variance on window are analyzed and the estimation of the number of particle emitting source is discussed.

Key words central collision, local character, number of emitting source.