

3.7 AGeV ^{16}O -Em作用中的间歇行为*

李俊生¹⁾ 张东海

(山西师范大学现代物理研究所 临汾 041004)

摘要 对3.7 AGeV ^{16}O -Em作用产生的慢粒子标度阶乘矩分布进行研究, 得出间歇指数随矩阶数的增加而增加, 随靶核质量的增加而减小; 反常分形维数随 q 的增加而增加; 对于每一个 q 值, d_q 随平均多重数的增加而减小, 表明在3.7 AGeV ^{16}O -Em作用中多粒子产生具有自相似级联的性质.

关键词 慢粒子 标度阶乘矩 间歇指数 反常分形维数 自相似随机级联

1 引言

在核-核碰撞中, 有关多粒子产生的动力学机制问题的研究一直吸引了众多的理论和实验物理工作者. 近年来, 随着加速器能量的提高, 间歇现象的研究在粒子物理学界产生了极大的影响. 实验上, 人们发现在高能核-核碰撞中产生粒子的快度分布可能存在非统计的大起伏. 这种现象最早在宇宙线实验中观察到^[1], 后来在强子-强子^[2, 3]、强子-核、核-核^[4]碰撞过程中均观察到这种现象. 这种涨落现象可以解释为从夸克胶子等离子体(QGP)到强子物质的相变^[5, 6]、强子契伦柯夫辐射、小喷注形成等集体现象所致. 因此人们认为间歇现象是在高能核-核碰撞中形成夸克胶子等离子体的一种可能信号.

1986年Bialas和Peschanski提出了利用阶乘矩分析法来研究这种末态粒子的非统计涨落^[7-9]. 由于这种现象和流体动力学中研究湍流现象时出现间歇很相似, 因此称为间歇. 他们利用标度阶乘矩来消除粒子多重数的纯统计涨落, 从而考察内在的动力学原因. 这种方法可以检验观察到的粒子密度涨落的统计意义, 即检验这种粒子密度涨落是由简单的统计引起, 还是由一定的动力学原因导致多粒子产生的间歇行为. 如果只有纯统计涨落, 则随着快度窗口的减小, 阶乘矩会趋于饱和, 最终趋于常数. 反之, 如果这种涨落是由于动力学原因引起, 则随着快度窗口的减小, 阶乘矩将随指数规律增加, 即存在间歇. 为了寻找这

种间歇现象, 许多物理工作者对不同射弹在不同能量下与不同的靶核进行碰撞的实验结果进行了大量的研究^[10-26].

最初人们对间歇现象的研究主要集中在赝快度空间, 即研究碰撞产生的 π 介子的间歇行为, 并把这种现象看作是产生夸克胶子等离子体的一种信号. 人们很少研究靶核碎裂的间歇行为. 但是, 靶核的碎裂过程也携带了有关核-核碰撞过程中的动力学信息. 蒸发模型可以较好地解释靶核碎裂过程, 但是该模型并不能解释所有的靶核碎裂过程^[27]. 因此, 我们需要用不同的方法来研究靶核的碎裂机制. 近年来, 人们发现在高能核-核作用的慢粒子中也存在这种间歇现象, 而在这一区域, 人们普遍认为是不会产生夸克胶子等离子体的. 因此, 能否把产生间歇行为作为产生夸克胶子等离子体的一种信号, 还有待进一步的研究. D.Ghosh等人利用垂直阶乘矩研究了2.1 AGeV和60 AGeV ^{16}O -AgBr作用, 4.5 AGeV ^{12}C -AgBr作用, 4.5 AGeV ^{24}Mg -AgBr作用, 14.5 AGeV ^{28}Si -AgBr作用, 200 AGeV ^{28}S -AgBr作用时靶核碎裂的间歇行为^[28-32]. 本文利用水平阶乘矩研究了3.7 AGeV ^{16}O -Em作用慢粒子的间歇行为.

2 阶乘矩分析法

对于间歇现象, 目前存在两种不同形式的阶乘矩分析方法. 一种称为水平阶乘矩, 另一种称为垂直阶乘矩.

2005-08-29 收稿

*国家自然科学基金(10475054, 10275042)和山西省青年科学基金(20051002)资助

1) E-mail: lij@sns.sxnu.edu.cn

2.1 水平阶乘矩

水平阶乘矩的定义如下

$$\langle F_q \rangle = \frac{1}{\langle \bar{n} \rangle^q} \left\langle M^{q-1} \sum_{m=1}^M n_{mj} (n_{mj} - 1) \cdots (n_{mj} - q + 1) \right\rangle, \quad (1)$$

其中

$$\langle \bar{n} \rangle = \left\langle \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M n_{mj} \right\rangle, \quad (2)$$

这里末态相空间 $\Delta(\eta$ 或 φ 或 $\cos\theta)$ 被划分成 M 个同样宽度的子区间, 每个子区间的大小为 $\delta(\delta = \Delta/M)$; n_{mj} 是第 j 个事例落在第 m 个子区间内的慢粒子数(即重电离粒子数 $n_h = n_g + n_b$), 平均值是对样品所有的事例求平均.

2.2 垂直阶乘矩

垂直阶乘矩的定义如下

$$\langle F_q \rangle = M^{q-1} \sum_{m=1}^M \frac{1}{N_{\text{event}}} \times \sum_{j=1}^{N_{\text{event}}} \frac{n_{mj} (n_{mj} - 1) \cdots (n_{mj} - q + 1)}{\langle n_m \rangle^q}, \quad (3)$$

这里相空间 $\Delta(\eta$ 或 φ 或 $\cos\theta)$ 同样被划分成 M 个同样宽度的子区间, n_{mj} 是第 j 个事例在第 m 个子区间内的慢粒子数(即重电离粒子数 $n_h = n_g + n_b$), 其中

$$\langle n_m \rangle = \frac{1}{N_{\text{event}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{event}}} n_{mj}. \quad (4)$$

水平阶乘矩是分析单事例粒子在空间分布的非统计涨落, 它依赖于单粒子密度分布谱的形状. 垂直阶乘矩讨论全部事例空间中产生粒子的非统计涨落, 它会丢失单事例空间产生粒子分布的涨落信息. 两种方法所得的结论是一致的.

如果当 $\delta \rightarrow 0$ 时, 阶乘矩有反常标度行为

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \langle F_q \rangle \propto M^{\alpha_q}, \quad (5)$$

即

$$\ln \langle F_q \rangle = \alpha_q \ln(M) + a, \quad (6)$$

则称为存在间歇, 其中 α_q 称为间歇指数, 可以利用最小二乘法拟合得到, a 为常量.

3 实验描述

首次对 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用慢粒子(重电离粒子 $n_h = n_g + n_b$) 的间歇行为进行了高统计的研究, 所

用乳胶叠是由 EMU-01 国际合作组提供的 NIKFI-BR-2 型原子核乳胶. 乳胶叠体积 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 2\text{cm}$, 在俄罗斯 JINR Dubna 的 Synchrophasotron (同步稳相加速器) 上沿平行于乳胶平面的方向照射, 照射束流通量为 $10^3/\text{cm}^2$. 乳胶片的原始厚度约为 $600\mu\text{m}$.

利用重光 XSJ-1 和 XSJ-2 型生物研究显微镜对核作用事例进行了沿径迹扫描, 即从距乳胶边缘 1cm 开始跟踪每一条氧核的径迹, 直至其发生作用或出乳胶上(下)表面. 由于进入乳胶平面的径迹不一定全部都是氧核的径迹, 可能含有未观测到的作用产生的次级粒子, 如 C 核、N 核等, 以及作用后结合得很紧密的一束次级粒子, 因而对每一个被扫描的径迹都利用 δ 电子密度法进行了仔细区分^[33]. 扫描物镜为 $100\times$ 浸油镜头, 目镜放大倍数为 16 倍. 为了避免乳胶畸变的影响, 扫描从乳胶边缘 1cm 处开始, 上下两边也各空 1cm .

根据核乳胶技术的惯例, 把相对论性重离子诱发乳胶核反应产生的末态粒子分为 4 大类^[34, 35]:

1) 簇射粒子, 用 N_s 来表示, 也称极小电离粒子, 其电离为 $I \leq 1.4I_{\text{min}}$, 这里 I_{min} 为单电荷粒子的极小电离, 对应能量大于 70MeV 的 π 介子及能量大于 400MeV 的质子. 大部分的簇射粒子是 π 介子但也混有少量的快质子和 k 介子, 它们的速度 $\beta > 0.7c$. 簇射粒子多重数用 n_s 表示.

2) 灰径迹粒子, 用 N_g 表示, 其多重数用 n_g 表示. 主要来源于碰撞后期靶核内的反冲质子, 其速度为 $0.3c \leq \beta < 0.7c$, 其动能为 $26\text{MeV} < E_k \leq 375\text{MeV}$. 另外还有少量的 K 介子、 π 介子、氘核、氚核和氦核, 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 $12\text{MeV} < E_k \leq 56\text{MeV}$. 灰径迹粒子在核乳胶中的电离为 $1.4I_{\text{min}} < I \leq 9I_{\text{min}}$, 射程为 $L > 3\text{mm}$.

3) 黑径迹粒子, 用 N_b 表示, 其多重数为 n_b . 黑径迹粒子主要来源于碰撞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, 在核乳胶中的电离 $I > 9I_{\text{min}}$, 射程 $L < 3\text{mm}$.

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

4) 射弹碎片粒子, 用 N_f 表示. 射弹碎片粒子为没有发生碰撞的射弹粒子剩余物. 其发射角 $\theta \leq 200/\text{pmrad}$. 其中 p 为射弹粒子的动量, 单位为 $\text{GeV}/\text{核子}$.

由于原子核乳胶是由 H, C, N, O, S, I, Ag 及 Br 等 8 种原子核组成的混合靶, 其中主要成分为 H, C, N,

O, Ag, Br 约占99%. 所以根据乳胶的组成可以把核作用分为3大类.

1) 射弹与乳胶重靶 AgBr 的作用, 实验上利用以下方法来判定:

(1) $n_h > 8$; (2) $n_h \leq 8$, 至少有一重电离粒子在乳胶中的射程 $R \leq 10\mu\text{m}$, 并无射程为 $10 < R \leq 50\mu\text{m}$ 的重电离粒子.

2) 射弹与乳胶轻靶 (C, N, O) 的作用, 实验上采用的判定标准为:

(1) $2 \leq n_h \leq 8$, 且无射程为 $R \leq 10\mu\text{m}$ 的重电离粒子径迹; (2) $n_h = n_b = 1$, 其射程 $R > 10\mu\text{m}$; (3) $n_h = n_g = 1$, 其出射方向向后(相对于射弹方向).

3) 射弹与 H 靶作用, 判定法则为:

(1) $n_b = 0$; (2) $n_h = n_g = 1$, 其出射方向向前(相对于射弹方向).

根据以上的判断标准, 选取了 848 个 3.7AGeV ^{16}O -AgBr 作用事例, 850 个 3.7AGeV ^{16}O -CNO 作用事例.

4 实验结果

在发射角空间计算了 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用慢粒子(重电离粒子)的水平阶乘矩, M 取值从 2—20. 图 1 给出了在发射角空间计算的 $q=2, 3, 4, 5, 6$ 时 $\ln\langle F_q \rangle$ 随 $\ln M$ 变化的关系, 其中图(a)为 ^{16}O -AgBr 作用结果,

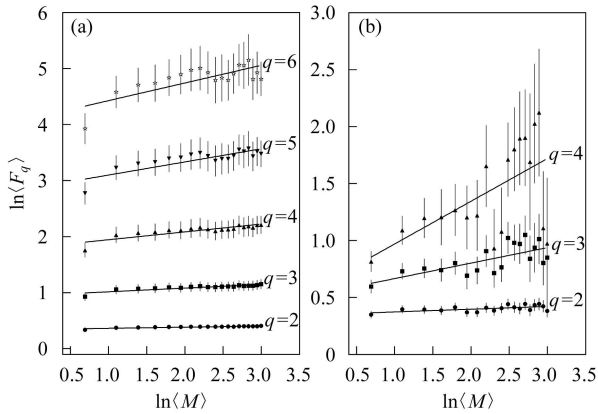


图 1 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用慢粒子在发射角空间 $\ln\langle F_q \rangle \sim \ln M$ 关系
(a) ^{16}O -AgBr 作用; (b) ^{16}O -CNO 作用.

图(b)为 ^{16}O -CNO 作用结果. 可以看出 $\ln\langle F_q \rangle$ 随 $\ln M$ 的增加而线性的增加, 从而可以说在 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用的靶核碎裂过程中存在明显的间歇行为. 利用(6)式对实验结果进行了拟合, 从而得到间歇指数 α_q , 拟合结果列于表 1 中. 从表 1 可以看出, 当束流能量确定时, ^{16}O 与 CNO 作用的 α_q 大于相同 q 值对应的

^{16}O 与 AgBr 作用的 α_q . 也就是说, 相同 q 值的间歇指数随靶核质量的增加而减小, 这与其他能量的实验结果是一致的.

标度阶乘矩的分析亦揭示出多粒子产生过程的分形性质. 这方面的性质可以通过反常分形维数 d_q 来研究, 反常分形维数的定义为^[36, 37]:

$$d_q = \frac{\alpha_q}{q-1}. \quad (7)$$

根据上式计算出 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用的 d_q 并列于表 1.

表 1 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用慢粒子间歇指数 α_q 及反常分形维数 d_q

作用类型	q	α_q	d_q
^{16}O -AgBr	2	0.020 ± 0.014	0.020 ± 0.014
	3	0.065 ± 0.029	0.033 ± 0.015
	4	0.140 ± 0.052	0.047 ± 0.017
	5	0.234 ± 0.082	0.058 ± 0.021
	6	0.315 ± 0.112	0.063 ± 0.022
^{16}O -CNO	2	0.024 ± 0.014	0.024 ± 0.014
	3	0.136 ± 0.036	0.068 ± 0.018
	4	0.375 ± 0.076	0.125 ± 0.025

图 2 给出了 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用 d_q 随 q 的变化关系. 从图 2 可以看出, 对于每一个 q 值, 反常分形维数随着靶核质量的增加而减小. 这表明在 3.7AGeV ^{16}O -Em 中多粒子产生具有自相似级联的性质.

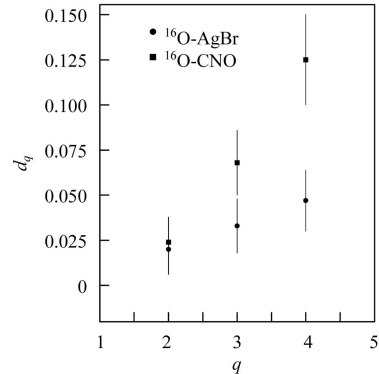


图 2 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用 $d_q \sim q$ 的关系

5 结论

在 3.7AGeV ^{16}O -Em 作用中间歇效应是很明显的. 间歇指数随阶数的增加而增加, 随靶核质量的增加而减小, 即间歇强度随平均多重数的增加而减弱. 反常分形维数随 q 的增加而增加, 对于每一个 q 值, d_q 随平均多重数的增加而减小, 表明在 3.7AGeV ^{16}O -Em 中多粒子产生具有自相似级联的性质.

参考文献(References)

- 1 Burnett T H, Dake S, Fuki M et al. Phys. Rev. Lett., 1983, **50**(26): 2062
- 2 Alner G J, Alpgard K, Ansorge R E et al. Phys. Rep., 1987, **154**(5): 247
- 3 Adamus M, Ajinenko I V, Amato S F et al. Phys. Lett., 1987, **B185**(1): 200
- 4 Adamovich M I, Aggarwal M M, Arora R et al(EMU01 Collaboration). Phys. Lett., 1988, **B201**(3): 397
- 5 Gyulassy M, Kajantie K, McLerran H K. Nucl. Phys., 1984, **B237**(3): 477
- 6 HWA R C. Phys. Lett., 1988, **B201**(1): 165
- 7 Bialas A. Nucl. Phys., 1986, **B273**(3-4): 703
- 8 Bialas A. Phys. Lett., 1988, **B207**(1): 59
- 9 Bialas A, Peschanski R. Nucl. Phys., 1988, **B308**(4): 857
- 10 Holynski R, Jurak A, Wilczynska B et al. Phys. Rev. Lett., 1989, **62**(1): 733; Holynski R, Jurak A, Olszewski A. Phys. Rev., 1989, **C40**(6): R2449—R2453
- 11 Braunschweig W et al(TASSO Collaboration). Phys. Lett., 1989, **B231**(4): 548
- 12 Gustafson G, Sjögren C. Phys. Lett., 1990, **B248**(3-4): 430
- 13 Ajinenko I V, Belokopytov Yu A, Böttcher H et al(NA22 Collaboration). Phys. Lett., 1989, **B222**(2): 306; *ibid.* 1990, **235**(3-4): 373
- 14 Albajar C, Albrow M G, Allkofer O C et al(UAI Collaboration). Nucl. Phys., 1990, **B345**(1): 1
- 15 Sengupta K et al. Phys. Lett., 1990, **B236**(2): 219
- 16 Adamovich M I, Aggarwal M M, Alexandrov Y A et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **65**(4): 412—415
- 17 Buschbeck B et al. Phys. Lett., 1988, **B215**(4): 788
- 18 Åkesson T, Almeded S, Angelis A L S et al(HELIOS-Emulsion Collaboration). Phys. Lett., 1990, **B252**(2): 303
- 19 Ghosh D, Ghosh Premomoy, Deb Argha et al. Phys. Lett., 1991, **B272**(1-2): 5—10; Ghosh Dipak, Ghosh Premomoy, Roychowdhury Jayanta et al. Phys. Rev., 1993, **C47**(3): 1120
- 20 Jain P L, Shing G. Nucl. Phys., 1996, **A596**(3-4): 700
- 21 Agababyan N M, Atayan M R, Gang Chen et al. Phys. Lett., 1998, **B431**(3-4): 451
- 22 Agababyan N M, Atayan M R, Charlet M et al. Phys. Lett., 1996, **B382**(3): 305
- 23 Smolarleiewicz M M, Kirejczyk M, Sikora B et al. Acta Physica Polonica, 2000, **B31**(2): 385
- 24 Janik R A, Beata Ziaja. Acta Physica Polonica, 1999, **B30**: 259
- 25 Bialas A, Ziaja B. Phys. Lett., 1996, **B378**(1-4): 319
- 26 Das G et al. Phys. Rev., 1996, **C54**(4): 2081
- 27 Ghosh D et al. J. Phys. G: Nucl. Phys., 1994, **20**(1): 1077
- 28 Ghosh D et al. Phys. Rev., 1998, **C58**(6): 3553
- 29 Ghosh D et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2003, **29**: 983
- 30 Ghosh D et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2003, **29**: 2087
- 31 Ghosh D et al. Eur. Phys. J., 2002, **A14**: 77
- 32 Ghosh D, Deb A, Bhattacharyya S et al. International Journal of Modern Physic, 2003, **E12** (3): 407
- 33 LI Jun-Sheng et al. Chinese Physics, 2004, **13**(6): 836
- 34 ZHANG Dong-Hai, SUN Han-Cheng. Acta Physica Sinca, 2000, **49**: 1938 (in Chinese)
(张东海, 孙汉城. 物理学报, 2000, **49**: 1938)
- 35 ZHANG Dong-Hai, SUN Han-Cheng. HEP & NP, 2001, **25**(7): 651 (in Chinese)
(张东海, 孙汉城. 高能物理与核物理, 2001, **25**(7): 651)
- 36 Hwa R C. Phys. Rev., 1990, **D41**(5): 1456
- 37 WANG Shao-Shun, ZHANG Jie, XIAO Chen-Guo et al. HEP & NP, 1994, **18**(11): 970 (in Chinese)
(王韶舜, 张杰, 肖臣国等. 高能物理与核物理, 1994, **18**(11): 970)

Intermittent Behavior in ^{16}O -Em Interaction at 3.7AGeV*LI Jun-Sheng¹⁾ ZHANG Dong-Hai

(Institute of Modern Physics, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

Abstract The scaled factorial moments of slow particles produced in ^{16}O -Em at 3.7AGeV have been calculated. It is obtained that the intermittency exponent increases with increasing moment order and decreases with increasing target mass, the anomalous fractal dimension d_q decreases with increasing multiplicity for each order of the moment. This behavior of anomalous dimensions d_q reveals a self-similar cascade mechanism in the case of the interactions of ^{16}O -Em at 3.7AGeV.

Key words slow particle, scaled factorial moment, intermittency exponent, anomalous fractal dimension, self-similar random cascade

Received 29 August 2005

*Supported by National Natural Science Foundation of China (10475054, 10275042) and the Shanxi Provincial Science Foundation for Youths (20051002)

1) E-mail: lij@s@dns.sxnu.edu.cn