

60A GeV ^{16}O 诱发乳胶核反应 α 射弹 碎片发射研究*

张东海¹⁾

(山西师范大学物理系 临汾 041004)

摘要 对 60A GeV ^{16}O 诱发乳胶核反应射弹 α 碎片的发射进行了研究, 得到 α 射弹碎片多重数分布服从 KNO 标度无关性. 在边缘作用下, α 射弹碎片的产生与靶核碎片的产生存在线性关联, 靶核碎片平均多重数随 α 射弹碎片数的增加线性减小, 它可以很好地利用核作用几何模型来解释.

关键词 射弹碎片 靶核碎片 碎裂

1 引言

在相对论性重离子碰撞中, 核物质的压缩及随后的膨胀将导致粒子的产生和扩展核系统分解成为多重碎片. 在高激发核物质的多重碎裂进程中, 将产生各种射弹碎片, 如 p, d, t, α 粒子及中等质量碎片^[1-8]. 在这些射弹碎片中 α 射弹碎片是仅次于单电荷碎片含量最高的碎片. 在 LBL 能区射弹 α 碎片的特性已被进行了大量的研究, 观察到两种明显不同特征的 α 射弹碎片^[9, 10]. 在 CERN SPS 及 BNL AGS 能区, 人们对射弹 α 碎片的发射也进行了研究^[11-16], 得到 α 碎片多重数分布服从 KNO 标度无关性^[17]; α 碎片横动量分布无法用单一高斯分布来描述, 分布存在高横动量尾巴. 为了解释 α 碎片横动量分布的特征, 一些作者利用两个不同宽度高斯分布的叠加来拟合实验结果, 这种两高斯分布性可以解释为射弹反应体内存在两种温度、速度不同的 α 射弹碎片发射源^[9, 12, 18, 19].

为了进一步揭示相对论性重离子碰撞过程中射弹碎裂的机制, 本文对 60A GeV ^{16}O 诱发乳胶核反应射弹 α 碎片的多重数分布以及 α 射弹碎片和靶核旁现体的关联进行了研究.

2 实验介绍

实验所用核乳胶叠由 EMU-01 国际合作组提供, 核乳胶叠体积为 10cm × 10cm ×

2001-02-15 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

2cm, 乳胶为 NIKFI BR-II 型全灵敏乳胶, 每层乳胶原始厚度为 $600\mu\text{m}$ 。乳胶叠于 1986 年在 CERN SPS 加速器上照射, 束流为 $60\text{AGeV } ^{16}\text{O}$, 通量为 $10^3/\text{cm}^2$ 。

为了得到核作用无偏事例, 利用放大倍数为 1500 倍的重光生物研究显微镜对进入乳胶叠的氧核径迹进行沿径迹扫描。扫描氧核径迹总长度 22097.6cm, 发现 1842 个作用事例, 其中电磁作用事例 151 个, 占核作用事例的 8.93%; 弹性作用事例 27 个。对每一个核作用事例, 按照核乳胶技术惯例对它的产生粒子进行分类, 分别得到簇射粒子 N_s , 黑径迹粒子 N_b , 灰径迹粒子 N_g 及射弹碎片粒子 N_f 的多重数。有关粒子分类及事例分类参见文献[20, 22]。

3 实验结果分析

3.1 α 射弹碎片多重数分布

在 1664 个非弹核作用事例中, 1136 个事例为半中心事例或边缘碰撞事例, 占总核作用事例的 68.3%。在 1136 个非中心作用事例中, 有 729 个事例含有至少一个 α 射弹碎片。按照不同 α 射弹碎片多重数把核反应分为不同道, 不同 α 碎片反应道下的截面见表 1。表中同时给出 60, 200AGeV ^{16}O 与 G5 乳胶作用的实验结果^[13]。表中 σ_c 为中心碰撞反应截面; σ_p 为边缘碰撞反应截面, σ_{n_a} 为边缘碰撞中 $N_a = n$ (n 为 α 粒子数) 的反应道的分截面。由表中结果可以看出, 在两个能区各种反应道下核反应截面在实验误差范围内基本相同, 且各种反应道所占的比例(括号中所列结果)也基本相同。

表 1 不同 N_a 反应道下的反应截面 σ_{n_a} 及中心和边缘作用截面 σ_c, σ_p (mb)

	200 A GeV ^[13]	60 A GeV ^[13]	60 A GeV(本工作)
σ_c	$348 \pm 33(31.6\%)$	$301 \pm 24(30.4\%)$	$294 \pm 18(31.7\%)$
σ_p	$754 \pm 49(68.4\%)$	$690 \pm 37(69.6\%)$	$632 \pm 19(68.3\%)$
σ_{n_a}	$406 \pm 36(36.8\%)$	$369 \pm 27(37.2\%)$	$404 \pm 15(43.8\%)$
σ_{0_a}	$348 \pm 33(31.6\%)$	$321 \pm 25(32.4\%)$	$228 \pm 11(24.6\%)$
σ_{1_a}	$238 \pm 28(21.6\%)$	$201 \pm 14(20.3\%)$	$225 \pm 11(24.3\%)$
σ_{2_a}	$103 \pm 18(9.4\%)$	$102 \pm 14(10.3\%)$	$127 \pm 8(13.7\%)$
σ_{3_a}	$61 \pm 14(5.6\%)$	$66 \pm 11(6.6\%)$	$50 \pm 5(5.4\%)$
σ_{4_a}			$4 \pm 1(0.4\%)$

对于 α 射弹碎片多重数分布, 现有实验结果表明它们服从 KNO 标度无关规律, 即多重数分布

$$\Psi(Z) = \langle N_a \rangle \sigma_{n_a} / \sigma_{in-el} \quad (1)$$

随变量 $Z = N_a / \langle N_a \rangle$ 的变化与射弹能量和质量无关, 服从一致的分布规律

$$\Psi(Z) = AZ \exp(-BZ), \quad (2)$$

这里的 N_a 为 α 射弹碎片多重数; $\langle N_a \rangle$ 为所有发射 α 射弹碎片非弹作用事例的平均多重数; A 和 B 为常数, 由实验结果拟合得出。

图 1 给出 60,200 A GeV ¹⁶O-Em 非弹作用 α 射弹碎片多重数分布 Ψ(Z) 随 Z 的变化规律. 利用公式(2)由最小 χ² 拟合实验结果得到 A = 1.77, B = 1.93, 拟合条件 χ²_{min}/d.o.f. = 0.001. 由图 1 所示拟合结果可知, 多重数分布可以很好地利用 Ψ(Z) = 1.77 Z exp(-1.93 Z) 来描述, 且与束流能量无关, 即 α 射弹多重数分布 Ψ(Z) 服从 KNO 标度无关规律.

高能核-核作用末态产生粒子的多重数分布也可以用多重数各阶矩分布来描述. 各阶矩为

$$C_q = \langle N^q \rangle / \langle N \rangle^q = \langle Z^q \rangle = \int Z^q \Psi(Z) dZ. \quad (3)$$

如果分布满足 KNO 标度无关性, 则各阶矩 C_q 与束流能量无关. 表 2 给出 60 A GeV ¹⁶O 诱发乳胶核反应射弹 α 碎片的平均多重数和各阶矩 C_q (q = 2, 3, 4, 5), 表中同时给出文献[13]中的实验结果. 由表中所列结果得出, C₂ 矩与射弹能量和质量无关; 而高阶矩随射弹质量数 A 的增加缓慢增加; 对于相同射弹, 高阶矩与束流能量无关.

表 2 α 射弹碎片平均多重数及各阶矩

束流	能量 (A GeV)	文献	$\langle N_a \rangle$	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
¹⁶ O	60	本工作	1.59 ± 0.03	1.21 ± 0.003	1.74 ± 0.007	2.82 ± 0.01	4.96 ± 0.02
¹⁶ O	60	[13]	1.62 ± 0.10	1.23 ± 0.07	1.77 ± 0.11	2.85 ± 0.17	4.88 ± 0.29
¹⁶ O	200	[13]	1.60 ± 0.15	1.22 ± 0.11	1.74 ± 0.16	2.76 ± 0.26	4.64 ± 0.43
³² S	200	[13]	1.74 ± 0.10	1.35 ± 0.08	2.36 ± 0.13	5.03 ± 0.28	12.19 ± 0.68
⁵⁶ Fe	1.9	[13]	2.53 ± 0.09	1.34 ± 0.05	2.21 ± 0.08	4.31 ± 0.16	9.57 ± 0.35
⁸⁴ Kr	1.5	[13]	2.91 ± 0.08	1.39 ± 0.04	2.40 ± 0.07	4.87 ± 0.14	11.14 ± 0.32

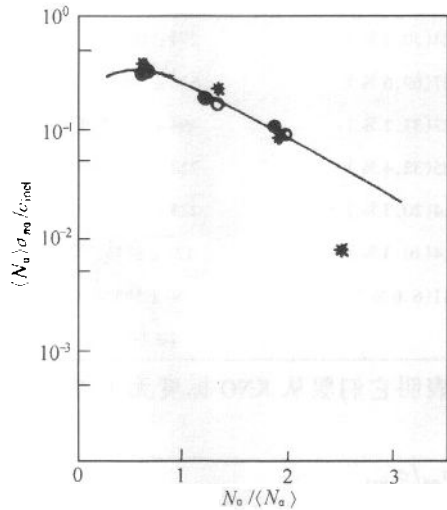


图 1 ¹⁶O-Em 作用射弹 α 碎片 $\langle N_a \rangle \sigma_{na} / \sigma_{inel}$ 随 $N_a / \langle N_a \rangle$ 的变化
* 本工作结果; ○、● 分别为 60,200 A GeV ¹⁶O-Em 作用结果^[13].

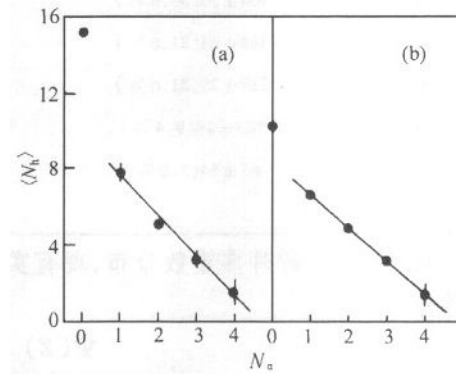


图 2 靶核碎片平均多重数 $\langle N_b \rangle$ 随 N_a 的变化
(a) $N_t = 0$; (b) $N_t \ge 0$.

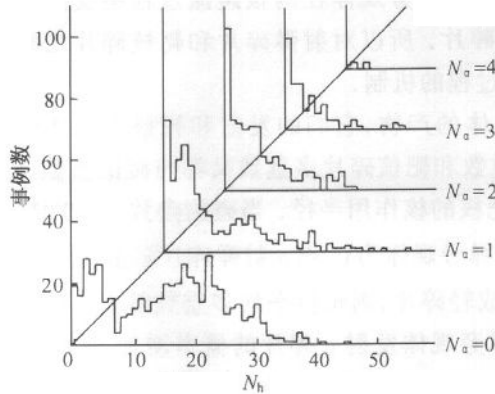
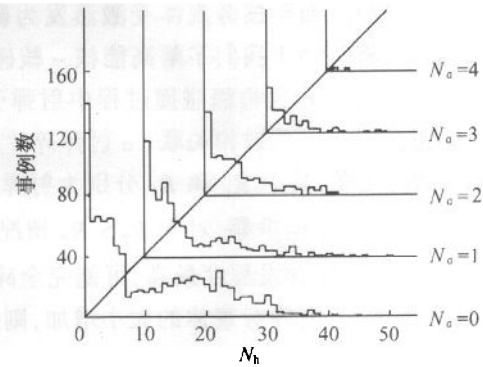
3.2 α 射弹碎片与靶核碎片的关联

对于高能核-核碰撞过程,从碰撞几何角度出发(即从核作用几何模型出发),碰撞系统分为两部分:碰撞两核相互重叠的区域称为反应体;碰撞两核相互不重叠的部分称为旁观体,旁观体又分为射弹旁观体和靶核旁观体.射弹旁观体在两核碰撞过程中受激而碎裂成射弹碎片,而靶核旁观体受激蒸发为靶核碎片.所以对射弹碎片和靶核碎片之间关联的研究,将有助于我们了解高能核-核碰撞过程的机制.

α 射弹碎片作为边缘碰撞过程中射弹旁观体的产物,它们的发射和靶核旁观体的大小,即靶核碎片多重数相关联. α 射弹碎片多重数和靶核碎片多重数又都与碰撞参数 $b \leq (R_p + R_T)$ 关联,其中 R_p 和 R_T 分别为射弹和靶核的核作用半径.当碰撞参数 $b = 0$ 时,相互碰撞的两核完全重叠,对于 $R_T > R_p$ 情况,射弹旁观体为 0,则 α 射弹碎片多重数为 0,此时靶核旁观体受激发程度最高,可能完全碎裂成轻碎片,则靶核平均多重数最大.随碰撞参数 b 的增加,射弹旁观体的大小增加,则射弹旁观体发射 α 碎片的概率增加,此时靶核旁观体受激程度随 b 的增加而减弱,从而靶核碎片多重数 N_b 减小.为了进一步研究 α 碎片与靶核碎片发射的联系,对 60AGeV ^{16}O -Em 作用 α 射弹碎片与靶核碎片发射的关联进行了研究,其结果见表 3.表中 N_i 为电荷数 $Z \geq 3$ 的射弹碎片数.由表中所给实验结果可知,不论对于 $N_i = 0$,还是 $N_i \neq 0$ 情况,靶核碎片平均多重数 $\langle N_b \rangle$ 随 N_i 的增加而减小.对于 $N_i = 0$ 情况,由于射弹碎片除 α 碎片之外再没有其他较重的碎片,所以和 $N_i > 0$ 情况相比,在相同 α 射弹碎片下,射弹旁观体相对较小,则碰撞过程中两核相互重叠部分较多,即碰撞比较剧烈,所以靶核受激程度较高,则产生的靶核碎片也较多($N_b = 1, N_b = 2$ 情况).由于射弹核本身大小的限制,在 α 射弹碎片数 $N_i > 2$ 情况下,射弹旁观体再无法产生比 α 射弹碎片较重的碎片,所以在 $N_i = 3, 4$ 两种情况下,靶核碎片平均多重数 $\langle N_b \rangle$ 对于 $N_i = 0$ 和 $N_i \geq 0$ 是相同的.图 2 分别给出 $N_i = 0$ 和 $N_i \geq 0$ 情况下靶核碎片平均多重数 $\langle N_b \rangle$ 随 N_i 的变化关系.对于 $N_i \geq 1, N_i = 0$ 情况, $\langle N_b \rangle$ 随 N_i 的增加线性减小,利用最小二乘法拟合实验结果得到 $\langle N_b \rangle = 9.64 - 2.06N_i$;而对于 $N_i \geq 1, N_i \geq 0$ 情况,拟合结果为 $\langle N_b \rangle = 8.44 - 1.70N_i$.

图 3 给出 $N_i = 0$,不同 N_i 下靶核碎片多重数分布;对于 $N_i \geq 0$,不同 N_i 下靶核碎片多重数分布如图 4 所示.由两图 N_b 分布可知,随 N_i 的增加, N_b 多重数分布变窄,分布峰值向 N_b 减小的方向移动,即随射弹旁观体的增加,靶核受激程度减小,靶核碎片平均多重数减小.对于 $N_i = 0, N_i = 0$ 情况, N_b 分布比较平坦,此时射弹旁观体的大小基本为零,碰撞为完全对心碰撞,所以靶核受激程度最高,则平均而言产生的靶核碎片数 $\langle N_b \rangle$ 也最高.对于 $N_i = 0, N_i > 0$ 情况,射弹旁观体的大小不为零,其产生比 α 碎片较重的碎片,此时相应于氧核和乳胶核的边缘碰撞,所以靶核受激程度较低,产生的蒸发碎片也较少.对于 $N_i = 0, N_i \geq 0$, N_b 多重数分布将在 $N_i = 0, N_i = 0$ 的基础上迭加大量的低 N_b 事例.对于 $N_i = 1, 2, N_i = 0$ 情况,射弹旁观体的大小随 N_i 的增加而增加,而靶核旁观体的受激程度随 N_i 的增加而减少, N_b 较大的事例数随 N_i 的增加而减小,则 $\langle N_b \rangle$ 随 N_i 的增加而减

小. 对于 $N_\alpha = 1, 2, N_f \geq 0$ 情况, 由于 $N_f \neq 0$ 事例的加入, 和 $N_\alpha = 1, 2, N_f = 0$ 情况相比, 在相同 N_α 下, 射弹旁观体较大的事例数增加, 即靶核受激程度较小的事例数增加, 所以 $\langle N_h \rangle$ 减小. 对于 $N_\alpha = 3, 4$ 情况, 由于射弹核本身大小的限制, 射弹旁观体无法再产生比 α 较重的碎片, 所以 N_h 分布对于 $N_f = 0$ 和 $N_f \geq 0$ 是相同的.

图 3 $N_f = 0$ 下靶核碎片多重数分布图 4 $N_f \geq 0$ 下靶核碎片多重数分布表 3 靶核碎片平均多重数随 α 射弹碎片数的变化

N_α	$N_f = 0$	$\langle N_h \rangle$ $N_f > 0$	$N_f \geq 0$
0	15.27 ± 0.42	4.27 ± 0.27	10.38 ± 0.32
1	7.86 ± 0.44	2.93 ± 0.41	6.70 ± 0.37
2	5.16 ± 0.34	3.42 ± 0.78	5.08 ± 0.33
3	3.34 ± 0.40		3.34 ± 0.40
4	1.60 ± 0.60		1.60 ± 0.60

4 结论

对于相对论性重离子碰撞中 α 射弹碎片的发射及其与靶核碎片多重数关联的研究, 可以不仅帮助我们了解相对论性重离子碰撞中射弹和靶核碎裂的机制, 而且可以帮助我们进一步了解高能核-核作用的信息. 通过对 60A GeV ^{16}O -Em 作用射弹 α 碎片多重数分布及其与靶核碎片多重数关联的研究得到:

1) 射弹 α 碎片多重数分布服从 KNO 标度无关性, 这一点可由多重数分布矩的能量无关性得到进一步证实.

2) 射弹 α 碎片的发射同靶核碎片的发射存在线性关联, 靶核碎片平均多重数随射弹 α 碎片数的增加而线性减少.

参考文献 (References)

- 1 Kim Y D, Tsang M B, Gebelke C K et al. Phys. Rev. Lett., 1989, 63:494
- 2 Blumenfeld X, Colonna N, Roussel-Chomaz P et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 66:576

- 3 Piasecki E, Bresson S, Lott B, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**:1281
- 4 Bowman D R, Peaslee G F, Souza R T et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**:1527
- 5 Oligive C A, Adloff J C, Begemann-Blaich M et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**:1214
- 6 Hagel K, Gomin M, Wada R et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **68**:2141
- 7 Hubele J, Krentz P, Alodf J C et al. Z. Phys., 1991, **A340**:263
- 8 Hubele J, Krentz P, Lindenstruth V et al. Phys. Rev., 1992, **C46**:R1577
- 9 Aggarwal M M, Bhalla K B, Das G et al. Phys. Rev., 1983, **C27**:640
- 10 Aggarwal M M, Jain P L. Phys. Rev., 1985, **C31**:1233
- 11 Golde M, Singh G, Jain P L et al. Z. Phys., 1993, **344**:291
- 12 Cherry M L, Dabrowska A, Delnes-Jonese P et al. Z. Phys., 1997, **C73**:449
- 13 Sengupta K, Singh G, Jain P L. Phys. Lett., 1989, **B222**:301
- 14 Singh G, Jain P L. Z. Phys., 1984, **A348**:99
- 15 Adamovich M I, Aggarwal M M, Arora R et al (EMU01 Collab.). Phys. Rev., 1989, **C40**:66
- 16 Adamovich M I, Aggarwal M M, Alexandrov Y A et al (EMU01 Collab.). Phys. Lett., 1994, **B338**:397; 1997, **B390**:445
- 17 Koba Z, Nielsen B, Ollesen P. Nucl. Phys., 1972, **B40**:317
- 18 Bhalla K B et al. Nucl. Phys., 1981, **A367**:446
- 19 Krasnov S A et al. J. of. Nucl. Phys., 1988, **47**:949
- 20 ZHANG Dong-Hai, SUN Han-Cheng. Acta Physica Sinica, 2000, **49**:1938 (in Chinese)
(张东海,孙汉城. 物理学报, 2000, **49**:1938)
- 21 ZHANG Dong-Hai, SUN Han-Cheng, G. Gharibi, Chinese Physics, 2001, **10**:21
- 22 ZHANG Dong-Hai, SUN Han-Cheng. HEP&NP, 2001, **25**:651 (in Chinese)
(张东海,孙汉城. 高能物理与核物理, 2001, **25**:651)

Production of Helium Projectile Fragments in ^{16}O -Emulsion Collisions at 60 A GeV*

ZHANG Dong-Hai¹⁾

(Department of Physics, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China)

Abstract Production of helium projectile fragments in ^{16}O -emulsion interactions at 60 A GeV is investigated. The total charge changing and partial production cross-sections are measured experimentally on the basis of helium multiplicity. The multiplicity distribution of helium projectile fragments obeys a KNO scaling. In the peripheral collision of ^{16}O at 60 A GeV in nuclear emulsion, the production of target fragments depends on the multiplicity of helium projectile fragments linearly. The average multiplicity of target fragments decreases with the increasing of the number of helium projectile fragments which can be well explained by the model of participant-spectator (the nuclear geometric model) of nucleus-nucleus interactions.

Key words projectile fragments, target fragments, fragmentation

Received 15 February 2001

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

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