

文章编号: 1007-4627(2013)01-0022-04

500 A MeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应弹核碎裂研究

李俊生, 张东海, 李惠玲

(山西师范大学现代物理研究所, 山西 临汾 041004)

摘要: 通过利用日本放射线医学综合研究所(NIRS)重离子医用加速器(HIMAC)产生的束流照射国产的核-4型原子核乳胶, 对500 A MeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应粒子产生进行了研究。讨论了500 A MeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应弹核碎片的多重数分布, 并与其他结果进行了比较。结果表明, 弹核碎片平均多重数随靶核质量的增加而增加, 与入射能量无关。

关键词: 原子核乳胶; 弹核碎片; 多重数

中图分类号: O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.022

1 引言

中高能核-核碰撞是目前粒子物理和原子核物理的前沿问题, 通过对中高能核-核碰撞中产生的末态粒子的研究, 可以揭示核反应机制, 进一步了解液气相变过程。在中高能核-核碰撞中, 核物质的压缩和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。通过对原子核多重碎裂的研究, 可以进一步解决有关宇宙线的产生与传播和利用重离子进行癌症诊治中的一些问题^[1-3]。

原子核乳胶是一种空间分辨率极高的固体核径迹探测器, 且可以记录相互作用事例的完整图像。因而, 原子核乳胶被广泛应用于中高能核-核碰撞研究。

在过去的30多年里, 人们利用加速器产生的不同能量重离子诱发核反应^[4-24], 研究重离子多重碎裂中的一般特征, 得到了许多有意义的结果, 为研究核物态方程、液气相变等问题提供了实验依据。同时, 在理论上也提出了一些模型^[25-28], 对中高能重离子碰撞过程进行了描述。然而, 100~1000 MeV 能区重离子诱发乳胶核反应的实验结果较少, 各种模型也只能在一定条件下解释实验现象。因此, 为完善中高能核反应理论, 有必要对这一能区的重离子诱发核反应进行全面的实验研究。

本文对500 A MeV的 ^{56}Fe 诱发乳胶核反应产生的

弹核碎片的多重数分布进行了研究, 并与其他实验结果进行了比较。

2 实验描述

本文所用乳胶叠为国产核-4型原子核乳胶, 在日本放射线医学综合研究所(NIRS)的重离子医用加速器(HIMAC)上用500 A MeV的 ^{56}Fe 束流沿平行于乳胶平面的方向照射。利用重光BA2000型生物研究显微镜对核作用事例进行了沿径迹扫描, 扫描物镜为100倍浸油镜头, 目镜放大倍数为10倍。

根据核乳胶技术的惯例, 我们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^[22]:

(1) 簇射粒子, 也称极小电离粒子。对应能量大于70 MeV的 π 介子及能量大于400 MeV的质子。簇射粒子多重数用 N_s 表示。

(2) 灰径迹粒子, 其多重数用 N_g 表示。主要来源于靶核内的反冲质子, 其速度为 $0.3c \leq v < 0.7c$, 其动能为 $26 \text{ MeV} < E_k \leq 375 \text{ MeV}$ 。灰径迹粒子在核乳胶中的电离本领为 $1.4 I_{\min} < I \leq 9 I_{\min}$, I_{\min} 表示最小电离本领。灰径迹粒子在核乳胶中的射程为 $L > 3 \text{ mm}$ 。

(3) 黑径迹粒子, 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, 在核乳胶中的电离本

收稿日期: 2012-07-30 修改日期: 2012-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10675077, 10975095, 11075100); 山西省自然科学基金资助项目(2008011005, 2011011001-2); 山西省留学回国人员科研项目(2011-058); 山西省软科学项目(2012041065-03)

作者简介: 李俊生(1977-), 男, 河北三河人, 副教授, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: jsli@yahoo.cn

<http://www.npr.ac.cn>

径迹长度 $I > 9I_{\min}$, 射程 $L < 3 \text{ mm}$ 。

灰径迹粒子和黑径迹粒子通称为重电离粒子(或慢粒子), 其多重数为 $N_h = N_g + N_b$ 。

(4) 弹核碎片粒子, 用 N_f 表示。弹核碎片粒子为没有发生碰撞的弹核粒子剩余物, 其发射角 $\theta \leq 200/p$, θ 的单位为 rad, 其中, p 为弹核粒子的动量, 单位为 MeV/c。

弹核碎片粒子电荷的测定, 采用颗粒密度法和 δ 电子密度法, 对于 $Z = 1$ 和 $Z = 2$ 的碎片, 因径迹上颗粒较少, 便于计数, 采用颗粒密度法; 对于 $Z \geq 3$ 的碎片, 因颗粒太密, 无法数清, 采用 δ 电子密度法。

3 结果与讨论

扫描 ^{56}Fe 径迹总长度 11218.61 cm, 共扫描

到 1421 个作用事例, 其中弹性作用事例 54 个, 非弹作用事例 1367 个。对其中的 1276 个非弹作用事例进行了测量, 利用重电离粒子数对反应事例进行分类, Fe+H 反应事例 ($N_h = 0, 1$) 178 个, Fe+CNO 反应事例 ($2 \leq N_h \leq 7$) 540 个, Fe+AgBr 反应事例 ($N_h \geq 8$) 558 个。

表 1 列出了 500 AMeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应非弹作用平均自由程, 同时列出 390 AMeV $^{20}\text{Ne}^{[23]}$, 480 AMeV $^{40}\text{Ar}^{[23]}$, 583 AMeV $^{56}\text{Fe}^{[24]}$ 和 1.9 AGeV $^{56}\text{Fe}^{[24]}$ 诱发乳胶核反应的实验结果。从表 1 可以看出, 在中高能重离子诱发乳胶核反应中, 在较低的能量区间, 弹核平均自由程随入射能量的增加而减小, 当能量达到一定程度, 弹核平均自由程趋于一个常数。

表 1 中高能重离子诱发乳胶核反应弹核平均自由程

弹核	390 AMeV $^{20}\text{Ne}^{[23]}$	480 AMeV $^{40}\text{Ar}^{[23]}$	500 AMeV ^{56}Fe	583 AMeV $^{56}\text{Fe}^{[24]}$	1.9 AGeV $^{56}\text{Fe}^{[24]}$
平均自由程/cm	11.9±0.58	10.07±0.57	8.21±0.22	8.19±0.58	8.3±0.2

表 2 ^{56}Fe -Em 反应弹核碎片平均多重数

能量	碎片电荷	$\langle N_z \rangle$			
		Fe-H	Fe-CNO	Fe-AgBr	Fe-Em
1.9 AGeV $^{[24]}$	1	2.35±0.17	3.00±0.13	3.24±0.09	3.03±0.06
	2	1.17±0.11	1.61±0.10	1.75±0.07	1.62±0.05
	3	0.06±0.03	0.11±0.02	0.17±0.02	0.13±0.01
	4		0.08±0.02	0.06±0.01	0.06±0.01
	5	0.02±0.01	0.05±0.01	0.05±0.01	0.04±0.01
	6		0.04±0.01	0.06±0.01	0.04±0.01
	7		0.04±0.01	0.06±0.01	0.05±0.01
	8		0.04±0.01	0.04±0.01	0.04±0.01
	≥ 9	0.98±0.01	0.64±0.03	0.26±0.02	0.49±0.02
500 AMeV	1	1.25±0.11	2.67±0.13	4.66±0.17	3.33±0.10
	2	0.46±0.05	1.20±0.07	1.72±0.08	1.32±0.05
	3	0.15±0.03	0.34±0.03	0.95±0.05	0.57±0.03
	4		0.14±0.02	0.52±0.03	0.29±0.02
	5	0.04±0.02	0.06±0.01	0.32±0.03	0.17±0.01
	6		0.04±0.01	0.18±0.02	0.10±0.01
	7		0.03±0.01	0.10±0.01	0.06±0.01
	8		0.03±0.01	0.08±0.01	0.04±0.01
	≥ 9	0.99±0.04	0.90±0.02	0.54±0.03	0.76±0.02

表 2 列出了 500 AMeV ^{56}Fe -Em 反应不同作用类型中, 各种弹核碎片的平均多重数; 作为比较, 表 2 中同时列出了 1.9 AGeV ^{56}Fe -Em 作用的实验结果。从表 2 可以看出: (1) 两种能量下, 弹核碎片平均多重数随碎片电荷的变化趋势相同, $Z=1$ 和 $Z=2$ 的碎片最

多; (2) 弹核碎片平均多重数随靶核质量的增加而增加, 表现出能量无关性。弹核碎片由弹核旁观体受激碎裂而成, 随着靶核质量的增加, 参与反应的核子数增加, 受激发的旁观体中沉积的能量随之增加, 弹核碎裂程度亦随之增加。

图 1 给出了 500 AMeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应不同作用类型中 $Z_f \geq 2$ 弹核碎片的多重数分布。从图 1 可以看出, Fe+H 和 Fe+CNO 反应中, 不同弹核碎片多重数事例出现的相对概率随 N_f 值的增加而逐渐减小; Fe+AgBr 反应中, 不同弹核碎片多重数事例出现的相对概率随 N_f 值的增加先增加再减小, 在 $N_f=5$ 处达到最大, 即弹核碎裂为 5 个碎片的事例概率是最大的。

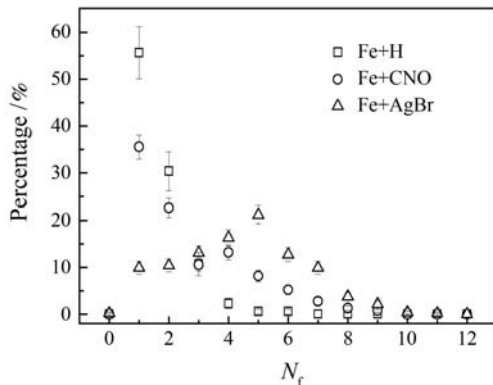


图 1 500 AMeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应弹核碎片多重数分布
 □ 500 AMeV $^{56}\text{Fe}+\text{H}$, ○ 500 AMeV $^{56}\text{Fe}+\text{CNO}$, △ 500 AMeV $^{56}\text{Fe}+\text{AgBr}$ 。

4 结论

实验研究了 500 AMeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应中的一些统计结果和弹核碎片的多重数分布, 并与不同能量重离子诱发乳胶核反应的实验结果进行了比较, 得出以下结论:

(1) 在中高能重离子诱发乳胶核反应中, 在较低的能量区间, 弹核平均自由程随入射能量的增加而减小。当能量达到一定程度, 弹核平均自由程趋于一个常数。

(2) 500 AMeV ^{56}Fe 弹核碎片平均多重数随碎片电荷的变化趋势与 1.9 AGeV ^{56}Fe 诱发乳胶核反应的实验结果相同, 且弹核碎片平均多重数随靶核质量的增加而增加, 表现出能量无关性, 说明弹核碎裂程度与参与反应核子数有关。

(3) 不同弹核碎片多重数的事例数在不同反应类型中所占的比率表现出不同的变化趋势, 尤其是低多重数事例, 与靶核质量有较强的关系, 这也可以解释为由于参与反应的核子数不同而造成的。

参考文献 (References):

[1] ZEITLIN C, SIHVER L, LA TESSA C, *et al.* Radiat Meas, 2008, **43**: 1242.

[2] IANCU G, FLESCH F, HEINRICH W. Radiat Meas, 2005, **39**: 525.

[3] YE Fei, LI Qiang. Nuclear Physics Review, 2010, **27**(3): 309(in Chinese).
(叶飞, 李强. 原子核物理评论, 2010, **27**(3): 309.)

[4] ADAMOVICH M I, AGGARWAL M M, ALEXANDROV Y A, *et al* (EMU01 Collaboration). Phys Rev Lett, 1992, **69**: 745.

[5] BARRETTE J, BELLWIED R, BENNETT S, *et al* (E814/E877 Collaboration). Phys Rev Lett, 1993, **70**: 2996.

[6] ADMOVICH M I, AGGARWAL M M, ALEXANDROV Y A, *et al* (EMU-01 Collaboration). Z Phys A, 1995, **351**: 311.

[7] EL-NADI M, EL-NAGDY M S, ABDELSALAM A, *et al.* J Phys G, 1998, **24**: 2265.

[8] EL-NADI M, EL-NAGDY M S, ALI-MOSSA N, *et al.* J Phys G, 1999, **25**: 1169.

[9] ZHANG Donghai. Chin Phys, 2002, **11**: 1254.

[10] WU Fengjuan, ZHANG Donghai, LI Junsheng, *et al.* Chin Phys, 2004, **13**: 646.

[11] LI Junsheng, ZHANG Donghai, LI Zhenyu, *et al.* Chin Phys, 2004, **13**: 836.

[12] EL-NAGDY M S, ABDELSALAM A, ALI-MOSSA N, *et al.* Nucl Phys A, 2004, **730**: 419.

[13] GHOSH D, DEB A, HALDAR P K, *et al.* Astroparticle Physics, 2007, **27**: 127.

[14] DHOSH D, DEB A, DUTTA S. Phys Scripta, 2007, **75**: 676.

[15] ISLAM S, HASAN R. J Phys G, 2007, **34**: 779.

[16] AHMAD S, AHMAD M A, Nucl Phys A, 2007, **789**: 298.

[17] LI Huiling, ZHANG Donghai, LI Junsheng. Chin Phys C, 2009, **33**: 521.

[18] AHMAD N, SHAKEEL A, KHAN M M, *et al.* Int J Mod Phys E, 2008, **17**: 707.

[19] KHAN M M, AHMAD S, AHMAD N, *et al.* Int J Mod Phys E, 2010, **19**: 2219.

[20] GHOSH M K, HALDAR P K, MANNA S K, *et al.* Nucl Phys A, 2011, **858**: 67.

[21] BELASHEV B Z, SULEYMANOV M K, VOKAL S, *et al.* Chin Phys C, 2011, **35**: 1095.

[22] LI Junsheng, ZHANG Donghai. HEP & NP, 2006, **30**(5): 398 (in Chinese).
(李俊生, 张东海. 高能物理与核物理, 2006, **30**(5): 398.)

[23] DUDKIN V E, KOVALEV E E, NEFEDOV N A, *et al.* Nucl Phys A, 1994, **568**: 906.

[24] AZIMOV S A, CHEMOV G M, GARPMAN S, *et al.* Nucl Phys A, 1987, **470**: 653.

[25] XIE Wenjie. Nuclear Physics Review, 2012, **29**(1): 36.

[26] LÜ Qiwen, WEI Huarong, RAHIM M A, *et al.* Nuclear Physics Review, 2012, **29**(1): 25.

- [27] LOU Xiaohui, JIANG Zhijin, LI Qingguang. Nuclear Physics Review, 2012, **29**(1): 52(in Chinese).
(娄小辉, 姜志进, 李庆广. 原子核物理评论, 2012, **29**(1): 52.)
- [28] SU Jun, ZHANG Fengshou, BIAN Baoan. Phys Rev C, 2011, **83**: 014608.

Investigation of Projectile Fragments in ^{56}Fe Induced Nuclear Reactions in Nuclear Emulsion at 500 AMeV

LI Jun-sheng¹⁾, ZHANG Dong-hai, LI Hui-ling

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

Abstract: A stack of domestic N-4 nuclear emulsion was exposed to ^{56}Fe ions at 500 AMeV at the HIMAC of NIRS. Particle production was investigated in ^{56}Fe -Em interactions. The multiplicity distribution of projectile fragments was given in this paper and compared with other experimental results of heavy ion induced nuclear reactions in nuclear emulsion. The results show that the multiplicity of projectile fragments increase with the increasing target mass, and there is no dependence on the projectile energy.

Key words: nuclear emulsion; projectile fragment; multiplicity

Received date: 30 Jul. 2012; **Revised date:** 17 Sep. 2012

Foundation item: National Nature Science Foundation of China(10675077, 10975095, 11075100); Natural Science Foundation of Shanxi Province(2008011005, 2011011001-2); Shanxi Province Foundation for Returness(2011-058); Soft Science Project of Shanxi Province(2012041065-03)

1) E-mail: jsli@yahoo.cn

<http://www.npr.ac.cn>