

BNL/AGS 10.7 A GeV 金核诱发作用中 核碎裂与粒子产生*

EMU-01 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. Ganssaug¹², 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. Mittra⁴, 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. Roeper¹², 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^{11,19}, 王晓荣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

1 (Alma Ata, Inst. of High Energy Physics, Kazakhstan)

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 (湖南教育学院物理系 长沙 410012)

6 (Duban, JINR, Russia)

* 国家自然科学基金、国家教委基金、瑞典 NFR、International Seminar in Uppsala、联邦德国 Minister of Research and Technology、第三世界科学院 TWRG、印度 Department of University Grants Commission、美国 DOE 和 NSF 的资助。

- 7 (Jaipur, University of Rajasthan, India)
- 8 (Jammu, University of Jammu, India)
- 9 (Kosice, Safarik University, Slovakia)
- 10 (山西师范大学物理系 临汾 041004)
- 11 (Lund, University of Lund, Sweden)
- 12 (Marburg, Philipps University, Germany)
- 13 (Moscow, Lebedev Institute, Russia)
- 14 (Ottawa, NRC, Canada)
- 15 (St. Petersburg, V G Khlopin Radium Institute, Russia)
- 16 (Seattle, University of Washington, USA)
- 17 (Tashkent, Institute of Nuclear Physics, Uzbekistan)
- 18 (Tashkent, Physical-Technical Institute, Uzbekistan)
- 19 (华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430070)
- 20 (Yerevan, Physical Institute, Armenia)

1994-07-07 收稿

摘 要

研究了在美国 BNL/AGS 上能量 $10.7A$ GeV 的 ^{197}Au 离子诱发核作用, 报告了 EMU-01 国际合作实验关于射弹核碎裂和产生粒子密度等最新实验结果。

关键词 高能重离子诱发核作用, 射弹核的碎裂, 产生粒子密度。

1 引 言

为了寻找新的核物质形态, 如夸克-胶子等离子态, 自 1986 年以来在 BNL/AGS 和欧洲核子研究中心 (CERN) 的超级质子加速器 (SPS) 上, 已分别进行了多次大规模的高能重离子实验。EMU-01 国际合作实验采用原子核乳胶的常规叠型和特殊室型两种类型探测器, 分别于 1992 年和 1993 年作了两次重要的曝光实验^[1,2] (E863 实验)。关于对这种新核物质形态不懈的探测, 也将促进对于含有大量粒子产生的软过程的更深刻了解。尽管现存的一些唯象模型, 亦可相当成功地描述目前实验数据的一些特征, 理论研究仍表明, 当碰撞能量和碰撞核质量继续增大时, 有可能出现性质上很不相同的现象。在目前能区 ($10 \leq E_{\text{b.e.m}} \leq 200A$ GeV), 对于较轻的射弹核 ($A_{\text{b.e.m}} \leq 32$), 非线性效应还可以忽略不计。但是当碰撞核质量和碰撞能量增加时, 这一效应就会变得相当重要。

到目前为止, 我们特别关注的主要有两个方面, 即非常猛烈的核-核碰撞中射弹核的碎裂和产生粒子的密度。目前实验中关于 ^{197}Au 核与乳胶核相互作用的性质的测量, 不仅可以同那些较轻核 (^{16}O 、 ^{28}Si 和 ^{32}S 等) 在不同能量下与乳胶核相互作用中所外推的性质相比较^[3], 而且还可以同 Waddington 等^[4]所报道的较低能量下 (LBL/BEVATRON 能区) 金核与乳胶核相互作用的结果相比较。

本文将公布在 BNL/AGS 能区采用核乳胶探测技术所观察到的射弹 ^{197}Au 核与 Au 和 Ag 等不同靶核的中心作用事例的数据, 特别是有关射弹核碎裂和产生粒子密度分布的一些最新结果。为了检测非线性效应, 对于这些分布及它们的起伏, 将采用上述较轻射弹核实验数据给出的线性外推作比较。尽管目前这方面的数据统计量有限, 但已初步表明:

射弹核碎片的平均多重数与能量近似无关;在中心碰撞中, ^{197}Au 核被完全打破, 并且几乎都是以 α 碎片的形式发射出来;产生粒子的密度及其起伏,在很大程度上依赖于从反应体发射产生粒子的随机性和反应体质子数目 Z 的起伏。

2 中心事例的挑选判据与相互作用平均自由程

在 EMU-01 (E863) 实验中,采用涂有一层很薄的金箔(约 $100\mu\text{m}$) 做靶的特别乳胶室,在 BNL/AGS 上作垂直曝光而获得 $\text{Au} + \text{Au}$ 相互作用的事例。这与 EMU-01 国际合作组自 1986 年以来成功使用的新型的核乳胶室探测技术相同 (EMU01, E815)。 $\text{Au} + \text{Ag}$ 相互作用的事例则仍采用老式的标准核乳胶叠探测技术得到。

关于中心事例的挑选判据,仍旧采用测量沿束流方向狭小的圆锥体中射弹核碎片电荷数目 Q_{ZD} 的估计方法。在目前的人射能量下,与赙快度值 3.65 所对应的圆锥张角为 2.98° 。此外,由于在核乳胶室探测器中装有靶箔,因此发射角大于 30° (即 $\eta < 1.32$) 的粒子径迹不测。

反应截面的能量依赖关系是利用常规核乳胶叠测量技术获得的。图 1 给出了本次实验 $10.7A \text{ GeV } ^{197}\text{Au}$ 核与乳胶核 (Em) 的相互作用平均自由程的测量结果,并与 Waddington 等^[4]在较低能区给出的相应结果作了比较。由图 1 可以看出,平均自由程 λ 呈现出近似能量无关性。由于在核乳胶叠中束流 ^{197}Au 离子的径迹非常粗,实验上很难测量那些只有少数几个粒子从射弹中放出来的“小相互作用”。因此,最小偏差的相互作用样本中缺少那些射弹核“小碎裂”的事例。

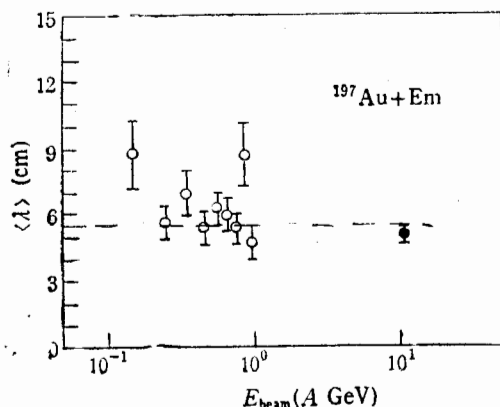


图 1 $^{197}\text{Au} + \text{Em}$ 相互作用平均自由程的能量关系
● 为 EMU-01 的实验结果, ○ 为文献[4]给出的实验结果。

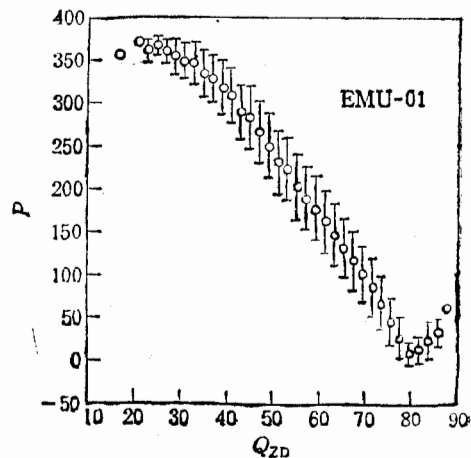


图 2 $\text{Au} + \text{Au}$ 作用的反应体核子数与 Q_{ZD} 的关系
FRITIOF 模拟的结果。

^{197}Au 离子在 BNL/AGS 上加速获得的束流能量为 $10.7A \text{ GeV}$, 相应的核子与核子的质心快度值为 $y_p/2 = 1.6$ 。束流离子的赙快度值为 $\eta_p = 3.29$, 比它的快度值 3.2

稍微大一点。在处理现有的固定靶实验数据时,发现赝快度分布非常接近于快度分布,至少对于 π 介子而言,主要差别是移动了 $1/4$ 个快度单位。采用 LUND-FRITIOF 模型的 Monte Carlo 产生器的计算作估计^[5], 它们的差别 $\epsilon = \langle \eta \rangle - \langle y \rangle \approx 0.24$ 。由此可以估计在对称碰撞中 η 分布峰的位置

$$\eta_{\text{peak}} = y_p/2 + \epsilon. \quad (1)$$

为了选择中心事例,测量向前方向的电荷 Q_{ZD} 。在 $10.7A$ GeV 的实验中,向前圆锥体的张角 $\theta_{Q_{\text{ZD}}}$ 为 2.98° 。 2.98° 的张角对应的赝快度值为 3.65。根据 FRITIOF 的核碰撞几何模型,图 2 中给出了 Au + Au 和 Au + Ag 反应中靶和射弹反应体的质子数目对于 Q_{ZD} 的依赖关系。

3 α 碎片的多重数与角分布

Waddington 等^[6]曾经研究了能量低于 $1A$ GeV ^{197}Au 核照射乳胶的相互作用。在较低的能量下, ^{197}Au 核有可能在核乳胶中减慢并停下来。他们发现在这样低的能量下, Au 核几乎不会破裂为如同核子和 α 那样的碎片末态,即使是同较重的 Ag 或 Br 靶核碰撞也是一样。在相互作用中仅有 $(1.3 \pm 0.1)\%$ 包含有 $Z < 3$ 的射弹碎片出现;而 50% 的事例,都分裂成两块、三块较重的核碎片。在我们的实验中,能量为 $10.7A$ GeV 的 Au + Au 相互作用事例中,约有 4% 的 Au 核几乎完全碎裂成为核子。Waddington 等在低能研究中还发现,碰撞末态发射出的 $Z \geq 3$ 核碎片的总电荷数 Z_f , 在能量 $0.1-0.9A$ GeV 能区中已表现出强烈的能量相关性。然而,我们的实验观察到,虽然 Z_f 随着能量的提高而减少,但 $Z \geq 3$ 核碎片的平均多重数 $\langle n_f \rangle$ 仍然是能量无关的。他们测得的 $\langle n_f \rangle = 2.02 \pm 0.27$, 与我们测得的 1.9 ± 0.1 接近。

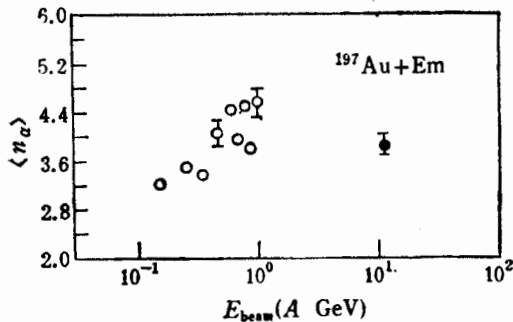


图 3 α 碎片的多重数的能量关系

● 为 EMU-01 的实验结果, ○ 为文献[4]给出的实验结果。

Waddington 等还测量了 α 碎片的多重数 n_α 。发现在 $0.1-0.9A$ GeV 能区内,平均值 $\langle n_\alpha \rangle$ 从 3.5 上升到 5.0,只有较弱的能量相关性。在图 3 中给出了我们的实验所测量的 α 碎片的平均多重数,与 Waddington 等低能区的数据作比较,测量结果仍在他们报道的数据范围内。

图 4(a) 是 EMU-01 实验测得的射弹 α 碎片发射角分布图。显然,该分布可以采用两个 Gauss 型分布结合起来作描写。将粒子的产额数值取对数,可采用 θ_α^2 的线性函数,如图 4(b) 所示。图 4 中给出了宽度 σ 值。如果只考虑一个 Gauss 分布,则取决于一个强烈的物理假设,即 α 碎片的发射源以与射弹核相同的速度运动。实验表明,分布尾部的 σ 值较大,这表示在反应体和旁观体的接触面之间有不能忽略的相互联系^[6]。这种联系使射弹核旁观体的碎片速度减慢下来。也就是说,关于核碎片发射源具有与射弹

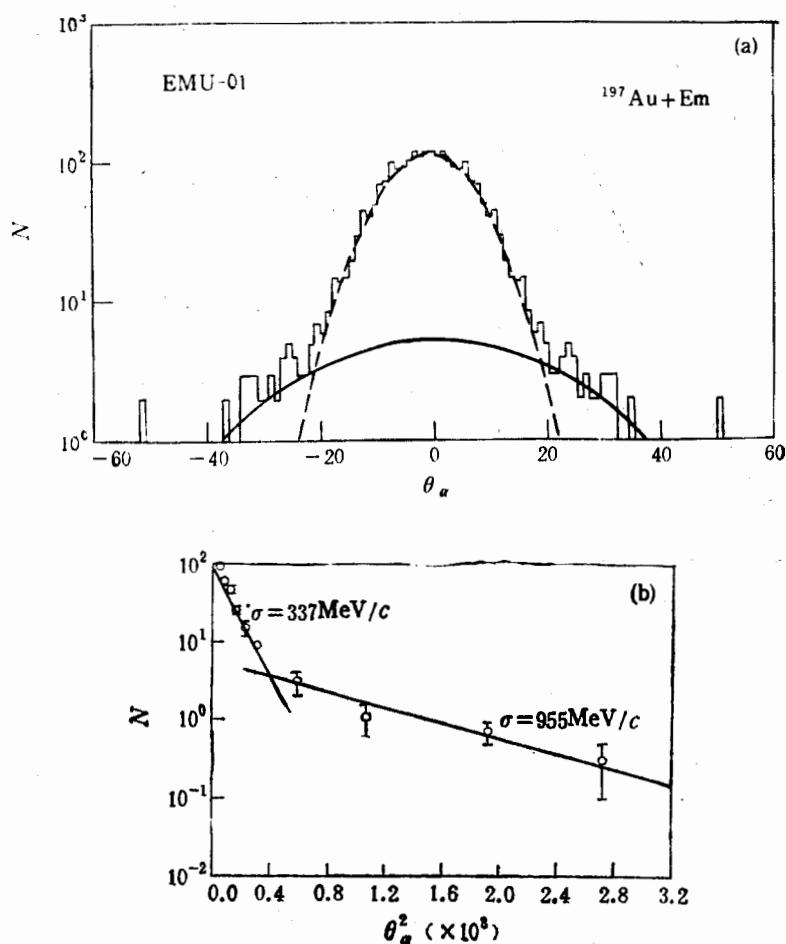


图 4 α 碎片的角分布

核相同速度的假设,与实验事实不符合。

4 较轻射弹核诱发作用的产生粒子特征

图 5 给出了 EMU-01 合作组在实验 (E815, EMU01) 中, 测量较轻射弹核 (^{16}O 、 ^{28}Si 、 ^{32}S) 诱发作用中的产生粒子谱得到的能量依赖关系 (采用最小无偏样本)。在该图中, 横坐标轴用束流能量所对应的 pp 碰撞的平均多重数 $\langle n_{pp} \rangle$ 代替, 纵坐标轴选用单位反应体核子数的产生粒子平均多重数 $\langle n_{AB} \rangle / P$ (P 是反应体的核子数目)。从图中看到, 相同入射能量下的不同碰撞体系的数据几乎落在一起, 与 $\langle n_{pp} \rangle$ 呈线性关系

$$\langle n_{AB} \rangle / P = a \langle n_{pp} \rangle + b, \quad (2)$$

式中, $a = 0.734$, $b = -1.44$ 。利用这个经验公式, 可以方便地通过反应体的核子数目估计, 来预言各种碰撞体系中的产生粒子平均多重数。对于 10.7A GeV 的 Au + Au 实验, 估计反应体的核子数 $P \approx 300$, 相应的 $\langle n_{AB} \rangle / P = 1.085$, 这样预计产生粒子总的平

均多重数为 325。这正好是在 Au + Au 中心事例的测量中得到的典型值。

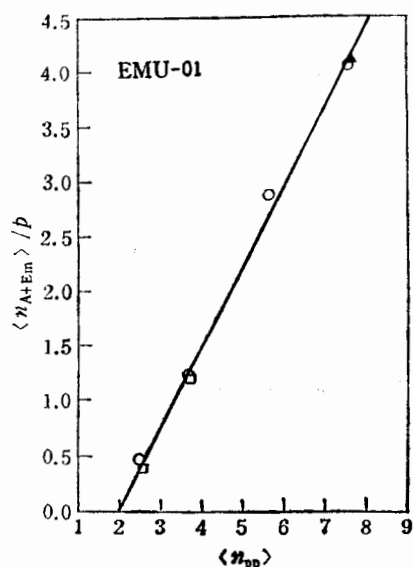


图5 核-核碰撞中单个反应体核子的产生粒子平均多重数与 pp 碰撞平均多重数的线性关系。

空心圆对应于 $^{16}\text{O} + \text{Em}$, 长方形对应于 $^{28}\text{Si} + \text{Em}$, 三角形对应于 $^{32}\text{S} + \text{Em}$ 。

对于不同能量下的各种碰撞体系, 曾采用 Gauss 型分布来拟合它们的产生粒子赝快度分布^[3]。图6给出了中心事例的产生粒子赝快度分布。在对实验数据采用 Gauss 曲线拟合时, 为了排除核碎片, 只选取了在 $0 \leq \eta \leq y_p$ 的快度区间, 并且只考虑 $\beta > 0.7$ 的簇射粒子。从 Gauss 分布中, 得到三个参数, 即峰的位置 η_{peak} , 峰的高度 ρ_{max} 以及分布的宽度 σ 。这些参数可以用来研究分布对能量、中心度以及碰撞体系大小的依赖关系。对于 Gauss 曲线表示的赝快度分布, 相应粒子总多重数由下式给出

$$n = \sqrt{2\pi} \sigma \rho_{\text{max}}. \quad (3)$$

图7中给出了不同子样本的 Gauss 拟合曲线的宽度。每个样本都按不同碰撞参数导致的不同中心度的范围来划分, 即射弹核中参加反应质子数目与射弹核质子数目之比 $Q_{\text{zd}}/Z_{\text{beam}}$ 。我们观察到, 对于给定的能量, Gauss

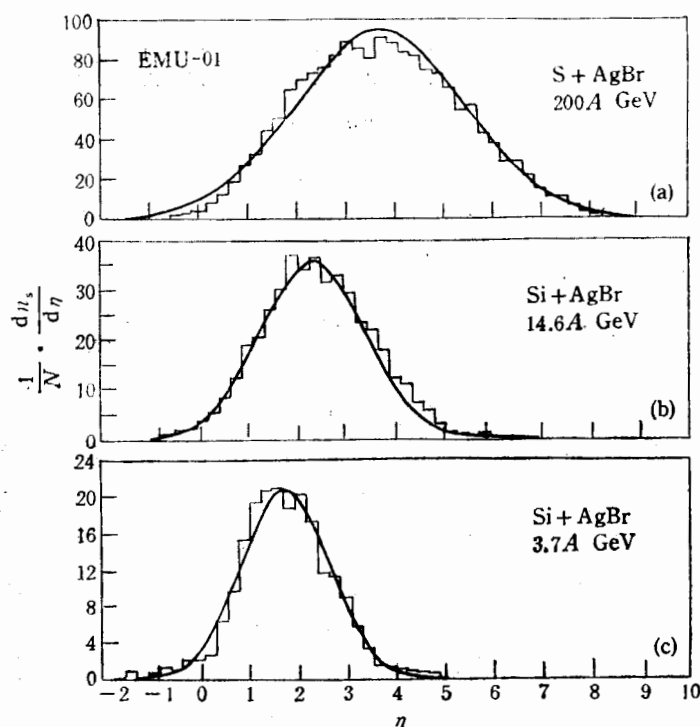


图6 中心事例的赝快度分布及其对应的 Gauss 曲线拟合

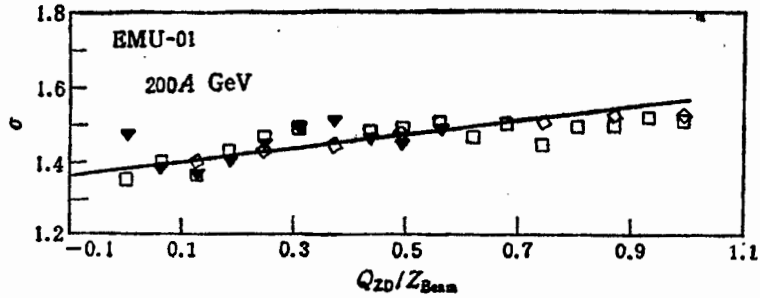


图 7 质快度分布宽度与碰撞中心度的关系
 三角形对应于 S + Au; 长方形对应于 S + Em; 菱形对应于 O + Em.

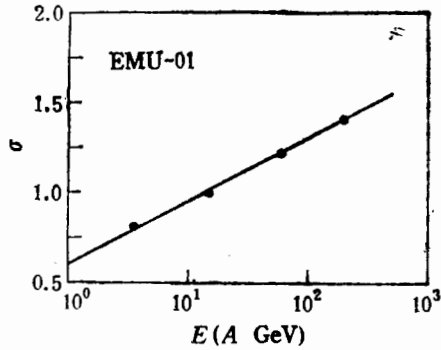


图 8 中心事例的质快度分布宽度的能量相关性

拟合曲线的宽度与碰撞体系的大小无关。从边缘碰撞 ($Q_{ZD}/Z_{beam} \approx 1$) 到中心碰撞 ($Q_{ZD}/Z_{beam} \approx 0$), Gauss 拟合曲线的宽度仅有 10—20% 的变化。

图 8 给出了 σ 的能量依赖关系。 σ 随能量的变化与所提供的相空间的大小有关。采用参数化

$$\sigma = \alpha + \beta \ln E_{beam}, \quad (4)$$

式中, $\alpha = 0.51 \pm 0.05$, $\beta = 0.17 \pm 0.01$ 。对于 $E_{beam} = 10.7A$ GeV, 得到中心事例的宽度 $\sigma = 0.91$ 。

5 重射弹核 (^{197}Au) 实验的最新结果

根据上节中给出的较轻射弹核实验的产生粒子质快度分布的一般特征, 可以预言更重碰撞核体系的分布, 如 Pb + Pb, Au + Au。这些分布的估计可通过以下一些步骤来进行: i) 由(1)式确定 $\eta_{p.o.k}$; ii) 利用(2)式, 估计产生粒子的总多重数。pp 碰撞的平均多重数 $\langle n_{pp} \rangle$, 采用对应能量的实验值输入。重核碰撞体系的反应体核子数目 P , 则根据碰撞参数来计算; iii) 由(4)式得到 σ , 于是给出了 Gauss 分布曲线。以下, 将把由较轻射弹核实验数据外推出的 η 分布, 同目前 10.7A GeV 的 Au + Ag 和 Au + Au 中心碰撞实验的新结果作比较。

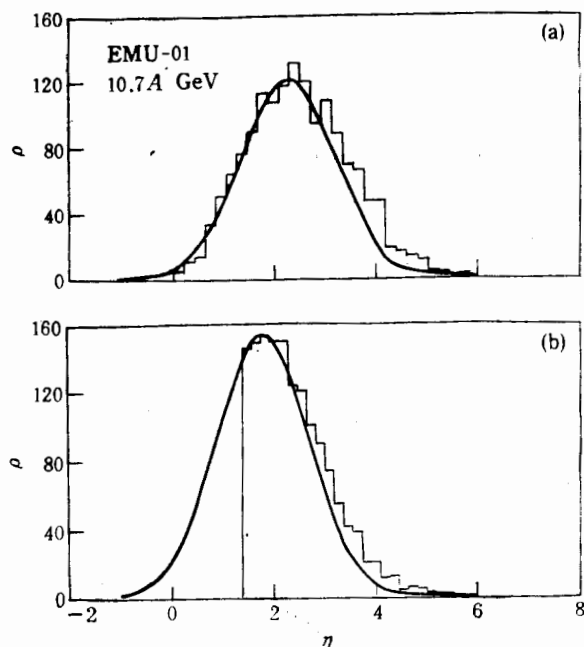


图9 重核中心事例的赝快度分布与轻核事例外推结果的比较

(a) Au + Ag, $n_f = 0$, $n_a = 0$; (b) Au + Au, $Q_{zD} = 37$, $P = 320$, $n = 347$, $\rho_{max} = 152$.

簇射粒子 ($\beta > 0.7$ 的单电荷粒子) 的快度分布, 分别在 Au + Au 的核乳胶室探测器

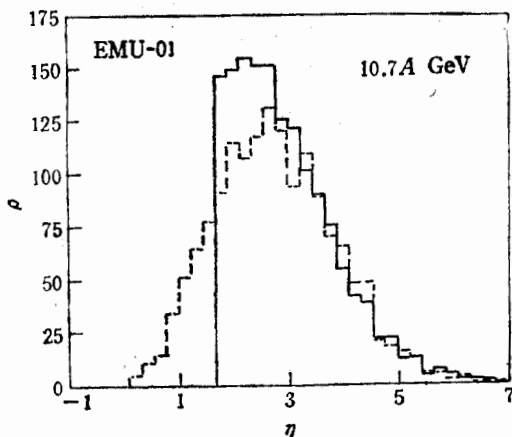


图10 相同 Q_{zD} 的 Au + Ag 与 Au + Au 赝快度分布的比较

实线对应于 Au + Au; 点划线对应于 Au + Ag, $Q_{zD} = 37$.

簇射粒子的贡献在 $\eta < \eta_{peak}$ 和 $\eta > \eta_{peak}$ 的快度区间不一样。在 $\eta < \eta_{peak}$ 区间, 由于采取了 $\beta > 0.7$ 的截断, 没有很慢的反应体质子。此外, 来自于射弹 ^{197}Au 核的质子也可能被包括在簇射粒子中, 因为它们的 $\eta > \eta_{peak}$ 。这些因素可能是在 $\eta > \eta_{peak}$ 区间测量的粒子密度高于外推 Gauss 曲线分布的原因。

和 Au + Ag (Br) 的核乳胶叠探测器中获得。中心事例(射弹 Au 核完全碎裂为核子)的产生粒子的快度分布在图9中给出。图中还画出了相应的外推 Gauss 分布曲线。对于 Au + Ag, 在 $\eta \leq \eta_{peak}$ 的区间, 粒子密度与外推的分布符合得很好。但在 $\eta > \eta_{peak}$ 的区间, 有较大的差别。对于 Au + Au 的中心事例, 由于粒子多重数是核乳胶室中测量的, 只有 $\eta > 1.3$ 的数据。这些数据在 $\eta > \eta_{peak}$ 区间, 比外推分布的曲线高。但是它的峰值 $\rho_{max} = 150$ 与外推的数值吻合相当好。反应体的质子对于

通常可以把快度空间分为三个区域:靶碎裂区,中心区和射弹碎裂区。考虑反应体-旁观体的核-核碰撞几何图象,在射弹碎裂区和靶碎裂区,粒子的产生分别依赖于射弹反应体和靶反应体中核子的数目 P_B 和 P_A ; 在中心区则依赖于这两个量之和 $P_B + P_A$ 。为了证实这一点,选择向前电荷相等的 Au + Au 和 Au + Ag 反应事例,即 $\langle Q_{ZD} \rangle_{Au+Au} = \langle Q_{ZD} \rangle_{Au+Ag}$ 。反应体的核子数目 $\langle P_B + P_A \rangle$, 对于 Au + Au 和 Au + Ag 相互作用分别估计为 320 和 250。图 10 给出了在给定的 Q_{ZD} 时 Au + Au 和 Au + Ag 的赝快度分布的比较。可以看出,射弹碎裂区的粒子密度相同。但是,它们的密度在中心区的比值为 1.25, 这比较接近于它们的反应体核子数之间的比值 $\langle P_B + P_A \rangle_{Au+Au} / \langle P_B + P_A \rangle_{Au+Ag} = 320/250 = 1.28$ 。

6 结 语

以上对于 BNL/AGS 的 10.7 A GeV 和 LBL/BEVATRON 的 0.1—0.9 A GeV ^{197}Au 离子诱发作用中 $Z \geq 3$ 和 $Z = 2$ 的核碎片作了研究,实验表明它们的多重数近似相等。但是,碰撞后射弹 ^{197}Au 核完全碎裂的比例,在 BNL/AGS 能区明显地升高。射弹 α 碎片的角分布呈现两分量特征,其中,一个分量可以用旁观体激发后蒸发的图象作解释;另一个分量则需更包含复杂的产生过程。

在赝快度空间的中心区和靶碎裂区, ^{197}Au 离子诱发作用的簇射粒子密度,与在 BNL/AGS 和 CERN/SPS 能区下较轻射弹核 (^{16}O 、 ^{28}Si 、 ^{32}S) 数据外推得到的结论一致。

参 考 文 献

- [1] I. Otterlund et al., (EMU-01 Collaboration), Invited talk at the Symposium on Heavy-Ion Physics at AGS, January 13—15, 1993, MIT, Cambridge, USA; Preprint of Lund University, LUIP-9304, 1993.
- [2] Cai Xu et al., (EMU-01 Collaboration), in Proceeding of the 16th International Conference on Nuclear Tracks in Solids, Oct. 1992, Beijing; *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **22** (1994) 547.
- [3] M. I. Adamovich et al., (EMU-01 Collaboration) *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992) 745.
- [4] C. J. Waddington, P. S. Freier, *Phys. Rev.*, **C31** (1985) 888.
- [5] E. Stenlund et al., (EMU-01 Collaboration) Proc. XXII Int. Symp. on Multiparticle Dynamics, Santiago de Compostella, Spain, July 13—17, 1992; B. Nilsson-Almqvist, E. Stenlund, *Comp. Phys. Comm.* **43** (1987) 387.
- [6] Cai Xu, Zhou Zhuowei, *Chinese Phys.*, **7** (1987) 989.

**Nuclear Fragmentation and Particle Production in Interactions
Induced by 10.7A GeV ^{197}Au at BNL/AGS**

EMU-01 Collaboration

Received 7 July 1994

Abstract

Nuclear interactions induced by 10.7A GeV ^{197}Au -ions at BNL/AGS are studied and the recent results on projectile nuclear fragmentation and particle production from the EMU-01 experiment are presented.

Key words High energy heavy-ion induced nuclear interactions, projectile nuclear fragmentation, density of produced particles.