

# 相对论性核碰撞中 $\phi$ 介子产生和弦碎裂函数\*

萨本豪<sup>1,2,3</sup> 王仲奇<sup>1</sup> 苏宗漆<sup>1</sup> 陆中道<sup>1</sup> 周代梅<sup>2</sup>

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (华中师范大学粒子所 武汉 430079)

3 (中国科学院理论物理研究所(客座) 北京 100080)

**摘要** 用强子和弦级联模型 LUCIAE 系统研究从 AGS 到 SPS, 到 RHIC, 再到 LHC 能量核-核碰撞中  $\phi$  介子产生. 采用与能量有关弦碎裂函数, 并通过与荷电粒子多重数实验数据的比较确定其中的参数后, LUCIAE 模型给出的  $\phi$  介子产额与实验数据也都相近, 得到的事件平均弦碎裂变量随能量之增趋饱和和规律, 可能是核穿透性能量行为的定性表示.

**关键词** 弦碎裂函数 核穿透性  $\phi$  介子产生 LUCIAE 模型

研究相对论性核-核碰撞目的之一是寻找由强子物质到夸克-胶子物质的 QGP 相变. 相对论性核碰撞研究是从 AGS 能量(核子-核子质心系能量  $\sqrt{S_{nn}} \approx 5\text{GeV}$ ) 开始, 后升到 SPS ( $\sqrt{S_{nn}} \approx 20\text{GeV}$ ), 又到 RHIC ( $\sqrt{S_{nn}} \approx 200\text{GeV}$ ), 并将再升至 LHC ( $\sqrt{S_{nn}} \approx 5500\text{GeV}$ ) 能量. 能量跨度约达 4 个数量级的核碰撞其动力学或热力学行为必有可观察的变化. 譬如说核穿透能力一定是  $\text{AGS} < \text{SPS} < \text{RHIC} < \text{LHC}$ , 它表现为净质子快度分布在中心快度区谷的出现和变得越来越深. 不过迄今尚缺定量甚至定性表征核穿透的物理量和对其系统研究的报道.

统计热模型或者动力学模型要统一描写能量跨度达 4 个数量级的核-核碰撞, 必须考虑其中所含热力学参量或动力学参量随能量的变化; 当然可能某些参量对能量敏感, 有些则不然, 但是系统地研究总是必要的.

最近文献[1]用统计模型系统研究了从 AGS 能量到 SPS 能量, 再到 RHIC 能量的 Au + Au 和 Pb + Pb 中心碰撞产生粒子多重数随束流能量的变化, 通过跟实验数据的拟合得到温度  $T$ , 重子化学势  $\mu_B$  和奇异抑制因子  $\lambda_s$ , 3 个主要模型参数随束流能量的变化是:  $T$  从约 120MeV 变到约 160MeV, 再到 175MeV;  $\mu_B$  从约 510MeV 到约 240MeV, 再到约 210MeV;  $\lambda_s$  从约 0.6

到约 0.45, 再到约 0.5.  $\lambda_s$  的定义是

$$\lambda_s = \frac{2\langle ss \rangle}{\langle u\bar{u} \rangle + \langle d\bar{d} \rangle}, \quad (1)$$

这里  $\langle ss \rangle$  是从色真空中激发奇异(s)夸克和 s 反夸克的几率,  $\langle u\bar{u} \rangle$  和  $\langle d\bar{d} \rangle$  亦然. 虽然相对论性核-核碰撞动力学模型, 如 FRITIOF<sup>[2]</sup>, VENUS<sup>[3]</sup>, HJING<sup>[4]</sup>, LUCIAE<sup>[5]</sup>, UrQMD<sup>[6]</sup> 和 AMPT<sup>[7]</sup> 等都考虑了相互作用的能量相关性等, 但是用动力学模型有意识地系统研究其中所含动力学参数从 AGS 直到 LHC 的能量变化行为尚不多见.

因为  $\phi$  介子是由  $s\bar{s}$  构成, 它的产额和谱斜率很好地反映着重离子碰撞中奇异产生的信息<sup>[8]</sup>, 本文以  $\phi$  介子产生为例着重研究 LUCIAE 模型<sup>[5]</sup> 中一个动力学参数即弦碎裂变量  $Z$  (fragmentation variable) 的能量相关性. 弦碎裂变量是弦碎裂时新产生强子带走弦末端夸克能量及纵动量和的部分数.

LUCIAE 是建立在 FRITIOF<sup>[2]</sup> 基础上, 但比 FRITIOF 多考虑了再散射<sup>[9]</sup>, 弦密集时发射胶子的集体效应(色绳, 即 Color rope 效应)<sup>[10]</sup>, 和弦碎裂时奇异夸克抑制的约化效应<sup>[11]</sup>.

如文献[12]所述, 弦碎裂变量  $Z$  是由弦碎裂函数  $f(Z)$  抽样产生而弦碎裂函数的选择具有一定任意性. 文献[12]中除给了 LUND 碎裂函数作为缺省选择外还给了其它可供选择的一些函数形式. 因待

2002 04 18 收稿

\* 国家自然科学基金(19975075, 10075035, 10135030)资助

研究的能量跨度达 4 个数量级特选其中只含一参数的简单形式

$$f(z) = \alpha \cdot Z^{-1}. \quad (2)$$

先用以上修改的 LUCIAE 模型计算 SPS 能量的 Pb + Pb 碰撞和 RHIC 能量的 Au + Au 碰撞中荷电粒子多重数. 由于上述碰撞的荷电粒子多重数已有实验结果, 计算中碰撞中心度以及快度(赝快度)和横动量窗口大小都取与相应实验一致(下同). 因为本文目的不在于拟合实验数据, 而是揭露现象背后的物理, 故满足于经适当调节  $\alpha$  后 LUCIAE 给出的荷电粒子多重数(或  $\langle \pi \rangle = \frac{1}{2}(\langle \pi^+ \rangle + \langle \pi^- \rangle)$ )与实验数据可比较即可. 由此得到的 LUCIAE 结果及相应的实验数据(Pb + Pb 数据取自文献[13], Au + Au 数据取自文献[14])给在表 1 中. 表 1 还给出了 LUCIAE 模型对 LHC 能量 Pb + Pb 碰撞的计算值, 它是  $\alpha$  取 18(适当大于 RHIC 能量的  $\alpha$  值)的结果. 由于 LUCIAE 模型引进色绳和奇异夸克抑制的约化机制时, 设定: 在 SPS 能量下当弦不稠密时色绳碎裂机制还原为简单弦碎裂机制, JETSET(描写弦碎裂的软件包, 是 FRITIOF 和 LUCIAE 的组成部分)中有关奇异

抑制参数:  $Parj(1), Parj(2), Parj(3), Parj(21)$ <sup>[12]</sup> 也还原到相应的缺省值. 因此 LUCIAE 用以研究奇异增强只适用于 SPS 及其以上的能量. 表 1 中给的 AGS 能量的理论结果, 是用冻结上述两机制的 LUCIAE 但令  $Parj(2)$  等于实验推测值(0.45, Au + Au)<sup>[11]</sup> 的结果; 相应的实验数据取自文献[15], 快度窗口是  $0.6 < y < 2.6$ . 前面提到的  $Parj(2)$  是奇异抑制因子, 即弦碎裂时产生 s 夸克对几率与产生 u 或 d 夸克对几率之比, 缺省值为 0.3;  $Parj(3)$  是奇异双夸克对相对于奇异夸克对的额外抑制因子;  $Parj(1)$  是双夸克反双夸克对相对于夸克反夸克对的抑制因子;  $Parj(21)$  是弦碎裂时产生强子横质量的高斯分布宽度. 表 1 中还列出了上述计算中调节得的  $\alpha$  值和相应的事件平均弦碎裂变量  $\langle Z \rangle$ .

再用如上确定的  $\alpha$  值计算上述反应中  $\phi$  介子的产额. 所得结果及其与相应实验数据的比较给在表 2 中. AGS 能量 Au + Au 数据取自文献[16], SPS 能量 Pb + Pb 数据取自文献[13], RHIC 能量 Au + Au 数据取自文献[17]. 表 2 中还给出了 LUCIAE 对 LHC 能量 Pb + Pb 碰撞全相空间  $\phi$  介子产额计算值.

表 1 相对论性核-核碰撞中强子多重数

Reaction		Au + Au	Pb + Pb	Au + Au	Pb + Pb
$\sqrt{S_{nn}}/\text{GeV}$		4.66	17.3	130	5500
Centrality	Exp.	$\leq 4\%$	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$ (BRAHMS)	$\leq 10\%$
	LUCIAE	$b \leq 2.82\text{fm}$	$b \leq 3.5\text{fm}$	$b \leq 3.2\text{fm}$	$b \leq 4.54\text{fm}$
$N_{ch}$	Exp.			$3860 \pm 300$ <sup>1)</sup>	
	LUCIAE			4114	$15646$ <sup>2)</sup>
$(\langle \pi^+ \rangle + \langle \pi^- \rangle)/2$	Exp.	$105$ <sup>3)</sup>	$611$ <sup>4)</sup>		
	LUCIAE	102	625		$5851$ <sup>2)</sup>
$\alpha$		0.4	1.0	12	18
$\langle Z \rangle$		0.286	0.499	0.923	0.947

1)  $-4.7 < \eta < 4.7$ , from [14]; 2) in full phase space; 3)  $0.6 < y < 2.6$ , taken from [15]; 4) cf. [13].

表 2 相对论性核-核碰撞中  $\phi$  介子产额

Reaction	$\sqrt{S_{nn}}/\text{GeV}$	Centrality		$\langle N_{\phi} \rangle$	
		Exp.	LUCIAE	Exp. data	LUCIAE
Au + Au	4.66	$301$ <sup>1)</sup>	$307$ <sup>1)</sup>	$0.252 \pm 0.107$ <sup>2)</sup>	0.14
Pb + Pb	17.3	$\leq 4\%$	$b \leq 3.5\text{fm}$ <sup>3)</sup>	$7.6 \pm 1.1$ <sup>3)</sup>	6.54
Au + Au	130	$\leq 11\%$ (STAR)	$b \leq 4.31\text{fm}$	$5.73 \pm 1.06$ <sup>4)</sup>	5.10
Pb + Pb	5500	$\leq 10\%$	$b \leq 4.54\text{fm}$		$132$ <sup>5)</sup>

1)  $\langle N_{part} \rangle$ ; 2)  $\frac{dN_{\phi}}{dy}$  within  $0.9 < y < 1.4$  [16]; 3) cf. [13]; 4)  $\frac{dN_{\phi}}{dy}$  within  $-0.5 < y < 0.5$  [17]; 5) full phase space.

图 1 给出 LUCIAE 模型得到的表 1 所列各反应中弦碎裂变量的事件平均值  $\langle Z \rangle$  (见图 1 实点) 随反应能量 ( $\sqrt{S_{nn}}$ ) 的变化规律. 图中点线是用函数

$$\langle Z \rangle = 1 - \frac{\alpha}{1 + b \sqrt{S_{nn}}}$$

拟合所得的结果 ( $\alpha = 0.895, b = 0.0507$ ).

文献[6]曾认为核穿透性与产生粒子形成时间及再散射有关(LUCIAE 模型对此两因素及其与能量的关系都作了适当考虑); 本文根据弦碎裂变量是弦碎裂时新产生强子带走弦末端夸克能量及纵动量和

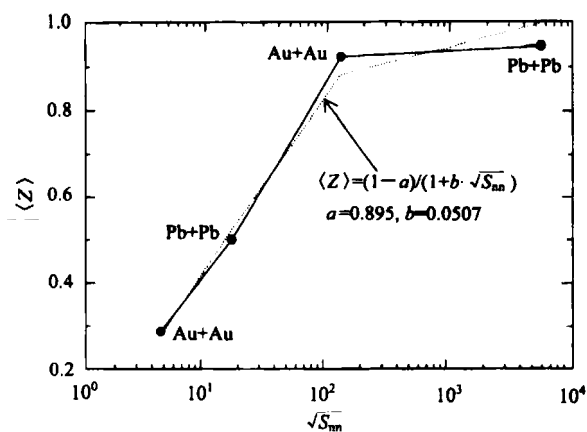


图1 弦碎裂变量平均值随核子-核子质心系能量的变化的部分数的定义,首次提出核穿透还与弦碎裂变量

有关;因为  $Z$  越大弦碎裂时产生粒子带走的能量及纵动量和部分数亦越大,核穿透性也就越强. 形成时间是硬散射后形成的弦的激发时间<sup>[6]</sup>;反应能量越高,弦激发经历的时间越长,形成时间也就越长;形成时间越长,再散射机会越少<sup>[6]</sup>,核穿透性越好. 从再散射自身作为决定核穿透的因素来说:显然反应能量越高,再散射越剧烈,核穿透性越差. 所以说,从形成时间和再散射这两因素对核穿透性的影响看来:两者有互相抵消的趋势. 于是弦碎裂变量有可能成了核穿透性的一个决定因素;于是本文得到的弦碎裂变量事件平均值随能量变化的规律有可能是核穿透性随能量变化行为的定性表示. 这一推测有待理论的进一步研究和实验的验证.

### 参考文献 (References)

- 1 Cleymans J. hep-ph/0201142
- 2 HONG Pi. Z. Phys., 1993, C57:485
- 3 Werner K. Z. Phys., 1989, C42:85; Phys. Rep., 1993, 87:232
- 4 WANG X N, Gyulassy M. Phys. Rev., 1991, D44:3501; Comput. Phys. Commun., 1994, 83:307
- 5 SA Ben-Hao, TAI An. Comput. Phys. Commun., 1996, 90:121; TAI An, SA Ben-Hao. Comput. Phys. Commun., 1999, 116:353
- 6 Bass S A et al. Prog. Part. Nucl. Phys., 1998, 41:255
- 7 ZHANG Bin, Ko C M, LI Bao-An et al. Phys. Rev., 2000, C61:067901
- 8 Koeh P, Müller B, Rafelski J. Z. Phys., 1986, A324:453
- 9 SA Ben-Hao, TAI An, LU Zhong-Dao. Phys. Rev., 1995, C52:2069
- 10 Andersson B, TAI An. Z. Phys., 1996, C7:155
- 11 TAI An, SA Ben-Hao. Phys. Lett., 1997, B409:393
- 12 Sjöstrand T. Comput. Phys. Commun., 1994, 82:74
- 13 Afanasiev S V et al (NA49 collab.). Phys. Lett., 2000, B491:59
- 14 Bearden I G et al (BRAHMS collab.). Phys. Lett., 2001, B523:227
- 15 Ahle L et al (E802 Collab.). Phys. Rev., 1998, C57:466
- 16 Seto R K et al (E917 collab.). Nucl. Phys., 1999, A661:506c
- 17 Adler C. Phys. Rev., 2002, C65:041901(R)

## $\phi$ Meson Production and String Fragmentation Function in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions\*

SA Ben-Hao<sup>1,2,3</sup> WANG Zhong-Qi<sup>1</sup> SU Zong-Di<sup>1</sup> LU Zhong-Dao<sup>1</sup> ZHOU Dai-Mei<sup>2</sup>

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2 (Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

3 (Institute of Theoretical Physics, CAS, Beijing 100080, China)

**Abstract** Using a hadron and string cascade model, LUCIAE, the  $\phi$  meson production in relativistic nucleus-nucleus collisions was systematically investigated from AGS energy, to SPS, to RHIC, up to LHC energy. After considering the energy dependence of the model parameter in string fragmentation function and fitting it to the experimental data of charged multiplicity, the results of  $\phi$  meson yield were comparable with experimental data. The obtained string fragmentation variable showed a saturation in dependence with energy, that might be a qualitative representation of the energy dependence of nuclear transparency.

**Key words** string fragmentation function, nuclear transparency,  $\phi$  meson production, LUCIAE model

Received 18 April 2002

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(19975075, 10135030, 10075035)