

高能重离子碰撞多粒子产生的热力学模型研究*

刘福虎

(山西师范大学物理系 临汾 041004)

摘 要 评述了高能重离子碰撞中多粒子产生的热力学模型,并根据该模型的最新发展,研究了有关高能核-核碰撞中簇射粒子的赝快度分布问题.

关键词 高能碰撞 多粒子产生 热力学模型

分类号 O571.4

高能重离子碰撞多粒子产生的理论,大部分是根据模型假设和统计方法的半唯象理论^[1,2].如参加者核子模型、三火球模型、多源模型、Lund 模型、二元部分子模型,分裂几何模型和 VUU 模型等发展而来的.这些模型主要是处理高能重离子碰撞最主要产物(簇射粒子)的产生过程及其特性,大致可分为四大类,即热力学模型(统计模型)、流体动力学模型、内核级联模型和输运模型.热力学模型是提出最早,应用最广的模型之一.本文将对热力学模型进行评述,并根据它的最新发展,研究有关高能核-核碰撞中簇射粒子的赝快度分布问题.

1 早期的单源(火球)模型和双源(火球)模型

最早的单(发射)源模型有费米统计模型和海森伯模型等^[3].费米统计模型认为:(1)当两个核子碰撞时,围绕这两个核子的虚介子云发生重迭,质心系统所有的动能立即集中在半径 $r_0 \sim \hbar/(m_\pi c)$ 和半厚度 $= r_0/\gamma_c$ 的一个盘内,同时全部能量分配给次级粒子和入射核子;(2)紧接着,代表介子的波包开始膨胀(发射),所有作用(包括次级粒子间的)停止,因此,相当于冲击时所得到的高能量密度的热平衡就在这时候被“冻结”.海森伯模型认为:(1)能量是由一个高度集中(很小)的体积

释放出来,入射核子在未达到末态之前就由作用区逃脱出来了,而在计算时未考虑它们也参与了能量分配;(2)产生新粒子的作用时间比碰撞时间大得多,当碰撞体积膨胀时,能量密度很快下降,使陆续产生的粒子能量也依次降低.

单源(火球)模型图像简单,可以解释新生次级粒子数目与入射能量的关系(费米统计模型)、非弹性系数与入射能量的关系及次级粒子横动量与发射角关系(海森伯模型)等少量实验结果.对于核-核碰撞,人们也提出了单粒子火球模型,认为核-核碰撞时反应系统发生热化,从而形成一个火球.但这个模型的预言与实验结果有较大的出入.

早期的双源模型认为^[3]:当两个“核子盘”碰撞时,没有介子发射,不过每一个核子都受到了高度激发.激发态的寿命足够长,每一个核子在衰变前有充分时间来脱离作用区向相反方向飞行.此后每一个激发核子即刻各自发射介子,介子的数目取决于激发程度,而后者又取决于这两个核子的相对反冲动量.该模型的优点是,能给出角分布的非各向同性程度和非弹性系数的单一关系方程.对一些特殊事例,实验结果和模型预言相近,但也有不少事例,实验结果和模型预言完全不符合.为了解决这些困难事例,人们对双源模型作了改进,提出了如下假设:在碰撞后每一

* 国家教委留学回国人员科研启动基金、山西省归国留学人员基金和山西省中青年学科带头人基金资助课题,课题编号[1997]436、97030和96024.
1997-09-20 收稿.

个激发核子的发射中心,即与核子的核心分离;碰撞后,能量在质心系中分为 4 个区,即两个运动方向相反速度较高的核子和两个尾随着的速度较低的“火球”.每一个“火球”在自己的中心是按各向同性发射粒子,而在总质心系中的角分布是这两个各向同性角分布的重迭.应用这种改进的双源模型,可以比较圆满地解释角分布的非各向同性程度和非弹性系数间的关系.

由于核-核碰撞的单(粒子)火球模型预言的质子谱在火球质心系中的各向同性分布与实验不符合.人们发展了描述核-核碰撞的两火球模型.模型假设:碰撞核是相互部分透明的;在碰撞过程中,形成两个参与者火球,每一个火球沿束轴向相反方向运动.这时粒子分布不是各向同性的,峰沿着束轴,因为火球在整体质心系中是运动的.这种模型能够得到与实验大致相同的结果.

2 三源(火球)模型和多源(火球)模型

描述高能非衍强子-强子碰撞过程的三火球模型认为^[4,5]:强子是由价夸克、海夸克和胶子形成的广延系.在碰撞中,两个强子相互穿透,在碎裂区形成两个产生粒子的源,分别称为射弹火球(P*)和靶火球(T*).同时,由于胶子和海夸克的相互作用,在中心区也形成一个产生粒子的源,称为中心火球(C*).射弹火球、靶火球和中心火球分别位于射弹碎裂区、靶碎裂区和快度中心区.值得注意的是,火球只是一种称呼,并不包含热平衡的要求.火球形成以后就互相独立地衰变为末态粒子.两个入射粒子只有纵向运动,而末态粒子具有横向能量.这些横向能量是以两粒子的动能作为两个能源而随机获得.

每个火球产生粒子的能量 E_i ($i = P^*, T^*, C^*$) 来源于两个入射粒子的动能.假定 E_i 的几率分布只与 E_i 的大小有关,而和它从两个入射粒子动能分别得到多少无关,就可以得到

$$P(E_i) = \frac{4E_i}{\langle E_i \rangle^2} \cdot \exp\left(-\frac{2E_i}{\langle E_i \rangle}\right), \quad (1)$$

式中, $\langle E_i \rangle = \int E_i P(E_i) dE_i$ 是 E_i 的平均值.基于实验事实,假定每个火球产生粒子的多重数 n_i 与火球获得的能量 E_i 成正比,就可得到每个火球产生粒子的多重数分布

$$P(n_i) = \frac{4n_i}{\langle n_i \rangle^2} \cdot \exp\left(-\frac{2n_i}{\langle n_i \rangle}\right). \quad (2)$$

高能强子-强子碰撞产生粒子的总多重数 $n = n_C + n_P + n_T$, 其几率分布 $P(n)$ 是三个火球产生粒子的多重数分布的卷积

$$P(n) = \int \delta(n - n_P - n_T - n_C) \cdot \prod_i P(n_i) dn_i. \quad (3)$$

定义 $\langle n_C \rangle = \alpha \langle n \rangle$, 则

$$\langle n_P \rangle = \langle n_T \rangle = \frac{1}{2}(1 - \alpha) \langle n_C \rangle, \quad (4)$$

式中, $\langle n \rangle$ 为某一质心系能量时的非衍事件的平均多重数, $\langle n_P \rangle$ 、 $\langle n_T \rangle$ 和 $\langle n_C \rangle$ 分别为相应火球产生粒子的平均多重数, α 为可调参数.

在能量守恒和横动量截断的约束下,每个火球衰变粒子的快度分布为

$$F_i(y) = K_i (\xi + \cosh y/T_i)^{-2}, \quad (5)$$

式中, ξ 为横向截断因子, K_i 为归一化常数, T_i 为配分温度.将三个火球的贡献迭加,就得到高能强子-强子碰撞中产生粒子的总快度分布

$$F(y) = \sum_i A_i F_i(y), \quad (6)$$

式中, A_i 是第 i 个火球的贡献与三个火球贡献之和的比.

因为核子-核子碰撞及核-核碰撞的基元过程是核子-核子碰撞,所以可对核子-核碰撞及核-核碰撞过程提出以下三源发射图像^[6]:对核子-核碰撞,射弹发射源是入射核子携带的由多次激发形成的大火球,中心发射源是入射核子穿透一串靶核子时形成的由多个中心火球连成的火球串,靶发射源是一串靶核子携带的由多个一次激发形成的小火球连成的火球串.对核-核碰撞,射弹发射源,中心发射源和靶发射源都包含多个大火球串.在初

级近似下,认为每个发射源所包含的多个火球由于传递能量在短时间内会达到热平衡,这样每个发射源都是一个热力学平衡态.在发射源静止系,可以假设所有粒子都以各向同性发射.

多源模型是描述强子-核及核-核碰撞的一种统计模型,它从参加者的核子数考虑,由三火球模型推广得到.多源模型认为^[2]:对于高能核子-核碰撞过程,假设入射核子与靶核内的核子进行了 ν 次碰撞.那么,就有一个射弹火球,一个中心火球和 ν 个靶火球.火球的形成和衰变规律与三火球模型中的情形一致,但中心火球的物质化能量是从 $1+\nu$ 个能源中随机获得的.对于高能核-核碰撞过程,假设有 ν_p 个入射核中的核子和 ν_T 个靶核中的核子参加反应,则形成一个中心火球、 ν_p 个射弹火球和 ν_T 个靶火球.中心火球的物质化能量从 $\nu_p+\nu_T$ 个能源中随机获得.

3 火条模型与热化柱图像

火条模型认为^[1]:由靶核和入射核产生的核媒质在纵向上完全混合和热化,横向上仅在一个很短的距离内热化.这样就产生了一束管,或称为一束火条,它们以不同的速度运动,发射具有不同温度的粒子.火条的速度、温度依赖于该火条由入射核和靶核所获得的粒子比例.火条模型虽然图像清晰,但是当与粒子分布的单举实验资料比较时,它并不优于其它模型.

与火条模型类似,本小组提出了一个更加具体化了的热化柱图像^[7]:对核子与核碰撞,入射核子会穿透一串靶核子,从而形成一个沿纵向(X 方向)扩展的火条.作为领头粒子,入射核子和靶核分别位于火条的两端.对核-核碰撞,将形成多根较之核子与核碰撞为粗的火条,且火条与火条之间在横向上相互混合,从而形成一根粗的火柱,称为热化柱.这根热化柱是沿纵向(X 方向)扩展的,且随着 X 的增大,速度增大.同时,入射能量越大,

扩展程度就越大.

热化柱内,具有相同速度的发射点组成一个发射面,若干个发射面构成了热化柱.在热化柱的中心轴及其附近区域,因为参与碰撞的入射核子数和靶核子数多,处于高激发态,将发射高横动量的粒子;在热化柱的侧面部分,因为参与碰撞的核子数少,处于低激发态,将发射低横动量的粒子;而从中心轴附近到侧面附近的区域,因为参与碰撞的核子数居中,处于中等程度的激发态,将发射中等横动量的粒子.

在发射面静止系粒子各向同性发射的假设条件下,当考虑到领头弹核质子的贡献时,固定靶的中心核-核碰撞中的簇射粒子赙快度 η 的分布可表示为

$$f(\eta) = A \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(\eta, y_x) dy_x + B f(\eta, y_{\max}), \quad (7)$$

式中

$$f(\eta, y_k) = \frac{1}{2ch^2(\eta - y_k)}, \quad k = x, \max, \quad (8)$$

$$A = \frac{n_s - Z_p}{n_s \int_{-\infty}^{\infty} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(\eta, y_x) dy_x d\eta}, \quad B = \frac{Z_p}{n_s}, \quad (9)$$

式中, n_s 是簇射粒子多重数, Z_p 是弹核参加者的质子数.

4 热化柱图像对赙快度分布的描述

对固定靶的中心核-核碰撞,在发射面静止系粒子各向同性发射的假设条件下,当考虑到领头弹核质子的贡献时,赙快度分布可用(7)式描述,其中的参数 A 和 B 如(9)式所示.对固定靶的非中心核-核碰撞,由于弹核旁观者的质子贡献不可忽略,末态观测到的赙快度分布应是考虑到弹核旁观者的质子贡献的(7)式的修正形式,具体表述为

$$f(\eta) = A \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(\eta, y_x) dy_x +$$

$$Bf(\eta, y_{\max}) + Cf(\eta, y_s), \quad (10)$$

式中

$$A = \frac{n_s - Z_p - Z_s}{n_s \int_{-\infty}^{\infty} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(\eta, y_x) dy_x d\eta},$$

$$B = \frac{Z_p}{n_s}, \quad C = \frac{Z_s}{n_s}, \quad (11)$$

在(10)式和(11)式中, y_s 是弹核旁观者的质子的快度, $f(h, y_s)$ 的表达式同(8)式, Z_s 是弹核旁观者的质子数. 在碰撞参数一定时, Z_p 和 Z_s 的值可由入射核和靶核之间的几何位置关系求出.

根据上述热化柱图像对赝快度分布的描述, 本小组研究了加速器产生的高能 ^{16}O 、 ^{28}Si 和 ^{32}S 与核乳胶碰撞中^[8], 以及在超高能宇宙线重核 Si 与 AgBr 碰撞和 Ca 与 C 碰撞^[9]中, 簇射粒子的赝快度分布^[7,10]. 结果表明, 热化柱图像在描述赝快度分布方面是非常成功的.

最近, 美国布鲁克海文国家实验室的重离子加速器(AGS)加速 Au 核获得成功, 被加速的 ^{197}Au 束流的动量达到每核子 11.6 GeV/c. 为了检验(7)和(10)式的正确性, 本小组计算了高能 ^{179}Au 与固定靶碰撞中簇射粒子的赝快度分布.

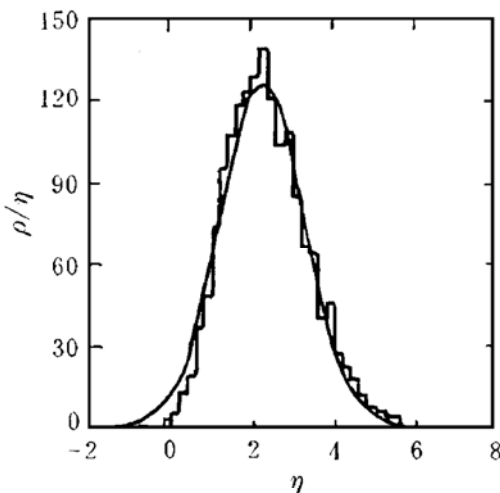


图 1 每核子动量为 11.6 GeV/c 的 Au 与 Ag 中心碰撞中簇射粒子的赝快度分布

图 1 是每核子动量为 11.6 GeV/c 的 ^{197}Au 与 Ag 中心碰撞中, 簇射粒子的赝快度

分布. 直方图是文献^[11]测得的实验结果, 曲线是本小组用(7)式计算的结果. 图中纵坐标 $\rho(\eta) = \langle n_s \rangle f(\eta)$ 为赝快度密度, 归一化条件为 $\int \rho(\eta) d\eta = \int \langle n_s \rangle f(\eta) d\eta = \langle n_s \rangle$. 在计算时, (7)式中的参数 y_{\max} 和 y_{\min} 的值分别为 2.9 和 1.2, 这是考虑到领头质子在每次核子-核碰撞中能量损失 10% 计算得到的^[7]. 图 2 是每核子动量为 11.6 GeV/c 的 ^{197}Au 与核乳胶碰撞中, 簇射粒子的赝快度分布. 直方图是文献^[10]测得的实验结果, 曲线是本小组用(10)式计算的结果. 为简便起见, (10)式中的有关参数由拟合实验数据得到, 具体为 $y_{\max} = 3.0$, $y_{\min} = 1.3$, $y_s = 4.5$, $Z_p = 1.2$ 和 $Z_s = 13.0$.

从图1和图2可以看出, 热化柱图像可以描述有关高能核-核碰撞中, 簇射粒子赝快度分布的最新实验数据.

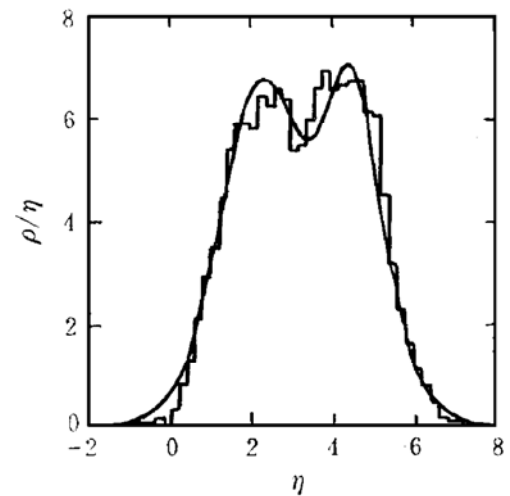


图 2 每核子动量为 11.6 GeV/c 的 Au 与核乳胶碰撞中簇射粒子的赝快度分布

5 结束语

对高能重离子碰撞多粒子产生的热力学模型作了综述, 并根据该模型的最新发展, 研究了有关高能核-核碰撞中簇射粒子的赝快度分布问题.

热化柱图像在解释目前能区簇射粒子的赝快度分布方面取得了成功. 可以预期, 在未来超高能超重核对撞实验(如 RHIC 实验)

中,热化柱图像仍能解释簇射粒子的赝快度分布. 需要说明的是,如果考虑的是整个区间的赝快度分布,(7)或(10)式中应包含参与对撞的两个核的参加者及旁观者的质子的贡献.

随着入射能量的提高,由热化柱图像描述的赝快度分布会变宽、变平,并出现平台结构^[10]. 如果在未来的超高能超重核对撞实验中,热化柱内部大部分区域有夸克物质生成,或在某些局部区域中有夸克物质生成,则会引起赝快度分布变窄或在较平缓的分布曲线上出现很窄的峰.

文中关于高能重离子碰撞多粒子产生热力学模型的综述,侧重于簇射粒子的赝快度分布问题. 事实上,热力学模型也可以描述高能原子核电磁离解中的末态能谱^[12,13]. 对最近实验上得到的高能强子碰撞过程中的特征参量^[14]也可用热力学模型进行描述.

参 考 文 献

- 1 刘亦铭. A-A 碰撞多粒子产生的唯象理论. 相对论性重离子碰撞专题报告会资料,北京,1989年5月
- 2 庄鹏飞. 高能重离子碰撞中的集体现象与夸克物质的形成. 华中师范大学博士学位论文,1990年6月
- 3 张文裕. 由宇宙线($10^{11} \sim 10^{14}$ 电子伏)引起的高能核作用. 物理学报,1961,17(8):271~295
- 4 Liu Lianshou, Meng Tachung. Multiplicity and Energy Distributions in High-energy $e^+ e^-$, pp, and $p\bar{p}$ Colli-

- sions. Phys Rev, 1983, D27: 2640~2647
- 5 Chou Kuangchao, Liu Lianshou, Meng Tachung. Kobayashi-Nielson-Olesen Scaling and Production Mechanism in High-energy Collisions. Phys Rev, 1983, D28: 1080~1087
- 6 Liu Fuhu, Sun Hancheng. Transverse Momentum and the Pseudorapidity Distributions of Negative Particles in Relativistic Heavy Ion Collisions. High Energy Phys & Nucl Phys, 1995, 19: 21~26
- 7 刘福虎. 高能核-核碰撞中反应系统的纵向扩展与横向激发. 核物理动态. 1996, 13: 23~27
- 8 Adamovich M I, Aggarwal M M, Alexandrov Y A et al. Parametrization of Pseudorapidity and Multiplicity Distributions in Central Ultrarelativistic Heavy Ion Interactions. In Proceedings of the 10th EMU01 Collaboration Meeting. Wuhan, China, September 19~21, 1991
- 9 Bumett T H, Dake S, Faki M et al. Extremely High Multiplicities in High-energy Nucleus-nucleus Collisions. Phys Rev Lett, 1983, 50: 2062~2065
- 10 Liu Fuhu, Zhang Jinjun. Longitudinal Extension and the Pseudorapidity Distributions of Shower particles in Relativistic Nucleus-nucleus Collisions. Chin J Nucl Phys, 1997, 19(4)
- 11 Stenlund E. Particle Densities and Collective Effects in Particle Production Observed in Gold Interactions at the BNL AGS. Proceedings of Quark Matter '95. Abstracts of Contributed Papers. Monterey, California, USA, Jan 9~13, 1995, 215
- 12 Barrette J, Bellwied R, Braun-Munxing P et al. Electromagnetic Dissociation of Relativistic ^{28}Si . Phys Rev, 1995, C51: 865~872
- 13 Liu Fuhu. Final-state Energy Spectrum in Nuclear Electromagnetic Dissociation Process. Chin J Nucl Phys, 1997, 19(3): 155~158
- 14 Agababyan N M, Atayan M R, De Wolf E A et al. Reactions with Leading Hadrons in Meson-proton Interactions at 250 GeV/c. Z Phys, 1997, C75: 229~236

Thermodynamic Models for Multiparticle Production in High Energy Heavy Ion Collisions

LIU Fuhu

(Department of Physics, Shanxi Teachers University, Linfen 041004)

Abstract The thermodynamic models for multiparticle production in high energy heavy-ion collisions are reviewed. According to the recent developments of the thermodynamic models, the pseudorapidity distributions of shower particles produced in high energy nucleus-nucleus collisions are investigated.

Key Words high energy collision multiparticle production thermodynamic model