

# 高能重离子碰撞中相对论 $\alpha$ 粒子的双温度发射

蔡 勳      周卓嫩  
(华中师范大学)      (华中工学院)

## 摘 要

本工作利用核乳胶作为靶和探测器,研究了入射能量超过 1A GeV 的重离子同乳胶核相互作用时  $\alpha$  碎片的发射。实验测量结果的分析表明,在重离子碰撞过程中,相对论  $\alpha$  粒子的横动量分布给出一个“双有效温度”的特征。这个特征可能成为判断出现由强子物质向夸克物质相变的一种新的信号。

## 一、引 言

近年来,关于极端的高温和高密条件下核内物质性质的研究<sup>[1]</sup>,使人们普遍相信可能存在着一种由强子物质到夸克物质(或称为夸克-胶子等离子体)的相变。在这种相变过程中,夸克将解除禁闭而形成一种新的核内物质态。在通常的条件下,夸克被禁闭在颜色中性的强子束缚态中。除了早期宇宙之外,形成夸克物质的高温、高密条件至少还可出现于以下两种物理环境中,一是中子星的内部,二是由宇宙线或由加速器加速的重离子诱导的高能核-核碰撞。由于夸克作为自由粒子迄今尚未在实验中被观察到,许多人开始把注意力集中到探寻夸克-胶子等离子体形成的实验信号上。

本文首先讨论了在重离子碰撞中寻求夸克物质形成信号的一种模型,然后报告了最近采用 Ilford G2 型核乳胶同  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  以及  $^{139}\text{La}$  束流的高能核-核碰撞实验的测量结果。正如本文所要说明的,我们提及的这种信号可能比已有的其他模型猜测优越一些。其原因主要是,在目前或即将达到的重离子加速器或对撞机的能量范围内,有可能观察到这种关于相变的信号。

## 二、模 型

高能核-核碰撞通常可以用“反应体-旁观体图象 (the participant-spectator picture)”来描述。在射弹核和靶核碰撞时,两者相互瞄准的部分参加反应,称为反应体;其余的部分不直接参加碰撞,分别称为射弹旁观体和靶旁观体。从运动学的角度来看,反应体和旁

本文 1986 年 3 月 10 日收到。

度的坐标系  
正对碰 ( $A'-$   
尽管前者对  
不对称。将  
间流体过  
明待加速器

LISION  
DEL

time evolu-  
dimensional  
imated and  
y distribu-

观体将分别出现在快速空间中的不同区域。位于中心快速区的反应体，由于高能反应和多次次级碰撞，处于高激发状态。旁观体由于未参加碰撞而擦边飞离，在初级近似下，几乎不被激发。然而，如果我们作细致一些的考虑，当旁观体同反应体分离时，由于它们之间存在的某种联系，也会导致旁观体的弱激发。旁观体被弱激发的程度依赖于它同反应体分离时的联系状况。显然，反应体内是不是发生了形成夸克物质的相变，它与旁观体的联系状况应有明显差异。基于这些想法，我们希望利用旁观体的弱激发程度来获取反应体内是否发生相变的信息。

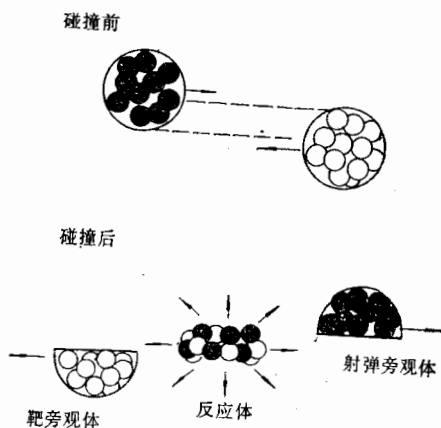


图 1

为了计算旁观体上接触层所获得的摩擦热，我们先写出相对论流体的粘性应力张量  $\sigma_{ik}$

$$\sigma_{ik} = -\eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x^k} + \frac{\partial u_k}{\partial x^i} + u_k u^l \frac{\partial u_i}{\partial x^l} + u_i u^l \frac{\partial u_k}{\partial x^l} \right) - \left( \zeta - \frac{2}{3} \eta \right) \frac{\partial u_l}{\partial x^l} (g_{ik} + u_i u_k), \quad (1)$$

其中， $u_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) 为四维速度， $\zeta$  为整体粘性系数， $\eta$  为动力粘性系数<sup>[3]</sup>。

取接触层平行于  $x-z$  平面，反应体与旁观体之间的相对速度沿  $x$  轴方向，因此可得到  $u_y = u_z = 0$ ，相对速度的梯度沿  $y$  轴。为了简单，设梯度的大小不依赖于  $x$  和  $t$ 。如果反应体未发生相变，则可以假定

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\Delta u_x}{h} = \frac{u_x}{h}, \quad (2)$$

其中  $h$  是接触层的厚度。切向摩擦力为

$$f = -\eta \gamma u_x / h, \quad (3)$$

其中  $\gamma$  是相应于速度  $u_x$  的洛伦兹收缩因子。

在旁观体之间的接

反应体从旁

旁观体内受

式中， $n_0$  是模型 (hot :

若将旁

于是我们得

在能

完全“拉住”

$T_2$ 。因此有

本工作

靶和探测器的 Bevatron

1.1A GeV

显微镜

作用量。  $\rightarrow$

$^{139}\text{La}$ ), 每  $\mu\text{s}$

关于核

寻找相对论

(grain dens

在图 2

互碰撞中  $\theta$

角度。显然

利用

可能反应和  
丘似下, 几  
女一些的考  
们之间存  
激发. 旁  
体分离时  
发生了形  
系状况应  
望利用旁  
否发生相

流体力学  
作不去追

核和靶核  
直接参加对  
应体同旁  
具有某种  
引起摩擦.  
即转变为  
言, 由于它  
体, 摩擦热

应力张量

在旁观体的静心坐标系中, 以  $S$  表示旁观体接触层的面积, 以  $S'$  表示反应体与旁观体之间的接触面积, 则

$$S' = \gamma^{-1} S, \quad (4)$$

反应体从旁观体旁边经过的距离  $D = 2(S/\pi)^{1/2}$ , 我们得到克服摩擦力所作的总功  $W_f$  为

$$W_f = \eta u_x S D / h. \quad (5)$$

旁观体内受摩擦热弱激发的接触层的体积为  $Sh$ , 因而其中每个核子的平均内能为

$$\omega = \frac{W_f}{n_0 S h} = \eta \left( \frac{u_x D}{h^2 n_0} \right), \quad (6)$$

式中,  $n_0$  是通常核内的核子数密度. 以上为了处理准平衡态问题, 我们已沿用了“热斑模型 (hot spot model)”的观点<sup>[4]</sup>.

若将旁观体内的核子气视为费米气, 应有状态方程

$$\omega = a T^2. \quad (7)$$

于是我们得到反应体内未发生相变时, 旁观体接触层的温度  $T_1$  为

$$T_1 \propto \left( \frac{u_x}{h} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

在 高能重离子碰撞中, 如果反应体发生相变, 成为夸克物质, 它不能将旁观体接触层完全“拉住”<sup>[5]</sup>. 这时,  $\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\Delta u_x}{h} < \frac{u_x}{h}$ , 我们类似讨论而得到旁观体接触层的温度  $T_2$ . 因此有

$$T_2 < T_1. \quad (9)$$

### 三、实 验

本工作以低感光度的 Ilford G2 型核研究乳胶叠 (单层  $10 \times 10 \times 0.06 \text{cm}^3$ ) 作为靶和探测器来获取碰撞实验数据. 乳胶叠于 1983 年在美国 Lawrence-Berkeley 实验室的 Bevatron-Bevalac 加速器上曝光, 入射束流分别为 1.8A GeV<sup>40</sup>Ar, 1.42A GeV<sup>84</sup>Kr 和 1.1A GeV<sup>139</sup>La. 乳胶平面与入射束流平行.

(1) 显微镜下的扫描技术是采用“沿径迹扫描法 (along-the-track scanning)”来寻找相互作用量. 为了减少由于电离造成的束流能量损失的影响, 对于较重的人射束流 (<sup>84</sup>Kr 和 <sup>139</sup>La), 每条入射粒子径迹只跟踪其进入乳胶内的头三厘米长的距离.

关于相互作用量的次级粒子的测量, 我们只在沿入射束流方向的向前  $10^\circ$  的锥内来寻找相对论  $\alpha$ -碎片. 次级粒子的辨认, 采用了聚块密度 (blob density) 和颗粒密度 (grain density) 测量方法.

(2) 在图 2 中, 我们用对数标度分别画出了入射束流为 <sup>40</sup>Ar, <sup>84</sup>Kr 和 <sup>139</sup>La 同乳胶核相互碰撞中发射的相对论  $\alpha$  碎片的  $\sin^2 \theta$  分布.  $\theta$  是次级  $\alpha$  粒子对于入射束流方向的发射角度. 显然, 这些实验结果表明分布的外观不简单.

(3) 利用  $\chi^2$ -分析, 根据实验数据获得的最佳拟合曲线, 如图 2 中的实曲线所示. 这些拟

31.

因此可得  
和  $t$ . 如

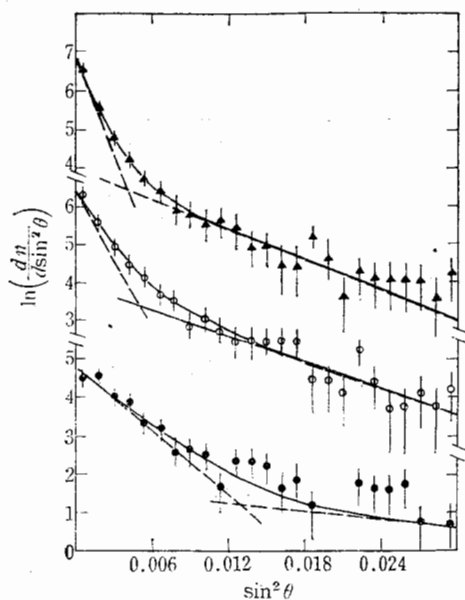
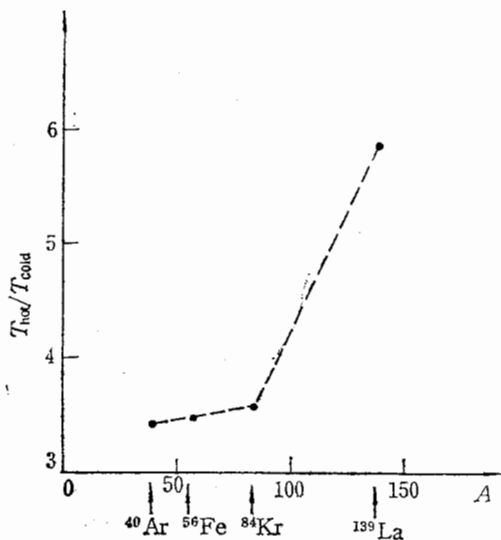
图 2 ▲  $^{40}\text{Ar}$  ○  $^{84}\text{Kr}$  ●  $^{139}\text{La}$ 

图 3

合曲线都可以用下面的两分量参数表达式来描写

$$F(\sin^2 \theta) = A_1 \exp(-B_1 \sin^2 \theta) + A_2 \exp(-B_2 \sin^2 \theta). \quad (10)$$

其中,  $A_1, B_1, A_2, B_2$  是参数. 图 2 中的虚直线给出了两分量中每个分量的贡献.

在旁观体的静止坐标系中, 碎片的横动量分布可以考虑为如下的归一化形式

$$f(p_{\perp}) dp_{\perp} = \frac{p_{\perp}}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{p_{\perp}^2}{2\sigma^2}\right) dp_{\perp}, \quad (11)$$

这里  $\sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi} \langle p_{\perp}^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\langle p_{\perp}^2 \rangle}{2}}$ . 也就是说, 我们可以利用  $\alpha$  粒子的  $\sin^2 \theta$  分布来判断碎片横动量分布是否为高斯型.

按照实验数据得到的两分量参数拟合表达式, 表明次级相对论  $\alpha$  粒子分别由两个发射源所产生. 利用运动 Boltzmann 分布<sup>[9]</sup>, 我们可以计算出这两个发射源所对应的有效温度  $T$  的比值, 如图 3 所示.

#### 四、讨 论

按照我们所讨论的模型, 在每一次高能重离子碰撞事件中, 在中心快度区形成一个高度激发的中心部分(即反应体); 同时, 在射弹和靶的碎裂区又各有一个由摩擦热形成的弱激发部分(即射弹和靶的旁观体). 我们测量了射弹旁观体碎裂时所发射的  $\alpha$  粒子角分布(即  $\sin^2 \theta$  分布). 测量结果表明, 与实验数据最佳拟合的曲线是一个两分量参数表达式. 这两个分量分别对应着具有不同有效温度的两个发射源.

根据本文模型的流体力学分析, 高能重离子碰撞可能包括两类性质的事件. 在反应体发生了相变的事件中, 旁观体接触层比较容易与反应体分离, 从而导致旁观体接触层的

温度比较明  
于在实验  
布既包含  
的双温度  
离子碰撞  
关于  
射, 测量  
于核内强  
前还不能  
可能在探  
由于  
的种类也  
们并不断  
为研究核  
EM  
加速到 2

本文  
谢 I. Ot

- [1] Qua  
leu:  
Spr  
[2] R.  
[3] L.  
[4] R.  
S.  
[5] F.  
[6] S.  
[7] G.  
J.  
J.

温度比较明显下降。模型并不期待每一次碰撞事件都能在反应体内形成夸克物质相。由于在实验测量的数据统计中,不区分是否出现相变的事件,因此关于相对论  $\alpha$  粒子的角分布既包含着无相变事件的信息,也包含着有相变事件的信息。数据拟合曲线所表现出来的双温度发射,其实是两类不同反应机制的事件混合统计的结果。它可能是反映高能重离子碰撞中形成夸克-胶子等离子体的信号。

关于夸克物质形成的实验信号,目前已有不少理论上的建议<sup>[7]</sup>,譬如,测量轻子对辐射,测量  $\pi$  介子的高多重数,测量  $\gamma$  光子或奇异粒子的产额,等等。这些估计往往需要对于核内强子物质和夸克物质的强相互作用动力学性质有足够的了解。可惜的是,我们目前还不能完全具备这些知识。因此,本文中讨论的模型以及对本实验结果所作的分析,有可能在探寻相变信号的方案中,开辟一条新的途径。

由于目前加速器上进行的核研究乳胶实验中,入射粒子的束流能量还不够高,射弹核的种类也比较少,而且实验测量数据的统计性较低,本文所分析的结果有它的局限性。我们并不断言,在现有的实验中已经看到了相变。我们只是认为,它可能在理论上和实验上为研究核物质相变提供一点新的启发。

EMU-01 国际乳胶实验协作组计划在欧洲核子研究中心 (CERN) 的 SPS 上将  $^{16}\text{O}$  加速到 200A GeV。我们期待着新的实验结果。

(10) 本文的部分实验测量是在瑞典隆德大学宇宙线和亚原子物理研究所进行的。作者感谢 I. Otterlund 教授的接待和帮助。

### 参 考 文 献

- (11)
- [1] Quark Matter '84, Proceedings of the Fourth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Helsinki, Finland, 17—21 June 1984, ed. by K. Kajantie, Lecture Notes in Physics 22-1. Springer-Verlag (1985).
  - [2] R. Beckmann, S. Raha, N. Stelte and R. M. Weiner, *Phys. Lett.* **105B**(1981), 411.
  - [3] L. D. Landau and E. M. Lifschitz, *Fluid Mechanics*, Pergamon Press, London, 1975.
  - [4] R. Weiner and M. Weström, *Nucl. Phys.*, **A286**(1977), 282.  
S. Raha, R. M. Weiner and J. W. Wheeler, *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 138.
  - [5] F. Halzen and H. C. Liu, *Phys. Rev.*, **D25**(1982), 1842.
  - [6] S. I. A. Garpman, *Phys. Lett.*, **106B**(1981), 367.
  - [7] G. Domokos and J. I. Goldman, *Phys. Rev.*, **D23**(1981), 203.  
J. Rafelski and B. Müller, *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 1066.  
J. Cleymans, M. Dechantsreiter and F. Halzen, *Z. Phys. C.*, **17**(1983), 17.

1  
150 A  
a

(10)  
贡献。  
式

(11)  
布来判断碎  
别由两个发  
对应的有效

形成一个高  
热形成的弱  
粒子角分布  
数表达式。

主。在反应  
本接触层的

## TWO TEMPERATURES EMISSION OF RELATIVISTIC $\alpha$ -PARTICLES IN HIGH-ENERGY HEAVY-ION COLLISIONS

CAI XU

(Hua-Zhong Normal University)

ZHOU ZHUO-WEI

(Huazhong University of Science and Technology)

### ABSTRACT

We have performed an experimental study of the  $\alpha$ -fragments emitted from collisions between emulsion nuclei and heavy-ion projectiles at beam energies beyond 1 A GeV. It is shown that the transverse momentum distributions of relativistic  $\alpha$ -particles give evidence for two effective temperatures emission in high-energy heavy-ion collisions. The data might take on a new signature for the phase transition from hadron matter to quark matter.

明了

近年  
文献[6,1  
不变的表  
有中心项  
平移  
同调闭链  
分区存在  
任意的  $r$   
与平  
特别是文  
定理逐次  
等。这  
出它所有  
有效作用  
对易反常  
目前

Hilbert-1

$\mathcal{G}^3$ ) 非 $\mathcal{G}$

范群  $\mathcal{G}$

本 $\mathcal{G}$

不同维 $\mathcal{G}$

本文