

方位角关联函数与核媒质态方程*

王山 刘亦铭 蒋玉桢 陈小凡

(哈尔滨工业大学理论物理教研室)

D. Keane

(Department of Physics, Kent State University, Kent, Ohio 44242)

S. Y. Fung S. Y. Chu

(Department of Physics, University of California, Riverside, Ca 92521)

摘 要

本文采用方位角和方位角关联函数二种方法对 Bevalac 流光室 1.2A GeV Ar + KCl 碰撞实验进行了研究,并和相对论 Vlasov-Uehling-Uhlenbeck 理论的结果进行比较,检测了核媒质态方程的软硬程度。对于方位角方法,反应平面上方位角的离散使方位角分布最大非对称性的计算值比真值下降了约 30%。采用本文提出的方位角关联函数的方法能够消除这一影响。

相对论重离子碰撞实验的主要目的之一就是研究核媒质在高温、高密度状态下的特性,得到核媒质的状态方程。在相对论核-核碰撞末态,粒子的动量分布为这一研究提供了重要的信息。根据末态粒子的动量分布,人们选择了许多参量来分析核媒质态方程,如:集合侧向流的流角^[1,2]、在反应平面内每核子横向动量的平均值^[3-7]、以及近来提出的末态粒子方位角分布的最大非对称性^[8,9]等。可是,在对这些参量进行计算时,必须首先确定每一事件的反应平面,而在实验分析中,轨迹的漏测、事件轨迹数的有限性及自相关的消除等因素都会影响到事件反应平面的准确确定,进而影响到上述参量的计算结果。因此,寻求一个与反应平面上方位角的离散无关的,同时又是对核媒质态方程敏感的参量是一个很有意义的课题。

本文首先采用 Welke 等人提出的方位角方法^[9],研究核媒质态方程。然后由方位角的分布函数诱导了方位角的关联函数,提出了由方位角关联函数分析核媒质态方程的方法。这种方法不需要对每一事件确定反应平面。与方位角方法比较,提高了对方位角分布最大非对称性计算的准确程度。

理论上,本文采用 VUU 模型^[10-12],它是基于 Vlasov-Uehling-Uhlenbeck 量子输运方程^[13]建立起来的。VUU 模型并不是 VUU 方程的直接数值解,而是它的蒙特卡罗模

本文 1990 年 3 月 12 日收到。

* 国家自然科学基金资助项目,美国能源部资助项目。

拟。其核心是内核级联模型,同时还考虑了核-核之间相互作用的平均势场及泡里阻塞的效果。在不考虑动量相关^[14,15]的条件下,在 VUU 模型中采用的平均势场是

$$U(\rho) = a\rho + b\rho^c$$

ρ 是核子密度, a, b, c 是常数。相应于 $c = 2$ 与 $c = 7/6$, 核媒质态方程的倔强系数分别是 $K = 380\text{MeV}$ 与 $K = 200\text{MeV}$, 通常称之为“硬核媒质”与“软核媒质”。

实验上,本文对 Bevalac 流光室的 1.2A GeV Ar + KCl 实验进行分析,采用了 571 个多重数大于 30 的事件。对应于简单的几何图象,碰撞参数的范围大约是在 0—3.6fm 之间。关于实验的详尽描述可见参考文献[16—18]。

用 VUU 唯象模型计算这种碰撞,相应于“软核媒质”与“硬核媒质”分别产生了 5 倍于实验样本的模拟事件。在与实验结果比较前,对理论计算的数据还需做一定的处理,处理过程包括^[19]: 轨迹的漏测,靶的吸收及核子能量的损失,以及粒子鉴别的失误。

对于非零碰撞参数的核-核碰撞,每一事件的反应平面是由碰撞前二原子核的连心线与入射核的运动方向 (\mathbf{z}) 确定的,将其定义为 xoz 平面。末态粒子的方位角为:

$$\phi = \cos^{-1}(p_x / \sqrt{p_x^2 + p_y^2}) \quad (1)$$

在一定的快度 (y) 范围内,重子的方位角分布函数为^[9]

$$d\sigma/d\phi = A(1 + \lambda \cos\phi) \quad (2)$$

由这个分布函数可以定义参量 R 来描述方位角分布的最大非对称性:

$$R = (1 + \lambda)/(1 - \lambda) \quad (3)$$

R 是由核媒质态方程决定的、同时又是对核媒质态方程变化灵敏的参量^[9,20]。

在实验中,每一事件的反应平面都是未知的,通常是采用矢量 \mathbf{Q} 与 z 轴来确定反应平面,

$$\mathbf{Q} = \sum \mathbf{p}'(\mu) \omega(\mu), \quad (4)$$

其中, $\omega(\mu) = \pm 1$ 对于快度 $y - y_{\text{CM}} \geq \pm \delta$ 的重子;

$\omega(\mu) = 0$ 对于快度 $|y - y_{\text{CM}}| < \delta$ 的重子以及所有 π 介子。

式中 $\mathbf{p}'(\mu)$ 是第 μ 个被检测粒子的横向动量, y_{CM} 是系统的质心快度。第 ν 个粒子的方位角则由下式计算:

$$\phi(\nu) = \cos^{-1}(p_x(\nu) / |\mathbf{p}'(\nu)|) \quad (5)$$

其中,

$$p_x(\nu) = \mathbf{p}'(\nu) \cdot \mathbf{Q} / |\mathbf{Q}|$$

由于在 $p_x(\nu)$ 的计算中,没有去掉自相关项,采用(5)式计算粒子方位角,自相关效应将会影响对方位角分布非对称性的分析。图 1 给出的方格标记是对蒙特卡罗事件计算的方位角分布,它指明了这种影响的存在。这里采用的蒙特卡罗事件是将不同实验事件(多重数相同)的轨迹随机组合而产生的^[3],它的方位角分布应是均匀的。使用 Danielewicz 消除自相关的方法^[3],由下式计算末态粒子的方位角,

$$\phi'(\nu) = \cos^{-1}(p'_x(\nu) / |\mathbf{p}'(\nu)|) \quad (6)$$

其中

$$p'_x(\nu) = \frac{\mathbf{p}'(\nu) \cdot \mathbf{Q}'_\nu}{|\mathbf{Q}'_\nu|}, \quad \mathbf{Q}'_\nu = \sum_{\mu \neq \nu} \mathbf{p}'(\mu) \omega(\mu).$$

式中 $\mu \neq \nu$ 消除了自相关的影响。 Q' 与 z 轴确定的平面称为估计反应平面。 $\phi'(\nu)$ 的分布函数为:

$$d\sigma/d\phi' = 1 + \lambda' \cos\phi' \quad (7)$$

图 1 的黑圆是对蒙特卡罗事件消除自相关后计算的方位角分布, 与消除自相关前的计算结果(方格)比较, 因自相关产生的方位角分布的非对称性已被消除。

图 2 是在消除自相关后, 对实验事件及由 VUU 理论产生的模拟事件计算的方位角分布, 快度范围在 $y > 0.75y_{beam}$ 区间。三条曲线的参数 λ' 分别为: 0.25 ± 0.02 (实验)、 0.17 ± 0.01 (软核媒质)、 0.34 ± 0.01 (硬核媒质); 由(3)式可计算方位角分布的最大非对称性 R' : 1.67 ± 0.07 (实验)、 1.41 ± 0.03 (软核媒质)、 2.03 ± 0.05 (硬核媒质)。

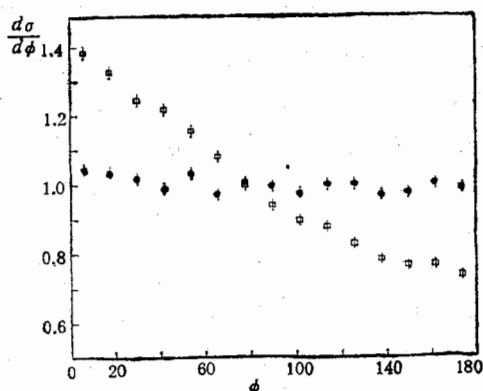


图 1 在未消除自相关的条件下, 对蒙特卡罗事件计算的方位角分布(方格标记); 消除自相关后, 对蒙特卡罗事件计算的方位角分布(黑圆标记)

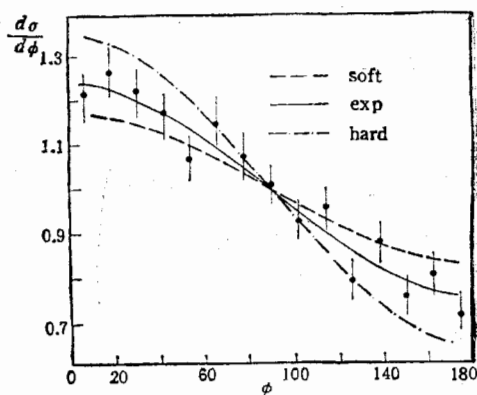


图 2 在消除自相关后, 对 1.2A GeV Ar + KCl 碰撞实验事件及 VUU 理论模拟事件计算的方位角分布, 快度范围在 $y > 0.75y_{beam}$ 区间

由于估计反应平面与真实反应平面间的夹角 ϕ_r 是一离散变量, R' 将低于真实的方位角分布最大非对称性。若 ϕ_r 的均方根值 $\Delta\phi$ 是已知的, 根据 R' 就可估计真实的方位角分布最大非对称性。假设 ϕ_r 的分布函数是高斯函数^[9],

$$N(\phi_r) = \frac{1}{\Delta\phi\sqrt{2\pi}} \exp(-\phi_r^2/2\Delta\phi^2) \quad (8)$$

方位角分布非对称性的真值可由

$$R = [1 + \lambda' \exp(\Delta\phi^2/2)] / [1 - \lambda' \exp(\Delta\phi^2/2)]$$

估计。在实验事件中, $\Delta\phi$ 大约是 55° (计算方法见文献 3), R 值减少约 30%。对 VUU 模拟事件, 可以采用(1)、(2)式直接计算末态粒子方位角分布的最大非对称性, 它们是: $R = 1.98 \pm 0.05$ (软核媒质)、 3.10 ± 0.10 (硬核媒质)。和 R' 值比较, 对应于软核媒质及硬核媒质, 估计反应平面方位角的离散使 R 值分别下降了约 30% 和 33%。

在实验数据分析中, 为消除估计反应平面的离散对方位角方法计算结果的影响, 本文提出由方位角关联函数计算方位角分布最大非对称性。

在相对论重离子碰撞中, 当研究集合侧向流引起的粒子方位角关联效果时, 可以认

为二个末态粒子方位角的几率分布是互相独立的。影响这个假定的主要因素是：末态粒子之间的库仑相互作用，以及全同粒子的量子统计效应。这二种因素主要影响小动量差 $|\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| \leq 50 \text{ MeV}/c$ 的粒子对。这种粒子对的数目在实验样本中仅占总粒子对数目的千分之三，因而可以略去不计。这样，由(2)式，在一个事件中，二个末态粒子方位角分别是 ϕ_1, ϕ_2 的几率为：

$$d^2\sigma/d\phi_1 d\phi_2 = A^2(1 + \lambda \cos \phi_1)(1 + \lambda \cos \phi_2) \quad (9)$$

则二粒子横向动量间的夹角 ψ 的分布几率为：

$$P(\psi) = A^2 \cdot (1 + 0.5\lambda^2 \cos \psi)$$

利用 π 干涉学处理关联函数的方法^[21]，定义方位角关联函数为：

$$C(\psi) = P(\psi)/PM(\psi) \quad (10)$$

其中， $PM(\psi)$ 是在蒙特卡罗事件中，二粒子横向动量间夹角为 ψ 的分布几率。同一事件中的二个粒子组成相关粒子对，蒙特卡罗事件中的二个粒子组成非相关粒子对。方位角关联函数 $C(\psi)$ 的计算，就是计算具有方位角差 ψ 的相关粒子对与非相关粒子对数目的比值。

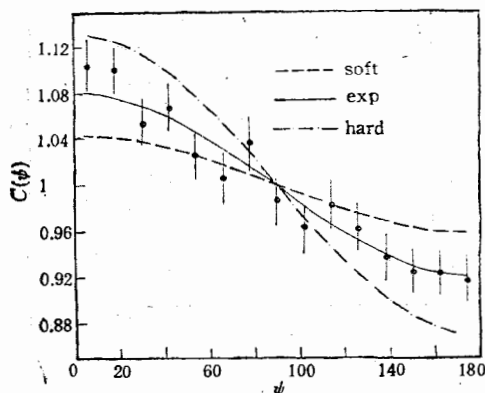


图3 对 1.2A GeV Ar + KCl 碰撞实验事件及 VUU 理论模拟事件计算的方位角关联函数 $C(\psi)$ ，快度范围在 $y > 0.75 y_{\text{beam}}$ 区间

图3是对实验及 VUU 模拟事件计算的 $C(\psi)$ 。粒子快度的取值区间是 $y > 0.75 y_{\text{beam}}$ 。对于 571 个实验事件，共组成了 45000 个相关粒子对；由蒙特卡罗事件构成不相关的粒子对作为背景，统计数目是相关粒子对数目的 10 倍。三条曲线的参数 λ 分别为： 0.41 ± 0.03 (实验)、 0.31 ± 0.01 (软核媒质)、 0.51 ± 0.02 (硬核媒质)；由(3)式求得 R 分别为： 2.39 ± 0.08 (实验)、 1.90 ± 0.04 (软核媒质)、 3.08 ± 0.06 (硬核媒质)。方位角关联函数对 VUU 模拟事件的计算结果和前面采用(1)、(2)式直接计算的结果基本一致，这是因为 ψ 是二个被测粒子横向动量的夹角，与反应平面的方位角无关，因而反应平面方位角的离散对分析结果不产生影响。

方位角关联函数的方法不需要确定每一事件的反应平面，因此在实验数据的测量过程中，轨迹的漏测，仅仅会减少计算的统计数目，增加计算结果的误差。例如，在将每一事件的粒子数随机的减少 40% 的条件下，采用方位角关联函数方法计算的 R 值分别为： 2.40 ± 0.15 (实验)、 1.96 ± 0.10 (软核媒质)、 2.97 ± 0.12 (硬核媒质)。与在未减少轨迹的条件下采用同样方法得到的分析结果比较，二个计算结果在误差范围内是吻合的。

结论：在 高能核-核碰撞的末态，粒子的方位角分布是一个对核媒质态方程敏感的参量。对于方位角方法，每一事件多重数的有限性，反应平面方位角的离散、自相关的消除等因素使得方位角分布最大非对称性的计算值低于真值。因此，在采用传输模型分析核媒质态方程的软硬程度时，以上因素的影响就必须加以考虑。方位角关联函数以二粒子横向动量间的夹角为变量，与反应平面的方位角无关，从而消除了 在实验事件中反应平面

方位角的离散对分析结果的影响。本文采用方位角方法及方位角关联函数的方法对 Bevalac 流光室 1.2A GeV Ar + KCl 碰撞实验及其 VUU 理论模拟事件的分析说明, 核媒质态方程的倔强系数在 200MeV—380MeV 之间。

参 考 文 献

- [1] Erez Braun and Zeev Frankel, *Phys. Rev.*, **C34** (1986), 120.
- [2] H. A. Gustafsson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 1590.
- [3] P. Danielewicz and G. Odyniec, *Phys. Lett.*, **157B** (1985), 146.
- [4] D. Beavis et al., *Phys. Rev.*, **C33**(1986), 1113.
- [5] K. G. R. Doss et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 302.
- [6] D. Keane et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 1447.
- [7] D. Keane et al., in Proceedings of Winter School on Nuclear Physics, Les Houches, France, 1989. Nuclear Matter and Heavy Ion Collisions, ed. M. Soyeur, Plenum, N. Y.
- [8] D. Beavis et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 1652.
- [9] G. M. Welke et al., *Phys. Rev.*, **C38** (1988), 2104.
- [10] H. Kruse et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 289.
- [11] J. J. Molitoris et al., *Phys. Lett.*, **162B**(1985), 47.
- [12] J. J. Molitoris et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 1014.
- [13] E. A. Uehling and G. E. Uhlenbeck, *Phys. Rev.*, **43**(1933), 552.
- [14] C. Gale et al., *Phys. Rev.*, **C35** (1987), 1666.
- [15] M. Prakash et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 2253.
- [16] D. Beavis et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 2443.
- [17] S. Y. Fung et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 292.
- [18] M. Vient, Ph. D. Thesis, University of California, Riverside (1988).
- [19] D. Keane et al., in Proceedings of the 2nd Conference on the Intersection between Particle and Nuclear Physics, Lake Louise, Alberta, 1986, edited by D. F. Geesaman (American Institute of Physics, New York, 1986), p. 844.
- [20] G. F. Bertsch and S. Das Gupta, *Phys. Rep.*, **160**(1988), 189.
- [21] Y. M. Liu et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986), 1667.

AZIMUTHAL CORRELATION FUNCTION AND THE NUCLEAR EQUATION OF STATE

WANG SHAN LIU YIMING JIANG YUZHEN CHEN XIAOFAN

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin)

D. KEANE

(Department of Physics, Kent State University, Kent, Ohio 44242)

S. Y. FUNG S. Y. CHU

(Department of Physics, University of California, Riverside, Ca 92521)

ABSTRACT

Collisions of 1.2 A GeV Ar on KCl in the Bevalac Streamer Chamber are studied using two methods: azimuthal distribution analysis and azimuthal correlation function analysis. Comparing with the Vlasov-Uehling-Uhlenbeck model predictions for different nuclear equations of state, the stiffness of the high density nuclear matter is estimated. The maximum azimuthal anisotropy inferred from the azimuthal distribution method is decreased by about 30% because of dispersion of the azimuthal angle of the reaction plane. This distortion can be eliminated by using the azimuthal correlation function analysis proposed in this paper.