

π 干涉学分析中的吸收关联*

霍雷 张卫宁 王山 刘亦铭

(哈尔滨工业大学理论物理教研室 哈尔滨 150001)

D. Keane

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

S. Y. Chu S. Y. Fung

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

1993年5月31日收到

摘 要

本文研究了吸收关联对 π 干涉学分析结果的影响,用VUU模拟数据探讨了消除这种影响的方法,对Bevalac流光室1.8A GeV Ar + Pb碰撞的实验数据进行了分析。吸收关联使得通常 π 干涉学获取的源参数小于真实值,适当的选取背景可以消除吸收关联的影响。

关键词 π 干涉学,方位角分布,吸收关联,关联函数。

1 引 言

π 介子之间的玻色-爱因斯坦关联导致关联函数在小相对动量区域有明显的升高。 π 干涉学的基本原理是,关联函数的这种升高与 π 源的时空结构具有紧密的联系^[1-4]。现在 π 干涉学已经成为相对论重离子碰撞物理学的一个十分重要的分支,通过 π 干涉学人们能够获取相对论核-核碰撞过程中 π 发射源的时空结构、演变过程、相干程度以及有关动力学的重要信息^[5]。碰撞过程是相当复杂的,许多因素,诸如末态相互作用、核屏蔽、不同碰撞参数和事件拓扑的平均等,都会影响对 π 干涉学分析结果的解释^[6]。因此,使用 π 干涉学获取正确的源的时空信息,必须对这些复杂因素逐一加以分析,扣除它们的影响。

最近人们在相对论性质量非对称的核-核碰撞实验中发现,末态 π 介子在整个快度区域都趋向于较轻的入射核一侧发射,其方位角分布具有明显的非对称性。研究表明^[7-9],这主要是旁观者的屏蔽效应造成的。重靶核旁观者一侧的强吸收作用使末态 π 介子在入射轻核一侧出现的几率变大,在 π 介子间形成了一种与玻色-爱因斯坦统计无关的关联效应(以下简称吸收关联)。由于吸收关联导致了末态 π 介子在玻色-爱因斯坦对称化以外

* 国家自然科学基金、高等学校博士点专项基金、美国国家科学基金资助。

的动量关联,因此吸收关联的存在是否会影响 π 干涉学分析结果的解释、如何在 π 干涉学分析结果中消除吸收关联的影响等是十分有意义的研究课题。

本文首先对 2π 关联函数和我们所用的 Bevalac 流光室 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞的实验数据作了简略的回顾;然后用 VUU 模拟数据探讨了在 π 干涉学分析结果中消除吸收关联的方法,在第四节中,对 Bevalac 流光室 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞的实验数据进行了分析。最后,给出了本文的结论。

2 2π 关联函数

全同 π 介子间具有玻色-爱因斯坦关联。假定碰撞过程中发射的 π 介子可以用平面波函数 $\psi_p(x)$ 描述,如果归一化的 π 源密度分布函数为 $\rho(x)$, 2π 关联函数一般可以写成^[1,2]:

$$C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \frac{\int d^4x d^4y \rho(x) \rho(y) |\psi_{\mathbf{p}_1}(x) \psi_{\mathbf{p}_2}(y) + \psi_{\mathbf{p}_2}(x) \psi_{\mathbf{p}_1}(y)|^2}{\int d^4x \rho(x) \psi_{\mathbf{p}_1}^*(x) \psi_{\mathbf{p}_1}(x) \int d^4y \rho(y) \psi_{\mathbf{p}_2}^*(y) \psi_{\mathbf{p}_2}(y)}$$

$$= 1 + \frac{|\tilde{\rho}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)|^2}{\tilde{\rho}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_1) \tilde{\rho}(\mathbf{p}_2, \mathbf{p}_2)}, \quad (1)$$

式中 $\tilde{\rho}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \int \rho(x) \psi_{\mathbf{p}_1}^*(x) \psi_{\mathbf{p}_2}(x) d^4x$ 为源密度分布函数 $\rho(x)$ 的傅里叶变换。

关联函数的函数形式依赖于源密度分布形式 $\rho(x)$ 。假定源密度分布为高斯型,考虑到 π 源的相干性, 2π 关联函数的形式是^[1-3]:

$$C(q, q_0) = 1 + \lambda \exp(-q^2 R^2 / 2 - q_0^2 \tau^2 / 2), \quad (2)$$

式中, q 和 q_0 分别为两 π 介子的相对动量值和相对能量; R 和 τ 分别为高斯分布下 π 源的时空参数; λ 为相干因子。

在数据分析中, 2π 关联函数值由下式给出^[2,3]:

$$C(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = \kappa \frac{\text{Cor}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}{U_{\text{ncor}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)}, \quad (3)$$

式中 $\text{Cor}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ 为关联 π 介子的对数,关联 π 对由取自同一碰撞事件的两个 π^- 介子构成; $U_{\text{ncor}}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ 为背景 π 对数,背景 π 对由多重数相同的两个不同事件中各取一个 π^- 介子构成, κ 是归一化常数。用方程(2)的函数形式对方程(3)给出的关联函数值拟合,就可以获得相应的源参量。

实验数据取自劳伦兹伯克利实验室的 Bevalac 流光室 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞实验。对应于简单的几何模型,该实验触发器的判选相当于选取碰撞参数大约在 0—5.0fm 之间的事件。为了消除电子污染及多次散射对取样的影响,对 π^- 介子的实验室动量作了截断 ($p_{\text{lab}} \geq 100\text{MeV}/c$)。在这种条件下,共得到 3200 个负 π 多重数大于 2 的事件,事件的平均负 π 介子多重数为 9。分析中所构成的关联 π 介子对数为 98500 对。这个实验的详细描述可参考文献[3]。由于时间因子对 Bevalac 流光室数据的 π 干涉学分析不敏感^[3],本文的分析中固定方程(2)中的 τ 值为 0。

3 吸收关联

在相对论性质量非对称的核-核碰撞实验中(轻入射核,重靶核),重靶核旁观者一侧对碰撞区域发射的 π 介子的吸收作用较强,末态 π 介子的方位角分布具有明显的非对称性,可以用下式描述^[6,9],

$$\frac{dN}{d\phi} = A[1 + \xi \cos(\phi - \psi)], \quad (4)$$

式中 ϕ 和 ψ 分别为末态 π 介子和事件反应平面的方位角, ξ 为非对称因子, A 是归一化常数。

末态的非对称吸收使 π 介子在入射轻核一侧出现的几率变大,在 π 介子间形成了吸收关联。Gyulassy 认为^[10],旁观者的吸收作用使描述单 π 介子的波函数 $\phi_p(x)$ 降低 $f(p_i, \theta_i, \phi_i - \psi)$ 倍,其中 θ_i, ϕ_i 分别为第 i 个 π 介子的动量矢量 p_i 的极角和方位角, ψ 为事件反应平面的方位角。用 C_f 表示引入因子 $f(p_i, \theta_i, \phi_i - \psi)$ 后的关联函数, C_f 能够写为:

$$\begin{aligned} C_f(p_1, p_2) &= \frac{f(p_1, \theta_1, \phi_1 - \psi)f(p_2, \theta_2, \phi_2 - \psi)}{f(p_1, \theta_1, \phi_1 - \psi_1)f(p_2, \theta_2, \phi_2 - \psi_2)} C(p_1, p_2) \\ &= R(p_1, p_2)C(p_1, p_2), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ψ_i 为构成背景 π 对时,选取第 i 个 π 介子的事件的反应平面的方位角。函数 $R(p_1, p_2)$ 为修正因子,它描述了末态 π 介子间的吸收关联。由方程(5)可以看出,如果对每一事件测量反应平面,然后转动事件使它们的反应平面相互平行,则 $\psi = \psi_1 = \psi_2$, $R(p_1, p_2) = 1$, π 介子吸收关联对 2π 干涉学结果的影响可以被消除。

在 VUU 唯象模型中^[11],模拟事件的反应平面预先已经确定,可以利用 VUU 事件对 $1.8A$ GeV Ar + Pb 碰撞实验中吸收关联对 2π 干涉学结果的影响作一分析。VUU 事件中, π 介子处理为经典粒子,为反映其是玻色子的特点,进行干涉学分析时,应在 π 介子间加入玻色-爱因斯坦关联。我们记录下每个末态 π 介子的动量及产生的时空位置,采用 Humanic 提出的方法^[12],在末态 π 介子中随机挑选 π 对,并用因子:

$$W(p_1, p_2) = |\phi_{p_1}(x_1)\phi_{p_2}(x_2) + \phi_{p_1}(x_2)\phi_{p_2}(x_1)|^2.$$

对这个 π 对加权,获得关联 π 对。我们分别采用下面两种方法构成背景 π 对:

a) 由反应平面相互平行的二个不同 VUU 事件中各随机挑选一个 π 介子构成背景 π 对。这时背景谱中的 π 介子与关联 π 对中的 π 介子具有相同的方位角分布。

b) 将每一个 VUU 事件绕入射轴随机旋转,使事件反应平面的方位角呈随机分布,然后由两个不同事件中各随机挑选一个 π 介子构成背景 π 对。这样的背景谱与以往 π 干涉学分析时使用的背景谱一致。

表 1 给出了(a)、(b)两种背景下分别对 $1.8A$ GeV Ar + Pb 碰撞的软、硬 VUU 模拟事件的 2π 干涉学分析结果。分析时相应于软、硬 VUU 模拟事件所产生的关联 π 介子对数均为 60 万对,是相应的实验数据统计数的 6 倍。背景 π 对数取为关联 π 对数的 20 倍,所使用的关联函数为方程(2)。

表 1 对 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞的 VUU 模拟事件的 2π 干涉学分析结果

	(a)			(b)		
	$R(\text{fm})$	λ	$\langle r \rangle(\text{fm})$	$R(\text{fm})$	λ	$\langle r \rangle(\text{fm})$
软	5.92 ± 0.23	0.98 ± 0.07	6.68 ± 0.26	5.34 ± 0.20	0.95 ± 0.07	6.02 ± 0.23
硬	6.19 ± 0.24	1.00 ± 0.08	6.98 ± 0.27	5.39 ± 0.22	0.96 ± 0.07	6.08 ± 0.25

(a) 事件反应平面相互平行 (b) 事件反应平面绕入射轴随机旋转

由于 2π 干涉学获取的源空间参数反映的是 π 发射源的平均半径^[4], 表 1 中, 我们给出了与源参数 R 值相应的源平均半径值 $\langle r \rangle$ 。另一方面, 我们根据末态 π 介子产生时的空间位置, 直接计算了相应于软、硬 VUU 事件的源平均半径, 结果分别为 $6.65 \pm 0.06 \text{fm}$ 和 $6.95 \pm 0.06 \text{fm}$ 。可以看出, 若构成背景谱时, 不同碰撞事件的反应平面彼此平行, 2π 干涉学和直接计算给出的源平均半径的结果在误差范围内是一致的, 消除了吸收关联的影响; 吸收关联使通常 2π 干涉学获取的源空间线度值偏小约 5% 左右; 吸收关联对相干因子 λ 的影响可以忽略。

4 实验数据分析

对于实验数据, 人们通常利用碰撞过程中发射核子的横向动量对事件的反应平面进行估计^[13]。但在 Bevalac 流光室 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞的实验数据中, 仅测量了末态的负 π 介子, 事件的平均 π 多重数为 9。由于 π 介子的质量较轻, 仅仅利用 π 介子的横向动量估计事件的反应平面, 估计反应平面与真实反应平面之间存在很大的离散。分析表明, 只有当事件的 π 多重数大于 9 时, 才有可能利用 π 介子的横向动量来估计事件的反应平面^[8,14]。因此, 对这一实验事件进行干涉学分析时, 利用旋转事件平行排列反应平面的方法消除吸收关联的影响是十分困难的。

构成背景谱时, 旋转事件使不同事件的反应平面彼此平行, 相当于旋转了背景 π 对中每一个 π 介子的方位角, 使得背景谱和实验事件中的 π 介子具有相同的方位角非对称分布。因此, 如果已知事件中末态 π 介子的方位角分布, 可以按照这种分布旋转通常所用背景中的每一个 π 介子的方位角, 形成新的背景谱。这样, 不需要知道事件的反应平面, 能够对吸收关联的影响加以修正。另一方面, 利用方位角关联函数方法^[8,15], 可以不需要知道事件的反应平面, 直接计算出方程(4)中的非对称因子 ξ , 决定事件中 π 介子的方位角分布。

方位角关联函数 $C_A(\alpha)$ 的定义为^[8,15]:

$$C_A(\alpha) = \frac{P(\alpha)}{PM(\alpha)}. \quad (6)$$

式中 $P(\alpha)$ 为同一事件中两个末态 π 介子横向动量间的夹角 α 的几率分布, 由方程(4)可以得出:

$$P(\alpha) = A^2[1 + 0.5\xi^2 \cos(\alpha)]; \quad (7)$$

$PM(\alpha)$ 是将不同碰撞事件中的 π 介子随机组合而构成的蒙特卡罗事件中, 两个 π 介子

横向动量间的夹角 α 的几率分布。利用方程(6)分别对 Bevalac 流光室 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞的实验数据及相应的软、硬 VUU 模拟数据进行分析, 所得结果为:

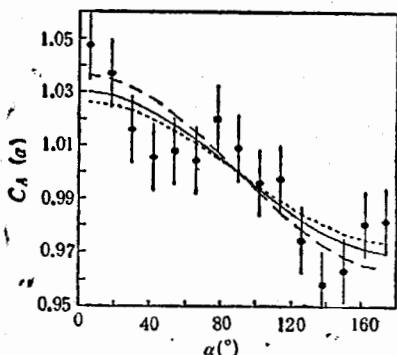
$$\text{软} \quad \xi = 0.23 \pm 0.02$$

$$\text{硬} \quad \xi = 0.27 \pm 0.02$$

$$\text{实验} \quad \xi = 0.25 \pm 0.02.$$

拟合曲线及实验数据如图 1 所示。方位角非对称因子的实验结果与软、硬核媒质态方程 VUU 模拟结果在误差范围内是一致的, 这意味着对整个快度区间的末态 π 介子而言, 吸收是产生 π 介子非对称发射的主要原因。

图 1 对 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞的实验数据(实线)及软(点虚线)、硬(虚线) VUU 模拟事件计算的方位角关联函数 $C_A(\alpha)$



进行干涉学分析时, 新背景谱构成的方法是, 首先按通常的方法由两个多重数相同的不同碰撞事件中各随机挑选一个 π 介子构成一个背景 π 对, 然后保持背景中每一个 π 介子的动量模和极角不变, 但是方位角按照事件中末态 π 介子方位角的非对称分布随机抽样, 重新赋值, 形成一个新的背景 π 对。利用这样的背景谱对 VUU 数据进行分析, 所得的结果为:

$$\text{软} \quad R = 5.93 \pm 0.22 \text{fm}, \quad \lambda = 1.01 \pm 0.07,$$

$$\text{硬} \quad R = 6.11 \pm 0.26 \text{fm}, \quad \lambda = 0.97 \pm 0.08.$$

与表 1 中利用真实反应平面(背景 a) 情况下的计算结果在误差范围内一致, 消除了吸收关联影响。

对 Bevalac 流光室 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞实验, 以往的 2π 干涉学分析结果为^[3]:

$$R = 5.53 \pm 0.38 \text{fm}, \quad \lambda = 0.99 \pm 0.13.$$

消除吸收关联后的分析结果为:

$$R = 5.87 \pm 0.43 \text{fm}, \quad \lambda = 1.02 \pm 0.15.$$

可以看到, 在目前流光室的实验精度范围内不能察觉吸收关联的影响。

5 结 论

在相对论性质量非对称的核-核碰撞中, 重靶核旁观者的屏蔽效应在 π 介子间形成的吸收关联使 π 干涉学分析获取的源空间参数较真实值偏小。为了获得正确的源的时空信息, 在干涉学的分析中, 可以通过背景的选择消除吸收关联的影响。新的背景可以用下面两种方法构成: 一种方法是首先确定事件的反应平面, 然后旋转事件, 使不同事件的反应平面彼此平行, 再由两个不同事件中各随机挑选一个 π 介子组成一个背景 π 对; 另一种方法是利用方位角关联函数方法获得事件中末态 π 介子的方位角分布, 然后按这一分布随机抽样, 对通常使用的背景谱中的每一个 π 介子的方位角重新赋值, 形成新的背景谱。后一种方法和事件反应平面能否确定无关, 因此当事件反应平面无法确定或估计反应平面离散程度较大时, 可以对吸收关联的影响进行修正。对 1.8A GeV Ar + Pb 碰撞的软、硬

VUU 模拟事件和 Bevalac 流光室实验数据的分析表明, 吸收关联使得通常 π 干涉学分析获取的源空间参数值偏小约 5% 左右; 目前流光室的实验精度掩盖了吸收关联的影响。随着未来越来越高能量相对论性核-核碰撞实验中数据统计数的增加, 在 π 干涉学分析中考虑全同粒子玻色-爱因斯坦对称化以外各种关联的影响, 对于获取正确的源时空信息将是重要的。

参 考 文 献

- [1] M. Gyulassy, S.K. Kauffmann and L.W. Wilson, *Phys. Rev.*, **C20**(1979)2267.
- [2] W.A. Zajc et al., *Phys. Rev.*, **C29**(1984)2173.
- [3] D. Beavis et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986)757.
- [4] 刘亦铭等, 高能物理与核物理, **15**(1991)123; Y.Z. Jiang et al., *Phys. Rev.*, **C44**(1991) 1957.
- [5] D.H. Boal, C.K. Gelbke and B.K. Jennings, *Rev. Mod. Phys.*, **62**(1990)553; D.L'Hôte, *Nucl. Phys.*, **A545**(1992)381c.
- [6] Y.M. Liu et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986) 1667; 刘亦铭, 核物理动态, **6**(1989)30.
- [7] D. Keane et al., "Collective flow of pions produced in nucleus-nucleus collisions", in Proc. of the Nuclear Dynamics Workshop IV, Cooper Mountain, Colorado, p. 151(1986).
- [8] 王 山等, 高能物理与核物理, **17**(1993)533.
- [9] B.A. Li, W. Bauer and G.F. Bertsch, *Phys. Rev.*, **C44**(1991) 2095; J.P. Alard et al., Rapport DPh-N/Saclay n°2583B, "Anisotropy of the pion emission in relativistic nucleus-nucleus collisions", DPHN 90-4(1990).
- [10] M. Gyulassy, *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982)454.
- [11] H. Kruse, B.V. Jacak, and H. Stöcker, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985)289, J.J. Molitoris, and H. Stöcker, *Phys. Lett.*, **162B**(1985)47; J.J. Molitoris et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988)1014.
- [12] T.J. Humanic, *Phys. Rev.*, **C34**(1986)191.
- [13] P. Danielewicz and G. Odyniec, *Phys. Lett.*, **157B**(1985)146.
- [14] Y.M. Liu et al., "Pion correlation in Ar on Pb collisions at 1.8GeV/nucleon", Proc. of international workshop on quark-gluon structure of hadrons and nuclei, p. 201, edited by Kisslinger L.S. and Qiu Xijun, Shanghai, (1990).
- [15] S.Wang et al., *Phys. Rev.*, **C44**(1991) 1091; 王山等, 高能物理与核物理, **14**(1990)907.

Absorption Correlation in Pion Interferometry Analyses

Huo Lei Zhang Weining Wang Shan Liu Yiming

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

D. Keane

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

S.Y. Chu S.Y. Fung

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

Received on May 31, 1993

Abstract

The effect of absorption correlation on the analyzed results of pion interferometry is studied. The way to remove this effect is discussed by using the data from VUU simulation. The data for collisions of 1.8A GeV Ar+Pb at the Bevalac streamer chamber are analyzed. The spatial parameter of the source extracted from pion interferometry is less than the true value due to the absorption correlation. The effect of absorption correlation can be eliminated by properly constructing the background.

Key words pion interferometry, azimuthal distribution, absorption correlation, correlation function.