

极化分析技术

叶云秀 季 刚 苏淑芳* 朱国怀* 吴 宁

(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 叙述了对在相对论核-核碰撞中产生的 Λ 粒子的极化分析技术。分析结果表明, 分析系统工作可靠, 物理结果合理。

关键词 相对论核-核碰撞, Λ 粒子, 自旋方向, 横动量, 横向极化度

对 Λ 粒子的极化度进行分析有助于对核反应过程中动力学机制的了解;对量子色动力学(QCD)的适用性也是一种检验^[1]。对于在相对论核-核碰撞中产生的 Λ 粒子的极化分析还是对核反应过程中是否形成夸克-胶子等离子体(QGP)的一种有效诊断手段^[2]。因此我们建立了一套极化分析系统。

我们利用欧洲原子核研究中心(CERN)SPS加速器上NA36国际合作组的原始实验数据, 对反应中所产生的 Λ 粒子进行极化分析。

1 实验基本情况

实验束流为 ^{32}S 和 P , 能量为每核子200GeV, 轰击固定铅靶, 在靶下游有一个直径为45cm、长为80cm的 Λ 粒子衰变真空室;在真空室下游是高和宽各为50cm、长为103cm的时间投影室(TPC), 它置于2.7T的垂直磁场中。 Λ 粒子的衰变产物的各动量分量在TPC中被测定, 测量精度为10%。由图像识别程序检出反应中的两分叉事例。

2 实验分析方法

2.1 Λ 粒子的选择

由图像识别程序检出的两分叉事例包括 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 的衰变 $\Lambda \rightarrow \text{p} + \pi^- (\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{\text{p}} + \pi^+)$, $\text{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma \rightarrow 2e^+e^-$, $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+e^-$ 等。 γ 光子转换到正、负电子对的两分叉事例可以由几何截取条件将其排除, 因为这类转换大多数是在真空室壁、TPC阴极板以及铀铁等物质中进行的。极少量的转换在探测器气体中或密封窗中进行, 由于他们的横动量极小, 用极小横动量截取条件可排除这部分本底^[3]。在TPC中测量到两粒子的各动量分量, 由此作出不变质量谱。将不变质量 M_x 在 $m_\Lambda \pm \Delta m_\Lambda$ 范围内的粒子取作 Λ 粒子, 这里我们取 $\Delta m_\Lambda/m_\Lambda = 5.0\%$ 。

2.2 极化参考方向的确定

根据理论模型, Λ 粒子的自旋方向也即极化方向应垂直于它的产生平面^[4]。产生平面的法线方向定义为

$$\hat{n} = \mathbf{P}_b \times \mathbf{P}_\Lambda / |\mathbf{P}_b \times \mathbf{P}_\Lambda| \quad (1)$$

* 中国科学技术大学少年班

收稿日期:1995-06-28, 修回日期:1996-06-04

式中, $\hat{n}$ 是产生平面的法线方向上的单位矢量, $\mathbf{R}_b$ 和 $\mathbf{P}_\Lambda$ 分别为束流和 Λ 粒子在实验室系中的动量。 $\mathbf{R}_b$ 的方向和大小是固定的; $\mathbf{P}_\Lambda$ 的方向和大小随每次产生的 Λ 而变。因此对每个 Λ 粒子需确定它的产生平面和相应的法线方向。

已知 $\mathbf{R}_b$ 为实验室坐标系的 X 轴方向, 我们把各个事例的 Λ 粒子在实验室坐标系 ($OXYZ$) 中的动量的方向余弦定义为

$$\alpha_i = P_i / |\mathbf{P}_\Lambda|, \quad i=1,2,3 (P_1, P_2, P_3 \text{ 分别为 } P_x, P_y, P_z)$$

记 $\lambda_1 = 1/(\alpha_2^2 + \alpha_3^2)^{1/2}$, 作坐标旋转变换, 使 Λ 粒子的运动方向为旋转变换后坐标系 ($O'X'Y'Z'$) 中的 Z' 轴方向, 即新坐标系的 Z' 方向上单位矢量在实验室系中的方向余弦为 $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, 即

$$\mathbf{e}'_3 = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

由于极化(自旋)方向垂直于产生平面, 所以把 Y' 轴方向定义为 Λ 粒子的极化方向, 即

$$\mathbf{e}'_2 = (\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}'_3) = \begin{pmatrix} 0 \\ -\lambda_1 \alpha_3 \\ \lambda_1 \alpha_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

X' 轴方向则由坐标系的正交性质决定, 即

$$\mathbf{e}'_1 = \mathbf{e}'_2 \times \mathbf{e}'_3 = \begin{pmatrix} -\lambda_1(\alpha_2^2 + \alpha_3^2) \\ \alpha_1 \alpha_2 \lambda_1 \\ \lambda_1 \alpha_1 \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

由此得到坐标和动量的变换矩阵 A

$$A = \begin{pmatrix} -1/\lambda & \lambda_1 \alpha_1 \alpha_2 & \lambda_1 \alpha_1 \alpha_3 \\ 0 & -\lambda_1 \alpha_3 & \lambda_1 \alpha_2 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

这样就可以对每一个具有不同产生点、不同衰变点和不同动量的 Λ 粒子完成从实验室坐标系到具有 Λ 粒子极化参考方向的坐标系中的变换, 对其衰变产物的动量也可作同样的转换。

2.3 Λ 粒子的静止坐标系

Λ 粒子的极化分析是在相对于它为静止的坐标系中进行的。由于所产生的 Λ 粒子在实验室系或旋转后的坐标系中作高速运动, 所以当把一些必要的物理量转换到以 Λ 粒子为静止的坐标系 ($O'X'Y'Z'$) 中时, 需作 Lorentz 变换。分别用 $X_\mu = (\mathbf{x}, t)$ 和 $P_\mu = (\mathbf{p}, E)$ 代表时空和能动量的四矢量, 沿着 Λ 粒子运动方向, 即沿 Z' 方向作 Lorentz 变换, 则变换矩阵 $A_{\mu\nu}$ 为

$$A_{\mu\nu}(\beta_z') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & -\beta_z \gamma \\ 0 & 0 & -\beta_z \gamma & \gamma \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, $\beta_z' = P_\Lambda'/E, E = (P_\Lambda'^2 + m_\Lambda^2)^{1/2}, m_\Lambda$ 为 Λ 粒子的静止质量(取 $c=1$); $\gamma = (1 - \beta_z'^2)^{-1/2}$ 。

2.4 角分布、横动量、横向极化度

取 $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ 衰变道, 在 Λ 静止坐标系中观察衰变产物 p 或 π^- 的分布情况。根据弱衰变理论, 由于宇称守恒律的破坏, Λ 衰变产物将有一个 s 波和 p 波的混合, 它们表现在对于产生

平面上、下的分布有一个不对称性。这个不对称性称为横向极化度，它定义为

$$P = (2/\alpha) \cdot (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow}) \tag{7}$$

式中， α 是不对称参数，对于 Λ ， $\alpha = 0.642$ ， $N_{\uparrow}$ 、 $N_{\downarrow}$ 分别表示在产生平面上、下的衰变粒子 p 或 π^- 的计数。由于极化方向即为所取坐标系中的 Y' 方向，因此实际上，质子或 π^- 的动量与 Y' 方向的点乘积(即 $\cos \theta$) > 0 时即属于 $N_{\uparrow}$ ，反之，属于 $N_{\downarrow}$ 。

根据 Λ 粒子的极化机制模型，极化度的大小还与 Λ 的横动量相关。 Λ 粒子的横动量定义为垂直于入射束流方向的动量，即在实验室系中的 $P_{\perp} = (P_y^2 + P_z^2)^{1/2}$ 。

3 实验结果和讨论

我们用以上讨论的方法对每核子 200GeV 的 $S + Pb$ 相互作用中产生的 Λ 粒子进行了极化分析。在 Λ 静止坐标系中测得了 Λ 粒子衰变质子相对于 Λ 粒子的自旋方向的角分布，如图 1 所示。从图 1 可以看出，相对于 $\cos \theta = 0$ 的左右有一个不太大的非对称分布，测得的总的横向极化度为 $P = 0.043 \pm 0.022$ 。

图 2 示出了横向极化度与 Λ 粒子的横动量的依赖关系。在小横动量范围($\leq 0.2\text{GeV}/c$)，横向极化度随横动量的增加而增加， $P_{\perp} = 0.1\text{GeV}/c$ 时， $P = 0.15$ ； $P_{\perp} = 0.2\text{GeV}/c$ 时， $P = 0.36$ 。这符合 Λ 极化机制的 Lund 模型，该模型认为由于“偏置”效应， Λ 粒子的极化度将随其横动量的增加而增加。从图 2 中还可以看到，当 $P_{\perp}$ 在 $0.2 - 1\text{GeV}/c$ 时，横向极化度随横动量的增加而减小，直至趋于零极化度，这个零极化度一直延伸到 $P_{\perp} = 2\text{GeV}/c$ 附近。根据 QCD 微扰理论的计算^[1]， Λ 粒子的横向极化度应该在 $P_{\perp} \geq 5\text{GeV}/c$ 时趋于零。不过，这一 QCD 预言是对反应中只形成强子气(HG)而言的。在相对论核-核碰撞中所产生的高温或高密度核物质有可能使反应发生相变，产生 QGP。在 QGP 中产生的 Λ 粒子是由三个不关联的 u 、 d 和 s 夸克组成的，它们将不呈现极化度。因此在较高横动量时，表明有产生或部分产生 QGP 的迹象，这与同类实验中用其他诊断方法所得的结果一致^[5]。

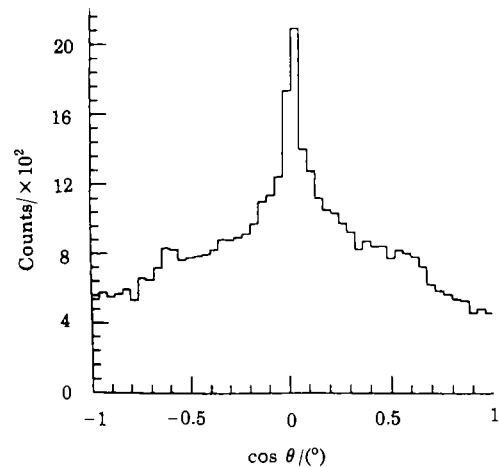


图1 Λ 粒子衰变质子的角分布
Fig.1 Angular distribution of protons from Λ particles

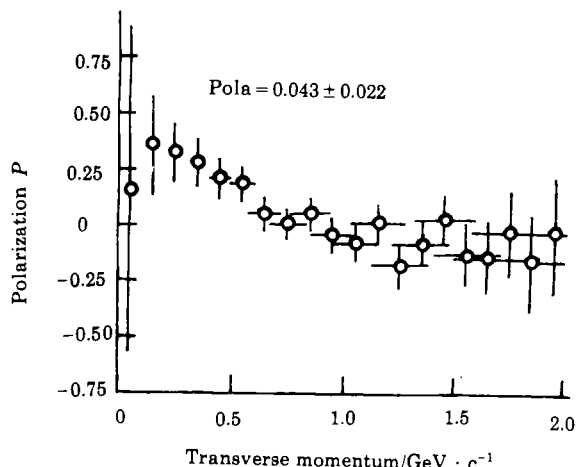


图2 Λ 粒子的横向极化度与横动量的依赖关系
Fig.2 Transverse polarization vs. transverse momentum for Λ particles

图 3 是对 200GeV 的“ $P + Pb$ ”相互作用所产生的 Λ 粒子的极化分析结果，横向极化度对

横动量的依赖关系与“P+Cu”产生的 Λ 粒子的结果有一致的趋势^[6]。数值上的差别是由靶质量的不同而造成的。

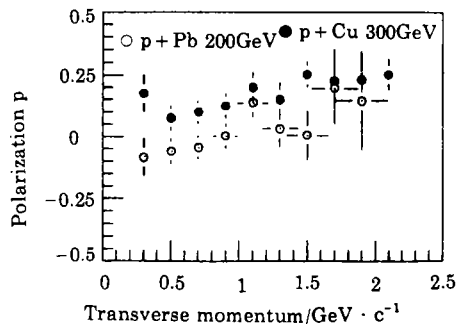


图3 P+Pb碰撞中产生的 Λ 粒子的横向极化与横动量的依赖关系

Fig.3 The dependence of transverse polarization on transverse momentum for Λ particles produced in the P+Pb collisions

4 结 论

我们的分析系统由两组人员用不同的方法独立完成,系统应用于每核子200GeV的“S+Pb”和“P+Pb”所产生的 Λ 粒子的极化分析,所得结果完全一致。分析所得的物理结果或与理论模型的预言一致,或预示着出现新的反应机制或 Λ 粒子的形成机制。这种极化分析技术还可推广应用于其他核与粒子的极化分析。

致谢 感谢NA36国际合作组提供原始实验数据。

参 考 文 献

- 1 Kane G L, Pumplin J, Repko W. Phys Rev Lett, 1978; 41:1689
- 2 Panagiotou A D. Phys Rev C, 1986; 33:1999
- 3 叶云秀. 中国科学技术大学学报, 1994; 24:361
- 4 Andersson B, Gustafson G, Ingelman G. Phys Lett B, 1979; 85:417
- 5 Andersen E, Barnes P D, Blaes R. Nucl Phys A, 1993; 533:817c
- 6 Heller K. Phys Rev Lett, 1983; 51:2025

A technique for polarization analysis

Ye Yunxiu Ji Gang Su Shufang Zhu Guohuai Wu Ning

(University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract

A technique of polarization analysis for Λ particles produced in relativistic heavy nucleus-nucleus collisions is described. It is shown that the analysis system is reliable and the obtained physical results are reasonable.

Key words Relativistic nucleus-nucleus collisions, Λ particles, Spin direction, Transverse momentum, Transverse polarization