

相对论核-核碰撞中产生的 Λ 超子的退极化原因探讨*

叶云秀^{1,1)} 陈志¹ 阮图南^{2,1} 沈激¹
吕海江¹ 董卫江¹ 萨本豪³ 台安⁴

1(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2(中国高等科学技术中心(世界实验室) 北京 100080)

3(中国原子能科学研究院 北京 102413)

4(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 对每核子 200GeV 的 S+Pb 中心碰撞中产生的 Λ 粒子的横向极化度消失的现象作了细致研究. 用相对论核-核碰撞的 Monte-Carlo 事例产生器——LUCIAE 产生了相应能量下的 S+Pb 中心碰撞事例, 定量地分析了消除 Λ 粒子横向极化度的各种因素, 研究了反应中的二次散射、二次产生以及 Σ , Ξ 等超子衰变产生的 Λ 粒子在总的实验测量到的 Λ 总数中的比例, 确定了由这些 Λ 粒子造成的退极化度对总的 Λ 极化度的影响. 模拟和计算结果表明, 以上 3 个效应强烈地影响了 Λ 的横向极化度, 但不可能使终态假定为强子气时 Λ 粒子的横向极化度完全消失. 为了解释 Λ 极化度近于零的实验结果, 可能需要在相对论重核碰撞中引进 Λ 粒子产生的新的机制, 包括存在形成夸克-胶子等离子体(QGP)的弱效应.

关键词 Λ 退极化 事例产生器 夸克-胶子等离子体

1 引言

实验证明, 在强子-核子、核子-核子、核子-核等碰撞中产生的 Λ 粒子有强的横向极化度, 并与其横动量关联^[1-3]. 在较低能量的核-核反应中, 也不同程度地测到了 Λ 的横向极化度^[4,5]. 有一些理论模型, 如半经典的 Lund^[6] 和 M-D^[7] 模型, 现代的 s 夸克散射模型^[8] 和 $SU(6)$ ^[9] 夸克模型各自部份地解释了这些实验现象. 无论在高能质子引起的反应, 还是在低能核-核反应中, 反应区中都只可能形成强子气, 形成的 Λ 粒子叫作领头(Leading)粒子, 它们之所以有较强的横向极化度, 用简单的 s 夸克模型来说, 在质子引

1998-12-17 收稿

* 国家自然科学基金(19675034, 19677102, 19775044)和 BEPC 国家实验室资助项目

1)E-mail: yeyx@ustc.edu.cn

起的反应中,入射质子中的 u 和 d 价夸克与反应中产生的 $s\bar{s}$ 对中的 s 海夸克组成 Λ 粒子. u, d 夸克处于自旋-同位旋单态,因而 Λ 粒子的自旋和它的极化度由 s 夸克决定. s 夸克在产生中是极化的. 而且由于“偏置效应”, Λ 粒子的极化度与其横动量相关联^[6].

在相对论核-核反应中,一方面,以“Clean-cut Geometry”模型而言,相对论核-核中心碰撞过程可以与高能核子-核子碰撞相比较,认为在核-核中心碰撞中,入射核的一个核子与靶核的 n 个核子相互作用, n 由下式决定, $n = c(A_{\text{靶}}/A_{\text{proj}})^{1/3}$, 这里 $A_{\text{靶}}$ 和 A_{proj} 分别代表靶和弹核质量数, c 为常数,对于核-核中心碰撞, $c = 1.5$. 所以当相对论核-核碰撞的末态为强子态时,它有与核子-核子碰撞时形成 Λ 粒子相同的机制,即形成的 Leading Λ 有较强的横向极化度以及与横动量的关联性. 另一方面,在相对论核-核中心碰撞中,在反应区有可能造成产生夸克-胶子等离子体(QGP)的条件——高温和/或高能量密度. 据推测,在这类反应中物质可能发生相变,形成夸克物质,即有可能使夸克解禁,在较大的尺度(大于核尺度)上形成 QGP^[10]. Λ 将由各自独立无关的 u, d 和 s 海夸克组成并经蒸发过程发射出来,我们称它们为“海 Λ ”. 因为极化是一个运动学为主的效应,在 QGP 中,夸克的任何方向或极化的记忆都将被抹去,因此这些 Λ 将显示零横向极化度^[11]. 夸克-胶子等离子体的色场具有横动量,并提供给 $s\bar{s}$ 夸克对,因而破坏了特有的横动量与 s 夸克自旋之间,也即与 Λ 横向极化度之间的关联^[11]. 因此,测量和分析在相对论核-核碰撞中产生的 Λ 粒子的横向极化度,及其与横动量的关联是特别感兴趣的. R. Stock 等人在 1982 年首先提出了测量 Λ 粒子的横向极化状态可以判断反应中是否形成 QGP^[12].

国际上有两个实验组分析了在相对论重离子碰撞下产生的 Λ 粒子的横向极化度^[13, 14], 他们都在一定的横动量范围内测到了 Λ 的零极化度及其与横动量的无关性. 似乎可以说它们由互不相关的海夸克形成,因而可以推测反应中 QGP 形成. 但是,也不能排除即使末态为强子态, Λ 本应有的较强的横向极化度而由于一些其它因素而被减小或消除. 在得出 QGP 形成的肯定结论以前,需要排除这些因素. 以下一些物理过程会引起 Λ 横向极化度的减小^[11, 15]:

(1) 二次散射效应:包括弹性和非弹性散射. 反应中直接产生的 Λ 和反应区内强子的非弹性反应减少了直接产生的 Λ 数目;对于弹性散射,由于散射后 Λ 粒子一般来说不能保持原来方向,因而改变了产生平面的原有方向,它们将随机取向,降低了 Λ 的极化度,也破坏了自旋与横动量的关联.

(2) 二次产生效应: πN 相互作用产生的 Λ 粒子不具有横向极化度. 在相对论性核-核碰撞中,大量的 π 被产生,与核子发生剧烈碰撞,产生的许多 Λ 粒子将减小它们的极化度.

(3) 由 Σ 和 Ξ 衰变产生的 Λ 无横向极化. 初级反应中 Σ 和 Ξ 对 Λ 的产生比在相对论核-核碰撞中并不太小,并且由于它们几乎 100% 衰变为 Λ , 该项对 Λ 极化的影响也不容忽略.

因此,要确认 QGP 的形成,就必须考虑到这 3 个因素的影响. 并且,碰撞核越大,能量越高,这些因素越重要. 以前只是有人定性地考虑了再散射会对 Λ 极化造成影响^[5]. 本文用 Monte-Carlo 模拟事例产生器 LUCIAE^[16] 来模拟在每核子 200GeV 的 S+Pb 中心碰撞中以上 3 个因素对 Λ 极化的定量影响,最后确认在散射等效效应后剩余的直

接产生的 Λ 对实测 Λ 产额的比值.

2 事例产生器的物理考虑

我们所用的 Monte-Carlo 事例产生器 LUCIAE 是基于 FRITIOF, FIRECRACKER 模型和再散射模型基础上的. LUCIAE 对 FRITIOF^[17] 作了下列改进:用 FIRECRACKER 模型(FCM)描述辐射胶子时各条弦间的集体作用^[18], 并考虑了产生粒子在核内的再散射^[19]. 在 FRITIOF 中, 两强子通过纵动量转移而激发, 形成色偶极子, 激发态按软辐射模型发射韧致胶子. 退激发的强子被描述为 LUND 弦, 按 LUND 弦的碎裂机制衰变为末态产物. FRITIOF 中的强子实际上是一条无质量的相对论性的弦, 弦间的相互作用类似于第二类超导体中涡旋线的约束色力场. 在相对论性核-核碰撞中一般会形成许多互相靠近的弦, 它们将受到这种力的作用, FRITIOF 未考虑这一点. 在 LUCIAE 中加上了 FCM 来描述这一作用. FCM 假定相邻的弦组成群, 群相当于相互作用的量子态, 它具有大的公共能量密度, 影响韧致胶子的发射和碎裂性质^[18]. LUCIAE 用再散射模型^[19]来描述产生粒子彼此间及其与参与和旁观核子间的再作用. 此模型假设产生粒子和参与(受伤)核子随机分布在一定参数下的弹核与靶核之间的几何交叠区内, 靶(弹)旁观者随机分布于交叠区域外, 但在靶(弹)球之内. 在再散射过程中, 运动中的强子被视为经典的点粒子, 两次连续碰撞之间的轨迹为直线, 而碰撞发生与否按两粒子最近距离 d_{\min} 是否小于 $\sqrt{\sigma_{\text{tot}}}/\pi$ 确定, σ_{tot} 为总截面.

LUCIAE 考虑了弹性散射和非弹性散射^[19], 弹性散射的发生按以下条件确定:发生碰撞的两粒子 i 和 j , 若在它们的质心系中, $\sigma_d/\sigma_{\text{tot}} \geq \xi$ (ξ 为 $[0, 1]$ 随机数), 则认为是弹性碰撞. 散射都在碰撞粒子的质心系中进行. 由于是弹性碰撞, 反应前后粒子动量模不变. 对非弹性散射, LUCIAE 共考虑了 295 个包含奇异粒子的非弹性散射道. 其余未考虑的道(如 $N+N \rightarrow N+Y+K$)按弹性散射处理. 对 $\pi N \rightarrow KY$ (Y 为 Λ , 以下同)及其它奇异夸克产生截面, 采用同位旋平均参数化公式处理, 并考虑了各道阈能. 奇异夸克交换反应如 $\bar{K}N \rightarrow \pi Y$, 假设其截面为奇异夸克产生反应截面的 10 倍. 求逆反应截面时, 利用了细致平衡假设.

反应中 π , Σ 和 Ξ 的多重产生以及 π 与靶核子的再相互作用的二次产生截面在 LUCIAE 模拟程序中由我们输入的反应性质 S+Pb 以及入射核能量, 即每核子 200GeV 而决定. Σ , Ξ 到 Λ 的衰变几率由 LUND 模型的子程序 JETSET 执行.

3 实验结果与讨论

每核子 200GeV 的 S+Pb 中心碰撞中, 影响 Λ 极化的二次非弹散射主要包括以下一些道:



$$\bar{K} + Y \leftrightarrow \pi + \Xi,$$

因为直接产生的 Λ 远少于 π , 由二次非弹性散射而损失的 Λ 并不太多, 更重要的是弹性散射. 为了统计出弹性散射的 Λ 数目及散射后剩余的直接 Λ 的分布, 我们采用了以下办法: 只要 Λ 粒子与其它粒子发生一次弹性散射, 就将其变为 Λ' , 并进行计数. 对非弹性散射, 最后得到的 Λ 已不包含它的贡献(即测到的已不是 Λ), 我们采取间接的方法, 进行几次不同初始条件的模拟, 从而计算出非弹性散射的多重数. 一般而言, 尤其是相对论性核-核碰撞中各粒子将发生剧烈的集体效应, 弹性散射的比例较大, 而非弹性散射对极化的影响相对小一些. 从表 1 中可以看到, 受到弹性散射的 Λ 粒子占总测量到的 Λ 粒子的 31% 左右. 由非弹性散射而损失掉的 Λ 粒子占总 Λ 粒子的 6% 左右.

二次产生道主要是:

$$\pi + \bar{N} \leftrightarrow \bar{K} + Y, \quad \bar{K} + N \leftrightarrow \pi + Y, \quad \pi + N \leftrightarrow K + Y.$$

其中以第 3 个反应道为主. 在 LUCIAE 中, 通过关闭这些道, 可以观察到二次产生效应对极化的影响. 结果见表 1, 约占总测量到的 Λ 的 16%.

由 Σ 和 Ξ 产生的 Λ , 在 LUCIAE 中, 通过禁止 Σ 和 Ξ 衰变, 可得到由 Σ 和 Ξ 产生的 Λ 的数目. 高能核-核碰撞下由于奇异性的增强, 将产生更多的 Σ 和 Ξ , 它们与 Λ 的比值也将上升, 大约占全部 Λ 的 30% (见表 1), 从而减小 Λ 的横向极化度.

表 1 Λ 的多重数

	1	2	3	4	5	6
多重数	14.2546	4.3463	0.8543	2.2480	4.1413	3.5190
%	100	30.5	6.0	15.8	29.1	24.7

注: 1. 全空间(能测到的)的 Λ ; 2. 受到弹性散射的 Λ 的比例; 3. 受到非弹性散射的 Λ 的比例; 4. 二次产生的 Λ ; 5. 由 Σ , Ξ 衰变而得的 Λ ; 6. 经过以上作用后剩余的直接产生 Λ 粒子.

从表 1 可以看到, 在每核子 200GeV S-Pb 中心碰撞中, 由于强烈的集体作用及再散射, 直接产生的 Λ 大多失去了它原有的极化度以及自旋与横动量的关联, 仅有 $0.247/(1-0.060)=0.263$ 的 Λ 属于直接产生且未失去极化信息的 Leading Λ . 实验指出^[2], 在 N-N 中心碰撞中(N 代表核子), 当 $p_t \sim 1.2\text{GeV}$ 时, Λ 横向极化度为 ~ 0.45 . 在这类反应中, 可以认为 Leading Λ 粒子的产生过程不受以上 3 个效应的干扰. 相对论核-核中心碰撞中, 实验上^[14]在横动量为 $0.5\text{--}2.0\text{GeV}/c$ 之间测到的 Λ 粒子的平均横向极化度为 0.043 ± 0.022 (此结果应含有以上三个效应). 假定此反应的末态为强子态, 那么核-核中心碰撞可描写为核子-核子碰撞迭加情形下的 Λ 粒子的平均横向极化度, 其值约为 $0.45 \times 0.263 \approx 0.12$. 实验上观察到的极化度 0.043 比该值小得多; 也较核子-核(P+A)碰撞(A=Be, 能量在 $20\text{--}400\text{GeV}$, $p_t \sim 1.2\text{GeV}$)中测得的极化度 0.23 ± 0.05 ^[11]小. 因此, 在相对论核-核碰撞中, 如果末态为强子气, 至少实验上应测到 $\sim 12\%$ 的极化度. 所以仅仅依靠以上再散射等效应, 不能完全解释极化度这么低的事实, 可能存在着别的动力学机制使 Λ 的横向极化度减小, 也不能排除在中心碰撞区有部分 QGP 形成(虽然这是一个弱的效应).

综上所述, 从 LUCIAE 模拟产生的每核子 200GeV 的 S+Pb 中心碰撞中看到, 二次散射效应, 二次产生效应及 Σ 和 Ξ 衰变到 Λ 对 Λ 的极化度有明显的影响, 表明相对论核

-核碰撞中的集体效应和再散射效应使 Λ 的极化度减为初值的25%左右;但不足以解释实验中的 Λ 的近乎零的极化度.这表明在每核子200GeV的S+Pb中心碰撞中有可能存在着别的动力学机制使 Λ 的横向极化度减小,其中也不排除在中心碰撞区有部分QGP形成的可能性.

感谢NA36合作组提供实验原始数据.

参考文献(References)

- 1 Gourlay S A, Melanson H L, Abolins M A et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**:2244—2247
- 2 Aahlin P, Frodesen A G, Alpgare K et al. *Lett. Nuov. Cimento*, 1978, **21**:236—238
- 3 Abe F, Hara K, Kimetal S et al. *Phys. Rev.*, 1986, **D34**:1950—1959
- 4 Anikina M, Aksineko V, Dementiev E et al. *Z. Phys.*, 1984, **C25**:1—11
- 5 Harris J W, Sandoval A, Stock R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**:229—234
- 6 Anderson B, Gustafson G, Ingelman G et al. *Phys. Rep.*, 1983, **97**:31—145
- 7 DeGrand T A, Markkanen J, Miettinen H I. *Phys. Rev.*, 1985, **D32**:2445—2448
- 8 Szwed J. *Phys. Lett.*, 1981, **B105**:403—405
- 9 Heller K, Cox P T, Dworkin J et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **41**:607—610
- 10 Satz H. *Ann. Rev. Nucl. Par. Sci.*, 1985, **35**:245—270; Casher A, Neuberger H et al. *Phys. Rev.*, 1979, **D20**:179—188
- 11 Panagiotou A D. *Phys. Rev.*, 1986, **C33**:1999—2002
- 12 Stock R, Angert N, Bialkowska H et al. *Quark Matter Formation and Heavy Ion Collisions*, World Scientific, Singapore, 1982, 557—582
- 13 Bartke J, Bialkowska H, Bock R et al. *Z. Phys.*, 1990, **C48**:191—200
- 14 YE YunXiu, SU SuFang, ZHOU Xin et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, (in Chinese), 1996, **20**:685—690 (叶云秀, 苏淑芳, 周昕等. *高能物理与核物理*, 1996, **20**:685—690)
- 15 Miyano K, Noguchi Y, Fukawa M et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**:1725—1727
- 16 SA BenHao, TAI An. *Comp. Phys. Commu.*, 1995, **90**:121—140
- 17 Andersson B, Gustafson G, Hong Pi. *Z. Phys.*, 1993, **C57**:485—494
- 18 Andersson B, TAI A. *Z. Phys.*, 1996, **C31**:155
- 19 SA BenHao, WANG ZhongQi, ZHANG XiaoZe et al. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:2995—2998

Exploration for Degradation of Λ Polarization Produced in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions

YE YunXiu^{1, 1)} CHEN Zhi¹ RUAN TuNan^{2, 1} SHEN Ji¹
LÜ HaiJiang¹ DONG WeiJiang¹ SA BenHao³ TAI An⁴

1(*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2(*CCAST (World Laboratory), Beijing 100080, China*)

3(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

4(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract The degradation of Λ transverse polarization produced in S + Pb central collisions at energy 200 GeV per nucleon has been studied in detail. The S + Pb central collision events have been generated using Monte-Carlo generator——LUCIAE at 200 GeV per nucleon. The various factors degrading Λ transverse polarization have been analysed quantitatively. The ratios of Λ 's produced from rescattering, secondary production and decays of Σ , Ξ hyperons to the total measurable Λ 's in experiment have been investigated and the degradation effect of these Λ on the total polarization has been determined. The simulation and calculation show that above three factors decrease the Λ transverse polarization strongly, however, can not eliminate the polarization completely when the Λ 's are assumed to be produced from hadronic gas in the final state. To explain the experimental data of vanished Λ polarization, it probably needs to consider new mechanisms of Λ production, including a weak effect of QGP formation.

Key words degradation of Λ polarization, event generator, quark-gluon plasma

Received 17 December 1998

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (19675034, 19677102, 19775034) and BEPC National Lab.

1)E-mail: yeyx@ustc.edu.cn