

# 200A GeV S + Au 反应中光子 产生的低横动量增强\*

王辉<sup>1)</sup> 萨本豪<sup>2)</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

台安

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 用建立在 LUND 弦模型特别是 PYTHIA 事件产生器基础上的描写极端相对论性核-核碰撞的强子和弦级联模型——JPCIAE 研究了入射能量为 200A GeV 的 S+Au 中心碰撞中光子产生. 模型同时考虑了部分子 QCD 散射过程、强子末态相互作用以及强子衰变等光子产生反应道并作了协调处理. JPCIAE 模型计算结果很好再现了 WA93 实验数据所呈现的低横动量增强效应.

**关键词** 光子产生的低横动量增强 JPCIAE 模型 部分子 QCD 散射 强子相互作用 强子衰变

## 1 引言

目前, 相对论性核-核碰撞被用来研究极端条件下核物质性质. 研究目的之一是寻找在高温高密度状态下可能存在的夸克胶子等离子体(QGP). 直接光子是一种比较“干净”的探针, 因只参与电磁相互作用又难被产生的核介质吸收, 能够反映碰撞初期状态, 是诊断 QGP 的好信号. 直接光子也是即将出束的 RHIC/PHENIX 实验的重要探测内容之一<sup>[1]</sup>.

除衰变产生的光子以外的光子称为直接光子. 直接光子分别为从纯强子相产生的, QGP 相产生的, 以及强子和 QGP 混合相产生的<sup>[2]</sup>. QGP 相产生的光子主要在横动量为 1—3GeV/c 区域. 而 2GeV/c 横动量以下的光子主要由强子( $\pi^0$ ,  $\eta$  以及  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\eta'$ ,  $a_1$ ,  $\Delta$  等)衰变而来, 还有  $\pi\rho \rightarrow \gamma\pi$  和  $\pi\pi \rightarrow \gamma\rho$  等强子物质相互作用的贡献<sup>[3]</sup>. 横动量在 1—3GeV/c 间, 除 QGP 产生的光子外, 还有部分子 QCD 硬过程产生的光子.

我们曾就 200GeV 核子-核子碰撞仔细研究过 QGP 光子和硬散射光子产生并考虑

1999-02-08 收稿

\* 国家自然科学基金和核工业基金资助项目

1) E-mail: hui@iris.ciae.ac.cn

2) E-mail: sabh@iris.ciae.ac.cn

内禀横动量分布的影响和二阶费曼图修正的贡献<sup>[4]</sup>. 为了对光子产生作更全面分析, 本文主要研究了较低横动量光子的产生.

横动量小于 1 GeV/c 的光子基本来自纯强子态, 不受 QGP 相干扰. 最近, WA93 实验组测出 200GeV/c S+Au 碰撞中横动量小于 1 GeV/c 光子的不变微分截面. 理论模型 VENUS 4.12 尚无法解释实验数据中呈现的低横动量增强效应<sup>[5]</sup>. 本文用建立在 LUND 弦模型特别是 PYTHIA 事件产生器基础上, 描写极端相对论性核-核碰撞的强子和弦级联模型——JPCIAE, 来研究上述反应中光子产生的横动量分布并与实验数据相比较, 结果证实了 WA93 实验中观测到的光子低横动量增强效应. 进而对各反应道的贡献作了分析, 结果表明  $\pi^0$  衰变对低横动量增强具有极大影响. 而  $\pi^0$  数目多寡取决于  $\pi^0$  是否参与末态再散射. 另外部分子 QCD 散射软过程的贡献不容忽视.

## 2 模型简介

强子和弦级联模型, JPCIAE, 可用于描写相对论性核-核碰撞<sup>[6,7]</sup>. 碰撞的蒙特卡罗模拟是在实验室系中进行的. 坐标空间原点取在靶核中心, 束流方向取作  $z$  轴. 时间原点取在弹和靶核在  $z$  轴方向距离为零的时刻. 因此, 碰撞时间可为负值.

碰撞核在它自身静止系中被描写为半径为  $1.05A^{1/3}$  ( $A$  为核子数) 的球; 其核子的空间位置由 Woods-Saxon 分布随机抽样产生. 弹核子带有每核子的入射动量, 并作了 Lorentz 收缩. 相对论性能量下, 我们忽略了靶核子的 Fermi 运动和平均场, 认为它静止不动.

在初始化弹核和靶核完成之后, 根据碰撞对最小逼近距离要小于或等于  $\sqrt{\sigma_{\text{ex}}/\pi}(\sigma_{\text{ex}}$  是碰撞对的总截面), 计算碰撞时间. 于是得到碰撞(时间)表.

由碰撞表选出的具有最小碰撞时间的碰撞对, 若其质心能量  $\sqrt{s}$  大于或等于 4GeV, 就假设有两根弦形成, 并执行 PYTHIA, 得到末态粒子; 否则无弦形成而直接发生通常的强子-强子散射过程<sup>[8-10]</sup>. 执行完该碰撞后要更新粒子表和碰撞表, 然后执行第 2 对碰撞, 第 3 对碰撞, …… , 一直到碰撞表空了为止. 最后考虑不稳定粒子的衰变.

模型中的 PYTHIA 除考虑部分子 QCD 散射的低横动量粒子产生外, 还考虑了高横动量粒子产生<sup>[11]</sup>, 此外还包括了供用户选择的一些截面很小的特殊粒子(如  $J/\psi$  和直接光子等)的产生.

强子和弦级联模型, JPCIAE, 建立后曾被用来计算 200A GeV 入射能量下, 质子-质子、质子-核和核-核反应中负粒子多重性, 以及负粒子和参加者质子的速度和横动量分布. 模型能很好再现相应的实验数据<sup>[6]</sup>. 此外, 模型曾成功地解释了 200A GeV 的质子-核和核-核碰撞中  $J/\psi$  的核压低现象<sup>[6,7]</sup>.

## 3 结果与讨论

继 WA80 实验<sup>[12]</sup> 测出 200A GeV 能量下, S+Au 碰撞中直接光子横动量分布后,

WA93 实验使用 BGO 探测器在 CERN-SPS 测量同样反应的低横动量光子不变微分截面分布<sup>[5]</sup>. 结果与 WA80 测得的强子衰变光子及 VENUS 4.12 理论计算结果相比较, 发现在光子的横动量小于 0.1 GeV/c 时, 前者光子数远远超过后者. 这引起理论界的极大兴趣.

用 JPCIAE 模型研究上述碰撞中光子的产生. 为此首先在 PYTHIA 事件发生器中选择考虑了以下有光子产生的部分子 QCD 散射道:

$$\begin{aligned} f_i + \bar{f}_i &\longrightarrow g + \gamma, & f_i + \bar{f}_i &\longrightarrow \gamma + \gamma, & f_i + g &\longrightarrow f_i + \gamma, \\ g + g &\longrightarrow \gamma + \gamma, & g + g &\longrightarrow g + \gamma, \end{aligned}$$

式中  $f_i$  为  $i$  味夸克.

另一方面在通常的强子-强子散射过程中, 又添加了如下光子产生反应道<sup>[3,13]</sup>,

$$\begin{aligned} \pi + \pi &\longrightarrow \rho + \gamma, \\ \pi + \rho &\longrightarrow \pi + \gamma. \end{aligned}$$

为简单起见, 相应截面均取同位旋平均值, 所用的参数化公式取自文献[13]. 同时还考虑了各种强子的  $\gamma$  衰变, 如  $\pi^0, \eta, \eta', \rho, \Delta, \omega$  等.

200A GeV S+Au 碰撞中光子不变微分截面横动量分布在图 1 中给出. 实心点是 WA93 实验数据. 空心点是 JPCIAE 模型计算结果, 它在横动量  $p_T = 0.55$  GeV/c 处与实验数据归一. 图中也给出 VENUS 4.12 的结果(空三角)<sup>[5]</sup>, 它在  $p_T = 0.3$  GeV/c 处与实验数据归一. 虚折线表示 WA80 衰变光子<sup>[5]</sup>, 它也在  $p_T = 0.3$  GeV/c 处与 WA93 数据归一. 从图 1 可看出,  $p_T < 0.1$  GeV/c 区域 WA93 实验值明显高于 WA80 衰变光子数, 显示低横动量增强效应. VENUS 4.12 计算结果在低横动量处的光子数也明显不足, 相差近 3—4 倍. JPCIAE 模型则很好再现了 WA93 实验数据, 大多数  $p_T$  区段都落在实验误差范围之内, 而且小横动量处与实验数据很接近. 但在  $p_T$  为 0.1—0.4 GeV/c 区间略高于实验值.

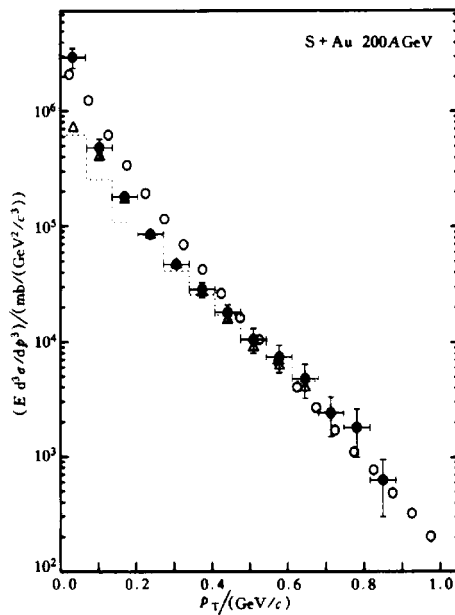


图 1 每核子 200 GeV S+Au 中心碰撞中光子不变微分截面横动量分布

在 WA93 实验结果中, 衰变光子无疑占居重大份额. 为此我们分别计算了对衰变光子有主要贡献的各种介子的衰变光子横动量分布, 如图 2 所示. 图 2 中实线是总光子, 虚线是  $\pi^0$  衰变光子, 密点线是  $\Delta$  衰变光子, 疏点线是  $\eta$  和  $\eta'$  衰变光子, 点划线是  $\rho$  衰变光子. 从图中可以看出,  $\pi^0$  的衰变具有决定性作用, 而  $\eta$  和  $\eta', \Delta$  以及  $\rho$  的贡献则相对小得多. 这是因为碰撞中产生的  $\pi^0$  数目非常多, 比  $\eta, \eta', \rho$  等至少高一个量级, 而且  $\pi^0$  的衰变道中光子衰变占 98.8%.

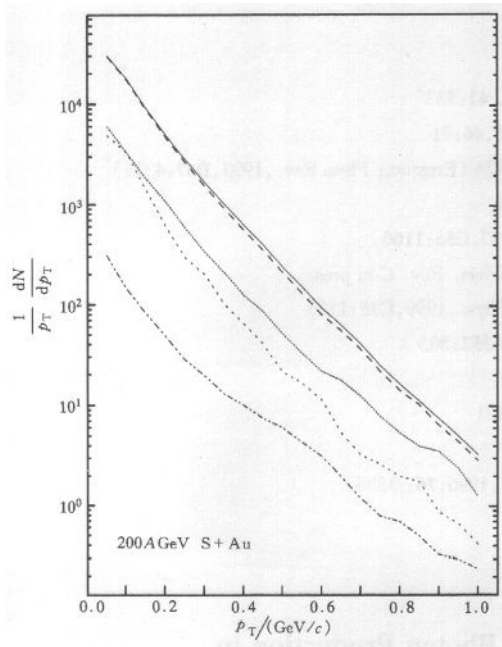


图2 每核子 200 GeV S+Au 中心碰撞中各衰变道对光子横动量分布的贡献

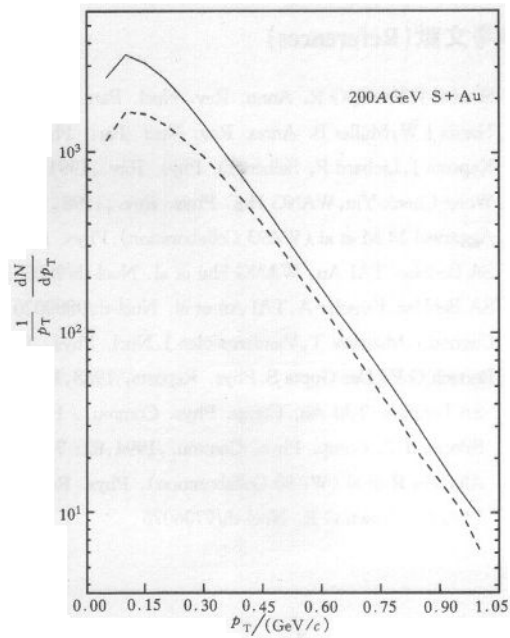


图3 每核子 200 GeV S+Au 中心碰撞中  $\pi^0$  横动量分布的 JPCIAE 模型计算结果

图3中给出再散射对  $\pi^0$  产生的影响. 图中实线是 200A GeV S+Au 碰撞中有再散射机制计算的  $\pi^0$  横动量分布, 而虚线是不含再散射机制的相应结果. 由图3可见再散射使  $\pi^0$  平均数约增加1倍. 在高横动量区域增加的幅度较小, 约0.5倍. 而在横动量小于  $0.4\text{GeV}/c$  时, 随横动量的减小,  $\pi^0$  数目增加幅度越来越大. 在  $p_T = 0.05\text{ GeV}/c$  处, 有再散射机制的  $\pi^0$  产生数目约为没有再散射机制时的2.4倍.  $\pi^0$  参与再散射使得  $\pi^0$  低横动量分布有显著增强, 进而促使低横动量光子产生的增强效应. 当然这儿尚有部分子 QCD 散射软过程的贡献.

总之, 我们用强子和弦级联模型, JPCIAE, 研究了 WA93 实验组的每核子 200 GeV 入射能量的 S+Au 中心碰撞中总光子数的横动量分布. JPCIAE 计算结果很好再现了实验数据, 低横动量增强效应得到解释. 这里再散射机制和部分子 QCD 散射软过程起了重要作用. 直接光子数相对总光子数而言很少, 本文未对其作单独分析, 留待下文进一步讨论.

鉴于 WA80 实验中光子测量实际上限于  $p_T \geq 0.1\text{ GeV}/c$  区域. 图1中, 在  $p_T \leq 0.1\text{ GeV}/c$  区域与 WA93 结果相比较的 WA80 衰变光子实际上是根据一定模型外推得到的. 故建议 WA93 进一步同时测量  $\gamma$  和  $\pi^0$  的横动量分布, 直接比较总光子和  $\pi^0$  衰变光子的横动量分布, 以求澄清低横动量增强效应由来的问题

## 参考文献(References)

- 1 Stachel J, Young G R. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 1992, **42**:537
- 2 Harris J W, Müller B. *Annu. Rev. Nucl. Part. Phys.*, 1996, **46**:71
- 3 Kapusta J, Lichard P, Seibert D. *Phys. Rev.*, 1991, **D44**:2774 (Erratum: *Phys. Rev.*, 1993, **D47**:4323)
- 4 Wong Cheuk-Yin, WANG Hui. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**:376
- 5 Aggarwal M M et al (WA93 Collaboration). *Phys. Rev.*, 1997, **C56**:1160
- 6 SA BenHao, TAI An, WANG Hui et al. *Nucl-th/9803033*, *Phys. Rev. C* in press
- 7 SA BenHao, Faessler A, TAI An et al. *Nucl-th/9809020*, *J. Phys.*, 1999, **G25**:1123
- 8 Cugnon J, Mizutani T, Vandermeulen J. *Nucl. Phys.*, 1981, **A352**:505
- 9 Bertsch G F, Das Gupta S. *Phys. Reports*, 1988, **160**:189
- 10 SA BenHao, TAI An. *Comp. Phys. Commu.*, 1995, **90**:121
- 11 Sjöstrand T. *Comp. Phys. Commu.*, 1994, **82**: 74
- 12 Albrecht R et al (WA80 Collaboration). *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**: 3506
- 13 LI G Q, Brown G E. *Nucl-th/9706076*

**Low  $p_T$  Enhancement of Photon Production in  
200 A GeV S + Au Collisions**

WANG Hui<sup>1)</sup>      SA BenHao<sup>2)</sup>

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

TAI An

(*Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China*)

**Abstract** A hadron and string cascade model, JPCIAE, which is based on LUND string model, PYTHIA event generator especially, is used to study the photon production of 200 A GeV S + Au central collisions. The model takes into account photon produced from the partonic QCD scattering processes, the final-state hadronic interaction, and hadronic decay and deals with them consistently. The results of JPCIAE model reproduce successfully the WA93 data of low  $p_T$  enhancement. We have compared the contributions from different decay channels and discussed the role played by rescattering.

**Key words** low  $p_T$  enhancement of photon production, JPCIAE model, QCD hard scattering, hadronic interaction, hadronic decay

---

Received 8 February 1999

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China and Nuclear Industry Foundation

1) E-mail: hui@iris.ciae.ac.cn

2) E-mail: sabh@iris.ciae.ac.cn