

用高能光子诊断 QGP 的不确定性及对策

艾小白 周宝森

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 本文讨论了用高能光子诊断夸克胶子等离子体研究中的不确定性问题,基于局部热平衡假设,对比研究新近的有关文献,发现对来自极端相对论性重离子碰撞的高能光子,仍可以从不确定性中找到某些确定的特性.我们建议实验上测得的高能光子总谱的形状可以用作为诊断夸克胶子等离子体是否存在的手段.

关键词 夸克胶子等离子体(QGP), 非遍举光子动量谱, 局部热平衡, 统计分布函数, 核衰变率.

1 前言

微扰 QCD 方法已预言在极端相对论性的重离子碰撞的最初阶段可能存在一种新的物质形态,通常称为 QGP^[1]. 寻求这种新的物态是高能物理研究的热点之一. 在 QGP 性质的理论研究中一般使用了如下标准假设:(1) QGP 是在局部热平衡下形成的;(2) 其物态方程可用无质量夸克与胶子组成的理想气体的物态方程,相互作用效应用加进的袋常数项来表示;(3) 在演化的所有阶段可认为是绝热膨胀(即等熵膨胀),且中心区服从相似流的规律. 人们普遍认为,倘若理论预言不能为实验观察所证实,上述假设之一或全部便可能是错误的.

自 80 年代以来在理论研究中已提出:在 QGP 形成与演化过程中产生的高能光子、双轻子(虚光子)和奇异粒子的特征谱用作为探测 QGP 是否存在的方法. 当然这方面的研究同样是基于上述假设下作出的. 上海原子核所理论室在国内刊物与国际会议上已发表的近三十篇论文是关于这方面的研究工作. 最近,贺泽君等人已把通常用来描述夸克胶子系统动力学演化的相对论流体力学模型推广到包括系统粒子数和富重子的情况^[2]. 本文仅讨论用高能光子诊断 QGP 的不确定性问题及对策.

2 不确定性问题

最近的实验结果显示在误差范围内,所

观察到的 γ/π^0 比值对可测量的横向动量 P_T 的关系直到 $2.5\text{GeV}/c$ 均与强子本底的蒙特卡洛法计算的结果符合得很好^[3]. (见图 1). 根据 $\mu^+\mu^-/\gamma$ 比及 $\mu^+\mu^-/\pi^0$ 比在 $P_T \approx 2 \sim 4\text{GeV}/c$ 左右趋向于一个恒定饱和值的事实^[3], 一般已被接受,对于来自 QGP 的热光子,适当的运动学窗口大概处于 $P_T \approx 2 \sim 4\text{GeV}/c$ 的范围之中. 然而新近的“热胶”方案却预言窗口位于 $P_T = 3 \sim 5\text{GeV}/c$ ^[4]. 我们考虑相变潜热的影响,应用完全阻止方案计算了有关的相对论流体动力学方程以决定粒子温度在火球中的分布^[5]. 当选择初始温度值 $T_i = 250\text{MeV}$, 临界温度 $T_c = 160\text{MeV}$, 去耦温度 $T_f = 140\text{MeV}$, 火球初始半径 $R_0 = 3.0\text{fm}$, 夸克相的初始数密度 $\rho_i = 5\rho_0$, 其中 $\rho_0 = 3 \times 0.17\text{fm}^{-3}$, 我们的结果表明 $P_T = 4 \sim 5\text{GeV}/c$ 可能是诊断 QGP 是否存在的一个窗口. 条件不同,结论各异. 由此可见,理论研究中确存在某些不确定性和不充分的认识^[6,9]. 事实上从以下几条不确定性可见,我们仍然不了解,根据从一个狭小的窗口获得的资料,是否能真正判别 QGP 的存在.

1) 在目前描写系统动力学演化的各种模型中,无论 Bjorken 标度模型,完全阻止方案,还是描写热化前状态的级联模型^[1], 都应用了许多目前尚无法敲定的物理量: 初始温度, 初始能量密度, 初始热化时间, 夸克相的初始数密度, 相互作用体积的具体形状和其它几何因子, 强子相变的临界温度, 核介质中介子

和夸克的质量与温度的关系, QCD 的耦合常数, 标度常数, 结构函数中的初始标度, 部分子级联动力学模型中基本的 (2→2) 散射过程

中所需的最低限度的横向移动量以及类时分支中部分子的最低虚度等, 都给理论预言带来不确定性.

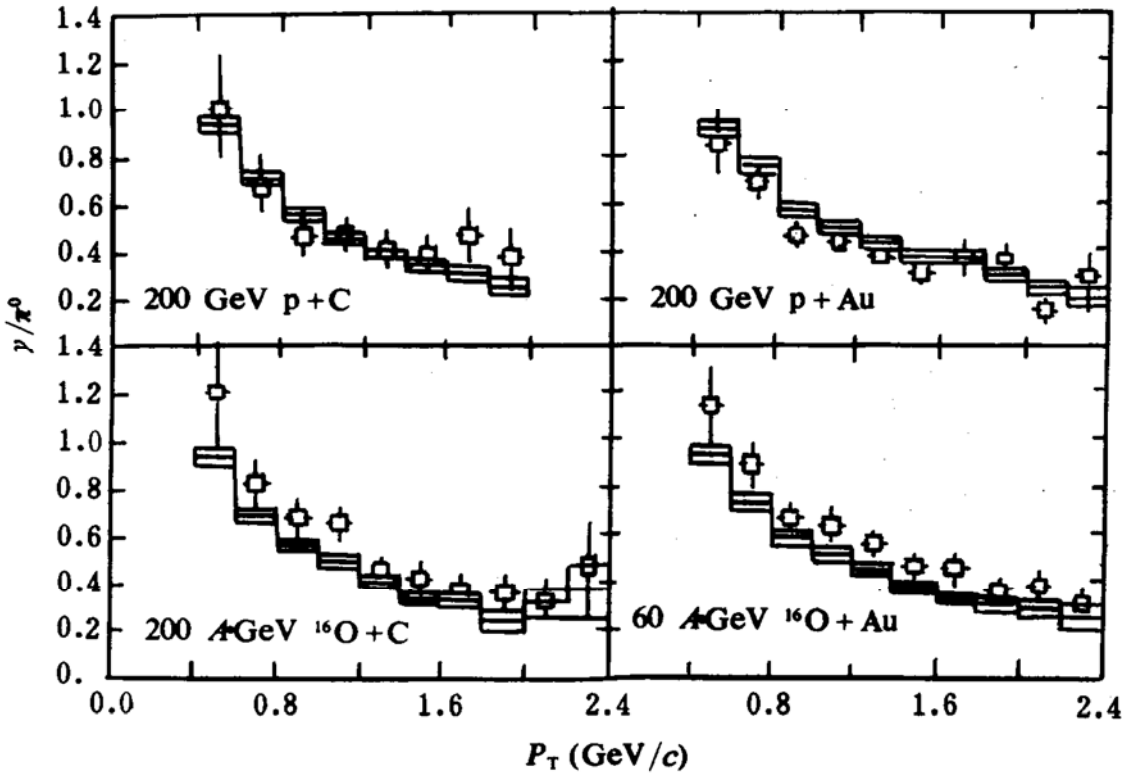


图 1 取自文献[3]中图 4.56. 对反应 p+C, p+Au, ¹⁶O+C 和 ¹⁶O+Au, 图中方格表示比值 $\gamma_{\text{观察}}/\pi^0$ 与 P_T 的关系, 而 $\gamma_{\text{强子}}/\pi^0$ 的蒙特卡罗计算结果用阴影块表示

2) 在某固定温度下对来自 QGP 的高能光子的发射率的计算需要结构函数, QGP 的时空演化及强子物质分布的具体知识. 可惜对这些知识无论实验和理论上都了解得很不够. 虽然目前对直接光子的 QCD 理论预言与所测量光子谱数据相一致, 然而许多计算忽略了高阶微扰项的贡献. 不确定的一点正是那些忽略掉的贡献是否确定是可以忽略的.

3) 对富重子 QGP, 净夸克数密度 $n_{ff}(\vec{r}, t)$ 与重子化学势 $\mu_f(\vec{r}, t)$ (其中 f 为味量子数) 均不为零, 此时初始能量密度等一系列物理参数的合理取值为多少, 尚无定论, 如何解决这种更为复杂的物理情况, 更无成熟的办法.

4) 实际上极端相对论重离子碰撞是不可逆的耗散过程, 目前人们已开始注意到研究

中应系统考虑能流、不透明度、非弹性碰撞和粘滞性问题. 但是尚未有人考虑碰撞中心边界上的高温所产生的辐射耗散对 QGP 时空演化的影响.

总而言之, 由于各种不确定性因素以及采取的近似模型不同, 最近文献中对热光子发射率的计算结果是各不相同的. 人们不禁要问: 谁的理论预言更加可信呢? 诊断 QGP 是否存在的窗口到底落在什么横向动量区?

3 高能光子总谱可用来诊断 QGP 是否存在

在极端相对论性重离子碰撞中, 主要存在三种高能光子: (1) $P_T > 5 \text{ GeV}/c$ 的瞬发直接硬光子, 来自碰撞最初阶段的 $q(\bar{q})g \rightarrow q(\bar{q})\gamma$ 康普顿散射和 $q\bar{q} \rightarrow \gamma g$ 湮灭过程; (2) $P_T \approx 2$

~4GeV/c 的热光子,来自处于局部热平衡的 QGP 中的康普顿散射和湮灭过程;(3) $P_T \approx 0.7 \sim 2\text{GeV}/c$ 光子,来自诸如 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma, \eta \rightarrow \gamma\gamma, \Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 \gamma$ 的介子衰变过程.

在探测 QGP 信号时,(1)与(3)都算本底噪声光子. Kapusta 等人基于假定系统在相变温度 T_c . 要保持较长的时间,认为大部分热光子应在 T_c 时产生,强子共振气体产生的光子(即过程 $\pi\rho \rightarrow A_1(1260)\text{共振} \rightarrow \gamma\pi$)不可忽略. 不过许多文献均未理会上述贡献. 这与介子在核物质中的质量在相变温度附近将有较大的修正,因而估算的可信度很小有关.

前面提到由于研究中存在不确定性以及采用的模型不同,文献中报告的光子热发射率 $E = dR/d^3P$ 的计算公式是各不相同的,例如可见文献[4]中的公式(4),文献[7]中的公式(41),文献[8]中的公式(25)和文献[9]中的公式(4),如此等等. 不过在上述公式中仍可以发现一个共同点,即它们均具有指数因子 $\exp(-E/T)$,它源于由局部热平衡假设所得到的统计分布函数. 对纵向动量与膨胀空间积分,可以得到关于由 QGP 产生的热光子与强子物质(HM)产生的光子横向动量分布 $dN/dy d^2P_T$,其中 y 是一个动量为 P 的光子的快度, P_T 是横向动量. 与此同时,应用积分中值定理,可以很容易地证明在中心快度区空间 $dN/dy d^2P_T$ 仍然是一个关于横向动量的指数函数 $A \exp(-P_T/T^*)$,其中 T^* 是对所讨论的物相所取的一个介于温度最大值 T_1 与温度最小值 T_2 之间的适当的中值,而 A 则是除指数部分外的被积函数的积分结果. 必须强调指出大部分不确定因素都已包含在 A 中. 一般来说,来自 QGP 的热光子谱与来自 HM 的本底光子谱都是横向动量的指数函数,仅有各自不同的下降因子($-1/T^*$)而已.

综合的非遍举光子谱即实际上的总 γ 光子谱主要由直接硬瞬发光子、来自 QGP 的热光子和来自 HM 的本底光子组成的混合谱:

$$A_1 \exp(-P_T/T_1^*) + A_2 \exp(-P_T/T_2^*) + A_3 \exp(-P_T/T_3^*) \quad (1)$$

对每一种成份的单独贡献,在半对数坐标纸上可以画一条直线,例如可见文献[4]中的图 2,[7]中的图 4,[8]中的图 4 与[9]中的图 6 (例如见图 2). 因此,在半对数坐标纸上总光子谱是形如

$$[\ln A_1 + (-P_T/T_1^*)] + [\ln A_2 + (-P_T/T_2^*)] + [\ln A_3 + (-P_T/T_3^*)] \quad (2)$$

的复杂曲线,它的两端有两条渐近线,很类似核物理学中具有两种或多种分支衰变的放射性样品的衰变曲线^[10]. 应该指出的是,在半对数坐标纸上,大多数不确定性基本上不影响高能光子总谱的形状. 目前的研究仍不能确定对直接光子其横向动量分布 $dN/dy d^2P_T$ 是否具有 P_T 的指数因子. 为了便于说明问题,可以看到,即使不考虑来自直接光子的贡献,总 γ 光子谱也是一条在大横向动量部分具有直线段的曲线,而直线段的斜率便是下降因子,它的倒数的负值大体也表征了 QGP 相的温度特征.

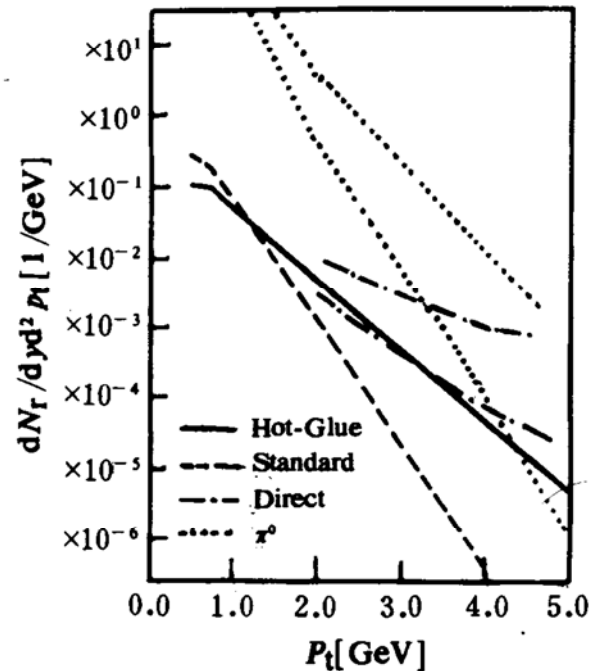


图 2 取自文献[4]中图 2. 对各种产生光子的横向动量分布作了比较. $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 的衰变光子介于两虚线之间;直接光子介于两条点划线之间;来自 QGP 的热光子,热胶模型与标准模型的结果分别用实线与长划虚线表示

上述分析已经表明,虽然探测热光子是困难的,然而人们仍然可能从总 γ 光子谱中解调出 QGP 是否存在的信号. 正因为如此我们建议,在实验上测量综合的非遍举光子谱可以用作诊断 QGP 是否确定存在的手段,因为以上分析已表明实验上测得的总 γ 光子谱的形状本身已包含了极端相对论性重离子碰撞中的许多信息. 具体的分析方法类似于核物理学中求出多分支放射样品的各分支衰变常数的方法. 当然如果各分支的半衰期相差不大,上述的分析方法并不总是行得通的. 同理,实际测得的综合非遍举光子谱也许对任何人们认为合理的 P_T 窗口都不存在直线段. 当这一情况发生时,人们同样可以获得关于极端相对论性重离子碰撞中复杂过程的细节知识,尤其可以检验局部热平衡假设是否正确,局部热平衡是否很快地或较慢地才建立,或者系统就根本没有达到局部热平衡.

总而言之,现今可测 P_T 范围的上限已接

近各种预言的适宜的 P_T 窗口的下限,在不久的将来,人们便可以应用本文的建议来诊断 QGP 是否确实存在.

参 考 文 献

- 1 Shuryak E, Phys. Rep., 1980, 61 : 71; Geiger K, Phys. Rev., 1992, D46 : 4965
- 2 He Zejun, et al. Nucl. Phys., 1991, A532 : 743; J. Phys., 1990, G16, L197; ibid, 1993, G19, L7
- 3 Schmidt H R, Schukraft J, GSI-92-19
- 4 Shuryak E, Xiong L, Phys. Rev. Lett., 1993, 70 : 2241
- 5 Zhou Baosen, Ai Xiaobai, Chin. Phys. Lett., 1993, 10 : 716
- 6 Neubert M, Z. Phys., 1989, C42 : 231
- 7 Kapusta J, et al. Phys. Rev., 1991, D44 : 2774
- 8 Baier R, et al. Z. Phys., 1992, C53 : 433
- 9 Ruuskanen P V. Nucl. Phys., 1992, A544 : 169C
- 10 Radionuclide Tracers, L'annunziata M F. Academic Press Inc., London, Ltd., 1987, p46

Uncertainties about Diagnosing Quark Gluon Plasma by High Energy Photon and Possible Countermove

Ai Xiaobai Zhou Baosen

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800)

Abstract More uncertainties in the studies about diagnosing Quark-gluon plasma (QGP) by use of high-energy photon are discussed upon the assumption of local thermal equilibrium as well as a comparison study for recent literature, it is found that some definite aspects of high-energy photons originating from ultra-relativistic heavy-ion collision may be still extracted from the uncertainties. We suggest that the shape of the measurable overall inclusive transverse momentum spectre for high-energy photons may be as a possible signature for diagnosing if quark-gluon plasma exists.

Key Words quark-gluon plasma, inclusive photon momentum spectrum, local thermal equilibrium, statistical distribution function, nuclear decay rate.