第17卷 第5期
1993年5月

高能物理与核物理
HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS

Vol. 17, No. 5
May, 1993

快报

相对论重离子碰撞中有限碰撞时间对能量密度的影响*

赵维勤[1)]
(中国科学院高能物理所,北京 100039)
S. P. Sorensen
(*University of Tennessee, Knoxville, TN 37796, USA*)
(*Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, TN 37831, USA*)

摘 要

基于 Monte Carlo 模型"ODIN"分析了相对论重离子碰撞中能量密度的时空发展. 结果表明,由于有限的碰撞时间,实际达到的能量密度明显低于 Bjorken 的估计值.

理论预言,当强子物质达到很高的能量密度时(比如1—3GeV/fm^3),就可能发生相变,形成夸克胶子等离子体(QGP);并且认为,相对论重离子碰撞有可能提供实现这一相变所需要的能量密度. 现在人们普遍采用 Bjorken[1]的公式,通过测量的横能的(赝)快度密度的最大值 $dE_T/d\eta|_{max}$来估算碰撞所达到的最大能量密度:

$$\varepsilon_{BJ} = \frac{1}{\pi R^2 \cdot \tau_0} dE_T/d\eta|_{max}, \tag{1}$$

式中 πR^2 是两个相撞核中较小一个的横截面积,τ_0是形成时间. 这一公式隐含着一个假定:在 dV 中测得的能量是瞬时产生的,即核-核(A-A)碰撞所需的时间为零. 由于两个相撞核有一定的大小,对 Bjorken 的公式就需要引入有限碰撞时间带来的修正.

另一方面,能量密度是一个与碰撞后的早期行为相关的量,那时体系尚未因膨胀而冷却;而 $dE_T/d\eta$ 则是对最终产生的粒子进行的测量. 要论证能量密度与 $dE_T/d\eta$ 的正比关系,就得对事例中碰撞及粒子产生的全过程一步步跟踪,研究其时空发展. 为此,我们用 Monte Carlo 模型"ODIN"来进行分析. 模型跟踪每一步的粒子碰撞,完整地将所有粒子的时空轨迹、四动量变化记录在一个"历史表"中. 这样,利用历史表中储存的信息,就能分析事例中各个变量的时空发展情况. 关于 ODIN 模型的详细描述将另文发表[2]. 这里,我们着重说明用 ODIN 模型分析事例中的能量密度的时空发展的情况.

首先,定义T时刻在某小空间范围Ω内的内禀平均能量密度ε_Ω. 对于Ω范围内的N_Ω

本文于1992年11月13日收到.
* 本工作部分得到中国国家自然科学基金与美国能源部资助.
1) CCAST 成员;中国科学院理论物理研究所客座研究员.

个粒子,从历史表中可以得到它们在 T 时刻的四动量为

$$p_i=(\boldsymbol{p}_i,E_i),\qquad i=1,2,\cdots N_\Omega. \tag{2}$$

在 Ω 中所有 N_Ω 个粒子的总动量为零的系统 S_c 中,Ω 内的能量为

$$M_\Omega=\sqrt{E_\Omega^2-\boldsymbol{P}_\Omega^2}, \tag{3}$$

其中

$$E_\Omega=\sum_{i=1}^{N_\Omega}E_i,$$

$$\boldsymbol{P}_\Omega=\sum_{i=1}^{N_\Omega}\boldsymbol{p}_i. \tag{4}$$

在 S_c 中,Ω 的体积为 $\Omega\cdot E_\Omega/M_\Omega$. 因此,$\Omega$ 内的内禀平均能量密度则定义为

$$\varepsilon_\Omega=\frac{M_\Omega}{\Omega\cdot E_\Omega/M_\Omega}=\frac{M_\Omega^2}{E_\Omega\cdot\Omega}. \tag{5}$$

ε_Ω 是小空间范围 Ω 的位置与时间 T 的函数,并且与(2)式中各粒子四动量的观测系统的选择无关. 这样,我们就从历史表中储存的信息,获得了能量密度 ε_Ω 的时空发展情况的知识.

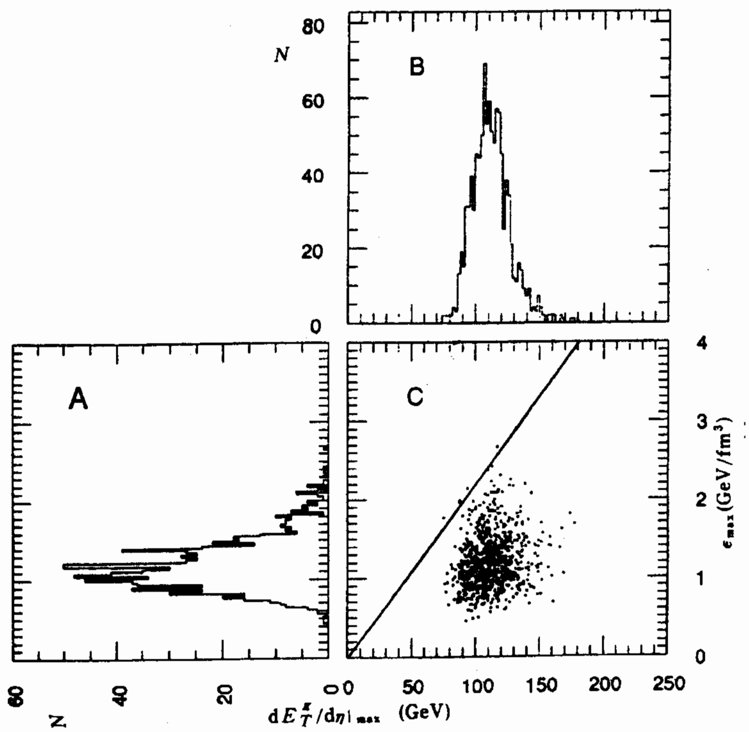

图1　$E_L=200\text{GeV}/N$ 的 $^{32}S+^{197}Au$ 中心碰撞($b\leqslant0.1$fm)时,用 ODIN 模拟1000个事例得到事例数 N,A:按照 ε_{max} 的分布;B:按照 $dE_T/d\eta|_{max}$ 的分布;C:上述两个量的关联.

图中实线为 Bjorken 的估算值. 形成时间 $\tau_0=1\text{fm}/c$

另外,我们要讨论的是与相变条件有关的能量密度,只有达到热平衡的能量,即由参

与了足够多次碰撞后的粒子所携带的能量才应包括在内. 不论核子是否参与了碰撞，它所带的能量主要是沿束流方向运动的动能. 因此，在我们进行的能量密度计算中不把核子的能量包括在内是较为合理的. 至于产生的 π 介子，它们只有在达到形成时间之后才能与其它粒子相碰. 因此，只有经过了形成时间之后的 π 介子的能量才包括在能量密度的计算中.

首先，用 ODIN 模型分析了事例数按最大能量密度 ε_{max} 与横能快度分布的极大值 $dE_T/d\eta|_{max}$ 的分布情况. 图1是对200GeV/ N 的 S+Au 的中心碰撞事例得到的结果. 当形成时间取为1fm/ c 时，中心碰撞对应的平均最大能量密度约为1GeV/fm^3，比取同样形成时间，用 Bjorken 公式所得结果约小一半. 在这一入射能量下，两个核的碰撞时间约为1.2fm/ c. 由于在碰撞过程中一方面系统的能量密度在积累，另一方面系统本身已经在膨胀，因此实际上系统不可能达到取碰撞时间为零的 Bjorken 公式得到的能量密度. 文献〔3〕用流体力学方法分析相对论重离子碰撞所达到的能量密度，也得到类似的结论.

有趣的是，当入射能量增加时，两个相撞核由于更强的 Lorentz 收缩而变得更薄. 这时，碰撞时间缩短，系统在碰撞结束前几乎来不及膨胀. 因此，能量升高时，实际达到的能量密度就会比较接近 Bjorken 公式估算的结果. 图2所示为 RHIC 能量($\sqrt{s_{NN}}=200$GeV)下中心碰撞时的结果. 的确，这时 ODIN 模型得到的事例分布与 Bjorken 的结果比较接近.

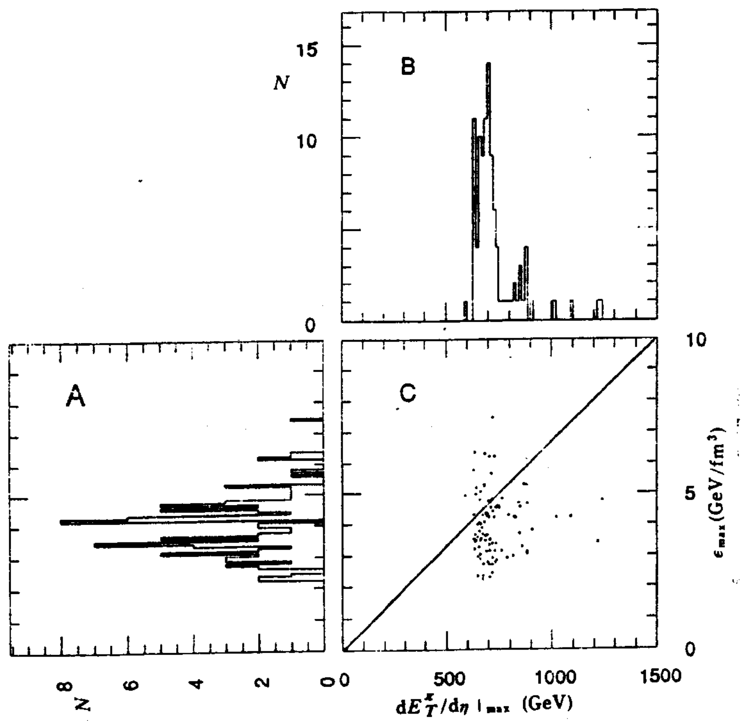

图2 与图1同. 但模拟了 $\sqrt{s_{NN}}=200$GeV 的 ^{197}Au+^{197}Au 的100个中心碰撞事例

另外,我们也分析了 ϵ_{max}与 $dE_T/d\eta|_{max}$的正比关系成立的条件. 如图3所示,对无偏事例 ϵ_{max}与 $dE_T/d\eta|_{max}$有明显的正比关系. 这是由于,当碰撞的中心度增大时,ϵ_{max}与 $dE_T/d\eta|_{max}$都由于参加碰撞核子数目上升而增大. 但是,在中心碰撞中,这两个量几乎不存在任何关联(见图1,2). 事实上,$dE_T/d\eta|_{max}$是在所有粒子都已产生的最终阶段测量的量. 它计入所有进入 $d\eta$ 范围的 dE_T,不论是何时何处产生的,而 ϵ_{max}则是针对核碰撞早期阶段某个特定的时空点的物理量,那时许多次级粒子还没有产生. 所以,没有理由简单地假定这两个如此不同的物理量一直保持正比关系. 图1,2的结果也说明,除了几何的关联,不能用进一步选择最大的 $dE_T/d\eta|_{max}$来得到最高的 ϵ_{max}.

总之,当我们估算不同实验条件下能达到的能量密度,或预言它在更高能量下的行为时,必须谨慎地注意 Bjorken 公式的适用条件.

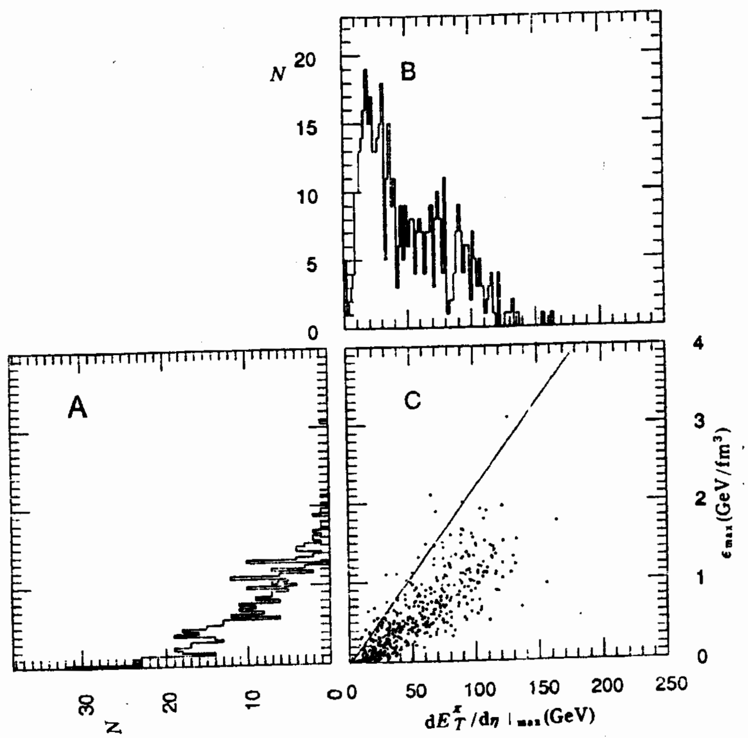

图3 与图1同,但模拟了1000个无偏事例

参 考 文 献

[1] J. D. Bjorken, *Phys. Rev.*, **D27**(1983), 140.
[2] 赵维勤,S. P. Sorensen, 相对论重离子碰撞的 Monte Carlo 模型 ODIN 与能量密度分析.
[3] P. F. Zhuang, L. S. Liu, *Phys. Lett.*, **B265**(1991), 41.

Influence of Finite Collision Time on Energy Density in Relativistic Heavy Ion Collisions

ZHAO WEIQIN
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing* 100039)
S. P. SORENSEN
(*University of Tennessee, Knoxville, TN* 37796, *USA*)
(*Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, TN* 37831, *USA*)

ABSTRACT

The space-time development of the energy density in relativistic heavy ion collisions is analyzed based on Monte Carlo code ODIN. The result shows that the actually reached energy density is much lower than Bjorken's estimation due to the finite collision time.