

中能重离子碰撞动力学过程中的 介质效应*

刘建业 葛愉成 葛凌霄

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

本文对 BUU 方程碰撞项中的核子-核子碰撞截面分别采用有介质和无介质两种情况下的数据, 系统地计算了重离子碰撞中介质效应对集体流的影响. 从有介质核子碰撞截面和无介质核子碰撞截面随入射核子能量变化的规律合理地解释了介质效应对重离子碰撞横动量, 流角等物理量的明显影响. 分析这些影响可以看出在该能区和只考虑核子-核子弹性碰撞, π 产生和 π 吸收的情况下介质效应与核物质状态方程的密切关系.

一、前 言

在中能重离子碰撞理论研究中一般认为核子-核子碰撞为自由核子-核子碰撞. 诸如 ETDH 和 BUU 等重离子碰撞理论都采用自由核子-核子碰撞截面作为一个近似. 实际上在两个重离子碰撞过程中, 由于每个核子均处在核物质中, 周围存在着和该核子相互作用的其它核子所产生的多体效应即介质效应. 这种介质效应会影响碰撞核子的运动速度和相空间. 同时核子-核子之间的相互作用会受到由于介子交换所造成的屏蔽和反屏蔽效应等. 无疑这种介质效应对重离子碰撞的动力学过程产生重要的影响.

我们采用前人^[1,2]关于介质中核子-核子碰撞截面的结果 (包括弹性碰撞和非弹性核子-核子碰撞截面), 利用 BUU 方程计算在重离子碰撞过程中对于介质效应比较敏感的物理量, 诸如横动量、流角和流张量四极矩等. 为了便于比较和分析介质效应对重离子碰撞动力学过程的影响, 同时计算了在无介质情况下同样的物理量. 计算结果表明, 在重离子碰撞过程中, 介质效应对集体流产生了明显的影响; 并通过与无介质情况下计算结果的比较, 可以看出介质效应与核物质状态方程的密切关系. 我们还将横动量的计算结果与实验值进行了比较, 得到了比较满意的符合.

二、介质效应对核子-核子截面的影响

核子-核子碰撞截面的介质效应是研究重离子碰撞动力学过程中介质效应的基础, 故

本文 1989 年 10 月 10 日收到.

* 中国科学院重大课题基金和中国自然科学基金支持的课题.

先对核子-核子碰撞截面中介质效应的影响的主要特征作些简单分析。

我们在计算中选用了 ter Haar 和 Malfliet^[1]关于介质中核子-核子弹弹性碰撞截面的结果。他们利用 Dirac-Brueckner 核物质理论计算了单核子入射能量在 1 GeV 以下介质中核子-核子弹弹性碰撞截面随不同密度 ρ/ρ_0 和不同入射核子动量的变化。其特征为：(i) 在该能区,对于各种密度,介质中核子-核子弹弹性碰撞截面均比无介质情况下的弹性碰撞截面减小;但是随入射能量的增加二者的差别逐渐变小。(ii) 随着 ρ/ρ_0 的减小介质中核子-核子弹弹性碰撞截面增大。

我们在计算中选用了 G. Bertsch 和 G. E. Brown^[2]关于核子-核子非弹性碰撞截面的计算值。因为 ter Haar 和 Malfliet 的计算中主要考虑了介质效应对碰撞核子能量和相空间的影响,没有考虑由于介子交换引起的屏蔽效应,而 G. Bertsch 和 G. E. Brown 的计算包括了屏蔽效应。他们的计算截面参数化公式为:

$$\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{有效}} = \sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{无介质}} \left[1.0 + 0.24 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 - 0.07 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \right], \quad (1)$$

其中 $\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{有效}}$ 和 $\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{无介质}}$ 分别是有介质和无介质情况下核子-核子非弹性碰撞截面,显然 $\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{有效}}/\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{无介质}}$ 随密度 $\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)$ 的增加而增加。 ρ_0 是核正常密度。在该能区, $\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{有效}}$ 均比 $\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{无介质}}$ 大。这些情况正好和弹性核子-核子碰撞截面的变化趋势相反。同时,在有介质和无介质的情况下非弹性核子-核子碰撞截面随入射能量的增加而增加,而弹性核子-核子碰撞截面则随入射能量的增加而减小。

三、介质效应对重离子碰撞动力学过程的影响

1. BUU 方程中的介质效应

介质效应对重离子碰撞动力学过程的影响是通过 BUU 方程中的碰撞项引入的,如下式所示^[3]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} - \nabla U \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} = -4 \int \frac{d^3 P_2 d^3 P_1 d^3 P_2' d^3 P_1'}{(2\pi)^6} \sigma v_{12} [f f_2 (1 - f_1)(1 - f_2) - f_1' f_2' (1 - f)(1 - f_2')] \delta^3(\mathbf{P} + \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2') \quad (2)$$

上式等号右边是碰撞项,其中 σ 是核子-核子碰撞截面,如果 σ 采用有介质情况下的核子-核子碰撞截面就可以研究介质效应对重离子碰撞过程的影响,其中泡里修正已经包括在 BUU 方程的碰撞项中。无介质情况下核子-核子碰撞截面采用文献[4]中参数化的公式:

$$\sigma_{NN}^e(\sqrt{s}) = \begin{cases} 55, & \sqrt{s} < 1.8993 \\ \frac{35}{1 + 100(\sqrt{s} - 1.8993)} + 20, & \sqrt{s} > 1.8993 \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{in}}(\sqrt{s}) = \begin{cases} 0, & \sqrt{s} < 2.015 \\ \frac{20(\sqrt{s} - 2.015)^2}{0.015 + (\sqrt{s} - 2.015)^2}, & \sqrt{s} > 2.015 \end{cases} \quad (4)$$

这里 σ_{NN}^e 和 $\sigma_{NN \rightarrow N\Delta}^{\text{in}}$ 分别是自由核子-核子弹弹性碰撞截面和非弹性碰撞截面, \sqrt{s}

是核子-核子质心系的能量,在实验室系和质心系之间由动量-能量四维矢量洛伦兹变换得到:

$$\sqrt{s} = [(E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)^2]^{1/2} = [2T_1 m_2 + (m_1 + m_2)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

其中 T_1 是实验室系中入射核子的动能, m_1 和 m_2 分别是核子 1 和核子 2 的静止质量. E_1 和 E_2 , \mathbf{P}_1 和 \mathbf{P}_2 分别是核子 1 和核子 2 的能量和动量. 公式(2)中的 U 取密度 $\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$ 相关的平均场即

$$U(\rho) = -A \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) + B \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma, \quad (6)$$

其中 A 、 B 和 γ 是从现有核物质基态性质得到的参量. $\gamma = 2$ 为硬势, $\gamma = 7/6$ 为软势, γ 的大小反映核物质可压缩性的大小. 在我们的计算中相应硬势有

$$A = -124 \text{ MeV}, \quad B = 70.5 \text{ MeV};$$

相应于软势有 $A = -356 \text{ MeV}$, $B = 303 \text{ MeV}$.

采用蒙特卡罗模拟和试验网格法求解 BUU 方程,其参数试验粒子数为 100, 时间步长为 $0.5 \text{ fm}/c$, 网格大小为 1 fm^3 , 可以在计算时间内保证 Vlasov 方程求解的稳定性.

图 1 是 $\frac{E_L}{A} = 400 \text{ MeV}$ 的 $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$, 碰撞参数 $b = 3 \text{ fm}$ 和硬势情况下碰撞核的空间密度分布随时间的变化. 当 $t = 10 \text{ fm}/c - 15 \text{ fm}/c$ 之间的密度最大, 然后随 t 的增加而逐渐扩散.

2. 集体流的介质效应

为了分别比较和分析弹性核子碰撞下的介质效应、非弹性核子碰撞下的介质效应和总介质效应对于重离子碰撞过程中各种物理量的影响, 本工作计算了以下六种情况下的物理量, 即无介质情况下的硬势 (FH) 和软势 (FS), 有介质情况下的硬势 (MH) 和软势 (MS), 有介质情况下的弹性核子碰撞硬势 (EH) 和非弹性核子碰撞硬势 (IH). 主要分析了以下的物理量.

(i) 流角和动能流张量分析

定义动能流张量^[9]为

$$F_{ij} = \sum_{\nu} \frac{P_i(\nu) P_j(\nu)}{2m(\nu)}, \quad (7)$$

其中 ij 是 Cartesian 分量, ν 是粒子指标, $m(\nu)$ 表示粒子 ν 的质量. 对角这些张量可以得到三个主轴的本征值和本征矢量. 其中把对应于最大本征值的本征矢量和入射束流方向之间的夹角定义为流角 θ_F .

(ii) 横动量分析^[6]

由被测粒子的横动量构成向量如下:

$$\mathbf{Q} = \sum_{\nu=1}^m W_{\nu} \mathbf{P}_{\nu \perp}, \quad (8)$$

这里

$\text{Nb}^{93} + \text{Nb}^{93} 400\text{MeV/u } b = 3.0\text{fm (BUU/VLA)}$

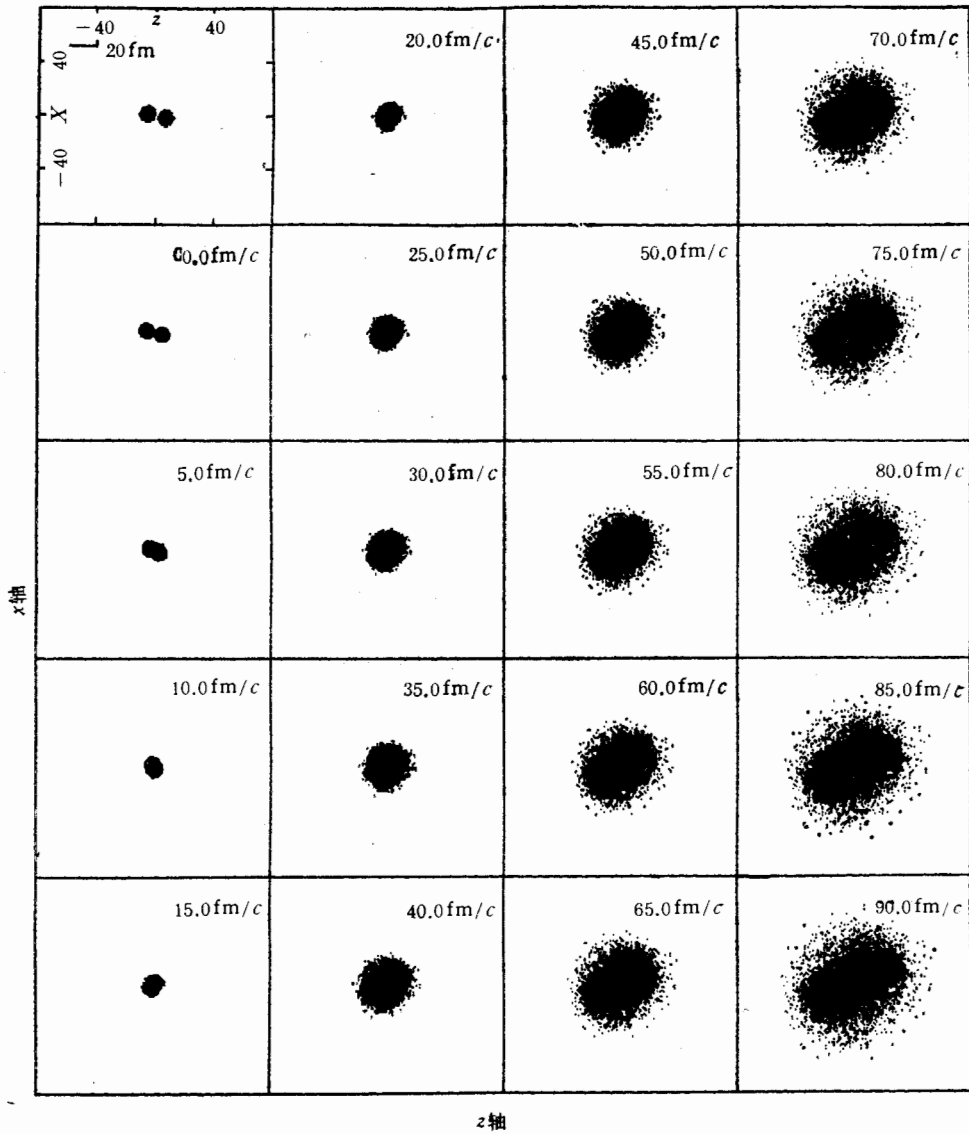


图1 空间密度分布随时间的变化

图中左上角小方格中是坐标刻度,每格中的数字是时间

$$W_v = \begin{cases} -1, & y_v < 0 \\ +1, & y_v > 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 y_v 是快度

$$y_v = \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{(E + P_{\parallel})}{(E - P_{\parallel})} \right\}, \quad (10)$$

E 和 P_{\parallel} 分别是核子的总能量和核子动量平行于束流的分量。在反应平面内每个核子的平均横动量为

$$\langle P_x \rangle = \frac{(Q - P) \cdot P}{|Q - P| A}, \quad (11)$$

(iii) 流张量四极矩

流张量四极矩为

$$\langle Q_{33} \rangle = \langle 2P_z^2(\nu) - P_x^2(\nu) - P_y^2(\nu) \rangle, \quad (12)$$

这里 P_x , P_y 和 P_z 是核子动量的三个分量。图 2 分别给出了 400 MeV/A, $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$ 反应所计算的流角 θ_F , 横动量 $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 和流张量四极矩 $\langle Q_{33} \rangle$ 随碰撞时间的发展, 其饱和值和极大压缩密度的大小列于表 1 中。

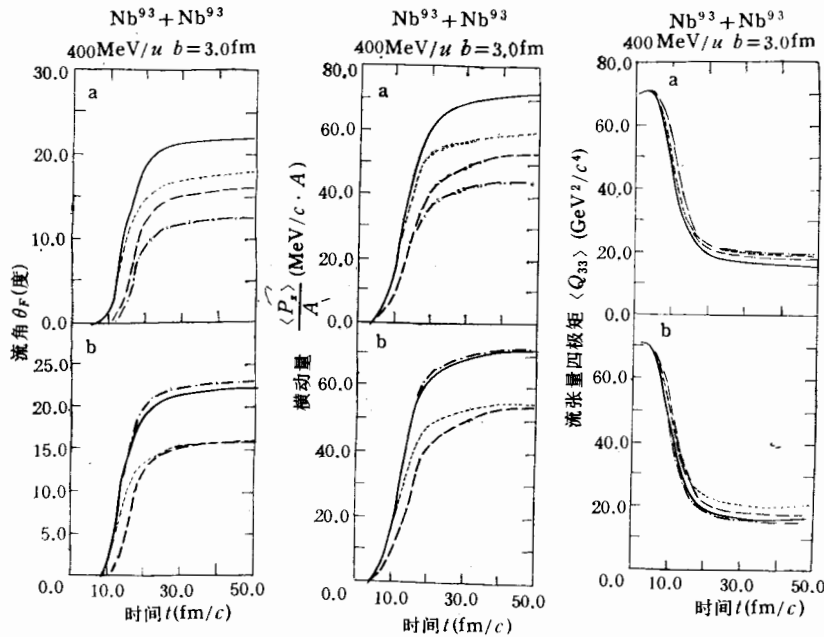


图 2 左图是流角 θ_F 的时间谱, 中图是反应平面内每个核子平均动量 $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 的时

间谱, 右图是流张量四极矩 $\langle Q_{33} \rangle$ 的时间谱

$$\text{其中 } a \begin{cases} \text{FH}(-), \text{MH}(\dots) \\ \text{FS}(-\dots), \text{MS}(-\dots) \end{cases} \quad b \begin{cases} \text{FH}(-), \text{IH}(-\dots) \\ \text{FS}(\dots), \text{EH}(-\dots) \end{cases}$$

比较和分析 θ_F , $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 以及 $\langle Q_{33} \rangle$ 的时间谱, 可以看出介质效应的明显影响。

(a) 起初 θ_F 和 $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 随时间 t 的增加而增加, $\langle Q_{33} \rangle$ 随 t 的增加而减小。这段时间内正好是核物质被压缩阶段 (参看图 3)。在 $t \cong 13 \text{ fm/c}$ 附近核物质密度达到最大值。在密度随 t 的上升过程中, 碰撞系统的集体能以压缩能和热能的形式储存起来。当密度从最大值下降时, 核体积膨胀, 压缩能和热能转化为集体流能量。在此期间也正是 θ_F 和 $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 随 t 上升最快时期, 同时也是 $\langle Q_{33} \rangle$ 随 t 下降最快时期。当 $t \cong 25 \text{ fm/c}$ 时

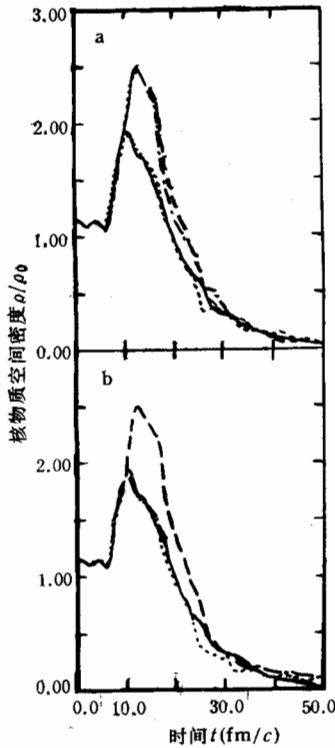
表1 $\theta_F, \frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 和 $\langle Q_{33} \rangle$ 的饱和值和 ρ/ρ_0 的最大值

$\frac{E_L}{A}$ (MeV)	400						1000		200	
	FH	FS	MH	MS	EH	IH	FH	MH	FH	MH
θ_F	22.23	16.16	18.50	13.01	16.59	23.12	20.10	22.11	13.70	6.95
$\frac{\langle P_x \rangle}{A}$	72.91	55.10	61.50	48.25	57.50	73.66	110.05	123.15	27.91	17.85
$\langle Q_{33} \rangle$	15.73	17.94	18.60	19.10	20.40	15.20	45.15	40.21	8.12	10.21
ρ/ρ_0	1.88	2.55	1.86	2.52	1.93	1.84				

$\theta_F, \frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 和 $\langle Q_{33} \rangle$ 均达到饱和值,此后基本上保持不变。(b) θ_F 和 $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 的大小在很大程度上反映了状态方程的硬度,而 $\langle Q_{33} \rangle$ 近似地看做热化的标志。在无介质条件下,当

$Nb^{93} + Nb^{93}$ 400 MeV/ μ $b=3.0$ fm

这些物理量达到饱和之后, $\theta_F(\text{FH}) > \theta_F(\text{FS})$,

图3 核物质空间密度 ρ/ρ_0 的时间谱

图中 a $\left\{ \begin{array}{l} \text{FH}(\text{---}), \text{FS}(\text{---}) \\ \text{MH}(\text{.....}), \text{MS}(\text{---}) \end{array} \right.$
 b $\left\{ \begin{array}{l} \text{FH}(\text{---}), \text{FS}(\text{---}) \\ \text{EH}(\text{.....}), \text{IH}(\text{---}) \end{array} \right.$

$$\frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FH}) > \frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FS}),$$

$\langle Q_{33} \rangle(\text{FH}) < \langle Q_{33} \rangle(\text{FS})$. (c) 在

$$\frac{E_L}{A} = 400 \text{ MeV}$$

的情况下,介质效应相当于使状态方程变软,即

$$\theta_F(\text{FH}) > \theta_F(\text{MH}),$$

$$\theta_F(\text{FS}) > \theta_F(\text{MS}),$$

$$\frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FH}) > \frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{MH}),$$

$$\frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FS}) > \frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{MS}),$$

$$\langle Q_{33} \rangle(\text{FH}) < \langle Q_{33} \rangle(\text{MH}),$$

$$\langle Q_{33} \rangle(\text{FS}) < \langle Q_{33} \rangle(\text{MS}).$$

(d) 由图2的下图,可以看出在有介质情况下,弹性核子碰撞介质效应(EH)相当于使状态方程变软,即

$$\frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FH}) > \frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{EH}),$$

$$\theta_F(\text{FH}) > \theta_F(\text{EH});$$

而非弹性核子碰撞介质效应(IH)相当于使状态方程变硬,即

$$\frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FH}) < \frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{IH}),$$

$\theta_F(\text{FH}) < \theta_F(\text{IH})$. 正如第一节中所述,在此能区,介质中核子弹性碰撞截面对自由核

子碰撞截面的减少量远大于介质中核子非弹性碰撞截面对自由核子非弹性碰撞截面的增加量，故二者总的介质效应相当于使状态方程变软了。

图 4 是在有介质硬势情况下 (MH) 横动量的快度分布, 图中实线是碰撞参数 $b = 1, 2, 3, 4, 5$ 五种情况下横动量达到饱和后的平均值. 圆点是实验值. 其形状及大小与实验值基本一致.

随着入射重离子能量的增高, 弹性核子碰撞截面减小, 而非弹性核子碰撞截面增加. 当入射重离子能量增加到一定数值时, 非弹性核子碰撞截面的贡献起主导作用; 在非弹性道考虑 π 产生和 π 吸收的情况下, 上面的情况就会倒过来. 图 5 右图是

$$\frac{E_L}{A} = 1000 \text{ MeV}$$

的 $\theta_F, \frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 和 $\langle Q_{33} \rangle$ 的时间谱, 明显地看出

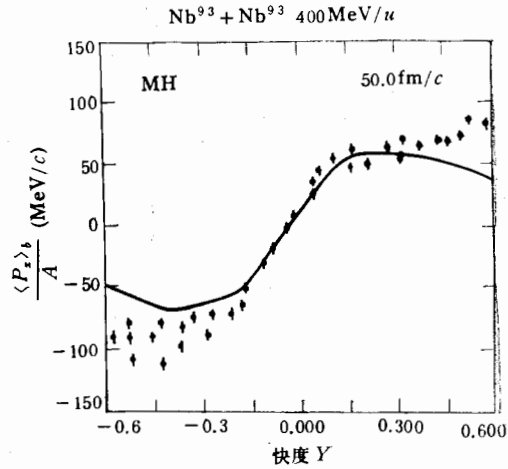


图 4 反应平面内每个核子平均横动量对各种碰撞参数 b 的平均值 $\frac{\langle P_x \rangle_b}{A}$ 随快度 Y 的变化. 图中实线表示理论计算值, 圆点表示实验值.

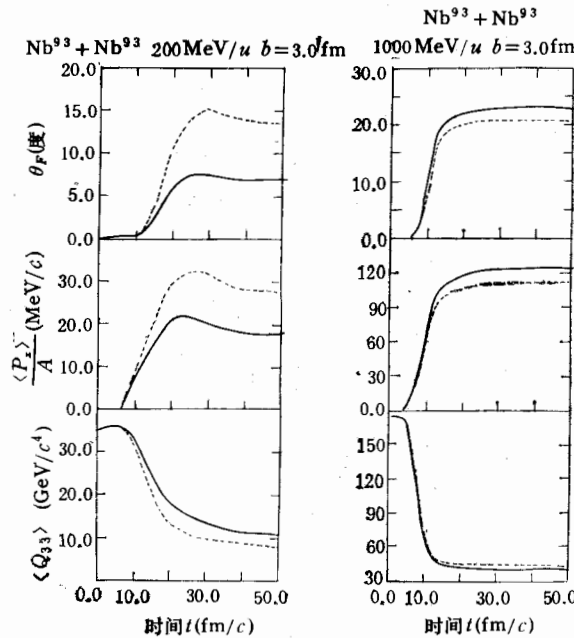


图 5 左图是 $\frac{E_L}{A} = 200 \text{ MeV}$, 右图是 $\frac{E_L}{A} = 1000 \text{ MeV}$ 时流角 θ_F 反应平面内每个核子平均横动量

$\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 和流张量四极矩 $\langle Q_{33} \rangle$ 的时间谱

其中 FH(.....) MH(——)

$\theta_F(\text{FH}) < \theta_F(\text{MH})$, $\frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FH}) < \frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{MH})$ 和 $\langle Q_{33} \rangle(\text{FH}) > \langle Q_{33} \rangle(\text{MH})$, 即介质

效应相当于使状态方程变硬了. 另一方面, 从 $\frac{E_L}{A} = 400\text{MeV}$ 开始, 由于随能量的降低弹性核子碰撞截面的贡献继续增加, 而非弹性核子碰撞截面的贡献很小, 结果弹性核子碰撞相关的介质效应变得更为重要. 图5左边为 $\frac{E_L}{A} = 200\text{MeV}$ 时, θ_F , $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$ 和 $\langle Q_{33} \rangle$

的时间谱, 可以明显地看出 $\theta_F(\text{FH}) > \theta_F(\text{MH})$, $\frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{FH}) > \frac{\langle P_x \rangle}{A}(\text{MH})$ 和

$$\langle Q_{33} \rangle(\text{FH}) < \langle Q_{33} \rangle(\text{MH}),$$

相当于使状态方程继续变软. 总之由于弹性和非弹性核子碰撞截面明显的能量依赖性, 故在重离子碰撞过程中介质效应对横向流的影响也是随入射重离子的能量而变化的.

四、结 束 语

综上所述, 核物质集体流如横动量、流角和流张量四极矩的大小反映了核物质状态方程的性质, 通过核物质介质效应对重离子碰撞动力学过程中集体流的明显影响可以看出介质效应与核物质状态方程之间有密切的关系. 在实验室系中入射单核子能量大约小于400MeV的能区, 介质效应相当于使状态方程变软, 因为在此能区考虑介质效应后核子弹性碰撞截面的贡献起主导作用. 随着入射能量的增加非弹性核子碰撞截面的贡献逐渐变得重要, 当入射能量增加到一定数值时非弹性核子碰撞的贡献变得重要, 此时介质效应相当于使方程变硬. 这与 Bertsch^[7] 对 $800\text{MeV}/A$ $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$ 的研究结论是一致的. 但由于核介质中核子弹性和非弹性碰撞截面的能量依赖性, 笼统地认为介质效应会增大横动量的结论有片面性, 介质效应对横向流到底如何影响也是能量相关的.

当然横动量分布不仅依赖于介质效应, 还依赖于动量相关的平均场, 本文中还未考虑动量相关的平均场, 这方面的研究工作正在进行中.

参 考 文 献

- [1] ter Haar and R. Malfliet, *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 1611.
- [2] G. Bertsch, G. E. Brown, et al., Private communication.
- [3] G. Bertsch, H. Krust, and S. Das Gupta, *Phys. Rev.*, **C29**(1984), 673.
- [4] G. Bertsch and S. Das Gupta, *Phys. Rep.*, **160**(1988), 190.
- [5] M. Gyulassy, K. A. Frankel and H. Stoecker, *Phys. Lett.*, **B110**(1982), 185.
- [6] P. Damelewieg and G. Odyniec *Phys. Lett.*, **157B**(1985), 146.
- [7] G. Bertsch, G. E. Brown, et al., *Nucl. Phys.*, **A490**(1988), 745.

The Medium Effects in Dynamics Processes of the Intermediate Energy Heavy Ion Collisions

LIU JIANYE GE YUCHENG GE LINGXIAO

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

ABSTRACT

The sideways flow induced by heavy ion collision have been calculated in the framework of BUU equation with and without medium in n-n collision. The medium effect on sideways flow are important, And the addition of medium dependence to n-n collision cross section gives more sideways flow than that of free n-n collision at 1000 MeV/ A , but less sideways flow at 200 and 400 MeV/ A due to the energy and density dependences of the elastic and inelastic n-n cross section in the medium.