

# 中高能重离子碰撞过程中集体流的 能量和碰撞参数相关性\*

杨富中 刘建业

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

## 摘 要

在 BUU 方程中引入真实的与动量和密度相关的平均场及介质中与密度和能量相关的核子-核子碰撞截面。在各种入射能量和碰撞参数下, 对于反应  $\text{Ca}^{40} + \text{Ca}^{40}$  求解 BUU 方程。系统地计算和分析了集体流随时间变化的过程, 结果表明: 动量相关势和介质效应对集体流都有明显的影响, 而且这种影响都有明显的能量和碰撞参数相关性。

## 一、前 言

研究中高能重离子碰撞的目的之一是设法建立核物质的状态方程。近年来, 动量相关的状态方程受到了极大的关注, 因此需要研究对状态方程敏感的可观察量。横动量流是反应过程的一种集体流。它对状态方程敏感, 而且是实验可观察量。在反应过程初期, 系统被压缩, 导致核物质系统密度不均匀, 即存在一个密度的梯度。而势场是与密度相关的, 密度的梯度会诱导出势的梯度。这样就会产生一个力, 这个力在一定范围内表现为排斥, 导致系统的膨胀。在系统膨胀的过程中, 粒子沿横向优势发射便形成了横流。因而, 对横动量流的分析能够获取有关核物质被压缩的程度及状态方程的信息。

我们考虑了动量相关势和介质效应, 用数值方法求解了 BUU 方程。在入射能量  $E_L/A = 200, 400$  和  $800\text{MeV}$  及碰撞参数  $b = 1.0, 3.0$  和  $5.0\text{fm}$  时, 对于反应  $\text{Ca}^{40} + \text{Ca}^{40}$ , 系统地计算了横动量随时间的变化过程。为了便于比较和分析动量相关势及介质效应的影响, 本文还分别在考虑和不考虑介质效应两种情况下计算了软势和硬势产生的横动量时间谱。

本文在第二节简要介绍了 BUU 方程及有关问题, 第三节分析和讨论了计算结果, 最后为小结。

本文 1991 年 9 月 4 日收到。

\* 中国科学院重大课题基金和中国自然科学基金资助。

## 二、BUU 方程及有关方面

### 1. 关于 BUU 方程

BUU 方程包含了影响重离子碰撞动力学过程的三大要素: 平均场, 二体碰撞和泡里阻塞效应. 其形式如下,

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \dot{\mathbf{r}} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f - \nabla_{\mathbf{r}} U \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f = I_{\text{coll}}, \quad (1)$$

$$I_{\text{coll}} = -4 \int \frac{d^3 p_2 d^3 p_1 d^3 p_2' d^3 p_1' d\Omega}{(2\pi)^6} \sigma v_{12} [f f_2 (1 - f_1') (1 - f_2') - f_1' f_2' (1 - f) (1 - f_2)] \delta(\mathbf{p} + \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1' - \mathbf{p}_2').$$

$I_{\text{coll}}$  为碰撞项,  $v_{12}$  为相对速度,  $\sigma$  是核子-核子碰撞截面,  $f$  为相空间中单粒子分布函数, 方程左边为与平均场有关部分. 当  $I_{\text{coll}} = 0$  时 BUU 方程即为 Vlasov 方程. 方程左边第二项中的  $\dot{\mathbf{r}}$  为单粒子坐标的时间导数, 当平均场与动量无关时,  $\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{p}/m$ , 即为粒子的速度. 当取动量相关的平均场时:  $\dot{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{p}}{m} + \nabla_{\mathbf{p}} U(\rho, \mathbf{p})$ . 第二项体现了平均场的动量相关特性,  $\nabla_{\mathbf{p}}$  表示对动量求梯度.

碰撞项  $I_{\text{coll}}$  中的核子-核子碰撞截面可选用自由的核子-核子碰撞截面, 也可选用介质中的有效截面<sup>[1]</sup>.

### 2. 动量相关的平均场

Wiringa<sup>[2]</sup> 利用较真实的哈密顿量计算了核物质中的单粒子势, 哈密顿量同时包含了单粒子势和三核子相互作用. 通过与核子-核子散射数据、少体结合能和原子核基态特性的比较, 发现这种势是目前较好的一种动量相关势. 其参数形式为:

$$U(\rho, K) = \alpha(\rho) + \frac{\beta(\rho)}{1 + [K/\Lambda(\rho)]^2}, \quad (2)$$

其中  $K = p/\hbar$ ,  $p$  为粒子动量.

可通过最小二乘法, 利用给定的几个密度  $\rho$  处的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\Lambda$  值, 拟合出各个  $\rho$  处的势.

## 三、计算结果和分析

我们用蒙特卡罗模拟和试验粒子网格法数值求解 BUU 方程. 单粒子运动遵循哈密顿方程. 计算横动量时采用如下公式:

$$\langle P_x \rangle = \frac{(\mathbf{Q} - \mathbf{P}) \cdot \mathbf{P}}{|\mathbf{Q} - \mathbf{P}| A}, \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{Q} = \sum_{\nu=1}^A w_{\nu} \mathbf{P}_{\nu, \perp},$$

$$W_y = \begin{cases} -1, & y_v < 0 \\ +1, & y_v > 0 \end{cases}$$

这里  $y_v$  为快度:

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

$E$  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,  $\langle P_x \rangle / A$  是反应平面内每个核子的平均横动量。

具体地计算了如下几种情况: 动量相关势+自由核子-核子碰撞 (FP), 动量相关势+介质中核子-核子碰撞的有效截面 (MP), 软势+自由碰撞截面 (FS) 及硬势+自由碰撞截面 (FH)。

计算结果如下:

1. 从图 1 可见: 在 400 和 800 MeV 时, 相应于 FP 的曲线位于 FH 和 FS 的中间, 说明动量相关势产生的排斥作用相当于硬度在软、硬势之间。另一方面, 在  $E_L/A = 800$  MeV 时, FP 的曲线更接近于 FH 的曲线; 而在  $E_L/A = 400$  MeV 时, FP 的曲线几乎在 FH 与 FS 曲线的正中间。这说明动量相关势的硬度在能量高时变大, 但在 800 MeV 时, 还小于硬势的硬度。在  $E_L/A = 200$  MeV 时, 相应于 FP 和 FS 的横动量曲线有交错情况, 说明在能量较低时, 动量相关势的硬度已接近于软势。综上所述: 相对于软势而言, 动量相关势产生更大的排斥效应, 增大了横动量流, 而且这种效应明显地依赖于入射能量。

2. 从图 1 中 MP 的曲线的相对位置可见: 在  $E_L/A = 200$  MeV 时, MP 情况下的曲线在其余三条线下面, 说明动量相关势和介质效应的总效果在此时使状态方程变软, 而且在 400 MeV 时仍然如此。在  $E_L/A = 800$  MeV 时, 相应于 MP 的曲线明显地超过了 FS 和 FP 的曲线, 说明在  $E_L/A = 200$  和 400 MeV 时, 介质效应使状态方程变软, 在 800 MeV 时使方程变硬。因此介质效应显著地依赖于入射能量。

3. 横动量在不同入射能量下随时间演化的特性显示在图 2 中。它表明横动量随入射能量的增加而增加。这是由于入射能量愈高, 压缩愈明显, 反应愈激烈, 使得压缩区的体积变小, 因而产生更大的排斥作用, 使  $\langle P_x \rangle / A$  增加。

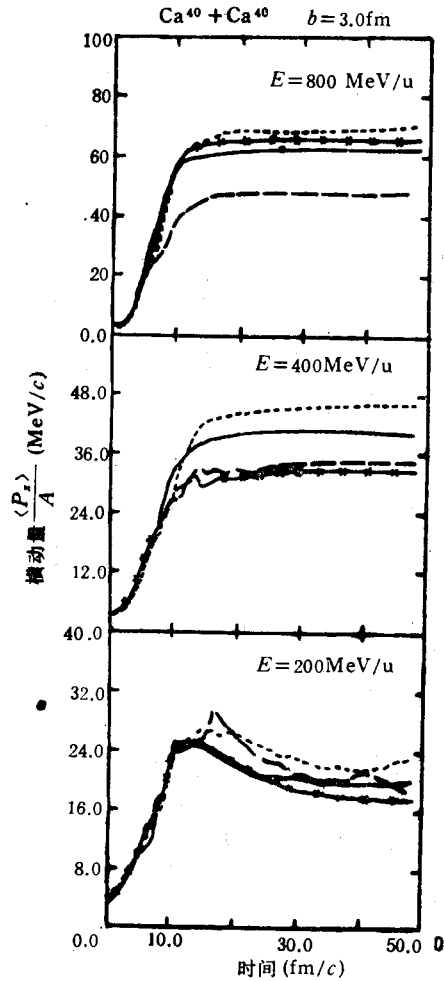


图 1 显示了在  $b = 3.0$  fm 和三个入射能量下, 对应于 4 种情况 (MP、FP、FS、FH) 的  $\langle P_x \rangle / A$  时间谱

—FP ———FH ····FS -·-·-MP

4. 图3显示了不同碰撞参数下  $\langle P_x \rangle / A$  的时间谱。从图可见：横动量流的值明显地依赖于碰撞参数，而且，在  $b = 3.0\text{fm}$  时，有较大的值。在对心碰撞时，由于系统的轴对称性，限制了集体横流的发射，因而横动量在此时不会出现极大值，尽管此时压缩最大。在  $b = 1.0\text{fm}$  时，可视为近心碰撞，因而横流值也不会太大。正如计算结果所显示的，在  $b = 3.0\text{fm}$  时，有较大的横流，但在  $b = 5.0\text{fm}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  时，横流较小。而且，对于不同的平均场，横流随碰撞参数的变化幅度也不同。另外比较 FH 与 MH (介质中的有效碰撞截面+硬势) 的情况可见：在有介质效应时，同一种平

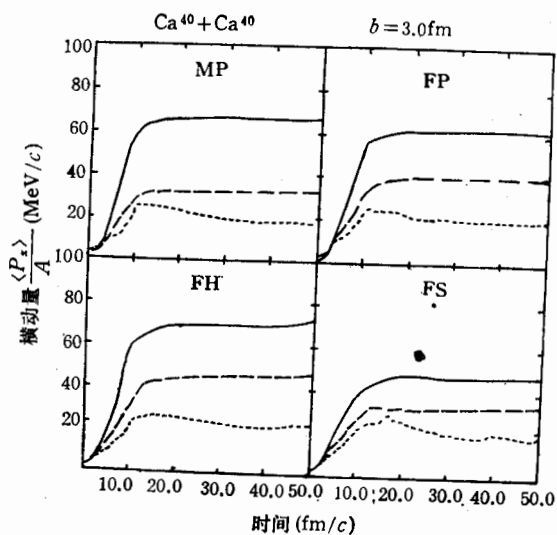


图2 显示了  $b = 3.0\text{fm}$  时,不同入射能量

下  $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$  的时间谱

—800MeV, ----400MeV, .....200MeV

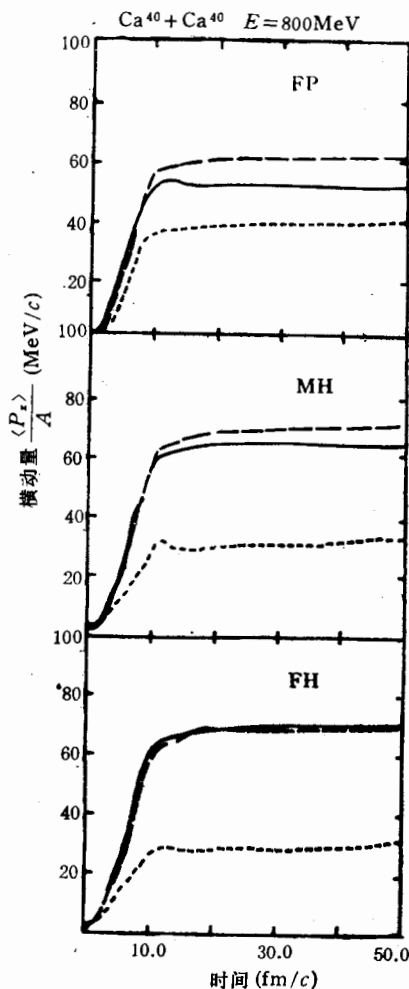


图3 显示了  $E_L/A = 800\text{MeV}$  时,不同碰撞

参数下,  $\frac{\langle P_x \rangle}{A}$  的时间谱

—  $b = 1.0\text{fm}$ , ----  $b = 3.0\text{fm}$ , .....  $b = 5.0\text{fm}$

均场产生的横流随碰撞参数的变化幅度也不尽相同。总的来说，横流对平均场和介质效应都很敏感，而且动量相关势和介质效应的影响都显然地依赖于碰撞参数。

#### 四、小 结

综上所述,可得出结论:集体横流对动量相关势和介质效应很敏感。能量较低时,这两种效应的总效果是使状态方程变软;能量较高时,这两种效应均使状态方程变硬——相对于软势。而且,这两种效应单独的及其综合的效应都明显地随入射能量和碰撞参数的变化而变化。

## 参 考 文 献

- [1] 刘建业、葛榆成、葛凌霄, 高能物理与核物理 15(1991), 71  
[2] R. B. Wiringa, *Phys. Rev.*, C38 (1988), 2967.

## Impact Parameter and Bombarding Energy Dependence of Collective Flow in the Dynamics Process of Intermediate High Energy Heavy Ion Collision

YANG FUZHONG LIU JIANYE

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

## ABSTRACT

The time processes of collective flow were calculated by use of BUU equation with momentum dependence mean field and nucleon-nucleon collisions in medium. It is shown that the momentum dependence mean field effect and the medium effect on the collective flow are obvious and sensitive to impact parameter and bombarding energy.