

中能区 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应中的能量耗散、 π 介子阈下产生和流角

马余刚 沈文庆 冯 军

(中国科学院上海原子核研究所, 201800)

葛 凌 霄

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

用扩展 BUU 模型计算了中能区 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 重系统的能量耗散、 π 介子阈下产生和流角, 定量地拟合了 $43\text{MeV}/u$ $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 实验的能量耗散和类弹碎片核电荷数的关系及类弹类靶碎片核电荷数的关联。

一、前 言

前几年,国际上开展了一些中能区的核反应实验,研究了非完全融合、复杂粒子发射、热核的性质、炮弹碎裂及多重碎裂等现象,同时分析了一些中能区的集体流现象^[1-6]。实验研究大多集中于较轻或中重,且较为对称的系统,而对中能区重系统较高能量的核反应实验研究较少^[7],理论分析也不多。中能区重系统的理论研究对探讨中能重离子反应动力学、态方程、核反应中的核物质的集体性质等都有很大的意义。

现在对中能区核反应的理论处理已有很多种方法,如 TDHF 理论、BUU 方法、QMD 方法和流体力学方法等等。BUU 方法是关于一体密度矩阵的理论^[8],它体现了核内级联模型 (INC) 的多体性质,同时也考虑了平均场和泡利效应。目前 BUU 方程的应用非常广泛,它借助于试验粒子和网格技术求解,可以从反应相空间密度分布随时间的演化中,取出许多物理量随时间的演化情况,但以往 BUU 的应用多集中于较对称的,轻的或中重的且核处于稳定线附近的系统。我们在处理粒子的发射时推广了 BUU 模型^[9],并利用这个扩展 BUU 模型作 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 的能量耗散, π 介子的阈下产生及流角的研究。对大部分反应系统而言,用一般的 BUU 处理就很好了,但对于重系统来说,用 BUU 处理还有一些问题,主要是: (1) 库仑势的影响可能较为明显; (2) 重炮弹和靶容易发生裂变。使用没有这两点的 BUU 来研究中能重系统的核反应时,要对实验和理论进行比较较为困难,在分析时必须加以注意。但不管如何, BUU 方法还是能很好地预言中能区重系统反应的某些特征及其随能量的变化,对很多物理现象也能作定性的分析,甚至作一些

定量的拟合都很好。

在扩展的 BUU 模型中,我们区分了靶弹的中、质子,对核子初始分布区分了中子和质子的不同分布,引入了表面弥散度、中子过剩自由度和形变参数等,同时考虑到中能区的实验事实,区分了不同核子之间的散射截面,并给核子的发射定义了合理的条件^[9]。我们选取 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应系统,取 50 个试验粒子为一个核子,时间步长 $1\text{fm}/c$,已证实了有足够好的稳定性。为了叙述方便,我们约定系统质心系能量为 E_{cm} ,库仑势 V_{CB} ,总动能损失 TKEL,实验室入射能 E_{in} 。

二、能量耗散和反应机制

图 1 显示了中能区 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 周边碰撞的试验粒子密度分布在反应平面投影随时间的演化,选取 $b = 9\text{fm}$ 。图中清楚地表明了反应机制随轰击能的变化。在 $E_{\text{in}} = 20\text{MeV}/u$ 轰击能时,反应是典型的 DIC 图象,靶弹相粘后,存在旋转效应、耗散动能、弛豫各种自由度;到足够长时间后两核分离,仍能基本保持两体性质。在该能量下,

$$E_{\text{cm}}/V_{\text{CB}} = 3.4 > 1.6,$$

根据过去对 DIC 的研究,反应应该有旋转效应。到 $200\text{fm}/c$ 时, $\text{TKEL} = 0.5\text{GeV}$, $\text{TKEL}/E_{\text{cm}} = 0.42$, 考虑库仑能时的全弛豫能量为 $(E_{\text{cm}} - V_{\text{CB}})/E_{\text{cm}} = 0.70$, 所以 $\text{TKEL}/(E_{\text{cm}} - V_{\text{CB}}) = 0.6$, 即在这个过程中共有 60% 的可弛豫能量耗散掉了。随着碰撞参数减小,这个比值向 1 的方向增加。在 $44\text{MeV}/u$ 时,反应类似于高能区的旁观者-参与者 (PS) 行为,但它仍有旋转效应。两核重迭区形成了一个高激发区(参与者),它随时间增加逐步退激,类弹旁观者还清楚地保持着类弹性质,同时反应过程中有许多轻粒子的发射。到 $E_{\text{in}} > 100\text{MeV}/u$ 时,炮弹碎成许多小碎片,已不再存在类弹碎片了(类靶也可能发生裂变或其它机制的反应,由于 BUU 没有考虑裂变,很难与实验作这样的比较)。对于近心碰撞,在能量 $E_{\text{in}} > 100\text{MeV}/u$ 时,发生了多重碎裂反应(图 2),发射一些复杂粒

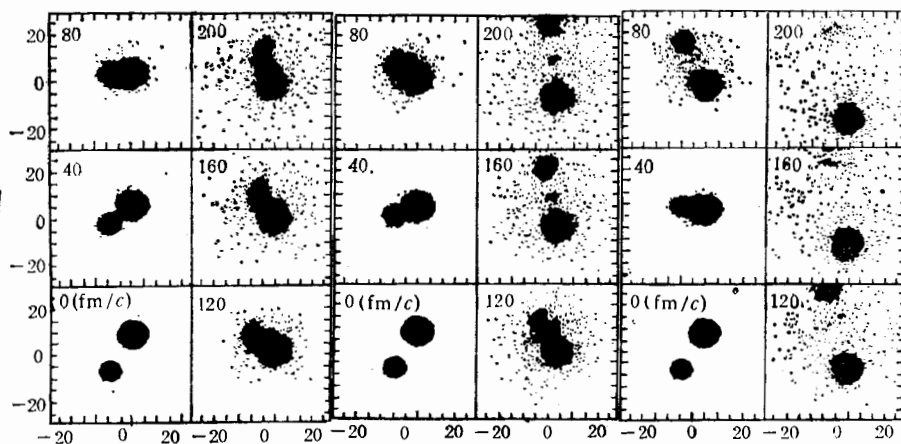


图 1 $b = 9\text{fm}$ 时试验粒子在 $X-Z$ 平面内的密度轮廓随时间的演化
从左到右分别是轰击能 $E_{\text{in}} = 20\text{MeV}/u$, $44\text{MeV}/u$ 和 $100\text{MeV}/u$

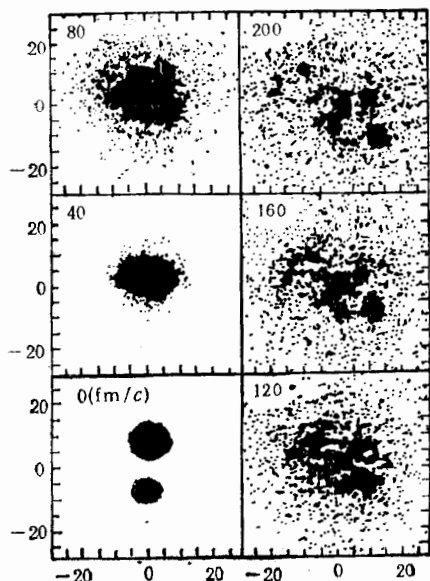


图2 $b = 1fm$, $E_{in} = 140 MeV/u$ 时试验粒子在 X-Z 平面内的密度轮廓随时间的演变

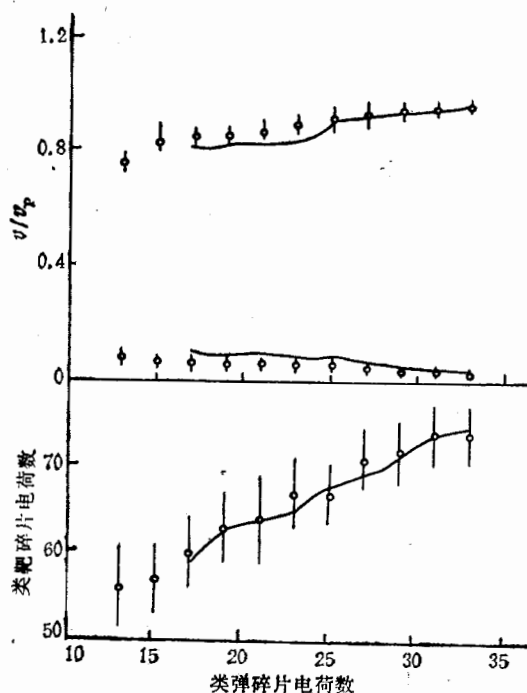


图3 类弹碎片电荷数与类弹类靶碎片的 v/v_p 关系及类弹类靶核电荷数关联。

实点是 $43MeV/u^{86}Kr + ^{197}Au$ 反应的实验数据^[7], 连线是我们的计算结果

子和大量的轻粒子;对于 $E_{in} < 100MeV/u$, 反应可能耗散较大的能量, 随后发射较多的粒子, 或可能发生裂变等。

由于 BUU 中没有对核子蒸发作合理的处理(同时 BUU 本身带有假蒸发), 也没有体现库仑作用, 在对计算的系统的能量耗散和类弹碎片核电荷数的关系与实验数据进行比较时, 必须考虑以上两点修正。对一固定的碰撞参数, 我们从计算得到动能耗散, 加入库仑效应, 算出激发能, 再算出弹靶各自的蒸发数 (CASCADE 程序), 求得最终的类弹类靶碎片的电荷数。从入射炮弹的能量及出射核的能量可以算出类弹碎片或类靶碎片的速度 v 与束流速度 v_p 之比 (v/v_p)。对不同的碰撞参数 (周边和半中心碰撞) 都进行这类计算, 就可得到 v/v_p 和类弹碎片 Z 数及类弹类靶的核电荷数关联。图 3 是我们计算的结果与实验的比较^[7]。从图中可以看出类弹的能量耗散随着类弹碎片的电荷数减小而增加, 即随着碰撞参数的减小而增加, 而类靶刚好相反。同时类弹类靶碎片的电荷数的关联也符合实验结果, 这说明了我们的理论处理也是合理的。随着能量的升高, 类弹的 v/v_p 在周边碰撞和近心碰撞时有不同的特征。周边碰撞时 v/v_p 随能量上升而增加, 也就是能量的相对耗散变小, 而近心碰撞时刚好相反, 这也说明了耗散与反应相互作用时间和反应的激烈程度有关。本文中 BUU 的计算对中能区重系统的反应随碰撞参数和轰击能量的变化和现有的实验数据基本一致, 但有些结果由于没有实验数据而无法进行比较。

三、 π 介子的阈下产生

我们在非相对论框架下研究了中能区 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 重系统的阈下 π 介子产生问题, 以便获得一些有关 π 介子产生和吸收的具体计算结果。为简便起见, 在处理 π 介子的过程中, 考虑核子-核子的非弹性道, π 介子主要来自 Δ 共振态。选取 π 介子的产生道为

$$n + n \rightarrow n + \Delta,$$

π 介子的吸收道为 $n + \Delta \rightarrow n + n$ 。同时假定其产生道和吸收道截面是各向同性的, 分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_{nn \rightarrow n\Delta} &= 0 \quad (\sqrt{S} \leq 0) \\ &= 20(\sqrt{S} - 2.015)^2 / [0.015 \\ &\quad + (\sqrt{S} - 2.015)^2], \quad (\sqrt{S} > 2.015) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sigma_{n\Delta \rightarrow nn} = (1/8)(p_i^2/p_f^2)\sigma_{nn \rightarrow n\Delta}, \quad (2)$$

其中 p_f, p_i 分别是初、末态的道动量。

我们选取 $b = 1\text{fm}$ 下 $E_{in} = 44, 60, 100, 140\text{MeV/u}$ 四个能量点。图 4 显示了反应的重迭区最大可压缩密度, 试验粒子的碰撞流及 π 介子的产生和吸收随时间的变化。从这些图中, 我们看到 π 介子主要产生在压缩阶段, 来源于两核的重迭区, 最大可压缩密度达到峰值后, 重迭体积和试验粒子的碰撞流迅速增加而达到极值。在此过程中, 个别核子间有较多的碰撞, 导致一些核子获

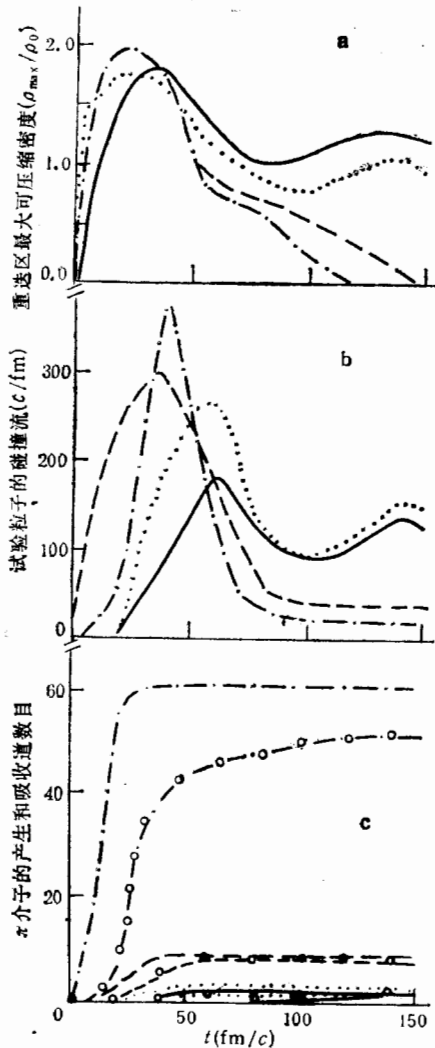


图 4 自上至下分别是 $b = 1\text{fm}$ 时, $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应的重迭区密度, 试验粒子的碰撞流以及 π 介子产生和吸收的道数目

实线(—)对应于 $E_{in} = 44\text{MeV/u}$, 点线(.....)对应于 60MeV/u , 虚线(---)对应于 100MeV/u , 点划线(-.-.-)对应于 140MeV/u , c 中带圈的表示吸收, 不带圈的表示产生

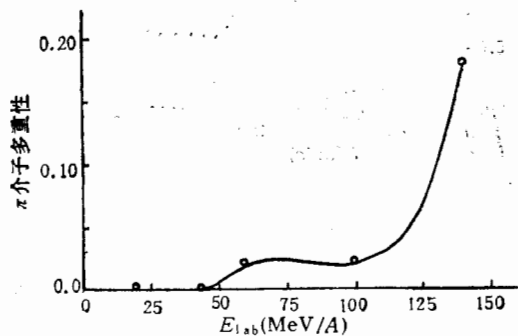


图 5 $b = 1\text{fm}$ 时, π 介子的多重性与实验室轰击能的关系

得足够的能量进入非弹性道, 产生 π 介子。当达到最高压缩密度时, π 介子的产生也达到

了极值,随后系统开始发生膨胀,几乎不再产生 π 介子,而 π 介子的再吸收占主要地位.最后导致产生和吸收相互抵消,使得中能重系统的 π 介子阈下产生对 EOS 也不灵敏.同时,我们也注意到在轰击能 $E_{in} = 140$ 、 100MeV/u 时,它们的最大可压缩密度几乎相同,而其最终的 π 介子产额相差较大;相反对于 $E_{in} = 100$ 、 60MeV/u , 最大可压缩密度相差较大,而其 π 介子的产额相近,也即是在 $E_{in} = 60\text{--}100\text{MeV/u}$ 间该系统的阈下 π 介子产额对轰击能量不灵敏(图5),但总的趋势是随着 $E_{in} = 40\text{MeV/u}$ 到 140MeV/u π 介子的多重性增加.造成这个结果的原因是很复杂的,可能是由于反应过程中压缩能的储存与压缩密度的大小并没有简单的线性关系,也可能是这个能区压缩和膨胀阶段 π 介子产生与吸收相互竞争随轰击能而变化的复杂关系造成的.同时由于在重离子碰撞中 π 介子和其它高能粒子的产生问题是一个很复杂的过程,相对论动力学和核物质中的介质效应,动量相关势等因素原则上也是必须考虑的.目前尚未提出一种完全自洽的处理方法,还需作进一步的研究.但是本计算明确显示了由于在压缩和膨胀阶段 π 介子产生和吸收的竞争使得 π 介子对 EOS 不灵敏.

四、核反应的集体流现象——流角

在集体流的分析中, P. Danielewicz 等提出了一种横动量分析方法^[9], 另外还有形状分析法^[10], 这两种方法都可分析中能核反应集体流的流角问题. 理论上的工作多集中于高能区, 且常选较为对称的系统, 此时流的特征较为明显, 对流角的分析也更多一些, 但对中能区重系统很少有这类分析. 实验表明在 100MeV/u 以下的中能区也存在着集体流^[11-15]. 我们试图用 BUU 方法获得有关流角的知识, 研究流角在不同碰撞参数和轰击能量下有何特征.

定义六元对称矩阵元

$$F_{ij} = \sum_{\nu} p_i(\nu)p_j(\nu)/m_0,$$

i, j 是三个笛卡儿坐标, m_0 是粒子的质量; 定义 F_{ij} 的最高本征值的本征矢与束流方向的夹角为流角. 计算表明随着 b 的增加流角趋于减小, 且随着时间的变化能较快地达到饱和值. 在固定的碰撞参数下, 随着入射能量的增加, 流角能较快地趋于饱和值. 对于周边碰撞, $b = 9\text{fm}$ 时, 流角随轰击能量增加而减小; 对于近心碰撞, $b = 1\text{fm}$ 时, 流角的趋势是随着能量的增加而增加. 作为一个例子, 图 6 显示了 $^{86}\text{Kr} +$

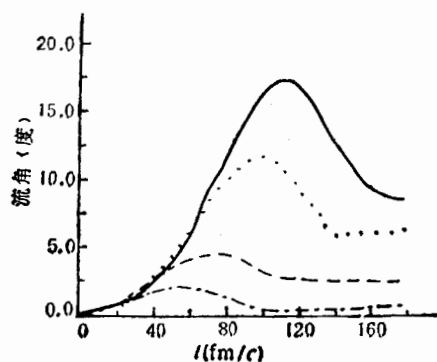


图 6 $b = 9\text{fm}$ 时的流角随时间的演化. 实线(—)是 $E_{in} = 44\text{MeV/u}$, 点线(.....)是 60MeV/u , 虚线(---)是 100MeV/u , 点划线(·-·-·)是 140MeV/u

^{197}Au 在 $b = 9\text{fm}$ 时, 流角在不同 E_{in} 时随时间的演化. 从另一角度说, 流角也可由集体流的动量在反应平面内的径向动量 $\langle p_z/A \rangle$ 和横向动量 $\langle P_x/A \rangle$ 来确定 ($\text{tg}^{-1}(\langle p_x/A \rangle / \langle p_z/A \rangle)$). 对于中心碰撞, 相互作用时间较长, 集体流的横动量随轰击能量的增加比集体流的径向动量随轰击能的增加要快, 而对周边反应情况则相反, 从而造成了流角在周

边和中心碰撞时对轰击能量的依赖关系刚好相反。总的来说,本工作的计算显示了中能区重系统存在集体流效应及流角对这类系统随轰击能和碰撞参数的变化关系,但是中能区包括流角在内的集体流的规律可能是很复杂的,有很多因素在共同起着作用,要找出一个准确的规律并非容易,因此无论是在实验上还是理论上都要做许多的工作。

五、结 论

本文用扩展 BUU 模型研究了中能区 $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 重系统反应的能量耗散, π 介子阈下产生和反应的流角等问题。简单地考虑了库仑修正后,定量地拟合了类弹类靶的 v/v_p 与类弹碎片电荷数的关系以及类弹类靶电荷数的关联,发现能量耗散是随着碰撞参数的减小而增加的。在周边碰撞中,能量的相对耗散随轰击能增加而减小,而中心碰撞则相反。同时用 BUU 算出的与时间相关的相空间密度的演化和轰击能及碰撞参数的关系,清楚地表明了中能重系统反应机制随轰击能与碰撞参数的变化。研究发现阈下 π 介子的产生对 EOS 不灵敏,必须寻找另外的物理量作为 EOS 的探针。流角随碰撞参数的增加趋于减小,并较快地趋于饱和,能量升高时,流角趋于饱和的程度越好。对周边碰撞,流角随轰击能量增加而减小,中心碰撞时则相反,在文中我们作了合理的解释,当然这些结论需要实验数据的验证。

参 考 文 献

- [1] G. Auger et al., *Phys. Lett.*, **169B** (1986), 161.
- [2] B. V. Jacak et al., *Phys. Rev.*, **C35** (1987), 1751.
- [3] L. G. Moretto et al., *Nucl. Phys.*, **A519** (1990), 183c-196c.
- [4] A. Adorno et al., Proc. XXIV International Winter Meeting On Nuclear Physics, Bormio (Italy), 25-30 Jan., 1988.
- [5] Y. Blumenfeld et al., *Phys. Rev. Lett.*, **66** (1991), 576.
- [6] P. Danielewicz et al., *Phys. Rev.*, **C38** (1988), 120.
- [7] G. Rudolf et al., Invited Contribution at the Symposium on Nuclear Dynamics and Nuclear Disassembly, Dallas (Texas), 10-14 Apr., 1989.
- [8] G. F. Bertsch et al., *Phys. Rep.*, **160**(1988), 189.
- [9] 马余刚,沈文庆等,高能物理与核物理,**16**(1992),1643.
- [10] J. A. Lopez et al., *Nucl. Phys.*, **A491**(1989), 477.
- [11] G. D. Westfall et al., *Nucl. Phys.*, **A519**(1990), 141c-156c.
- [12] C. A. Ogilvie et al., *Phys. Rev.*, **C40**(1989), 2592.
- [13] J. Peter et al., *Nucl. Phys.*, **A519**(1990), 127c-140c.
- [14] W. Q. Shen et al., Components of Collective Flow and Azimuthal Distributions in $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ and $^{40}\text{Ar} + ^{58}\text{Ni}$ Collisions Below 85 MeV/u, submit to *Nucl. Phys.*, **A**, in press.
- [15] R. Bougault et al., Proc. XXVIII Winter Meeting on Nuclear Physics, Bormio (Italy), 1990.

The Energy Dissipation, Productions of the Subthreshold Pion Mesons and Flowangle in Intermediate-Energy $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ Reaction

MA YUGANG SHEN WENQING FENG JUN

(Institute of Shanghai Nuclear Research, 201800)

GE LINGXIAO

(Institute of Modern Physics, Lanzhou 730000)

ABSTRACT

The dissipative energy, productions of subthreshold pion mesons and flowangle in intermediate-energy heavy system $^{86}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ reaction have been calculated by the extended BUU model, meanwhile, the relation of the energy dissipation to the charge number of PLF and the correlation of the charge number between the PLF and TLF have been reproduced.