

# CSR外靶实验终端中子流测量的模拟<sup>\*</sup>

付芬<sup>1,2;1)</sup> 肖志刚<sup>1</sup> 靳根明<sup>1</sup> 冯兆庆<sup>1,2</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 随着兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)外靶实验终端中子墙的建立,为实验测量高能中子提供了机遇.为确定CSR外靶实验终端对中子流测量的可行性,基于BUU理论模型分别对对称系统(Ni+Ni, Pb+Pb)和非对称系统(Pb+Ni)进行了模拟计算,发现当系统能量达到几百MeV/u时,中子流信号相当明显,并与碰撞参数有明显的依赖关系.模拟结果表明,在前角20°的覆盖范围内,可以较好地实现中子流测量所需要的反应平面确定及碰撞参数选择.对双击事件及其对中子流的影响进行了简单的讨论.

**关键词** CSR 中子流 反应平面 碰撞参数

## 1 引言

近些年来,核物质状态方程(EOS)的同位旋相关性性质引起了人们的广泛兴趣.其核心问题是EOS中对称能的密度相关性<sup>[1]</sup>.对称能在高密下的行为不仅影响天体,如中子星等的演化性质,也会影响重离子碰撞中的产物分布性质.实验上,人们已经找出很多关于对称能的探针,如同位旋标度<sup>[2]</sup>,同位旋扩散<sup>[3]</sup>, $\pi^+/\pi^-$ 产额比<sup>[4]</sup>等.基于BUU的计算表明中子/质子直接流信号也是对称能的灵敏探针<sup>[1]</sup>.另一方面,近年来人们对相对论重离子碰撞的研究表明,在GeV能区,核子碰撞并未达到全阻止,而是表现出一定的穿透效应.这一效应同粒子种类、束流能量有明显的依赖关系,并且同流的形成密切相关<sup>[5, 6]</sup>.中子流的测量对于理解这些现象具有重要的意义.

兰州重离子加速器冷却储存环(CSR)可提供2.8GeV的质子束流和520MeV/u的U束流.在这个能区,重离子碰撞过程中可以形成2—3 $\rho_0$ 的高温高密核物质,因此这一能区是实验研究核物质状态方程的良好能区.另外,在这个能区会出现大量的集体流现象,这对EOS的测量提供良好的探针.因此,CSR上的外靶终端,为EOS的研究提供良好的实验条件.

实验上,对于轻带电粒子(包括质子)流对入射能量、碰撞中心度、粒子种类、反应系统以及同位旋的依赖关系都有很清楚的定论,并且这些现象已经被微观输运模型(QMD)和BUU定量地重现出来<sup>[7]</sup>,但是实验上对中子流的研究相当缺少.随着兰州放射性束流线II(RIBLL-II)外靶实验终端中子墙的建立,使我们有可能测量较高能量的中子,并提供中子流方面的数据.实验上进行流的测量必须考虑以下几个因素:(1)反应平面的确定,由于探测器设备覆盖不全,并且反应中粒子多重性有限,反应平面的确定有一定的误差;(2)碰撞参数的确定,进行流的测量,必须进行碰撞参数的选择,在有限的覆盖角区,需找出选择碰撞参数的观测量;(3)双击概率的估算,由于双击事件的存在,是否会对流信号造成很大的影响;(4)覆盖范围.本文通过对400MeV/u Ni+Ni, Pb+Pb, Pb+Ni 3个反应系统的模拟计算,用横向动量法确定其反应平面,给出了中子流、总横向动能与总纵向动能之比( $E_{rat}$ )等随碰撞参数的变化关系,得出了测量中子流的最佳区域,同时也为实验确定碰撞中心度提供了可靠的依据.结合CSR外靶实验终端中子墙的实际情况,从相空间、双击事件及其对中子流的影响等方面进行了简单的讨论.

2006-02-24 收稿

\* 国家自然科学基金(10205020)和中国科学院知识创新工程方向性项目(KJ9X2-SW-N07)资助

1) E-mail: fuf@impcas.ac.cn

## 2 中子墙探测器

中子墙采用量能器构型,在CSR外靶实验终端作为中子飞行时间测量的停止时间探测器.其主体包括两部分:前端是16cm厚的闪烁体探测器,由两层垂直相交的塑料闪烁“棒”组成,主要用来测量较低能量的中子;由于高能中子与闪烁材料的核相互作用长度较长( $\lambda_{\text{int}}=80\text{cm}$ )<sup>[8]</sup>,要使绝大部分簇射阻止在闪烁材料中,需要很厚的探测介质,为了减小探测器的体积,后面为取样量能器,共由216个“夹心”构型的“浆状”模块组成,光信号经光导传输到两端的光电倍增管读出,时间分辨(前沿甄别)达到450ps.对于中高能中子探测效率达到90%左右,能量分辨为3%左右<sup>[9]</sup>.中子墙的各项参数如表1所示.

表1 中子墙参数

探测效率	时间分辨 (R7724读出)	$E_n$ / MeV	能量 分辨(%)
低能(<20MeV)>70%	$FWHM=450\text{ps}$	200	1.59
		300	1.95
高能(>20MeV)>90%		500	2.68
		700	3.47

## 3 中子直接流信号及中子墙的相空间覆盖范围

### 3.1 中子流

当两个核碰撞时,参加反应部分的压力和密度都会变大,非中心碰撞时,有一个内在的非对称压力,产生直接流<sup>[10]</sup>,进行能量和压力的转移和释放,并且轻带电粒子流对入射能量、碰撞中心度、粒子种类、反应系统以及同位旋都有很强的依赖关系.由以往的研究可知,当系统能量增加到几百MeV/u之后,轻带电粒子有很强的直接流信号但是随能量的增加已经变得缓慢<sup>[11]</sup>.在此能区,同样会存在强烈的中子流,由于中子不受库仑力的影响,其特征更能反映碰撞的特征.但由于中子探测的困难,实验上对它的研究很少.因此,为了检验利用CSR外靶终端的中子墙对中子流进行测量的能力,我们通过BUU程序对Ni+Ni, Pb+Ni, Pb+Pb 3个系统进行了模拟计算,分别提取了3个系统在400MeV/u入射能时的中子流信号,并讨论了CSR外靶终端实验测量中子流的可行性.

横向动量法是提取直接流的常用方法<sup>[12]</sup>.在横向

动量法中,用中间快度区粒子的 $\langle p_x/A \rangle$ 对 $y^{(0)}$ 的斜率 $F$ 定量地描述直接流:

$$F = \left. \frac{d\langle p_x/A \rangle}{dy^{(0)}} \right|_{y^{(0)} \approx 0}$$

其中 $p_x$ 是粒子在 $x$ 方向(反应平面内垂直于束流方向)的动量, $A$ 是粒子的质量数, $y^{(0)} = \frac{y_{\text{lab}}}{y_{\text{cm}}} - 1$ 是粒子的约化快度, $y_{\text{lab}}$ 是粒子在实验室系的快度, $y_{\text{cm}}$ 是质心系的快度.

图1给出的是自由中子的 $\langle p_x/A \rangle$ 随快度 $y^{(0)}$ 的变化,呈现出典型的“S”型<sup>[12-14]</sup>,体现出粒子动量从 $y^{(0)} > 0$ 的区域向 $y^{(0)} < 0$ 的区域的转移.在中间快度区的类直线部分用直线 $a + Fy^{(0)}$ 拟合得出其斜率 $F$ <sup>[15]</sup>, $F$ 是反应过程中向参加者部分转移的横向动量的量化.从图1可以看出,此时3个系统都有很明显的中子流信号.

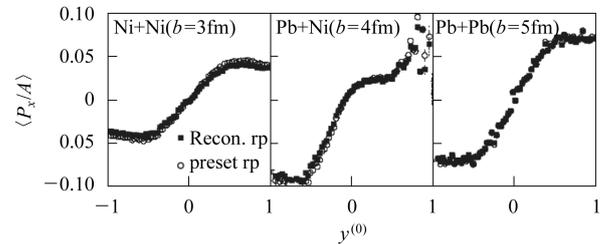


图1 400MeV/u Ni+Ni, Pb+Ni和Pb+Pb反应系统 $\langle p_x/A \rangle$ 与 $y^{(0)}$ 的变化关系  
符号○和■分别为 $p_t$ 向模型中预设的理想反应平面和实验确定反应平面投影得出的结果.

### 3.2 相空间分布

中子墙的建立将为我们提供研究中子流的设备和空间,但是两块中子墙是否能够满足测量的要求?能否覆盖测量所需要的空间?在此对中子的 $\theta$ 角分布和相空间分布进行了模拟.图2(a)为400MeV/u Ni+Ni ( $b=3\text{fm}$ ) Pb+Ni ( $b=4\text{fm}$ ) Pb+Pb ( $b=5\text{fm}$ ) 反应系统实验室系中子的 $\theta$ 角分布,图2(b)为400MeV/u Ni+Ni ( $b=3\text{fm}$ )的中子相空间分布.从图中可以看出,对于Ni+Ni对称系统,实验室前角 $20^\circ$ 覆盖了40%以上的产物,根据对称系统前后空间反演,可以给出90%以上产物的相空间分布.而对于逆运动学系统Pb+Ni,由于产物的前冲性,实验室前角 $20^\circ$ 几乎覆盖了所有的相空间,实验过程中如果同时用两块中子墙,基本能实现探测角度达到 $20^\circ$ ,这一模拟结果表明最少用两块中子墙在空间上能基本满足实验测量中子流的需要.

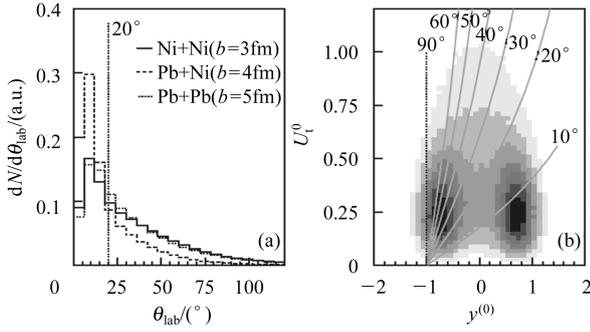


图 2  $\theta$  角分布 (a) 和 Ni+Ni ( $b=3\text{fm}$ ) 相空间分布 (b)

## 4 反应平面的确定及碰撞参数的选择

### 4.1 反应平面的确定

在较高能量重离子碰撞反应中 ( $E/A > 100\text{MeV}$ ), 出射粒子多重性较高, 可以用横向动量方法逐事件确定反应平面<sup>[10, 14, 16]</sup>.

通过在质心系对所有粒子横向动量求和得出总横向动量矢量

$$Q = \sum_{i=1}^M \frac{\omega_i \mathbf{p}_t}{|\mathbf{p}_t|}$$

其中  $M$  是事件中出射粒子的多重性;  $\mathbf{p}_t$  为粒子的横向动量.  $\omega_i$  是加权因子, 在对称系统中,  $\omega_i$  对于不同快度的粒子分别取不同的值, 如下:

$$w_i = \begin{cases} 1 & y^{(0)} > 0.3 \\ 0 & |y^{(0)}| < 0.3 \\ -1 & y^{(0)} < -0.3 \end{cases}$$

$Q$  位于垂直于束流方向的平面内, 其方向与束流方向所决定的平面就是反应平面. 由于出射粒子多重性  $M$  的有限性, 由出射粒子确定的反应平面相对于预设理想反应平面有一个分布宽度, 如图 3 上图所示. 从图中可以看出, 利用前角  $20^\circ$  内出射的所有粒子确定的反应平面的分布宽度比利用所有粒子确定的稍宽一些, 但是仍然有一个比较窄的分布. 这表明用前角  $20^\circ$  内探测到的所有粒子确定反应平面还是比较可靠的. 下图是利用出射粒子确定出来的  $\Phi$  角的不确定性 (分布的均方差) 随碰撞参数的变化曲线. 3 个系统表现出相似的趋势, 在小碰撞参数时不确定性比较大, 源于在近中心碰撞时, 出射粒子几乎各向同性. 而随着碰撞参数的增大, 不确定性会逐渐减小, 在某个碰撞参数时会出现一个最小值. 碰撞参数进一步增大, 出射粒子的多重性则减少, 重碎片比份会增大, 但其质量的不确定性增大, 因此确定出来的  $\Phi$  角不确定性也进一步增大. 反应系统越重, 反应平面的不确定性出现

最小值的范围就越宽, 其原因是反应系统越重, 出射的粒子的多重性  $M$  越大, 因此实验测量越有利. 当然用全空间出射的所有粒子确定出来的反应平面最接近于真实平面, 但是考虑到实验条件的限制, 很难做到全空间所有粒子的测量. 模拟结果表明可以在前角  $20^\circ$  的空间内探测到的粒子较可靠地确定反应平面.

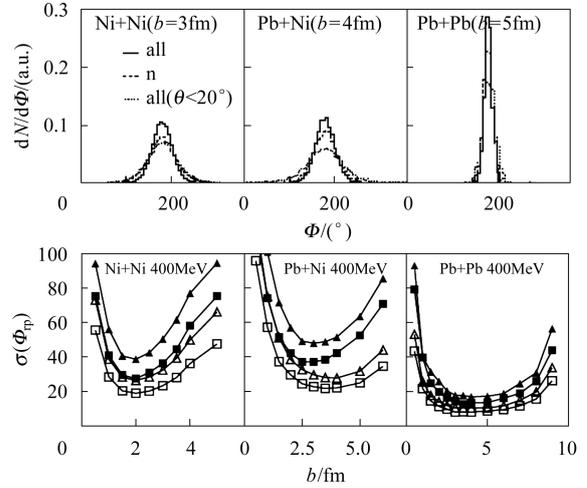


图 3 用出射粒子确定的反应平面的分布及其与碰撞参数的变化关系

上图中实线、虚线、点线分别表示用出射的所有粒子、中子和前角  $20^\circ$  内出射的所有粒子确定的反应平面  $\Phi$  角分布; 下图是  $\Phi$  角分布不确定性随碰撞参数的变化关系,  $\square, \Delta, \blacksquare, \blacktriangle$  分别表示出射的所有粒子(all), 中子(n)和前角  $20^\circ$  内出射的所有粒子(all( $\theta < 20^\circ$ )), 中子(n( $\theta < 20^\circ$ )) 确定的反应平面分布的不确定性.

### 4.2 碰撞参数的确定

由于流信号在近周边碰撞时非常明显, 因此在实验中应对碰撞参数进行选择. 通常用  $E_{\text{rat}}$  来选择系统碰撞中心度<sup>[6, 17]</sup>,  $E_{\text{rat}}$  是质心系中出射粒子总横向动能 ( $E_{\perp}$ ) 与总纵向动能 ( $E_{\parallel}$ ) 之比:

$$E_{\text{rat}} = \frac{\sum_i E_{\perp i}}{\sum_i E_{\parallel i}}$$

其中  $i$  是所有被测粒子. 图 4 给出的是  $400\text{MeV/u}$  Ni+Ni 反应系统  $E_{\text{rat}}$  与  $b$  的变化关系, 误差取作  $E_{\text{rat}}$  在各个碰撞参数时分布均方差值的一半. 在近中心碰撞区域,  $E_{\text{rat}}$  与  $b$  有明显的线性关联, 说明在此碰撞区域, 用  $E_{\text{rat}}$  选择碰撞参数是比较可靠的. 当近周边碰撞时, 粒子多重性也是作为选择碰撞中心度的一个很好的参数<sup>[13]</sup>. 由于模型的局限性, 在此没有计算多重性与碰撞参数的关联关系. 但在实验的过程中, 我们可以用  $E_{\text{rat}}$  和多重性相结合的方法来更好地选择粒子碰撞中心度<sup>[14]</sup>.

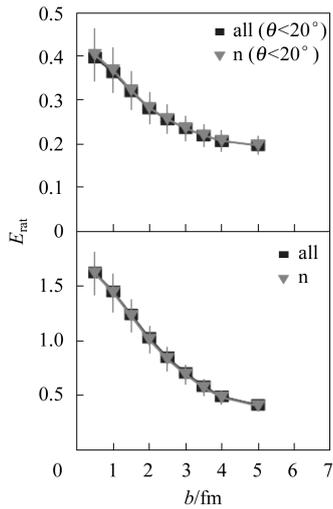


图4 400MeV/u Ni+Ni反应系统 $E_{\text{rat}}$ 与 $b$ 的变化关系

### 4.3 反应平面的确定对 neutron 流的影响及 neutron 流随碰撞参数的变化

由以前的研究可以知道, 轻带电粒子流对碰撞参数(即碰撞中心度)有很明显的依赖关系<sup>[13, 15, 17—19]</sup>, 但是 neutron 流的这些性质却没有明确的定论. 那么 neutron 流随碰撞参数会有什么样的变化? 反应平面的确定对 neutron 流的提取又会有什么样的影响? 为了解决这个问题, 在此分别对 400MeV/u Ni+Ni, Pb+Ni, Pb+Pb 3 个系统进行了相应的模拟. 图5给出的是3个系统提取出的 $F$ 值随碰撞参数 $b$ 的变化关系. 由图可以看出3个系统表现出相似的趋势, 在某个 $b$ 值时出现最大值, 并在两侧迅速地减小. 这些给我们指明了测量 neutron 流的最佳碰撞参数区域, 并且随着系统变重, 流信号就越明显, 越有利于流的测量和研究.

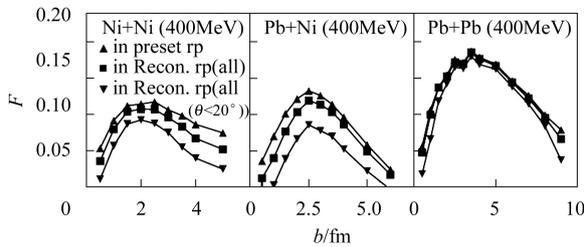


图5 3个反应系统提取出的 $F$ 值随 $b$ 的变化关系

▲ $p_t$ 向模型中预设的理想反应平面投影得出的 $F$ 与 $b$ 的变化关系, ■ $p_t$ 向利用全空间所有粒子确定的反应平面投影得出的 $F$ 与 $b$ 变化关系, ▼ $p_t$ 向利用前角 $20^\circ$ 内所有粒子确定的反应平面投影得出的 $F$ 与 $b$ 变化关系.

图5中不同的符号分别给出了根据不同的反应平面得出的流信号 $F$ 值的差异, 这种差异是由于反应平面确定的精度所引起的, 可以用图3中的反应平面不确定性进行修正. 由图5可以看出, 根据全空间探测

的所有粒子确定的反应平面提取出的 $F$ 值与根据模型预设的理想反应平面提取出的 $F$ 值之间只有微小的差别, 而根据前角 $20^\circ$ 内探测的所有粒子确定的反应平面提取出的 $F$ 值与之差别更大一些, 但是仍能够提取出明显的流信号, 并且随着系统的变重, 差别变得越小. 这表明对于越重的系统, 实验在很大碰撞参数范围内确定的反应平面对 neutron 流的影响都很小, 也说明在实验过程中用横向动量法来提取 neutron 流是比较可靠的.

## 5 双击事件及其对 neutron 流的影响

实验过程中, 当中子多重性较多时, 在中子墙较小的范围内可能会接收到两个甚至两个以上的中子, 由于中子墙的位置分辨率的限制, 难以区分每一个中子所产生的信号, 从而生成假信号(简称‘双击事件’或‘多击事件’). 为了给出更可靠的双击(或多击)信息, 在此, 首先做了几何上的估算. 模拟表明单个400MeV中子在中子墙的一个模块层面上点火模块单元的最可几数为2左右<sup>[9]</sup>, 因为每条量能器的宽度为8cm. 前后两层正交排布, 因此选择最小分辨单元格的面积为 $16\text{cm} \times 16\text{cm}$ , 即两个中子同时打在 $16\text{cm} \times 16\text{cm}$ 单元格内并在中子墙上的估算层面都点火, 则认为两个中子是不可分辨的. 图6(a)为400MeV Ni+Ni系统参加双击的中子和打在中子墙上的中子 $\theta$ 角分布(假定中子墙离靶5m). 参加双击的中子主要集中在 $\theta < 15^\circ$ 的范围之内. 由图可以看出, 在束流近中心附近范围, 双击概率达到25%左右, 但在实际的实验测量过程中, 中子在中子墙每层面的点火几率为10%<sup>[9]</sup>, 这样实际测量到的双击概率会明显的下降,

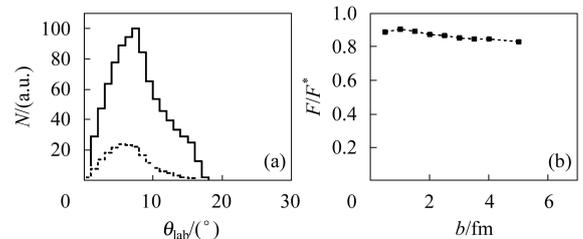


图6 400MeV/u,  $b=3\text{fm}$  Ni+Ni系统中子的 $\theta$ 角分布(a)与 $F/F^*$ 随碰撞参数 $b$ (b)的变化关系

即使在中心附近中子分布最密的区域也不会大于2%. 实验时, 双击事件被认为是一个中子事件, 在模拟的过程中, 同样对双击事件只取其中的一个中子信号, 把另一个参与双击的中子信号舍弃, 这样可得出一个新的中子流 $F^*$ , 与前面得出的中子流 $F$ 进行比较得出 $F/F^*$ . 图6(b)显示的是400MeV/u Ni+Ni系统提

取的  $F/F^*$  随碰撞参数的变化关系. 由于参加双击的中子主要集中在  $\theta < 15^\circ$  的范围内, 其横向动量都比较小, 于是舍弃双击中子中的一个, 相对而言会增加横向动量的转移, 即会相对增加中子流信号, 所以  $F^*$  会比  $F$  略大一些. 但是可以看出, 两种方法提取出的  $F$  值的比值保持在 0.9 附近, 说明目前中子墙设计构型下双击事件对中子流的影响不是很明显. 在实际的测量中, 由于双击事件会比估算的小很多, 其中子流影响会更小, 更有利于中子流的研究.

## 6 总结

基于 BUU 模型对 3 个反应系统的模拟计算, 给出

了中子流以及反应平面确定的不确定性与碰撞参数的依赖关系, 指出了 3 个反应系统在此能量下测量中子流的最佳区域. 结果显示出越重的系统确定出来的反应平面越接近于真实的反应平面, 并且不确定性出现最小值的范围就越宽, 对中子流的测量越有利. 文章还给出了  $E_{\text{rat}}$  与碰撞参数的变化关系, 为近中心碰撞系统选择中心度提供了简单有效的方法. 对双击事件进行了几何方面的模拟估算, 并考察了它对中子流的影响, 结果表明双击事件对中子流的影响较小. 详细模拟中子墙上多中子事件的重构, 包括双击事件的判选, 将是下一步工作的重点. CSR 上外靶实验装置, 将为高温高密核物质性质及中高能区重离子碰撞研究提供一个良好的平台.

## 参考文献(References)

- 1 LI Bao-An. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**(19): 192701
- 2 XU Hu-Shan et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 716
- 3 Tsang M B et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 062701
- 4 LI Bao-An. Phys. Rev., 2003, **C67**: 017601
- 5 Reisdorf W et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**(23): 232301
- 6 HONG B et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 034901
- 7 Andronic A et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 034907
- 8 Particle Data Group. Phys. Lett., 1990, **239B**: 1
- 9 XU Hua-Gen et al. HEP & NP, 2006, **30**(1): 1—5 (in Chinese)
- (徐华根等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(1): 1—5)
- 10 Doss K G R et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**(24): 2720
- 11 Partlan M D et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**(11): 2100
- 12 Danielewicz P, Odyniec G. Phys. Lett., 1985, **B157**: 146
- 13 Doss K G R et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**(3): 302
- 14 Andronic A. Phys. Rev., 2001, **C64**: 041604(R)
- 15 Rami F et al. Nucl. Phys., 1999, **A646**: 367—384
- 16 Ollitrault J Y. 1997. nucl-ex/9711003
- 17 Ramillien V et al. Nucl. Phys., 1995, **A587**: 802—814
- 18 Huang M J et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**(18): 3739
- 19 Crochet P et al. Nucl. Phys., 1997, **A627**: 522

# Measurement of Neutron Flow with the External Target Experimental Device on CSR<sup>\*</sup>

FU Fen<sup>1,2;1)</sup> XIAO Zhi-Gang<sup>1</sup> JIN Gen-Ming<sup>1</sup> FENG Zhao-Qing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

<sup>2</sup> (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** With the construction of the neutron detection wall at the external target position on Heavy Ion Research Facility in Lanzhou-Cooling Storage Ring (HIRFL-CSR), it will be possible to detect high energy neutron. A BUU model is applied to simulate the flow in both symmetric (Ni+Ni, Pb+Pb) and asymmetric (Pb+Ni) systems. It is shown that at above several hundreds MeV/u, the flow signals are very obvious and depend clearly on the centrality of the collisions. Based on the products in the forward angle less than  $20^\circ$ , the simulation also reveals that the determination of the reaction plane and the selection of the impact parameter, both of which are essential in the flow measurement, are well implemented. The double event and its influence on the determination of the neutron flow are also simulated.

**Key words** CSR, neutron flow, reaction plane, impact parameter

Received 24 February 2006

\* Supported by National Natural Sciences Foundation(10205020) and the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N07)

1) E-mail: fuf@impcas.ac.cn