

文章编号: 1007-4627(2008)01-0001-07

重离子弹性散射中的角分散研究*

白真¹, 王琦^{1, #}, 韩建龙¹, Sergey Yu Kun^{2, 3}

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 Centro de Ciencias Fisicas, National University of Mexico (UNAM), Cuernavaca, Mexico;

3 Center for Nonlinear Physics, RSPHysSE, Australian University, Canberra, ACT 0200, Australia)

摘要: 简要评述了重离子弹性散射角分散研究的内容、方法及物理意义。通过前角区重离子弹性散射产物微分截面的角分布测量, 作出角分散图 $\ln(d\sigma/d\theta) - \theta^2$ 。分析经典偏转函数, 从而在实验上确定了反应系统的核虹角。在低能、重靶的重离子反应系统中, 核虹角远小于擦边角。晕核及弱束缚核比稳定核具有更小的核虹角和更大的核相互作用范围。经典偏转函数的计算有助于提供一套光学势参数, 以便于拟合弹性散射产物的微分截面。

关键词: 重离子弹性散射; 角分散; 经典偏转函数; 核虹角

中图分类号: O571.6

文献标识码: A

1 引言

在核物理研究中, 弹性散射一直是人们非常感兴趣的课题。弹性散射是核碰撞中的一个基本过程, 对弹性散射的彻底了解是正确描述其它非弹性过程的先决条件^[1-3]。重离子碰撞中, 相对运动的波长小于相互作用势的特征长度, 所以, 一些问题常常可以采用经典近似。经典偏转函数是描述重离子弹性散射过程的基本手段和有效工具。

放射性束物理是当前核物理的前沿研究方向之一。中子晕和质子晕已经为实验和理论所确认^[4-21]。晕现象的发现使弹性散射的研究更加复杂, 同时也给弹性散射的研究增添了新的活力。有理由相信, 以表面相互作用为主的弹性散射研究能够为更深入地认识晕核提供有用的信息。

兰州重离子加速器国家实验室的次级束流线 RIBLL^[22-24] 是晕核研究的一个实验平台。本文围绕在 RIBLL 上完成的一个实验的结果^[25-27], 简要介绍在重离子弹性散射中进行角分散研究的基本概念、分析方法及其物理意义。

2 实验及结果

最近, 在中国科学院近代物理研究所的 RIBLL 上完成了 141 MeV $^{17}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ 和 128 MeV $^{17}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 弹性散射反应产物微分截面的角分布测量, 实验室系探测角度从 $6^\circ - 20^\circ$, 实验结果的角分散 $\ln(d\sigma/d\theta) - \theta^2$ 如图 1 所示。显然, 弹性散射产物 ^{17}F 和 ^{17}O 的角分散表现出明显不同的行为, ^{17}O 的实验结果可以用一条直线很好地拟合, 而 ^{17}F 的实验结果则不得不用两条不同斜率的直线来拟合。为了检验这一新的实验结果的可信程度, 我们搜集了国外其它实验小组关于重离子弹性散射的相关数据^[28-33], 并将这些角分布测量的原始数据进行转换, 也表达成角分散 $\ln(d\sigma/d\theta) - \theta^2$ 的形式, 如图 2 所示。可以看出, 与 $^{17}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射产物相类似, 角分散的实验数据普遍需要两条不同斜率的直线来拟合。在这些低能、重靶重离子弹性散射的角分散图 $\ln(d\sigma/d\theta) - \theta^2$ 中, 两条不同斜率直线的交叉点对应一个角度, 被称之为角分散拐角 θ_m 。如表 1 所列, 角分散拐角 θ_m 与反应系统擦边角 θ_{gr} 的比值大致可

* 收稿日期: 2007 - 09 - 05; 修改日期: 2007 - 10 - 16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10675149, 10535010); 中国科学院方向性项目资助(KJXC3-SYW-No1, KJXC2-SW-No18); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2007CB815000)

作者简介: 白真(1977—), 男(回族), 甘肃兰州人, 在职博士研究生, 从事重离子核物理实验研究。

通讯联系人: 王琦, E-mail: wangqi@impcas.ac.cn

以分成两组, 入射束流是晕核或者弱束缚核的为一组, 比值 $\theta_{tu}/\theta_{gr} \approx 0.20$, 入射束流是稳定核的为另一组, 比值 $\theta_{tu}/\theta_{gr} \geq 0.42$ 。由此系统性推断, 128

MeV $^{17}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$ 弹性散射反应产物的角分散拐角大约在 25° 左右, 位于实验测量的角度范围以外。

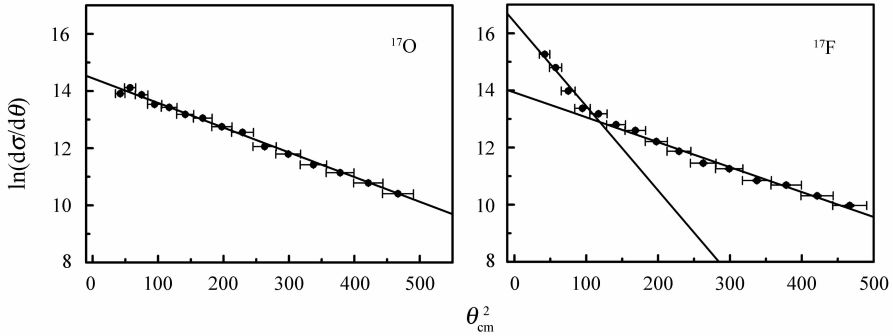


图 1 $^{17}\text{F}/^{17}\text{O}$ 弹性散射实验结果的角分散

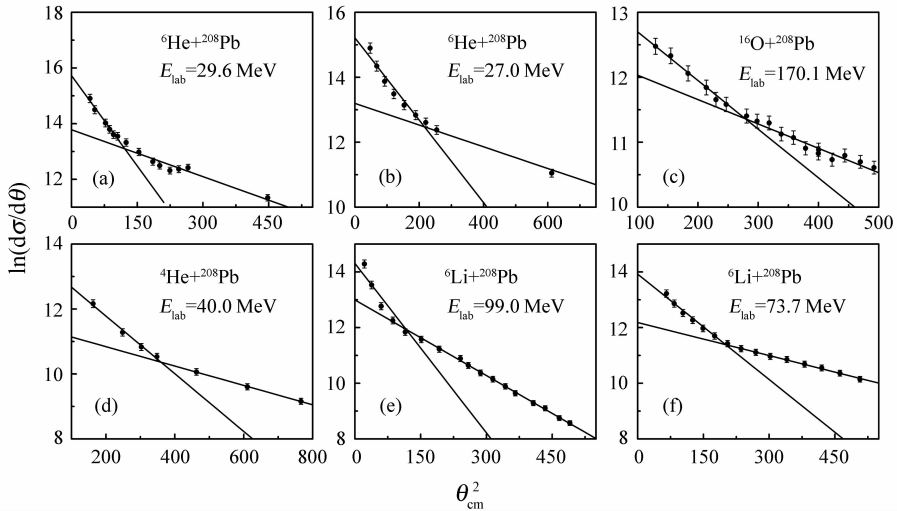


图 2 一些重离子反应系统弹性散射产物的角分散

表 1 重离子弹性散射产物角分散的实验结果

反应系统	E_{lab} /MeV	$\theta_{tu}/(^{\circ})$	$\theta_{gr}/(^{\circ})$	θ_{tu}/θ_{gr}	炮弹性质	参考文献
$^{17}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$	141.0	12	59	0.20	弱束缚核	Our work
$^{17}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	128.0	>21	57	>0.37	稳定核	Our work
$^6\text{He} + ^{208}\text{Pb}$	29.6	11	60	0.18	晕核	[28]
$^6\text{He} + ^{208}\text{Pb}$	27.0	15	72	0.21	晕核	[29]
$^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	170.1	17	38	0.45	稳定核	[30]
$^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$	99.0	10	22	0.45	稳定核	[31]
$^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$	73.7	14	33	0.42	稳定核	[32]
$^4\text{He} + ^{208}\text{Pb}$	40.0	19	43	0.44	稳定核	[33]

3 角分散

角分散 $\ln(d\sigma/d\theta) - \theta^2$ 有明确的物理意义, 图 3

是 Strutinsky 给出的定性示意图^[34]。在重离子碰撞中, 如果入射波角动量的中心值为 l_0 , 入射 l 窗的宽度为 Δl , 其对应的散射角中心值为 θ_0 , 散射角的

范围为 $\Delta\theta$, $\Delta\theta$ 就叫做角分散, 如图 3 中的虚线所示。这是一种量子效应, 所以, 这种角分散称之为量子角分散。如果在弹靶之间有核相互作用参与的过程发生, 那么角分散会产生两种变化: 第 1 种是核碰撞的动力学效应使得角分散 $\Delta\theta$ 所包含的散射角度的范围增大; 第 2 种是核力的吸引性质使得散射角度有整体减小的趋势。这两种变化统称为动力学角分散, 其综合结果如图 3 中弹靶之后的实线所示。Strutinsky 从反应振幅出发, 强调基本的物理内涵, 做出了一系列合理的假定、简化及推导, 最后给出了角分散与微分截面的定量关系。后来, Strutinsky 理论又有所发展^[35], 其微分截面的表达式也在实验中得到了广泛的应用^[36-41]。

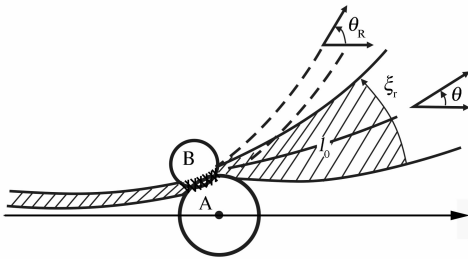


图 3 角分散意义示意图^[34]

本文侧重于对物理图像的简略介绍, 为了突出重点, 节约篇幅, 这里只是给出 Strutinsky 理论的出发点、主要物理假定以及后来发展的能够与实验直接比较的表达式, 省略了对角分散表达式的繁杂的推导和简化过程, 对其中的细节感兴趣的读者, 可参阅相关文献^[34-41]。

Strutinsky 给出的反应振幅的螺旋 (helicity) 表象^[34]的一般表达式为

$$f_M(\Omega) = \frac{1}{2i} \frac{1}{\sqrt{kk'}} \sum_{lK} (2l+1) \eta_{lK}^r D_{MK}^l(\Omega), \quad (1)$$

其中, 总的角动量 I 等于初态 (末态) 轨道角动量 $l(l')$ 与初态 (末态) 道自旋 $S(S')$ 之和 $I = l + S = l' + S'$, M 和 K 分别是角动量 I 在初态波矢 k 和末态波矢 k' 方向的投影, η_{lK}^r 表示分振幅, 角函数 D_{MK}^l 是熟知的转动波函数, 它与欧拉角 Ω 相关。为了简化计算, 不考虑道自旋, 假定碰撞发生在核的表面, 振幅成高斯分布, l 窗的宽度为 Δl , 且 $l_0 \gg \Delta l \gg 1$, 忽略高次项的贡献, 对于角分布前冲的反应系统, 在一定的角度范围内, 可以得到能够与实验结果直接比较的微分截面表达式:

$$\ln\left(\frac{d\sigma}{d\theta}\right) \propto -\left(\frac{\theta}{\xi}\right)^2, \quad (2)$$

这里, 微分截面 ($d\sigma/d\theta$) 取对数之后与散射角 θ 的平方成直线关系, 其斜率决定于角分散系数 ξ , 而角分散由量子角分散 ξ_q 与动力学角分散 ξ_r 两部分构成, 即

$$\xi = (\xi_q^2 + \xi_r^2)^{1/2}. \quad (3)$$

4 经典偏转函数

根据经典散射理论, 散射角的表达式为

$$\theta = \pi - 2 \int_{r_m}^{\infty} \frac{b}{r^2} \left(1 - \frac{V_{\text{eff}}}{E}\right)^{-1/2} dr, \quad (4)$$

式中, r_m 为两粒子质心的最小距离, 可以由能量守恒和角动量守恒定律导得, E 为相对运动动能。散射角 θ 作为碰撞参量 b 的函数, 称为偏转函数, 是决定反应体系行为的基本函数。在实验中, 通常有固定的入射能量, 所以, 经典偏转函数计算的问题就归结为如何确定一个适当的有效重离子相互作用势 V_{eff} 。一般来说, 有效重离子相互作用势由 3 部分组成, 即库仑势、核势及离心势。其中, 库仑势和离心势的常规表述是大家所公认的, 所以, 选择一个适当的核势就是偏转函数计算的关键。图 4 给出了典型的有效重离子相互作用势以及经典偏转函数的示意图^[1-3]。其中, 偏转函数可能有 3 类不同的轨道, 当满足条件 $E < V_C$ 时, 只有库仑散射, 这时不存在虹角; 当满足条件 $V_C < E < V_{\text{eff}}(r_{\text{cr}})$ 时, 散射轨道如图 4(b) 中的 2 所示, 称之为轨道散射, 这时只有库仑虹角; 当满足条件 $E > V_{\text{eff}}(r_{\text{cr}})$ 时, 散射轨道如图 4(b) 中的 1 所示, 同时存在核虹角与库仑虹角。这里的 V_C 是库仑位垒, $V_{\text{eff}}(r_{\text{cr}})$ 是临界能量。很容易判断, 本文所讨论的反应系统都属于第 3 种情况, 即核虹角与库仑虹角同时存在。

5 实验数据分析

核势取 Woods-Saxon 形式, 进行经典偏转函数计算。为了消除势参数的不确定性, 以反应系统的擦边角 θ_{gr} 作为库仑虹角 θ_{r1} , 角分散拐角 θ_{m} 作为核

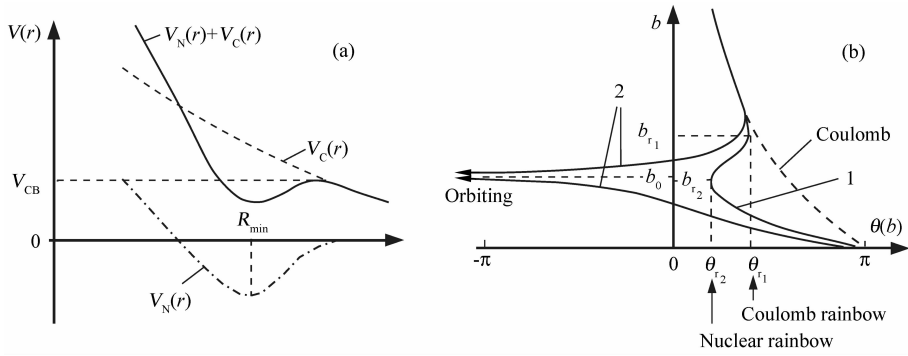


图 4 典型的有效重离子相互作用势(a)及经典偏转函数(b)示意图^[1]

虹角 θ_{r_2} ，再加上临界角动量 L_{cr} 作为又一个限定条件，求出了表 2 所列 7 个反应系统的经典偏转函

数，作为例子，图 5 给出了其中 3 个计算的典型结果。

表 2 重离子弹性散射产物偏转函数计算的参数

反应系统	E_{lab}/MeV	V_0/MeV	a/fm	R_0/fm	L_{cr}/\hbar	$\theta_{gr}/(^{\circ})$	$\theta_{tu}/(^{\circ})$
${}^6\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$	29.6	29.0	1.38	6.7	41.3	59.4	11.4
${}^6\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$	27.0	22.4	1.25	7.4	41.6	71.1	15.1
${}^4\text{He} + {}^{208}\text{Pb}$	40.0	20.2	1.04	7.1	27.7	42.3	18.9
${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$	99.0	36.5	1.06	6.4	38.4	22.9	10.2
${}^6\text{Li} + {}^{208}\text{Pb}$	73.7	36.6	1.13	6.6	37.4	32.1	14.3
${}^{16}\text{O} + {}^{208}\text{Pb}$	170.1	122.0	1.42	6.2	73.3	37.6	17.8
${}^{17}\text{F} + {}^{208}\text{Pb}$	141.0	535.0	2.23	2.2	79.9	51.5	13.6

关于经典偏转函数计算中的 3 个限定条件，其中的临界角动量和擦边角，人们在以往的重离子研究中已经取得了共识，至于将角分散拐角作为核虹角的理由如下：一方面，从角分散分析知道，如图 2 所示，也正如公式 (2) 和 (3) 所指出的，角分散斜率的变化来源于动力学角分散的贡献，在我们所研究的系统中，它就对应于从纯库仑散射到有核力作

用参与的弹性散射的转变，所以，角分散拐角就是观测到的散射弹核感受到核相互作用的角度起点；另一方面，偏转函数计算表明，如图 4 和 5 所示，散射到小于核虹角范围的粒子只受到库仑作用，而在大于核虹角的散射角度内则可能叠加有核相互作用的重要贡献。比较偏转函数和角分散，可得到角分散拐角就是核虹角的结论。

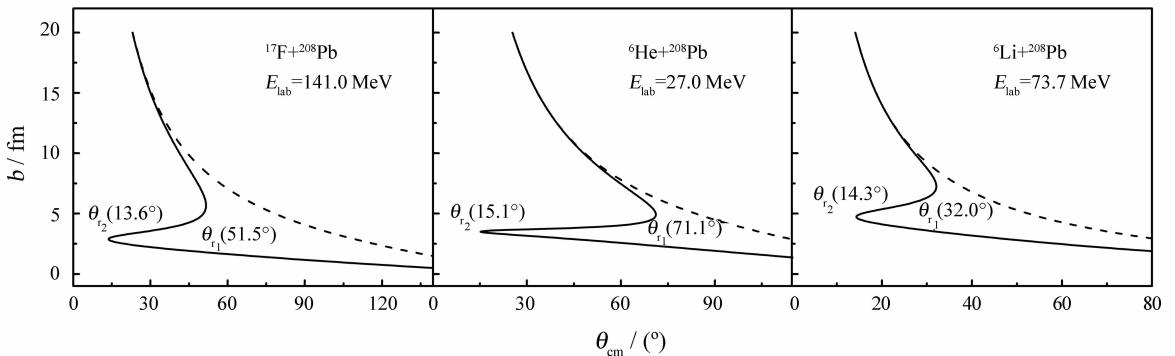


图 5 重离子弹性散射产物经典偏转函数的典型示例

用 FRESKO 程序^[42]对弹性散射微分截面进行了拟合, 表 3 列出了拟合时选择的光学势参数, 典型的拟合结果如图 6 所示。其中, 光学模型参数的

实部取自经典偏转函数计算中 Woods-Saxon 核势的参数。拟合表明, 经典偏转函数计算有助于为弹性散射微分截面的拟合提供一套光学势参数。

表 3 重离子弹性散射微分截面拟合的光学势参数

反应系统	$E_{\text{lab}} / \text{MeV}$	光学势参数						χ^2
		实 部			虚 部			
		V_0 / MeV	R_0 / fm	a / fm	W / MeV	R_w / fm	A_w / fm	
$^{17}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$	141.0	535	2.2	2.23				
$^6\text{He} + ^{208}\text{Pb}$	29.6	22.4	7.4	1.25				
$^6\text{He} + ^{208}\text{Pb}$	27.0	29.0	6.7	1.38	6.49	8.30	1.675	0.057
$^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$	170.1	122.0	6.2	1.42	6.12	11.30	0.680	0.584
$^4\text{He} + ^{208}\text{Pb}$	40.0	20.2	7.0	1.04	3.00	11.57	0.246	0.524
$^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$	99.0	36.5	6.4	1.06	6.61	11.24	0.644	0.636
$^6\text{Li} + ^{208}\text{Pb}$	73.7	36.6	6.6	1.13	5.13	11.57	0.552	0.191

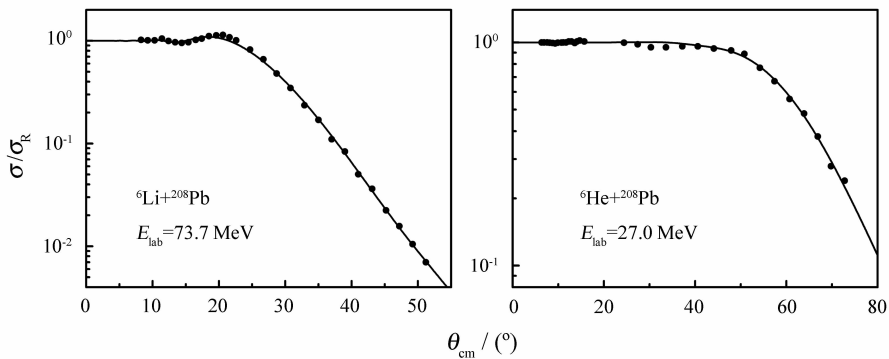


图 6 重离子弹性散射微分截面的拟合

6 本研究工作的物理意义

本文陈述了一种新的实验方法, 通过前角区重离子弹性散射产物微分截面的角分布测量, 作出角分散图 $\ln(d\sigma/d\theta) - \theta^2$, 分析经典偏转函数, 可以确定低能、重靶反应系统的核虹角。这个核虹角远小于反应系统的擦边角, 它是散射核感受到核相互作用的角度起点。不同反应系统的比较表明, 晕核及弱束缚核比稳定核具有更小的核虹角和更大的核相互作用范围。经典偏转函数的计算有助于提供一套光学势参数, 以便于拟合弹性散射产物的微分截面。

致谢 感谢对 RIBLL 实验及其数据分析作出贡献的诸位同仁, 如中国科学院近代物理研究所的肖国

青、徐珊珊、肖志刚、孙志宇、胡正国、张雪莹、王宏伟、毛瑞士、袁小华、徐治国、赵铁成、张宏斌、徐华根、祁辉荣、王玥、贾飞、武丽杰、丁先利、高启、高辉、靳根明、李松林、李君清、张亚鹏, 南京大学的任中洲, 理论物理所的周善贵, 北京大学的张双全和庞丹阳以及上海核子所的徐望和范功涛。

参考文献 (References):

- [1] Norenberg W. Basic Concept in the Description of Collisions Between Heavy Nuclei. In: ed. Bock R. Heavy Ion Collisions. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1980, 2: 1—43.
- [2] Frahn W E. Elastic Scattering. In: ed. Bromley D A. Treatise on Heavy-ion Science. New York and London: Plenum Press, 1984, 1: 135—290.
- [3] Hu J M. Nuclear Theory. Beijing: Atomic Energy Press, 1996,

- 2: 265—328 (in Chinese).
(胡济民. 原子核理论. 北京: 原子能出版社, 1996, 第 2 卷, 265—328.)
- [4] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, *et al.* Phys Rev Lett, 1985, **55**: 2 676.
- [5] Mittag W, Chouvet J M, Zhan W L, *et al.* Phys Rev Lett, 1987, **59**: 1 889.
- [6] Saint-Laurent M G, Anne R, Bazin D, *et al.* Z Phys, 1989, **A332**: 457.
- [7] Ren Z Z, Chen B Q, Ma Z Y, *et al.* Phys Rev, 1996, **C53**: R572.
- [8] Brown B A, Hansen P G. Phys Lett, 1996, **B381**: 391.
- [9] Morlock R, Kunz R, Mater A *et al.* Phys Rev Lett, 1997, **79**: 3 837.
- [10] Navin A, Bazin D, Brown B A, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **81**: 5 089.
- [11] Zhang H Y, Shen W Q, Ren Z Z, *et al.* Nucl Phys, 2002, **A707**: 303.
- [12] Ren Z Z, Faessler A, Bobyk A. Phys Rev, 1998, **C57**: 2 752.
- [13] Lin C J, Zhang H Q, Liu Z H, *et al.* Phys Rev, 2002, **C66**: 067 302.
- [14] Warner R E, Kelley J H, Zecher P, *et al.* Phys Rev, 1995, **C52**: R1 166.
- [15] Cai X Z, Zhang H Y, Shen W Q, *et al.* Phys Rev, 2002, **C65**: 024 610.
- [16] Liu Z H, Ruan M, Zhao Y L, *et al.* Chin Phys Lett, 2004, **21**: 1 711.
- [17] Jensen A S, Riisager K, Fedorov D V. Rev Mod Phys, 2004, **76**: 215.
- [18] Liu Zuhua, Zhang Xizhen, Zhang Huanqiao. Nuclear Physics Review, 2004, **21**: 1 (in Chinese).
(刘祖华, 张锡珍, 张焕乔. 原子核物理评论, 2004, 21: 1.)
- [19] Ye Yanlin, Pang Danyang, Ge Yucheng, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**: 1 (in Chinese).
(叶沿林, 庞丹阳, 葛愉成等. 原子核物理评论, 2005, 22: 1.)
- [20] Wang Jia, Ye Yanlin, Jiang Dongxing, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**: 3 (in Chinese).
(王 佳, 叶沿林, 江栋兴等. 原子核物理评论, 2005, 22: 3.)
- [21] Pang Danyang, Ye Yanlin, Jiang Dongxing, *et al.* Nuclear Physics Review, 2005, **22**: 6 (in Chinese).
(庞丹阳, 叶沿林, 江栋兴等. 原子核物理评论, 2005, 22: 6.)
- [22] Sun Z Y, Zhan W L, Guo Z Y, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **A503**: 496.
- [23] Ozawa A, Cai Y Z, Chen Z Q, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2006, **B247**: 155.
- [24] Li Z H, Ye Y L, Hua H. *et al.* Phys Rev, 2005, **C72**: 064 327.
- [25] Wang Q, Han J L, Xiao Z G, *et al.* Chin Phys Lett, 2006, **23**: 1 731.
- [26] Han J L, Wang Q, Xiao Z G, *et al.* High Energy Phys and Nucl Phys, 2006, **30**: 1 058.
- [27] Wang Q. Invited Talk in the International Symposium on Physics Unstable Nuclei (ISPUN07). July 3 - 7, 2007, Hoi An, Vietnam.
- [28] Rusek K, Keeley N, Kemper K W, *et al.* Phys Rev, 2003, **C67**: 041 604R.
- [29] Kakuee O R, Rahighi J, Sanchez-Benitez A M, *et al.* Nucl Phys, 2003, **A728**: 339.
- [30] Perry R, Nadasen A, Hendrie D L, *et al.* Phys Rev, 1981, **C24**: 1 471.
- [31] Schwandt P, Jacobs W W, Kaitchuck M D, *et al.* Phys Rev, 1981, **C24**: 1 522.
- [32] Huffman R, Galonsky A, Markham R, *et al.* Phys Rev, 1980, **C22**: 1 522.
- [33] Baker S D, McIntyre J A. Phys Rev, 1967, **161**: 1 200.
- [34] Strutinsky V M. Phys Lett, 1973, **B44**: 245.
- [35] Abul-magd A Y, Simbel M H. Phys Lett, 1979, **B83**: 27.
- [36] Gobbi A, Norenberg W. Dissipative Collisions. In: ed. Bock R. Heavy Ion Collisions. Amsterdam: North-Holland Pub. Co. 1980, **2**: 127—274.
- [37] Rosa A D, Inghima G, Rosato E, *et al.* Phys Rev, 1989, **C40**: 627.
- [38] Rosa A D, Fioretto E, Inghima G, *et al.* Phys Rev, 1990, **C41**: 2 062.
- [39] Rosa A D, Fioretto E, Inghima G, *et al.* Phys Rev, 1991, **C44**: 747.
- [40] Wang Q, Dong Y C, Li S L, *et al.* Chin Phys Lett, 2004, **21**: 1 911.
- [41] Dong Y C, Wang Q, Li S L, *et al.* High Energy Phys and Nucl Phys, 2005, **29**: 147 (in Chinese).
(董玉川, 王 琦, 李松林等. 高能物理与核物理, 2005, 29: 147.)
- [42] Thompson I J. Comput Phys Rep, 1988, **C7**: 167.

Angular Dispersion of Elastic Scattering in Heavy Ion Collisions^{*}

BAI Zhen¹, WANG Qi^{1, #}, HAN Jian-long¹, Sergey Yu Kun^{2, 3}

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Centro de Ciencias Fisicas, National University of Mexico (UNAM), Cuernavaca, Mexico;*

3 *Center for Nonlinear Physics, RSPHysSE, Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia*)

Abstract: In terms of the angular dispersion plot of $\ln(d\sigma/d\theta)$ versus θ^2 , which can be obtained from the angular distribution of the elastic scattering differential cross sections in heavy ion collisions, systematic analysis on the angular dispersions is made by using classical deflection function for the available experimental data on the target of ^{208}Pb . Our systematic analyses bring about some important results. Firstly, there is an angular dispersion turning angle at forward angular range beyond the grazing angle. Secondly, the nuclear rainbow angle for such reaction systems can be determined by measuring differential cross sections of elastic scattering at forward angular range and analyzing the angular dispersion. Thirdly, analysis of angular dispersion may provide a way to determine a set of optical potential parameters by means of fitting the experimental data of elastic scattering differential cross sections. Finally, for the halo nuclei as the projectiles, there is an exotic behaviour, i. e., smaller angular dispersion turning angle.

Key words: heavy ion elastic scattering; angular dispersion; classical deflection function; nuclear rainbow angle

* **Received date:** 5 Sep. 2007; **Revised date:** 16 Oct. 2007

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10675149, 10535010); Funds of Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (KJCX3-SYW-No1, KJCX2-SW-No18); Major State Basic Research Developing Program (2007CB815000)

Corresponding author: Wang Qi, E-mail: wangqi@impcas.ac.cn