

文章编号: 1007-4627(2006)01-0001-05

在 pA 碰撞中 K^\pm , η 和 ϕ 介子的阈下产生*

郭 华^{1,2}, 李希国^{1,3,#}, 刘玉鑫^{1,4}

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 北京大学技术物理系, 北京 100871;

3 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

4 北京大学物理系, 北京 100871)

摘 要: 简要评述了在 pA 碰撞过程中 K^\pm , η 和 ϕ 介子的阈下产生及其对应的物理含义。这些介子的阈下产生都可以在兰州 CSR 上实现, 特别是通过 pA 碰撞实现 ϕ 介子的阈下产生还没有看到实验数据的报道。

关键词: pA 碰撞; 介质效应; 阈下产生

中图分类号: O572.34 **文献标识码:** A

1 引言

QCD 能够成功地解释高能物理领域的现象, 使人们相信它是描述强相互作用的基本理论。而直接使用 QCD 理论处理低能强作用的核多体问题还有相当大的困难, 于是发展了一些反映 QCD 理论基本性质(如: 手征对称性、夸克禁闭和流动耦合常数等)的有效模型, 并在处理强作用核多体问题中取得了一定的成功^[1]。手征对称性的破缺使得粒子获得质量, 此时 QCD 微扰真空变成物理真空。在高温、高密物质环境所形成的夸克-胶子等离子体(QGP)中, 手征是近似对称的。理论预言 QGP 可能存在于宇宙大爆炸的初始阶段或高能重离子碰撞的中心区域。由于宇宙过程的不可逆性, QGP 物态在实验室里只能通过高能重离子碰撞来实现, 因此, 寻找形成 QGP 物态及手征对称性恢复或部分恢复的标志信号。

手征对称性恢复或部分恢复会导致强子物质中强子有效质量随强子物质密度的增加而减小。由于强子的有效质量涉及强相互作用, 是不可测量的, 实验上只能通过适当的末态信号来判断强子在介质

中的性质。这一方面需要在适当能区内通过核-核碰撞或质子与核(pA)碰撞形成瞬间强子物质, 另一方面也需要对强子物质的性质作深入而系统的物理分析, 以便提取在强子物质中手征对称性恢复或部分恢复的可靠信息。

核-核碰撞与 pA 碰撞各有不同的特点。例如: 高能核-核碰撞可以在碰撞中心区域形成瞬间的高温或高密强子物质, 而高能 pA 碰撞不太可能形成高温强子物质; 在高能核-核碰撞中可以观测到低质量区域双轻产生的增强现象, 而即使在高能 pA 碰撞中还没有观察到双轻产额的显著增强^[2]。但是 pA 碰撞所形成的系统相对简单, 对一些感兴趣的反应道可以进行仔细的甄别与研究, 特别是中能区域的 pA 碰撞能够较好地研究强子在介质中的行为及靶核的结构信息, 有助于进一步判断强子物质中手征对称性是否得到部分恢复。

兰州冷却储存环 CSR 建成后, 能够提供最大能量为 2.8 GeV 质子束流及能量 0.6 GeV/A 的重核到 1.1 GeV/A 的轻核束流, 可以实现中能区域内的 pA 与核-核碰撞过程, 为我国展开中能区域理

收稿日期: 2005-08-02; 修改日期: 2005-08-24

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10275002, 10435080, 10425521, 10135030); 973 国家重点基础发展规划项目(G2000077400); 国家教育部重点基金资助项目(305001); 中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目(KJ9XZ-SW-No2)

作者简介: 郭 华(1963-), 男(汉族), 河南卢氏人, 教授, 博士生导师, 从事原子核多体理论研究。

联系人: 李希国, E-mail: xgl@impcas.ac.cn

论与实验相结合的研究提供了很好的机遇。中能区域的物理非常丰富。例如：如果 Θ 粒子存在的话，可以研究 $pp \rightarrow \Sigma^+ + \Theta^+$ 与 $pn \rightarrow \Lambda + \Theta^+$ 的产生截面，因为前者的阈能为 $E_{th} = 2.10$ GeV，后者的阈能为 $E_{th} = 1.89$ GeV，都在兰州 CSR 能区范围之内。在此基础上可进一步研究 $pA \rightarrow \Theta^+ + X$ 的可能性^[3]；可以通过 $pA \rightarrow \eta + X$ 研究强子共振态，特别是 $N^*(1535)$ 的性质^[4]；研究中能区域内强子物质的相结构^[5]；也可以讨论中能区域介子的产生^[6]。本文仅限于介绍 pA 碰撞过程中介子的阈下产生。

2 K⁻ 介子的阈下产生

在由组分夸克为 u 和 d 强子组成的体系中，如由 pp 和 pA 所形成的反应体系有带奇异数介子的产生，需要在物理真空中激发 $s\bar{s}$ 对。而产生 $K^-(\bar{u}s)$ 还需要在物理真空中再激发出 $u\bar{u}$ 对，与 $K^+(\bar{u}s)$ 和 $K^0(d\bar{s})$ 产生相比， $K^-(\bar{u}s)$ 介子的产额要受到抑制，同时 K^-N 作用截面较大，如在低动量 ($p_{K^-} < 0.5$ GeV/c) 区域 $\sigma_{K^-N} \approx 40$ mb，很容易发生 $K^- + N \rightarrow \Lambda + \pi$ 而被吸收，因此在 pA 过程中 K^- 产生的事件相对于 K^+ 和 K^0 来说较少^[7]。但研究核物质中 K^- 介子性质有着重要的意义，它也与核天体物理中子星的性质密切相关^[8]。介质效应使得强子在介质中的有效质量降低，因而也降低了 K^- 介子产生的阈能，并使 K^- 介子产额增加。在核物质饱和和密度处 K^- 介子感受到强的吸引势为 $U_{K^-} = -140 \sim -75$ MeV。显然在核环境中 K^- 介子与核子的作用势强度变化范围较大，且动量相关性亦不清楚。对俄罗理论和实验研究所 (ITEP) 所作的 K^- 介子阈下产生数据分析表明：高动量 ($p_{K^-} \geq 1$ GeV/c) K^- 介子产生的主要反应道为直接(也称初级)反应道 $p + N \rightarrow N + N + K^+ + K^-$ ($E_{th} = 2.5$ GeV)，而次级道 $p + N \rightarrow N + N + \pi$ ($E_{th} = 0.29$ GeV)， $\pi + N \rightarrow N + K^+ + K^-$ ($E_{th} = 1.36$ GeV) 的贡献并不重要。高动量 K^- 介子产生对于核子在核内所感受到的势场非常敏感，这可以从对图 1 的理论分析中得出：高动量 K^- 介子阈下产生主要决定于有效核子质量的变化，而对于 K^- 介子在核介质中所感受到的吸引势不太敏感。若不考虑核介质效应，则计算结果偏离实验数据很大(见图 1 中“- · -”所示曲线)。

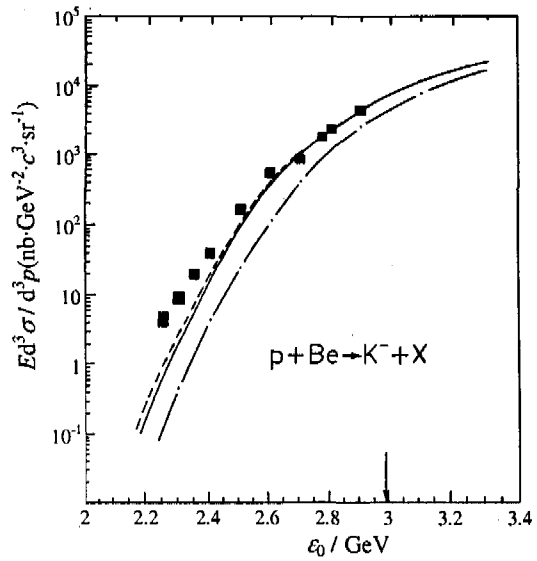


图 1 K⁻ 介子阈下产生^[9]

出射的 K^- 介子高动量为 1.28 GeV/c，出射角度 10.5° 。■表示实验点，横轴上的垂直向下的箭头表示不受介质影响 $p+N \rightarrow N+N+K^+ + K^-$ 过程的阈能。注意此图中的阈能为协变阈能，与文中的阈能 E_{th} 有差别。— 计算所取参数为：核子在核物质中所受到的势场为 $-34 \rho/\rho_0$ MeV， K^- 介子在核物质中所受到的势场为 $-126 \rho/\rho_0$ MeV，原子核对人射质子的作用势为 40 MeV，并假设 K^+ 介子不受核物质的影响；- · - 所取参数为假设 K^+ 介子不受核物质的影响，其它参数与实践线相同；- · - 表示不考虑介质效应的计算。

低动量 ($p_{K^-} \leq 1$ GeV/c) K^- 介子产生则对 K^- 介子在核内所感受到的吸引势非常敏感。另外，次级道是否在低动量 K^- 介子产生过程中起重要作用，目前还不清楚。因此可以通过 pA 过程中 K^- 介子阈下产生的低动量谱来研究 K^- 介子在核物质中所感受到的势场，以此来研究 K^- 介子在原子核内的性质。实验内容包括质子束流对不同靶核的碰撞，如 pA ($A = {}^9\text{Be}, {}^{12}\text{C}, {}^{63}\text{Cu}$)，其中入射质子的能量限定在 K^- 介子产生的阈能以下 (≤ 2.5 GeV)，所测出射 K^- 介子的动量应该较低 (≤ 1 GeV/c)，以前角区 ($0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$) 测量为主，目前仍然缺乏这方面的实验数据^[9]。事实上 pA 过程中 K^- 介子阈下产生的实验数据较少，还无法做系统学方面的分析。

3 K⁺ 介子的阈下产生

输运理论计算表明，高能核-核碰撞所产生的 K^+ 介子流对于 K^+ 介子在核介质中所感受到的势

场非常敏感。在核物质饱和密度处 K^+ 介子受到弱排斥势作用，其强度为 $U_{K^+} = 20\text{--}30$ MeV。 K^+ 介子一旦产生不易被吸收，并携带着初始产生时刻碰撞系统的信息，因此 K^+ 介子是理想的实验探测信号。利用 pA 过程测量 K^+ 介子阈下产生的实验于 1988 年由 Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI) 实验室完成。数据分析认为在入射质子能量 $\epsilon_0 > 2.5$ GeV 时，pA 过程产生 K^+ 介子的主要反应道为直接反应道 $p+N \rightarrow K^+ + \Lambda + N$ ($E_{th} = 1.58$ GeV)， $p+N \rightarrow K^+ + \Sigma + N$ ($E_{th} = 1.79$ GeV)；而在入射质子能量 $\epsilon_0 \leq 2.5$ GeV 时，pA 过程产生 K^+ 介子的主要反应道为次级反应道： $p+N \rightarrow N+N+\pi$ ($E_{th} = 0.29$ GeV)， $p+N \rightarrow N+N+2\pi$ ($E_{th} = 0.59$ GeV)； $\pi+N \rightarrow K^+ + \Lambda$ ($E_{th} = 0.76$ GeV)， $\pi+N \rightarrow K^+ + \Sigma$ ($E_{th} = 0.89$ GeV)^[10]。当自洽地考虑核介质效应后，理论计算表明在 pA 过程中 K^+ 介子阈下产生的主要反应道不一定是次级反应道^[11]。这一观点可以从对图 2 分析中得出。

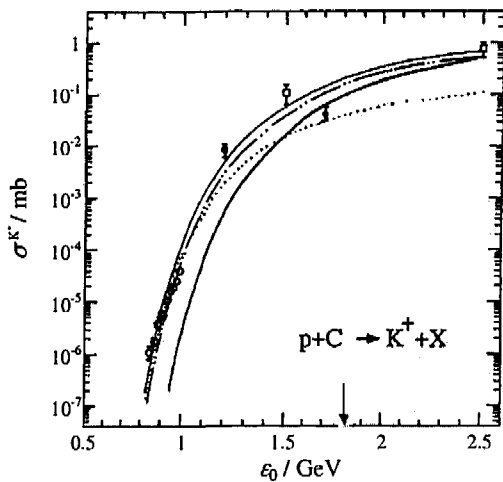


图 2 K^+ 产生截面与人射质子能量的关系^[11]

细—(上侧曲线)为初级过程与次级过程 K^+ 介子产生并考虑介质效应的总截面，粗—(下侧曲线)为初级过程与次级过程 K^+ 介子产生没有介质效应的总截面，· · · 为初级过程 K^+ 介子产生截面，- · - 为次级过程 K^+ 介子产生截面，不同实验室的实验数据分别用空(或实)心圆点及空(或实)心方块表示。横轴上的箭头表示在没有介质情况下初级过程 $pN \rightarrow K^+ N\Lambda(\Sigma)$ 所对应的最小阈能 $E_{th} = 1.58$ GeV。

在图 2 给出的计算中分析了核环境影响的大小。理论分析表明，在低能区内 ($\epsilon_0 < 1.5$ GeV) 直接过程与次级过程具有同样的重要性，而在能量较高区域内 ($\epsilon_0 > 1.5$ GeV) 直接过程的贡献比较重

要。不考虑介质效应的总截面在低能区域内偏离实验数据较大(见图 2 中粗实线)。

与 K^- 介子的阈下产生相比，利用 pA 过程研究 K^+ 介子阈下产生的实验较多，入射质子能量可以从 K^+ 介子产生的阈下能量到阈上能量。例如：STURN/GSI 合作组通过 pA 过程产生 K^+ 介子实验的靶核为 ^{12}C ，入射质子的能量分别为 $\epsilon_0 = 1.2, 1.5, 2.5$ GeV，测量了高动量 ($p_{K^+} \geq 0.4$ GeV/c) K^+ 介子的产生，测量角度为 $\theta = 40^\circ$ ^[12]；对低动量 ($p_{K^+} < 0.4$ GeV/c) K^+ 介子的测量由文献[13]给出。最近对小角度 ($0^\circ \leq \theta \leq 12^\circ$) K^+ 介子在 pA ($A = ^{12}\text{C}, ^{63}\text{Cu}, ^{197}\text{Au}$) 过程中的产生也进行了测量，结果表明，低动量区 K^+ 介子产生的动量谱明显偏离热平衡态，而高动量 K^+ 介子产生可能是靶核内核子集体运动行为的一种反映，并且 K^+ 介子产生截面与靶核质量数相关性非常弱^[14]。对现有的 K^+ 介子产生实验数据系统分析认为：在 pA 过程中，在入射质子能量较高 ($\epsilon_0 > 1.2$ GeV) 情况下，有必要测量小角度区域内 K^+ 介子的动量谱，以便比较 K^+ 介子产生直接反应道与次级反应道贡献的相对大小，并进一步检查 K^+ 介子产生截面的角关联^[15]。总之，探索 K^+ 介子阈下产生机制、靶核内部核子的关联(如： K^+ d 关联^[16])及其动量分布等物理因素仍然是理论与实验研究的一个重点。

4 η 介子的阈下产生

赝标量 η 介子的质量为 547.3 MeV，夸克结构可以表示为 $c_1(u\bar{u} + d\bar{d}) + c_2 s\bar{s}$ ，其中 $c_1 \neq 0, c_2 \neq 0$ 。研究 η 介子的产生有助于理解核子内部奇异成份含量。同时 η 介子在核物质中运动时很容易使核子激发，即 $\eta N \rightarrow N^*(1535) \rightarrow \pi N$ ，因此在 pA 过程中对 η 介子产生的研究有利于认识 η 介子与核子的作用，理解核子激发态在核物质中的性质^[17]。第一个利用 pA ($A = ^6\text{Li}, ^{12}\text{C}, ^{63}\text{Cu}$) 过程产生 η 介子的实验数据发表于 1990 年^[18]，相应的理论分析考虑了 η 介子产生的初级、次级及吸收过程。初级过程反应道为 $NN \rightarrow NN\eta$ ($E_{th} = 1.25$ GeV)，次级过程为 $NN \rightarrow NN\pi$ ($E_{th} = 0.28$ GeV)， $\pi N \rightarrow \eta N$ ($E_{th} = 0.56$ GeV)，吸收过程为 $\eta N \rightarrow N^*(1535) \rightarrow \pi N$ 。在 pA 碰撞中， η 介子产生的理论分析要用到原过程(即 $pp \rightarrow pp\eta, pn \rightarrow pn\eta$) 的反应截面，一般应有 $\sigma_{pn \rightarrow pn\eta} >$

$\sigma_{pp \rightarrow pp\eta}$, 当时还没有这些原过程的实验数据^[19, 20]。利用 $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ 过程可以较为清楚地说明在 pA 过程中 η 介子的产生与核子共振态的关系, 结果表明, 在考虑 $NN \rightarrow NN^*(1535) \rightarrow NN\eta$ 后, 理论计算能够很好地拟合 η 介子产生的实验数据^[21]。由于在 $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ 过程中涉及到的粒子数量相对较少, 可以检验末态相互作用在 η 介子产生中的效应^[22]。图 3 给出了在 $pd \rightarrow {}^3\text{He}\eta$ 过程中 η 介子的产生截面。由于靶核结构简单, 可以进行较为严格的少体计算。结果表明, 末态相互作用(FSI)对 η 介子阈下产生贡献较大, 并且 η 介子阈下产生截面近似地有各向同性的特点。由于 ηN 相互作用比较强, 极有可能形成 ηNN 的束缚态^[23], 但考虑到 ηN 系统中 πN 与 $\pi\pi N$ 是开道, 因此 ηNN 态只可能是准束缚态^[24]。是否可以在 $NN \rightarrow NN\eta$ 阈能附近或阈下通过 $pA \rightarrow \eta X$ 过程获得 ηNN 准束缚态的信息还不得而知。

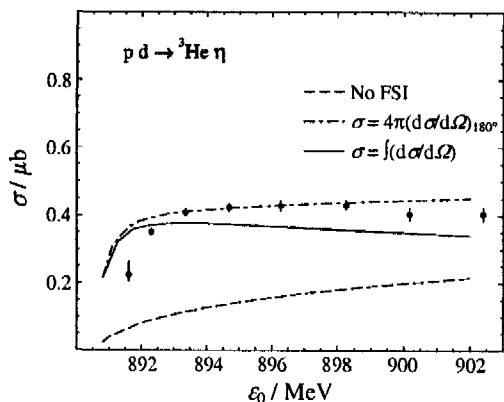


图 3 η 介子阈下产生截面与人射质子能量的关系^[22]
 — 表示在考虑末态相互作用(FSI)时的截面, - · - 表示在假定 η 介子产生为各向同性并考虑 FSI 时的截面, - - 表示在不考虑 FSI 时的截面。

5 ϕ 介子的阈下产生

ϕ 介子的夸克组成为纯 $s\bar{s}$, 研究核-核碰撞过程中 ϕ 介子的产生具有重要意义: ϕ 介子产额的增加预示着碰撞区域可能出现 QGP 物态; 由于 ϕ 介子与非奇异强子作用很弱, 它一旦产生必将携带碰撞区域的信息; 在粒子产生质量谱中, ϕ 介子不会与其它介子混合, 很容易鉴别; ϕ 介子的衰变模式对于介质环境很敏感; ϕ 介子介质修正质量与核子奇异成份含量相关联^[25]。用 12 GeV 的质子束流轰击靶核 C 和 Cu, 测量 $\phi \rightarrow K^+ K^-$ 与 $\phi \rightarrow e^+ e^-$ 的协变质量谱, 并没有观察到 ϕ 介子受介质修正的明显信息。但在测量结果中发现有过剩 $e^+ e^-$ 产生, 可能与 ρ/ω 质量受介质修正有关^[26]。在 pA 过程中, ϕ 介子产生的原过程为 $p + N \rightarrow p + N + \phi$, 其阈能为 2.59 GeV, 而 ϕ 介子衰变道为 $\phi \rightarrow K^+ K^-$, $\phi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 。理论研究表明, 在 pA ($A = {}^{12}\text{C}, {}^{63}\text{Cu}$) 过程中取入射质子的能量为 2.4 和 2.7 GeV, 则完全有可能实现 ϕ 介子的阈下产生, 当然在实验中需要测量 $K^+ K^-$ 及 $\mu^+ \mu^-$ 的双微分协变质量截面^[25]。目前还没有看到利用 pA 碰撞研究 ϕ 介子阈下产生的实验报道。

总之, 兰州 CSR 能区的 pA 碰撞涉及到粒子物理与核物理的交叉领域, 有丰富的物理研究内容。通过 pA 碰撞研究介子的阈下产生是探索强相互作用、反应动力学、核内非核子自由度、强子介质效应及靶核结构的重要手段, 是在强子物质中检验手征对称性是否得到部分恢复的重要途径。也可以利用 pA 碰撞寻找强子新的共振态、奇异强子态及新的反应道。对于重质量靶核来说, 又可以研究由中能质子所引起的原子核裂变现象。可以说兰州 CSR 的建成与运行将推动我国中能区核物理研究进入快速发展的新时期。

参 考 文 献:

[1] Serot B D, Walecka J D. *Int J Mod Phys*, 1997, **E4**: 515.
 [2] Masera M. *Nucl Phys*, 1995, **A590**: 93c.
 [3] 李希国, 徐珊珊, 肖国青等. *原子物理评论*, 2005, **22**(3): 243.
 [4] 邹冰松. *原子物理评论*, 2003, **20**(3): 167.
 [5] 庄鹏飞. *原子物理评论*, 2002, **19**(3): 306.
 [6] 姜焕清. *原子物理评论*, 2002, **19**(3): 301.
 [7] Sibirtsev A, Büscher M, Müller H, *et al.* *Eur Phys J*, 1995, **A351**: 333.
 [8] Gu J F, Guo H, Zhou R, *et al.* *Astrophysical Journal*, 2005, **622**: 549.
 [9] Paryev E. *Eur Phys J*, 2000, **A9**: 521.
 [10] Efremov S V, Paryev E. *Eur Phys J*, 1998, **A1**: 99.
 [11] Paryev E. *Eur Phys J*, 1999, **A5**: 307.

- [12] Debowski M, Barth R, Boiviv M, *et al.* Z Phys, 1996, **A356**: 313.
- [13] Badala A, Barber R, Bassi M, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **80**: 4 863.
- [14] Koptev V, Büscher M, Junghans H, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **87**: 022301.
- [15] Büscher M, Loffe B L, Koptev V, *et al.* Phys Rev, 2001, **C65**: 014603.
- [16] Koptev V, Nekipelov M, Büscher M, *et al.* Eur Phys J, 2003, **A17**: 235.
- [17] Golubeva Y S, Iijinov A S, Paryev E, *et al.* Z Phys, 1993, **A345**: 223.
- [18] Chiavassa E, Dellacasa G, Marco N, *et al.* Nucl Phys, 1990, **A538**: 413.
- [19] Chiavassa E, Dellacasa G, Marco N, *et al.* Z Phys, 1993, **A344**: 345.
- [20] Cassing W, Batko G, Vetter T, *et al.* Z Phys, 1991, **A340**: 51.
- [21] Santra A B, Jian B K. Phys Rev, 2001, **C64**: 025201.
- [22] Khemchandani K P, Kelkar N G, Jain B K. Nucl Phys, 2002, **A708**: 312.
- [23] Chiang H C, Oset E, Liu L C. Phys Rev, 1991, **C44**: 738.
- [24] Garcilazo H. Nucl Phys, 2001, **A689**: 193c.
- [25] Paryev E. Eur Phys J, 2004, **A23**: 453.
- [26] Ozawa K, Chiba J, Enyo H, *et al.* Nucl Phys, 2002, **A698**: 535c.

Subthreshold K^\pm , η and ϕ Meson Productions in pA Collisions*

GUO Hua^{1,2}, LI Xi-guo^{1,3}, LIU Yu-xin^{1,4}

(¹ Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China;

² Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

³ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

⁴ Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: K^\pm , η and ϕ meson productions at subthreshold energies in pA collisions are briefly reviewed. These subthreshold meson productions can also be carried out at CSR in Lanzhou. Especially, experiments on ϕ meson production near subthreshold energy in pA collisions should be performed in the future.

Key words: pA collision; in-medium effect; subthreshold production

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (10275002, 10435080, 10425521, 10135030); Major State Basic Research Developing Program (G2000077400); Key Grant Project of the Chinese Ministry of Education (305001); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCXZ-SW-No2)