

# 重离子碰撞中的介子\*

——兰州重离子冷却储存环上可能实验的讨论

姜焕清

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

**摘 要** 讨论了在兰州重离子加速装置冷却储存环上开展介子产生的实验研究的可能性和进行  $\pi$  和  $\eta$  介子产生研究的意义. 在 CSR 能量区域内, 核子可以激发为  $\Delta$  和  $N^*$ . 因此, 在研究热密核物质的状态方程时, 考虑  $\Delta$  和  $N^*$  自由度是重要的. 观察重离子碰撞中产生的介子可以提供热密核物质的状态方程, 从而可以提供核内物质分布以及  $N^*$  在核物质中传播的信息. 建议建造一个测量介子的实验装置, 以开展该领域的研究.

**关键词** 介子产生 重离子反应 核反应

**分类号** O571.42

## 1 为什么要观察介子?

介子在强作用物理中起着重要的作用. 我们知道, 介子是强作用的传播子, 它们是玻色子, 具有独特的性质. 介子可以在强作用中产生, 因此, 它们是提供强作用信息最灵敏的探针. 表 1 中列出了一些最轻的介子及它们的性质.

从表 1 可以看出,  $\pi$  介子、K 介子和  $\eta$  介

子属于同一个 SU(3) 分类的赝标介子. 其中,  $\pi$  介子有 3 种电荷状态, 是最轻的强子, 可以在 N-N 碰撞中产生; K 介子是奇异粒子, 它可以在 N-N 碰撞中与另一个奇异重子一同产生, 具有较高的阈能;  $\eta$  介子的同位旋为零.  $\rho$  介子和  $\sigma$  介子在核子-核子相互作用中起重要作用. 然而,  $\sigma$  介子的存在仍然是一个没有解决的问题. 自 60 年代末期以来, 对  $\pi$  介子和原子核相互作用的研究一直是人们十分关注的课题, 并已取得了很大进展. 为研究原子核的激发方式提供了大量信息<sup>[1~3]</sup>.

在过去的 20 年里, 由于介子工厂的建成和投入运行, 关于原子核的图象经历了一场变革: 过去认为原子核是一个通过 N-N 发生相互作用的核子系统, 而现在则认识到它是一个核子、介子以及  $\Delta(1232)$  相互耦合的体系. 虽然, 从更基本的意义上讲, 夸克和胶子在核物理中起着核心的作用, 而传统的图象仍然具有很强的预言能力. 因此,  $\pi$ -核物理仍然有机会对解决目前人们感兴趣的

表 1 一些轻介子的性质

介子	$I^G(J^P)$	$M/\text{MeV}$
$\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	139.6
$\pi^0$	$1^-(0^-)$	135
$\eta$	$0^+(0^-)$	547.3
$K^\pm$	$1/2(0^-)$	493.7
$K^0$	$1/2(0^-)$	497.7
$K^0$	$1/2(0^-)$	497.7
$\rho$	$1^+(1^+)$	770.0
$\sigma$	$0(0)$	500?

\* 收稿日期: 1999-04-13.

国家自然科学基金(项目号 1967544)资助.

问题作出贡献. 此外, 目前的介子工厂仍然能对解决非微扰 QCD 区域的一些现象作出贡献.  $\pi$ -核作用过程的研究可以把大动量转移的现象(夸克、胶子“凝聚”)与低动量尺度的现象(物理上的观测量强子是自然的自由度)相联系.  $\pi$ -核散射提供了研究核内物质分布的新方法<sup>[4]</sup>,  $\pi$ -核双电荷交换反应为研究原子核的双同位旋相似激发提供了新的手法, 为产生丰中子和丰质子核提供了有效方法<sup>[5]</sup>.

70 年代末期以来, K 介子与核相互作用的研究也开始引起人们的极大兴趣,  $K^-$  介子在核上引起的奇异交换反应是产生超核的有效手段,  $K^+$  介子在核内较长的平均自由程使它成为核内部物质分布的理想探针. 80 年代初, 开始了  $\eta$  介子与原子核作用的实验研究,  $\eta$  介子的产生以及  $\pi$  介子引起的  $\eta$  介子产生成为研究核内核子激发态的重要手段<sup>[6-10]</sup>. 在即将建设的兰州重离子加速装置冷却储存环(CSR)的能区,  $\pi$  和  $\eta$  介子都可以产生, 而 K 介子只能在核-核碰撞的阈下产生. 研究重

离子碰撞中的  $\pi$  和  $\eta$  介子产生, 可以提供  $\pi$  和  $\eta$  介子在核物质中传播的信息, 对双  $\pi$  介子产生的研究, 可以得到  $\sigma$  介子的信息.

由于它们的同位旋性质, 研究  $\pi$  和  $\eta$  介子的产生是研究重子激发态的有效手段. 通常, 核子的同位旋为 1/2,  $\pi$  介子的同位旋为 1,  $\eta$  介子的同位旋为 0, 因此,  $\pi$ -核子系统同位旋可以是 1/2 或 3/2, 而  $\eta$ -核子系统同位旋只能是 1/2. 由于强作用中同位旋守恒,  $\pi$  介子可以和核子耦合成  $I = 3/2$  或  $I = 1/2$  的核子激发态. 表 2 和表 3 分别给出了同位旋为 3/2 和 1/2 的核子共振态以及它们的衰变分支比.

表 2  $\Delta$  重子( $S = 0, I = 3/2$ )

共振态	衰变分支比 (%)	
	$\pi$ -N	$\pi\pi$ -N
$\Delta(1232) P_{33}$	> 99	
$\Delta(1600) P_{33}$	10~ 25	75~ 90
$\Delta(1620) P_{31}$	20~ 30	70~ 80

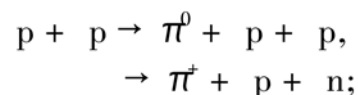
表 3  $N^*$  重子( $S = 0, I = 1/2$ )

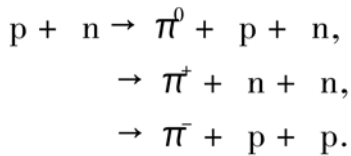
共振态	衰变分支比 (%)				
	$\pi$ N	$\eta$ N	$\pi\pi$ -N	$\Lambda$	K
$N^*(1440) 1/2^+ P_{11}$	50~ 70		30~ 50		
$N^*(1520) 3/2^- D_{13}$	50~ 60	~ 0.1	40~ 50		
$N^*(1535) 1/2^- S_{11}$	35~ 50	45~ 55	~ 10		
$N^*(1650) 1/2^- S_{11}$	55~ 65	~ 1.5	20~ 30	~ 8	
$N^*(1675) 5/2^- D_{15}$	35~ 40	~ 1	60~ 65	~ 0.1	

从表 2 和表 3 可以看出, 在质心能量 1 700 MeV 以下, 只有  $N^*(1535)$  有很大的分支比衰变到  $\eta$ -N, 而其它共振态衰变到  $\eta$ -N 的分支比很小. 换句话说, 在阈能附近,  $\eta$ -核子与  $N^*(1535)$  有很强的耦合, 而与其它共振态的耦合却很小.  $\pi$ -核子与  $\Delta_{33}$  有很强的耦合. 观测重离子碰撞中  $\pi$  和  $\eta$  介子的产生, 是研究  $\Delta_{33}$  激发态和  $N^*(1535)$  在核物质中的

形成与传播的有效手段.

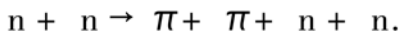
另一方面, 由于介子的独特性质, 观测重离子碰撞中  $\pi$  的产生, 可以得到原子核中物质分布的知识. 这对于研究丰中子或丰质子核中子物质分布是很好的工具. 现在让我们看一看核子-核子碰撞中的单  $\pi$  介子产生,





一个质子和一个靶核质子碰撞可以产生  $\pi^0$ , 也可以产生  $\pi^+$ . 而一个质子和一个靶核中子碰撞可以产生  $\pi^0$ ,  $\pi^+$ , 还可以产生  $\pi^-$ . 可见, 入射质子与靶作用产生的  $\pi$ , 只可能在与靶中子作用时才可能产生. 可以想象, 观测质子与靶核碰撞中中子的产生, 可以得到核内中子分布的信息.

已知,  $S=0$  和  $T=0$  的  $\pi$ - $\pi$  散射可以提取  $\sigma$  粒子的信息<sup>[12]</sup>. 而  $\pi\pi$  散射可以通过核子-核子碰撞中的双  $\pi$  产生来研究:

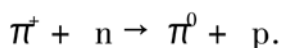


研究表明, 在核物质中,  $\pi$ - $\pi$  散射有大的变化, 随着核物质密度的增大, 强度会向低能端移动. 这表明, 核内的  $\sigma$  粒子会不同于自由的  $\sigma$  粒子, 这会表现在重离子碰撞中的双  $\pi$  产生的原子核的依赖性上. 研究阈能附近重离子碰撞中的双  $\pi$  产生, 将提供核内的  $\sigma$  信息.

## 2 $\pi$ 介子在物质中的传播

在核物质中的介子不同于自由介子. 为了正确分析重离子碰撞中的介子产生, 需要了解它们在核物质中的传播.  $\pi$  介子可以在核物质中引起核子-空穴和  $\Delta$ -空穴激发, 如图 1 所示. 一个入射的  $\pi$  介子把核物质中的一个核子激发到费米海以上或激发成一个  $\Delta$ , 而在原来的地方留下一个核子空穴.

$\pi$  介子可在核内与核子发生电荷交换, 如



对这类反应系统的研究表明,  $\pi$  介子-核单电荷交换反应是研究原子核同位旋相似激

发和核内中子分布的有效手段. 在传统的领域内, 对于具有极端中子/质子比的原子核的研究引起了人们越来越大的兴趣, 包括天体物理学家.  $\pi$  介子提供了一个产生丰中子核和丰质子核的机会. 双电荷交换反应可以产生丰质子核(如  $^9\text{C}$ 、 $^{10}\text{C}$  和  $^{11}\text{N}$ ), 也可以产生丰中子核(如  $^{10}\text{He}$ 、 $^{11}\text{Li}$ 、 $^{14}\text{Be}$  和  $^{17}\text{B}$  等). 同时, 利用谱仪分析这些核谱, 就可以研究有趣的原子核的运动方式. 通过角分布的研究, 可以得到中子晕的空间分布, 用  $\pi$  核单电荷交换反应的独特性质可以研究重核中质子分布与中子分布的差别.

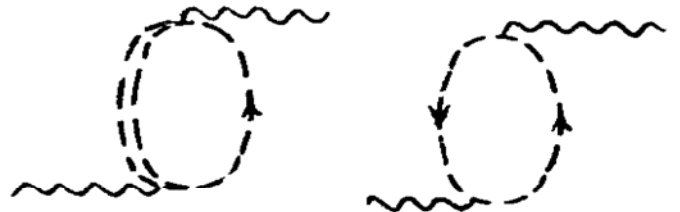
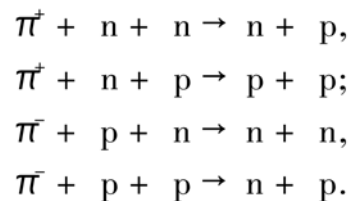


图 1  $\pi$  介子引起的核子-空穴和  $\Delta$ -空穴激发

$\pi$  介子在核内可以被吸收. 由于在自由空间一个核子不可能吸收  $\pi$  介子, 核内  $\pi$  介子吸收主要来自两核子吸收过程, 如



一个  $\pi$  介子与一对核子发生作用, 末态没有  $\pi$  介子出射,  $\pi$  介子把所有的能量都转变成末态核子的动能. 由于至少需两个核子参与  $\pi$  介子吸收, 所以对  $\pi$  介子吸收过程的研究为研究核内多核子关联提供了重要手段.

$\pi$  介子在自由空间的传播子为

$$D^{(0)}(K) = \frac{1}{(k^0)^2 - \mathbf{k}^2 - m_\pi^2 + i\epsilon}, \quad (1)$$

其中,  $K$  为  $\pi$  介子的四动量,  $k^0$  为  $\pi$  介子的能量,  $\mathbf{k}$  为  $\pi$  介子的动量,  $m_\pi$  为  $\pi$  介子的质量,  $\epsilon$  为无穷小量.

考虑粒子-空穴和  $\Delta$ -空穴激发,  $\pi$  介子在核物质中的传播可用图 2 表示.  $\pi$  介子吸收

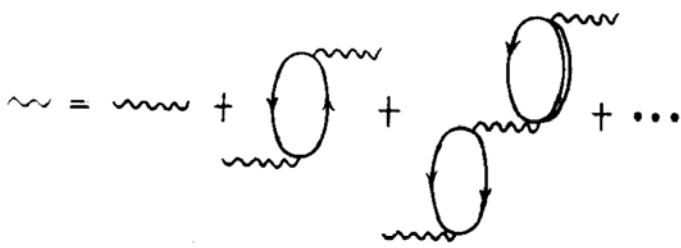


图 2  $\pi$  介子在核物质中的传播

也要引起  $\pi$  介子自能的修正. 考虑到所有过程,  $\pi$  介子在核物质中的传播子变为

$$D(K) = \frac{1}{(k^0)^2 - \mathbf{k}^2 - m_\pi^2 + \Pi(k)}, \quad (2)$$

其中  $\Pi(k)$  为  $\pi$  介子在核物质中的自能, 即

$$\Pi(k) = \Pi^{(\text{ph})} + \Pi^{(\Delta\text{h})} + \Pi^{(\text{abs})} + \dots, \quad (3)$$

这里,  $\Pi^{(\text{ph})}$ 、 $\Pi^{(\Delta\text{h})}$  和  $\Pi^{(\text{abs})}$  分别是由于粒子-空穴、 $\Delta$ -空穴激发和  $\pi$  吸收引起的  $\pi$  介子自能的修正. 在无限大的核物质中,  $\Pi^{(\text{ph})}$  和  $\Pi^{(\Delta\text{h})}$  可以分别写成

$$\Pi^{(\text{ph})}(q^0, \mathbf{q}) = -q^2 \chi_N(q^0, \mathbf{q}), \quad (4)$$

$$\chi_N(q^0, \mathbf{q}) = -\frac{f^2}{\mu^2} U_N(q^0, \mathbf{q}), \quad (5)$$

这里,  $f$  和  $\mu$  分别是  $\pi N N$  耦合常数和  $\pi$  介子的质量,  $U_N$  为 Lindhard 函数.

$$U_N(q) = 4 \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \left| \frac{n(\mathbf{k}) [1 - n(\mathbf{k} + \mathbf{q})]}{q^0 - \epsilon(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + \epsilon(\mathbf{k}) + i\eta^+} + \frac{n(\mathbf{k} + \mathbf{q}) [1 - n(\mathbf{k})]}{-q^0 - \epsilon(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + \epsilon(\mathbf{k}) + i\eta^+} \right|, \quad (6)$$

其中,  $n(k)$  和  $\epsilon(k)$  分别是核子的占有数和能量

$$\Pi^{(\Delta\text{h})}(q^0, \mathbf{q}) = -q^2 \chi_\Delta(q^0, \mathbf{q}), \quad (7)$$

$$\chi_\Delta(q^0, \mathbf{q}) = -\frac{f^{*2}}{\mu^2} U_\Delta(q^0, \mathbf{q}), \quad (8)$$

$$U_\Delta(q) = 4 \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \left| \frac{n(\mathbf{k})}{q^0 - \epsilon_\Delta(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + \epsilon(\mathbf{k}) + i\eta^+} + \frac{n(\mathbf{k} + \mathbf{q})}{-q^0 - \epsilon(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + \epsilon_\Delta(\mathbf{k} + \mathbf{q}) + i\eta^+} \right|, \quad (9)$$

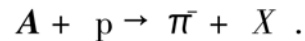
$f^*$  和  $\epsilon_\Delta$  分别是  $\pi N \Delta$  的耦合常数和  $\Delta$  的能量.

### 3 在 CSR 上对 $\pi$ 产生反应研究

对重离子引起的介子产生的研究把现代物理中两个不同的方面联系在一起: 介子在核物质中的产生与传播以及重离子反应动力学. 在 CSR 能量范围, 未能很好地考虑介子的产生与传播, 很难对反应动力学有可靠的理解. CSR 的能量可达到 900 MeV/u, 从能量考虑, 在这一能量下的核子-核子碰撞可以产生  $\pi$  介子和  $\eta$  介子. 这里对一些新的可能实验进行定性分析.

#### 3.1 极化大变形放射性核引起的 $\pi$ 产生

我们已经看到, 观测质子与核碰撞中的  $\pi^-$  产生可以得到核内中子分布的信息. 现在, 考虑入射极化大变形放射性核 A 与氢靶作用, 观测  $\pi^-$  产生,



大变形核的极化方向分别为沿入射方向和垂直于入射方向. 定义不对称量,

$$A_s = \frac{(\frac{d\sigma}{d\Omega})_\perp - (\frac{d\sigma}{d\Omega})_\parallel}{d\sigma/d\Omega}, \quad (10)$$

式中,  $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_\perp$  为横向极化的 A 核与靶核子作用产生  $\pi^-$  介子的微分截面,  $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_\parallel$  为纵向极化的 A 核与靶核子作用产生  $\pi^-$  介子的微分截面,  $d\sigma/d\Omega$  为它们的平均. 直观地考虑, 这个不对称量对大变形放射性核中的中子分布敏感. 更定量的理论计算很有意义.

#### 3.2 不同能量下的单 $\pi$ 产生

在兰州 CSR 的能区, 应系统研究  $\pi$  介子

产生的能量依赖关系, 研究  $\pi$  介子产生的机制, 特别是研究极化核与极化靶(或非极化靶)碰撞产生  $\pi$  介子的截面. 实验表明, 即使在  $\pi$  介子产生的阈能以下的重离子碰撞中也观测到了  $\pi$  介子的产生, 即  $\epsilon \leq 140 \text{ MeV/u}$ . 在这种情况下, 显然需要多个核子合作相干的产生  $\pi$  介子. 已有不同的理论模型来解释  $\pi$  介子和阈下产生, 对于同一个体系, 系统研究  $\pi$  介子的阈下产生和阈上产生将有利于透彻理解  $\pi$  介子阈下产生的机制.

### 3.3 重离子碰撞中的双 $\pi$ 产生

为了检验 QCD, 对于低能定理的一个特别重要的和理论上干净的例子, 是  $\pi$ - $\pi$  散射. 在 30 多年以前, Weinberg 利用流代数/PCAC 技术就已经指出了这一点. 目前计算数据与理论预言在误差范围内是一致的. 为了完全检验这种预言, 我们需要一套新的实验, 这些实验的精确度都应该在 5% 的范围内.  $S=0$  和  $T=0$  的  $\pi$ - $\pi$  散射是研究  $\sigma$  粒子的有效办法. 然而, 核内的  $\sigma$  不同于自由的  $\sigma^{[1]}$ . 在 CSR 能区, 系统研究双  $\pi$  产生的能量依赖和  $A$  依赖, 可以进一步澄清核内  $\sigma$  的性质.

### 3.4 重离子碰撞中的 $\eta$ 介子产生

前面已讨论了阈能附近的  $\eta$  介子产生是

研究  $N^*(1535)$  的好办法. 研究表明, 核内的  $N^*(1535)$  不同于自由的  $N^*(1535)$ , 也就是说,  $N^*(1535)$  在核物质中的传播会有自能修正. 这会对重离子碰撞中的  $\eta$  介子生成截面产生影响. 系统研究  $\eta$  介子产生的能量依赖和参与核的依赖, 可以进一步澄清核内  $N^*(1535)$  的性质.

## 4 小结

本文讨论了介子的独特性质、介子在核物质中的传播和在 CSR 上可能开展的介子产生反应的研究. 可以看出: 重离子反应中可能引起  $\Delta$  和  $N^*$  的激发; 研究热密核物质的状态方程应该考虑  $\Delta$  和  $N^*$  自由度; 对重离子反应中产生介子的观测, 可以提供热密核物质状态的信息; 对重离子反应中产生介子的观测, 可以提供核内物质分布的信息; 对重离子反应中产生介子的观测, 可以提供  $N^*$  在核内传播的信息; 对重离子反应中产生双  $\pi$  介子的观测, 可以提供核内  $\sigma$  的信息. 兰州重离子冷却储存环可以为这方面的研究作出贡献, 适时考虑建造介子的观测装置是必要的.

## 参 考 文 献

- Huefner J. Pions Interact with Nuclei. Phys Reports, 1979, 21C: 1~ 79
- Eisenberg J, Koltun D S. Theory of Meson Interactions with Nuclei. Wiley, 1980
- Chiang C H, Huefner J. Nucleons after Pion Absorption, Nucl Phys, 1981, A352: 442~ 460
- Chiang H C, Johnson M B. Pion Charge Exchange from Oriented Deformed Nuclei, Phys Rev Lett, 1984, 53: 1 996~ 1 999
- Chiang H C, Johnson M B. Pion Scattering on Aligned  $^{165}\text{Ho}$ . Phys Rev, 1985, C31: 2 140~ 2 146
- 姜焕清, 邹冰松.  $\pi$ -核双电荷交换反应. 高能物理与核物理, 1991, 15: 1 115~ 1 125
- Li Y G, Chiang H C.  $\eta$  Production from Nuclei by  $\pi$  Capture. Nucl Phys, 1986, A454: 720~ 732
- Chiang H C, Oset E, Liu L C. Width of Bound eta in Nuclei. Phys Rev, 1991, C44: 738~ 746
- Bhalero R S, Liu L C. Off-shell Model for Threshold Pionic  $\eta$  Production on a Nucleon and for  $\eta$ -N Scattering, Phys Rev Lett, 1985, 54: 865~ 868
- Peng J C, Leitch M J, Bowman J D *et al.* Coherent  $\eta$ -meson Production in the Reaction  $\pi + {}^3\text{He} \rightarrow \eta + t$ . Phys Rev Lett, 1989, 63: 2 353~ 2 356.
- Chen L, Chiang H C. Eta Photoproduction on Nucleons and Nuclei near Threshold. Phys Lett, 1994, B329: 424~ 428

- 12 陈 林, 姜焕清. 核上  $A(\pi, \eta)X$  单举反应. 高能物理与核物理, 1994, 18: 553~ 558
- 13 俞 涛, 姜焕清. 氘核上  $\eta$  介子的光产生. 高能物理与核物理, 1998, 22: 452~ 459
- 14 Chiang H C, Yu T. Proceedings of the Inauguration Conference on APCTP: Current Topics in Physics. Eds Y M Cho, J B Hong and C N Yang. World Scientific, 1996, 938~ 947
- 15 Chiang H C, Oset E, Vicente Vacas M J. Chiral Non-perturbative Approach to the Isoscalar S-wave  $\pi\pi$  Interaction in a Nuclear Medium. Nucl Phys, 1998, A644: 77~ 92

## Meson Production in Heavy Ion Collisions

Jiang Huanqing

(Center for Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000)

(Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

(Institute of Theoretical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** The possibilities for experimental study of meson production at Cooling Storage Ring (CSR) of Lanzhou are discussed. It is shown that the study of production of the pion and eta mesons at CSR is of significance. Nucleon can be excited to  $\Delta$  and  $N^*$  at CSR energy region. Therefore, it is important to consider the degree of  $\Delta$  and  $N^*$  in the study of the equation of states of hot and dense matter. The produced mesons in heavy-ion collisions can provide information on the equation of states of hot and dense matter, the matter distribution in nuclei and the propagation of  $N^*$  in nuclear matter. The construction of a facility for measuring mesons is strongly suggested.

**Key words** meson production heavy ion reaction nuclear reaction

**Classifying number** 0571.42

(上接第 147 页)

## Status of RIBLL and Some New Experiments

Xiao Guoqing Zhan Wenlong Guo Zhongyan

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** The status of RIBLL and some new experiments performed since the first operation of RIBLL in 1997 are described. Some of the experimental results are introduced and discussed.

**Key words** radioactive nuclear beam identification of new nuclides total nuclear reaction cross-section break-up reaction

**Classifying number** 0571.4