

中能核反应中碰撞参数的确定^{*}

魏志勇, 靳根明, 诸永泰, 吴和宇

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 介绍了中高能核反应过程中与碰撞参数相关的可观测量, 确定碰撞参数的各种方法, 以及这些方法的适用范围和可靠性. 这些方法包括约化线性动量转移、带电离子多重性、横向动量的方向性、横向动能和纵向动能的比 E_{rel} 、 Z_{bound} 和椭圆流参量.

关键词: 碰撞参数; 统计发射; 动力学发射

中图分类号: O571.1; O571.42; O571.4 **文献标识码:** A

1 引言

中能重离子核反应机制研究和热核性质研究是当前核物理研究的前沿领域之一, 有关这方面的研究工作已有较多的积累^[1-3]. 将核反应过程中不同碰撞参数下的事件选择后进行分析研究, 不仅仅是分析方法和手段方面的突破, 而且是对核物理问题研究本身的深入. 确定核反应过程中的碰撞参数, 可以区分核反应机制, 另外, 找到这种确定碰撞参数的方法又需要对核反应机制有比较深入的研究.

在低能重离子核反应中, 碰撞参数的不同, 核反应过程有不同的方式. 在碰撞参数比较大的擦边碰撞下, 核反应过程往往是直接反应过程(包括弹性、准弹、转移反应及各种交换过程), 碰撞参数减小后, 弹靶原子核作用时间增大, 耗散的能量、角动量比较多, 交换的质量和电荷增多, 出现了深度非弹性碰撞过程, 对于中心或近中心碰撞则会有熔合反应等等. 低能核反应过程的一个基本特点就是核反应过程是一个两体过程, 核反应过程中相互作用的主要特征是平均场. 入射炮弹和靶核在同一平面内, 同样出射产物也在这一核反应平面内. 核反应过程中, 核反应机制与碰撞参数有明显的对应关系. 随着轰击能量提高, 进入中能区后, 核反应机制发生了明显的变化. 首先, 核反应过程的实验现象和低能区有很大的不同. 在核反应过程中除发射中子、质子及 α 粒子等轻带电粒子外, 还发射大量

的中等质量碎片, 在一次核碰撞过程中发射的粒子数目往往很大. 发射产物不仅仅在反应平面内, 而且有很大的出平面成分. 发射粒子的动能可以跨越几个数量级. 这时候, 核反应过程中的相互作用由平均场占据统治地位变为核子-核子碰撞占据统治地位. 核反应机制既与碰撞参数有关, 又和轰击能量、弹靶体系密切相关. 此时, 需要找出一些和碰撞参数有单调函数关系, 同时又对其它反应参量依赖性弱的可观测量, 才能确定碰撞参数.

2 碰撞参数的确定方法

通过核反应过程中的可观测量来得到碰撞参数有多种方法. 对于束流能量不是很高的情况, 可以利用测量线性动量转移来确定碰撞参数.

和低能重离子核反应过程不同, 随着束流能量提高, 即使中心碰撞, 也不能将炮弹的所有能量和动量都带入复合体系中. 在碰撞过程中, 会有部分核子在反应的早期就发射出来, 因此, 根据碰撞参数的不同及入射炮弹能量的不同, 会有不同大小的线性动量转移. 对中心碰撞, 平均线性动量转移可按下式来估计.

$$\langle LMT \rangle = \begin{cases} 1.273 - 0.092 \sqrt{E/A} & (\sqrt{E/A} > 3.2), \\ 1 & (\sqrt{E/A} < 3.2). \end{cases} \quad (1)$$

对于类熔合反应过程, 实验中可以用测量折叠

收稿日期: 2000-11-11; 修改日期: 2001-03-22

* 基金项目: 中国科学院留学回国人员基金资助; 中国科学院“百人计划”基金; 中国科学院“九五”重大基金资助项目(KJ95T-03)

作者简介: 魏志勇(1964-), 男(汉族), 甘肃白银人, 副研究员, 从事重离子核反应研究.

角的方法^[4]确定线性动量转移, 如图 1 所示.

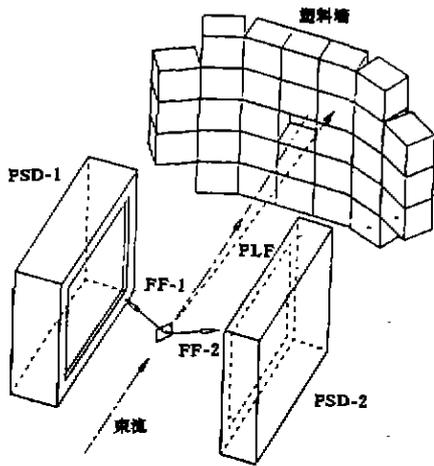


图 1 测量折叠角分布的实验布局

塑料墙的 30 个单元分别由 1 mm 的快塑料(Ne102)和 50 mm 的慢塑料(Ne115)组成; FF 代表裂变碎片、PLF 代表类弹碎片; PSD 为位置灵敏雪崩探测器.

在中能重离子碰撞过程中, 存在跟随裂变和熔合裂变反应过程, 对周边碰撞, 跟随裂变过程中发射的两裂变碎片的夹角(即折叠角)接近 180°, 随碰撞参数的减小, 在碰撞过程中转移的动量增大, 体系发生裂变后折叠角逐渐减小, 如图 2(a)所示.

约化线性动量转移和碰撞参数 b 的关系为

$$lmt = \left(1 - \frac{b}{b_1}\right)^2 \exp\left[0.125\left(\frac{E}{37A}\right)^2\right] \quad (2)$$

其中 b_1 为体系的最大碰撞参数^[5]. 约化线性动量转移 lmt 和折叠角之间有一个关系: $lmt = V_1 V_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) / V_{cm} (V_2 \sin\theta_2 + V_1 \sin\theta_1)$, 其中 V_1 和 V_2 分别为以 θ_1 和 θ_2 角发射的裂变碎片速度. 由约化线性动量转移可以得到碰撞参数, V_{cm} 为非完全熔合体系的质心速度. 通过测量折叠角可以得到约化线性动量转移. 由图 2(b)可以看到线性动量转移和塑料墙所测的总电荷存在关联, 总电荷 Z_{det} 大, 则碰撞参数也大. 图 2(b)中的 M 为带电粒子多重性. 这个总电荷 Z_{det} 实际上和 Z_{bound} 是相关联的, 因而和碰撞参数有对应关系. 后来的研究工作表明, 在分析确定高能核碰撞参数时, 所定义的 Z_{bound} 比定义总电荷 Z_{det} 更适合确定碰撞参数. 除了测量折叠角外, 根据大质量转移模型还可通过测量余核来

确定碰撞参数. 高能核反应过程中线性动量转移很难测量, 因此利用线性动量转移确定碰撞参数的方法只适合于费米能区的束流能量. 随束流能量增加可靠性降低. 和 4π 探测系统相比, 这种方法对实验设施的要求相对来说简单一些.

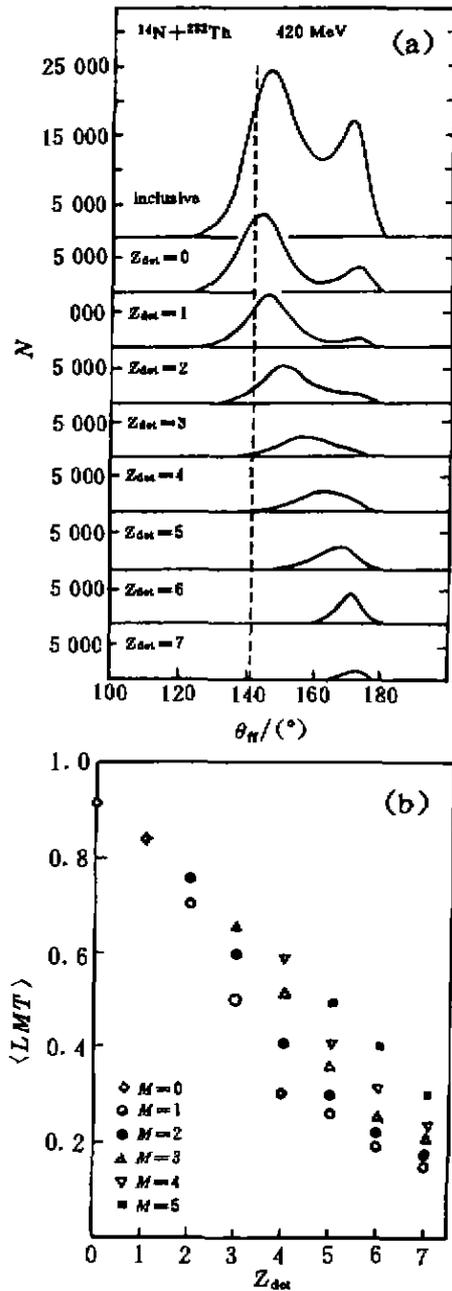


图 2 (a) 裂变碎片的折叠角(θ_{fr})分布; (b) 平均线性动量转移和塑料墙所测总电荷之间的关系

在质心系中前半球所测离子的横向动能和纵向动能的比值可以作为碰撞参数的一个选择^[6-8]. 横向动能和纵向动能的比定义为

$$E_{rat} = \left[\frac{\sum_i^{M_c} E_{t,i}}{\sum_i E_{p,i}} \right]_{y_i \geq 0} \quad (3)$$

其中, y_i 为所测离子的快度, $E_{t,i}$ 为第 i 个碎片的横向动能, $E_{p,i}$ 为第 i 个碎片的纵向动能, 公式中 M_c 为核反应中的多重性. 在中心碰撞中, 剧烈的碰撞致使部分核物质挤出, 横向动能的贡献增大. 碰撞参数越小, E_{rat} 越大. 根据 BUU 模型对 150 MeV/u Au+Au 反应体系的计算, E_{rat} 这个值越大, 对应的碰撞参数越小, 并且这种对应关系和核态方程无关, 如图 3 所示. 图中 3 种态方程(EOS)对应的不可压缩系数分别为 $K_{soft} = 210$ MeV, $K_{hard} = 380$ MeV 和 $K_{medium} = 235$ MeV.

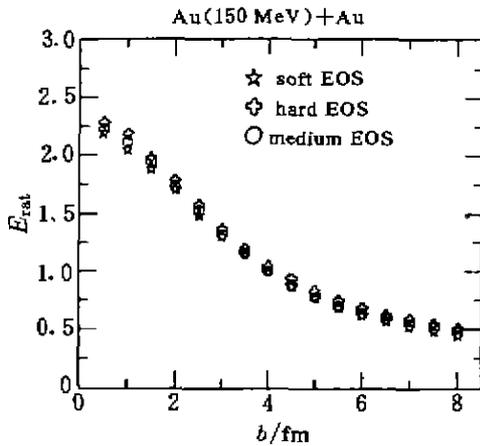


图 3 横向动能和纵向动能的比与碰撞参数的关系

这种方法对确定碰撞参数有很好的准确性, 要求多单元离子探测设备. 实际中使用接近 4π 的探测系统.

轻带电离子 ($Z=1$ 和 $Z=2$) 的横向动能 E_{t12} 和碰撞参数有单调的函数关系^[9]:

$$\frac{b}{b_{max}} = \frac{\int_{E_{t12}}^{\infty} dE_{t12} P(E_{t12})}{\int_n^{\infty} dE_{t12} P(E_{t12})} \quad (4)$$

上式中 $P(E_{t12})$ 为分布函数. 如图 4 所示, 散点为动力学和统计模型结合 (CHIMERA + GEMINI) 模拟计算的结果, 实线为其平均值, 虚线与点组合为几何模型的结果. 虚线为 INDRA 实验数据经 (4) 式处理后的结果. 这种确定碰撞参数的方法其物理基础

是参加者几何模型. 两核相碰时, 重叠区域有很大的激发而发射出较多的轻带电离子, 按横向动能来区分轻带电离子, 可以避免大量旁观者区域直接发射的贡献. 因此, 可以根据发射的轻带电离子推断重叠区域的大小, 重叠区域的大小和碰撞参数直接相关. 这种利用轻带电离子横向动能分布来确定碰撞参数的方法可靠性很好, 尤其是对周边及近周边碰撞参数的确定.

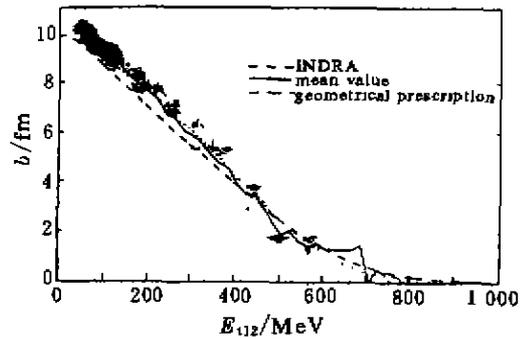


图 4 碰撞参数 $b(\text{fm})$ 和 E_{t12} 的关系

在火球模型中, 不同的碰撞参数导致了不同的参加者火球体积, Z_{bound} 的大小反映了旁观者的大小. Z_{bound} 定义为前角发射的 (或类弹发射产物) 所有 $Z \geq 2$ 的碎片之和. 如果核碰撞中, 有较多的激发能产生, 则会发射出大量的核子, 从而使 Z_{bound} 减小. 当激发能比较小时, 会有比较多的大质量的碎片发射出来, 这种事件的 Z_{bound} 比较大, 碰撞参数和激发能存在对应关系. Z_{bound} 越小, 对应的碰撞参数也越小^[10]. 因此可以通过 Z_{bound} 来确定碰撞参数. 经 BUU-Copenhagen 混合模型计算 Z_{bound} 和碰撞参数的对应关系见图 5 (带状部分), 虚线为由碰撞中形成的热核体系的大小随碰撞中碰撞参数的变化估计的结果.

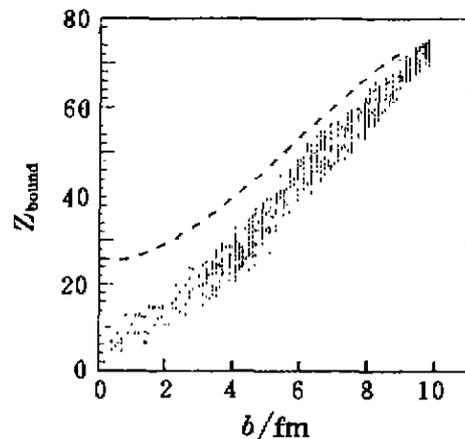


图 5 碰撞参数 $b(\text{fm})$ 和 Z_{bound} 的关系

基于同样的思想，可以利用另外一个观测量 Z_{\max} 来确定碰撞参数。 Z_{\max} 定义为在一次核反应事件中碎片的最大电荷，它和 Z_{bound} 有很强的关联。虽然这种利用 Z_{bound} 来确定碰撞参数的方法是基于火球模型的，这是描述高能核反应过程的模型，这种方法仍然可以用于中低能核反应过程中。利用 Z_{bound} 来确定碰撞参数的方法具有很好的可靠性。

核反应过程中发射离子的方位角分布可按下式来分析，

$$E \frac{d^3N}{d^3p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2N}{p_t dp_t dy} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2V_n \cos[n(\Phi - \varphi_t)] \right\}, \quad (5)$$

Φ 为发射粒子的方位角， φ_t 为反应平面所在的方位角。经 Fourier 分析后^[11]，第一个系数 V_1 对应于方向流，第二个系数 V_2 对应于椭圆流。椭圆流对体系最大压缩下的演化比较敏感^[12]。通过分析流的大小可以确定碰撞参数。如 A. M. Poskanzer 等人对 158 GeV/u Pb+Pb 核反应过程中 π 介子数据进行了研究分析，根据 π 介子椭圆流可以确定碰撞参数，如图 6 所示。图中碰撞参数由积分带电离子多重性而来，椭圆流 (F) 由实验测量结果的分析而来，可以看到椭圆流和碰撞参数之间有线性关系。另外也可以看到考虑相对论效应的分子动力学方法 (RQMD) 的计算和实验数据分析结果之间有一定的偏差。

除此之外，横向动量的方向性^[13] 也是一个用来确定碰撞参数的可观测量，它定义如下：

$$D = \left(\frac{\sum_i^{M_c} |p_{t,i}|}{\sum_i^{M_c} |p_{t,i}|} \right)_{y_i > y_{cm}}, \quad (6)$$

分子为横向动量的矢量求和，分母为横向动量的标量求和。和前面相同， y 为快度。 D 值越小，则碰撞参数越小。在中心碰撞中，在一次事件中，前半角区各种出射离子的方位角分布各向同性。在 C. Kuhn 等人的工作中选 $D \leq 0.2$ ，视为中心碰撞。

带电离子多重性可作为碰撞参数的一个标度，带电离子多重性越大，碰撞参数越小^[14-15]。利用下式可从带电离子多重性的几率分布得到碰撞参数。

$$B = \frac{b}{b_{\max}} = \left[\int_{N_c, b_0}^{\infty} dN_c P(N_c) \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$P(N_c)$ 为带电离子多重性的几率分布， b_{\max} 为最大碰撞参数，一般可以取 $N_c=3$ 时的平均碰撞参数作为 b_{\max} 。由于大碰撞参数对应的多重性比较低，统计差，因此，这种方法对于确定中心碰撞比较可靠，但对周边碰撞过程定出的碰撞参数可靠性降低。

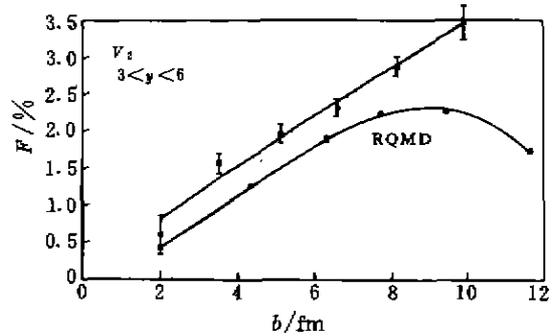


图 6 碰撞参数与 π 介子椭圆流的关系

核反应过程中发射各种离子的产额比不仅可以用于提取核反应参量比如温度^[16]、熵、碎裂密度^[17]等，还可用于确定碰撞参数。在中心碰撞反应过程中， Y_p/Y_d 比较小，而随碰撞参数增大， Y_p/Y_d 逐渐增大。周边碰撞反应过程中 Y_p/Y_d 比最大。质子和 ^3He 的产额比 $Y_p/Y_{^3\text{He}}$ 也有相似的特性。考虑氘的产额 Y_d 及 α 粒子的产额 Y_α ，则核反应过程中发射带电离子相对产额比 Y_p/Y_d ， Y_p/Y_t ， $Y_p/Y_{^3\text{He}}$ ， Y_p/Y_α 的大小和碰撞参量有关，碰撞参数越大，这几个相对产额比也越大。如果对于 1 GeV/u 的 Au+Au 反应我们仅仅挑选中心碰撞，可以取相对产额比 Y_p/Y_d ， Y_p/Y_t ， $Y_p/Y_{^3\text{He}}$ ， Y_p/Y_α 分别在 2.3，3.7，7.3，13.4 以下的事件为中心碰撞^[18]。

在实际中对核反应事件进行分析研究时，并不要求对碰撞参数定得很准，而是将碰撞参数分为几个区间，将碰撞参数在某个区间的事件归为一类来分析。大多数情况下，仅仅将中心碰撞的事件区分出来，利用核反应过程中的可观测量来确定碰撞参数的方法，除了以上介绍的几种外，还有很多，这些方法大多数都需要 4π 探测设备来实现。我们研制的 4π 探测系统 MUDAL 已投入使用，它将在下一步的研究工作发挥重要作用。

参 考 文 献:

- [1] Pochodzalla J, Gelbke C K, Lynch W G, *et al.* Two-particle Correlations at Small Relative Momenta for ^{40}Ar -induced Reactions on ^{197}Au at $E/A=60$ MeV [J]. *Phys Rev*, 1987, C35, 1 695-1 719.
- [2] 靳根明. 高激发核物质液-气相变与核温度[J]. *原子物理评论*, 1998, 15(4): 227-236.
- [3] Wei Zhiyong, Zhu Yongtai. Influence of IMF Internal Excitation on the Extraction of the Isotope Nuclear Temperature [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese)*, 1997, 21(3), 57-62.
- [4] Hinnefeld J D, Koldenhof E E, Leegte H K W, *et al.* Production of Fast Light Particles in Fusion-like Reaction [C]. Shen W Q, Luo Y X, ed. *International Symposium on Heavy Ion Physics and Its Application*, World Scientific, Singapore, 1991, 45-56.
- [5] 戴光曦. 实验原子核物理学 [M]. 北京: 原子能出版社, 1995, 111-127, 贺智勇. 中能区 $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}/^{159}\text{Tb}/^{108}\text{Ag}$ 反应中高激发热核性质研究 [D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1997.
- [6] Heide B, Barz H W. Collective Effects and Multifragmentation in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies within a Hybrid Model [J]. *Nucl Phys*, 1995, A588: 918-940.
- [7] Dželalića M, Basrak Z, Cindro, *et al.* Entropy in Central Au+Au Reactions between 150 and 400 A MeV [M]. GSI Report, 1993, 32.
- [8] Dželalića M, Cindro N, Basrak Z, *et al.* Entropy in Central Au+Au Reaction between 100 and 400 A MeV [J]. *Phys Rev*, 1995, C52: 346-355.
- [9] Plagnol E, Lukasik J, Auger G, *et al.* Onset of Midvelocity Emissions in Symmetric Heavy Ion Reaction [J]. *Phys Rev*, 1999, C61: 014606-1-014606-13.
- [10] Ogilvie C A, Adloff J C, Begemann-Blaich M, *et al.* Multifragment Events as a Probe of Nuclear Disassembly [J]. *Nucl Phys*, 1993, A553: 271c-282c.
- [11] Poskanzer A M, Voloshin S A. Methods for Analyzing Anisotropic Flow in Relativistic Nuclear Collisions [J]. *Phys Rev*, 1998, C58, 1 671-1 678.
- [12] Poskanzer A M, Voloshin S A. Collaboration Centrality Dependence of Directed and Elliptic Flow at SPS [J]. *Nucl Phys*, 1999, A661: 341c-344c.
- [13] Kuhn C, Konopka J, Coffin J P, *et al.* Entropy Production in the Au+Au Reaction between 150 A and 800 A MeV [J]. *Phys Rev*, 1993, C48: 1 232-1 245.
- [14] Prendergast E P, Van Den Brink A, De Haas A P, *et al.* Flow and Multifragmentation of $^{24}\text{Mg}+^{27}\text{Al}$ at Intermediate Energies [J]. *Phys Rev*, 2000, C61: 024611-1-024611-9.
- [15] Bowman D R, Colonna N, Friedman W A, *et al.* Space-time Characteristics of Fragment Emission in the $E/A=30$ MeV $^{136}\text{Xe}+^{64}\text{Cu}$ Reaction [J]. *Phys Rev*, 1995, C52: 818-830.
- [16] Wei Zhiyong, Zhu Yongtai. On Isotope Thermometers [J]. *Chinese Physics Letters*, 1997, 14: 169-173.
- [17] 魏志勇, 段利敏, 李祖玉, 等. 35 MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$ 反应中热核的碎裂密度 [J]. *高能物理与核物理*, 2001, 待发表.
- [18] Speer J, Kohlmeyer B, Pöppel H, *et al.* Entropy from Ratios of Light Particles in Central Collisions of 1 GeV/u Au+Au [M]. GSI Report, 1993, 33-33.

Determination of Impact Parameters in Intermediate Energy Heavy Ion Reactions*

WEI Zhi-yong, JIN Gen-ming, ZHU Yong-tai, WU He-yu

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

Abstract: Observables that related to the impact parameters in intermediate and relativistic energy heavy ion reactions were introduced. These observables that related to the impact parameter include linear momentum transfer, multiplicities of charged particles, the ratio of transverse kinetic energy and longitudinal kinetic energy E_{tr} , the transverse momentum directivity, Z_{bound} , elliptic flow etc. Impact parameter determination for intermediate and relativistic energy heavy ion reactions was presented. The reliabilities of the methods of parameter determination were discussed.

Key words: impact parameter; statistical emission; dynamical emission

* **Foundation Item:** Supported by the Foundation of the Chinese Academy of Sciences for Back Abroad, One Hundred Talents Project of the Chinese Academy of Sciences, Major Subject of the Chinese Academy of Sciences(KJ95T-03)