

46.7 MeV/u $^{12}\text{C} + ^{58}\text{Ni}$ 反应中的 轻带电粒子关联测量*

郝鸿飞 詹文龙 诸永泰 郭忠言 胡晓庆 刘冠华

周建群 尹淑芝 赵有雄 魏志勇 范恩杰

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

本文报道了在 $^{12}\text{C}(46.7 \text{ MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 实验中利用 9 单元 CsI(Tl) 阵列探测器测量轻带电粒子关联函数的实验结果, 详细讨论了关联函数的定义及从实验上提取关联函数的方法。本文还讨论了非稳态粒子衰变在关联粒子测量中的表现, 并给出了对于 ^{58}Ni 靶得到的各种粒子组合的关联函数。

一、引 言

研究中能区的核-核碰撞反应过程中的时空演化与高激发的热核体系是目前中能区重离子物理的一个重要方向。中能区核反应的动力学由于同时受到平均场与核-核碰撞的影响, 因此是一个过渡能区, 目前在这一能区尚无一个非常理想的动力学描述。由于反应过程是一个非平衡的发展过程, 因此了解反应区域的时空发展对于了解有限体系由非平衡向平衡演化, 及有关核的压缩等信息有重要意义。量子统计的概念最早被用于复合核理论并取得了一定的成功, 中能区在假定局部平衡的前提下, 量子统计中的有关概念(如温度、熵等)仍是描述中能核反应过程的重要参量^[1]。但由于整个体系是一个有限粒子数的体系, 因此不符合热力学极限条件的要求, 同时由于反应的时间过程比较短, 因此激发体系也许尚未达到平衡, 又由于其它原因, 如守恒定律、Pauli 阻塞、涨落、长程库仑力以及系综平均的影响等^[2,3], 使统计概念在中能重离子核反应中的适用性受到一定的限制。因此进行系统地实验来检验统计物理中有关基本概念在中能重离子核反应中的适用性, 研究反应区域的时空演化是有重要意义的。S. E. Koonin 将天体物理中的 Hanbury-Brown 及 Twiss 效应应用于核物理^[4], 指出了轻带电粒子小相对动量的关联测量中, 得到的关联函数由于反映了两个符合轻带电粒子之间的末态相互作用, 因此可以用来研究反应过程的时空演化。同时由于这种方法可以测量非稳态粒子的衰变产物, 因此在假定非稳态的复杂粒子来源于统计平衡的条件下, 通过测量非稳态粒子的相对布居, 可以得到

本文 1991 年 10 月 31 日收到。

* 国家自然科学基金资助。

有关核温度的信息^[9]。虽然轻带电粒子的关联测量受到系综平均、反应动力学、动量守恒、库仑力以及高阶衰变的影响,但如果在同一实验中测量多种轻带电粒子的组合的关联函数,我们期望能够对认识反应动力学,研究各种效应对关联函数的影响及反应体系的时空演化会有很大的帮助。目前以美国 MSU 为首的实验室开展了这一方面的研究工作,但目前还有很多问题不清楚^[9]。为此我们在 ^{12}C (46.7 MeV/u) 诱发核反应中,进行了轻带电粒子小相对动量的关联测量。本文将讨论如何从实验中提取关联函数,及在 $^{12}\text{C}(46.7 \text{ MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 实验中得到的有关关联函数。

二、实验概况

实验是 1991 年 5 月在兰州 HIRFL 加速器的大面积位置灵敏电离室终端上完成的。实验中用单核子能为 46.7 MeV/u 的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 束流轰击了 ^{197}Au 靶(厚度分别是 2.73 mg/cm^2 、 4.53 mg/cm^2)、 ^{115}In 靶(厚度为 4.81 mg/cm^2) ^{58}Ni 靶(厚度分别为 1.045 mg/cm^2 、 2.092 mg/cm^2)。实验中束流强度为 5—10 nA。在前角区用一个由三片穿透式半导体和 CsI(Tl) 光二极管组成的望远镜体系测量了类弹碎片。3 片半导体探测器的厚度分别是 $131 \mu\text{m}$ 、 $1584 \mu\text{m}$ 、 $5000 \mu\text{m}$, 剩余能量探测器由 CsI(Tl) + 光二极管读出探测器构成。中角区由 9 单元 CsI(Tl) 闪烁体阵列测量轻带电粒子。该探测器距靶心 35cm, 其中每一单元由一块 $1.2 \times 1.2 \times 1.5 \text{ cm}^3$ 的 CsI(Tl) 闪烁体加 ST1790-2 光二极管构成, 每个探测器相对靶子的立体角为 0.816 msr , 相邻两个探测器的夹角为 2.5° , 探测器单元之间相对于靶子的最大夹角为 7° 。在实验中采用过零时间法来鉴别 p、d、t、 ^3He 、 ^4He 等轻带电粒子, 在图 1 中给出了利用这种方法鉴别粒子的实验结果。该探测器被置于束流方向成 20° 角的地方主要用来测量轻带电粒子关联。在束流另一侧, 气体电离室被用来在中后角区测量复杂粒子。实验中共计有 69 个参数, 采用近代物理研究所 GOOSY 获取系统进行数据获取, 将数据以事件方式逐个记录在磁带上。

本文主要讨论 9 单元 CsI(Tl) 阵列测到的 $^{12}\text{C} + ^{58}\text{Ni}$ 关联函数的结果, 在离线分析中该探测器的能量阈为 8 MeV。

三、一般原理

小相对动量轻带电粒子关联测量的基本目的是为了得到关联函数, 研究两个符合粒

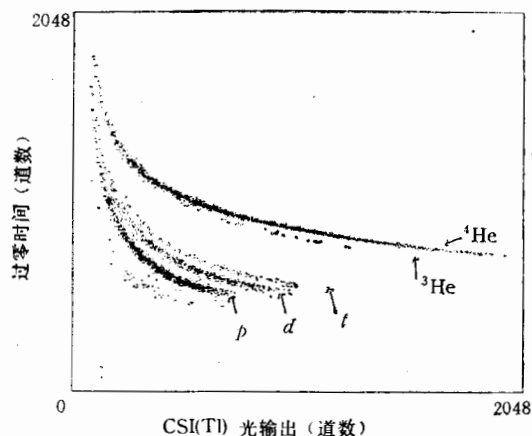


图 1 CsI(Tl) 光输出与过零时间构成的散布图

子之间的相关性。对于给定的粒子组合,如质子质子关联,关联函数的定义如下:

$$\sum_{p_1, p_2}^q Y_{12}(p_1, p_2) = C_{12}[1 + R(q)] \sum_{p_1, p_2}^q Y_1(p_1)Y_2(p_2). \quad (1)$$

其中 $\sum Y_{12}(p_1, p_2)$ 表示在给定探测器构型的条件下,对于给定粒子对,测量的相对动量为 q 的符合事件的产额, $\sum Y_1(p_1)Y_2(p_2)$ 则表示给定探测器构型条件下单举测量得到的结果中,能够构成相对动量为 q 的两个粒子单举产额乘积之和。可以证明(1)式中给出的关联函数与通过概率论给出的关联函数的定义是一致的。在(1)式中 C_{12} 为一个常数,当 q 很大时,由于两个事件是独立的,因此有 $R(q) = 0$ 。 q 表示两个关联粒子之间的相对动量,其非相对论的定义为:

$$q = \mu |(p_1/m_1 - p_2/m_2)|. \quad (2)$$

其中 m_1, m_2 为两个关联粒子的质量, μ 为两个粒子的约化质量。所以关联函数 $R(q) + 1$ 可以通过符合产额 $Yc(q)$ 与单举归一化函数 $Y_{\text{norm}}(q)$ 来得到:

$$R(q) + 1 = \frac{Yc(q)}{Y_{\text{norm}}(q)}, \quad (3)$$

$Yc(q) = \sum Y_{12}(p_1, p_2)$ 为实验上测到的某二种粒子的符合动量谱,而

$$Y_{\text{norm}}(q) = \sum Y_1(p_1)Y_2(p_2)$$

则表示归一化函数,它可以从阵列探测器测到的轻带电粒子的单举结果中得到。

二粒子关联测量是由 Hanbery-brown 及 Twiss 效应演化而来的通过测量带电粒子之间末态相互作用对关联函数的影响来研究反应时空发展的方法。但也可以简单地用热力学模型来加以解释^[6]。假定两个粒子之间存在相互作用而与体系的其它部分没有相互作用,则二粒子的态密度可以表示为:

$$\rho(p, q) = \rho_0(p)\rho(q). \quad (4)$$

其中 $\rho_0(p) = Vp^2/2\pi^2$ 表示二粒子质心运动的态密度, p 表示二粒子的总动量, V 表示系统体积,而二粒子相对运动的态密度则可以表示为:

$$\rho(q) = \rho_0(q) + \Delta\rho(q), \quad (5)$$

$$\rho_0(q) = (2s_1 + 1)(2s_2 + 2) \frac{Vq^2}{2\pi^2}, \quad (6)$$

其中 s_1, s_2 表示粒子的自旋。

对于非全同粒子 $\Delta\rho(q)$ 可以表示为:

$$\Delta\rho(q) = \frac{1}{\pi} \sum_{J, \alpha} (2J + 1) \frac{\partial \delta_{J, \alpha}}{\partial q}, \quad (7)$$

因此我们可以得出:

$$\rho(p, q) \approx \rho_0(p)\rho_0(q)[1 + R(q)] = \rho_0(p_1)\rho_0(p_2)[1 + R(q)], \quad (8)$$

由此可以得出关联函数的表达式:

$$R(q) = \frac{2\pi}{(2s_1 + 1)(2s_2 + 1)Vq^2} \sum_{J, \alpha} (2J + 1) \frac{\partial \delta_{J, \alpha}}{\partial q}. \quad (9)$$

由此可见,关联函数 $R(q)$ 与反应体系的体积有关。对于给定 q 值和关联粒子种类的条件,反应体系的体积 V 越小 $|R(q)|$ 就越大。

四、实验中提取关联函数的方法

在实验中,我们使用 9 单元 CsI(Tl) 阵列探测器测量了轻带电粒子。在离线分析中,首先根据 Bitpattern 识别器来判别符合事件。对于每块 CsI(Tl) 探测器我们采用了过零时间法进行粒子鉴别,我们感兴趣的有 5 种轻带电粒子即 p, d, t, ^3He , ^4He 。对于符合事件,我们可以得到 15 种不同的符合事件,即 p-p, p-d, p-t, p- ^3He , p- ^4He , d-d, d-t, d- ^3He , d- ^4He , t-t, t- ^3He , t- ^4He , ^3He - ^3He , ^3He - ^4He , ^4He - ^4He 。在离线分析过程中首先对每个符合事件重新构成一个伪事件,这个伪事件包括有第一个点火的探测器号数,相应的能量和粒子种类,第二个点火的探测器的号数,相应的能量、粒子种类以及相应的相对动量等信息,通过对这一伪事件的进一步分析就可以得出 15 种符合事件的累积动量谱 $Y_c(q)$ 。

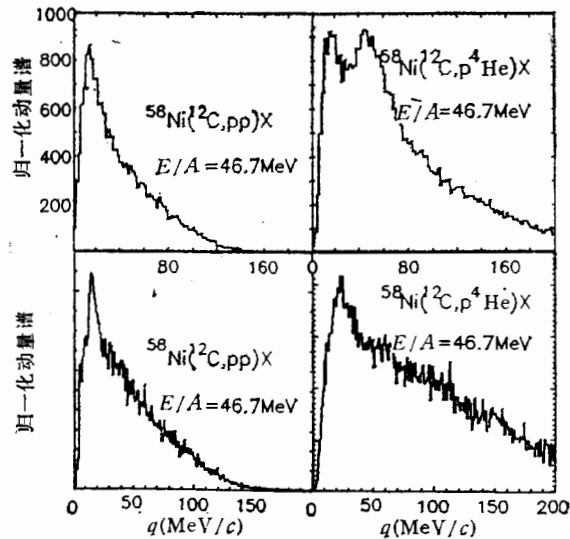


图 2 关联动量谱与归一化函数

其次为了得到关联函数 $R(q) + 1$, 我们还要得到归一化函数 $Y_{\text{norm}}(q)$ 。根据归一化函数的定义 $Y_{\text{norm}}(q) = \sum Y_1(p_1)Y_2(p_2)$, 由于 9 块 CsI(Tl) 探测器对于 p, d, t, ^3He , ^4He , 都有自己测量的单举能谱, 所以对于某种关联如 p-d 关联, 可以根据 M. C 方法来决定归一化函数。其方法是首先通过随机抽样来决定 9 块探测器中是那两块探测器点火, 这样就定出了该事件两个粒子的夹角, 然后定出哪块探测器中测到的是 p, 哪块是 d, 从其相应的能谱中抽样决定出 p 与 d 的能量并计算出相对动量 q 来。通过这种方法就可以得到归一化函数 $Y_{\text{norm}}(q)$ 。

在图 2 中给出了 $^{12}\text{C}(46.7 \text{ MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 实验中探测器中心位于 $\theta = 20^\circ$ 时测到的质子-质子关联及质子- α 关联的相对动量谱 $Y_c(q)$ 与用蒙特卡罗方法得到的归一化函数 $Y_{\text{norm}}(q)$ 。显然有了 $Y_c(q)$ 与 $Y_{\text{norm}}(q)$ 我们就可以得到关联函数 $R(q) + 1$ 。

五、实验测到的关联函数

在前面我们已经详细地讨论了关联函数的定义及从实验中得到关联函数的方法, 并以 p-p 关联及 p- ^4He 关联为例给出了符合动量谱 $Y_c(q)$ 及归一化函数 $Y_{\text{norm}}(q)$, 下面我们将集中介绍 $^{12}\text{C}(46.7 \text{ MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 实验中在中心角为 $\theta = 20^\circ$ 测到的关联函数。

图 3(a) 给出了质子与质子的关联函数。在 $q = 20\text{MeV}/c$ 处 p-p 关联函数有一个突起,这是因为被探测到的两个质子由于相对动能很低,并且相互之间存在库仑与核相互作用,所以两个质子的相对运动波函数的 S 波起主要作用, S 波中核力的吸引使质子-质子关联函数在 $q = 20\text{MeV}/c$ 处有一个突起。比较关联函数谱 $R(q) + 1$ 与符合动量谱 $Y_c(q)$ 及归一化函数 $Y_{\text{norm}}(q)$, 我们发现对于 $Y_c(q)$ 及 $Y_{\text{norm}}(q)$ 很难看出关联的一对质子之间有任何关系,但从关联函数 $R(q) + 1$ 谱上就可以清楚地看出两个符合质子对独立事件的偏离。这一点反映了关联函数 $R(q) + 1$ 由于压抑了本底(本底关联 $R(q) = 0$), 因此突出了要研究的物理因素。

在图 3(b) 中给出了 p-t 关联的关联函数。我们知道 ${}^4\text{He} \rightarrow \text{p} + \text{t}$ 为允许跃迁,在图中我们可以看到 $J = 0$ ($\Gamma_p/\Gamma = 1.00$) 的 ${}^4\text{He}_{20.1\text{MeV}}$ 这个激发态及 $J = 0$ 的 21.1MeV ($\Gamma_p/\Gamma = \Gamma_n$) 这个激发态。

在图 3(c) 中我们给出了 p- ${}^3\text{He}$ 关联的关联函数,可以看出在 $q \approx (50 \sim 90\text{MeV}/c)$ 处关联函数有一个突起的峰.我们认为这个峰可能对应于 ${}^4\text{Li}$ 的基态的衰变, ${}^4\text{Li} \rightarrow \text{p} + {}^3\text{He}$, 由于 ${}^4\text{Li}$ 的寿命很短所以由测不准关系 $\Delta E \times \Delta t \sim \hbar$, 对应的能级比较宽,在测量中可以看出关联函数中 ${}^4\text{Li}$ 基态的峰比较宽。

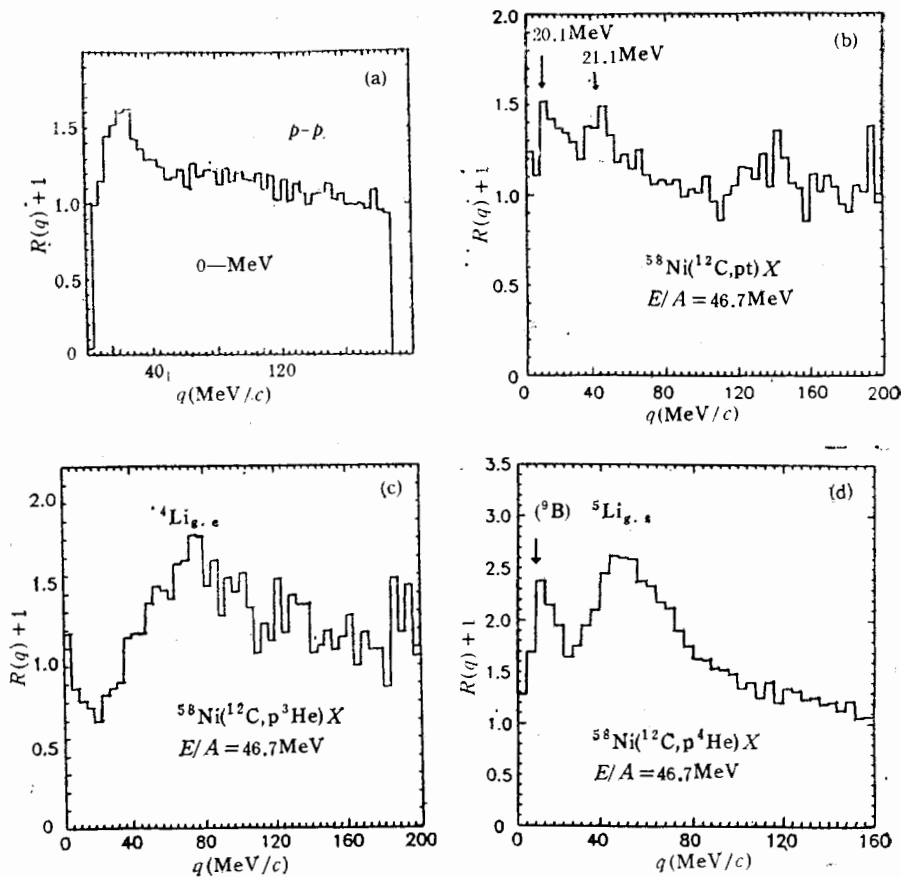


图 3

在图 3(d) 中我们给出了 p- α 的关联函数。在 p- α 关联函数中存在两个峰, 一个在 $q \sim 15 \text{ MeV}/c$ 处比较窄的峰, 它对于 ⁹B 非稳定基态的衰变, ${}^9\text{B} \rightarrow \text{p} + \alpha + \alpha$, 而比较宽的在 $q \sim 50 \text{ MeV}/c$ 处的峰则对应于 ⁵Li 的非稳定基态 ${}^5\text{Li} (J = 3/2, \Gamma = 1.5 \text{ MeV}, \Gamma_p/\Gamma = 1.00)$ 的衰变, ${}^5\text{Li} \rightarrow \text{p} + \alpha$ 。

在图 4(a) 中给出了 d-³He 关联的关联函数。图中 $q \sim 20 \text{ MeV}/c$ 处的峰对应于 ${}^5\text{Li}_{16.66 \text{ MeV}}$ 激发态的衰变, ${}^5\text{Li} \rightarrow \text{d} + {}^3\text{He}$ 。

在图 4(b) 中我们给出了 d-t 关联的关联函数。从图中可以看出在 $q \sim 12 \text{ MeV}/c$ 处的峰对应于 ${}^5\text{He}_{16.76 \text{ MeV}}$ 的衰变, ${}^5\text{He} \rightarrow \text{d} + \text{t}$ 。

在图 4(c) 中给出了 t- α 关联的关联函数。可以明显地看出来来自于 ${}^7\text{Li} (4.63 \text{ MeV}, \Gamma_a/\Gamma_{\text{tot}} = 1.00)$ 的衰变, ${}^7\text{Li} \rightarrow \text{t} + \alpha$ 。

在图 4(d) 中我们给出了 ³He- α 关联的关联函数。在这张图上可以看出在 $q \sim 125 \text{ MeV}/c$ 处有一个峰, 对应于 ${}^7\text{Be} (J_x = 7/2^-) 4.57 \text{ MeV}$ 这个激发态, 而关联函数 $R(q)+1$ 在 $q < 40 \text{ MeV}/c$ 处的上升可能是由于在 ³He-⁴He 关联中混有 ⁴He-⁴He 关联事件造成的, 即关联函数在低 q 处的上升是由于混有 ${}^8\text{Be}_{g.s.}$ 衰变的贡献。

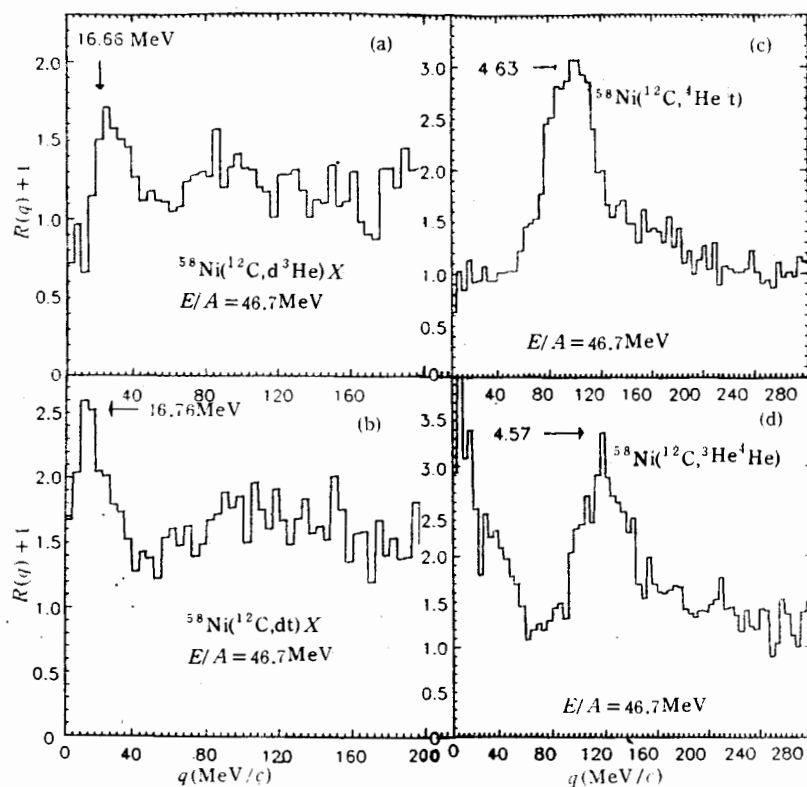


图 4

在图 5(a) 中我们给出了 α - α 关联的关联函数。图中 $q \sim 10 \text{ MeV}/c$ 处的高峰显然来自于 ${}^8\text{Be}_{g.s.}$ 的衰变, ${}^8\text{Be}_{g.s.} (J = 0^+, \Gamma_a/\Gamma_{\text{tot}} = 1.00)$, 而 $q \sim 105 \text{ MeV}/c$ 处的峰则对应

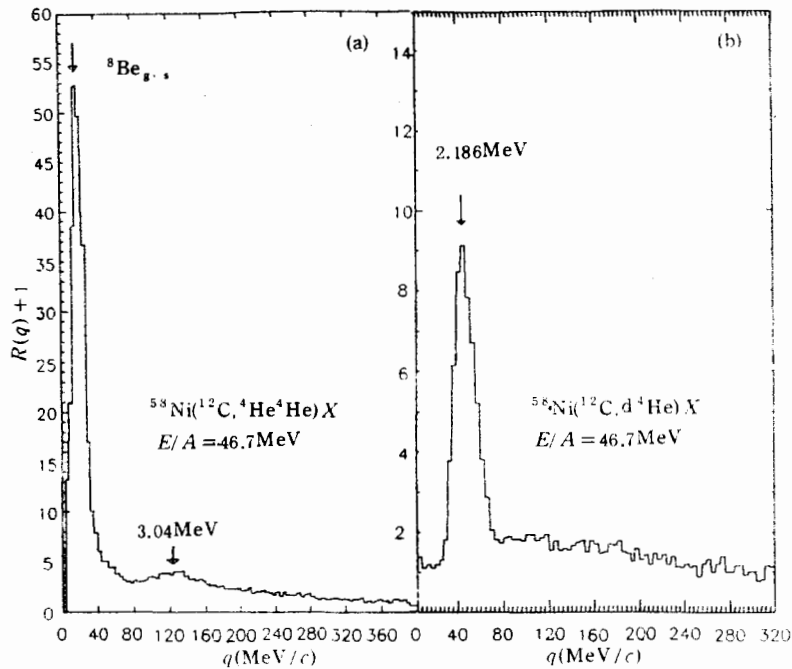
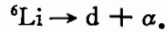


图 5

于 ${}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$ 的激发态的衰变 ($J = 2^+$, $\Gamma = 1.5\text{MeV}$)。

在图 5(b) 中给出了 $d-\alpha$ 关联的关联函数。从图中可以看出在 $q \sim 42\text{MeV}/c$ 处有一个很明显的峰, 对应于 ${}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}(J_\pi^{3+}, \Gamma = 24\text{KeV}, \Gamma_\alpha/\Gamma_{\text{tot}} = 1.00)$ 的衰变,



在图 6 中还给出了 $p-d, d-d, t-t$ 的关联函数, 这些关联粒子对由于不可能来自于某一母体的衰变, 因此在其关联函数上看不出成峰结构。这些关联粒子对的关联函数在低 q 值时呈反关联, 是因为它们产生于一个小的空间范围 (fm 数量级), 因此相互之间的库仑排斥作用对其低 L 分波的影响使在二粒子相对动量比较小时为负值, 因此关联函数 $R(q) + 1$ 在 q 值比较低时呈反关联。

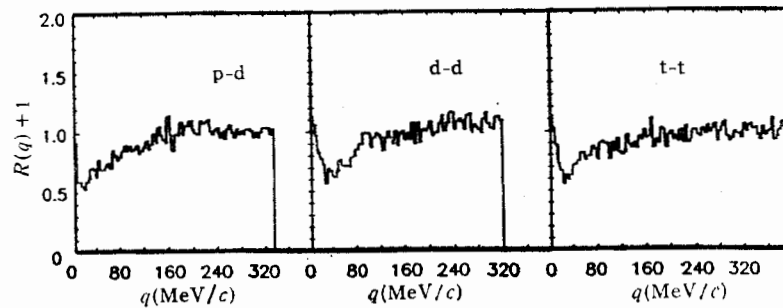


图 6

六、小 结

本文讨论了如何从实验中提取关联函数, 及在 $^{12}\text{C}(46.7\text{MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ 实验中得到的有关关联函数。实验是在兰州 HIRFL 加速器的大面积位置灵敏电离室终端上完成的。由 9 单元 CsI(Tl) 闪烁体阵列测量关联的轻带电粒子: p、d、t、 ^3He 和 ^4He 。从上述各种粒子组合的小相对动量关联函数中可以看出, 通过测量轻带电粒子关联, 可以测到一些非稳定的核 (^8Be , ^5Li , ^3He , ^4Li) 及一些核的低激发态, 而 p-p, p-d, d-d, t-t 关联都不能来源于母体衰变, 其关联函数在低的相对动量时对独立事件的偏离主要是由于关联粒子之间的末态相互作用造成的。通过研究这些关联粒子对的关联函数可以使我们了解和研究反应区域的时空演化。这些实验结果对于进一步研究反应动力学及激发热核的性质有重要的意义。

本工作得到国家自然科学基金资助。作者感谢 HIRFL 的全体人员, 他们提供了品质良好的 ^{12}C 离子束, 感谢数据获取室、NIM 库和公共实验室工作人员的辛勤劳动。

参 考 文 献

- [1] R. A. Loveman, *Phys. Rev.*, **C33**, (1986), 2209.
- [2] H. R. Jaqaman et al., *Phys. Rev.*, **C29**(1984), 2067.
- [3] S. Levit et al., *Nucl. Phys.*, **A437**(1985), 426.
- [4] S. E. Koonin, *Phys. Lett.*, **70B**, (1977), 43.
- [5] J. Pochodzalla et al., *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 1695.
- [6] B. K. Jennings et al., *Phys. Rev.*, **C33**(1986), 1303.

Light Charged Particle Correlation Measurement in Intermediate Energy Heavy Ion Reactions

XI HONGFEI ZHAN WENLONG ZHU YONGTAI GUO ZHONGYAN HU XIAOQING
LIU GUANHUA ZHOU JIANQUN YIN SHUZHONG ZHAO YOUZONG WEI ZHIZONG FAN ENJIE
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou, 730000*)

ABSTRACT

The experiment results from the light charged particle correlation measurement obtained in $^{12}\text{C}(46.7\text{MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$ experiment by using a 9 element CsI(Tl) hodoscope are reported. The definition of the correlation function and its extraction method from the experimental data are discussed in detail. In this paper the decay of the unstable particles is studied the correlation functions of various particle combination on ^{58}Ni target are given.