

# 46.7 MeV/u $^{12}\text{C}$ 诱发核反应中的 双质子干涉研究\*

郝鸿飞 詹文龙 诸永泰 郭忠言 周建群 刘冠华

尹淑芝 赵有雄 范恩杰 魏志勇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

胡晓庆

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1992年10月26日收到

## 摘 要

本文讨论了  $46.7\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{58}\text{Ni}, ^{115}\text{In}, ^{197}\text{Au}$  实验中双质子干涉的研究结果,研究了零寿命 Koonin 模型中核力、库仑力及费米统计对关联函数的影响,并从实验中提取了发射源的半径参数  $r_0$ ,实验发现  $r_0$  随着靶核质量的增加而增加,实验中还研究了发射源的大小与两个关联粒子能量和  $E_1 + E_2$  的关系,得出的  $r_0$  值随着  $E_1 + E_2$  的增加而减少,反映了高能质子主要来源于反应的早期.

**关键词** 关联函数,半径参数,双质子干涉.

## 1 引 言

热核的生成与演化是中能重离子核反应研究的一个重要方向.在热核的研究中,反应区域的时空信息对于了解反应机制有着重要的意义.双质子干涉(也称双质子小相对动量关联测量)是天体物理中 Henbery-Brown 效应在核物理中的应用<sup>[1-3]</sup>.由于从一个发射源发射出来的两个质子在相对动量比较小时它们的运动会受到核力、库仑力及统计性质的影响,这种影响可以通过测量这两个质子的关联函数体现出来.七十年代 S. E. Koonin 提出可以通过测量双质子小相对动量关联的关联函数来研究核反应过程中的时间与空间的信息<sup>[4]</sup>.八十年代人们开始通过  $\pi$  干涉及质子-质子关联来研究高能及中能重离子核反应中的空间大小,到目前粒子-粒子的小相对动量关联测量(也称强度干涉)已经成为重离子物理中的一种研究反应区域时空演化的最主要的手段.在中能区这一方面的研究主要由 MSU 开展了一些工作<sup>[2-4]</sup>,并取得了重要的研究成果.但由于中能区反应机制

\* 国家自然科学基金资助.

的复杂性,使得从实验中得到的关联函数上提取的发射源半径参数  $r_0$  受到反应机制、发射源寿命等多方面因素的影响.为了进一步开展这方面的研究工作,了解反应机制及反应区域的时空演化过程,我们在 46.7 MeV/u  $^{12}\text{C}$  诱发核反应的研究中开展了双质子干涉的研究.着重研究了关联函数对靶核质量及两个质子能量和的依赖关系.本文将讨论如何利用零寿命 Koonin 模型来从实验得到的关联函数中提取发射源的大小.并着重研究了关联函数对靶核质量及两个质子能量和的依赖关系.

## 2 零寿命 Koonin 模型与发射源的半径参数

由于从反应区域中发射出来的两个粒子受到统计性质及相互作用的影响,使得两个独立事件会偏离独立性.这种偏离可以用关联函数  $1+R(p_1, p_2)$  来表示:

$$R(p_1, p_2) = [P(p_1, p_2)/P(p_1)P(p_2)] - 1, \quad (1)$$

其中  $p_1, p_2$  表示两个粒子的动量,  $P(p_1, p_2)$  表示两个粒子的符合几率,而  $P(p_i)$  则表示单举的几率. S. E. Koonin 提出在假定发射源的寿命为零的条件下,关联函数可以表示为<sup>[1]</sup>:

$$R(p_1, p_2) = \int d^3x_1 d^3x_2 \rho(x_1) \rho(x_2) [|\Psi_{12}(x_1, x_2)|^2 - 1], \quad (2)$$

其中  $\rho(x)$  表示粒子发射的空间几率,并满足  $\int d^3x \rho(x) = 1$ ,  $\Psi_{12}(x_1, x_2)$  为两个关联质子相对运动波函数. 可以将  $\rho(x)$  表示为:

$$\rho(x) \propto \exp(-r^2/2r_0^2), \quad (3)$$

其中  $r_0$  表示反应区域的半径参数. 定义相对几率分布函数  $g(x)$  为:

$$g(x) = \int d^3X \rho\left(X + \frac{1}{2}x\right) \rho\left(X - \frac{1}{2}x\right), \quad (4)$$

其中  $X = (x_1 + x_2)/2, x = (x_1 - x_2)/2$ , 并将式中的相对运动波函数用平面波展开 则对于全同玻色子、全同费米子和非全同粒子 (2) 式可以分别表示为:

$$R(q) = 4\pi \int dx x^2 g(x) \left\{ 2 \sum_{l \text{ 偶}} (2l+1) [\Psi_l^2(x) - j_l^2(qx)] + j_0(2qx) \right\} \text{ 玻色子}, \quad (5)$$

$$R(q) = 4\pi \int dx x^2 g(x) \left\{ 2 \sum_{l \text{ 奇}} (2l+1) [\Psi_l^2(x) - j_l^2(qx)] - j_0(2qx) \right\} \text{ 费米子}, \quad (6)$$

$$R(q) = 4\pi \int dx x^2 g(x) \left\{ 2 \sum_l (2l+1) [\Psi_l^2(x) - j_l^2(qx)] \right\} \text{ 非全同粒子}, \quad (7)$$

其中  $j_l(x)$  为球贝塞尔函数,  $q$  为两个关联粒子之间的相对动量. 对于 p-p 关联, 考虑到自旋单态和自旋三重态的贡献关联函数应为:

$$R(q) + 1 = \frac{1}{4} \times (5) + \frac{3}{4} \times (6) + 1. \quad (8)$$

在图 1 中我们给出了  $r_0 = 3.0\text{fm}$  时利用(8)式计算的关联函数.

图中实线表示不考虑相互作用时的计算结果, 可以看出由于费米子的统计性质, 关联函数在  $q$  比较小时呈反关联. 图中虚线为考虑两个关联质子间库仑相互作用时的计算

结果,可见由于库仑力的排斥性质关联函数呈反关联.图中点线为考虑库仑力+费米统计

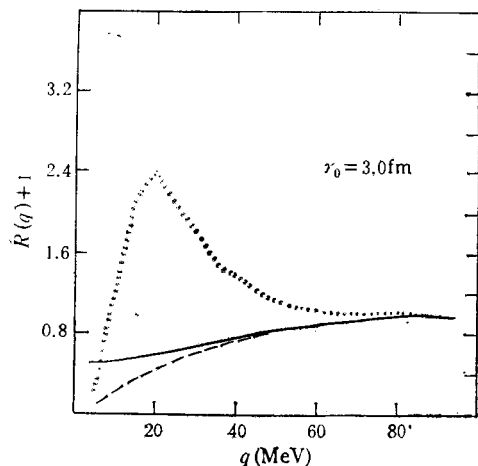


图1  $r_0 = 3.0\text{fm}$  时 Koonin 模型计算得到的 p-p 关联函数

——表示不考虑相互作用时的计算结果, ----为考虑两个关联质子间库仑相互作用时的计算结果, .....为考虑库仑力+费米统计+核势时的计算结果.

其中  $Y(p_1, p_2)$  表示两个关联粒子相对动量为  $q$  的符合产额,而  $Y_i(p_i)$  则表示单举产额.  $\sum Y_i(p_i)Y_j(p_j)$  表示归一化函数,其构成方法如文献[7]中所描述.

在图2中给出了  $^{12}\text{C} + ^{58}\text{Ni}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{197}\text{Au}$  实验中在  $\theta = 20^\circ$  处测到的 p-p 关联函数.

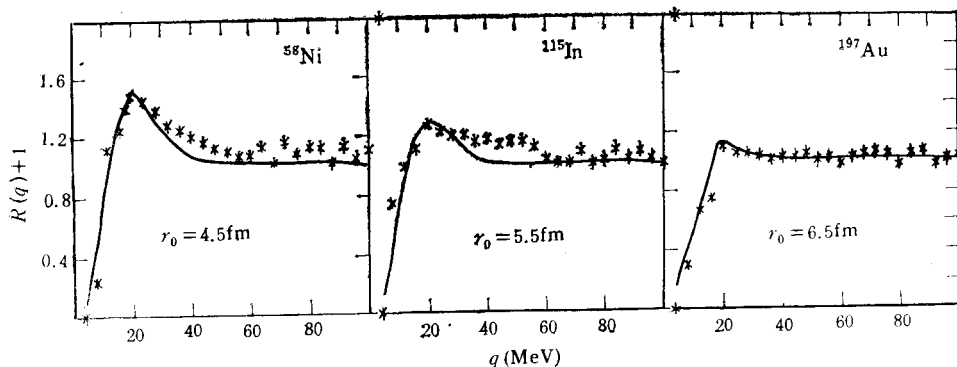


图2  $46.7\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{58}\text{Ni}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{197}\text{Au}$  实验中 p-p 关联函数

——为零寿命 Koonin 模型计算的结果, x 为本实验的结果.

从图中可以看出,由 p-p 关联函数中提取的反应区域的半径参数  $r_0$  随着靶核质量的增加而增加,说明了用这种方法得到的反应区域的半径参数  $r_0$ ,从平均意义上来讲反映了反应区域的大小.

由于反应过程中质子可以来源于不同的反应阶段,因此上面提到的反应半径参数  $r_0$  只是各种反应机制的一个平均值.考虑到不同反应机制产生的质子的能量有一定的差

### 3 实验测到的 p-p 关联函数及反应区域的半径参数的提取

在  $46.7\text{ MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{58}\text{Ni}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{197}\text{Au}$  的实验中,用一个 9 单元的 CsI(Tl) 探测器阵列测量了轻带电粒子[6]. 实验的构型与文献[7]相同. 实验中的关联函数由下式给出:

$$\sum Y(p_1, p_2) = (1 + R(q)) \sum Y_i(p_1) Y_j(p_2)$$

其中  $Y(p_1, p_2)$  表示两个关联粒子相对动量

别,对于  $^{12}\text{C}(46.7\text{MeV/u}) + ^{58}\text{Ni}$  这一反应,我们在实验中研究了 p-p 关联函数与两个

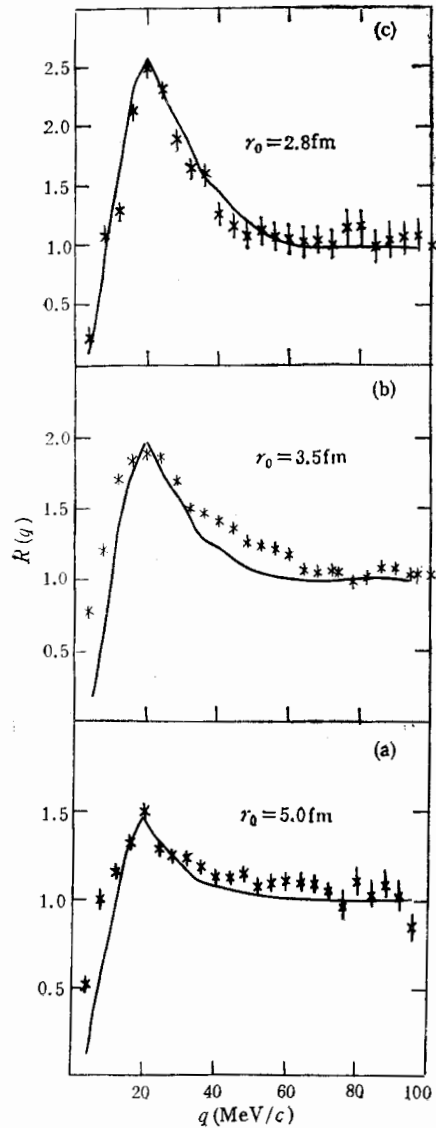


图 3 p-p 关联函数与两个关联质子能量和  $E_1 + E_2$  的关系  
(a), (b), (c) 分别对应  $E_1 + E_2$  为 20—60 MeV, 60—100 MeV, 100—140 MeV. — 为零寿命 Koonin 模型计算的结果, \*\* 为本实验的结果

关联质子能量和  $E_1 + E_2$  的关系. 在图 3 中给出了 p-p 关联函数在  $E_1 + E_2$  分别为 20—60 MeV, 60—100 MeV 及 100—140 MeV 时的关联函数.

从图中可以看出当两个关联质子的能量比较高时相应的发射源的半径参数比较小, 这说明了高能质子主要来源于反应早期的预平衡发射, 相应的发射源比较小. 而低能质子则主要来源于蒸发过程, 对应的发射源半径比较大. 在图 4 中给出了发射源半径  $r_0$  与参量  $[(v_0/v_p)^2 = (E_1 + E_2)/(A_1 + A_2) \times A_p/E_p]$  的关系. 其中  $v_0$  为束流速度,  $v_p$  为质子的平均速度.

可以看出由于系统  $^{12}\text{C} + ^{58}\text{Ni}$  的核半径比较小, 因此得到的半径参数与其它系统

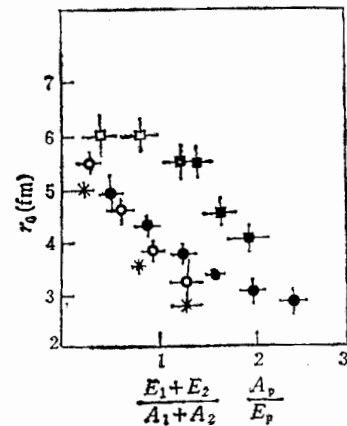


图 4 发射源半径  $r_0$  与参量  $(v_0/v_p)^2$  的关系

\* 为本实验的结果, 符号 O, □, ●, ◆, ■, 分别为  $^{16}\text{O}(94\text{MeV/u}) + ^{197}\text{Au}$ ,  $^{40}\text{Ar}(60\text{MeV/u}) + ^{197}\text{Au}$ ,  $^{14}\text{N}(35\text{MeV/u}) + ^{197}\text{Au}$ ,  $^{16}\text{O}(25\text{MeV/u}) + ^{197}\text{Au}$ ,  $^{32}\text{S}(22\text{MeV/u}) + ^{197}\text{Au}$  给出的结果<sup>[1]</sup>.

相比要小一些. 但基本上符合不同实验到得的系统性.

## 4 结 论

在本文中, 讨论了利用双质子干涉方法研究反应区域大小的实验结果. 通过研究

p-p 关联函数与靶核的关系发现利用零寿命 Koonin 模型从关联函数上提取的反应区域的半径参数  $r_0$  随着靶核质量的增加而增加, 说明从平均意义上来讲, 利用这种方法得到的反应半径参数  $r_0$  基本上反映了反应的空间大小. 但是从实验中可以看出, 反应区域的大小与反应机制有着比较大的关系. 当两个关联质子的能量比较高时, p-p 关联函数在  $q \sim 20 \text{ MeV}/c$  处呈现比较强的关联, 相应的发射空间比较小. 说明了高能质子来之于反应早期的预平衡过程. 而低能质子相应的发射空间则比较大, 这是因为低能质子主要来源于平衡热核的蒸发过程. 由于热核有一定的寿命, 并且有一定的速度, 因此利用零寿命 Koonin 模型得出的反应区域的半径参数应当为热核运动区域的大小, 得到的半径参数要比热核本身的尺寸大一些. 利用 p-p 关联函数来同时研究热核的空间大小与寿命是目前国际上比较关心的问题, 这方面的研究工作正在进行之中.

### 参 考 文 献

- [1] S. E. Koonin, *Phys. Lett.*, **70B** (1977) 43.
- [2] C. B. Chitwood, C. K. Gelbke and J. Pochodzalla et al., *Phys. Lett.*, **B172** (1986) 27.
- [3] Z. Chen, C. K. Gelbke and J. Pochodzalla et al., *Nucl. Phys.*, **A473** (1987) 564.
- [4] Z. Chen, C. K. Gelbke and W. G. Gong et al., *Phys. Lett.*, **B199** (1987) 171.
- [5] Reid, R. V. Jr, *Ann Phys.*, (N. Y.) **50**(1968) 144.
- [6] Xi Hongfei, Zhan Wenlong, Guo Zhongyan and Zhu Yongtai et al., *NIM* **A320** (1992) 504.
- [7] 郝鸿飞、詹文龙、诸永泰、郭忠言等, 高能物理与核物理, **17**(1993)268.
- [8] W. G. Lynch, *Nucl. Phys.*, **A488** (1988) 359c.

## Study of Two-Proton Interferometry in 46.7 MeV/u $^{12}\text{C}$ Induced Reactions

Xi Hongfei Zhan Wenlong Zhu Yongtai Guo Zhongyan Zhou Jianqun  
Liu Guanhua Yin Shuzhi Zhao Youxiong Fan Enjie Wei Zhiyong  
(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Hu Xiaoqing

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

Received on October 26, 1992

### Abstract

In this paper, the results of two-proton interferometry obtained in the experiment of  $46.7 \text{ MeV}/u \text{ }^{12}\text{C} + {}^{58}\text{Ni}$ ,  ${}^{115}\text{In}$ ,  ${}^{197}\text{Au}$  have been discussed. The influence of nuclear force, Coulomb force and Fermi statistics on the correlation function is discussed also. The source radius parameters  $r_0$  obtained from the experiment increase with increasing of the target nuclei mass. In the experiment, the p-p correlation function seems to have a strong dependence on the sum energy of two correlated protons. The  $r_0$  parameter decreases with increasing of the sum energy, indicating that the high energy protons are mainly from the nonequilibrium emission process.

**Key Words** Correlation function, Source radius Parameters Two-proton interferometry.