

《原子核物理评论》



Started in 1984

通过4-α衰变观测¹⁶0中可能的玻色凝聚态

陈家	豪 叶沿	林马	らい 韩家	兴 王东	玺 林承	键 贾会	明 杨磊	李根	阳黎升	胡梓瑶	谭智威	魏
康	蒲伟良	陈莹	楼建玲	杨晓菲	李奇特	杨再宏	骆天鹏	黄大湖	钟善豪	李智焕	许金艳	
Searching for Possible Bose-Einstein Condensate States in ¹⁶ O via Its 4-a Decay												

CHEN Jiahao, YE Yanlin, MA Kai, HAN Jiaxing, WANG Dongxi, LIN Chengjian, JIA Huiming, YANG Lei, LI Gen, YANG Lisheng, HU Ziyao, TAN Zhiwei, WEI Kang, PU Weiliang, CHEN Ying, LOU Jianling, YANG Xiaofei, LI Qite, YANG Zaihong, LUO Tianpeng, HUANG Dahu, ZHONG Shanhao, LI Zhihuan, XU Jinyan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC35

引用格式:

陈家豪, 叶沿林, 马凯, 韩家兴, 王东玺, 林承键, 贾会明, 杨磊, 李根, 阳黎升, 胡梓瑶, 谭智威, 魏康, 蒲伟良, 陈莹, 楼建玲, 杨 晓菲,李奇特,杨再宏,骆天鹏,黄大湖,钟善豪,李智焕,许金艳.通过4-α衰变观测¹⁶0中可能的玻色凝聚态[J].原子核物理 评论, 2024, 41(1):292-298. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC35

CHEN Jiahao, YE Yanlin, MA Kai, HAN Jiaxing, WANG Dongxi, LIN Chengjian, JIA Huiming, YANG Lei, LI Gen, YANG Lisheng, HU Ziyao, TAN Zhiwei, WEI Kang, PU Weiliang, CHEN Ying, LOU Jianling, YANG Xiaofei, LI Qite, YANG Zaihong, LUO Tianpeng, HUANG Dahu, ZHONG Shanhao, LI Zhihuan, XU Jinyan. Searching for Possible Bose–Einstein Condensate States in ¹⁶O via Its 4- α Decay[J]. Nuclear Physics Review, 2024, 41(1):292-298. doi: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC35

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

通过费米能区重离子碰撞产额分布来研究¹⁶0原子核的团簇结构

Probing Clustering Configurations of ¹⁶O by the Yield Distribution in Heavy Ion Collisions at Fermi Energy 原子核物理评论. 2021, 38(1): 8-16 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020057

双幻核¹⁶O附近核素¹⁴C,^{14,15}N,¹⁴⁻¹⁸O能谱结构的壳模型计算分析

Spectral Structure Analysis of Nuclei ¹⁴C, ^{14,15}N, and ^{14–18}O Near Double Magic Nucleus ¹⁶O by Shell Model Calculations 原子核物理评论. 2020, 37(3): 563-568 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC54

基于耦合道Gamow壳模型计算¹⁷O和¹⁷F的能谱以及¹⁶O(p,p)反应的微分散射截面

Calculations of the ¹⁷O and ¹⁷F Spectra and ¹⁶O(p,p) Reaction Cross Sections in the Coupled-channel Gamow Shell Model 原子核物理评论. 2020, 37(3): 586-594 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC68

用于CSRe上¹⁶0⁵⁺离子精密激光谱学实验的极紫外光子探测系统的研制

Development of an Ultraviolet Photon Detection System for Precision Laser Spectroscopy of Li–like ¹⁶O⁵⁺ Ion at the CSRe 原子核物理评论. 2022, 39(2): 224-231 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2021042

利用多普勒移动衰减法研究⁴⁶Ti核的激发态能级寿命

Studies on the Lifetimes of ⁴⁶Ti Excited States via the Doppler Shift Attenuation Method

原子核物理评论. 2023, 40(2): 193-197 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2023021

^{235, 237}Np高自旋态的理论研究

Theoretical Investigation of the High-spin States in ^{235, 237}Np

原子核物理评论. 2022, 39(4): 413-420 https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022047

文章编号: 1007-4627(2024)01-0292-07

通过 $4-\alpha$ 衰变观测 ¹⁶O 中可能的玻色凝聚态

陈家豪¹, 叶沿林^{1,†}, 马凯¹, 韩家兴¹, 王东玺¹, 林承键^{2,3}, 贾会明², 杨磊², 李根¹, 阳黎升¹, 胡梓瑶¹, 谭智威¹, 魏康¹, 蒲伟良¹, 陈莹¹, 楼建玲¹, 杨晓菲¹, 李奇特¹, 杨再宏¹, 骆天鹏²,

黄大湖^{2,3}, 钟善豪^{2,3}, 李智焕¹, 许金艳¹

(1.北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室,北京 100871;2.中国原子能科学研究院核物理研究所,北京 102413;3.广西师范大学物理科学与技术学院,广西 桂林 541004)

摘要: 近期在中国原子能科学研究院北京串列加速器核物理国家实验室开展的¹⁶O+¹²C 非弹散射实验,给出 了¹⁶O中存在4-α玻色凝聚状态的新证据。实验采用多套双面硅微条带电粒子望远镜,首次在¹⁶O衰变中实 现了4个α粒子的准确识别(Particle Identification, PID)和符合测量。在此基础上获得了高分辨的反应*Q*值谱 并重建了清晰的4-α共振态。其中在阈值附近观察到4个高显著度(大部分高于5σ)的共振态,它们按照 ¹²C(Hoyle state)+α的特征模式衰变,与理论预言的类Hoyle-BEC结构及其转动带特征相一致。本观测结果将 推动进一步的理论研究,实验上也需要对上述共振态做更多物理量的观测。

关键词: 集团结构; 类Hoyle态; ¹⁶O的共振态; 高激发 中图分类号: O571.21 文献标志码: A DOI: 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC35

0 引言

原子核中的集团结构是在原子核低密度区普遍出现 的奇特状态,近年来一直是核物理与核天体物理领域的 重点关注的问题之一^[1-6]。按照 Ikeda 图,在原子核破 裂阈值附近一般会出现与其相对应的集团结构态^[7]。 随着激发能的提高,可以出现多α结构直至最高阶的全 α结构。如果所有α粒子均处于最低的*S*波,且体系的 整体空间分布扩展,则原本以费米子(核子)独立运动为 基础的核体系可转化为以玻色子运动为基础的玻色-爱 因斯坦凝聚 (Bose-Einstein Condensation, BEC)状态^[8]。 这种演化对核物质形态和核天体过程有重要影响。

此前的实验和理论研究基本确认,天体演化过程中 影响巨大的¹²C的Hoyle态(7.65 MeV, 0_2^+)是一个由 3α组成的类 BEC态^[9–13]。Hoyle态主要通过 α +⁸Be→3α 进行衰变^[14]。比¹²C更重的体系里,如¹⁶O、²⁰Ne、²⁴Mg 等,尽管已有多种理论预言,但由于实验直接测量多 个 α 且判断它们所处状态确实很困难,这种状态是否存 在迄今依然缺乏可靠的实验证据[15-16]。

对于¹⁶O,理论上指出,其4- α 分离阈(14.437 MeV) 附近可能出现与 Hoyle 态类似的 4- α 凝聚态。当然,不 同的理论模型计算得到的能级位置不尽相同^[9,12,17]。 理论上预言的 4- α 凝聚态与¹²C(0⁺₂)+ α 的构型有较大的 重叠,并且主要通过两步过程¹⁶O→¹²C(0⁺₂)+ α →4 α 衰 变^[18-19]。一般认为阈上的第一个 4- α 凝聚态与单举实 验观测到的 15.1 MeV 的¹⁶O 的激发态相对应^[17,20-22]。 然而至今为止,依然无法对¹⁶O 的 15.1 MeV 态做可靠的 集团衰变测量^[15,19,23-24]。这主要是由于在非常靠近 分离阈的能区, α 粒子很难穿出库仑位垒^[19]。以往实验 观测到的一些迹象,很可能只是本底的统计涨落^[19,23]。

为此,对¹⁶O的4-α衰变的实验测量,需要针对比 15.1 MeV更高的激发态。自1967年以来,已经有一些 实验关注了¹⁶O的多α衰变。这些实验可分为共振散射 实验^[25-27]和破裂反应实验^[15,28-30]。通常共振散射实 验可选用气体厚靶,可通过调整束流能量选择激发能区。 一般使用¹²C和气体⁴He反应,测量末态多α来重建得

收稿日期: 2023-07-11; 修改日期: 2024-01-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFA1606403, 2023YFE0101600, 2022YFA1602302);国家自然科学基金资助项目(12235020, 12027809, 11961141003, U1967201, U2167204);国家财政部稳定支持研究经费(WDJC-2019-13);领创科研项目(LC192209000701, LC202309000201)

作者简介:陈家豪(1995-),男,河南焦作人,博士研究生,从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: jiahaochen@pku.edu.cn

[†]通信作者:叶沿林, E-mail: yeyl@pku.edu.cn

到共振¹⁶O的能谱。但由于其不可避免地会引入非共振 的成份,且反应点较难确定,通常这类反应本底较高, 能量分辨相对较差,不同实验的结果经常不一致。破裂 反应通常为两步过程,即首先通过弹靶反应获得激发的 目标核,然后目标核衰变为4-α。此时可以主要通过衰 变产物推出反应Q值并重建母核的激发能,而Q值和 激发能谱的分辨率依赖于反应末态碎片的识别和测量。 上面提到的几个破裂反应实验均通过探测的粒子数 (hits)^[15, 28-30]及其能量来推出反应Q值和激发能。这 种没有粒子鉴别(particle identification, PID)的方式会引 入较大的本底,也会影响对反应道的判断与筛选。

本文主要介绍为了寻找¹⁶O中的类Hoyle态而在中 国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上开展的非弹激 发和衰变实验及其数据处理主要过程。本次实验尽可能 多的通过有粒子鉴别的多个α来分析反应机制以及重 建¹⁶O共振态^[31]。

1 实验设置

由于本次实验的物理目标是对末态产物进行多重符 合探测,同时为了获得尽可能高的能量、位置分辨,本 次实验采用八套硅微条探测器组成的望远镜系统对反应 末态粒子进行探测,如图1所示。其中TO和T1望远镜 (L0、R0、L1、R1)由三层硅探测器组成,其中第一层 为厚约40 μm的W1型硅微条探测器,其有效探测面积 为50 mm×50 mm,正背面分别分割为16条独立读出; 第二层为厚约500 μm的BB7型硅微条探测器,其有效 探测面积为64 mm×64 mm,正背面分别分割为32条独 立读出;最后一层为厚约1500 μm的MSX40型大面积 硅探测器,其有效探测面积为64 mm×64 mm。T2(L2、 R2)、T3(L3、R3)望远镜均由两层硅探测器组成。T2 由



一层约40 μm的W1型硅微条探测器和一块1500 μm的 大面积硅探测器组成,T3由一层约40 μm的BB7型硅 微条探测器和一块1500 μm的大面积硅探测器组成。 关于探测器阵列更详细的信息可以参考文献[31]。

实验中,¹⁶O 轰击 0.98 μm 的¹²C 靶,非弹激发¹⁶O 至 4-α分离阈之上。随后,这些高激发态其可通过不同 的路径衰变为4个α粒子。α粒子及反冲核¹²C 可被望 远镜系统探测。通过带电粒子在两层硅中沉积能量的关 系即 Δ*E* – *E* 方法来做粒子鉴别 (PID)。由于 PID 曲线的 位置依赖于第一层硅的厚度,而实际使用的第一层 W1 型硅微条的厚度不均匀性较大,因此使用逐格点的方式 做 PID 分析。作为举例,L0 望远镜的前两层硅单格点 的 PID 如图 2 所示。



尽管本次实验探测避开了零度附近很强的直接束流 粒子的影响,仍然可能有少量粒子来自在硅探测器本身 发生的核反应。为了尽可能避免这种本底影响,我们通 过粒子在两层硅中记录到的位置信息重建其径迹。若径 迹无法回推至靶范围,则排除对应的事件。这种方法的 示意如图3。另外也加入各探测信号的时间关联约束, 以尽可能地排除偶然符合事件。



如前所述,本次实验特别关注对于α粒子的鉴别。 首先,我们选取反应末态中4个α都有粒子鉴别(4-α全 PID)的事件,如图4(a)所示。此时,假定反冲核为¹²C, 利用束流的能动量和探测到的4个α粒子的能动量,可 按照能动量守恒关系推出¹²C的能动量^[31-33]。假定反 冲核为¹²C的正确性,可由下节提到的Q值谱中的对应 的峰来检验。为了增加好事件的统计量,可以增加一部 分α粒子阻停在第一层硅探测器从而缺乏PID的事件。 例如,4个α中只有3个穿透望远镜第一层硅从而有PID, 而第4个α的能量不足以穿透第一层硅从而没有PID。 此时为了尽可能减少由于粒子误判而引入的本底,可增 加对反冲¹²C的测量和判断,即要求事件含有第5个 "hit"(5-"hit"事件),如图4(b)所示。由于¹²C很难穿透 第一层硅,此时就有两个缺乏 PID 的粒子。我们首先要 求第4个 "hit" 的被测得的能量小于α粒子在第一层硅 中的穿透能(约为9~10 MeV)。然后要求探测到的第5 个 "hit" 的能量 [T_{det} (¹²C)], 与按照能动量守恒由束流 和其余4个 "hit" 的能动量推得的反冲 ¹²C 的动能 [T_{cal} (¹²C)]相一致,也就是选取对应于图5中的红线区域内 的事件。满足这种限制的5-"hit" 事件同样能够产生于 净的Q值峰(见后分析),选取这个峰也就保障了假定的 PID等效于正确的PID。这部分增加的事件和4-α全 PID 的事件统称为"加和好事件",它们被用于接下来的 物理过程分析。







图 5 利用未完全识别的4个"α"粒子的能动量和束流的 能动量推得的反冲¹²C的能量 T_{cal}(¹²C)与实际探测到 的第5个"hit"能量 T_{det}(¹²C)之间的关系

2 数据分析及结果

反应*Q*值是反应前后的质量差,也是反应末态粒子的总动能与初态束流能量的差值,可表达为

$$Q = \sum_{i=1}^{4} E_{\alpha_i} + E_{^{12}\text{C}} - E_{\text{beam}} \,\circ \tag{1}$$

图 6 展示了我们本次得到的结果与 Freer 等^[28]得到的结果的对比。其中位于-14.4 MeV 左右的峰,对应于 末态粒子为4 个α加上反冲的¹²C。其他任何5粒子以上





的末态质量组合均远离这个峰,说明这个*Q*值峰在没有本底干扰的情况下等价于4α+¹²C的完整的PID。位于 大约-18.9 MeV的峰也对应于同样的5个末态核,只不 过¹²C处于4.44 MeV的激发态。可以看到本次实验的 "加和好事件"对应的*Q*值峰非常清晰,基本没有本底。 考虑到本底会比较集中的出现在4-α分离阈附近,保持*Q* 值峰的低本底对于重建阈值附近的共振态特别的重要。

通常多 α 构成的共振态的衰变模式,不是所有 α 成员同时崩开,而是多步过程。对于 ¹⁶O,通常是 ¹⁶O(excited) \rightarrow ¹²C(excited) + $\alpha \rightarrow 4\alpha$ 或者 ¹⁶O(excited) \rightarrow ⁸Be+ ⁸Be $\rightarrow 4\alpha$ 。此时可通过遍举方法选择其中 2 个或 3 个 α ,按照不变质量 (Invariant Mass, IM)方法来寻找母体共振态,如示意图 7 所示。用本实验的"加和好事件"中的 3- α 或 2- α 粒子重建的能谱举例如图 8 所示。图中明显给出已知的 ¹²C的 7.65 和 9.64 MeV 共振态以及 ⁸Be基态,这些峰的宽度和位置反映了本次实验探测良好的分辨率以及数据分析处理的可靠性。

随后我们选择任意 3-α能够组合出 ¹²C的 7.65 MeV 激发态 (Hoyle state)的事件,同时选择图 6(b)中在 -14.44 MeV 附近的峰。此时反应末态产物为 ¹²C(Hoyle state→3α)、剩余的第4个α粒子以及反冲的基态 ¹²C。 此时第4个α可以与 ¹²C(Hoyle state)组合,重建出弹核 ¹⁶O_P被非弹激发后的共振态;当然也可与反冲的基态 ¹²C结合,重建出靶核 ¹²C接收了一个转移来的α形成



图 8 选择"加和好事件"中的 2-α和 3-α粒子重建得到的 ⁸Be的激发能谱及¹²C的激发能谱

的类靶¹⁶O_T。显然,前一种过程是我们期待研究的4-α 衰变物理过程,而后一种是本底过程。由于转移反应的 截面可以很大,因此后一种干扰的本底过程可以概率 (截面)很大。由于末态粒子相同,这两种过程无法通过 *Q*值谱区分,但可以通过 Dalitz 图分析^[28, 34-35],如 图9所示。图中横向很强的带子,对应于已知的¹⁶O_T< 12 MeV 的激发态。

为了避免¹⁶O_T的影响,选择¹⁶O_T>12 MeV(图 9中 红线以上部分)的数据,此时投影到¹⁶O_P的不变质量谱 如图 10 所示。图中同时展示了利用蒙特卡罗模拟得到 的效率曲线。可以看到仅由 4-α PID 事件重建出的能谱 效率在 19 MeV 附近接近于 0,正是由于 5-"hit"事件的 加入,改进了阈值附近的探测效率分布,使得关键的共 振态得以被观测到。其他衰变道 (如经过⁸Be+⁸Be 衰变) 或*Q*值位于-18.88 MeV 附近(反冲¹²C 被激发)的数据可 以按照类似的方法进行处理,考虑到与本文所要讨论 的¹⁶O 类 Hoyle 共振态关系不大,所以在此没有给出。



图 10 按照正文所属筛选条件得到的¹⁶O激发能谱(在线 彩图)

蓝色虚线为模拟得到的"加和好事件"的效率曲线,红色点划线 为模拟得到的4-α全 PID 事件的效率曲线。Freer等^[29]的初步 结果也用红点标在了图中。

3 讨论

从图 10 中可清晰地看到4-α破裂阈值附近有5个窄 共振峰。考虑到近阈能区库伦位垒的阻挡,这几个峰的 出现更加突出反映了¹⁶O中对应的4-α结构。利用卷积 探测分辨的 Breit-Wigner 函数描述每个峰,对能谱进行 拟合,结果如表1所列。其中峰显著度水平(Significance Level, SL)是通过最大似然法分析获得^[36],也就是比较 加入该峰(*L*_{H1})或者不加入该峰(*L*_{H0})时拟合得到的最

表 1 拟合得到的5个共振态的信息,括号中表示拟合得 到的统计误差(1.s.d)

$E_{\rm x}/{ m MeV}$	$\Gamma/{\rm keV}$	SL/σ
15.63(5)	271(200)	2.7
16.18(6)	274(140)	3.0
17.46(4)	370(100)	6.5
18.47(5)	421(140)	5.1
19.74(5)	668(250)	>8.0

大似然函数值的差别。结果显示,位于16.18,17.46, 18.47,19.74 MeV的4个峰的显著度很高,特别是后3 个峰显著度大于5σ。而位于的15.63 MeV的峰受限于较 低的统计量,其显著度较低,需要后续实验进一步确认 和研究。

图 11显示了本次实验结果与以往衰变实验得到的 结果的比较。可以看出本工作中得到的近阈共振峰结构 清晰且显著度高,而此前的结果受本底干扰很大难以确 认共振峰的存在。这主要是由于此前的测量均缺少对衰 变的多个α的识别(PID)以及对本底干扰反应道的有效 排除^[15, 28, 30]。即本实验首次高显著度地发现了4个 ¹⁶O中的4-α共振峰,它们通过¹²C(Hoyle state)+α的特 征路径衰变。这个衰变道本身从实验角度体现了与¹⁶O 的类 BEC态的密切关系。首先,动力学分析表明,如 果¹⁶O处于类BEC态,它将优先通过¹²C(Hoyle state)+α 的模式衰变^[18]。这一方面是由于库伦位垒效应(单个α 穿出位垒相对容易),另一方面也是由于衰变过程倾



图 11 本工作和以往的衰变实验 Freer 1995^[28]、Curtis 2016^[30]、Manna 2021^[15]得到的¹⁶O激发能谱的对比,图中红色虚线 标出了表1中列出的共振态的峰位

向于尽可能保留母核结构 (structural link)^[37-39]。由于 ¹²C(Hoyle state) 是 BEC 型结构主导,所以 ¹⁶O 的类 BEC 态会优先衰变到 ¹²C(Hoyle state)+ α 。在这里 ¹²C(Hoyle state) 里边的 3 个 α 已经处于 *S* 波,因此只需要考虑第 4 个 α 所处的轨道即可。

理论上,Ohkubo等^[40]通过耦合道方法完整地研究 了¹²C+α散射体系可以产生的¹⁶O共振态,预言了一条 由¹²C(Hoyle state)+ α 体系形成的转动带,它的0⁺、2⁺、 4⁺、6⁺成员分别处于16.61、17.04、18.38、19.95 MeV。 这与本次实验得到的四个共振峰的位置极为接近。尽管 本次实验中受限于统计无法通过角关联的方式测得这些 态的自旋宇称,但它们通过Hoyle态的特征衰变模式已 经显示其和理论预言的类Hoyle态紧密关联。对于这个 转动带的每个成员,其内在的3个α已经处于S轨道, 只有第4个α可具有不同角动量,其中很可能包含了第 4个 α 也处于*S*轨道的情况,也就是类似¹⁶O的BEC态。 Funaki 等^[41] 通过计算也给出相似的结果,即在 $4-\alpha$ 分 离阈之上得到一条转动带,其带头(0⁺态)相当于第4个 α 粒子掉入了 Hoyle 态中。这种关系如图 12 所示。当然, 也有其他理论工作认为靠近4-α分离阈的地方会出现若 干个0⁺态(而不一定是转动带),它们都与BEC结构有 关^[42]。显然,本次测量结果将激发进一步的理论研究, 实验上也需要进一步观测表1中几个共振态的自旋宇称。



图 12 实验探测及由 4-α 重建的物理过程示意图

4 总结

通过八套基于硅微条探测器的望远镜系统,测量 了 ^{16}O 在 ^{12}C 靶上的非弹激发及 4-α衰变过程,首次得 到了大量的有全部4个 α 粒子鉴别的事件。为了有效使 用部分无完全 α 粒子鉴别的事件,加入了对第5个粒子 "hit"的筛选,使其符合反冲 ^{12}C 的性质,从而使得具有 清晰 Q-值分辨 (等效于末态全粒子鉴别)的好事件数增 加了约一倍,特别是改善 4- α 分离阈附近的探测效率。 通过对这种"加和好事件"的分析,高显著度地观测 到 ^{16}O 中在 4- α 分离阈附近的四个共振态,它们按照 ^{12}C (Hoyle state)+ α →4 α 的方式衰变。由于 ^{12}C (Hoyle state)已经是类 BEC 结构,且第4个衰变 α 的构成也与 理论预言的包含 S轨道的态相一致,本实验为 ^{16}O 中出 现类 BEC 态提供了重要的实验证据。后续需要实验进 一步直接确定目前所观察到的这几个共振态的自旋宇称, 也需要理论模型分析这几个共振态的内在结构及其衰变 路径和宽度。

参考文献:

- VON OERTZEN W, FREER M, KANADA-EN'YO Y. Phys Rep, 2006, 432(2): 43.
- [2] HORIUCHI H, IKEDA K, KATō K. Prog Theor Phys Suppl, 2012, 192: 1.
- [3] LIU Y, YE Y L. Nucl Sci Tech, 2018, 29(12): 1.
- [4] YE Y, YANG X, LIU Y, et al. Scientia Sinica Physica, Mechanica Astronomica, 2020, 50(11): 112003.
- [5] YANG Z H, YE Y L, ZHOU B, et al. Phys Rev Lett, 2023, 131: 242501.
- [6] HAN J, YE Y, LOU J, et al. Communications Physics, 2023, 6(1): 220.
- [7] IKEDA K, TAKIGAWA N, HORIUCHI H. Prog Theor Phys Suppl, 1968, E68: 464.
- [8] ADACHI S, FUJIKAWA Y, KAWABATA T, et al. Phys Lett B, 2021, 819: 136411.
- [9] TOHSAKI A, HORIUCHI H, SCHUCK P, et al. Phys Rev Lett, 2001, 87: 192501.
- [10] YAMADA T, SCHUCK P. The European Physical Journal A, 2005, 26(2): 185.
- [11] FUNAKI Y, HORIUCHI H, VON OERTZEN W, et al. Phys Rev C, 2009, 80: 064326.
- [12] KANADA-EN'YO Y. Phys Rev C, 2014, 89: 024302.
- [13] FUNAKI Y, HORIUCHI H, TOHSAKI A. Prog Part Nucl Phys, 2015, 82: 78.
- [14] RANA T K, BHATTACHARYA S, BHATTACHARYA C, et al. Phys Lett B, 2019, 793: 130.
- [15] MANNA S, RANA T K, BHATTACHARYA C, et al. Eur Phys J A, 2021, 57: 286.
- [16] ZHOU B, FUNAKI Y, HORIUCHI H, et al. Nature Communications, 2023, 14(1): 8206.
- [17] FUNAKI Y, YAMADA T, HORIUCHI H, et al. Phys Rev Lett, 2008, 101: 082502.
- [18] KOKALOVA T, ITAGAKI N, OERTZEN W V, et al. Phys Rev Lett, 2006, 96(19): 192502.
- [19] SMITH R, BISHOP J, HIRST J, et al. SciPost Phys Proc, 2020: 30.
- [20] FUNAKI Y, YAMADA T, TOHSAKI A, et al. Phys Rev C, 2010, 82: 024312.
- [21] TILLEY D, WELLER H, CHEVES C. Nucl Phys A, 1993, 564(1): 1.
- [22] LI K C W, NEVELING R, ADSLEY P, et al. Phys Rev C, 2017, 95(3): 031302.
- [23] BARBUI M, HAGEL K, GAUTHIER J, et al. Phys Rev C, 2018, 98: 044601.
- [24] BISHOP J, KOKALOVA T, FREER M, et al. Phys Rev C, 2019, 100: 034320.
- [25] CHEVALLIER P, SCHEIBLING F, GOLDRING G, et al. Phys Rev, 1967, 160: 827.
- [26] SOYLU A, FREER M, ASHWOOD N I, et al. Phys Rev C, 2012,

86: 057601.

- [27] CURTIS N, ALMARAZ-CALDERON S, APRAHAMIAN A, et al. Phys Rev C, 2013, 88: 064309.
- [28] FREER M, CLARKE N M, CURTIS N, et al. Phys Rev C, 1995, 51: 1682.
- [29] FREER M, NICOLI M P, SINGER S M, et al. Phys Rev C, 2004, 70: 064311.
- [30] CURTIS N, ALMARAZ-CALDERON S, APRAHAMIAN A, et al. Phys Rev C, 2016, 94: 034313.
- [31] CHEN J, YE Y, MA K, et al. Science Bulletin, 2023, 68(11): 1119.
- [32] YANG B, YE Y L, FENG J, et al. Phys Rev C, 2019, 99: 064315.
- [33] CURTIS N, CAUSSYN D D, FLETCHER N R, et al. Phys Rev C, 2001, 64: 044604.
- [34] FENG J, YE Y, YANG B, et al. Science China Physics, Mechanics

& Astronomy, 2018, 62(1): 12011.

- [35] WANG D X, YE Y L, LIN C J, et al. Chin Phys C, 2023, 47(1): 014001.
- [36] TANABASHI M, HAGIWARA K, HIKASA K, et al. Phys Rev D, 2018, 98: 030001.
- [37] LI J, YE Y L, LI Z H, et al. Phys Rev C, 2017, 95: 021303.
- [38] LIU Y, YE Y L, LOU J L, et al. Phys Rev Lett, 2020, 124: 192501.
- [39] HAN J X, LIU Y, YE Y L, et al. Phys Rev C, 2022, 105: 044302.
- [40] OHKUBO S, HIRABAYASHI Y. Phys Lett B, 2010, 684(2): 127.
- [41] FUNAKI Y, YAMADA T, HORIUCHI H, et al. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 436(1): 012004.
- [42] TAKAHASHI J, YAMANAKA Y, OHKUBO S. Prog Theor Exp Phys, 2020, 2020(9).

Searching for Possible Bose-Einstein Condensate States in ¹⁶O via Its 4-α Decay

CHEN Jiahao¹, YE Yanlin^{1,†}, MA Kai¹, HAN Jiaxing¹, WANG Dongxi¹, LIN Chengjian^{2,3}, JIA Huiming², YANG Lei², LI Gen¹, YANG Lisheng¹, HU Ziyao¹, TAN Zhiwei¹, WEI Kang¹, PU Weiliang¹, CHEN Ying¹, LOU Jianling¹, YANG Xiaofei¹, LI Qite¹, YANG Zaihong¹, LUO Tianpeng², HUANG Dahu^{2,3}, ZHONG Shanhao^{2,3}, LI Zhihuan¹, XU Jinyan¹

(1. School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;
 2. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;
 2. China C

3. College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: Recently, an inelastic scattering experiment of ${}^{16}O{+}{}^{12}C$ was performed at the Beijing Tandem Accelerator Nuclear Physics National of China Institute of Atomic Energy. New evidence for the existence of Bose-Einstein condensation state of ${}^{16}O$ has been obtained. Employing a series of double-sided-silicon-strip-based telescopes, this experiment achieved accurate particle identification and coincidence measurement of $4{-}\alpha$ in the decay of ${}^{16}O$ for the first time. Based on this, high-resolution reaction *Q*-value spectra was obtained and clear $4{-}\alpha$ resonance states were reconstructed. In the vicinity of the $4{-}\alpha$ separation threshold, 4 highly significant (3 of them above 5σ) resonance states were observed, which decay to the characteristic pattern of ${}^{12}C$ (Hoyle state)+ α , consistent with the predicted Hoyle-BEC structure and its rotating band features. The observation results will promote further theoretical research, and more measurements are needed for these resonance states in experiments. **Key words:** cluster structure; Hoyle-like states; ${}^{16}O$ resonances; high excitation

Received date: 11 Jul. 2023; Revised date: 04 Jan. 2024

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2023YFA1606403, 2023YFE0101600, 2022YFA1602302); National Natural Science Foundation of China (12235020, 12027809, 11961141003, U1967201, U2167204); Continuous Basic Scientific Research Project (WDJC-2019-13); Leading Innovation Project (LC192209000701, LC202309000201)

[†] Corresponding author: YE Yanlin, E-mail: yeyl@pku.edu.cn