# 恒星s-和i-过程 伽莫夫窗口内中子源反应 <sup>13</sup>C(α, n)<sup>16</sup>0截面直接测量

### 中国科学院近代物理研究所 中科院近代物理研究所-兰州大学共建核物理系 JUNA合作组

唐晓东

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

高丙水(近物所)

# 二十一世纪未解物理之谜



第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

2023年5月7-12日 千岛湖





第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

2023年5月7-12日 千岛湖

### 富碳贫金属星(CEMP)i-过程中子源 Hampel et al., ApJ 831(2016)171 CS31062-050 3.5 3.0 T~0.15 GK



第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

## 对s─过程核合成的影响



+20%/-10%的不确定性影响+/- 5%的理论丰度预言

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

2023年5月7-12日 千岛湖

### 复杂的反应机制



第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

2023年5月7-12日 千岛湖







JUNA

FIG. 6.  ${}^{13}C(\alpha,n){}^{16}O$  S factor. The dotted line represents the GCM result; the full line is obtained with the Breit-Wigner parametrization (see text); the dashed lines are the experimental data taken from Ref. 3 (a) and Ref. 4 (b). The arrows indicate the energy range where the experiments are carried out.

P. Descouvemont PRC(1987)

2023年5月7-12日

千岛湖

#### 第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会



- ・ 地面实验受限于本底,无法很好地约束外推
- ・ 间接方法带来系统误差, 难以定量估计

理论外推由郭冰(原子能院)提供 B.Guo *et al.*,ApJ756(2012)193

## <sup>13</sup>C(a,n)<sup>16</sup>O 核天体物理界关注的重要反应



Perspectives of Nuclear Physics in Europe NuPECC Long Range Plan 2010





JUNA

2023年5月7-12日 千岛湖

The large uncertainties in the main astrophysical neutron sources  ${}^{13}C(\alpha,n)$  and  ${}^{22}Ne(\alpha,n)$  need to be addressed in order to understand the s-process.

### 为理解s-过程,需要减小中子源反应<sup>13</sup>C( $\alpha$ ,n)和<sup>22</sup>Ne( $\alpha$ ,n)的不确定性

#### 第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

## 意大利LUNA介绍





- 意大利格兰萨索LUNA
- 世界上唯一的深地核天体物理实验室

 $H^{+} < 1 \, mA$ 

- 50 kV和400 kV加速器
- 氢燃烧阶段关键反应重要数据
- 将开展氦燃烧研究
- LUNA-MV正处于设计阶段

<sup>3</sup>He( $\alpha$ , $\gamma$ )<sup>7</sup>Be, <sup>12</sup>C( $\alpha$ , $\gamma$ )<sup>16</sup>O, <sup>13</sup>C( $\alpha$ ,n)<sup>16</sup>O, <sup>22</sup>Ne( $\alpha$ ,n)<sup>25</sup>Mg











- 缺乏自洽的高能数据
- > 无法得到最佳拟合
- > i-过程能区需要外推: 误差50%
- > s-过程能区需要外推: 误差>50%



### JUNA深地加速器



JSD

- 2400 m overburn (6700m w.m.), the deepest underground lab by now
- The 3rd underground accelerator facility after LUNA and CASPAR

	cosmic muon bkg ( cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	beam energy(keV)			beam intensity (emA)			onorgy otability
		H⁺	He⁺	He <sup>2+</sup>	H⁺	He⁺	He <sup>2+</sup>	energy stability
LUNA	2×10 <sup>-8</sup>	50-400	50-400		0.3~1	0.3~0.8		0.05%
CASPAR	4.4×10 <sup>-9</sup>	100-1000	100-1000		0.1	0.1		0.05%
JUNA	2×10 <sup>-10</sup>	50-400	50-400	100-800	10	10	2	0.04%
第二尺州下和交问粒之物理片安全物理前沿问题环社会。								12日 工包湖

別们以透明以云







2023年5月7-12日 千岛湖

JUNA

- 2mm厚靶,目前最高功率500W
- JUNA使用3块靶,LUNA使用靶>100
- 束斑小,需要添加光阑,进行扫束;改善靶冷却

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

### JUNA中子探测系统







- 成功研制低本底、高效率中子探测阵列
- 首次研究角分布对探测效率的影响

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

李宇田,林炜平,高丙水等,NST(2022) 黄翰雄,高丙水等,NIMA(2021)

千岛湖

2023年5月7-12日



JUNA design Limit 10 He2+ Beam current (particle mA) • He+ JUNA design Limit 1 0.1 LUNA 0.01 200 400 600 0 800 1000 Alpha particle energy (keV)

Preparation + Beam time: Jan. 27 to Feb. 16, 2021

#### 2023年5月7-12日 千岛湖





指标	LUNA (Italy)	JUNA (China)
束流强度	<0.2 particle mA	0.1-2 particle mA
靶数目	>100	3
深地能区(MeV)	0.234-0.31	0.24-0.6
高能数据	依赖不自洽测量	自洽测量
探测器中子本底	3 cnts/hr	4.7 cnts/hr
最小截面	1.1pb	1.9 pb
效率刻度方法	<sup>51</sup> V(p,n) <sup>51</sup> Cr	<sup>51</sup> V(p,n) <sup>51</sup> Cr
束流时间	240 days	14 days

流强优势,厚靶技术,更宽能区使我们在深地实验室用1/17的时间超越LUNA的物理目标,并在0.24-1.9MeV能区提供自洽基准数据







• SCU data analyzed by W.P. Lin(SCU)

#### 第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

## <sup>13</sup>C(α,n)<sup>16</sup>O S-因子



JUNA

2023年5月7-12日

千岛湖

i-过程能区: LUNA依赖不自洽的高能数据,存在分歧,外推误差>50%

s-过程能区:LUNA依赖不自洽的高能数据,外推误差<sup>~</sup>50%

## <sup>13</sup>C(α,n)<sup>16</sup>O S-因子



JUNA

2023年5月7-12日

千岛湖

i-过程能区: LUNA依赖不自洽的高能数据,存在分歧,外推误差>50% JUNA首次实现直接测量误差<13%,**澄清分歧** 

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

### 电子屏蔽效应

 $f_{\text{lab}}(E) = \sigma_{\text{s}}(E) / \sigma_{\text{b}}(E) \approx \exp(\pi \eta U_{\text{e}}/E) \ge 1$ 

JUNA

2023年5月7-12日

千岛湖



Trippella & Cognata (2017) Stridder, Rolfs and Spitaleri (2001)

 $U_e$ =0.78+/-0.43 keV agrees with  $U_e$ =0.937 keV predicted using the adiabatic limit, rules out other predictions.

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会





### JUNA direct measurement:

- Reduced width = -0.145+/-0.019 MeV<sup>1/2</sup> at R=6.684 fm
- Modified ANC<sup>2</sup>=2.1+/-0.6 fm<sup>-1</sup> with Ex=6.356 MeV
- Important for quantifying the systematic error of transfer reaction

Guo2 taken from Shen, Guo et al., PLB(2020)

2023年5月7-12日

千島湖

### 最精确的反应率



JUNA

2023年5月7-12日

千岛湖



FIG. 6.  ${}^{13}C(\alpha,n){}^{16}O$  S factor. The dotted line represents the GCM result; the full line is obtained with the Breit-Wigner parametrization (see text); the dashed lines are the experimental data taken from Ref. 3 (a) and Ref. 4 (b). The arrows indicate the energy range where the experiments are carried out.

#### 第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会





JUNA

2023年5月7-12日

千岛湖

- 屏蔽天然中子本底,约为地面水平的1/250→1/3400
- •利用塑料闪烁体+<sup>3</sup>He探测器符合压制alpha本底







### 24小时深地测量相对误差估计

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会



AP

10

ITANA Inping Underground Nuclear Irophysics experiment)



第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会



谢谢清华

Dap

# **交大、锦屏等的大力支持**







直星中子源实验(2021年2月27日至3月16日)

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会



17-22 September 2023 Institute for Basic Science (IBS) Daejeon, Korea

### 17<sup>th</sup> International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XVII)

#### Topics

- •Nuclear reaction rates and stellar abundances
- •The s-process
- •Nuclear properties for astrophysics
- •High-density matter
- Novae and X-ray bursts
- •Type la supernova and the p-process
- •Core-collapse supernovae, mergers and the r-process
- •Underground nuclear astrophysics
- •The early universe
- Galactic evolution
- Radioactivity and meteorites
- Stellar modelling
- •Others (new facilities, instruments, tools, etc)

#### Important dates

- Abstract submission: Apr. 4 May 15
- Oral/poster presentation notification: early June
- Early registration (with payment): May 1 July 31
- Registration deadline: Sep. 10

https://indico.ibs.re.kr/event/548/

NIC School The School for NIC-XVII for graduate students and young postdocs will be held at the Institute for Basic Science, Sep. 11-15. The school will provide lectures on basics and the current subjects in nuclear astrophysics, from theories to experiments and observations.

#### 第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会





- 国内首次利用深地实验室和强流加速器开展中子源 反应研究,在天体物理能区获得可靠数据,为检验 理论外推提供基准
- 改进屏蔽压制天然中子本底,利用塑料闪烁体+<sup>3</sup>He 探测器符合压制alpha本底,将本底控制到
   0. 4cnts/hr
- 2023年开展<sup>13</sup>C(α, n)<sup>16</sup>O、<sup>22</sup>Ne(α, n)<sup>25</sup>Mg和
  <sup>10</sup>B(α, n)<sup>13</sup>N, <sup>17</sup>O(α, n)<sup>20</sup>Ne中子源研究