${}^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方题

实验数据初步分析

总结与后续计划 0000 参考文献

# 基于 MTPC 的 ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$ 反应直接测量

刘亦晖

中国原子能科学研究院

2024年12月1日



刘亦晖 基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量 ▲□▶▲圖▶★≧▶★≧▶ ≧ のへで

中国原子能科学研究院

1 / 37



<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计: 0000 参考文献

附录 0000

- **1**<sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状
- 2 基于 MTPC 的实验方案
- 3 实验数据初步分析
- 4 总结与后续计划

- \* ロ \* \* @ \* \* 注 \* \* 注 \* のへの

刘亦晖 基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量



<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计: 0000 参考文献

附录 0000

## **1**<sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状

- 2 基于 MTPC 的实验方案
- 3 实验数据初步分析
- 4 总结与后续计划

<u>刘亦晖 基于 M</u>TPC 的 <sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 反应直接测量

<sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状 ⊙●○○○○○ 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献



恒星氧同位素丰度

刘亦晖

氧元素在恒星中丰度较高, 其稳 定同位素<sup>16,17,18</sup>O的丰度及比例具有 重要的应用。

陨石氧化物颗粒<sup>(a)</sup>和大量 AGB 星光谱<sup>(a)</sup>中<sup>17</sup>O 丰度较高,可能主要 来自于 AGB 恒星,太阳系形成早期太 阳系周围应该有一颗影响太阳系形成 的 AGB 星。



图 1: 太阳系前陨石中氧化物颗粒 (圆点) 及 AGB 星光谱 (五角星) 中氧同位素丰度比

<sup>(a)</sup> Nittler et al. Astrophys. J. 1997

<sup>(b)</sup> Hinkle et al. Astrophys. J. 2016 Lebzelter et al. Astrophys. J. 2019

<sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状 ○○●○○○○

基于 MTPC 的实验方

实验数据初步分析

总结与后续计划 0000 参考文献





图 2: AGB 星中部分核反应链,箭头粗线代表贡献<sup>(a)</sup>

- 大爆炸原初核合成非标准模型 (IBNN) 中<sup>14</sup>C 的主要来源
- 通过<sup>22</sup>Ne 向中重核区发展,决定着一系列后续核素的产量

<sup>(a)</sup> Schatz et al. Astrophys. J. 1993

基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量

刘亦晖

- ▲日▼ ▲圖▼ ▲国▼ ▲国▼ ▲国 ● ● ●

<sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状 000●000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析 00000000000000 总结与后续计划 0000

4 E

参考文献



## ${}^{17}O(n,\alpha){}^{14}C$ 现有测量结果



<sup>(b)</sup> Schatz et al. Astrophys. J. 1993 Sanders. Phys. Rev. 1956 Koehler et al. Phys. Rev. C. 1991
 <sup>(c)</sup> Wagemans et al. Phys. Rev. C. 2002

<sup>(d)</sup> Gulino et al. Phys. Rev. C. 2013

刘亦晖



实验数据初步分析

总结与后续计划 0000 参考文献



#### Back-n + Si 探测器测量



(a) 探测器示意图

(b) 前角 SiC 探测器测量结果

< E

图 4: 基于硅探测器的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应测量

双束团  $\Phi$ 50 束斑,功率为 100 kW, 30 % 丰度  $W_2O_3$  靶,前角使用 SiC 探测器,覆盖立体角 < 1 %。



实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献



#### Si 探测器测量结果



图 5: Si 探测器测量结果

在 0.1-200 keV 能量区间较之前结果降低 1 个数量级, 天体物理反应率在  $T_9 < 0.2$  时降低为原有  $1/8 \sim 1/5$ , 符合 AGB 星 <sup>17</sup>O 丰度较高的预期。

8 / 37



总结与后续计划 0000 参考文献



### 实验不足与改进

- 统计不足: 100 keV 附近误差大于 20 %
  - W<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 靶同位素丰度低 (30%)
  - 立体角占比小(前角 < 1%)</li>
- 改进
  - 丰度 70 % 的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应靶
  - 大立体角覆盖的 MTPC 探测器,比上次实验提高一个量级

<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计: 0000 参考文献



## **1**<sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状

#### 2 基于 MTPC 的实验方案

- 3 实验数据初步分析
- 4 总结与后续计划

刘亦晖 基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量 中国原子能科学研究院

10 / 37

 ${}^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案 ○●○○○○ 实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献

## 实验方案

刘亦晖



图 6: MTPC 探测器

基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量

- 束流: 170 kW 双束团
- 探测器: MTPC, 立体角覆盖接近 50 %

• 靶材:

- <sup>6</sup>LiF, 靶厚约 150 ug/cm2
- Cr<sub>2</sub><sup>16</sup>O<sub>3</sub>, 靶厚约 300 ug/cm2
- Cr<sub>2</sub><sup>17</sup>O<sub>3</sub>, 靶厚约 290 ug/cm2, 丰度 70 %
- 实验时长:11月2日-8日,总计120h
  - 换靶与测试: 10h
  - <sup>6</sup>LiF: 2 h
  - $Cr_2^{16}O_3$ : 22 h
  - $Cr_2^{17}O_3$ : 80 h

イロト 不得 トイヨト イヨト



#### 基于 MTPC 的实验方案 00●000

实验数据初步分析

总结与后续计划 0000 参考文献



## 制靶 @ 田涛



- 旋转蒸镀与磁控溅射一体镀膜设备,使用磁控溅射制靶
- 铝衬靶: 3 um 衬底易碎, 最终选择 5 um 铝衬底以削弱 γ-flash 的影响
- 靶厚约 290 ug/cm2, 对应厚度 555 nm
- 二次离子激发测量<sup>17</sup>O 丰度结果约为70%

 ${}^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

总结与后续计划 0000 参考文献

附录 0000

### MTPC 工作气体 @ 褚天志

$$^{17}\text{O} + \text{n} \rightarrow ^{14}\text{C} + \alpha, \quad \text{Q} = 1.817 \text{ MeV}$$

低能  $\alpha$  粒子要求低气压、高增益 (高电压):

- 93 % Ar + 7 % CO<sub>2</sub>: 低气压条件下容易打火, 无法测量
- 75 % Ar + 25 % CH<sub>4</sub>:低电压,但容易受到 np 散射的干扰

最终选择 0.15 atm 气压下的 75 % Ar + 25 % CH<sub>4</sub> 混合气作为工作气体,  $\alpha$  粒子射程约为 60 mm @ 1.5 MeV <sup>(a)</sup>,工作电压不低于 260 V <sup>(e)</sup>,探测效率不低于 85 % <sup>(f)</sup>。

<sup>(a)</sup>由 LISE++ 计算 <sup>(e)</sup>由 Garfield++ 计算 <sup>(f)</sup>由 BLUET 模拟

基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量

刘亦晖



#### 基于 MTPC 的实验方案 0000●0

<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计划 00000 参考文献



#### np 散射与束斑选择

- np 散射:当束斑较大,中子通量太高时,大量的质子事件会叠加在一起,使得 提取 α 粒子径迹变得困难,干扰 α 粒子的测量
- ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$ 反应截面低至 mb 量级,要求较高的中子通量以满足统计要求 Anode Plane



np 散射的主要贡献来自于高能中子,由于质子的电离损失能力更多,需要更高的增益:

- 选择较低的电压,降低低能区的 影响
- 通过延迟电子学启动时间,不记 录高能中子事件



#### 基于 MTPC 的实验方案 000000●

<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计划 2000 参考文献



## 不同束斑大小与延迟时间



最终综合考虑,选择 Φ50-15-40 束斑,延迟时间 1405 个时钟周期,对应中子 能量约为 300 keV。



总结与后续计: 0000 参考文献

附录

## $1^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状

#### 2 基于 MTPC 的实验方案

3 实验数据初步分析

#### 4 总结与后续计划

・ 日 ・ ・ 日 ・ ・ 日 ・ ・ 日 ・ ・ 日 ・ ・ 日 ・

刘亦晖 基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量 中国原子能科学研究院

16 / 37

 ${}^{17}O(n, \alpha)$  ${}^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析 ○●○○○○○○○○○○ 总结与后续计划 0000 参考文献



 ${}^{6}Li(n,\alpha){}^{3}H + np 散射径迹$ 



质子径迹与 α 或氚核径迹重叠,质子径迹更细更短,而重带电粒子的径迹更粗 更长,需要通过径迹搜索算法进行区分。

 ${}^{17}O(n, \alpha)$  ${}^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案 000000 实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献









图 12: 有多个信号的 Pad

由于 np 散射高计数率, 时间窗内可能有多个信号,需 要通过波形拟合算法提取出 主要的信号。



实验数据初步分析

总结与后续计划 0000 参考文献



## np 散射阴极与栅极信号



- ◆ □ ▶ ◆ 個 ▶ ◆ 国 ▶ ◆ 国 ▶ ◆ ④ ◆ ○ ◆

中国原子能科学研究院

刘亦晖 基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量

19 / 37

<sup>17</sup>Ο(n,α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计: 0000 参考文献



## ${}^{6}Li(n,\alpha){}^{3}H$ 反应径迹与波形拟合



- ▲ ロ ▶ → 個 ▶ → 画 ▶ → 画 → の < ?

中国原子能科学研究院

刘亦晖 基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量  ${}^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方题

实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献



## ${}^{6}Li(n,\alpha){}^{3}H$ 反应阴极与栅极信号



重带电粒子事例 的阴极信号与栅极信 号较好,但是阴极存 在较大的噪声,给阴 极定时带来了困难。

< E

< E

21 / 37

 ${}^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献



### 时间戳与死时间窗





#### 图 17: 死时间窗示意图

时间戳在 2000-7000 区间 (对应约 40 us) 处于死时间内, 但是 2000-3800 区 间的信号可以被第一个采样窗记录, 相应 的能量下限为 35 keV; 而 3800-7000 (对应 能量约为 10-35 keV) 区间的信号将无法记 录。

 ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献



### $^{6}Li(n,\alpha)^{3}H$ 反应计数预期对比



 ${}^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计划 0000 参考文献







<sup>17</sup>Ο(n,α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

总结与后续计划 0000 参考文献



## $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 反应角分布



 ${}^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献

附录 0000

## ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$ 反应计数预期对比







总结与后续计划 0000 参考文献



#### $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 反应中 PCB 本底事例



(a) U/Th 衰变的 α 事例
 (b) 全部事例的顶点分布
 (c) 靶实物图
 图 22: PCB 本底事例 (红圈为束斑,绿圈为衬底,蓝圈为 PCB 环,紫圈为场笼)

4 ∃ ⇒

A D N A B N A B N



<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计划 ●000 参考文献



**1**<sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状

- 2 基于 MTPC 的实验方案
- 3 实验数据初步分析
- 4 总结与后续计划

- ▲ ロ ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ▲ 国 ▶ ▲

<u>刘亦晖 基于 M</u>TPC 的 <sup>17</sup>O(n, α)<sup>14</sup>C 反应直接测量

<sup>l7</sup>Ο(n,α)<sup>14</sup>C 物理意义与研究现状 2000000 基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计划 ○●○○ 参考文献







通过 MTPC 探测器,成功测量出 <sup>17</sup>O(n,α)<sup>14</sup>C 反应的 α 事例,提取出 事例的径迹、波形、时间戳等信息,对 事例的顶点分布、能量-长度分布、角 分布等进行了初步分析。

根据初步分析的结果,得到了 10 keV 以下的计数谱,在误差范围内 与前次实验一致,符合实验的预期。

中国原子能科学研究院

刘亦晖 基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量

29 / 37



<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计划 ○○●○ 参考文献





- 改进径迹搜索算法,更精确重建粒子径迹,从 np 散射数据中挑选  $\alpha$  事例
- 大束斑条件下高能区事例总是会触发,需要详细地进行死时间修正
- 通过事例顶点重建、<sup>16</sup>O 靶测量等手段,尽可能减少本底的影响

为了满足低截面核天体物理反应测量的要求,需要考虑使用更大的束斑来提高中子通量,可能的方向包括:

- 更换气体, 如更低组分的 CH4, 或 CF4, 以减少 np 散射的影响
- 改进 MTPC 的设计,降低干扰,提高立体角效率等

此次实验原计划申请 300h 的测量时间,实际测量了约 80h,为了更好的统计 效果,后续计划继续申请测量时间。

イロト 不得 トイヨト イヨト



总结与后续计划 000● 参考文献



#### 实验参与成员

- 指导老师: 李云居 (中国原子能科学研究院)
- 制靶: 田涛 (中国原子能科学研究院)
- MTPC 支持: 易晗、陈海铮、褚天志、陈宏昆(中国散裂中子源科学中心)
- 参与实验:
  - 董敬宇、朱铭浩 (中国原子能科学研究院)
  - 卢苏鹏、黄安然、周志浩 (中国散裂中子源科学中心)

. Thanks!

[1] NITTLER L R, ALEXANDER C M, GAO X, et al. Stellar sapphires: The properties and origins of presolar  $Al_2O_3$  in meteorites[J]. Astrophys. J, 1997, 483(1):475.

**实验数据初步分析** 

总结与后续计划

参考文献

[2] HINKLE K H, LEBZELTER T, STRANIERO O. Carbon and oxygen isotopic ratios for nearby Miras[J]. Astrophys. J, 2016, 825(1): 38.

基于 MTPC 的实验方案

- [3] LEBZELTER T, HINKLE K H, STRANIERO O, et al. Carbon and oxygen isotopic ratios. II. Semiregular variable M giants[J]. Astrophys. J, 2019, 886(2): 117.
- [4] SCHATZ H, KAEPPELER F, KOEHLER P, et al.  ${
  m ^{17}O(n, \alpha)^{14}C}$  Closure of a primordial CNO bi-cycle?[J]. Astrophys. J, 1993, 413: 750-755.
- [5] SANDERS R M. Study of the  ${}^{14}C(p,n){}^{14}N$  and  ${}^{14}C(\alpha,n){}^{17}O$  Reactions[J]. Phys. Rev., 1956, 104(5): 1434.
- [6] KOEHLER P, GRAFF S.  ${}^{14}C(\alpha, n){}^{17}O$  cross section from 25 meV to approximately 1 MeV[J]. Phys. Rev. C, 1991, 44(6): 2788.

 ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  物理意义与研究现状

[7] WAGEMANS J, WAGEMANS C, GOEMINNE G, et al. The  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  reaction from subthermal up to approximately 350 keV neutron energy[J]. Phys. Rev. C, 2002, 65(3): 034614.

实验数据初步分析

总结与后续计划

参考文献

基于 MTPC 的实验方案

- [8] GULINO M, SPITALERI C, TANG X, et al. Suppression of the centrifugal barrier effects in the off-energy-shell neutron+<sup>17</sup>O interaction[J]. Phys. Rev. C, 2013, 87(1):012801.
- [9] LI Y, YI H, SUN Y, et al. Performance study of the Multi-purpose Time Projection Chamber (MTPC) using a four-component alpha source[J]. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 2024, 1060: 169045.

 ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  物理意义与研究现状



<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计戈 0000 参考文献



## TiO 与 $Cr_2O_3$ 靶



(a) TiO 靶

(b) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 靶

图 24: 两种靶的扫描电镜结果

- Ti 为磁阻介质, 难氧化, 磁控溅射制靶速率太慢
- Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 靶中 N 杂质含量更低

刘亦晖

#### ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$ 物理意义与研究现状 0000000

基于 MTPC 的实验方案

实验数据初步分析

总结与后续计划 0000 参考文献



### 预估计数

刘



根据参考能谱估计,在 1 eV-100 keV 能量区间 2 h 内 <sup>6</sup>Li(n, $\alpha$ )<sup>3</sup>H 反应的计数为 5 × 10<sup>4</sup>,在 80-120 keV 能量区间 80 h <sup>17</sup>O(n, $\alpha$ )<sup>14</sup>C 反应计数约为 70<sup>(a)</sup>。

(a)假设立体角覆盖为 40	 <ロ> <問> <言> <言>
<b>下晖</b>	中国原子
E MTPC 的 <sup>17</sup> 0(n a) <sup>14</sup> C 反应直接测量	

能科学研究院



总结与后续计划 0000 参考文献



漂移速度

刘亦晖

筛选 cos θ > 0.6, 时间戳 ts > 2000, 仅拟合出 1 条径迹的事例, 使用等均值双 高斯函数拟合漂移时间, 迭代直至收敛<sup>(a)</sup>。



<sup>(a)</sup> Li et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2024

・ロト・日本・ キャー キャー キャー シャー

中国原子能科学研究院

基于 MTPC 的  ${}^{17}O(n, \alpha){}^{14}C$  反应直接测量

<sup>17</sup>Ο(n,α)<sup>14</sup>C 物理意**义与研**究现状 0000000 基于 MTPC 的实验方案

<u>实验数据初步分析</u>

总结与后续计3 00000 参考文献



## $^{17}O(n, \alpha)^{14}C$ 反应粒子鉴别

$$^{14}\mathrm{N} + \mathrm{n} \rightarrow ^{14}\mathrm{C} + \mathrm{p}, \quad \mathrm{Q} = 0.626\, \mathrm{MeV}$$



刘亦晖 基于 MTPC 的  $^{17}\mathrm{O}(\mathrm{n},lpha)^{14}\mathrm{C}$  反应直接测量