

深地核天体物理

何建军

中科院近代物理研究所



报告内容

1

核天体物理简介

2

研究意义及地位

3

研究现状及动向

4

近物所前期研究

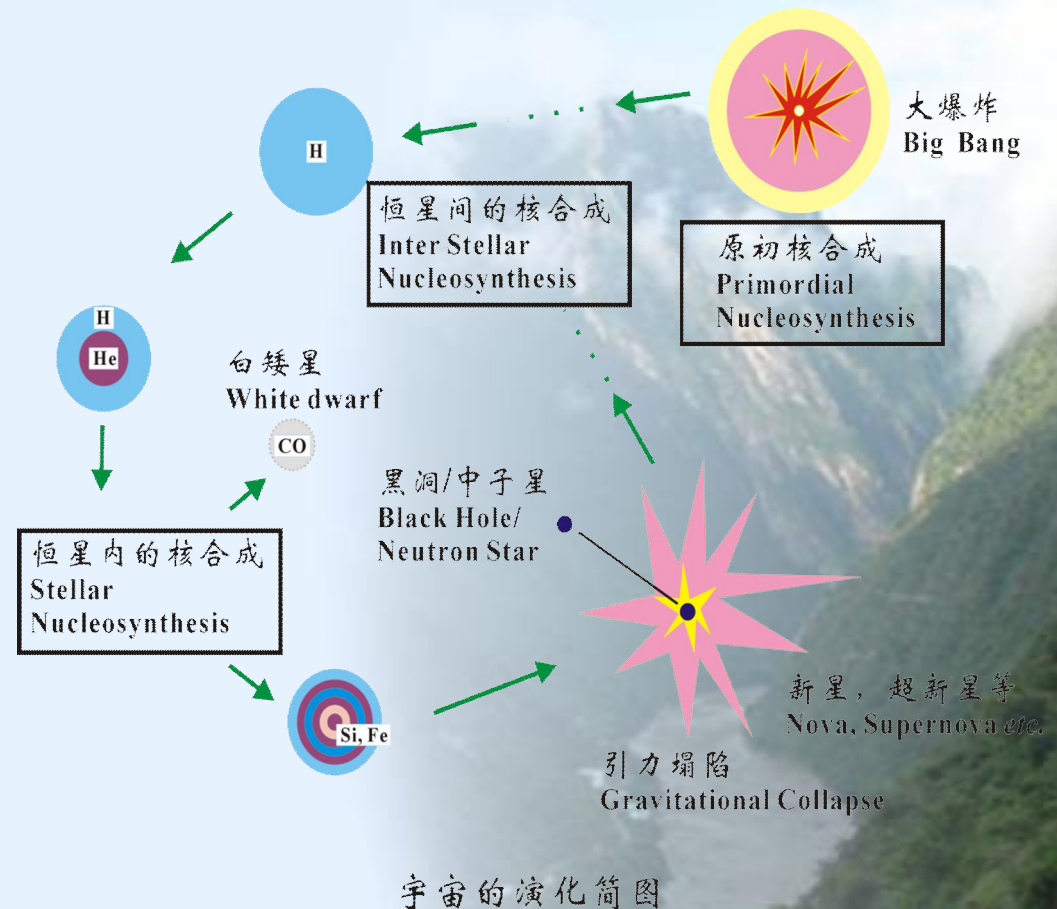
5

深地核天体构想

核天体物理简介

- 核天体物理是宏观世界的天体物理与微观世界的核物理紧密结合的一门交叉学科。

- 它应用核物理的知识和规律阐释恒星中核过程产生的能量及其对恒星结构和演化的影响等。



- 目前，原子核反应截面、质量及衰变测量等是核天体物理研究的最前沿。

研究意义及地位

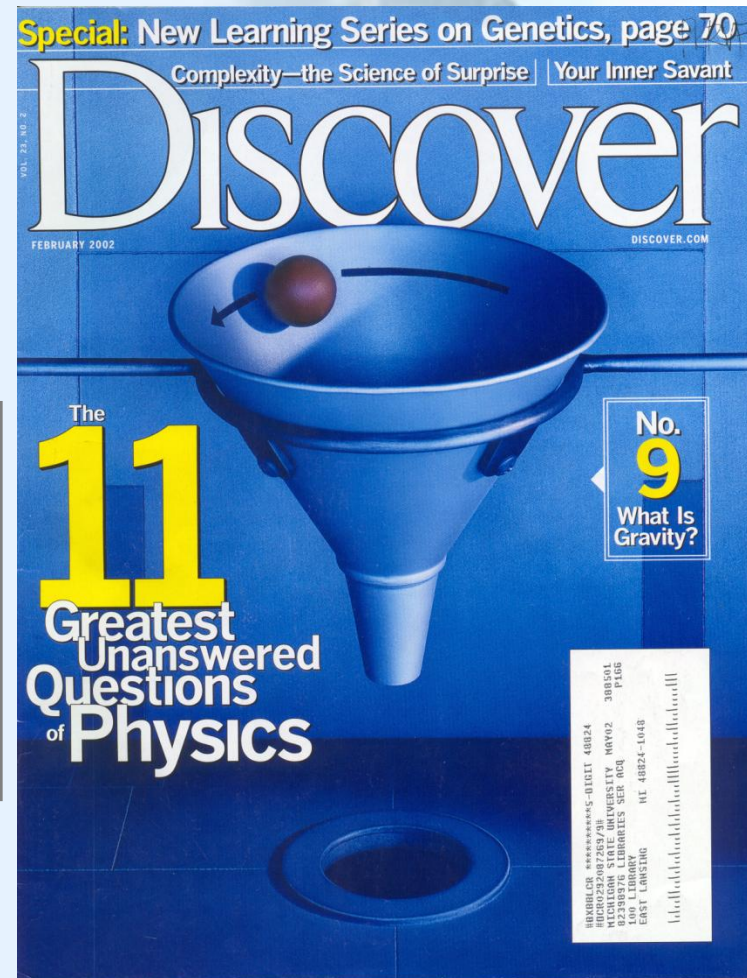
寻找宇宙中元素的起源(Origin of elements)

★ 2002年美国《发现》杂志上11大物理谜团之三。

Question 3

How were the elements
from iron to uranium
made ?

(从铁到铀的元素是怎么“造”出来的?)



研究意义及地位

寻找宇宙中元素的起源(Origin of elements)

- ★ 美国核科学长期规划（1996, 2002, 2007）
- 核天体物理是最重要的课题之一

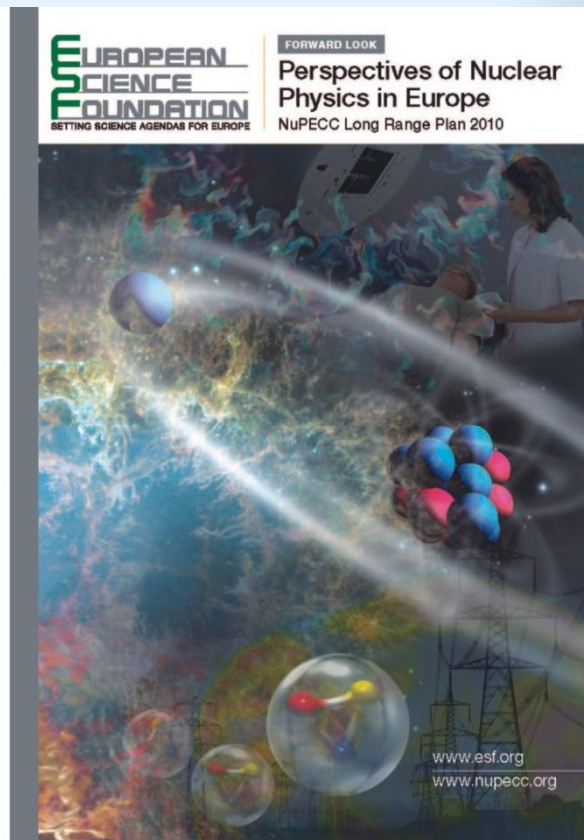


研究意义及地位

寻找宇宙中元素的起源(Origin of elements)

★ 欧洲NuPECC长期规划(2004, 2010)

--核天体物理是最重要的课题之一



Current Nuclear Research Facilities in Europe.

研究意义及地位

寻找宇宙中元素的起源(Origin of elements)

- ★ 基金委数理科学13个优先领域

- 恒星的形成、演化与太阳活动
- 极端条件下的核物理和核天体物理

- 基金委创新研究群体科学基金

- 近物所“十二五”规划重要前瞻性部署

- 天体核物理关键反应研究

核天体物理相关概念

●天体物理反应率(reaction rate)

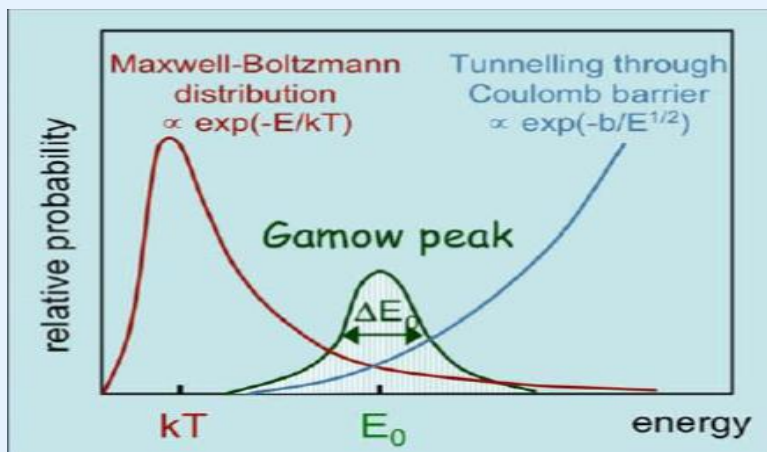
描述核反应发生快慢的物理量，定义为：

$$N_A \langle \sigma v \rangle = N_A \left(\frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} (kT)^{-3/2} \int \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE$$

●伽莫夫峰(Gamow peak)

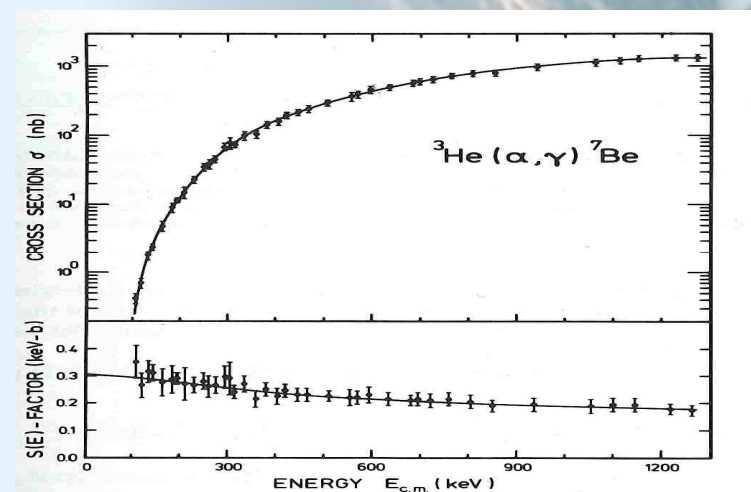
原子核燃烧(反应)的最有效能区，其峰值为：

$$E_0 = 1.22(Z_1^2 Z_2^2 \mu T_6^2)^{1/3} \text{ keV}$$



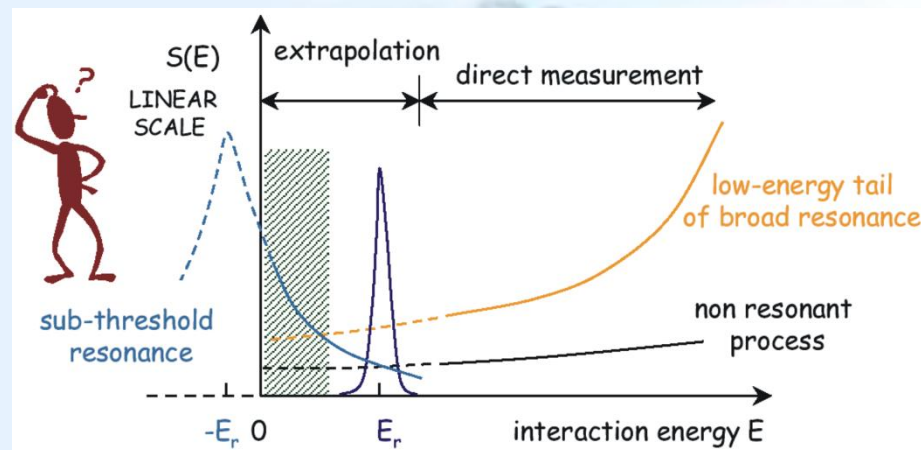
●天体物理S因子

定义为： $S(E) = E\sigma(E)\exp(2\pi\eta)$



深地核天体物理

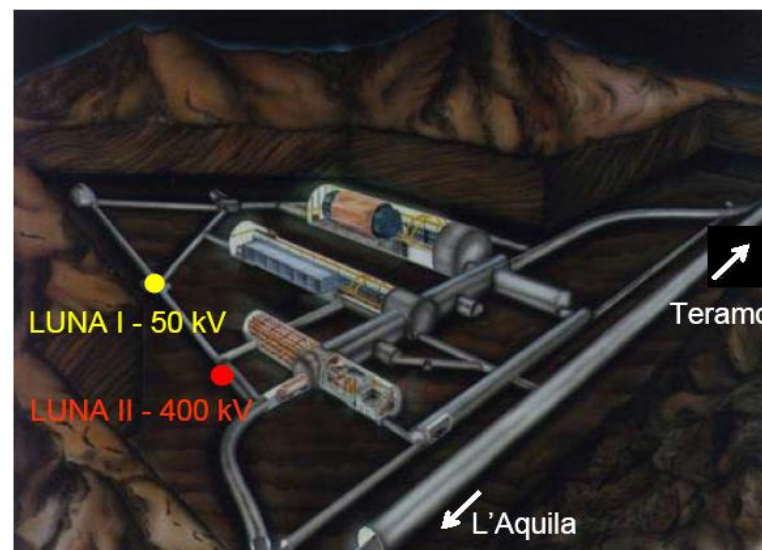
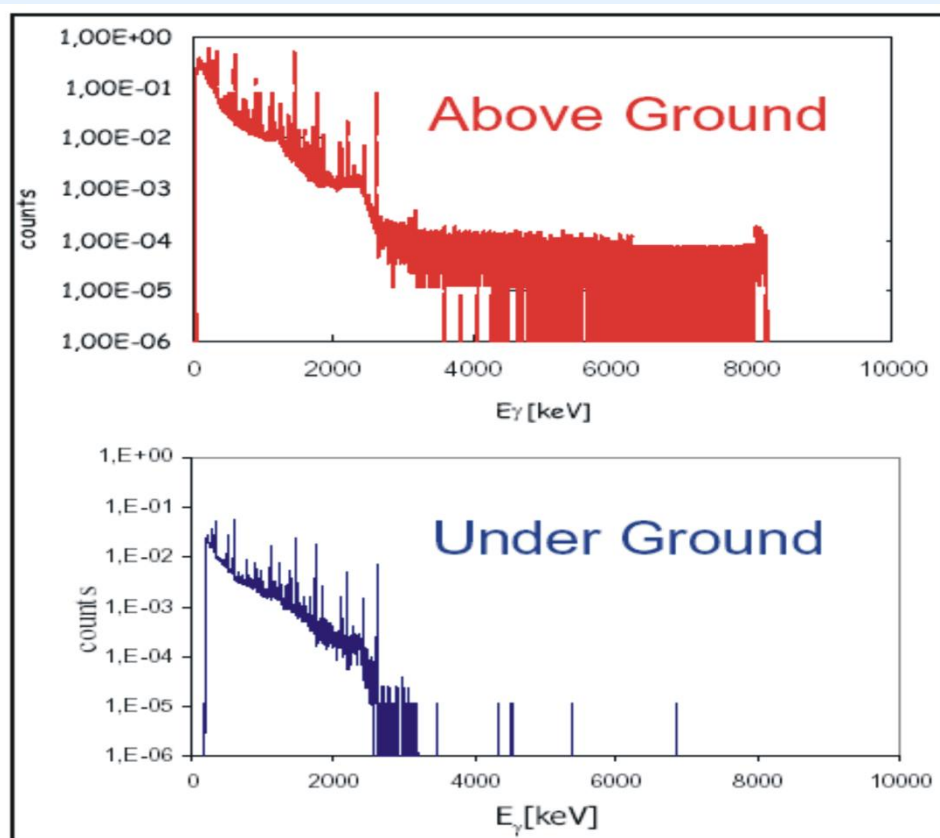
- 静态天体物理环境下，天体核过程通常发生在相对运动能量几到几百千电子伏特 (keV) 的能区 (Gamow 窗)。截面极小，地面实验因宇宙射线干扰无法精确测量。一般是从高能端外推，不定因素太多。



- 需要深地低本底环境，进行Gamow窗能区核反应截面的直接测量。

国内外研究现状

目前世界上正在运行的只有意大利Gran Sasso国家实验室的LUNA装置(独此一家!)



实验结果:

深地实验室可以将宇宙射线造成的 γ 射线本底降低1万多倍!
热中子流的影响减少1000倍!

LUNA发表文章统计

(主要在1996至2012年间)

期 刊	文章数 (篇)
PRL	4
PLB	6
PRC	7
NPA	4
JPG	4
EPJA	9
NIMA	3
Astron & Astronomy	2
Astrophysical Journal	1
总 计	40

国内外发展动向

- 欧洲：

建议升级意大利Gran Sasso地下实验室LUNA研究装置；英国Boulby地下实验室ELENA项目将建一台3 MV电压的加速器；罗马尼亚也有在地下盐矿建立核天体物理实验室的想法。

- 美国

地下科学和工程实验室DUSEL项目包含核天体物理相关的科学课题。

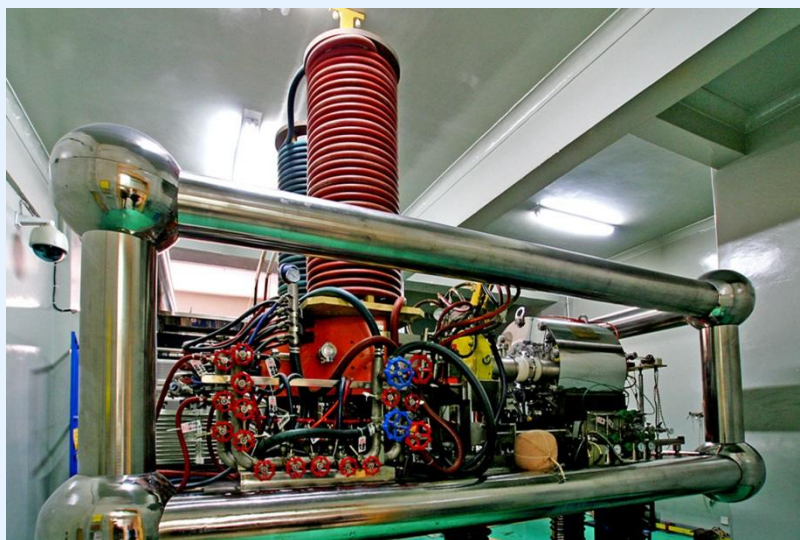
- 国内：

尚无深地低本底实验装置。

近物所低能核天体 物理前期实验研究



近物所320kV高压平台



高压平台+加速管

高压平台+离子源

束流配送系统

低能核天体物理研究

研究团队



[文章: S.Z. Chen, J.J. He* *et al.*, NIMA, submitted]

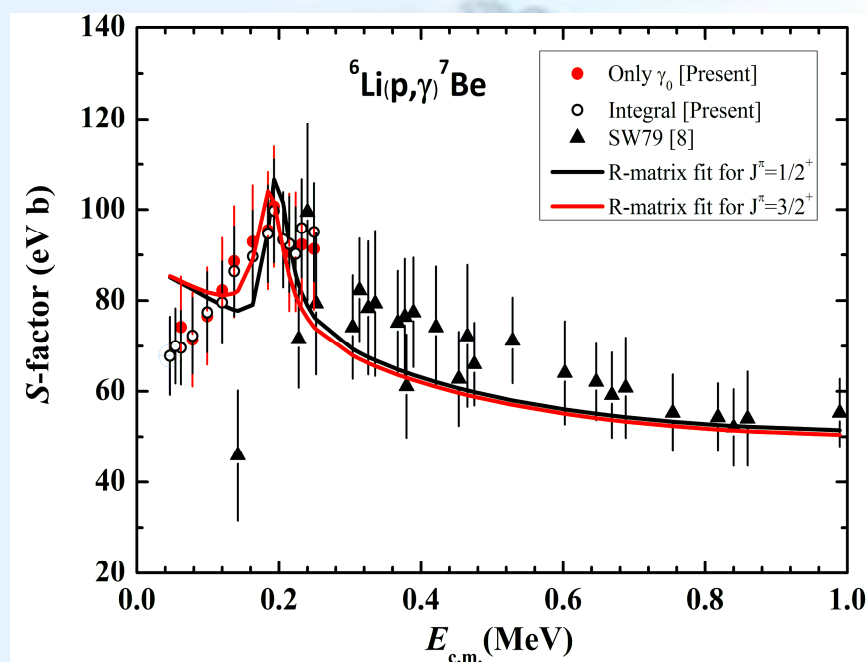
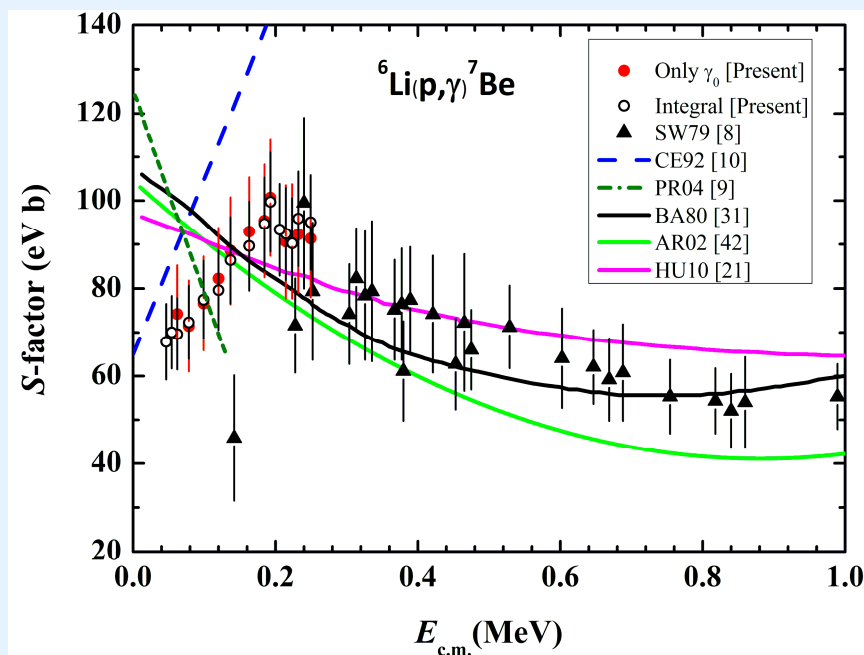


本底抑制因子: 3倍



低能核反应截面测量

${}^6\text{Li}(p,\gamma){}^7\text{Be}$ 核反应的天体物理S因子测量

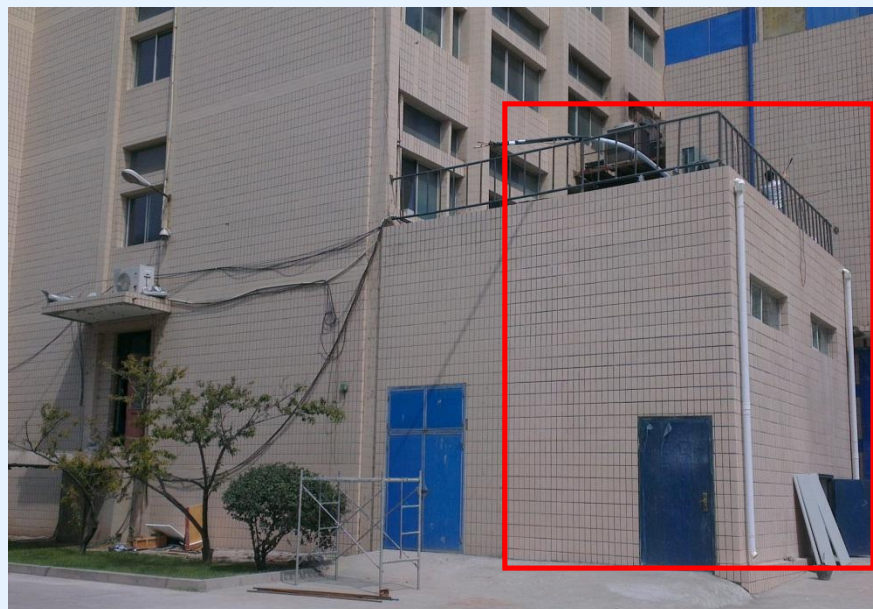


结论： 在小于200 keV的低能区，测得的天体物理S因子随能量的降低而减小，这与所有以前的理论预言都不相符。预言在 ${}^7\text{Be}$ 中很可能存在一个新激发态。同时，提醒人们在低能区简单的理论外推有时是很不可靠的，迫切需要直接测量的实验数据。

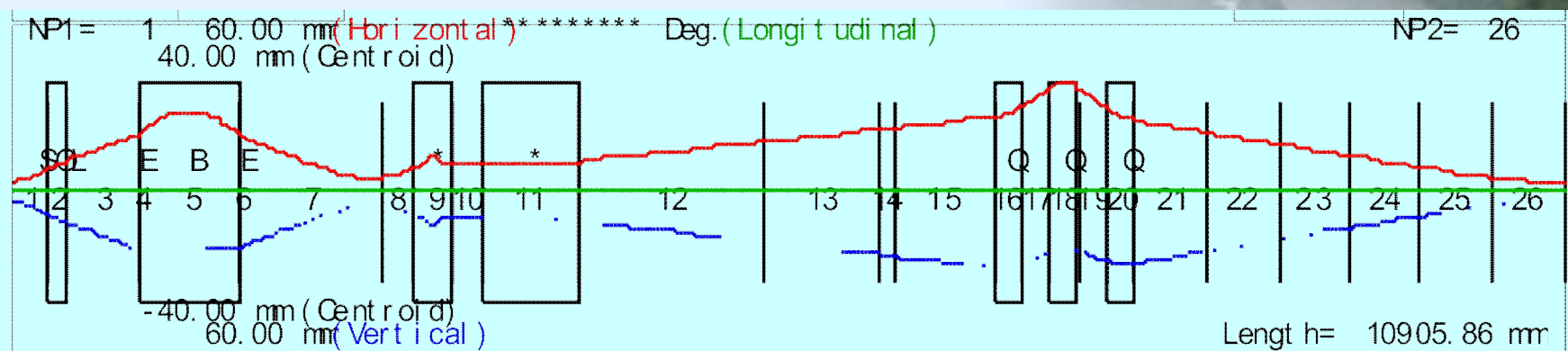
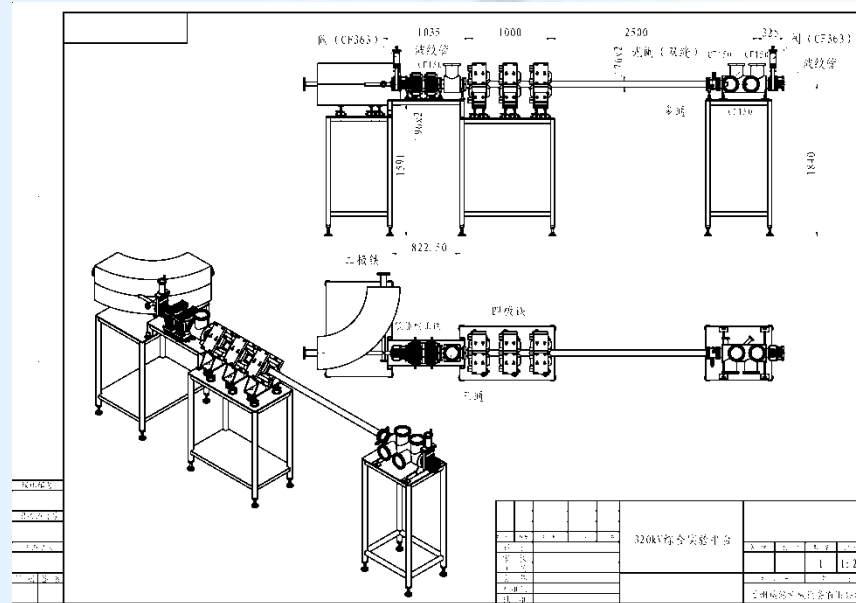
[文章：J.J. He, S.Z. Chen *et al.*, Physics Letters B (2013), in press]

低能核天体物理实验室(新建)

实验室



束流线



$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应截面直接测量(挑战)

科学问题：天体物理慢中子俘获s过程悬而未决的中子流来源问题

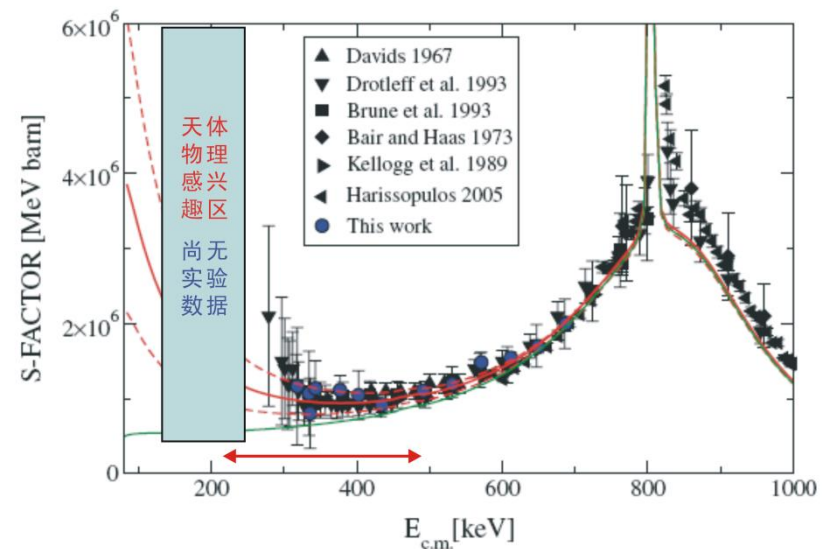
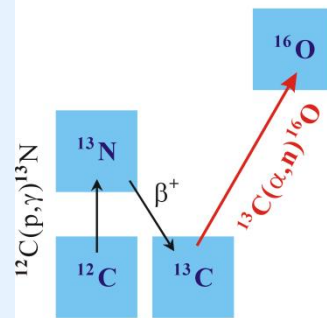
科学意义：这一关键核反应的截面对人们理解处于AGB星演化阶段的红巨星中重元素的核合成具有非常重要的意义。

研究现状：该反应在低能区的实验数据尚属空白。

天体物理场所：
 $1.5 - 3 M_{\odot}$ AGB星

典型温度：
 $T_9 \sim 0.09 - 0.27$

典型密度：
 $\rho \sim 10^3 - 10^5 \text{ g/cm}^3$



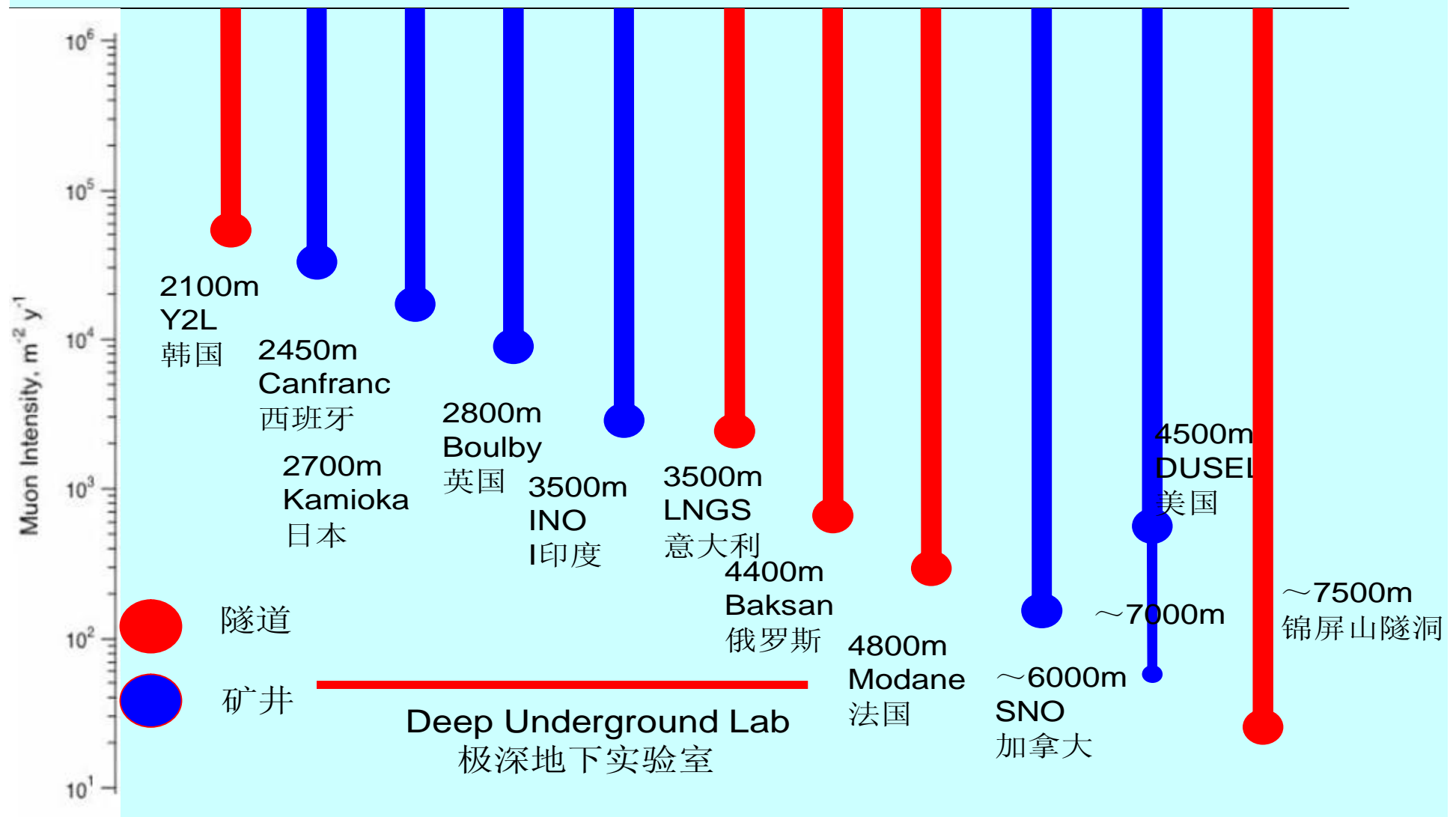
研究目标：

为未来国家深地实验室的建设奠定技术及物理基础

深地核天体构想

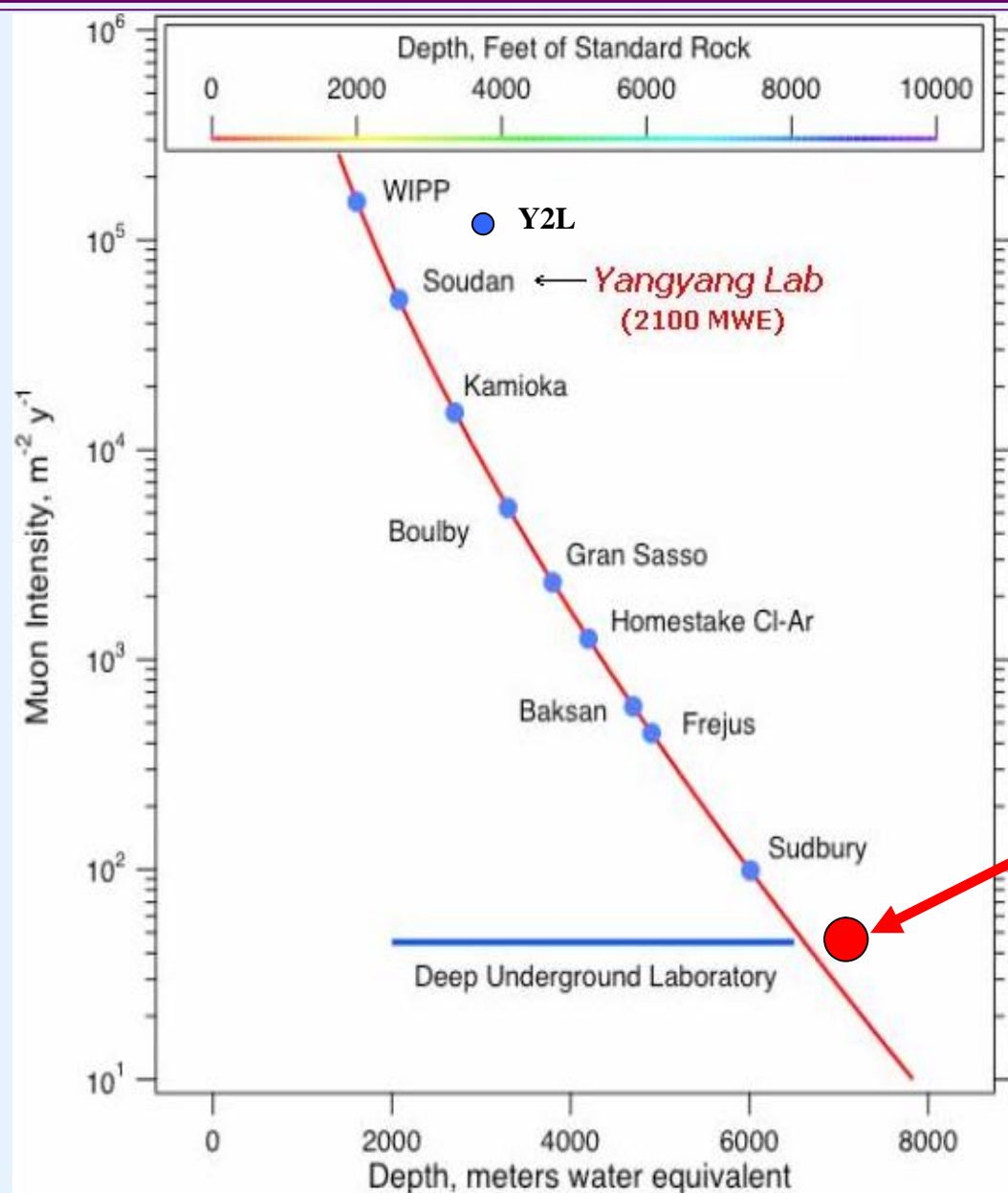


国际地下实验室埋深比较



(单位: 等效水厚)

地下实验室宇宙线通量比较



● 宇宙线通量:
比意大利Gran Sasso地
下实验室低约100倍;
比韩国Y2L地下实验低
3000倍以上;

核天体物理科学目标

主要研究恒星中氢、氦燃烧以及超新星爆发等过程相关的一些关键核反应：

(1) 主序恒星氢燃烧过程中的关键核反应，涉及太阳中微子问题和大质量恒星的演化，如： ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)$ 反应， ${}^{17,18}\text{O}$ 和 ${}^{19}\text{F}$ 的 (p, γ) 和 (p, α) 反应，等

(2) 研究发生在氦燃烧阶段的一些关键反应，涉及中子星及黑洞的形成等，如： ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16,18}\text{O}$ 、 ${}^{20,22}\text{Ne}$ 的 (α, γ) 反应，等

(3) 天体物理慢中子s俘获过程悬而未决的问题中子流来源相关的关键核反应，涉及宇宙中重元素的合成等，如： ${}^{13}\text{C}$ 、 ${}^{17}\text{O}$ 和 ${}^{22}\text{Ne}$ 的 (α, n) 反应，等

建设方案（一期）

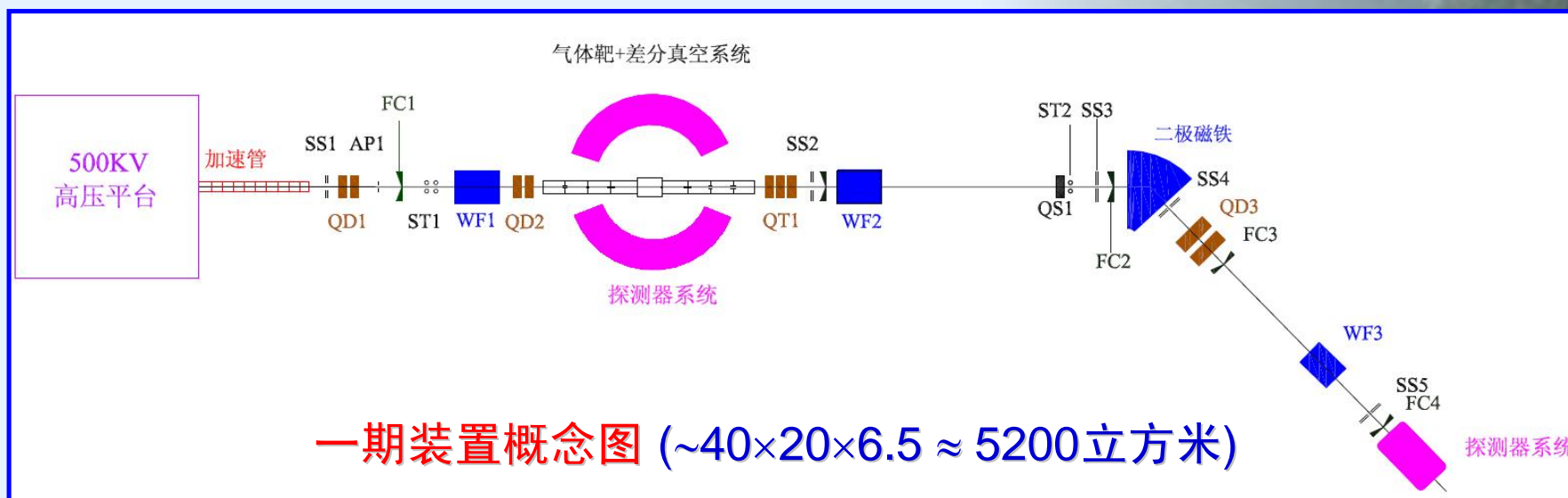
- 加速器系统：500 kV高压平台加速器
- 无窗靶系统：差分抽气系统
- 实验探测装置：带电粒子探测器、 γ ,n探测器阵列、反冲核测量磁谱仪
- 配套实验室

主要指标：

离子能量范围：50 - 500 keV（一期），
可提高到5 MeV（二期）；

离子种类：质子到铁离子(p - Fe)；

离子束流强度：气体离子流强1 mA，
金属离子束流强略低。



装置的先进性

- 可加速的离子束比目前国际上已有的地下实验室可提供的离子束**能量范围宽**，**离子种类多**；
- 流强比目前国际上已有的地下实验室可提供的离子束**流强强几倍**；
- 采用反冲核与 γ 射线符合测量，**可进一步降低本底**。

可行性分析

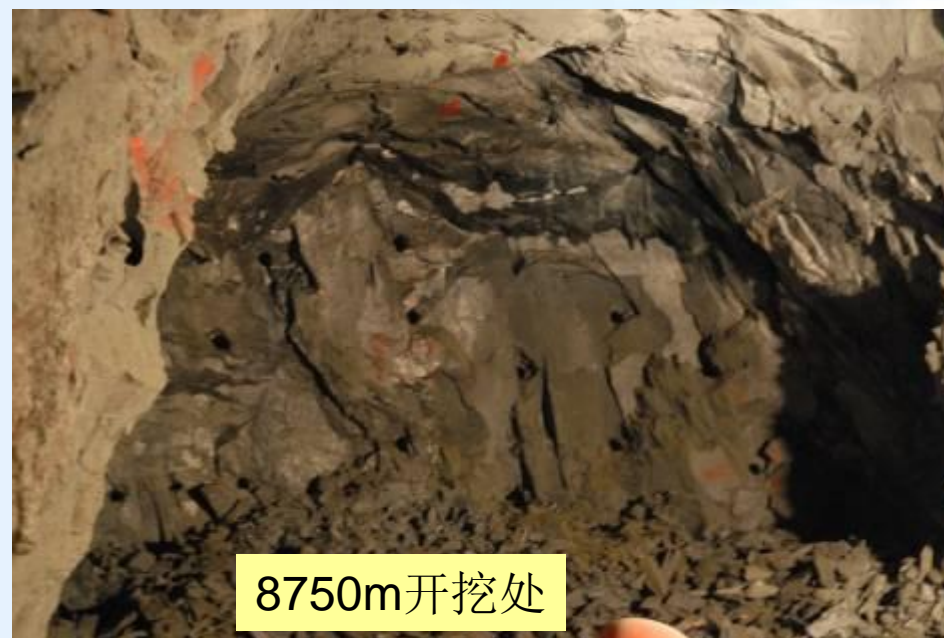
深地核天体物理研究所需的条件&技术均有积累:

- 自行研制的320 kV高压平台加速器正在运行
- 有研制差分抽气系统的经验（无窗气体靶系统）
- 具备丰富的各类探测器研制经验
- 具备丰富的电磁分析设备的建造经验
- 有一定的人员储备



谢谢！
敬请批评指正

8750m处采样的新鲜岩石样品放射性含量测量结果表明，其放射性活度低于北京地表正常水平几十倍到几百倍。



	钾-40 (1460keV)	镭-226 (609keV)	钍-232 (911keV)
开挖处岩石样品 (8750m处)	< 1.1	1.8 ± 0.2	< 0.27
北京地表正常水平	600	25	50

国内外现状—地面实验

爆发性天体物理环境：

- 反应截面测量

- 直接测量

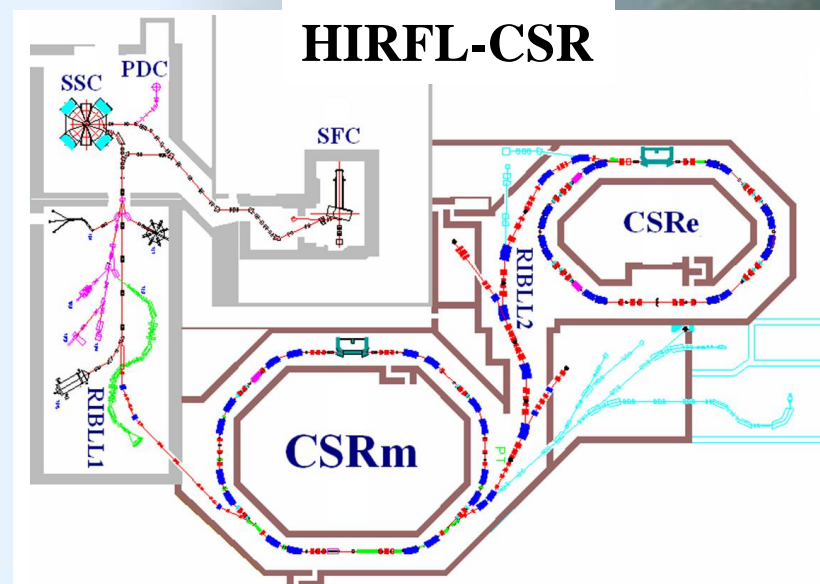
- 加拿大，美国，比利时等

- 间接测量

- 美，日，德，中国等

- 质量、衰变测量

- (存储环：德国，中国)



LUNA上的典型实验

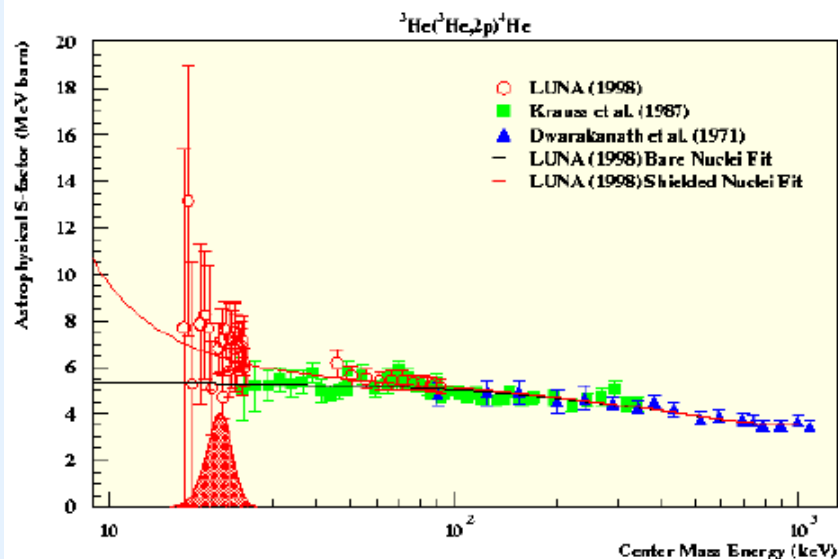


图1: ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ 反应的天体物理S因子

这一反应在质子-质子链(pp-chain)中扮演着非常重要的角色，很大程度上影响了人们对太阳中微子亮度的计算。

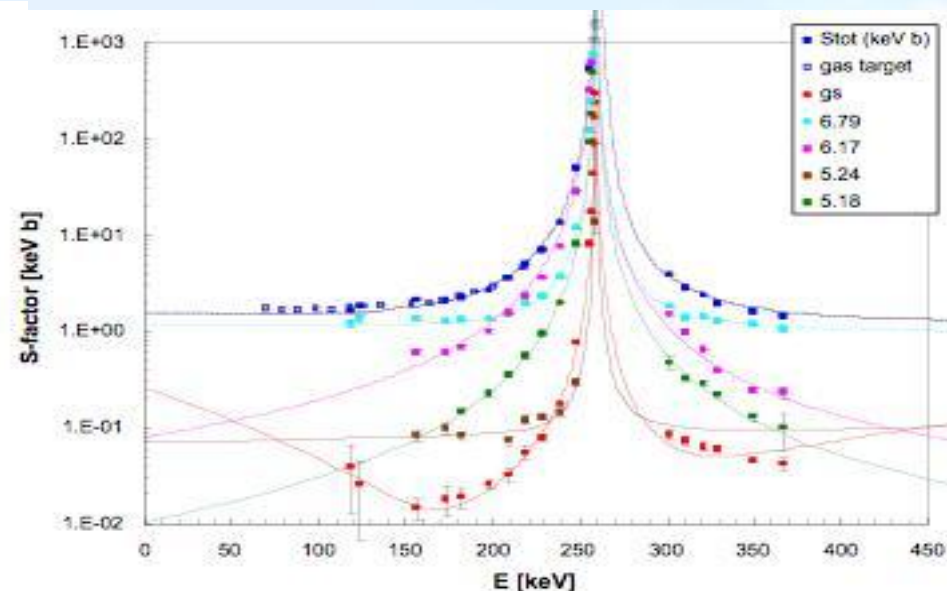


图2: ${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$ 反应的天体物理S因子

LUNA的实验结果:

- 使预言的太阳中CNO循环对能量产生的贡献减少了一半，使CNO循环的中微子流减少了一半；
- Globular Clusters的年龄比原来增加了10亿年；
- 计算宇宙年龄的下限为 140 ± 10 亿年 (宇宙微波辐射测量为: 137 ± 2 亿年)。

LUNA发表文章统计

(主要在1996至2012年间)

期 刊	文章数 (篇)
PRL	4
PLB	6
PRC	7
NPA	4
JPG	4
EPJA	9
NIMA	3
Astron & Astronomy	2
Astrophys J	1

典型实验举例

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应:

- 它在许多恒星的演化中都起着重要的作用，其截面不仅对中等质量核素的合成，而且对超新星爆发后的残留物都有决定性的影响。
- 典型的伽莫夫能量为0.3MeV(1.8亿度)，天体物理模型计算要求S因子的测量精度要好于10%。
- 尽管近40年来实验上做过多方面的巨大努力，但因其截面甚小，物理过程复杂，特别是受本底水平的制约，目前测量仍局限在0.9MeV以上的能区，且测量精度与模型计算的要求相去甚远。

