

锦屏山深地实验室核天体物理研讨会报告

我国地下核天体物理实验JUNA研究建议

柳卫平

中国原子能科学研究院

2013年8月21日，西昌邛海宾馆

名字的由来

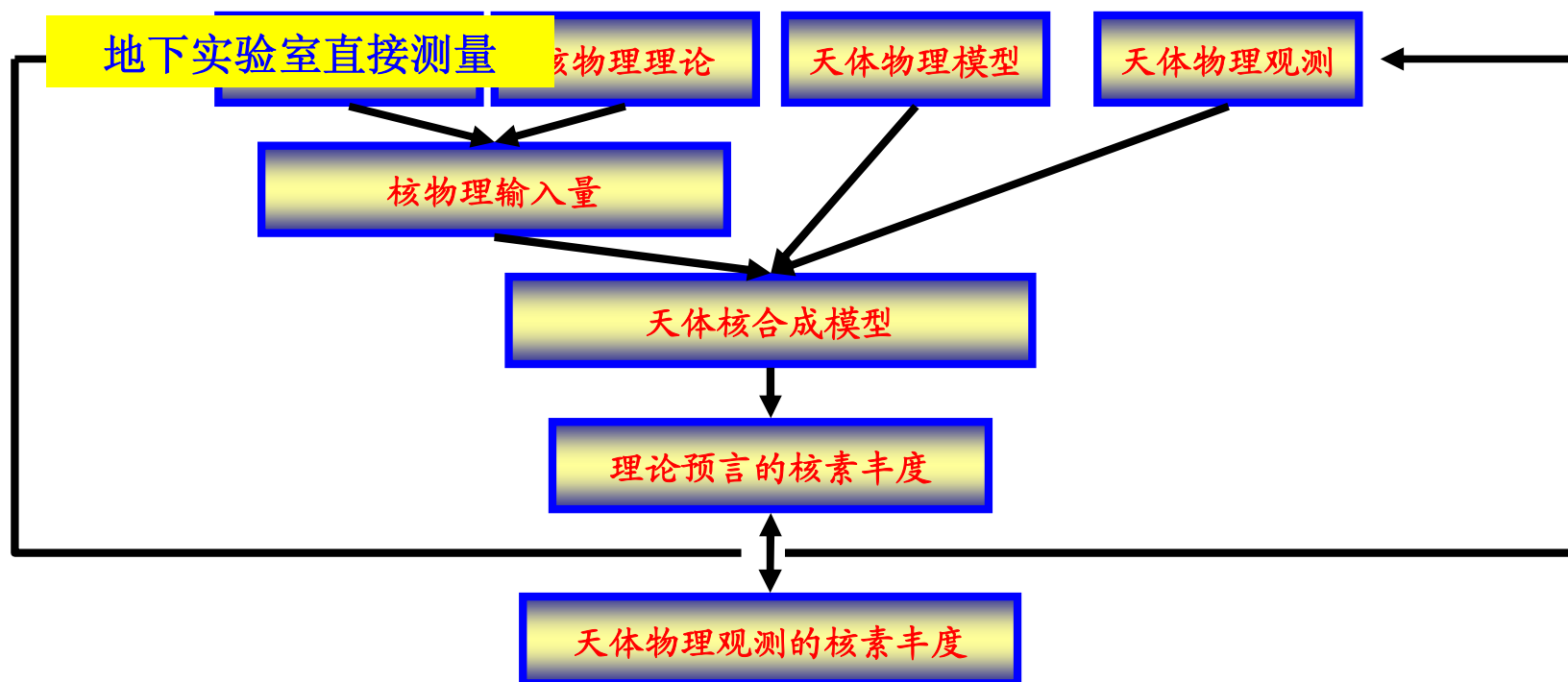
- 锦屏山核天体物理地下实验
- Jinpin mountain underground nuclear astrophysics experiment
- JUNA

报告内容概要

- 地下核天体物理实验研究的重要性
 - 连钢、何建军的报告
- 国际地下实验室进展
 - 连钢、何建军的报告
- 我国的发展设想
 - 具体见连钢报告
- 发展思路建议和阶段目标展望
- 其他报告
 - 锦屏山实验室进展，岳骞、赵力的报告
 - 其他工作，叶沿林，孙汉城的报告

核天体物理的研究内容

- 对微观尺度(10^{-15} m)的核过程的了解, 可以解释对宇观尺度(10^{14} m)的天文观测, 构成了学科发展和交叉的动力和挑战, 使核天体物理始终处于物理学科的前沿
- 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, 自然界中化学元素的起源



核天体物理的形成与发展



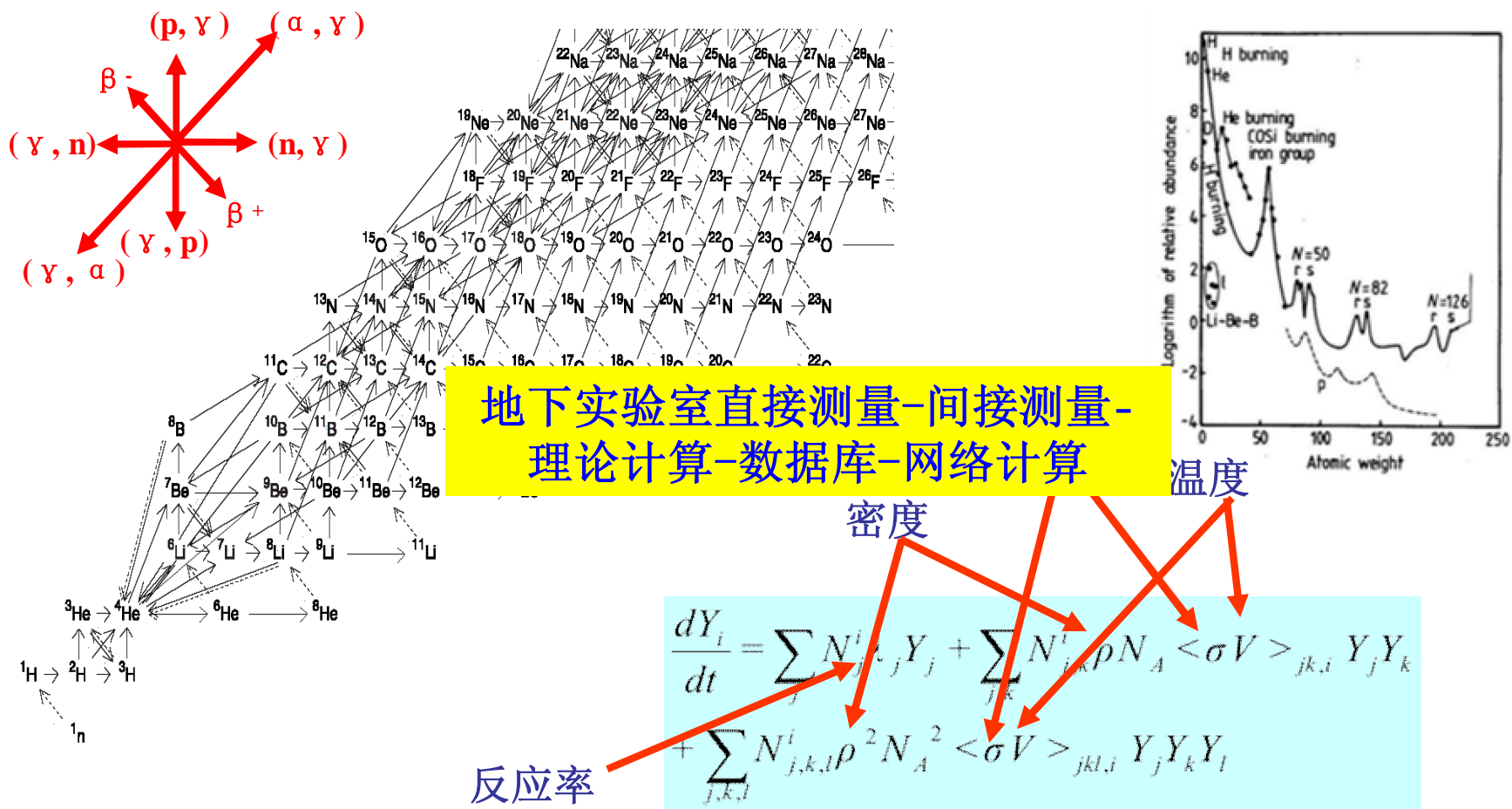
30年代，**汉斯·贝特**提出太阳和恒星的能源：氢通过pp反应链和CNO循环转化为氦的聚变反应。获得

- 90年代以来，地下实验室的核天体物理反应直接测量的兴起
- 90年代以来，各种间接测量方法的建立
- 90年代以来，质量、衰变测量和网络计算的发展
- 2000年以来，JINA核天体物理网络的建立
- 2010年以来，在国际大科学工程上开展的核天体物理研究和地下实验核天体物理的发展



丢失之谜”。二人与贾科尼分享2002年诺贝尔物理奖。

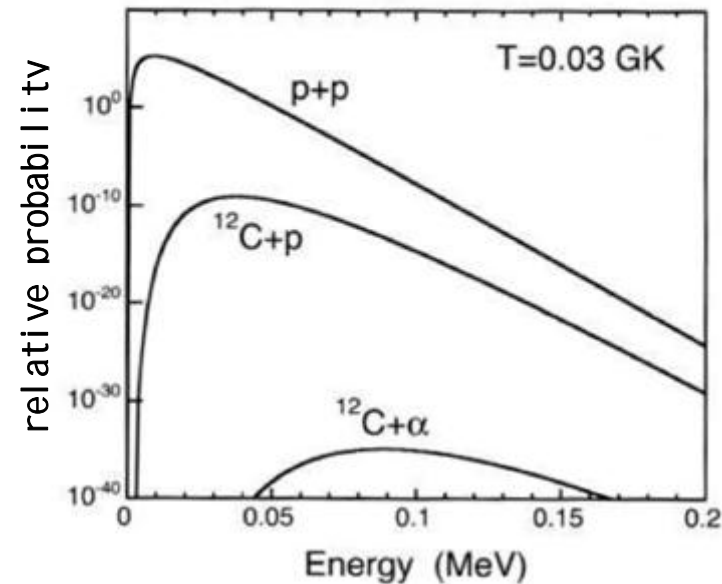
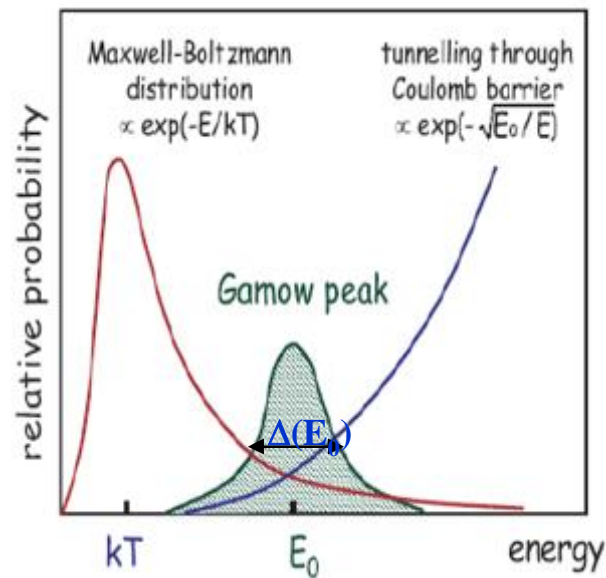
元素核合成网络计算



网络方程:一套非线性微分方程, 包括核反应率、光致分裂反应率、 β 衰变和电子俘获率以及中微子引起的反应率。

实验测量的挑战

$$\sigma(E) = S(E) \exp(-2\pi\eta) \frac{1}{E}, \quad N_A \langle \sigma v \rangle = 3.7313 \times 10^{10} \mu^{-1/2} T_9^{-3/2} \int_0^\infty \sigma(E) E \exp(-11.605 E/T_9) dE,$$



- 天体能区的反应截面极低
- 采用由较高能区的实验数据向下外推和进行间接测量
- 本底极低的深地实验室直接测量是最重要的基础数据！

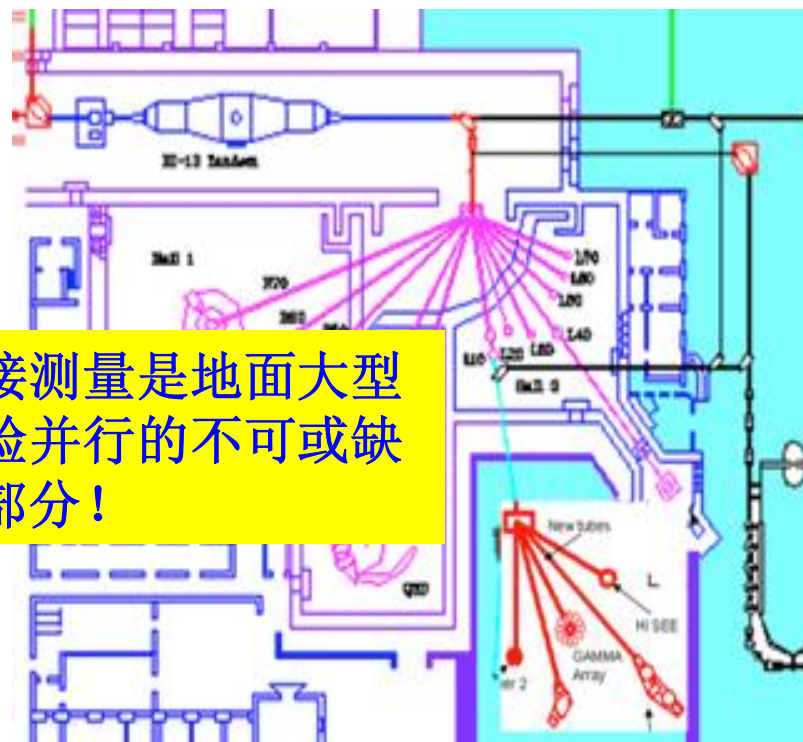
我国目前的核天体物理研究平台

兰州CSR：衰变和质量测量

北京串列加速器：间接测量



地下实验室直接测量是地面大型加速器平台实验并行的不可或缺的部分！



在建或计划建造的实验装置：HI-13升级工程，SLEGS；大科学装置HIAF，**地下实验室**，北京ISOL等

当前核天体物理关键科学问题

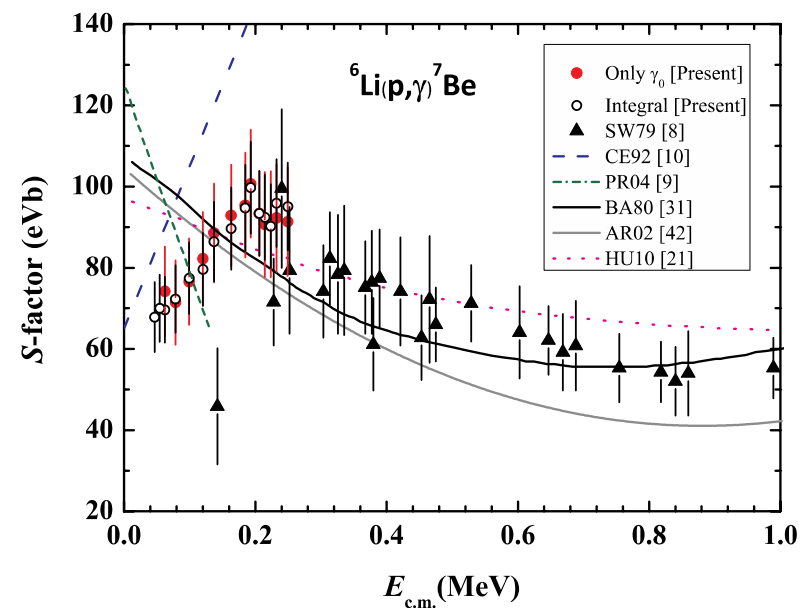
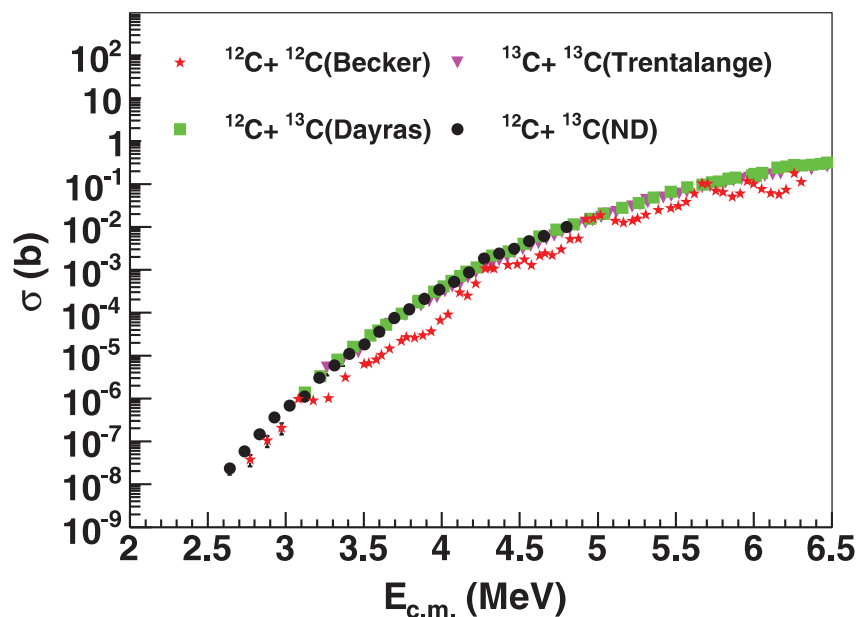
- 平稳核燃烧重要反应的直接测量，地下实验室！
- 带电粒子核天体物理反应截面的合理低能外推，地下实验室！
- 爆发性核燃烧r和rp过程关键核反应的间接测量
- r和rp过程的核素质量、衰变和共振性质测量
- 对以上过程的反应、衰变、质量和中微子作用的理论计算
- 中微子震荡和与核作用对恒星演化与元素核合成的影响
- 核天体物理数据库和网络计算方程构建
- 元素丰度天文观测和对核素合成场所的推断
- 在关键科学问题中占有重要地位！

我国核天体物理研究

- 直接测量, ${}^6\text{Li} (p, \gamma) {}^7\text{Be}$ 等
- 间接测量, ${}^7\text{Be} (p, \gamma) {}^8\text{B}$, ..., ${}^{13}\text{C} (\alpha, n) {}^{16}\text{O}$ 中子源反应等
- 衰变测量, rp过程中 ${}^{53}\text{Ni}$ 附近核的衰变等
- 质量测量, rp过程核等
- 理论计算, 衰变, 质量
- 网络计算, rp过程, r-过程
- 天文观测, NLTE, 贫金属星
- 得到基金委创新群体和重点项目、科技部973项目的支持
- 对关键科学问题进行全面研究! 但地下实验室直接测量仍然是空白!

我们群体的直接测量

为地下实验室的直接测量打下了
很好的基础！



J. J. He et al., PLB, accepted

M. Notani et al.,

PRC 85, 014607 (2012)

今年末将在加拿大TRIUMF开展
 $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$ 的直接测量

对pp链和CNO循环开展的系统工作

ANC方法:

$${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}, {}^{11}\text{C}(p, \gamma){}^{12}\text{N}, {}^{13}\text{N}(p, \gamma){}^{14}\text{O}, {}^8\text{Li}(p, \gamma){}^9\text{Be}, {}^{12}\text{N}(p, \gamma){}^{13}\text{O}$$

核谱因子方法:

$${}^8\text{Li} (n, \gamma) {}^9\text{Li}, \quad {}^6\text{Li} (n, \gamma) {}^7\text{Li}, \quad {}^{12}\text{C} (n, \gamma) {}^{13}\text{C}, \quad {}^{13}\text{C} (\alpha, n) {}^{16}\text{O}$$

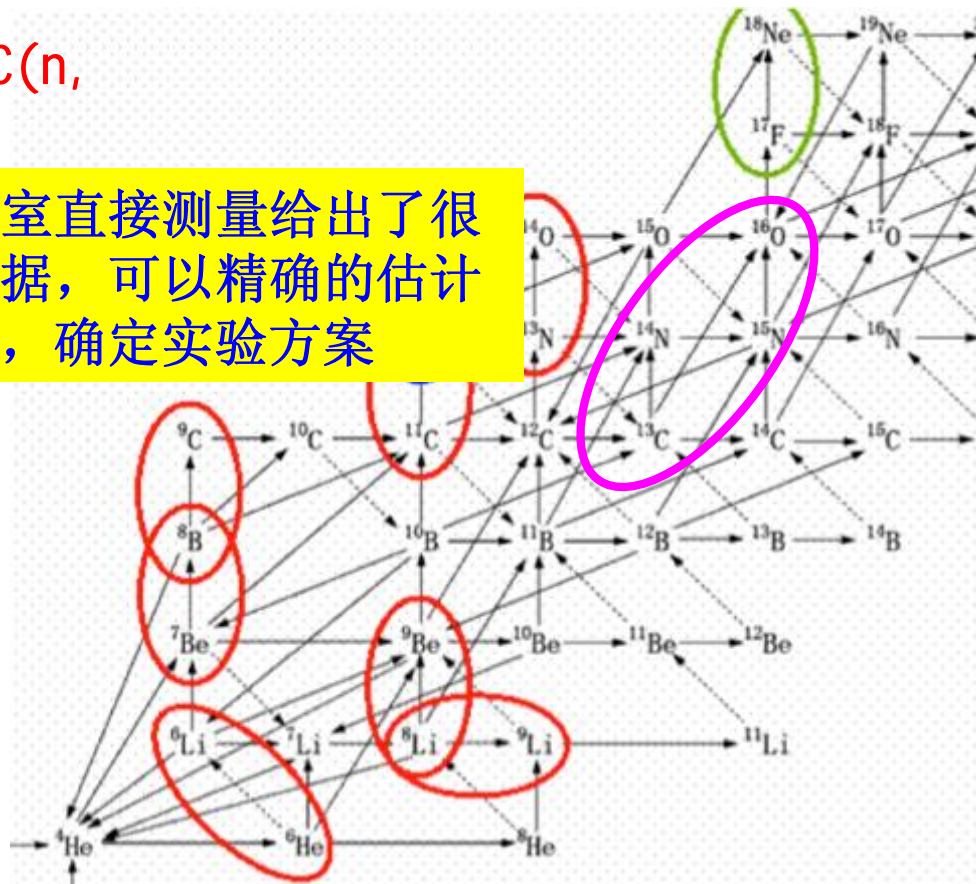
电荷对称方法:

 ${}^8\text{B}(p, \gamma){}^9\text{C}, {}^{26}\text{Si}(p,$

直接测量:

 $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$, DRAGON, 2013

为地下实验室直接测量给出了很好的初始数据，可以精确的估计计数率，确定实验方案

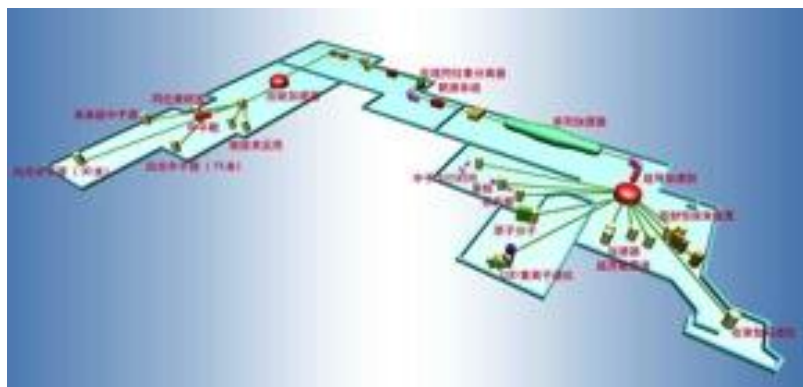


我国核天体物理发展的计划

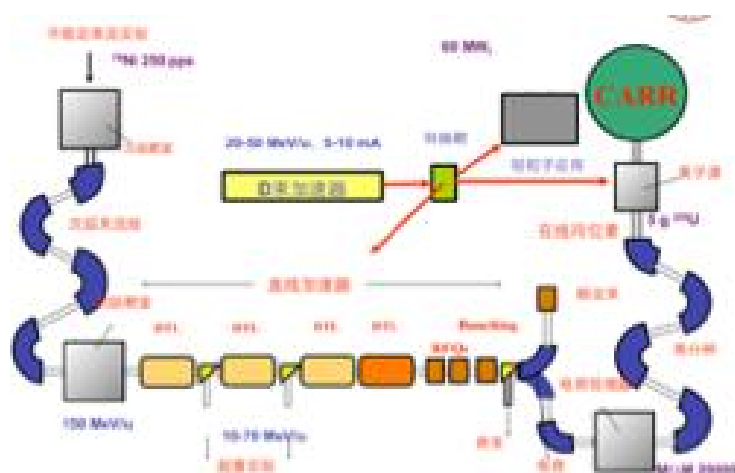
- 利用北京、兰州和上海的大科学工程，通过间接测量 (p, γ) 和 (n, γ) 反应充实关键核天体物理反应数据库，从轻核推到中等质量核区，并启动 r 过程的间接测量
- 通过国际合作，开展平稳和爆发性核过程的直接测量，检验和改进 Fowler 及 Hindrance 低能外推模型
- 开展快速质子俘获 (rp) 和快速中子俘获 (r) 过程相关核素的衰变性质和质量测量，得出核天体物理网络计算的重要输入量
- 启动锦屏山地下实验室核天体物理实验
- 通过实验与理论相结合，将反应、衰变和质量数据带入网络计算，与天文观测丰度数据相比较

我国核物理大科学平台为核天体物理发展提供机遇

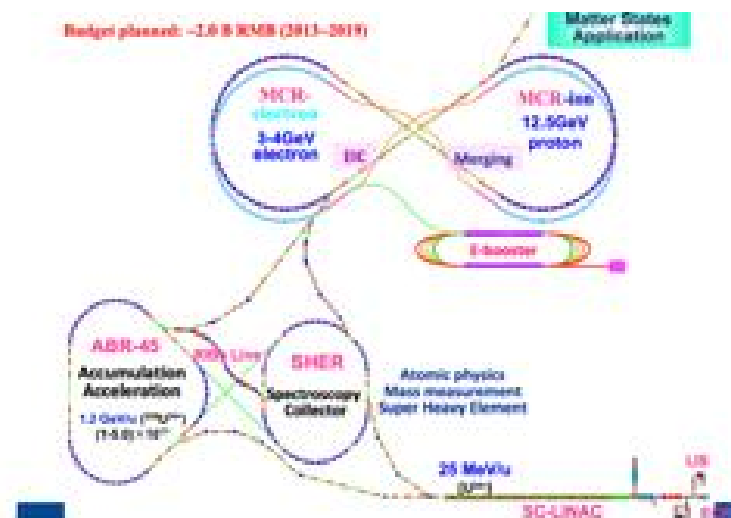
2014, 北京串列升级, BRIF



2025+, 北京 ISOL装置



2021, 重离子实验装置, HIAF



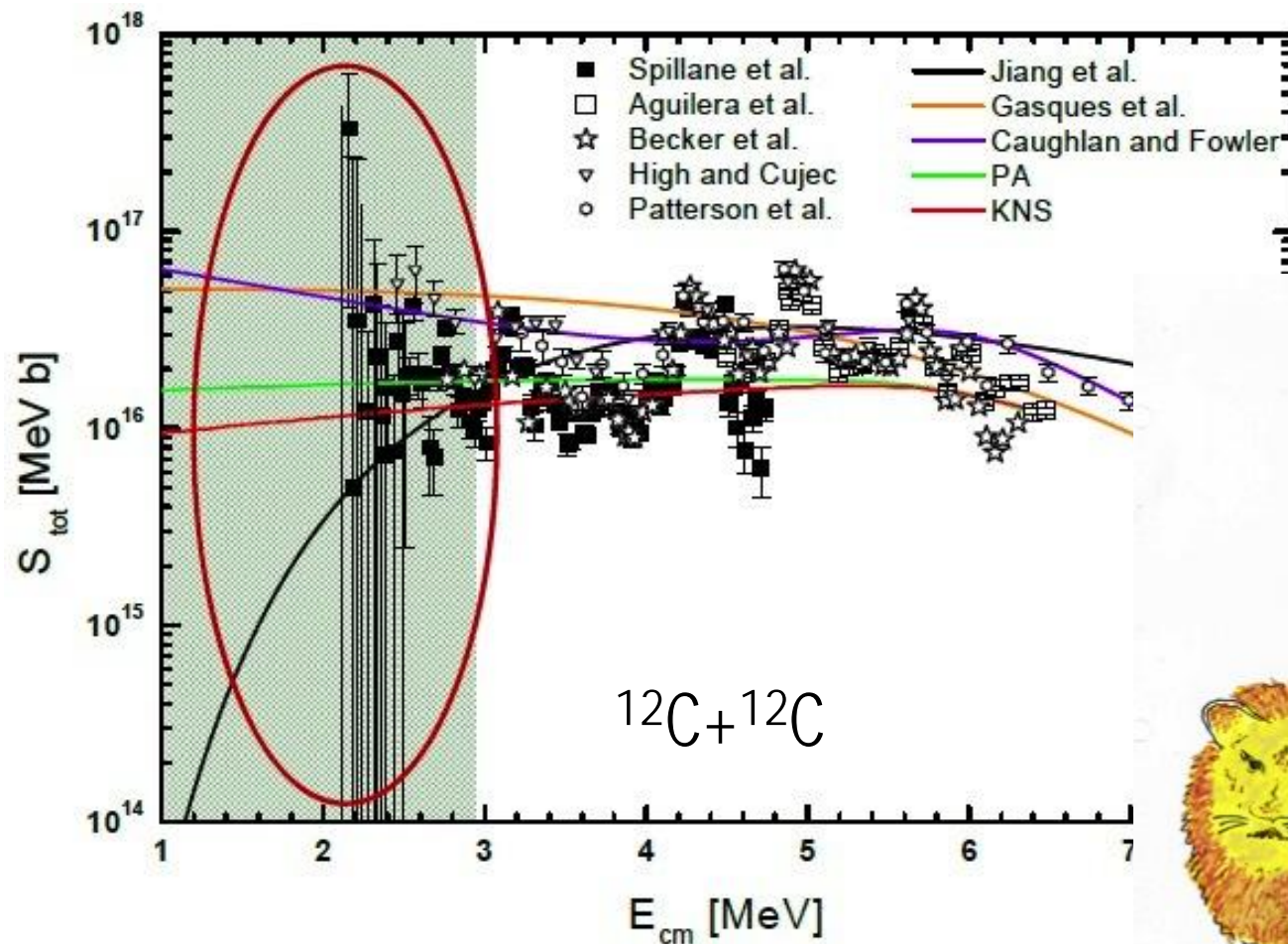
+HI

2020, 锦屏山核天体物理地下实验室

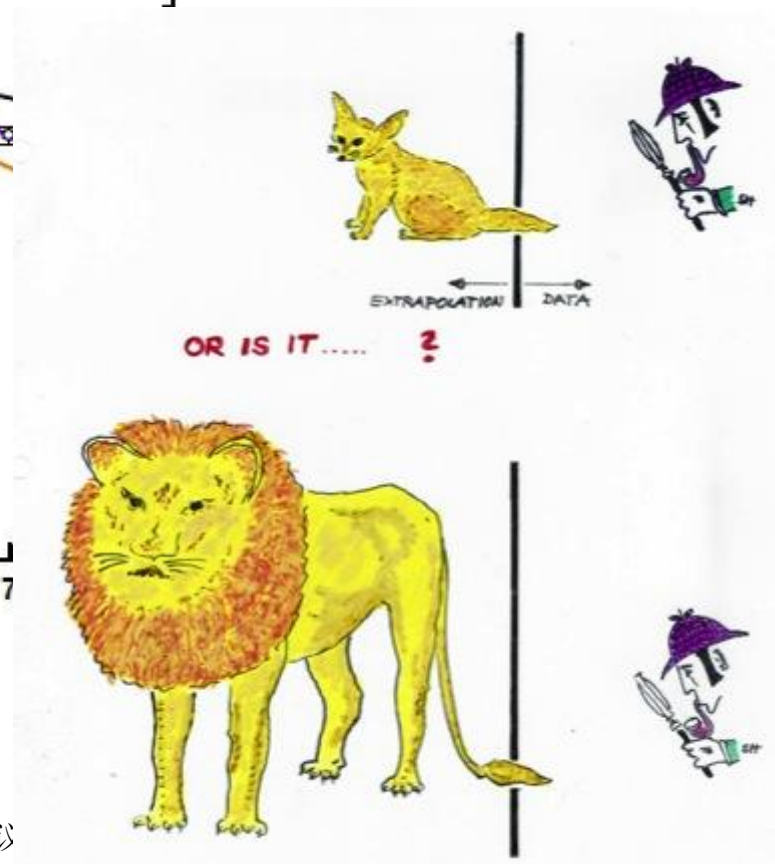


为什么要直接测量？

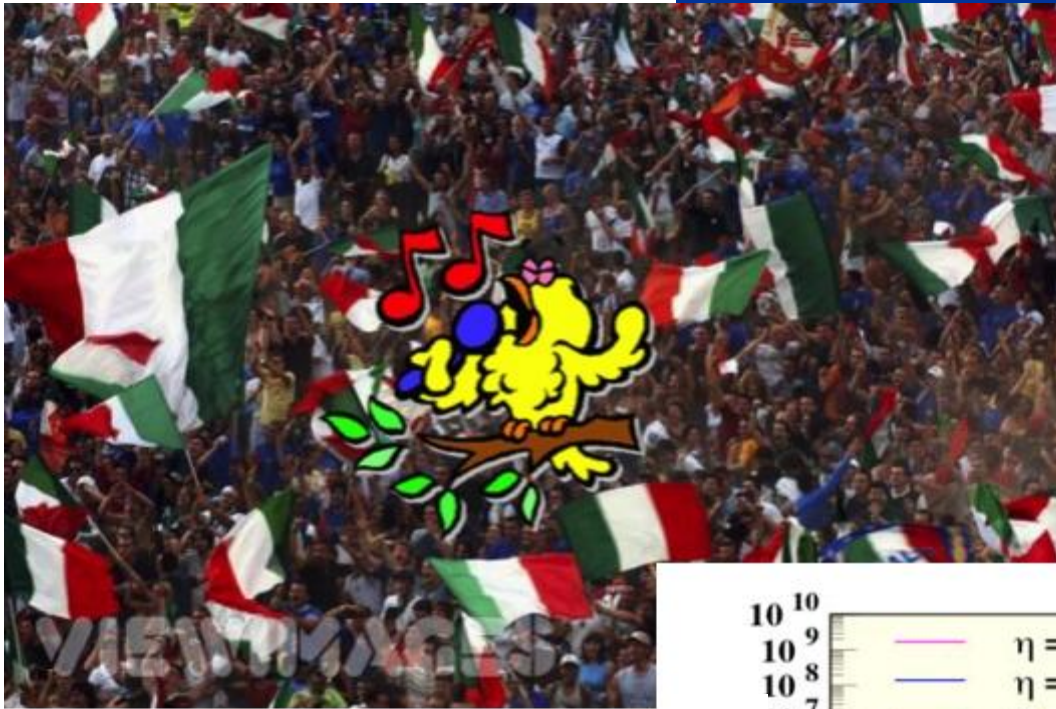
直接测量不借助任何间接实验手段和理论方法，是**最可靠**的方法



不同方法的低能外推结果相差**1000**倍

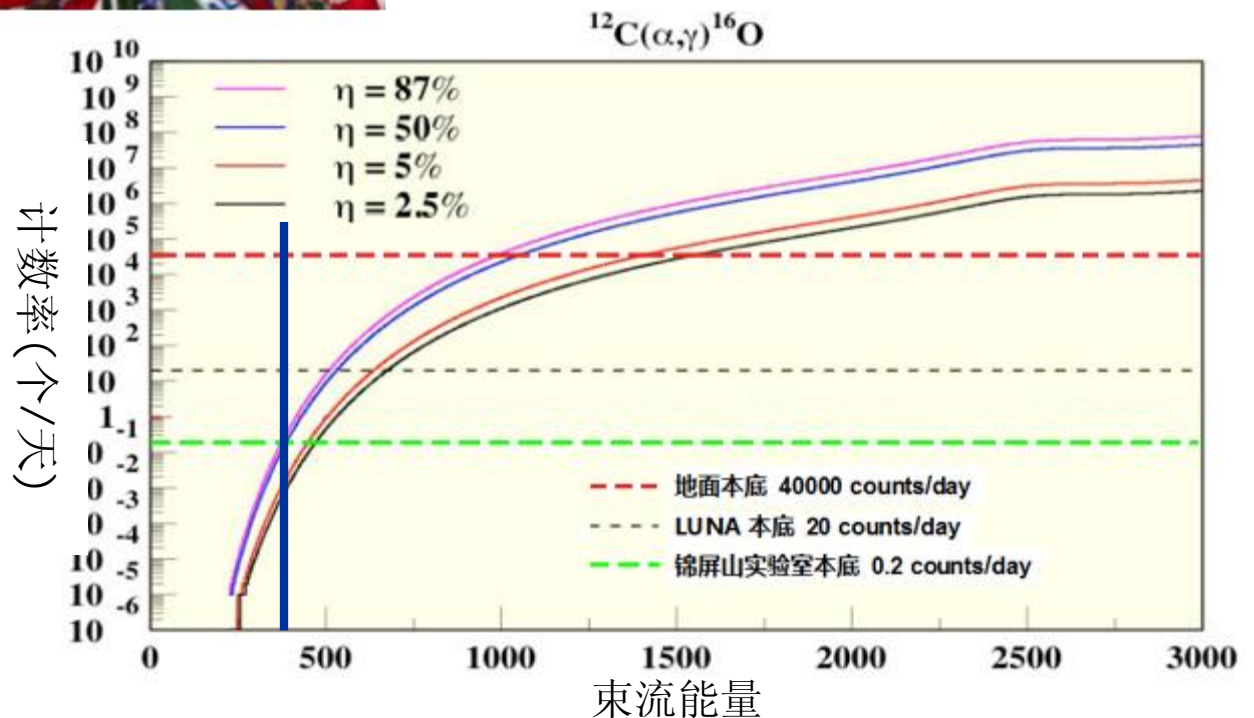


为什么要去地下开展实验？



极大地屏蔽宇宙线噪声，
提供极低本底测量环境，
有利于**微弱信号**的精确
测量——必要性

本底可降低**20万倍**，
地面实验室200000选1，
地下实验室2选1



国际地下实验室的发展情况

地下核天体物理实验室的国际现状 (1+3)

1个已运行的项目

意大利格兰萨索, LUNA

加速器可提供p、 ^4He 束流

束流能量低 (400kV)

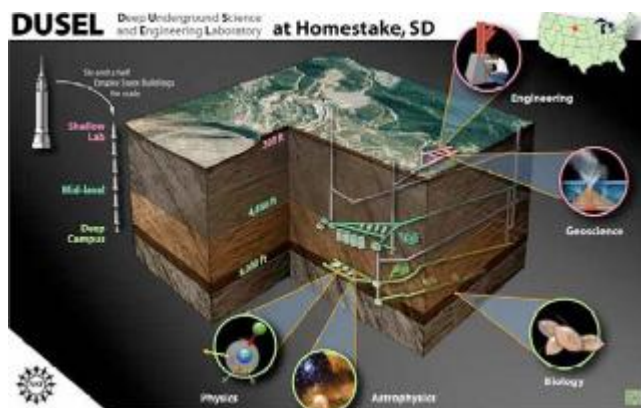
继续升级存在经费限制



3个计划中的项目

美国南达科他州
霍姆斯特克金矿

DIANA



2013-9-3



CUNA

英国北约克郡

博尔比盐矿

ELENA



地下实验室的比较

实验室	国家	岩石深度, 米	加速器束流, KV, 粒子	投入运行时间
LUNA	意大利	1400	400, p, 4He	1998
LUNA MV	意大利	1400	3500, p到Ni	经费落实中
DIANA	美国	1650	400, p, 4He	项目停滞
CUNA	西班牙	850	3500	财务未落实
ELENA	英国	1100	3000	财务未落实
JUNA	中国	2400	4000,p到Ni	2019

面临激烈竞争，不过锦屏山地理最好，我国经济最好，仍具有优势！

核天体物理关键科学问题-地下实验室

- 核天体物理实验的圣杯

- $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 直接测量

- 氦燃烧阶段 ^{14}N , ^{15}N , ^{18}O 的 (α, γ) 直接测量

- 世纪之谜的第一个问题“重元素的来源”
这些反应均需地下实验室直接测量

- 中子源 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 、 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 直接测量

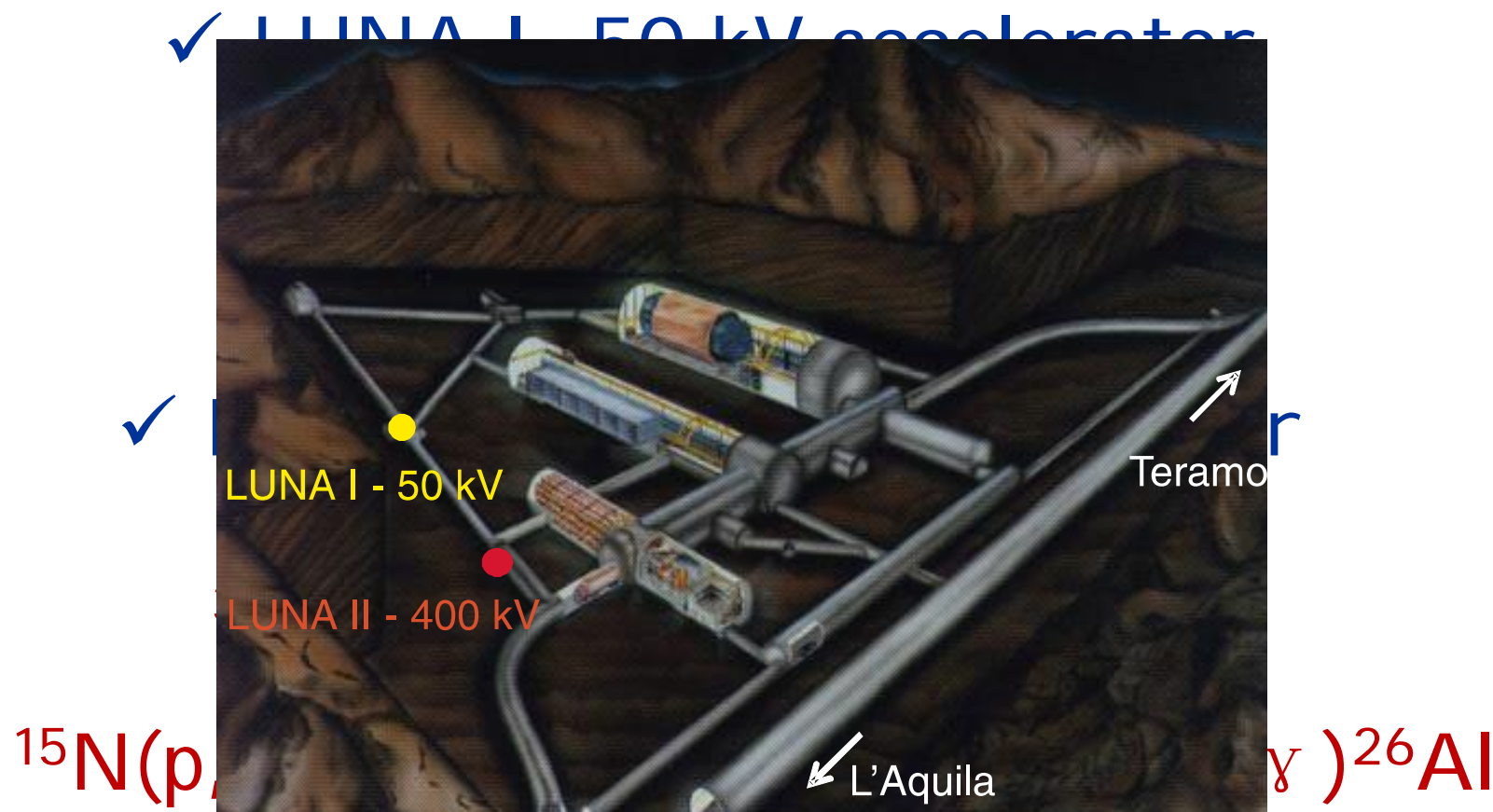
- 大质量恒星的演化和命运

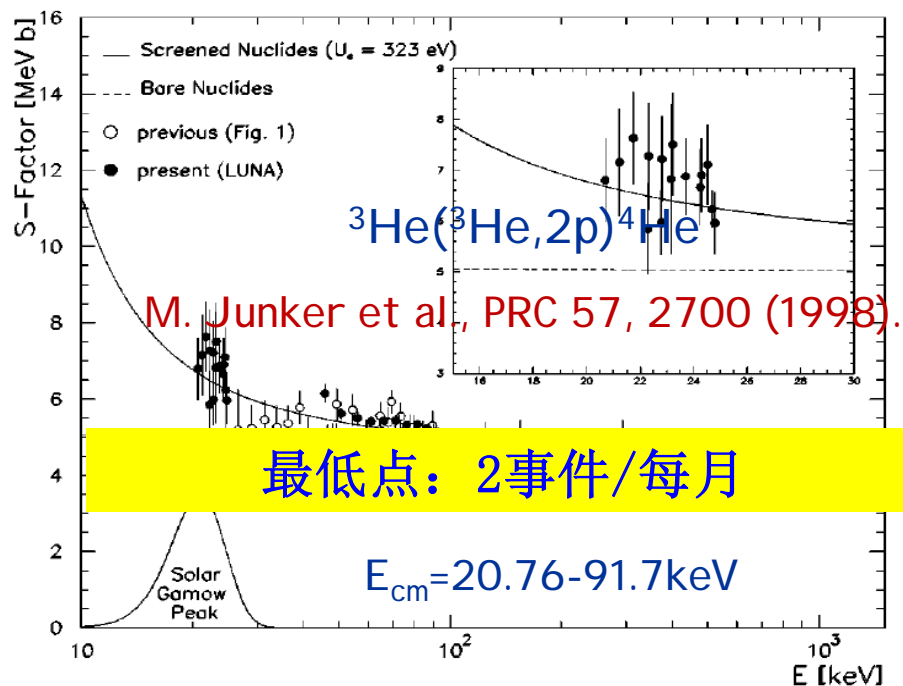
- 碳燃烧阶段 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 的直接测量

- AGB星核合成、新星爆发、星系组分

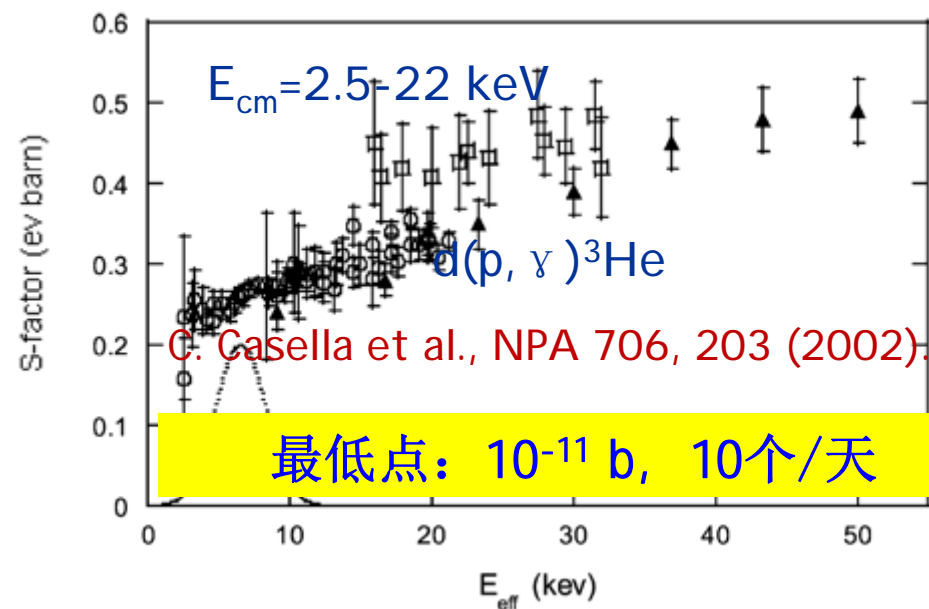
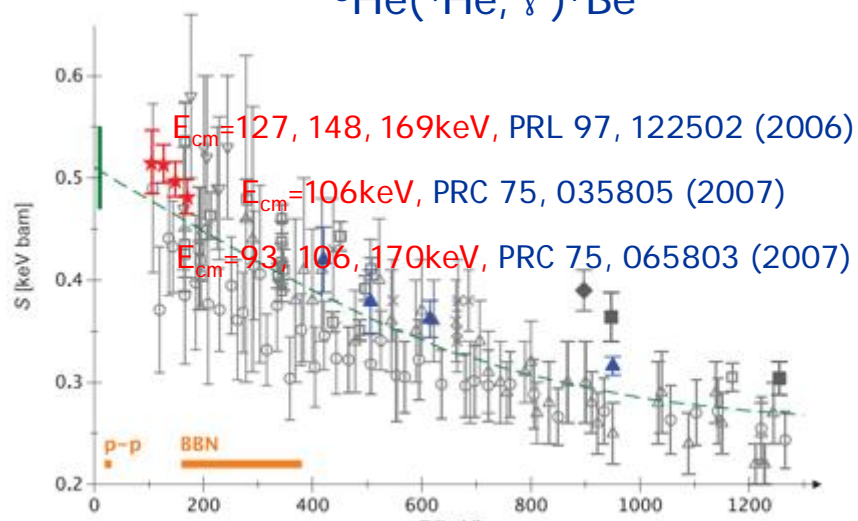
- Ne、Na、Mg、Al 等元素合成 (p, α) 、 (p, γ) 直接测量

LUNA已经完成的7个直接测量实验





$^3\text{He}(^4\text{He}, \gamma)^7\text{Be}$



$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$

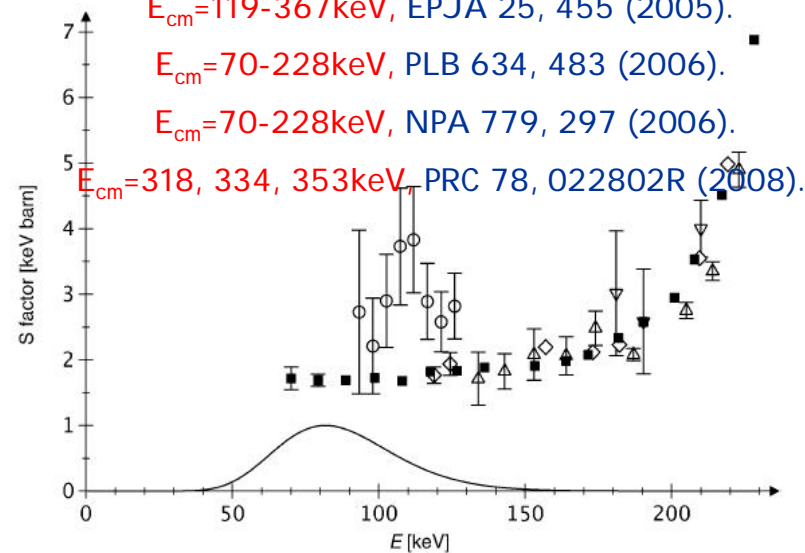
$E_{\text{cm}} = 131-373 \text{ keV}$, PLB 591, 61 (2004).

$E_{\text{cm}} = 119-367 \text{ keV}$, EPJA 25, 455 (2005).

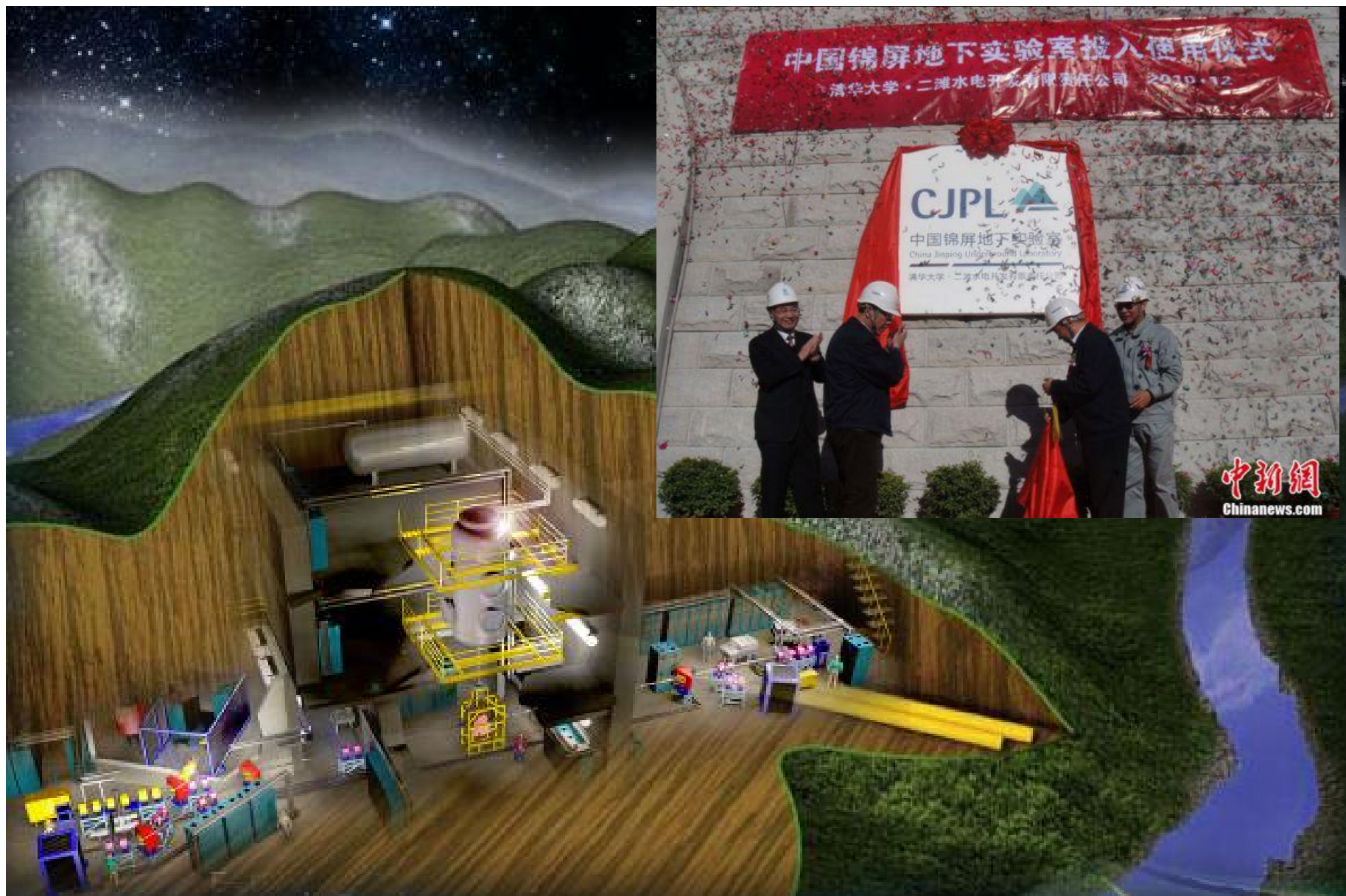
$E_{\text{cm}} = 70-228 \text{ keV}$, PLB 634, 483 (2006).

$E_{\text{cm}} = 70-228 \text{ keV}$, NPA 779, 297 (2006).

$E_{\text{cm}} = 318, 334, 353 \text{ keV}$, PRC 78, 022802R (2008).



我国开展地下核天体物理实验的设想



实验室的由来

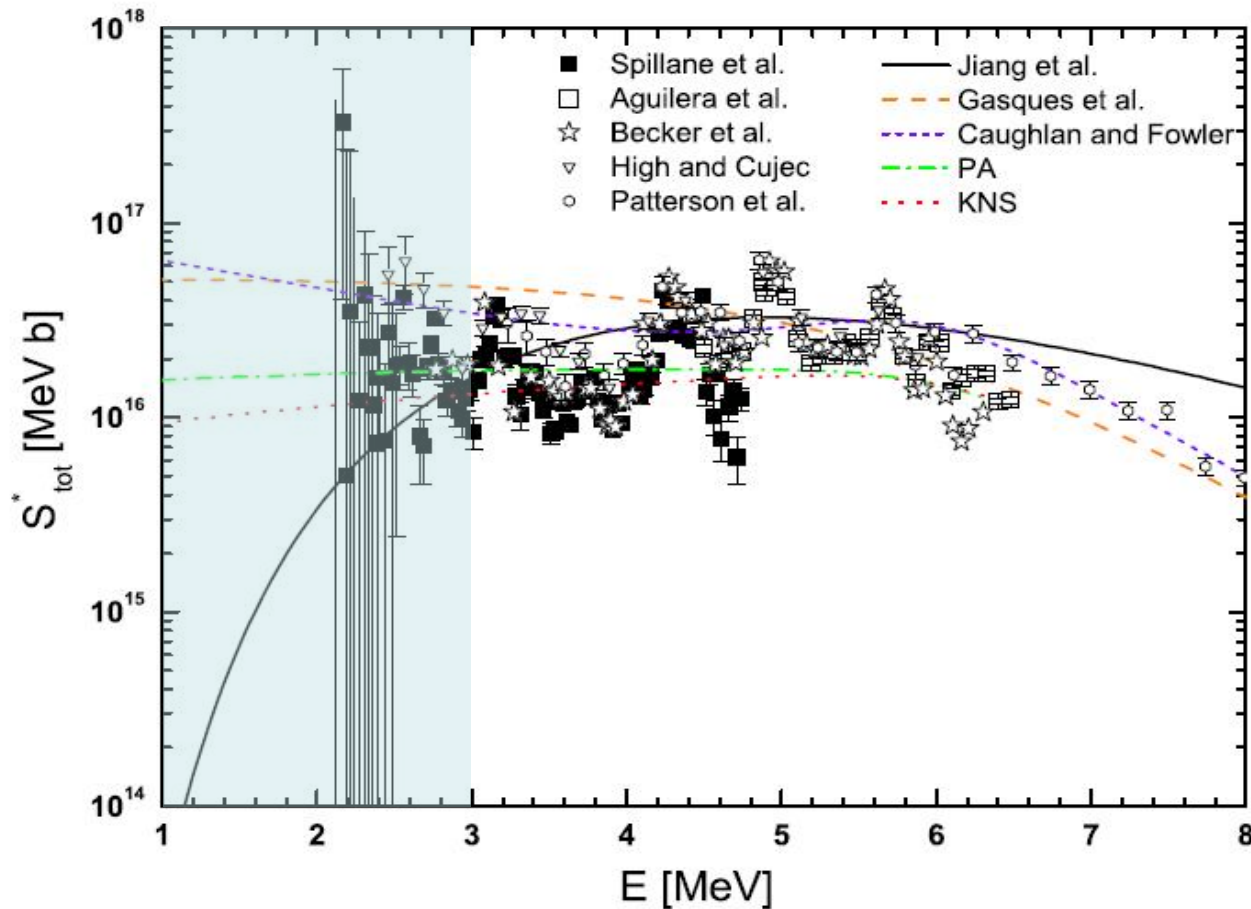
- 我国暗物质领域的研究拉动了位于锦屏山的“锦屏地下实验室”
- 2008年，二滩为建设水电站而修建的锦屏山隧道建成，这条隧道除了有约2500米的岩石覆盖层外，洞内岩体天然放射性极低，非常适合开展暗物质探测和核天体物理等基础科学实验。
- 清华大学实现了与二滩水电站的合作。实验室选址于2009年8月确定，2010年7月实验室配套工程建设完成。
- 2009年10月，“暗物质暗能量的理论研究和实验预研”项目获973项目资助，涵盖了地下直接探测
- 2010年12月，四川雅砻江锦屏水电站，世界岩石覆盖最深的实验室、也是中国首个极深地下实验室——锦屏地下实验室宣布正式投入使用
- 目前实验室空间容积约4000立方米，分为暗物质探测实验区、低本底测量实验区、电子学与信号系统工作区
- 开展的工作有清华和交大的暗物质测量
- 总体工作详见岳骞报告，交大工作详见赵力报告

可开展的物理实验

需要开展直接测量的四类反应

- ◆ (α, γ) 反应: $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 、 $^{14}\text{C}(\alpha, \gamma)$ 、 $^{14,15}\text{N}(\alpha, \gamma)$ 、 $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)$ 、 $^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)$ 、 $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)$...
- ◆ 中子源反应: $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 、 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)$ 、 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, n)$...
目前LUNA尚无法开展
- ◆ 融合反应: $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$...
- ◆ 质子辐射俘获反应: $^{18}\text{O}(p, \gamma)$ 、 $^{22}\text{Ne}(p, \gamma)$ 、 $^{22}\text{Na}(p, \gamma)$ 、 $^{23}\text{Na}(p, \gamma)$ 、 $^{26}\text{Al}(p, \gamma)$ 、 $^{33}\text{S}(p, \gamma)$...

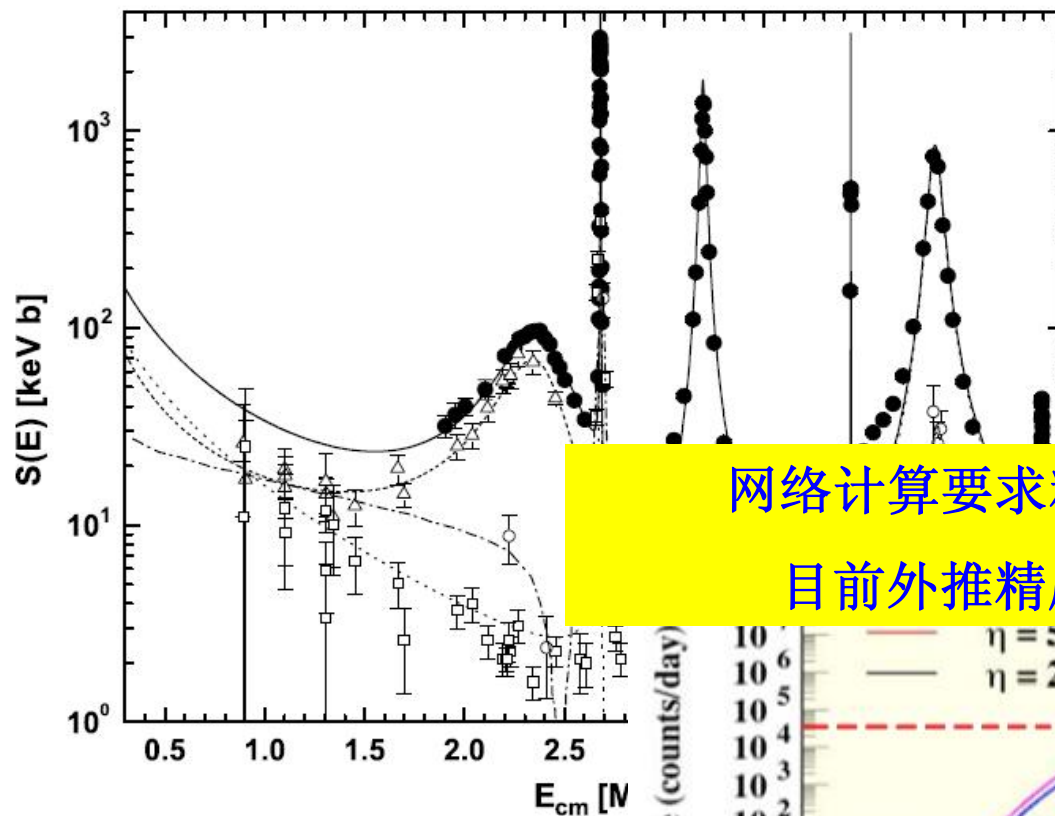
$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 融合反应



- Motivation: 大质量恒星的演化
- 天体感兴趣能区: 1-3MeV
- 当前数据最低能量: 2.1MeV

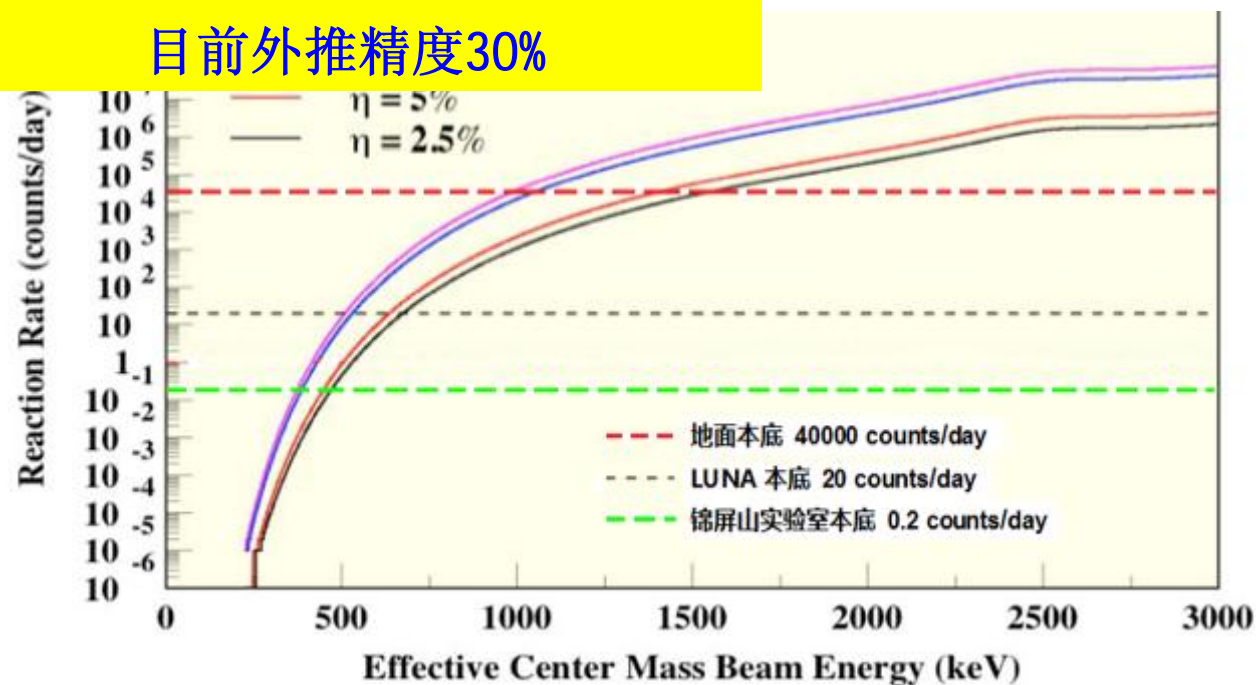
不同方法的低能外推结果相差达1000倍

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

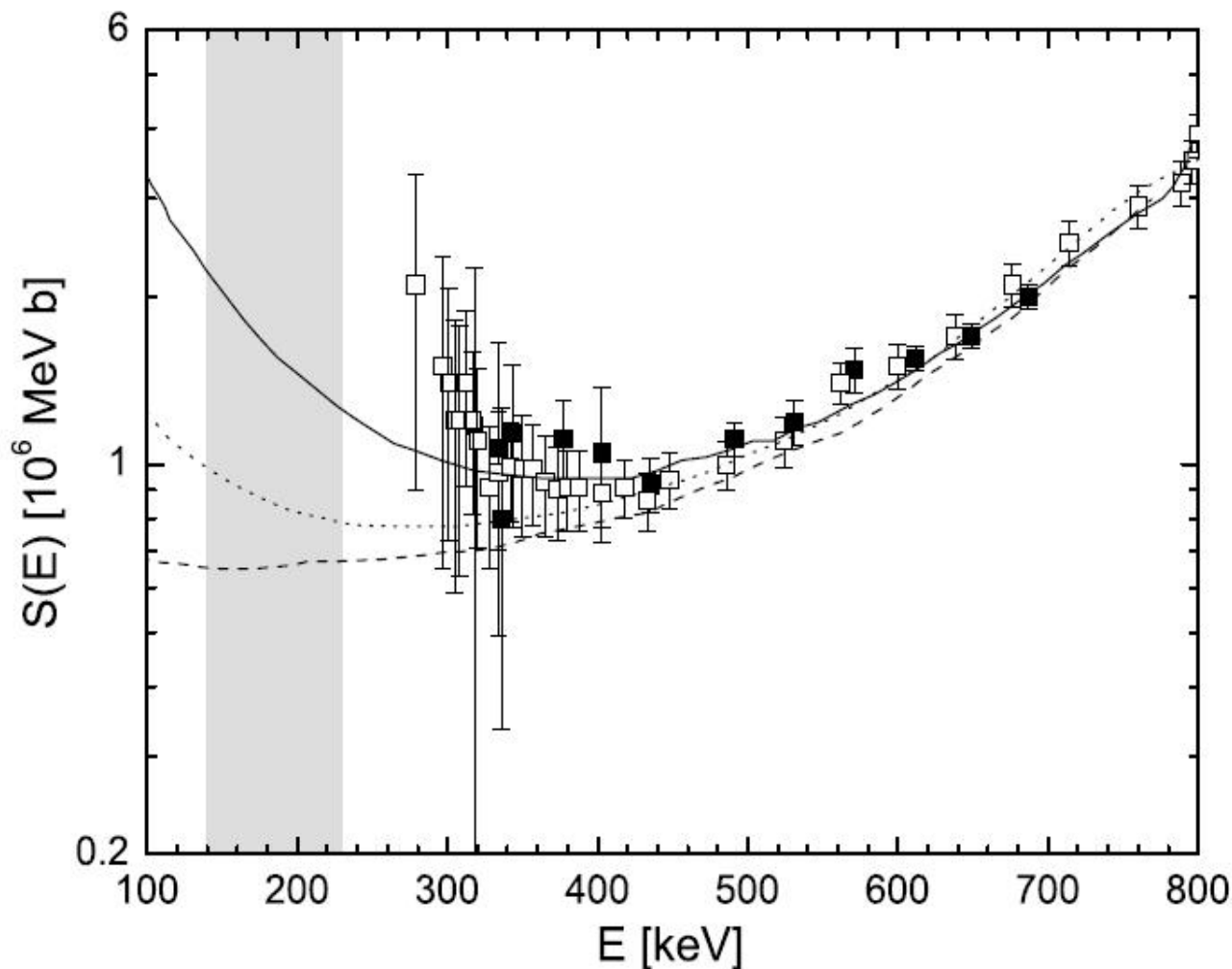


事件率及地下实验室
本底估算

现有直接测量数
据仍未达到伽莫
夫能量300keV



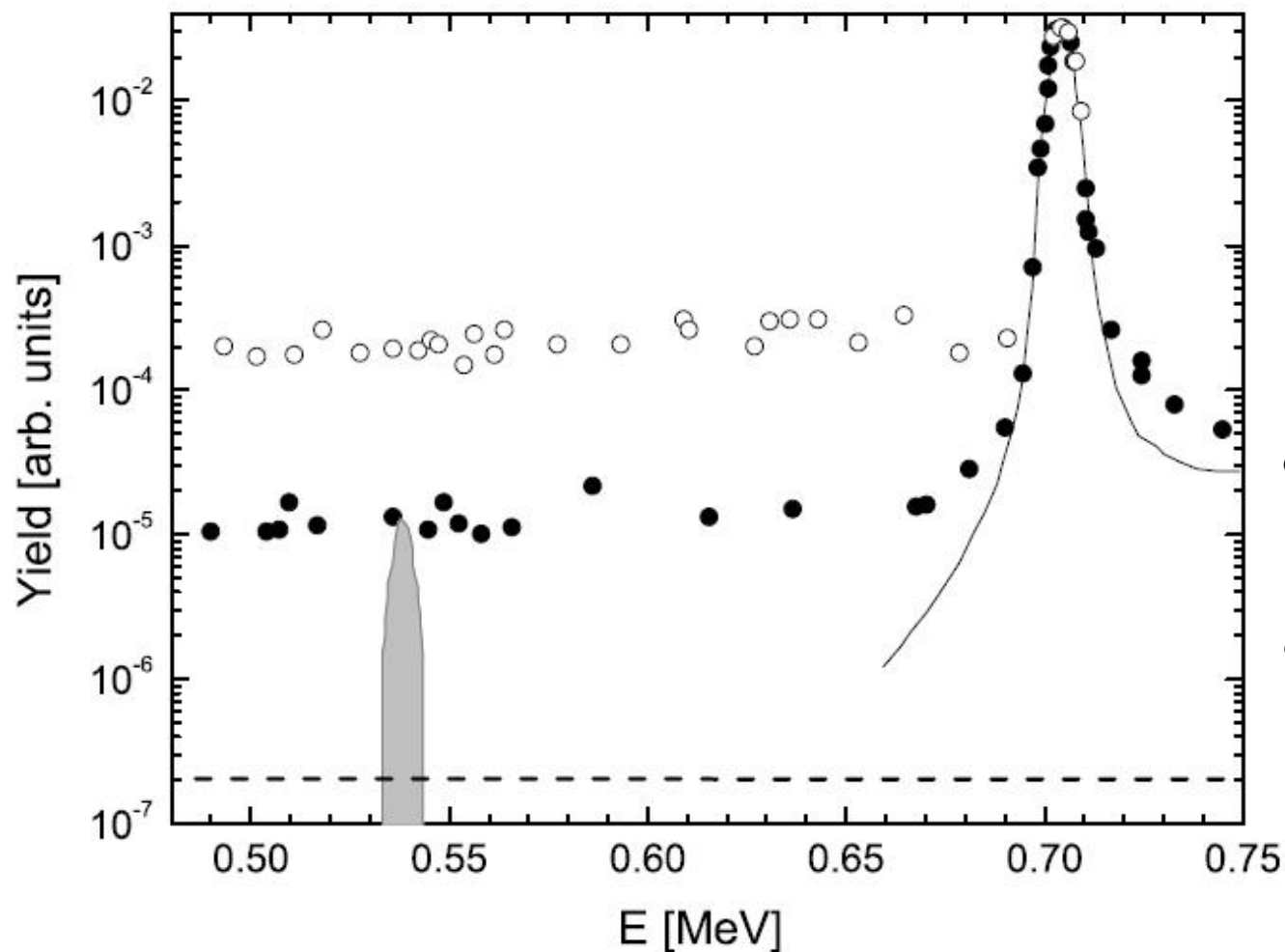
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应



- Motivation: s 过程主中子源反应
- 天体感兴趣能区: 140-230keV
- 当前数据最低能量: 270keV

不同方法的低能外推结果相差达**5**倍

$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应



- Motivation: s 过程弱中子源反应
- 天体感兴趣能区: 400-700keV
- 当前数据最低能量: 680keV以下仅给出上限

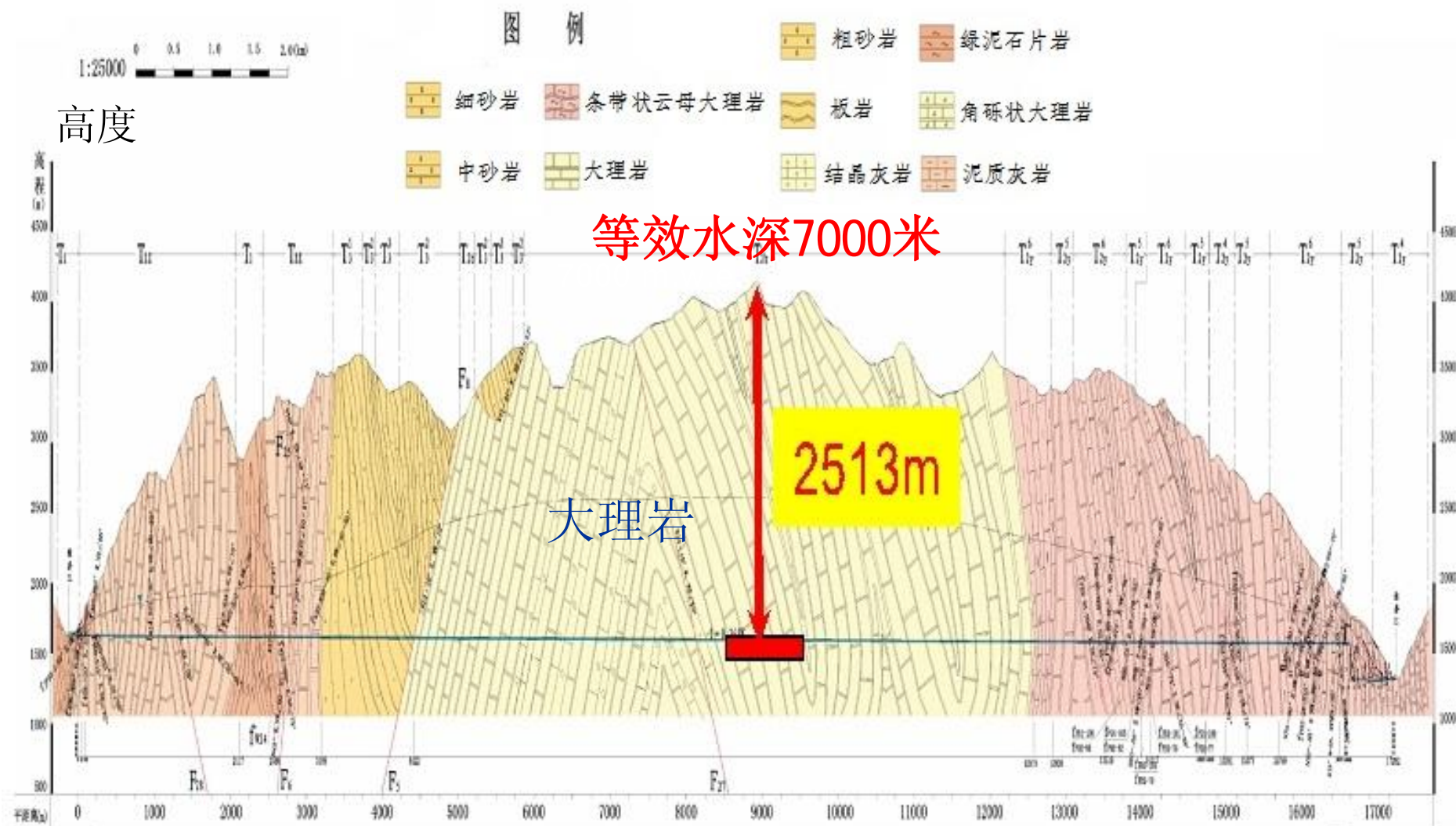
锦屏山核天体物理实验室设想

锦屏山地下实验室——地理位置

位置：四川省西昌市
雅砻江锦屏水电站一期
工程穿山隧道（17 km）

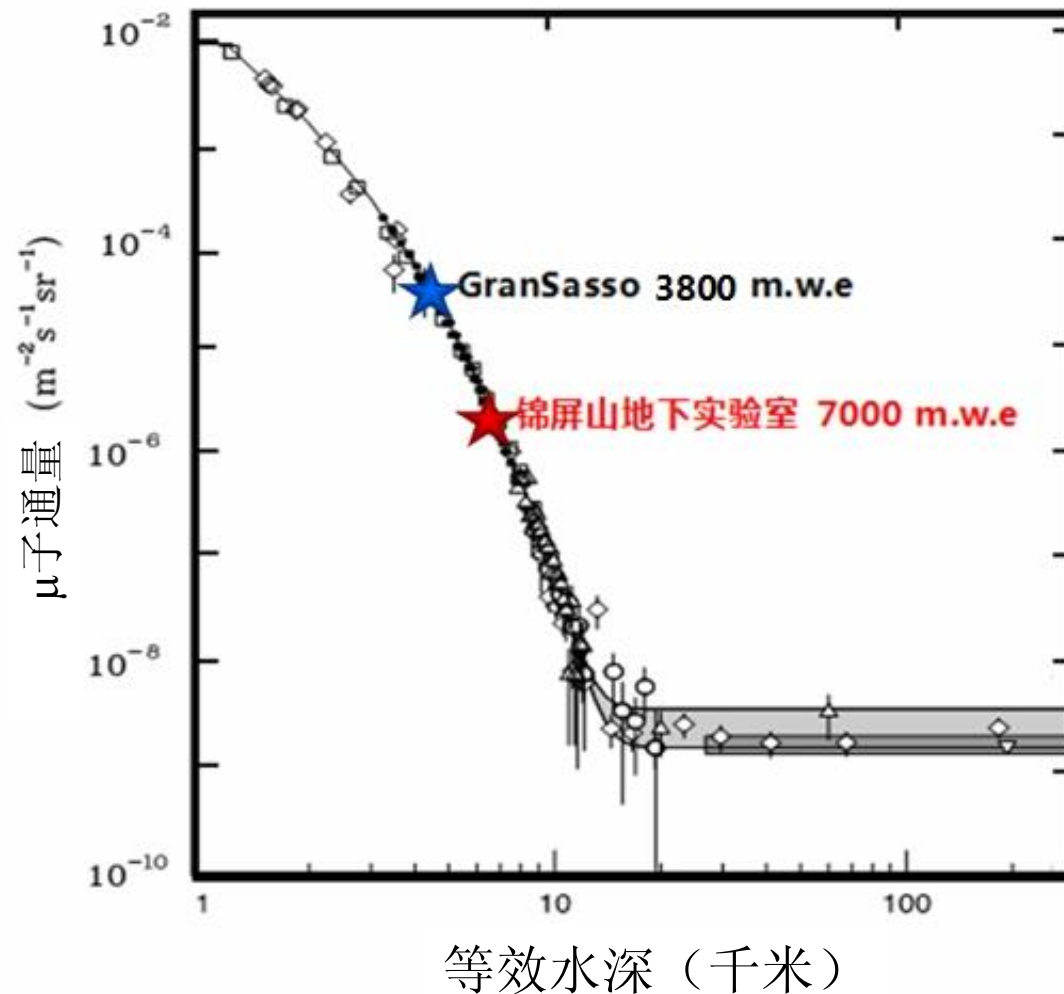


锦屏山地下实验室——隧道岩层结构



锦屏山地下实验室——本底水平

宇宙线本底： μ 子通量



锦屏山地下实验室
对宇宙线噪声的屏蔽
效果比意大利
LUNA好~**100**倍，比
地面实验室好
~**200000**倍

锦屏山地下实验室——本底水平

实验室环境放射性本底

核素	北京地表岩石样本	锦屏山地下岩石样本
K-40 (Bq/kg)	600	<1.1
Ra-226 (Bq/kg)	25	1.8(2)
Th-232 (Bq/kg)	50	<0.27
Radon (Bq/m ³)		20

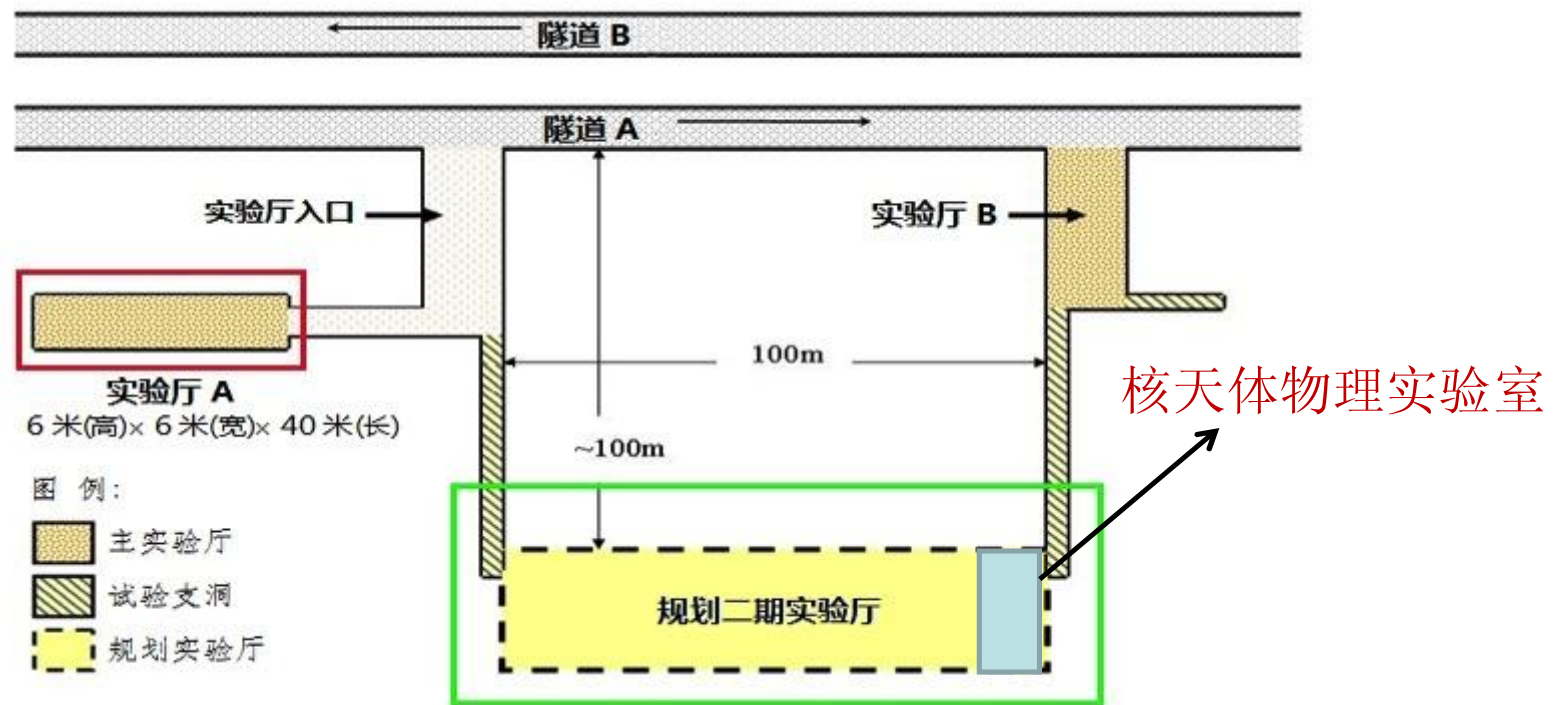
来自清华测量，详见岳骞报告

锦屏山地下实验室与其他实验室比较

地下实验室		等效水深 [m]	宇宙线通量 MUON Flux [cm ⁻² s ⁻¹]	环境本底			中子本底		氡本底 [Bq/m ³]
				⁴⁰ K [Bq/kg]	²³⁸ U [Bq/kg]	²³² Th [Bq/kg]	中子能量	中子通量 10 ⁻⁶ [cm ⁻² s ⁻¹]	
意大利 LUNA	Hall A	3800	2.87×10 ⁻⁸	224	84.7	8.8	(0 - 1×10 ⁻⁷) eV	1.08	26
							(50×10 ⁻³ - 1×10 ³) eV	1.98	
							1 keV < E _n < 2.5 MeV	0.54	
							E _n > 2.5 MeV	0.23	
	Hall B	3800	2.87×10 ⁻⁸	5.1	5.2	0.25			21
	Hall C			2.9	8.2	0.27	1 < E _n < 10 (MeV)	0.42	87
美国 DIANA		4800	4.86×10 ⁻⁹						
英国 ELENA		2805	3.79×10 ⁻⁸	34.9	0.83	0.52	E _n > 0.5MeV	1.72	
西班牙 CUNA		2500	3.94×10 ⁻⁷	169	41.4	34.4			66.2
锦屏实验室		7000	5.6×10 ⁻¹⁰	< 1.1		< 0.27	热中子	< 0.15	20

部分数据来自唐晓东报告

锦屏山地下实验室——现状与规划



- 中国锦屏山地下实验室，2010. 12. 12揭牌正式运行
- 目前已成立两个实验室：清华大学暗物质实验室，上海交大暗物质实验室，A厅240平米，40m(L) x 6m(W) x 6m(H)
- 2014年锦屏水电站完工前工程队将挖掘8个新洞，50m(L) x 12m(W) x 12m(H)，增加40倍空间
- 其中1个洞初步定为“核天体物理实验室”

锦屏山地下实验室——小结

➤ 锦屏山地下实验室具有三大优势

1. 深度居世界第一，岩层2500多米，等效水深7000米

2. 岩层主要为大理岩，岩石放射性本底极低

3. 通过水平隧道进入，便于安全施工和运输设备

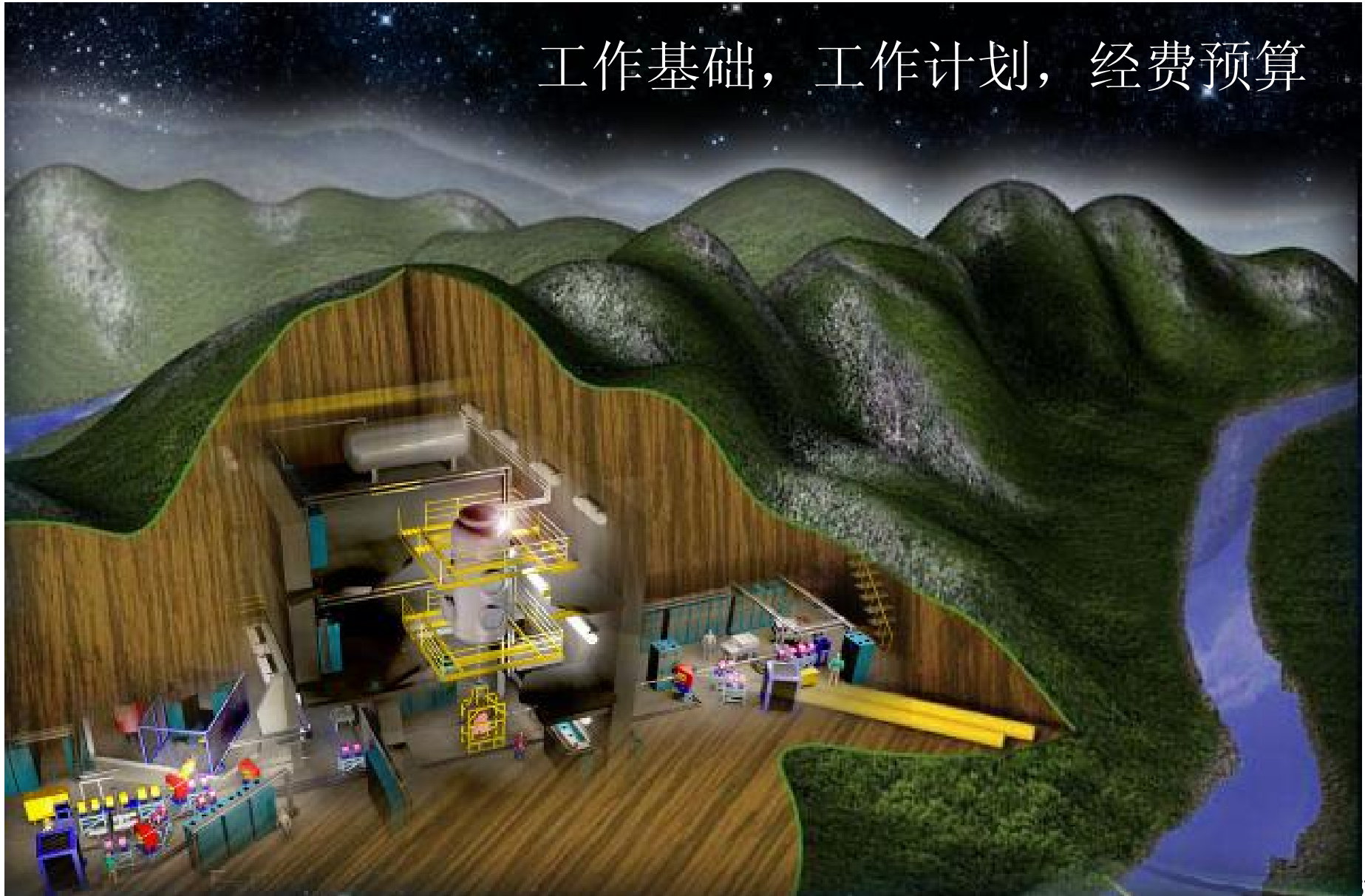
➤ 2014年锦屏水电站完工前工程队将挖掘8个新洞，开凿费用由水电站方面负责

➤ 锦屏山实验室二期将新建设近5000平米实验大厅，有条件成为世界上顶级的极低本底实验室

➤ 锦屏实验室总负责方清华大学已答应其中一个实验洞作为核天体物理实验用，这是我们建设世界上条件最好的地下核天体物理实验室的绝佳机会

锦屏山地下核天体物理实验室建议

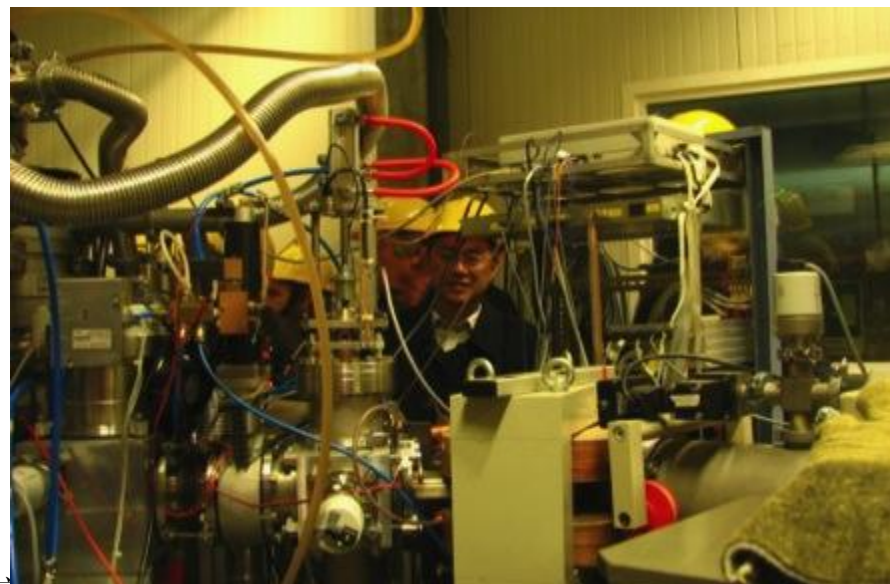
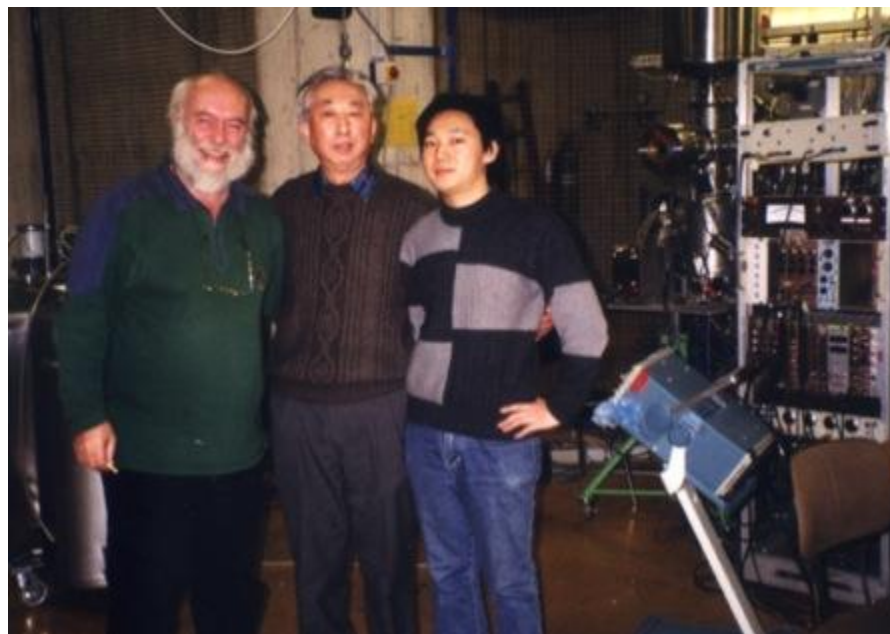
工作基础，工作计划，经费预算



地下核天体物理实验室建议——工作基础

国际合作

- 与意大利LUNA的创建人国际知名核天体物理学家Roif s教授长期密切合作
- 自2001年起一直参与Roif s教授在波鸿大学领导的核天体物理国际合作实验
- 与LUNA地下实验室保持密切联系和合作
- 自2009年积极参与LUNA的3.5MV加速器的升级工作
- 两次参加了在格兰萨索举办的升级工作的国际研讨会



地下核天体物理实验室建议——工作基础

与清华大学和上海交大的合作关系

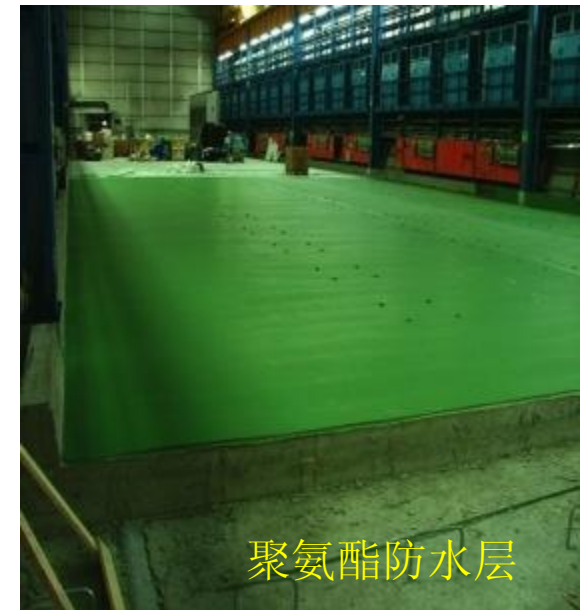
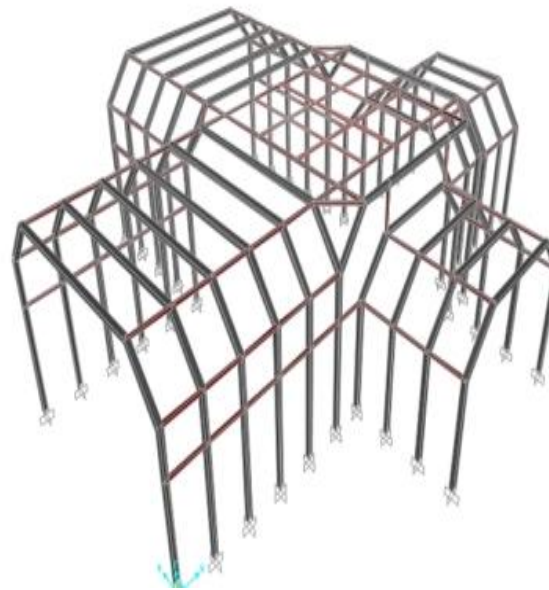
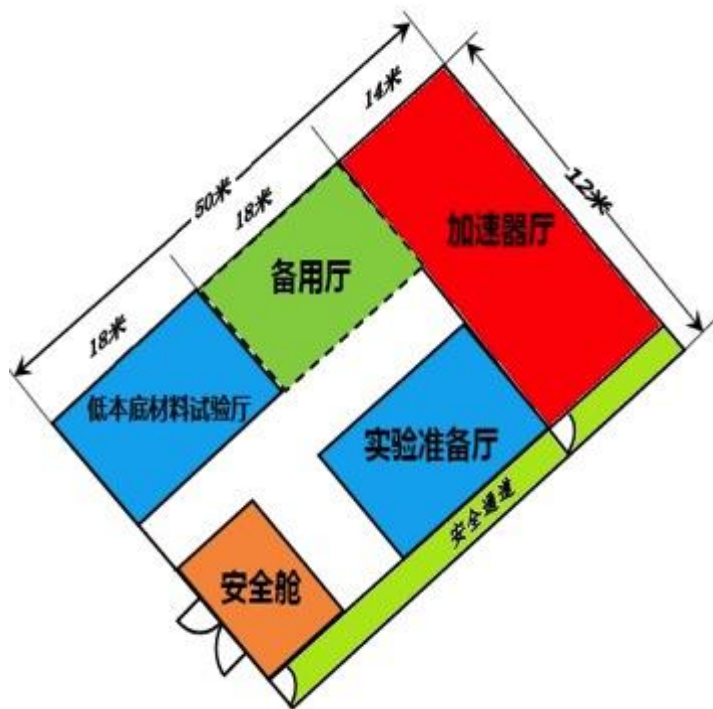
- 清华大学为锦屏山地下实验室总负责方，我们在核天体物理实验等方面一直与清华保持紧密联系
- 同清华大学已经达成合作意向，同意将一个新开凿实验洞交由我国核天体物理学界作为地下核天体物理实验室使用
- 柳卫平任上海交大核天体物理中心顾问委员会成员



地下核天体物理实验室建议——工作计划

共分三期

- 一期，**实验室整体设计、基础建设**，主要工作包括：实验洞挖掘工程，实验室通风、水、电、通信建设，实验洞支撑防护、地面防水处理，洞内本底测量



地下核天体物理实验室建议——工作计划

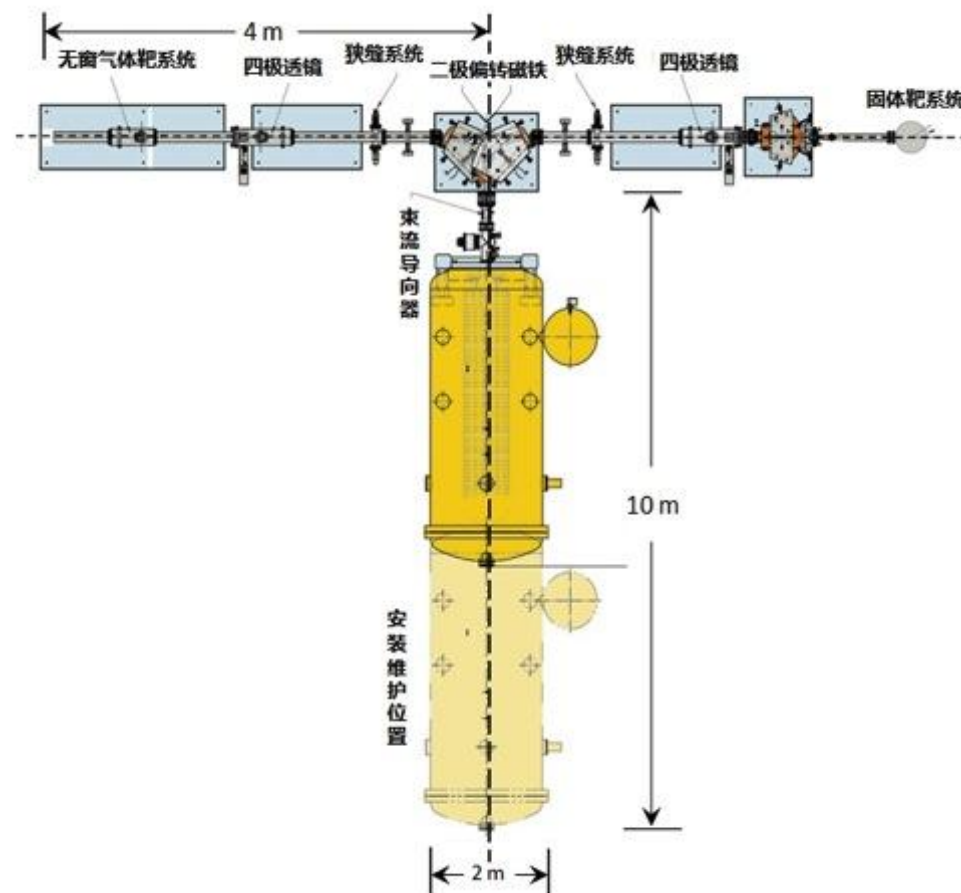
➤ 二期，**加速器及实验终端建设**，主要工作包括：低本底材料试验，4MV加速器设计加工，束流线设计加工，固体靶及无窗气体靶系统、探测器系统建设

◆ 设计方案为单端静电加速器

◆ 最高端电压4MV

◆ 能量稳定度好于0.1%

离子种类	束流强度 (个/秒)
H^+	5.0×10^{14}
He^+	5.0×10^{13}
He^{2+}	1.0×10^{13}
Xe^{17+}	2.9×10^{12}
Kr^{15+}	4.1×10^{11}
Ar^{11+}	5.6×10^{11}
Ne^{6+}	1.0×10^{12}
Fe^{11+}	5.7×10^{11}
Ni^{11+}	5.7×10^{11}



地下核天体物理实验室建议——工作计划

- 三期，**加速器的进洞和安装调试**，主要工作包括：设备进洞安装调试，数据获取系统建设，低本底屏蔽体加工，4MV加速器试运行，获取初步实验数据



项目得到中核集团支持

- 集团总经理钱智民，总工程师雷增光高度关心
- 于6月7日向雷增光总工程师专题汇报
- 集团批复从集团自主研发经费特批300万元，用于前期土建启动经费



地下核天体物理实验室建议——工作计划

工程进度初步安排

工程计划	详细内容	2014 年				2015 年				2016 年				2017 年				2018 年				2019 年				2020 年			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
一 期	实验洞挖掘工作																												
	水、电、通风、通信基础建设																												
	实验洞支撑防护																												
	本底测量工作																												
二 期	4 MV 加速器及离子源系统																												
	束流线 (包括电磁分离系统)																												
	无窗气体靶系统																												
	探测器系统																												
三 期	装备进洞安装调试调试																												
	系统真空、冷却水系统																												
	低本底屏蔽体设计加工																												
	实验数据获取系统																												
	首批实验测量工作																												

地下核天体物理实验室建议——经费预算

工程	内容	预计费用（万）	备注
一期	实验洞挖掘（12米x12米x50米）	6000	水电站施工方承担
	水、电、通风、通信基础建设	1000	水电站施工方承担
	实验洞支撑防护、防水	600	中核支持300万
二期	4 MV加速器及离子源系统	3000	如经费紧张，可以先建400KV加速器，经费1000万左右
	束流线（包括电磁分离系统）	1300	
	无窗气体靶系统	500	
	探测器系统（ γ 探测器阵列、中子、带电粒子探测器）	2200	
三期	系统真空、冷却水系统	1000	
	低本底屏蔽体设计加工	500	
	实验数据获取系统	1200	
其他	人员费用（8年计算）	900	
	会议、交通、资料费用	700	
	管理费	600	
	不可预计费用	800	
合计		13300	

下步工作阶段目标建议

- 2013-2014，对工作路线图形成共识，形成项目建议书，启动并完成基本的现场工作
- 2014-2015，向基金委、科技部和发改委等提出项目建议
- 2015-2016，得到国家支持并启动
- 2020，项目完成，开始核天体物理反应测量
- 2014-2018，联合暗物质等物理单元，联合申请锦屏山多物理国家实验室，获得运行费支持
- 2023，取得第一批世界水平研究成果，成为国际上第二个核天体物理地下实验室

JUNA具体工作方法建议

- 形成项目组织体系和工作包
 - 国际惯例
 - 项目发言人
 - 工作包负责人
- 工作包建议
 - 加速器
 - 靶系统
 - 探测器
 - 土建基础
 - 物理方案
- 根据合作优势，对工作包进行分解
 - 国内合作为起步，择机引入国际合作
- 定期召开工作会议，推进项目进展
 - 拟半年一次
- 合作申请国家项目
 - 基金委，重大仪器项目，其他
 - 科技部，973，其他
 - 发改委，运行费

总结

- 核天体物理是国际基础研究的前沿之一，地下实验室直接测量是核天体物理最重要的基础数据
- 锦屏山地下实验室JUNA是开展核天体物理直接测量的最佳场所，与运行(意)和计划(美、英、西)，的国际同类实验室相比，条件最好，如加紧建设，JUNA有望成为亚洲第一个、世界第二个核天体物理地下实验室
- 锦屏山核天体物理项目投资和周期适中，技术相对比较成熟，有望在2020年后取得国际原创性的研究成果，在国际竞争态势下，启动这个项目具有重要性、紧迫性和可行性
- 我们愿与清华等单位共同努力，把锦屏山地下实验室建成我国的重大基础科学多学科研究设施，为国家提供重大基础科学和应用科学研究成果
- 期望我国学术界已此次会议为起点逐步形成共识，建议与国内优势单位联合，一起早日建成JUNA，在中核集团目前启动支持的基础上，得到科技部和基金委等部门给予的重点支持
- 在此特别感谢中核集团的启动经费支持，特别感谢锦屏山项目总体负责单位清华大学对开展核天体物理工作的支持和帮助，特别感谢基金委、科技部和中核集团对此次会议的大力支持

谢谢各位老师！

讨论议题建议

- 如经费有限
 - 4MV加速器+部分探测器，物理先进
 - 400KV加速器+全面探测器，实验简易
- 经费筹措渠道
 - 多渠道合成，基金委+科技部
 - 一体化，如发改委
- 加速器国产还是进口
 - 进口稳定性好
 - 国产容易申请经费
- 是否引进国际合作
 - 方式和时机
- 加速器应考虑脉冲束，减少束晕
- 国际合作，基础是我们主导；北京ISOL的经验，从务虚就国际化，不与狼共舞，永远是羊；竞争和压力出人才；对项目申请有利
- 主动的优势：地头蛇，多目标，协议订好，顶住竞争
- 加速器如国内有优势，则可形成创新点