



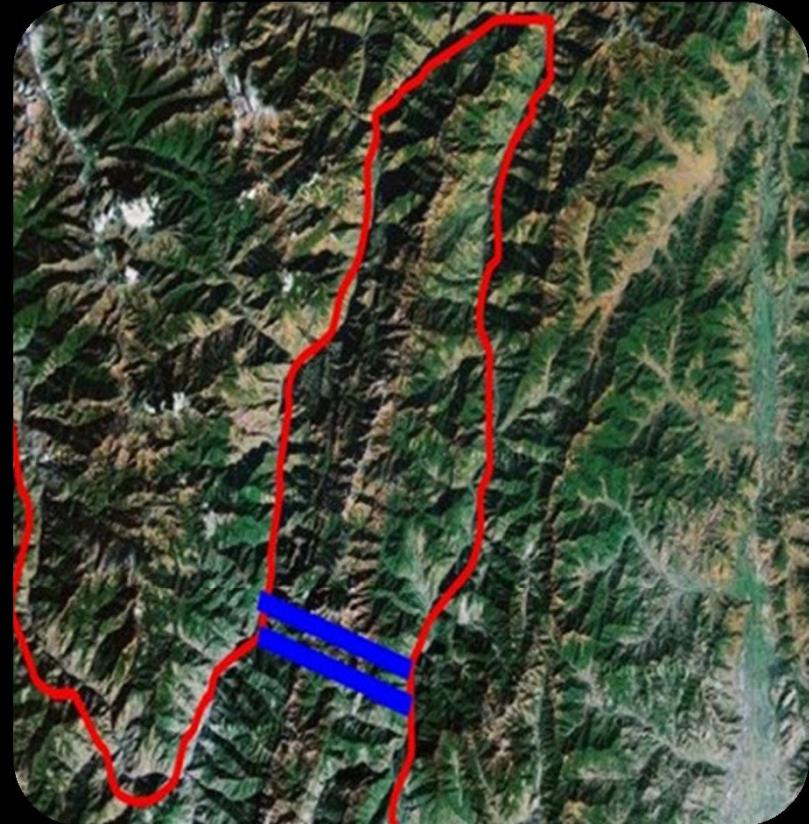
锦屏山地下核天体物理实验室 初步规划

原子能院 连钢

主要内容



2013.8.21 西昌邛海



核天体物理

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

Can we reveal the origin of us ? The answer is in nuclear physics

Eddington 1920, Bethe 1938, von Weiszäcker 1938, Gamow 1948, B2FH 1957 ...



Margaret Burbidge



Geoff Burbidge



William Fowler

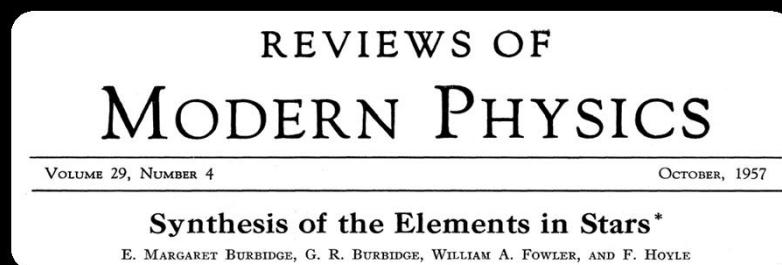


Fred Hoyle

In 1957, B2FH presented the basis of the modern nuclear astrophysics in their review paper explaining by nuclear reactions occurring in the interior of the stars



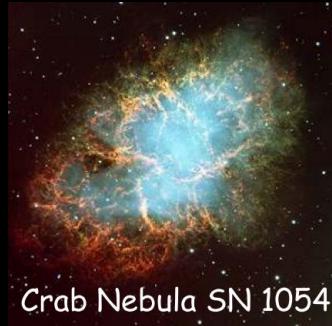
2013.8.21 西昌邛海



核天体物理

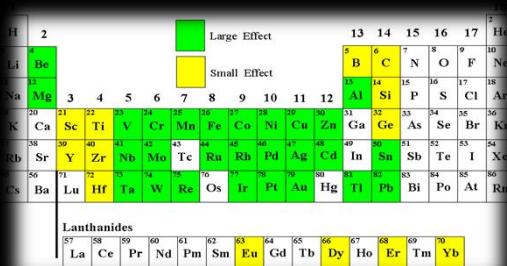
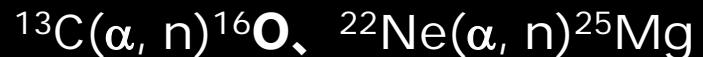
物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

➤ 大质量恒星的演化和命运



Crab Nebula SN 1054

➤ 世纪之谜的第三个问题 “重元素的来源”



➤ AGB星核合成、新星爆发、星系组分

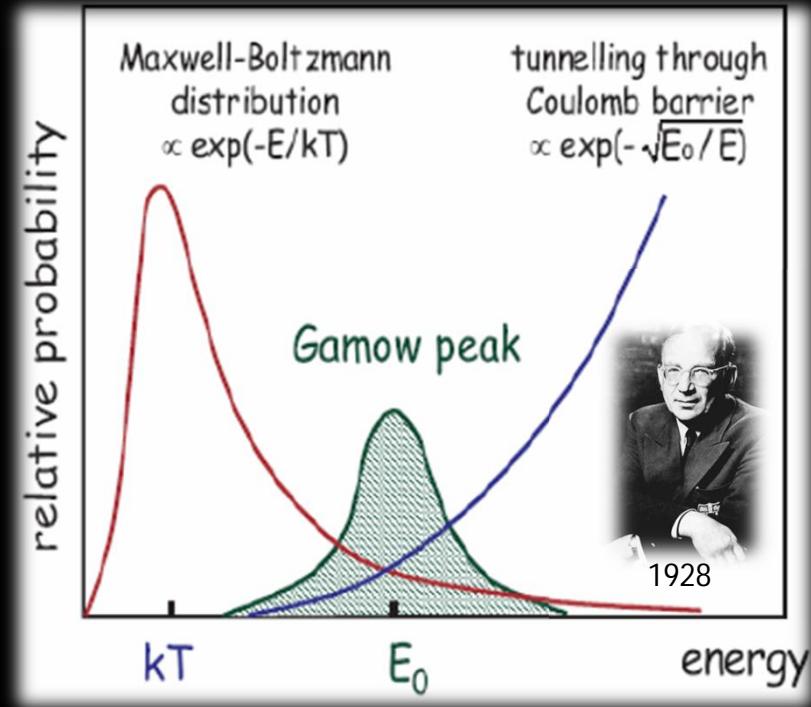
Ne、Na、Mg、Al 等元素合成的一系列 (p, α) 、 (p, γ) 反应



天蝎座V1280

Gamow窗口

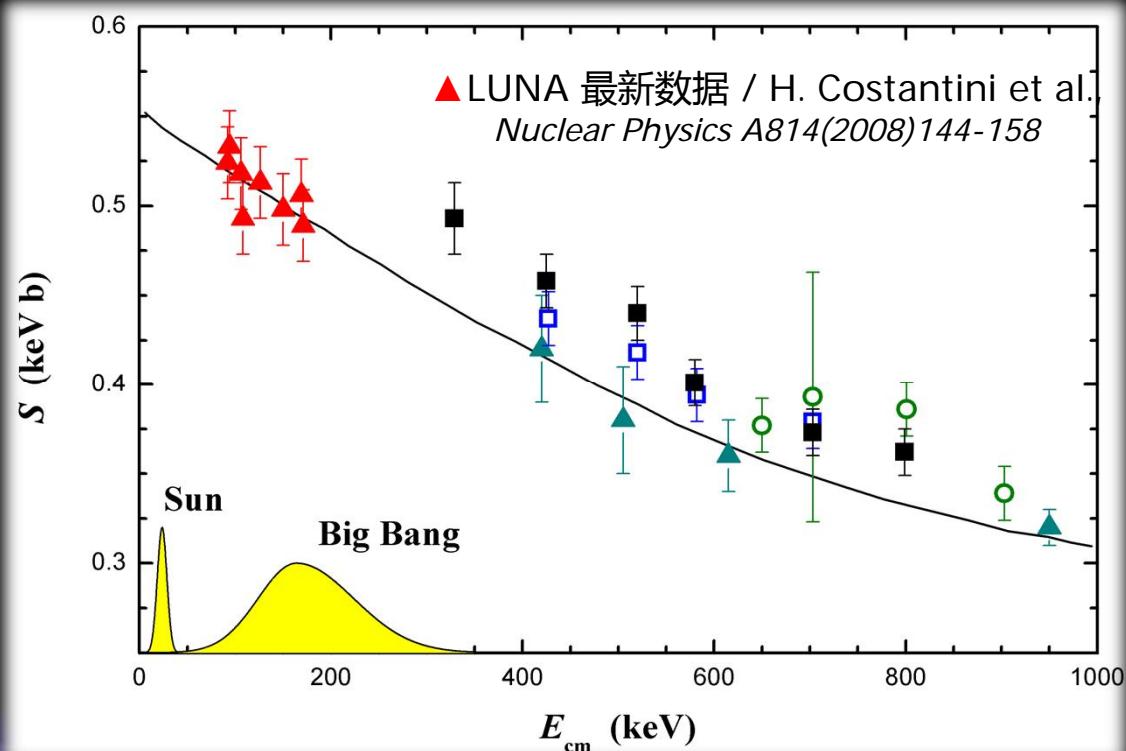
物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



2013.8.21 西昌邛海

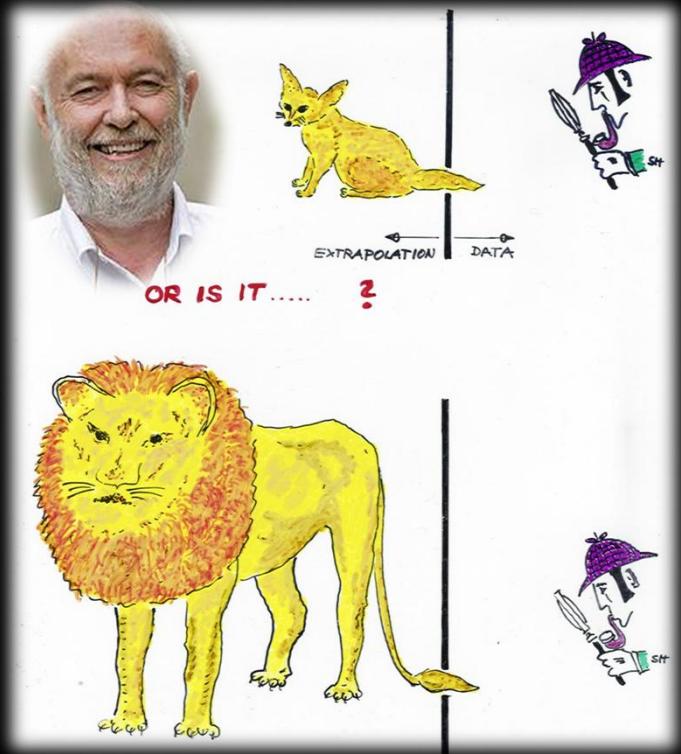
- 天体物理环境中任一发生反应带电粒子对的数目按质心系动能的麦克斯韦-玻尔兹曼分布和库仑势垒穿透概率随质心系动能的变化卷积形成一个近似高斯分布的Gamow 峰。
- 对天体物理反应率有决定性的贡献，它成为判断带电粒子反应的直接测量是否进入了天体物理感兴趣低能区的基准。



$^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ 反应直接测量

外推的不确定性

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

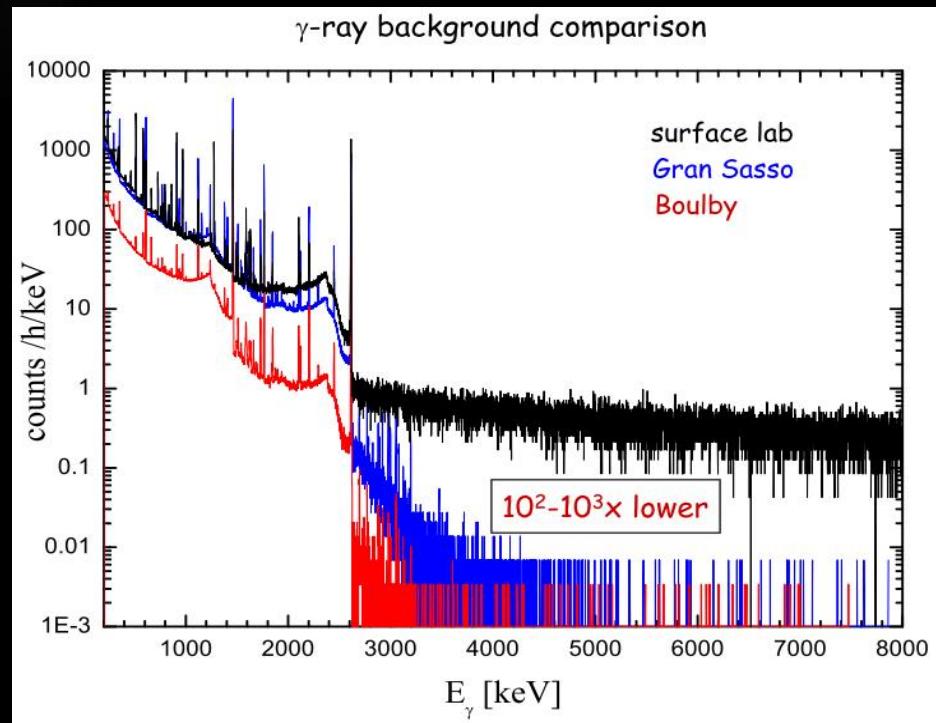


2013.8.21 西昌邛海

- 恒星平稳核燃烧阶段的带电粒子热核反应截面在Gamow窗口能区甚低，直接测量十分困难，通常要利用较高能区的实验数据向下外推。
- 由于电子屏蔽效应和可能存在的共振的影响，外推导致很大的不确定性。
- 地下实验室为直接测量提供了可能

Gamow窗口能区核反应计数率

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



Marialuisa aliotta, Nuclear Physics News, Vol. 22, No. 2 (13-17) , 2012



2013.8.21 西昌邛海

Gamow窗口能区

反应截面 σ : $10^{-18} \sim 10^{-9}$ barn

C.Iliadis, *Nuclear Physics of stars*

典型稳定束实验 :

$i = 100 \mu A$

$N_t = 10^{19} \text{ atoms/cm}^2$

$\varepsilon = 1-100\%$

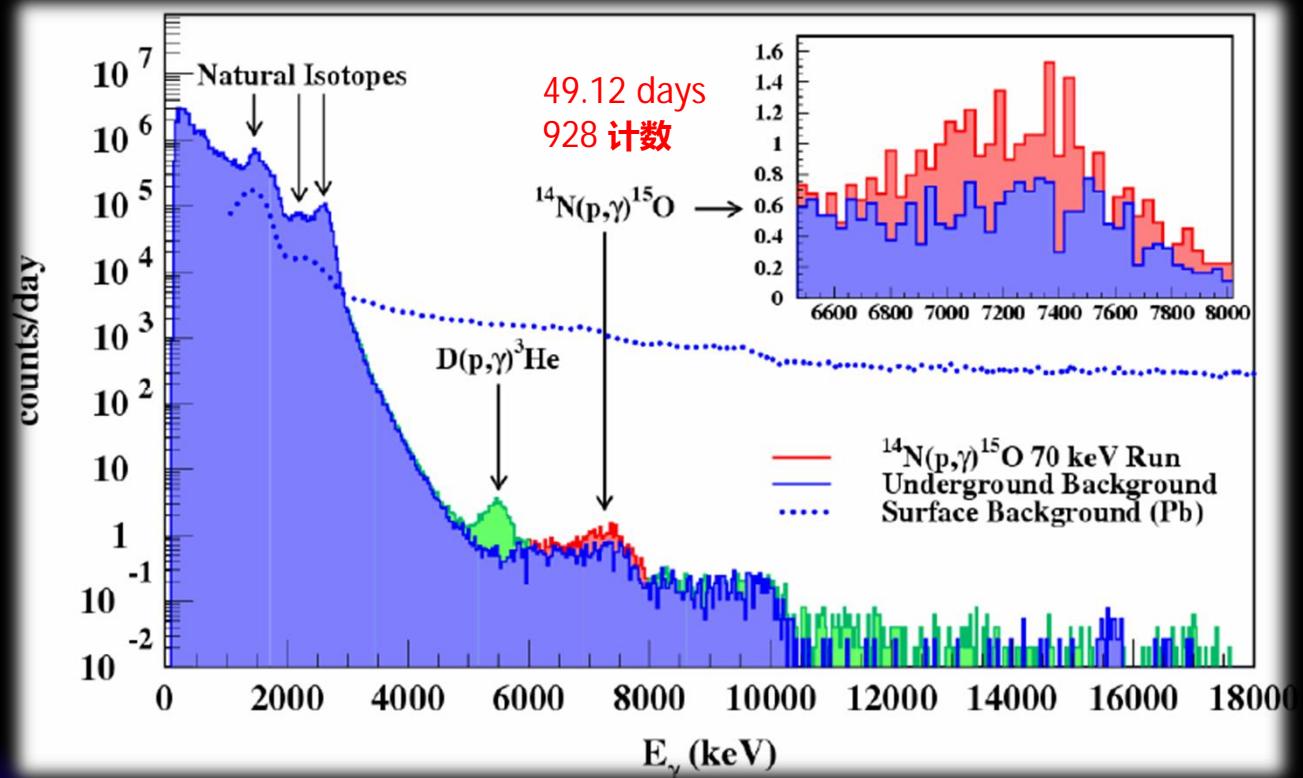
计数率 : ($\sigma = 10^{-13}$ barn)

0.1-10 个/天

地下实验室测量实例

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

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



Nuclear Physics A 779 (2006) 297–317

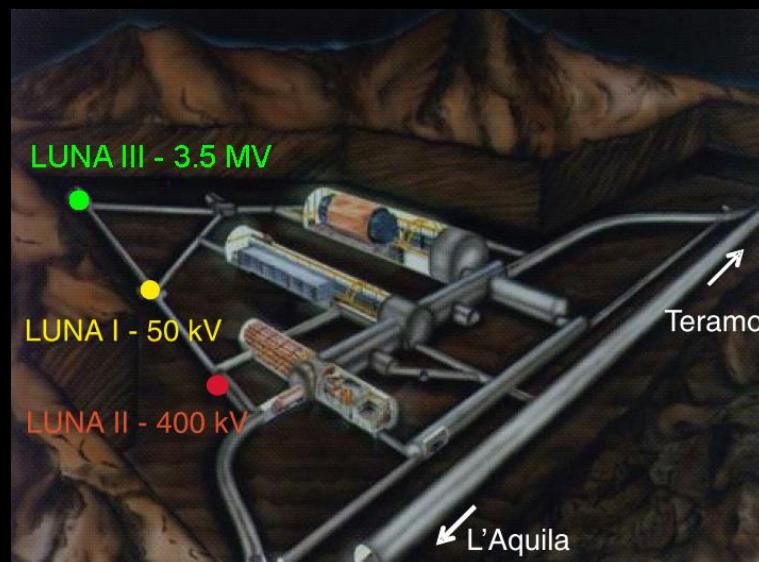


2013.8.21 西昌邛海

Operating Institution	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)
Location	Gran Sasso Tunnel (Abruzzi, Italy)
Excavation	1987
Underground area	3 halls A B C (100m x 18m x 20m) + service tunnels
Depth	1400 m (3800m.w.e)
Total volume	180000 m ³
Surface	> 6000 m ²



2013.8.21 西昌邛海

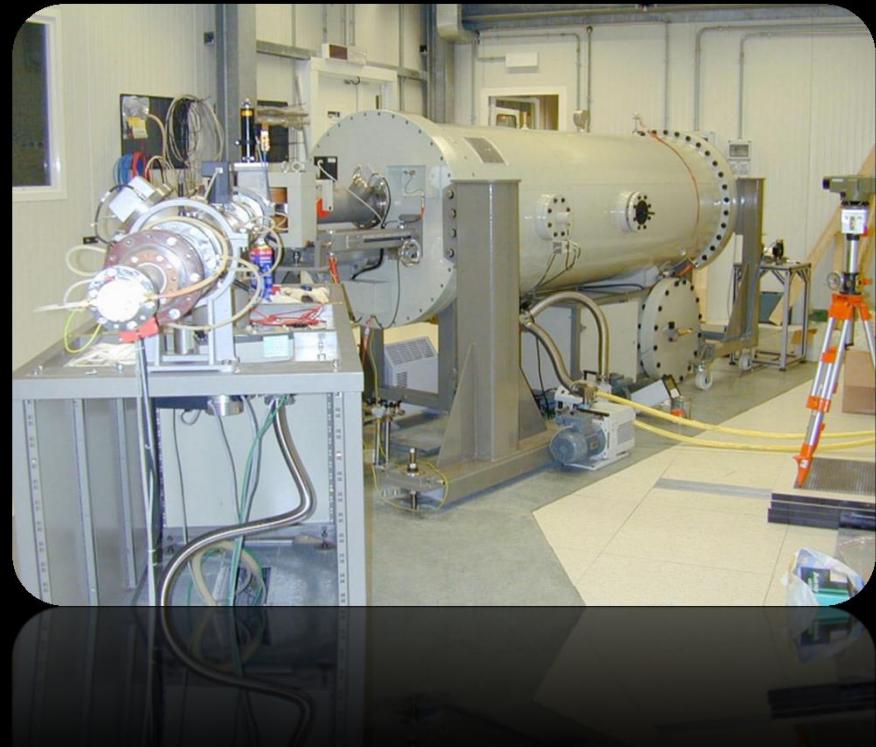


Laboratory
Underground
Nuclear
Astrophysics

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



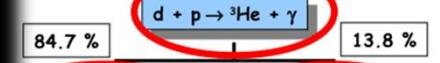
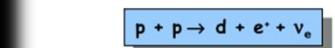
LUNA-II: 400 kV (2000)



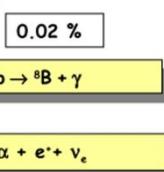
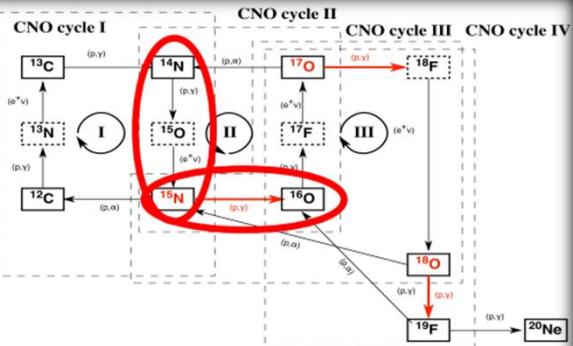
Laboratory Underground Nuclear Astrophysics

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

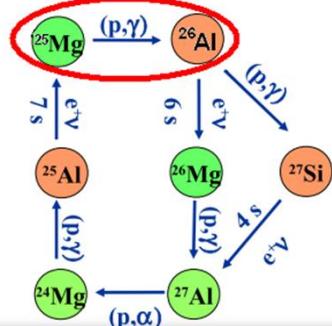
pp chain



84.7 %



13.78 %



0.02 %



LUNA Results



2013.8.21 西昌邛海

LUNA present program

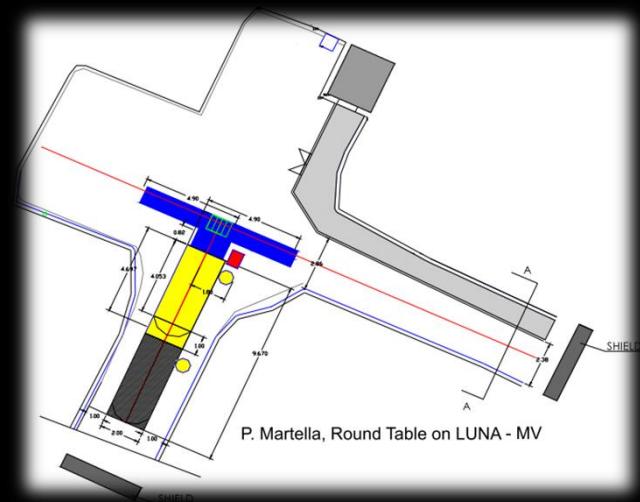
reaction	Q-value (MeV)	Gamow energy (keV)	Lowest meas. Energy (keV)	LUNA limit
${}^{17}\text{O}(p, \gamma){}^{18}\text{F}$	5.6	35-260	300	65
${}^{18}\text{O}(p, \gamma){}^{19}\text{F}$	8.0	50-200	143	89
${}^{23}\text{Na}(p, \gamma){}^{24}\text{Mg}$	11.7	100-200	240	138
${}^{22}\text{Ne}(p, \gamma){}^{23}\text{Na}$	8.8	50-300	250	68
$D(\alpha, \gamma){}^6\text{Li}$	1.47	50-300	700(direct) 50(indirect)	50



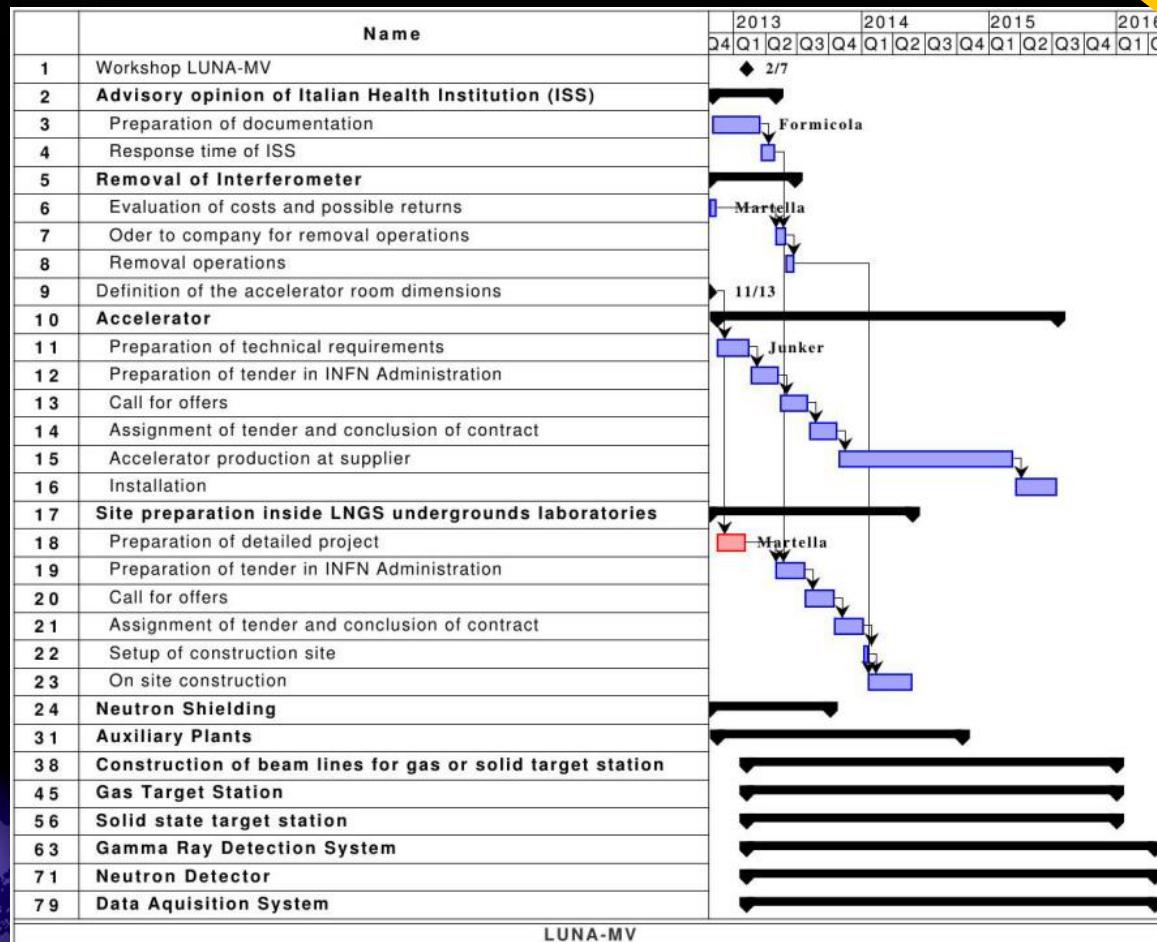


LUNA MV project

- Obtained 2,8 millions of euros for the LUNA MV project from the “Progetto Premiale” fund
 - site preparation, the accelerator and partly for the shielding
 - 3 more millions of euros are needed
 - $^3\text{He}(\alpha, \gamma) ^7\text{Be}$, $^{22}\text{Ne}(\alpha, n) ^{25}\text{Mg}$, $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma) ^{16}\text{O}$

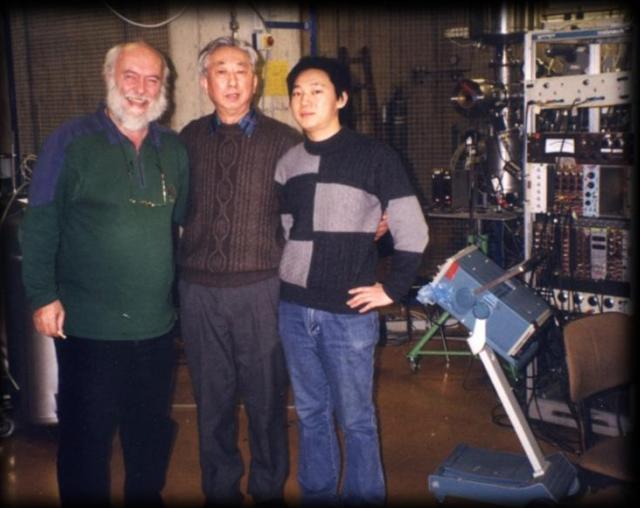


LUNA-MV 时间进度表



与 LUNA 的合作

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



与LUNA的创建人国际知名核天体物理学家Rolfs教授长期密切合作，自2001年起一直参与Rolfs教授在波鸿大学领导的核天体物理国际合作实验



2013.8.21 西昌邛海

Electron screening in d(d,p)t for deuterated metals and the periodic table Francesco Raiola, P Migliardi, L Gang et al., *Phys.Lett. B* 547 (2002) 193

Enhanced electron screening in d(d,p)t for deuterated metals Francesco Raiola, L Gang, C Bonomo et al., *Eur.Phys.J. A* 19 (2004) 283

Electron screening in d(d,p)t for deuterated metals: temperature effects Francesco Raiola, ..., S Zeng et al., *J.Phys. G* 31 (2005) 1141

Change of the ${}^7\text{Be}$ electron capture half-life in metallic environments B Wang, S Yan, B Limata et al., *Eur.Phys.J. A* 28 (2006) 375

First hints on a change of the ${}^{22}\text{Na}$ β^+ -decay half-life in the metal Pd B Limata, Francesco Raiola, B Wang, S Yan et al., *Eur. Phys.J. A* 28 (2006) 251

Study of the ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ fusion reactions near the Gamow energy Timothy Spillane, Francesco Raiola, S Zeng et al., *Phys. Rev.Lett.* 98 (2007) 122501

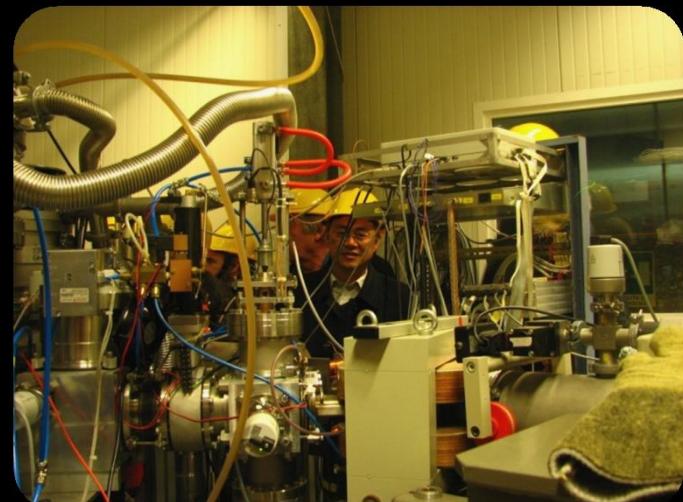


与 LUNA 的合作

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



- 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

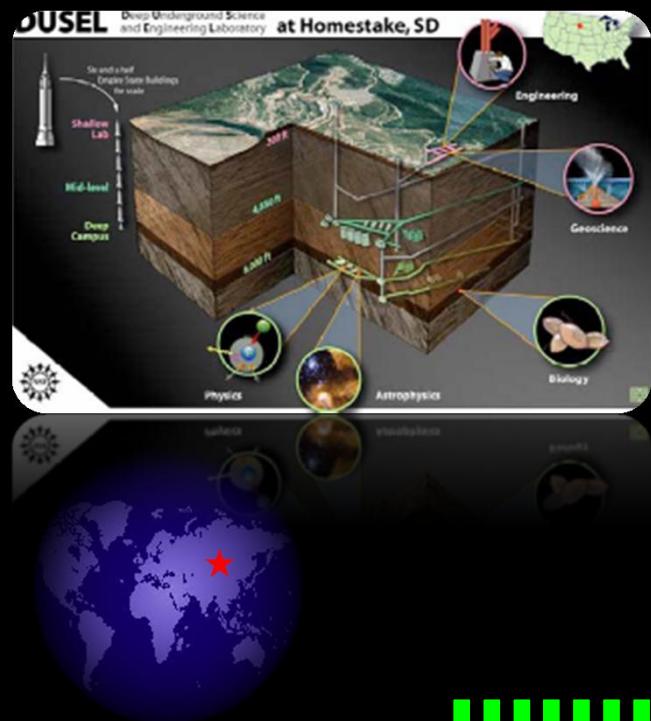


2013.8.21 西昌邛海

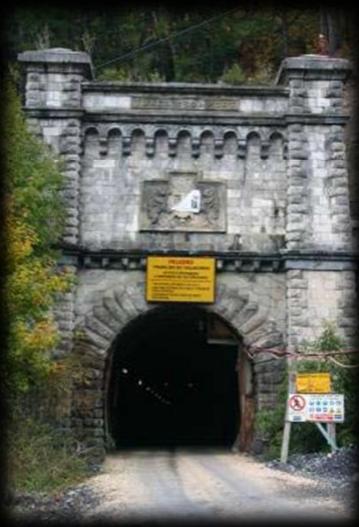
其他核天体物理地下实验室计划

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

美国南达科他州
霍姆斯特克金矿
DIANA



西班牙坎弗兰克
CUNA

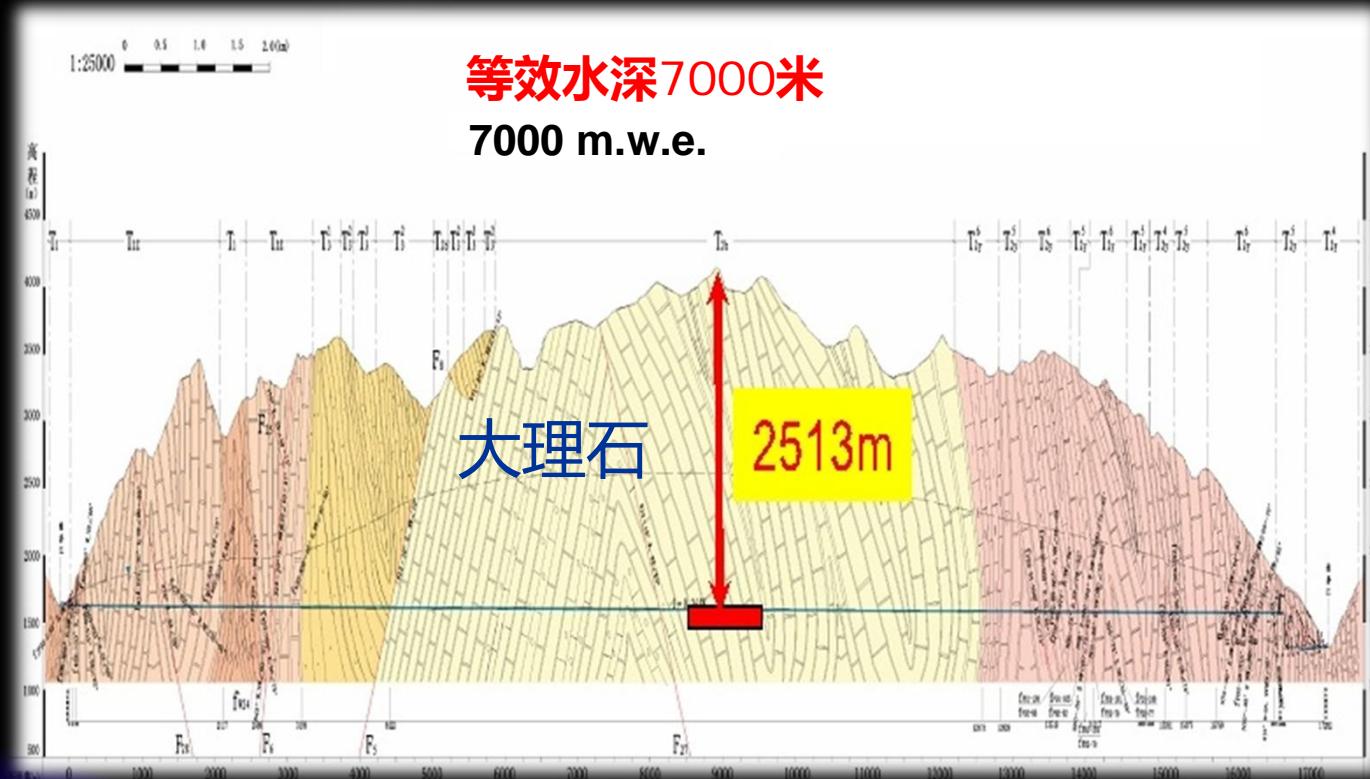


英国北约克郡
博尔比盐矿
ELENA

锦屏地下实验室

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

锦屏山地质结构

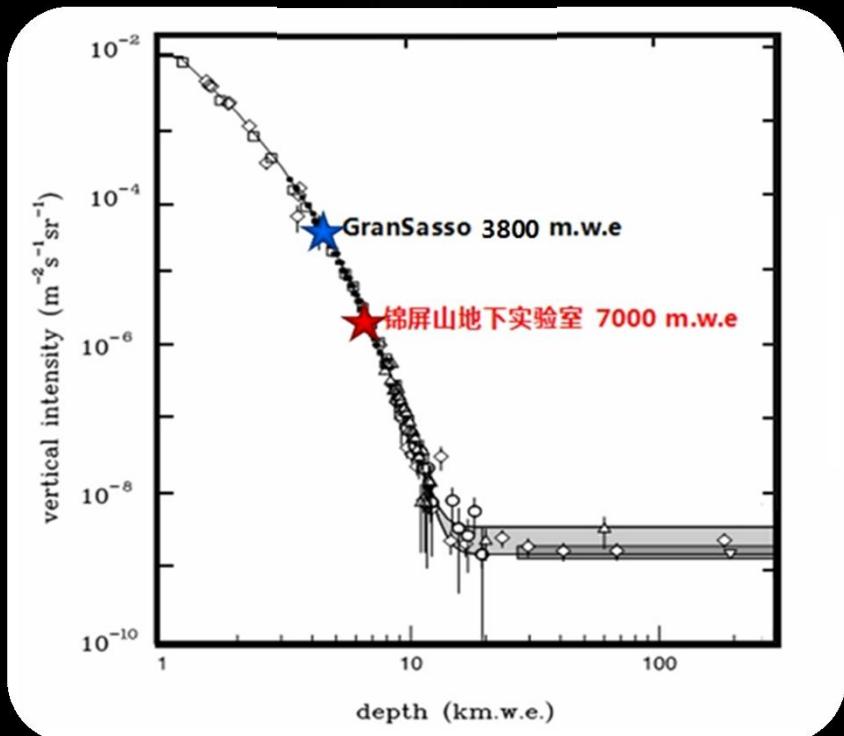


2013.8.21 西昌邛海

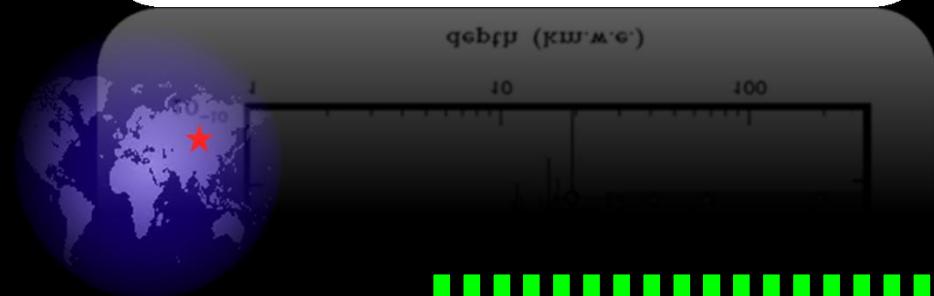
18

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

μ子通量

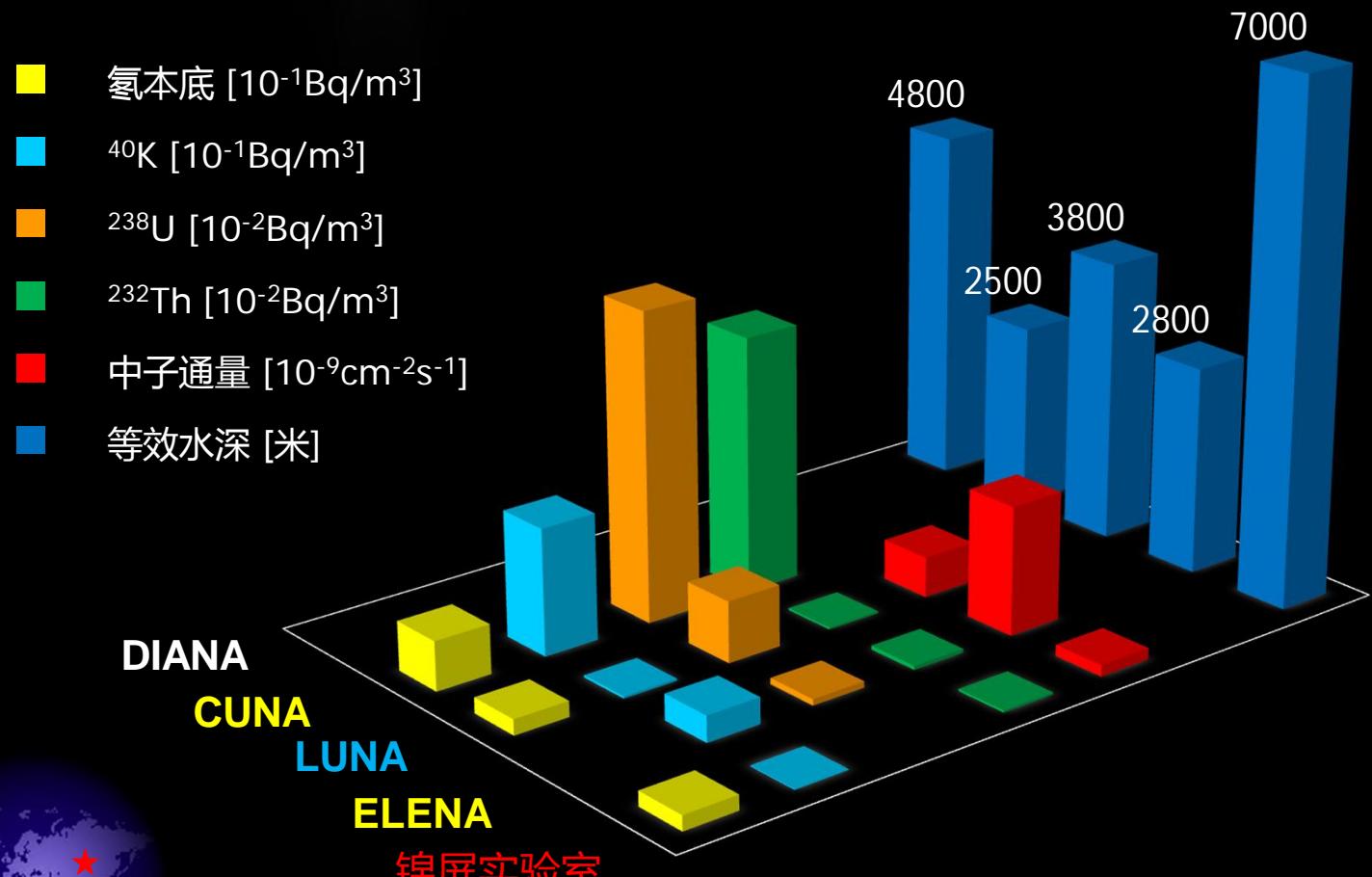


锦屏山地下实验室对宇宙线噪声的屏蔽效果比意大利LUNA好~ **100 倍**，



与其他核天体物理地下实验室比较

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



锦屏地下实验室

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

- 深度居世界第一，岩层2500多米，等效水深7000米
- 岩层主要为大理岩，岩石放射性本底极低
- 通过水平隧道进入，便于安全施工和运输设备
- 由于资金限制，国外地下实验室进展缓慢；抓住机遇有可能成为第一个建立MV加速器的核天体物理地下实验室



科学目标

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

氦燃烧阶段

^{12}C 、 ^{14}N ， ^{15}N ， $^{16,18}\text{O}$ 的(α, γ)反应的直接测量

s过程两个重要的中子源

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 、 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应的直接测量

AGB星和超新星爆发中

Ne、Na、Mg、Al等元素合成的一系列(p, α)、(p, γ)反应的直接测量

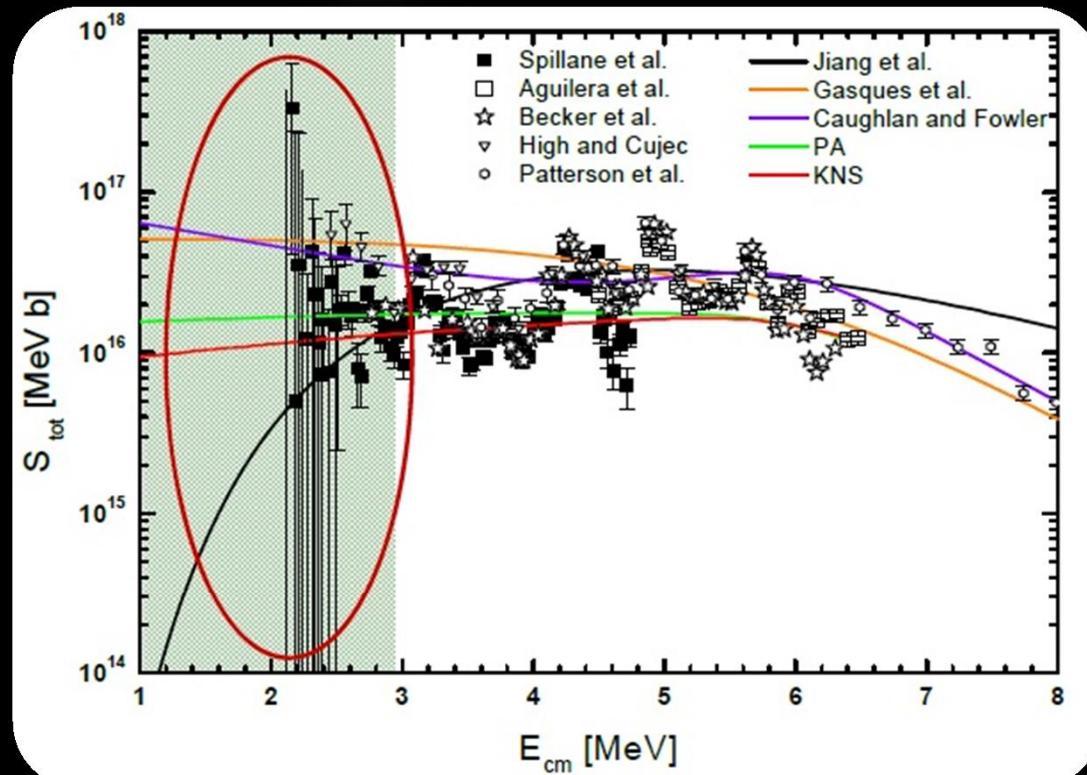
碳燃烧阶段

关键反应 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 的直接测量



$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 研究现状

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



天体感兴趣能区：

1-3MeV

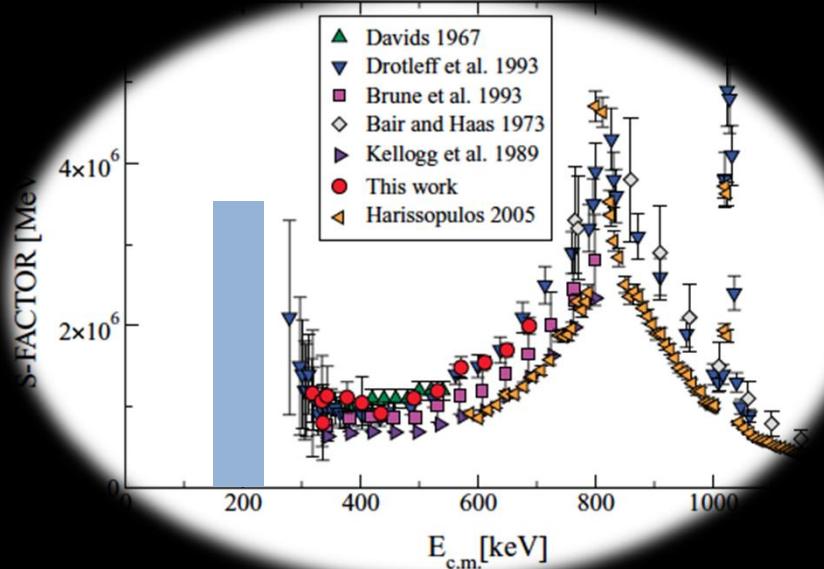
当前数据最低能量：
2.1MeV



F. Strieder et al., *J. Phys. G* 35 (2008) 14009

$^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 研究现状

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



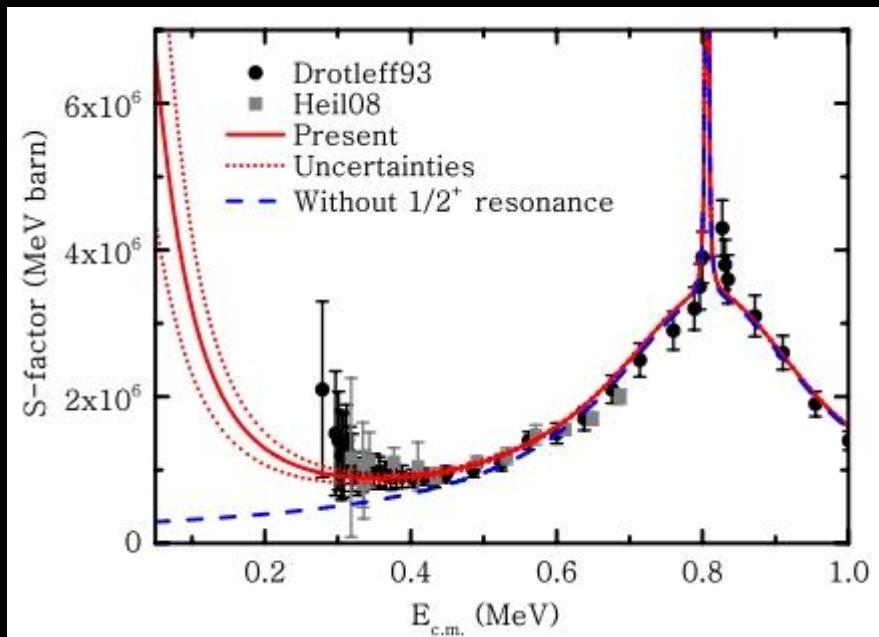
PRL, 109, 232701 (2012)

天体感兴趣能区：140-230keV
当前数据最低能量：270keV



2013.8.21 西昌邛海

APJ, 756:193 (10pp), 2012 September 10

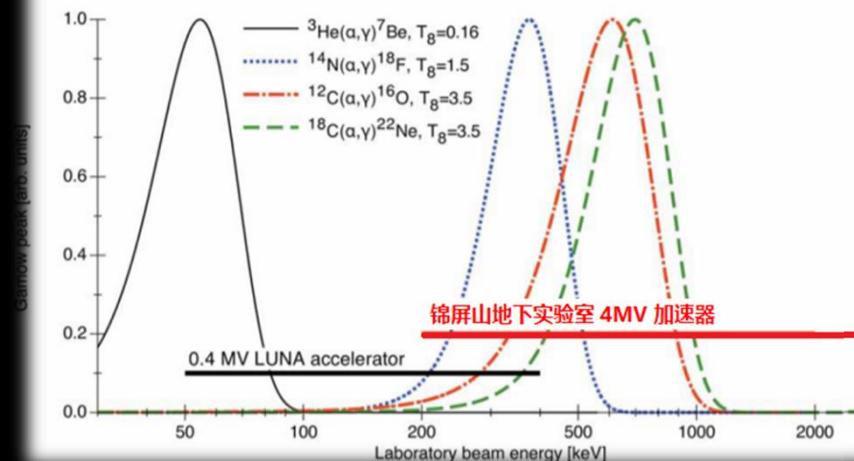


4MV加速器

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

能量范围

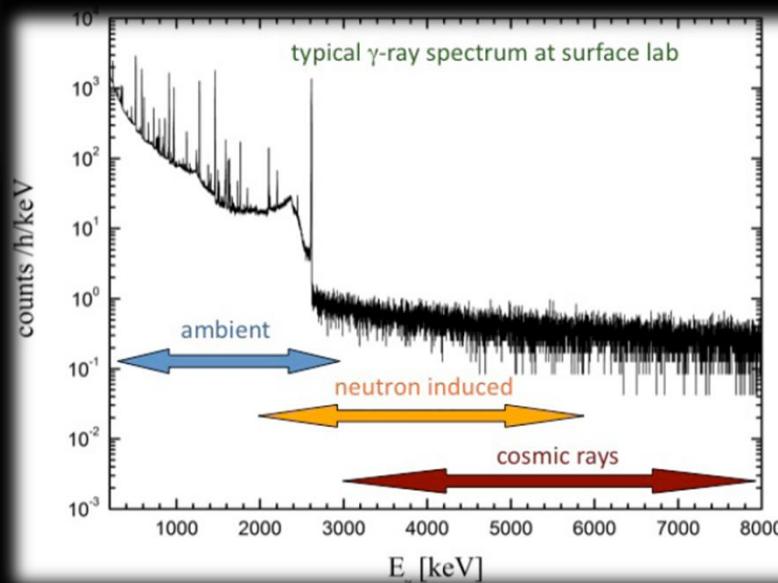
氢燃烧阶段关键反应 Gamow 峰能量



2013.8.21 西昌邛海

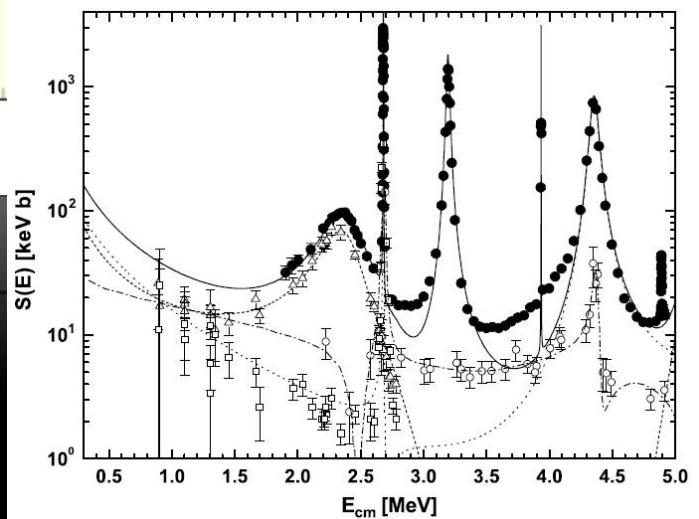
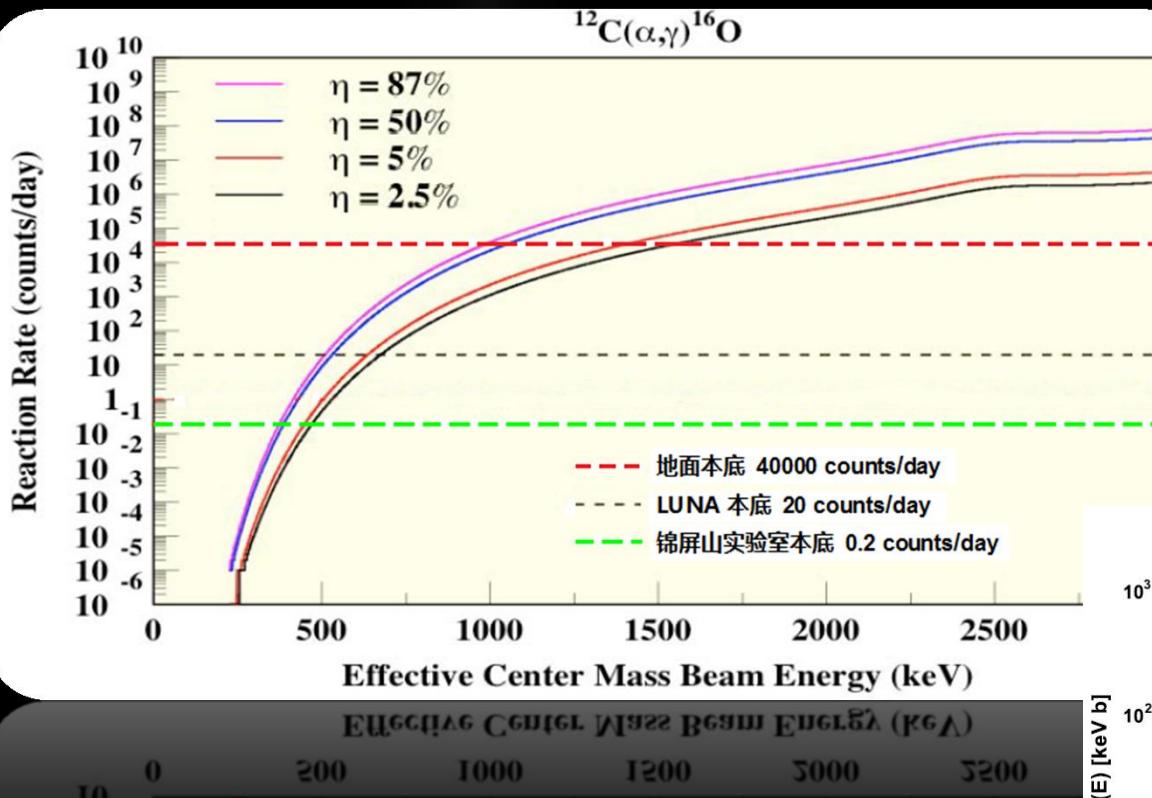
- 直接测量 γ
- 测量退激 γ
- 中子测量

本底构成



低本底优势

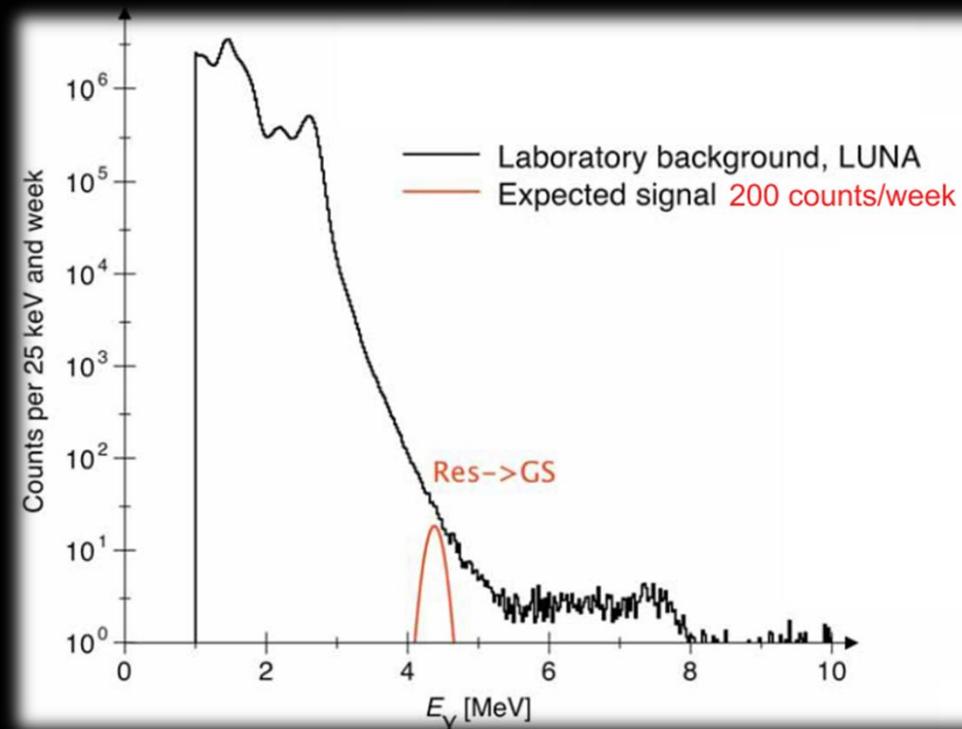
物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



低本底优势

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

$^{15}\text{N} (\alpha, \gamma) ^{19}\text{F}$ reaction



$$Q\text{-value} = 4.014 \text{ MeV}$$

^{15}N gas target

$250\mu\text{A}$ α -beam intensity

$\sim 70\%$ LUNA BGO detector

干扰反应 $^{15}\text{N}(\text{p}, \alpha\gamma)^{12}\text{C}$

气体靶中 H^+ 含量 $\sim 10^{-8}$



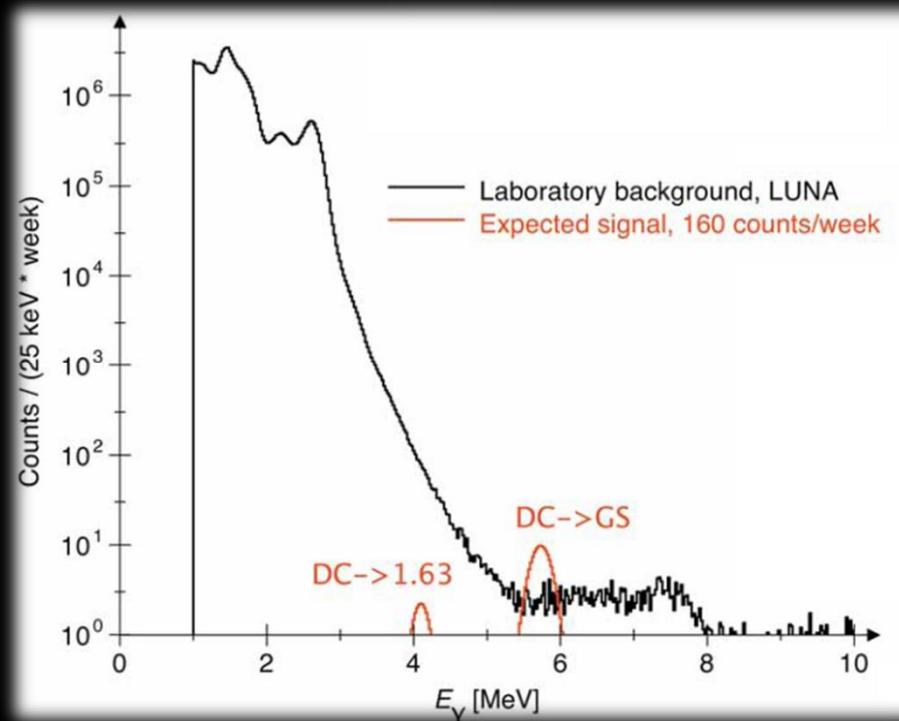
2013.8.21 西昌邛海



低本底优势

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

$^{16}\text{O} (\alpha, \gamma) ^{20}\text{Ne}$ reaction



2013.8.21 西昌邛海

^{16}O gas target

$\sim 6 \times 10^{17}$ atoms/cm²

250 μA α -beam intensity

$\sim 70\%$ LUNA BGO detector

干扰反应 $^{18}\text{O}(\alpha, n)$ for
 $E_\alpha > 0.86\text{MeV}$

低本底优势

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ reaction



$$E_\gamma = 440 \text{ keV}$$



$$E_\gamma = 1630 \text{ keV}$$

background **100x** lower than on surface

expected improved precision (**~ 10-15%**)



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

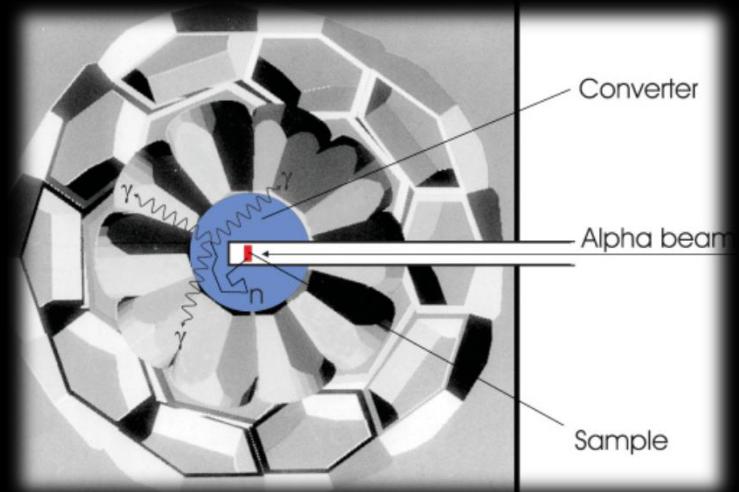
1. Neutron detector

- neutron detection
- expected n-background ~ 50x lower
- lowest energy achievable $E_{\text{cm}} \sim 200 \text{ keV}$
- greatly improved precision (~15%)

2. BaF_2 sphere surrounded

neutrons captured in Cd loaded moderator mainly by $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$

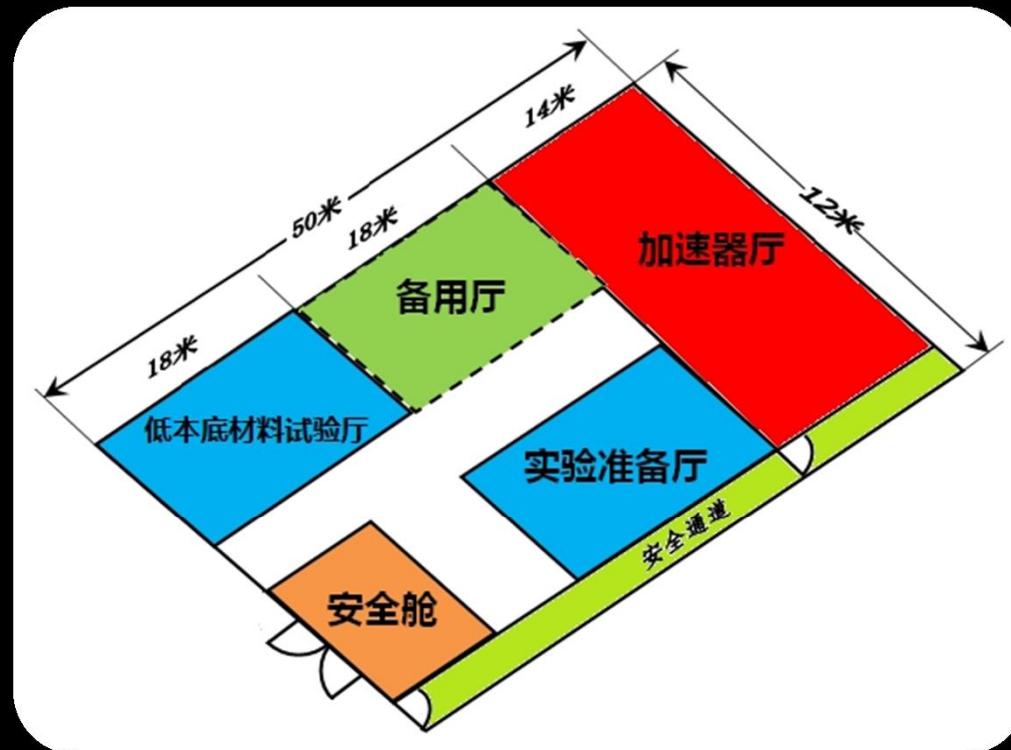
Efficiency: 10%~ 20%



物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

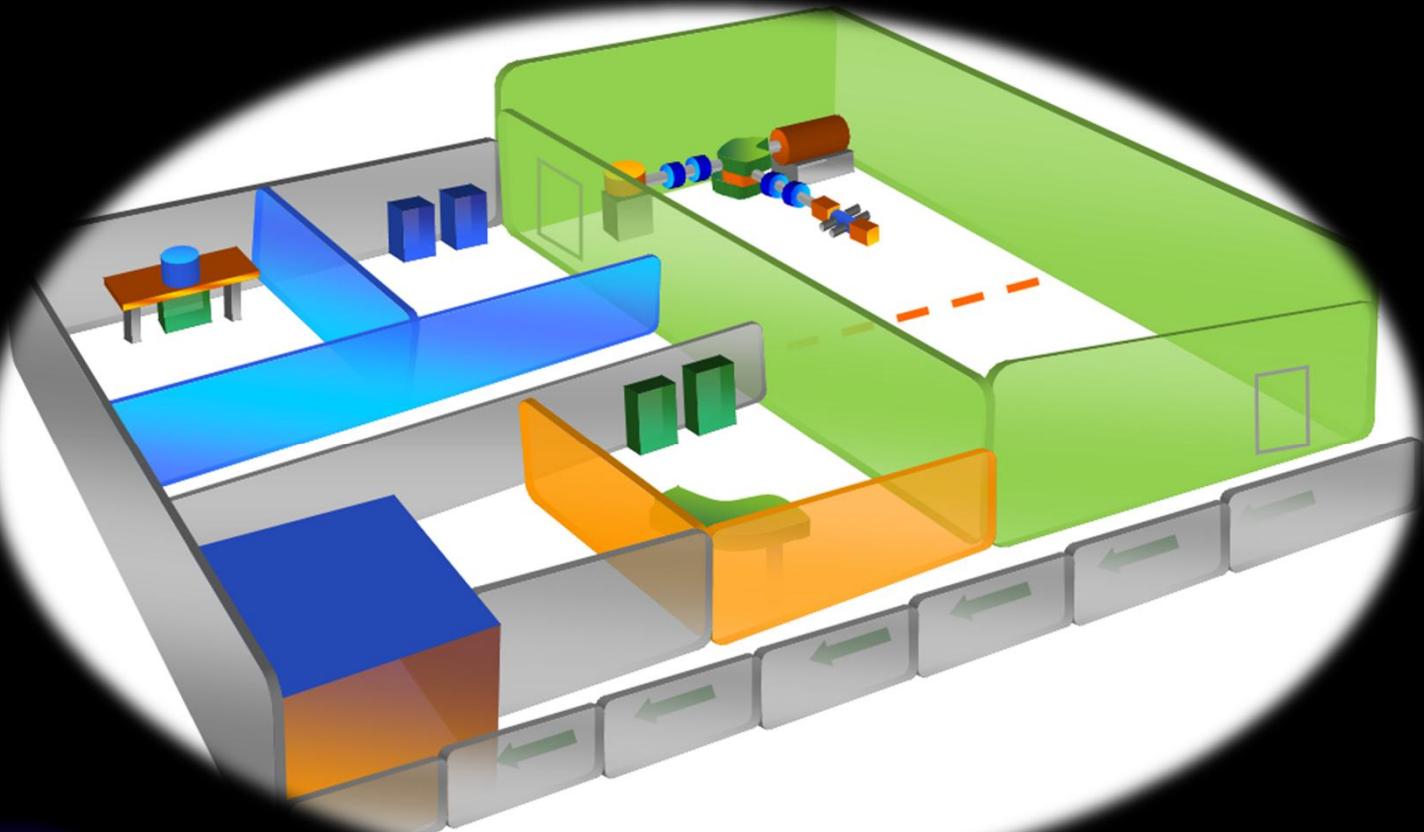
2014年底新开凿实验洞

50m(L) x 12m(W) x 12m(H)



实验室布局

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



实验室建设初步规划

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

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，实验洞地面防水处理

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建设

加速器进洞安装调试

主要工作包括：实验洞本底测量，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

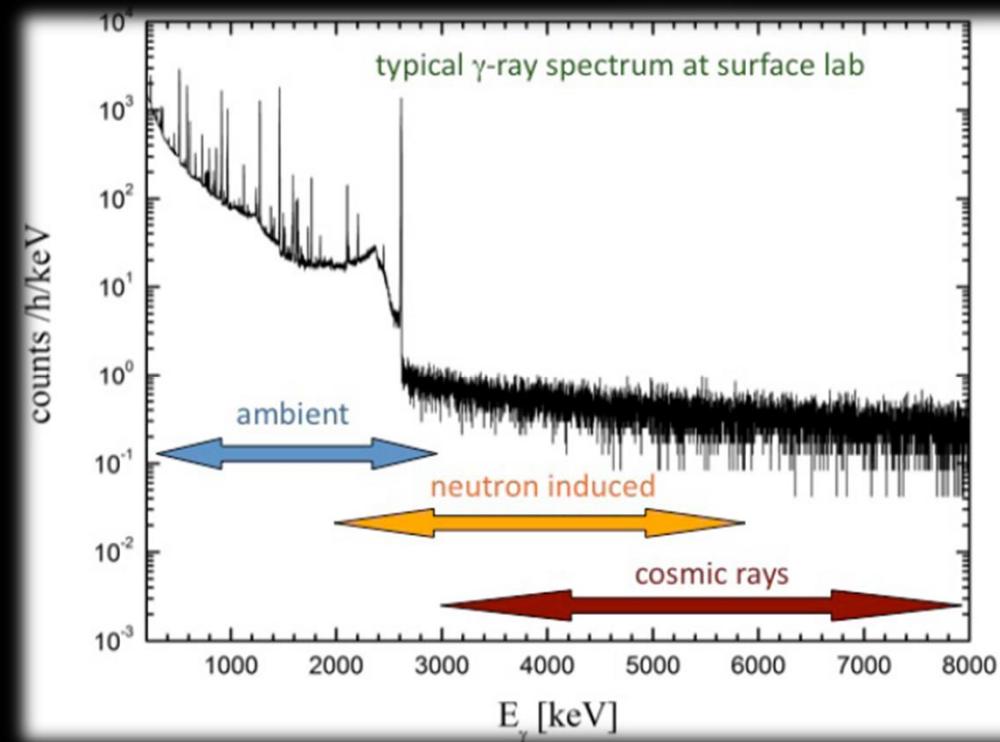


2013.8.21 西昌邛海



地下实验室难点

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



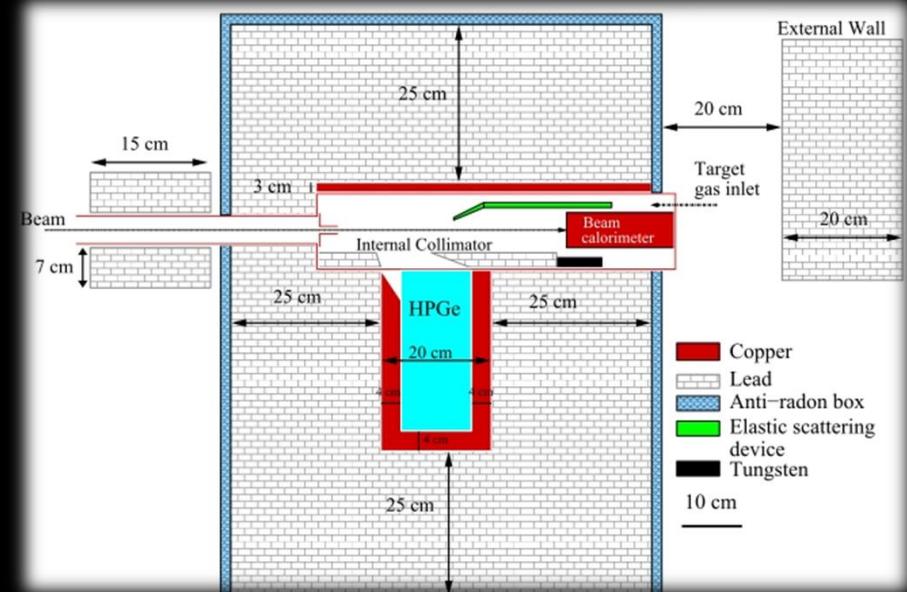
2013.8.21 西昌邛海

难点1：抑制本底水平

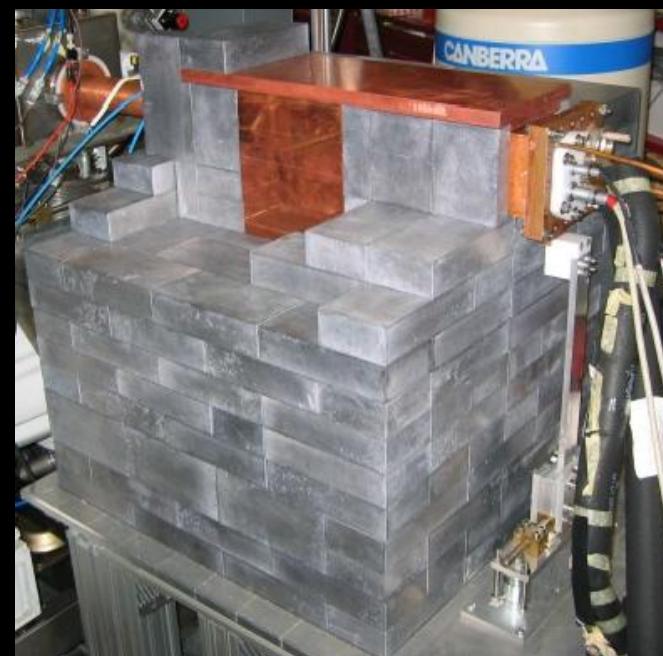
- 环境本底
洞内装修屏蔽
实验屏蔽设计
- 束流带来的本底
低本底材料选择
合理设计束流线

地下实验室难点

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



LUNA典型实验屏蔽

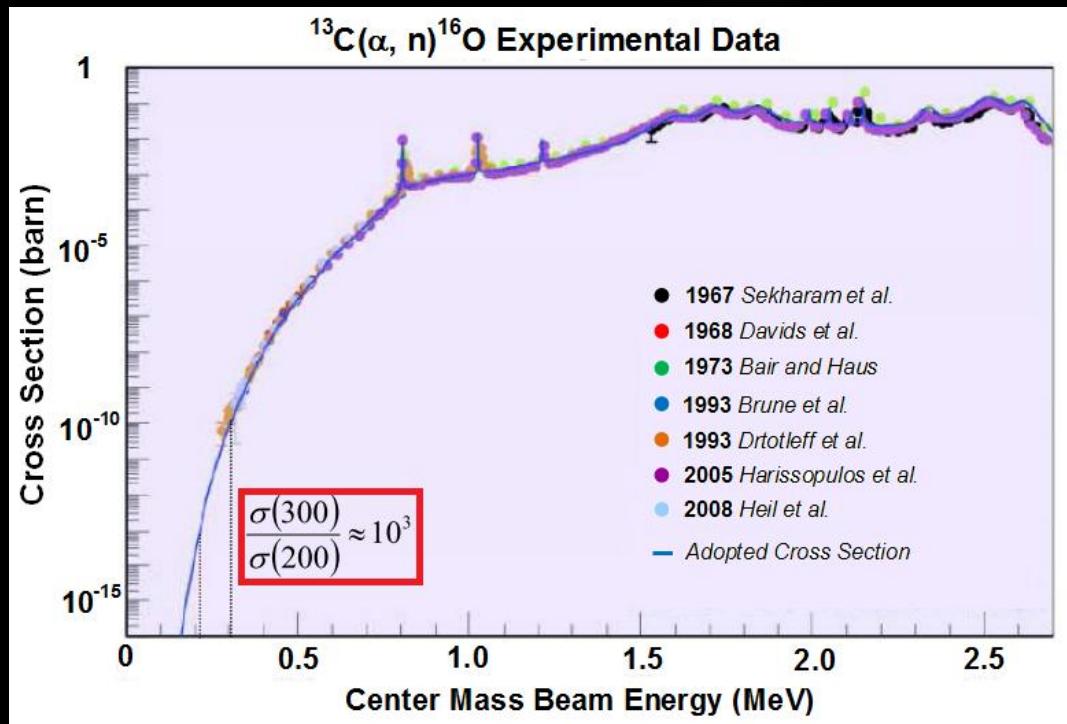


A.Caciolli et al.,
Eur.Phys.J.A 39, 179 - 186 (2009)



地下实验室难点

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



2013.8.21 西昌邛海

难点2：系统稳定性

➤ 能量稳定

加速器能量稳定度好于0.01%

能量分辨好于0.05%

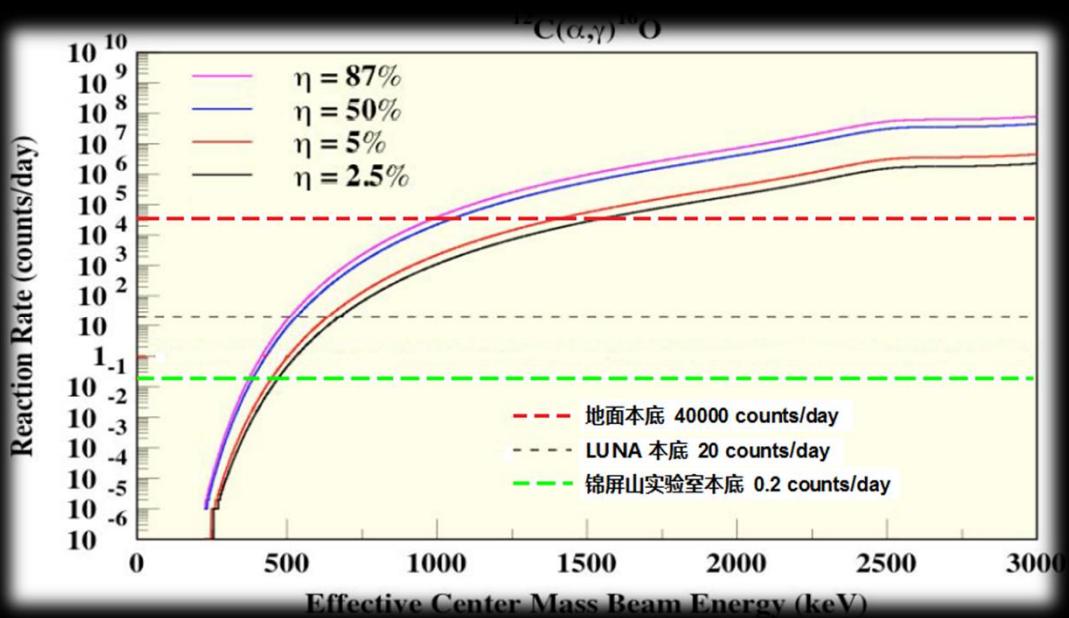
无窗气体靶系统

➤ 系统长期运行稳定性

地下实验特点计数率少周期长

地下实验室难点

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



难点3：提高测量效率

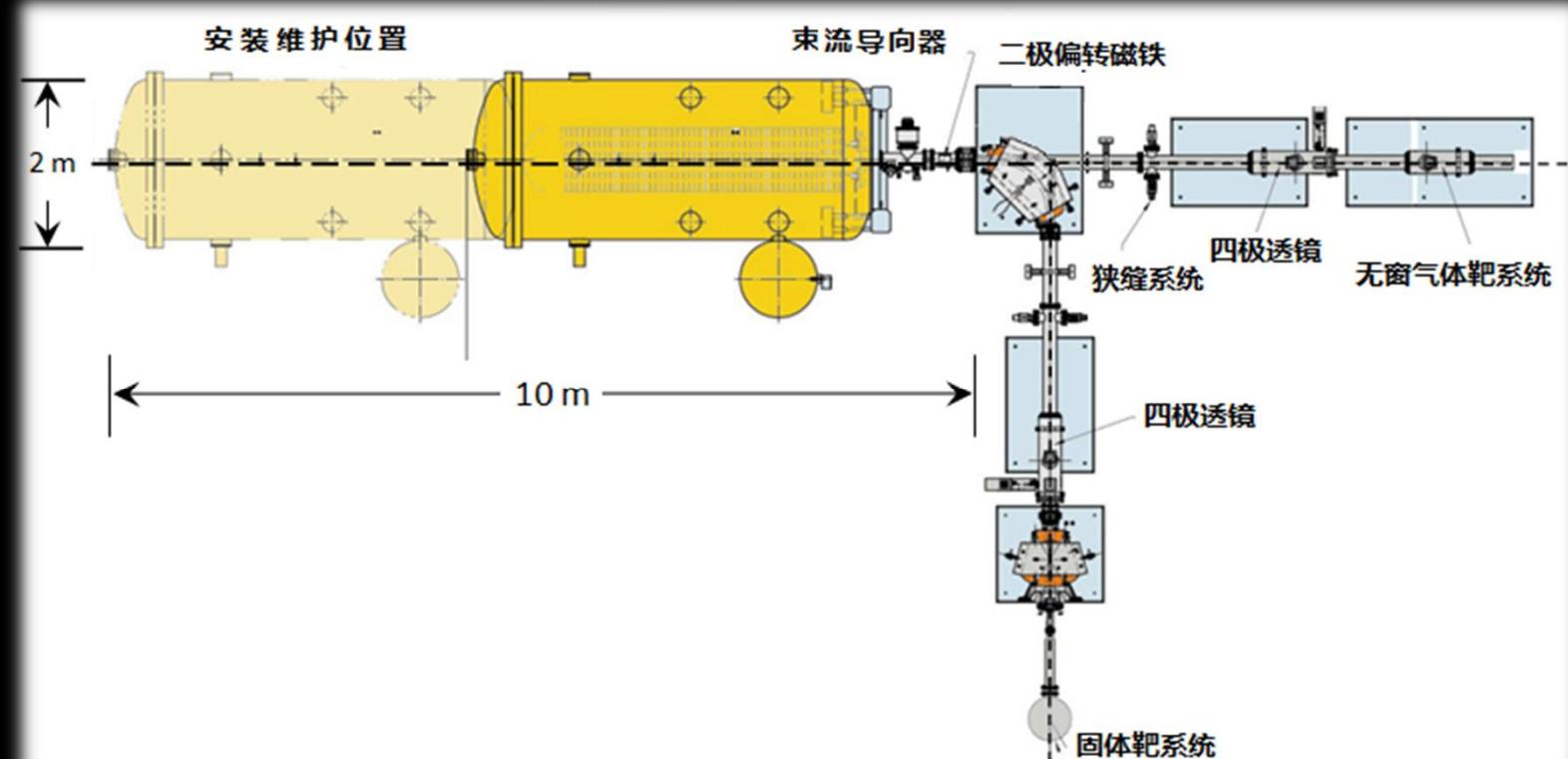
- 增加靶厚
无窗喷射气体靶
- γ 探测
探测器阵列
- 中子探测
高效中子探测器



2013.8.21 西昌邛海

加速器示意图

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



2013.8.21 西昌邛海

离子源和加速器

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



NEC, Pelletron

ECR source

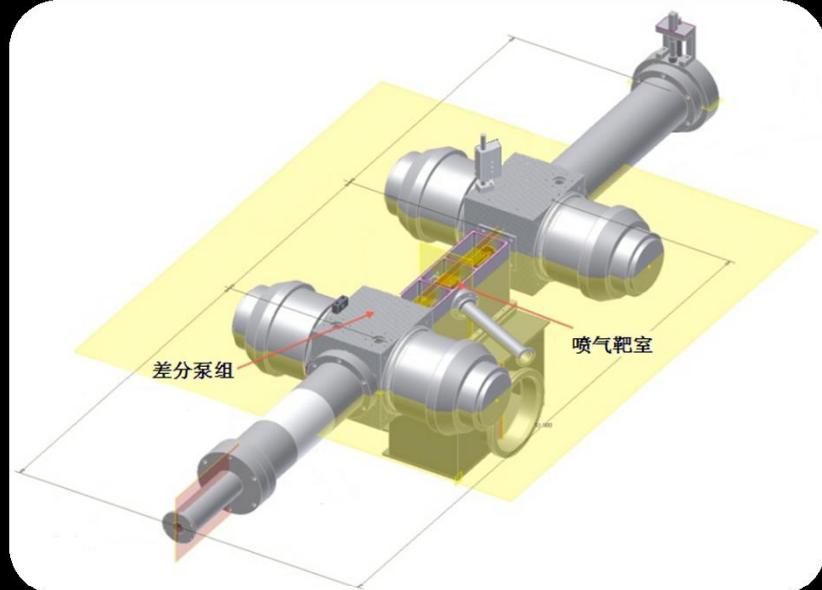
离子种类	束流强度 (个/秒)
H ⁺	5.0x10 ¹⁴
He ⁺	5.0x10 ¹³
He ²⁺	1.0x10 ¹³
Xe ¹⁷⁺	2.9x10 ¹²
Kr ¹⁵⁺	4.1x10 ¹¹
Ar ¹¹⁺	5.6x10 ¹¹
Ne ⁶⁺	1.0x10 ¹²
Fe ¹¹⁺	5.7x10 ¹¹
Ni ¹¹⁺	5.7x10 ¹¹

参考 ELENA Project

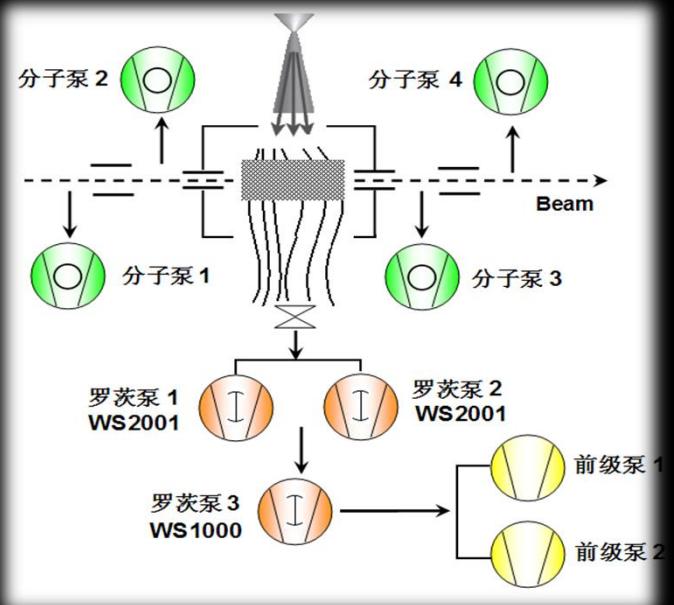


无窗气体靶系统

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



差分泵组示意图



实验室基础建设

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

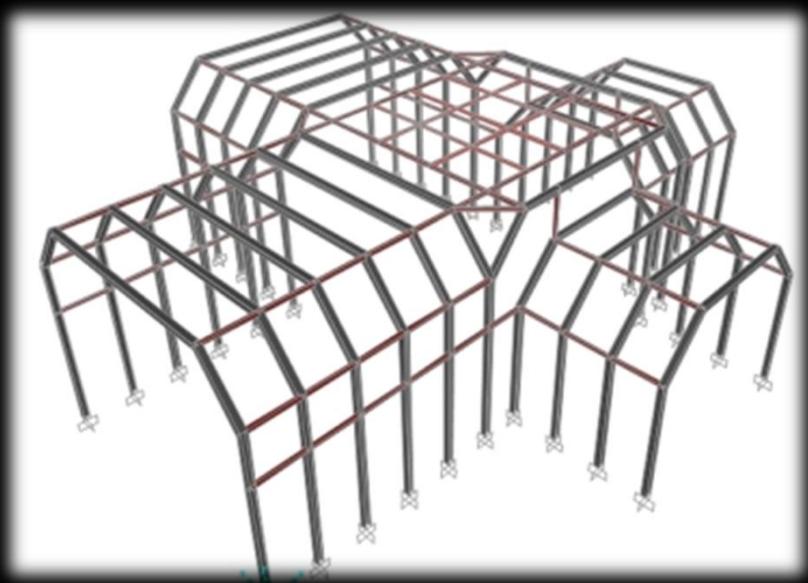
长期、安全、稳定运行
实验室基础建设非常重要



LUNA实验室支撑



2013.8.21 西昌邛海



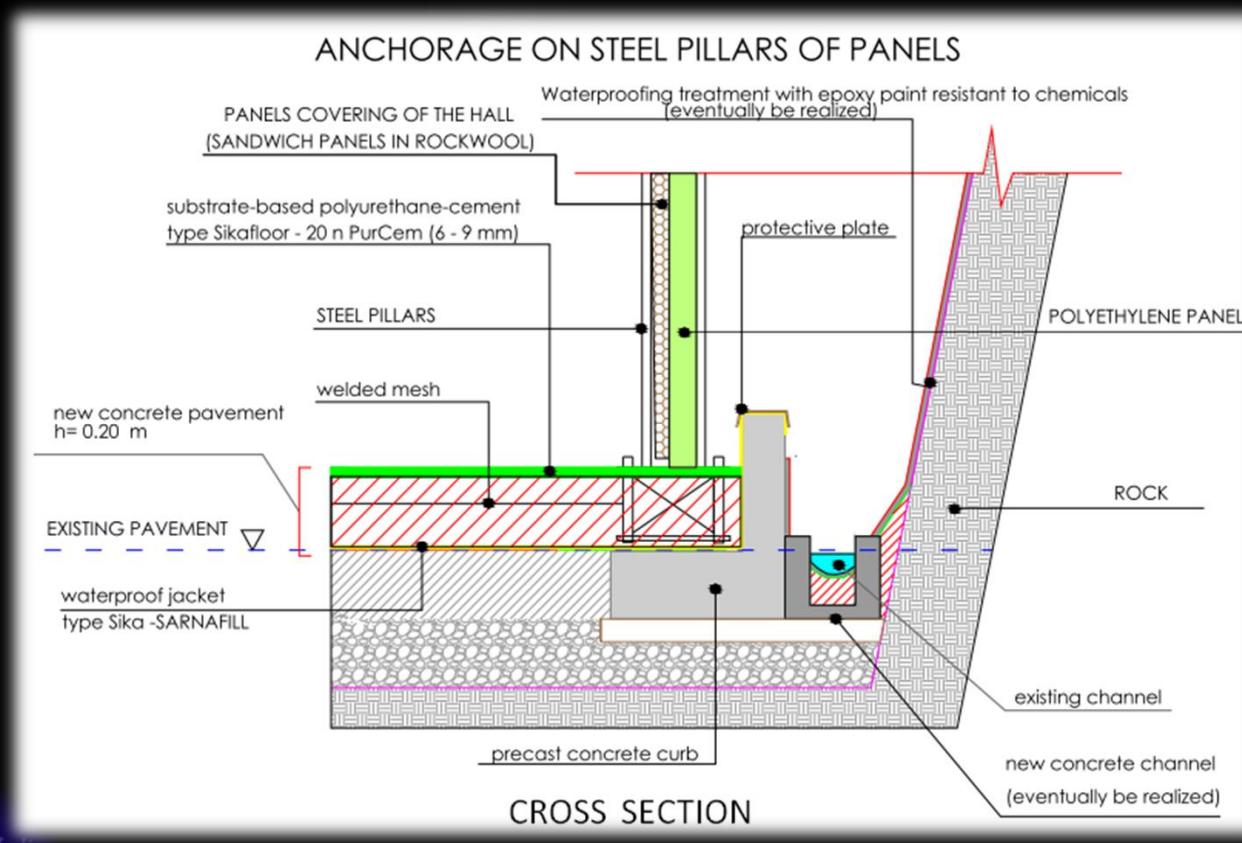
P. Martella, Round Table on LUNA- MV



实验室基础建设

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

实验室防水处理



P. Martella, Round Table on LUNA- MV



实验室基础建设

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划

实验室防水处理



P. Martella, Round Table on LUNA- MV



时间进度表

物理背景 LUNA介绍 锦屏优势 初步计划



总结

条件绝佳、机会难得！！！

"Some people are so crazy that they actually venture into deep mines to observe the stars in the sky."

Gaius Plinius Secundus, *Naturalis Historia*



Thank you!



Stellar sites



Big Bang
(primordial
nucleosynthesis)



Main sequence
(ex. Sun)



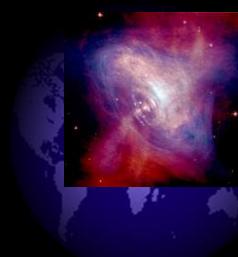
Red giant stars, stars of the
Asymptotic branch



Super giant stars,
Wolf-Rayet stars and
Pre-supernovae



Novae, supernovae,
X-ray bursts



AGB stars,
supernovae II,
Neutrons stars

Nuclear processes

Reactions between the lightest elements
p, d, He, Be, Li

Hydrogen burning
proton-proton chain, CNO cycle,
Ne-Na cycle, Mg-Al cycle

Helium burning
 3α -process, $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$
Other (α,γ) and (α,n) reactions

Advance burning stages
Reactions of C, O, N, Ne, Si...

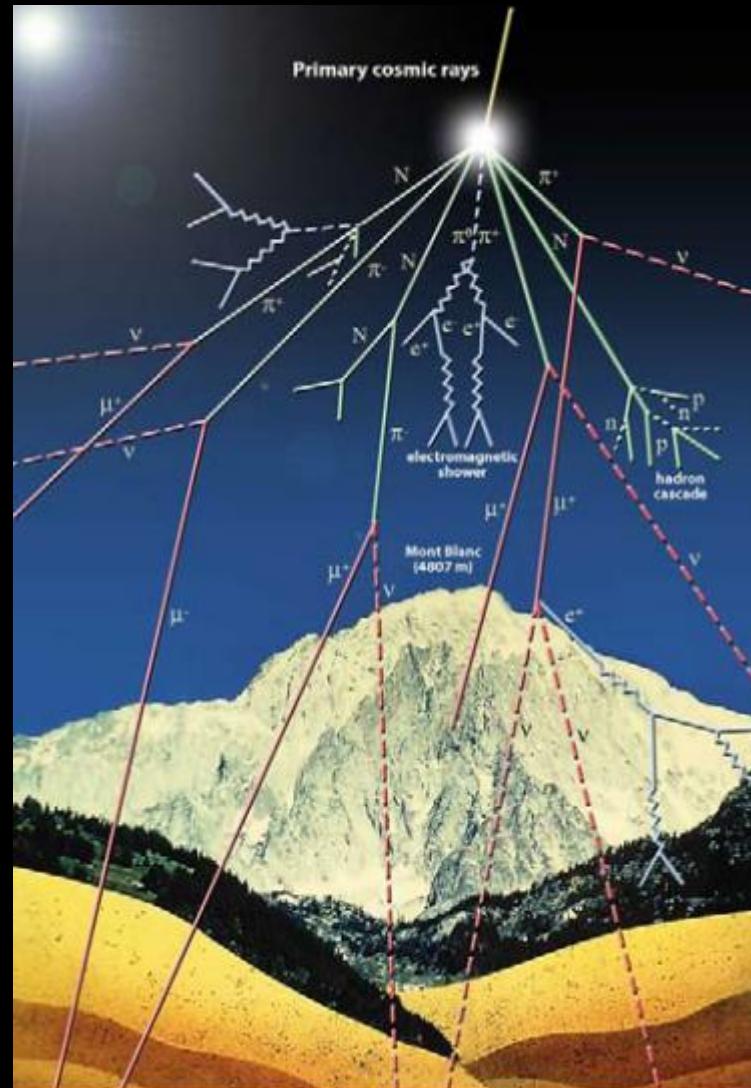
Explosive burning
Hot CNO cycle
Rapid proton capture (rp process)

Nucleosynthesis beyond iron
Slow neutron capture (s-process)
Rapid neutron capture (r-process)
photodisintegration and proton capture (p-process)

- Cosmic ray muons
- Muon-induced neutrons & radioactivity
- Rn and A=210 Pb-Bi-Po daughters
- Gamma and n emission from materials
- Rn emanation from materials
- Beam induced reactions



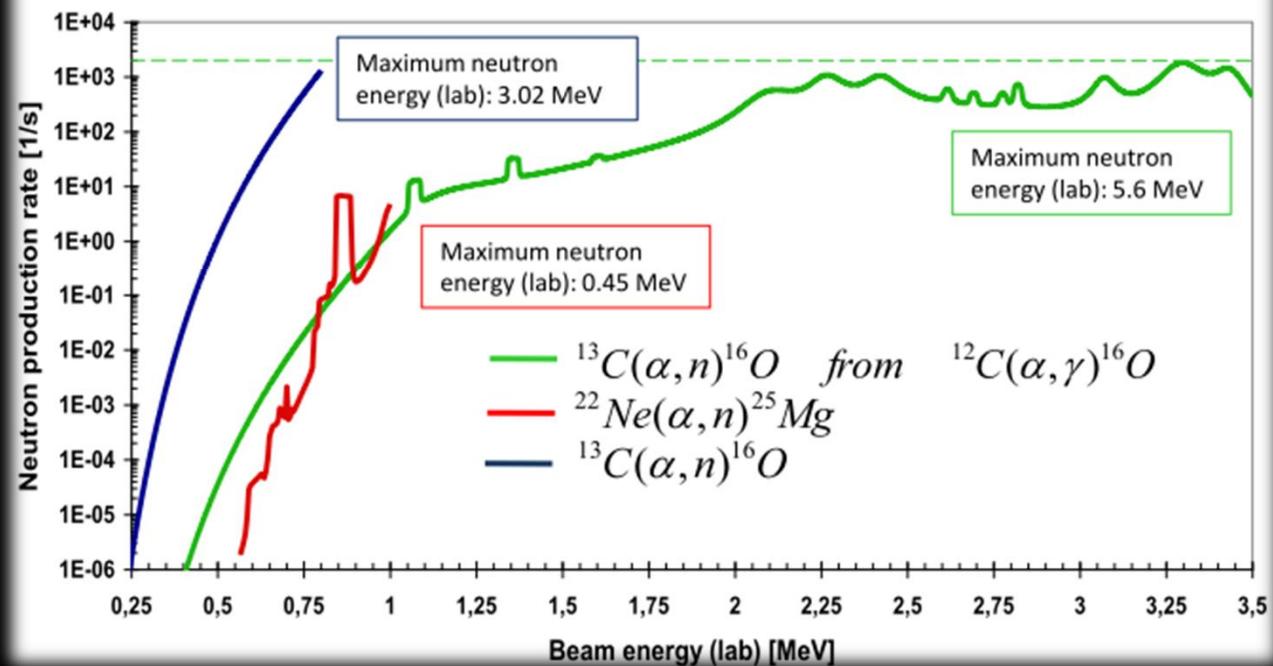
2013.8.21 西昌邛海



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
							$(50 \times 10^{-3} - 1 \times 10^3)$ eV	1.98	
							$1 \text{ keV} < E_n < 2.5 \text{ MeV}$	0.54	
	Hall C			5.1	5.2	0.25	$E_n > 2.5 \text{ MeV}$	0.23	21
美国 Diana		4800	4.86×10^{-9}						
英国 ELENA		2805	3.79×10^{-8}	34.9	0.83	0.52	$E_n > 0.5 \text{ MeV}$	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



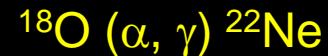
- Maximum neutron production rate is about 2000 n/s
- Maximum neutron energy (lab) is 5.6 MeV



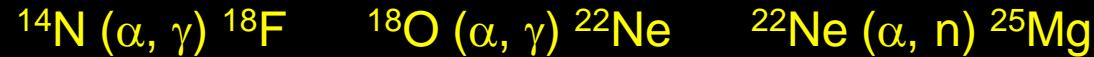
Stellar helium burning

Core helium burning, and shell hydrogen burning. Not only ^{12}C , but also $^{14,15}\text{N}$ are found and can be burnt by capture processes

Besides the “holy grail” reaction, also some other interesting reactions are found:



Consequences for the production of neutrons, via



Consequences for the production of fluorine, via



Consequences for escape from main helium burning, via





52