

低本底实验中宇宙线muon产生的本底研究

路浩奇

高能物理研究所

中国科学院粒子物理前沿卓越创新中心第八次全体会议

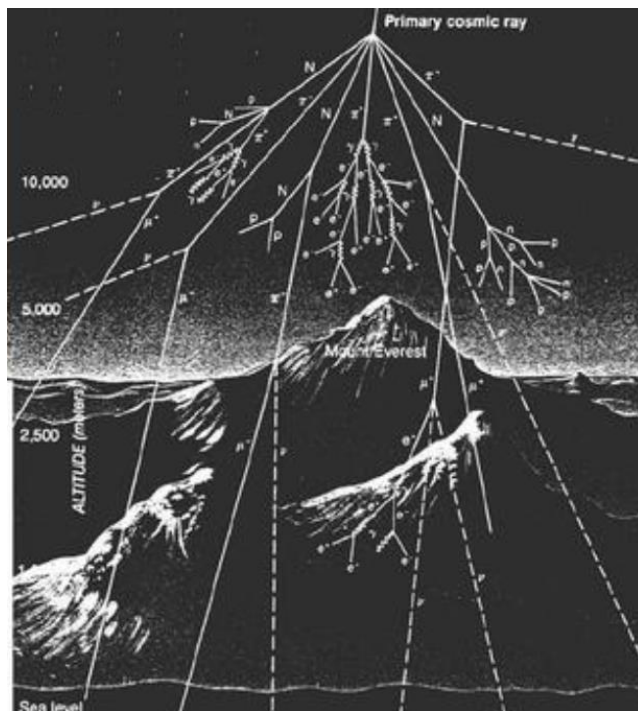
2020-12-04

提纲

- 简介
- 宇宙线muon引入中子本底的研究
- 宇宙线muon引入同位素本底的研究
- 总结

宇宙线

- 宇宙线：维克托·赫斯于1912年发现宇宙线。
- 宇宙射线为来自太阳系以外的高能量粒子，能量约从 $10^9\text{eV} \sim 10^{20}\text{eV}$ 以上。
- 宇宙线在大气簇射的过程中，这些碰撞产生很多 π 介子和K介子，这些很快会衰变为 μ 子，由于muon有很高的穿透能力，可达到地面和地下。
- 当宇宙线muon在穿过探测器时，与物质作用发生散裂 (muon spallation),产生中子和同位素，引入本底。



低本底实验

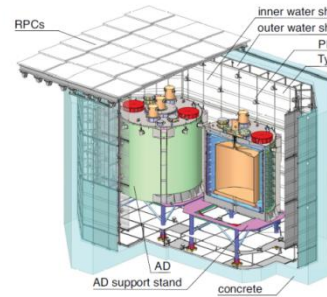
- 低本底实验：
 - 观测的信号事例率低，希望本底的事例越低越好，实验有好的信噪比和灵敏度。
 - 包括中微子实验，暗物质探测和无中微子双 β 衰变等实验。
 - 中微子实验：
 - 太阳中微子：~0.5-50/kton/day(液闪探测器)
 - 反应堆中微子:不同实验，探测器大小，距离反应堆远近不同
 - » 大亚湾实验：几十个-几百个/天
 - » 江门实验：~60/day
 - 弥散超新星中微子：~0.1/kton/year
 - 暗物质探测和无中微子双 β 衰变实验
 - 稀有事例观测；
 - 期望在信号能区极低本底(零本底)。

实验本底

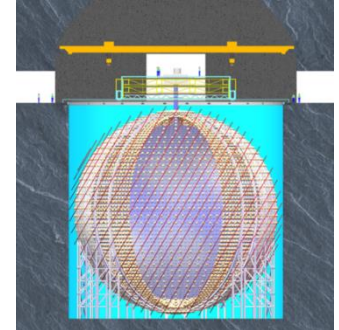
- 探测器研究中，本底主要包括：

比如：厚水层有效的屏蔽压低周围的放射性

- 探测器周围环境本底
 - 通过增加外围的屏蔽材料，阻挡外部放射性，最容易达到屏蔽效果。
- 探测器自身材料的本底：
 - 需要提纯材料，不断改进技术降低本底。



Dayabay



JUNO

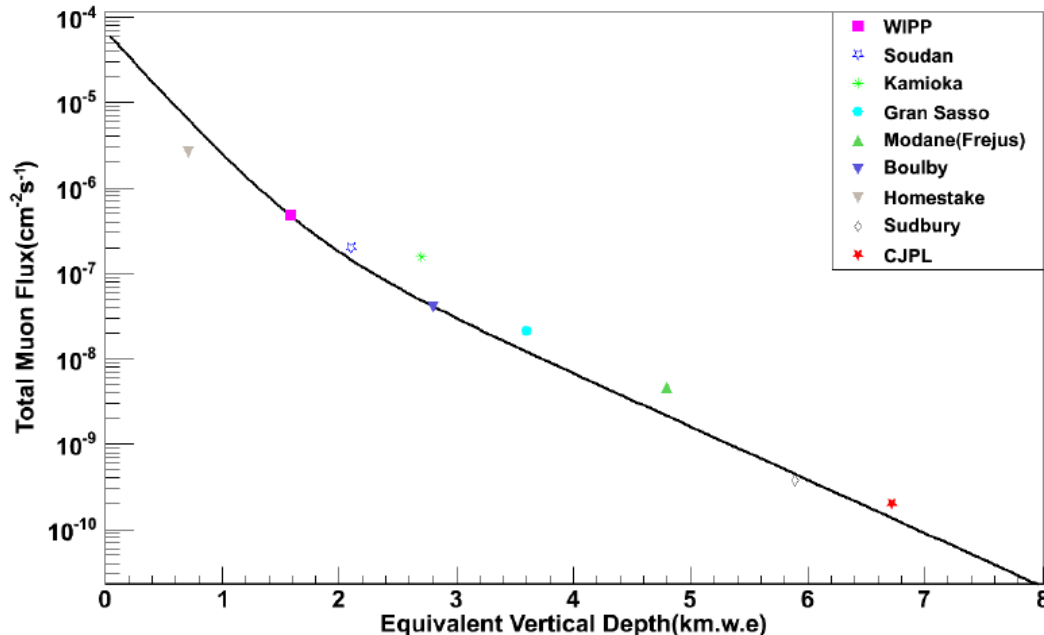
- 宇宙线muon引入的本底(报告的主要内容)

- 中子本底
- 伴生同位素本底
- 需要通过对中子和同位素性质进行研究，利用有效的veto方法去降低本底

岩层覆盖与宇宙线通量

- 厚的岩石层覆盖，探测器处于深地实验室
 - 可有效的降低muon流强

世界上一些地下实验点的岩石覆盖厚度（水当量）和muon



<https://arxiv.org/abs/1305.0899>

- 非常厚的岩石覆盖。
- **CPJL (Jingping)**
 - ~6700米水当量， $\sim 3.5 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$
 - Muon 事例率极低

Sudbury:

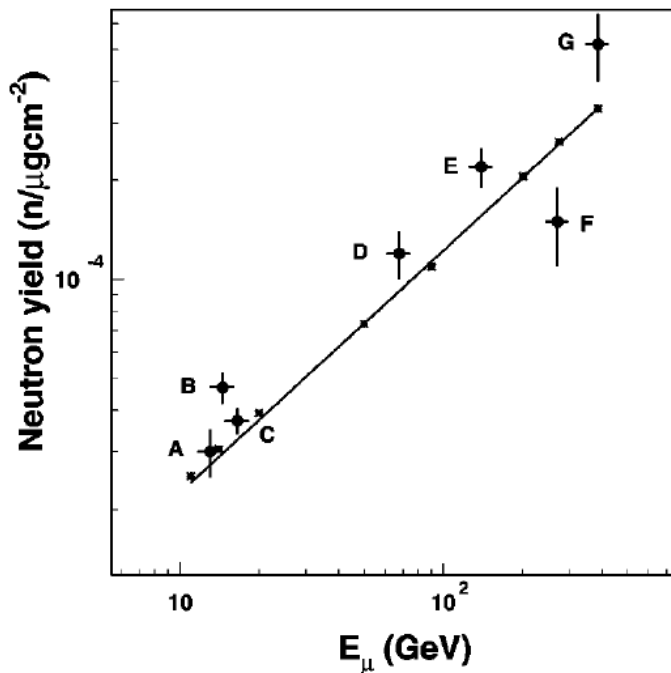
- 比如其中SNO实验；
 - SNO~6000米水当量
 - 探测器内muon事例率 ~3/hour.
 - 探测介质重水：D2O
 - 直接veto

暗物质和无中微子双 β 衰变实验在深地实验室，宇宙线不是主要本底。

宇宙线muon产生中子—产额的研究

- 对于muon引入中子的研究，有实验开始从20世纪70年代开始有实验测量，于此相关理论计算，和参数化也都有研究；
 - 主要是希望找到产额和muon平均能量之间的关系
- 2000年，把不同实验muon平均能量和已有的实验测量结合用公式描述有效的参数化；
- 可以直接计算中子产额，比较直接评估中子引入本底水平。

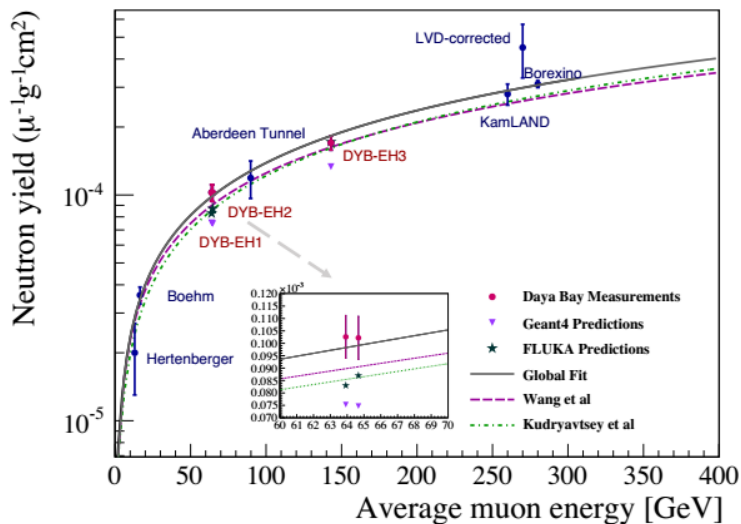
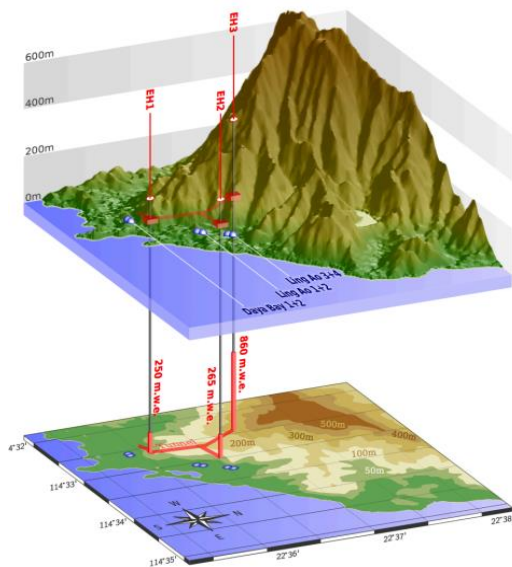
$$N_n = 4.14 E_\mu^{0.74} \times 10^{-6} \text{ neutron}/(\mu\text{g cm}^{-2})$$



Neutron production rate as a function of muon energy. The stars indicate the FLUKA simulation with a fit to the power law. The experimental points, with the abscissa corresponding to the average energy at the experiment's depth: (A) 20 meter water equivalent (m.w.e.) [7,6], (B) 25 m.w.e. [23], (C) 32 m.w.e. by the Palo Verde experiment [6], (D) 316 m.w.e. [23], (E) 750 m.w.e. [24], (F) 3650 m.w.e. by the LVD experiment at Gran Sasso [8], and (G) 5200 m.w.e. by the LSD detector at Mont Blanc [5].

Phys. Rev D, 64, 013012

中子产额-大亚湾



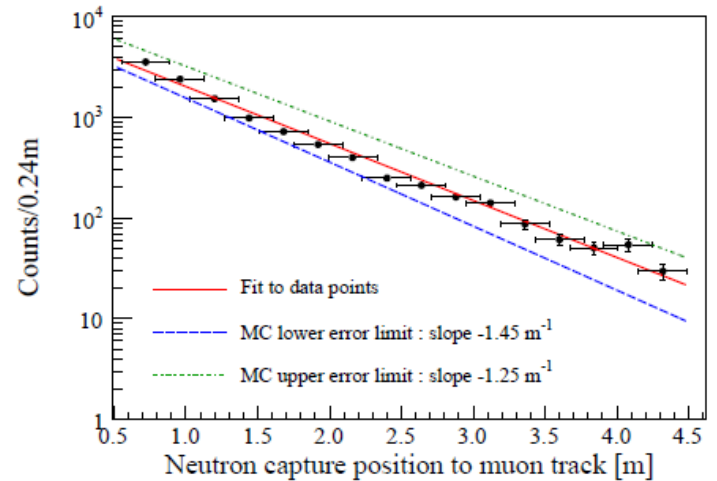
	EH1	EH2	EH3
E_{avg}^{μ} (GeV)	63.9 ± 3.8	64.7 ± 3.9	143.0 ± 8.6
Measured Values ($\times 10^{-5} \mu^{-1} g^{-1} cm^2$)			
Y_n	10.26 ± 0.86	10.22 ± 0.87	17.03 ± 1.22
MC Predictions ($\times 10^{-5} \mu^{-1} g^{-1} cm^2$)			
Y_n (GEANT4)	7.53 ± 0.01	7.47 ± 0.05	13.35 ± 0.03
Y_n (FLUKA)	8.34 ± 0.02	8.70 ± 0.03	17.15 ± 0.04

Phys. Rev. D 97, 052009

- 三个实验厅不同岩石覆盖，不同muon平均能量下的产额结果。
- 同时与世界上其他的实验结合，power law的函数拟合，系数 0.77 ± 0.03 。
- 对宇宙线引入中子产额有了更深入的理解，可以更好约束产额和平均能量之间的关系。

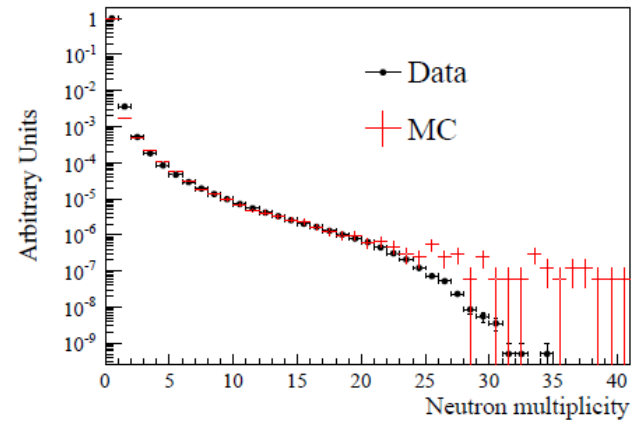
中子传播和多重度

muon



大亚湾特色设计：

- Telescope-RPCs，可以有效的精确测量muon径迹，测量中子距离muon径迹分布；
- 通过MC和数据对比，来验证MC中子的传播；
- MC和数据中子多重都对比。

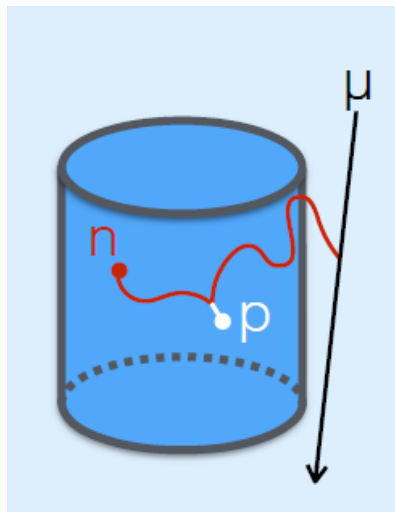


Phys. Rev. D 97, 052009

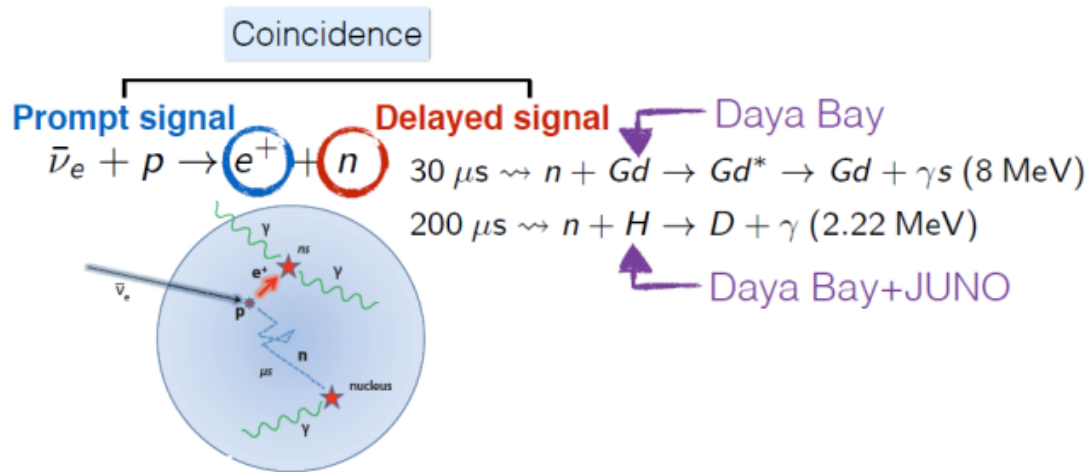
快中子本底(I)

- 快中子本底：
 - 探测器中没有veto到的muon，以及muon穿过探测器周边物质（如岩石），产生的高能中子进入探测器，撞击质子反冲产生快信号，中子俘获衰变形成慢信号，为关联信号本底。
 - 反应堆中微子实验的重要本底，Daya Bay, Double Chooz, RENO 都对此类本底进行过研究。
 - 大亚湾实验最此做了更加深入的研究。

快中子本底



反应堆中微子信号

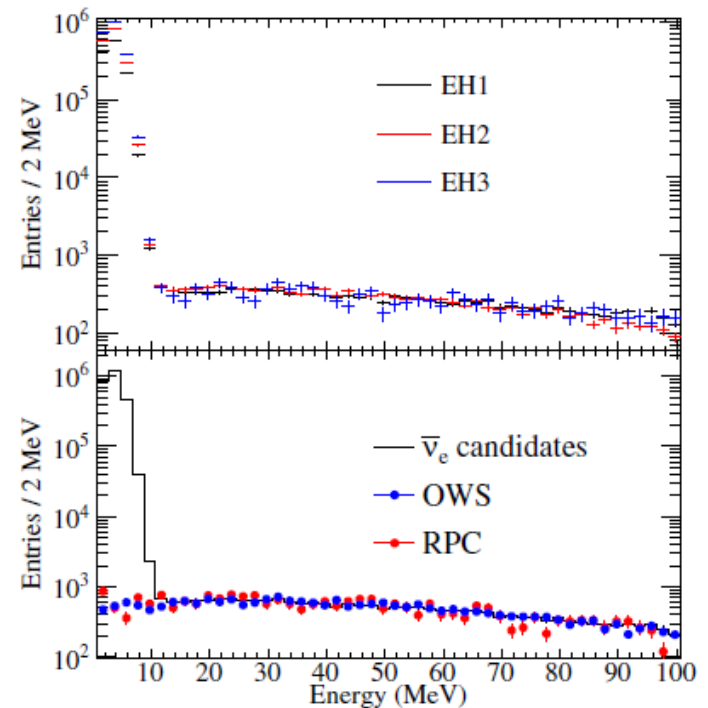


快中子本底(II)

- 快中子信号能谱：
 - 一般处理，无法得到低能段（10MeV以下）靠高能普反推（上图）
- 大亚湾通过多反符合探测器的优势（大亚湾内外水池（OWS），顶部RPC探测器（RPC）），直接测量到了快中子能谱的全谱。
- 将快中子本底控制在非常低的水平
 - $S/B \sim 0.1\%$
 - 本底系统误差20%水平

	EH1	EH2	EH3
Fast neutron(/AD/day)	0.79 ± 0.10	0.57 ± 0.07	0.05 ± 0.01
B/S	0.12%	0.10%	0.07%
$\Delta B/B$	13%	13%	20%

Phys. Rev. D.95.072006

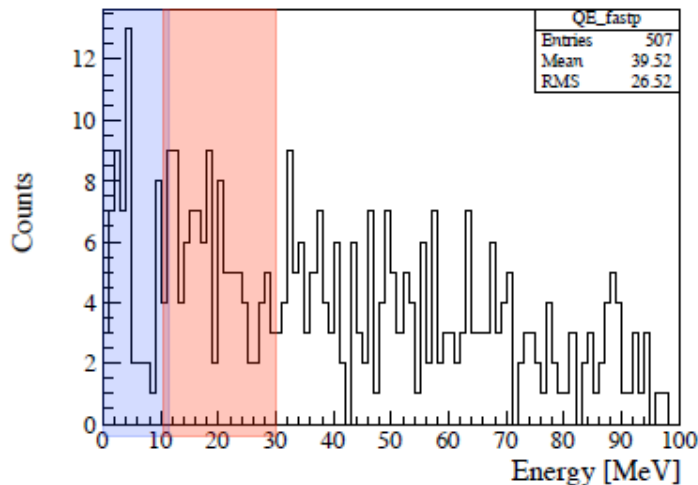


- muon引入的中子本底研究上中子产额，模拟和数据对比，传播，快中子本底能谱的研究，相对来说比较全面。

快中子本底(III)

- 江门中微子实验:

- 反应堆中微子/超新星弥散中微子 (信号: 反beta衰变反应的关联信号)
- 需要对快中子本底进行研究



0.7-12MeV, 反应堆中微子能区

11-30MeV, 弥散超新星中微子能区

FN background rate(reactor neutrino)

0.044/day ~ 16.1/year

FN background rate(DSNB)

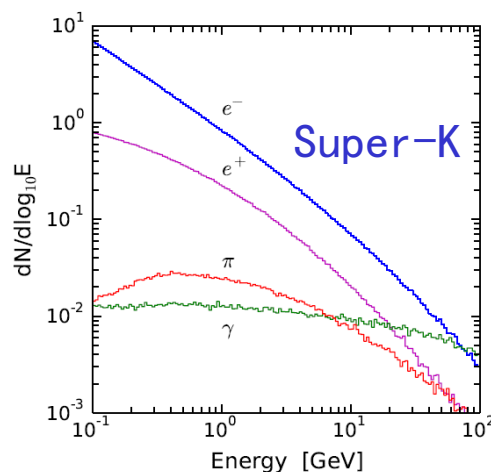
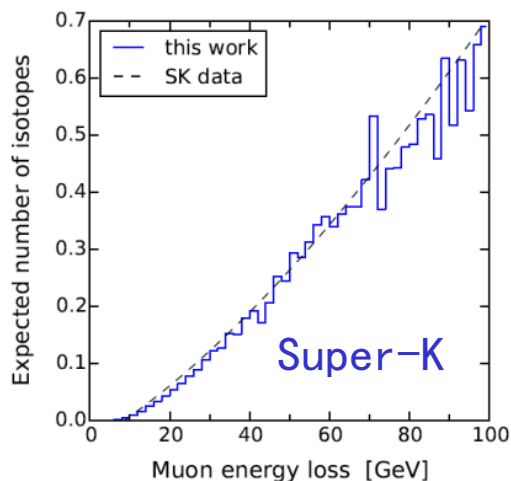
0.067/day ~ 24.6/year

快中子本底事例率: <0.1/day (实验设计要求)

同位素产生

- 当宇宙线muon在穿过物质
 - 常用的中微子探测器液闪和水；
 - 同位素的产生大部分是有muon 散裂产生；
 - 主要都是次级粒子中gamma, pi介子等参与作用而产生；

液闪C12



Primary process	
n	$\pi^- + {}^1\text{H}, {}^{12}\text{C}$
${}^{11}\text{C}$	${}^{12}\text{C}(\gamma, n)$
${}^7\text{Be}$	${}^{12}\text{C}(\gamma, n\alpha)$
${}^{10}\text{Be}$	${}^{12}\text{C}(n, {}^3\text{He})$
${}^{12}\text{B}$	${}^{12}\text{C}(n, p)$
${}^8\text{Li}$	${}^{12}\text{C}(n, p\alpha)$
${}^{10}\text{C}$	${}^{12}\text{C}(\pi^+, np)$
${}^6\text{He}$	${}^{12}\text{C}(n, 2p{}^3\text{He})$
${}^8\text{B}$	${}^{12}\text{C}(\pi^+, {}^2\text{H}{}^2\text{H})$
${}^9\text{Li}$	${}^{12}\text{C}(\pi^-, {}^3\text{He})$
${}^9\text{C}$	${}^{12}\text{C}(\pi^+, {}^3\text{H})$
${}^{12}\text{N}$	${}^{12}\text{C}(p, n)$
${}^{11}\text{Be}$	${}^{12}\text{C}(n, 2p)$
${}^8\text{He}$	${}^{12}\text{C}(\pi^-, n3p)$
${}^{13}\text{B}$	${}^{13}\text{C}(n, p)$
${}^{15}\text{O}$	${}^{16}\text{O}(\gamma, n)$
${}^{13}\text{N}$	${}^{13}\text{C}(p, n)$

muon能量损失和同位素产额关系

Muon产生次级粒子能量

	Muon可见能量	占总muon比例	同位素产额占比
Super-K	>30GeV	2%	~60%

[arXiv:1503.04823](https://arxiv.org/abs/1503.04823)

同位素产额(I)

KamLAND(液闪)实验的同位素测量结果

	Lifetime in KamLAND LS	Radiation energy (MeV)	Yield ($\times 10^{-7} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$)			Fraction from showering μ (%)
			Ref. [10]	FLUKA calc.	This measurement	This measurement
n	207.5 μs	2.225 (capt. γ)	–	2097 \pm 13	2787 \pm 311	64 \pm 5
^{12}B	29.1 ms	13.4 (β^-)	–	27.8 \pm 1.9	42.9 \pm 3.3	68 \pm 2
^{12}N	15.9 ms	17.3 (β^+)	–	0.77 \pm 0.08	1.8 \pm 0.4	77 \pm 14
^8Li	1.21 s	16.0 ($\beta^- \alpha$)	1.9 \pm 0.8	21.1 \pm 1.4	12.2 \pm 2.6	65 \pm 17
^8B	1.11 s	18.0 ($\beta^+ \alpha$)	3.3 \pm 1.0	5.77 \pm 0.42	8.4 \pm 2.4	78 \pm 23
^9C	182.5 ms	16.5 (β^+)	2.3 \pm 0.9	1.35 \pm 0.12	3.0 \pm 1.2	91 \pm 32
^8He	171.7 ms	10.7 ($\beta^- \gamma n$)	} 1.0 \pm 0.3	0.32 \pm 0.05	0.7 \pm 0.4	76 \pm 45
^9Li	257.2 ms	13.6 ($\beta^- \gamma n$)		3.16 \pm 0.25	2.2 \pm 0.2	77 \pm 6
^{11}C	29.4 min	1.98 (β^+)	421 \pm 68	416 \pm 27	866 \pm 153	62 \pm 10
^{10}C	27.8 s	3.65 ($\beta^+ \gamma$)	54 \pm 12	19.1 \pm 1.3	16.5 \pm 1.9	76 \pm 6
^{11}Be	19.9 s	11.5 (β^-)	<1.1	0.84 \pm 0.09	1.1 \pm 0.2	74 \pm 12
^6He	1.16 s	3.51 (β^-)	7.5 \pm 1.5	12.08 \pm 0.83	–	–
^7Be	76.9 day	0.478 (EC γ)	107 \pm 21	105.3 \pm 6.9	–	–

- 表中所示：Phys. Rev C **81**, 025807 (2010)
 - 同位素寿命 ms-day不等；
 - 相对来说，长寿命高产额的的同位素，压低最困难
 - C11, C10, 如果veto时间长，探测器的活时间降低太多
 - 大部分同位素为单信号事例；
 - Li9/He8有关联信号事例，对探测信号是关联的事例的形成重要的本底(IBD信号).

同位素产额(II)

JCAP08(2013)049

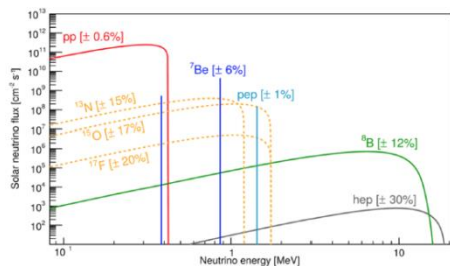
	GEANT4 Model III	GEANT4 Model IV — $\langle E_\mu \rangle = 283 \pm 19 \text{ GeV}$ —	FLUKA	Borexino	KamLAND $\langle E_\mu \rangle = 260 \pm 8 \text{ GeV}$
Isotopes	Yield $[10^{-7} (\mu\text{g}/\text{cm}^2)^{-1}]$				
^{12}N	1.11 ± 0.13	3.0 ± 0.2	0.5 ± 0.2	< 1.1	1.8 ± 0.4
^{12}B	30.1 ± 0.7	29.7 ± 0.7	28.8 ± 1.9	56 ± 3	42.9 ± 3.3
^8He	< 0.04	0.18 ± 0.05	0.30 ± 0.15	< 1.5	0.7 ± 0.4
^9Li	0.6 ± 0.1	1.68 ± 0.16	3.1 ± 0.4	2.9 ± 0.3	2.2 ± 0.2
^8B	0.52 ± 0.09	1.44 ± 0.15	6.6 ± 0.6	14 ± 6	8.4 ± 2.4
^6He	18.5 ± 0.5	8.9 ± 0.4	17.3 ± 1.1	38 ± 15	not reported
^8Li	27.7 ± 0.7	7.8 ± 0.4	28.8 ± 1.0	7 ± 7	12.2 ± 2.6
^9C	0.16 ± 0.05	0.99 ± 0.13	0.91 ± 0.10	< 16	3.0 ± 1.2
^{11}Be	0.24 ± 0.06	0.45 ± 0.09	0.59 ± 0.12	< 7.0	1.1 ± 0.2
^{10}C	15.0 ± 0.5	41.1 ± 0.8	14.1 ± 0.7	18 ± 5	16.5 ± 1.9
^{11}C	315 ± 2	415 ± 3	467 ± 23	886 ± 115	866 ± 153
Neutrons	Yield $[10^{-4} (\mu\text{g}/\text{cm}^2)^{-1}]$				
	3.01 ± 0.05	2.99 ± 0.03	2.46 ± 0.12	3.10 ± 0.11	2.79 ± 0.31

- KamLAND和Borexino模拟和数据对比的结果。
 - 不同种类的同位素模拟和数据差别可达几倍；
 - 主要是强过程与核素的作用比较复杂，在模拟中对此类过程比描述不准确。

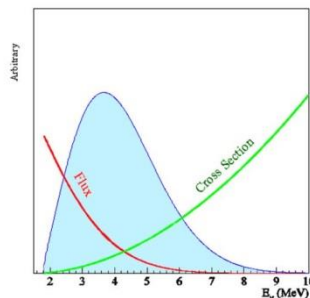
同位素对实验影响

- muon引入同位素种类多，衰变后能谱的范围和很多物理相关研究的能区重合（0-20MeV）
 - 比如太阳中微子，反应堆中微子，弥散超新星中微子等。
- 关联事例
 - Li9/He8本底为关联本底
 - 反应堆中微子
- 单事例
 - 太阳中微子

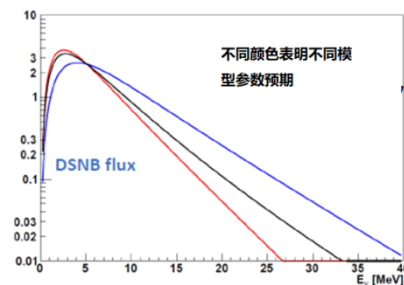
	Lifetime in KamLAND LS	Radiation energy (MeV)
n	207.5 μ s	2.225 (capt. γ)
^{12}B	29.1 ms	13.4 (β^-)
^{12}N	15.9 ms	17.3 (β^+)
^8Li	1.21 s	16.0 ($\beta^- \alpha$)
^8B	1.11 s	18.0 ($\beta^+ \alpha$)
^9C	182.5 ms	16.5 (β^+)
^8He	171.7 ms	10.7 ($\beta^- \gamma n$)
^9Li	257.2 ms	13.6 ($\beta^- \gamma n$)
^{11}C	29.4 min	1.98 (β^+)
^{10}C	27.8 s	3.65 ($\beta^+ \gamma$)
^{11}Be	19.9 s	11.5 (β^-)
^6He	1.16 s	3.51 (β^-)
^7Be	76.9 day	0.478 (EC γ)



太阳中微子能谱 (SSM)



反应堆中微子能谱



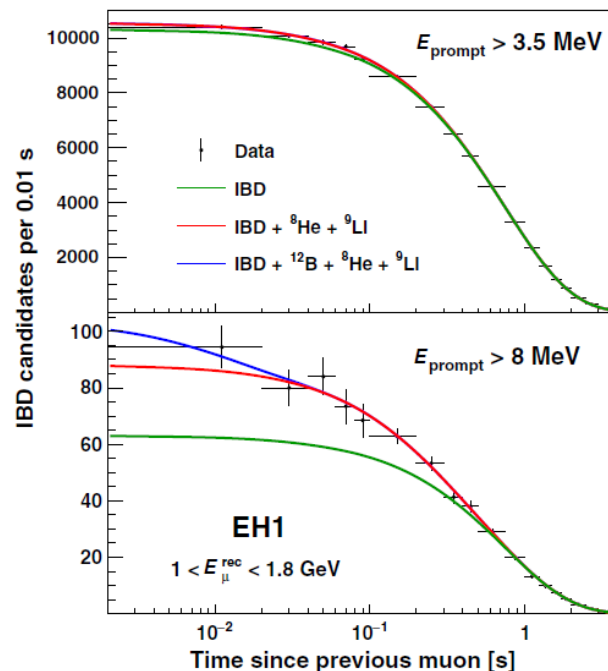
超新星弥散中微子

(Jie Cheng neutrino2020, poster)

Li9/He8 本底-反应堆中微子

- 大亚湾
 - 使用时间信息拟合
 - 能量分段拟合
 - 在muon可见能量低的能段产额低，muon事例率相对高，不易确定产额

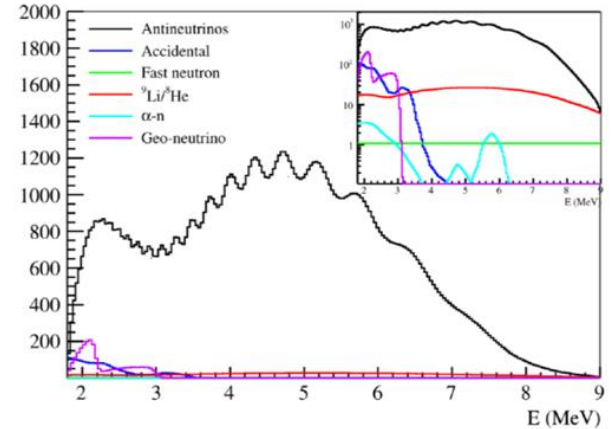
- Li9/He8本底控制的水平
 - S/B: 0.3-0.4%，
 - 系统误差30-40%水平



	EH1	EH2	EH3
Li9/He8(/AD/day)	2.38 ± 0.66	1.59 ± 0.49	0.19 ± 0.08
ΔB/B	28%	31%	42%

Li9/He8本底-反应堆中微子

- Li9/He8是反应堆中微子反beta衰变事例的重要本底，对JUNO质量等级的研究很重要。
- 宇宙线本底压低
 - 1.5 ms veto,
 - muon 径迹，3米半径的圆柱体veto, 1.2s
 - 无径迹，整个探测器做1.2 veto;
 - 活时间83%



Selection	IBD efficiency	IBD	Geo- ν s	Accidental	${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	Fast n	(α, n)
-	-	83	1.5	$\sim 5.7 \times 10^4$	84	-	-
Fiducial volume	91.8%	76	1.4	410	77	0.1	0.05
Energy cut	97.8%	73	1.3		71		
Time cut	99.1%			1.1			
Vertex cut	98.7%	60	1.1	0.9	1.6		
Muon veto	83%	60	1.1	0.9	1.6		
Combined	73%	60	3.8				

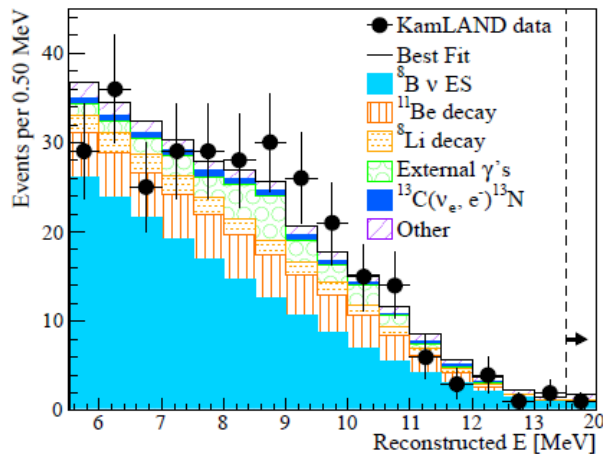
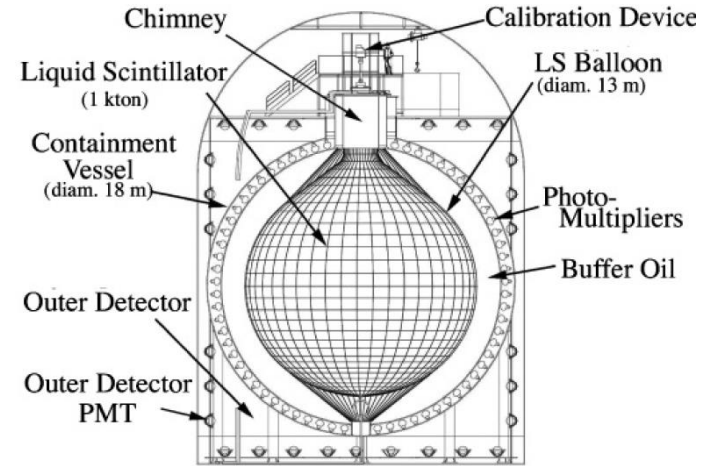
The efficiencies of antineutrino selection cuts, signal and backgrounds rates.

- 通过veto可以将Li9/He8的本底1.6/day, B/S~2.7%

Neutrino Physics with JUNO, J. Phys. G 43, 030401 (2016)

太阳中微子-KamLAND

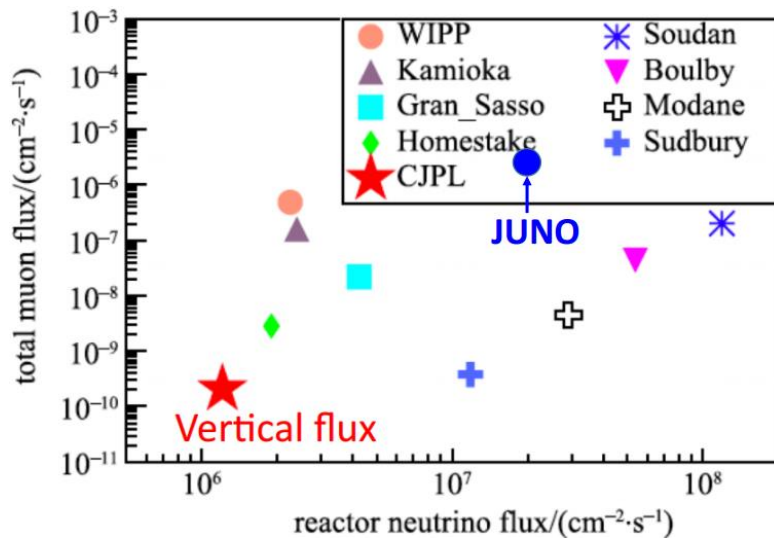
- KamLAND:
 - ~ 2700 meters水当量覆盖;
 - ~ 900 吨的液闪, 探测器内muon事例率0.2Hz ;
- B8 太阳中微子的研究
- 宇宙线本底压低
 - B12, 200ms veto, 去除 B12/N12;
 - 5MeV cut ;
 - 非散裂muon ($< 700,000$ p. e.): 3米半径的圆柱体veto
 - 散裂muon, 没有径迹, 整个探测器做5s veto;
 - 活时间62.4%



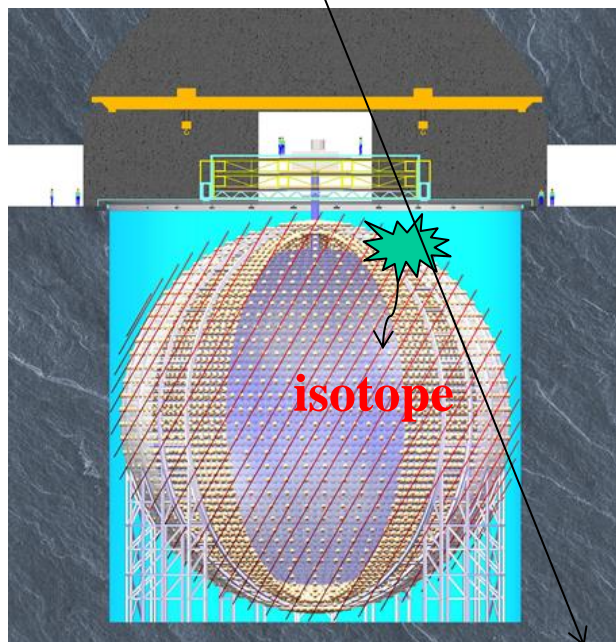
Source	Uncertainty (%)
^{11}Be	10.8
^8Li and ^8B	3.3
External gamma rays	6.8
Other Backgrounds	1.1
Detection Efficiency	6.3
Energy Scale	0.8

- 探测器设置5MeV阈值
 - C11, C10, He6引入的本底高;
- 剩余同位素本底误差1.1-10.8%

江门实验(JUNO)



- 20kton液闪, 700 m 岩石覆盖
- Muon流强相对比较高;
- 同位素产额:
 - MC 模拟的结果和实验数据 (KamLAND和Borexino) 外推的结果。
 - 同位素产额, 几十 ---- 几万/天;

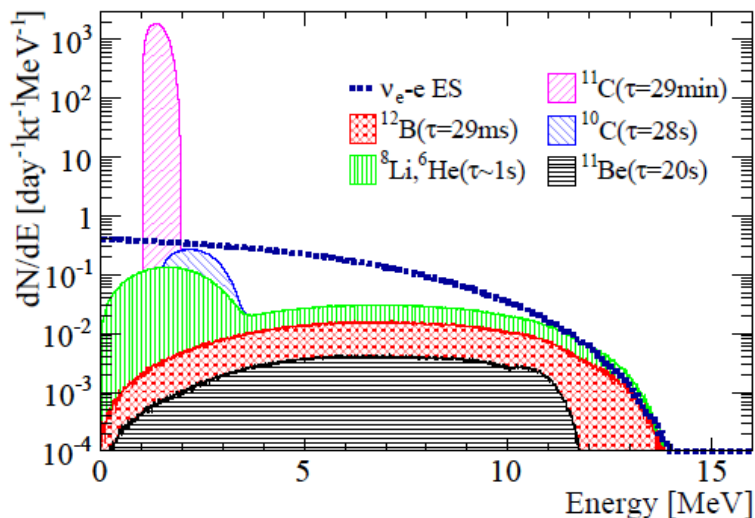
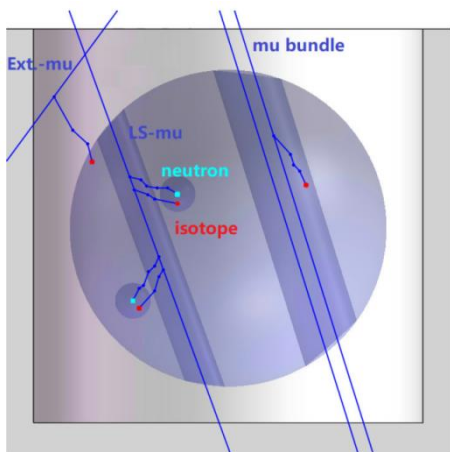


Isotope	Live time	Yield (/day)		Neutron-acc. eff
		Total(G4)	Yield by extrapolation	
¹² B	29.1 ms	1058.9	2282.0	90.4%
⁹ Li	257.2 ms	67.9	117.0	96.3%
⁹ C	182.5 ms	20.6	159.6	>99%
⁸ Li	1.21 s	725.2	649.0	93.9%
⁶ He	1.16 s	526.3	2185.6	94.7%
⁸ B	1.11 s	34.7	446.8	>99%
¹⁰ C	27.8 s	816.8	877.7	>99%
¹¹ Be	19.9 s	9.2	58.5	96.2%
¹¹ C	29.4 min	11811.6	46065.4	98.1%
¹⁶ N	10.3 s	0.55	—	92.6%

太阳中微子-江门实验

- B8太阳中微子的物理研究。
- 使用muon veto+中子veto，损失50%活时间，本底压低大概200倍。

Muon track veto+ neutron veto



unit: cpd/kt	¹² B	⁸ Li	¹⁰ C	⁶ He	¹¹ Be	²³⁸ U	²³² Th	$\bar{\nu}$ -e ES	Total bkg	B8 signal	
										dm21=7.5e-5eV ²	dm21=4.8e-5eV ²
(2,3)MeV	0.005	0.006	0.141	0.084	0.002	0.050	0.050	0.049	0.39	0.32	0.30
(3,5)MeV	0.013	0.018	0.014	0.008	0.005	0	0.012	0.016	0.09	0.42	0.39
(5,16)MeV	0.065	0.085	0	0	0.023	0	0	0.002	0.17	0.61	0.59
sys. err	1%	3%	10%	3%	10%	1%	1%	2%			

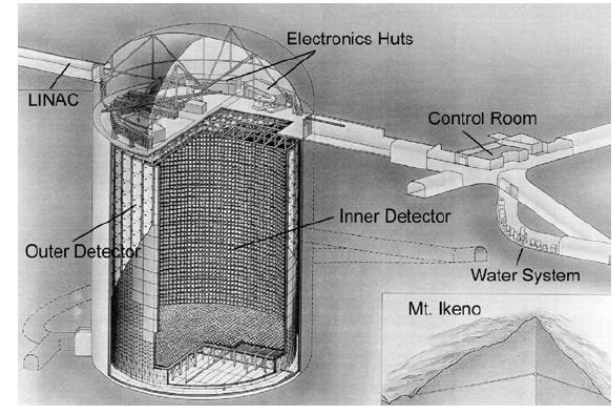
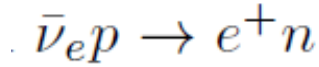
Chinese Physics C Vol. 45, No. 1 (2021)

- 能谱阈值2MeV，去掉C11本底的影响
- 宇宙线引入的同位素本底本底
 - ~0.5cpd/kton
- 本底误差的估计：1-10%

弥散超新星中微子

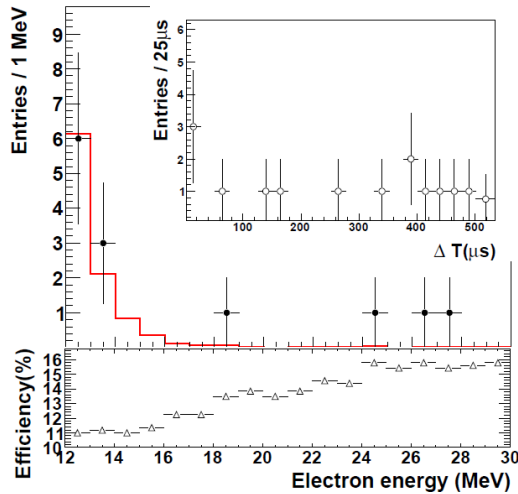
- Super-Kamiokande:

- Gd-Water phase(IV)
- 升级更新了电子学
- IBD可以探测delay的俘获信号, 在Gd和H上的俘获信号;
- 从原来研究的单信号探测提升为关联信号探测;
- 使用spallation cut(LikeLihood方法)压低宇宙线本底
- 将阈值17.3MeV降低到13.3MeV

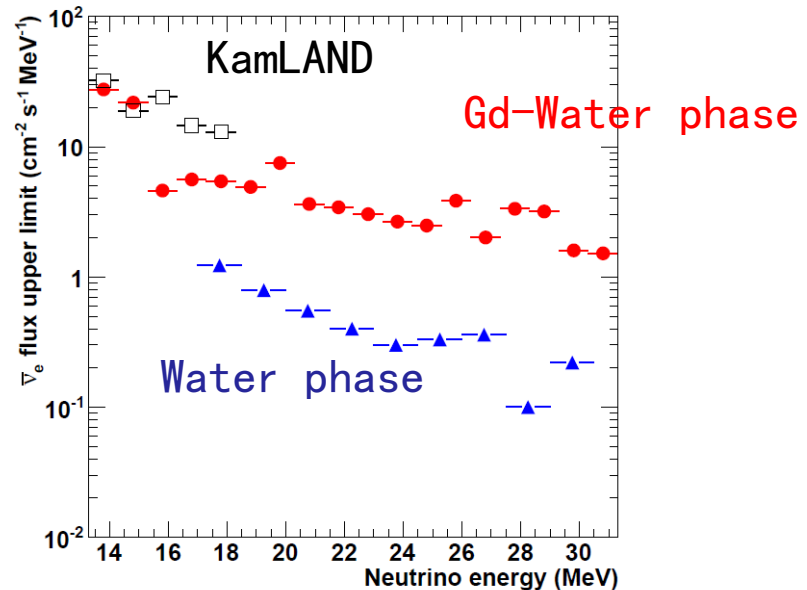


- 有了neutron tag,可以对其他相关的物理研究可以用中子veto, 有效降低本底

探测到的事例分布



观测灵敏度



arXiv:1311.3738

长寿命的特殊同位素

- 一些核素被宇宙线辐照后，产生同位素寿命很长（百-千年量级），将变为材料的放射性本底，对一些实验有较大影响。
 - 需要特殊原材料，或者特殊处理
- C14：宇宙线muon与N14作用产生；
 - C14: 半衰期5730年
 - Borexino为降低C14本底，找地下原油做液闪的原料
- 液氦实验
 - 宇宙线照射产生氦39，半衰期269年；
 - 为了降低氦39的本底，寻找地下贫氦(低放射性氦气)

总结

- Muon在探测器散裂产生的中子和同位素是一些低本底实验的重要本底。
- 对于muon引入的中子本底研究，研究相对清楚。
- 同位素相关的研究方面，有产额的相关研究，但模拟和数据差别比较大，主要是跟核素的作用，描述不够清楚，未来需要进一步研究。
- 针对本底的压低研究方面，不同的实验主要的目的就是veto策略的研究，使用有效策略来的压低本底。

谢谢！