

# 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

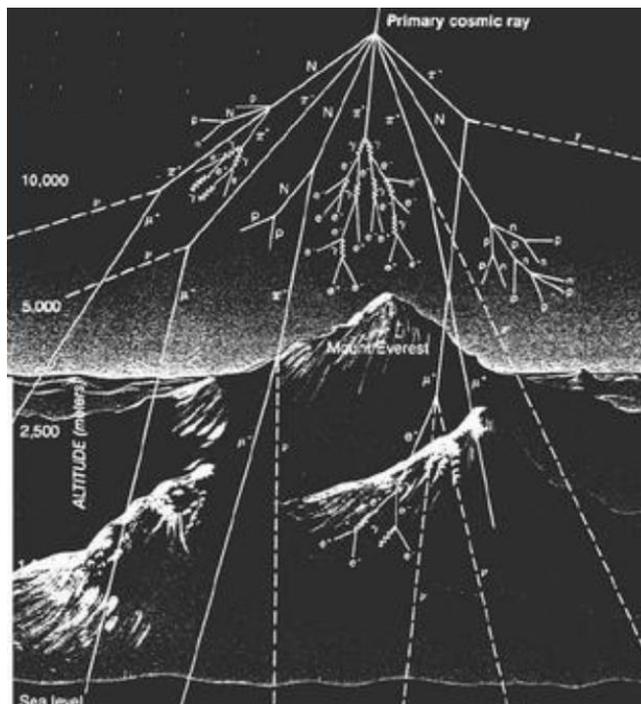
# 提纲

---

- 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 $\pi$ 介子和K介子，这些很快会衰变为 $\mu$ 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

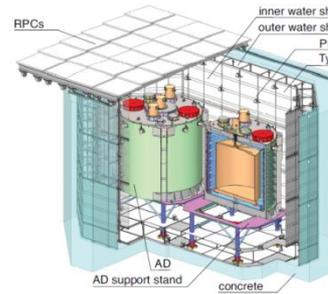
- 低本底实验：
  - 观测的信号事例率低，希望本底的事例越低越好，实验有好的信噪比和灵敏度。
  - 包括中微子实验，暗物质探测和无中微子双 $\beta$ 衰变等实验。
  - 中微子实验：
    - 太阳中微子： $\sim 0.5-50/\text{kton}/\text{day}$ (液闪探测器)
    - 反应堆中微子:不同实验，探测器大小，距离反应堆远近不同
      - » 大亚湾实验：几十个-几百个/天
      - » 江门实验： $\sim 60/\text{day}$
    - 弥散超新星中微子： $\sim 0.1/\text{kton}/\text{year}$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

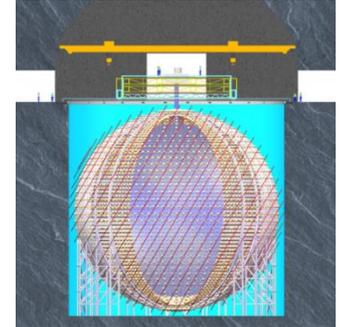
- 探测器研究中，本底主要包括：

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

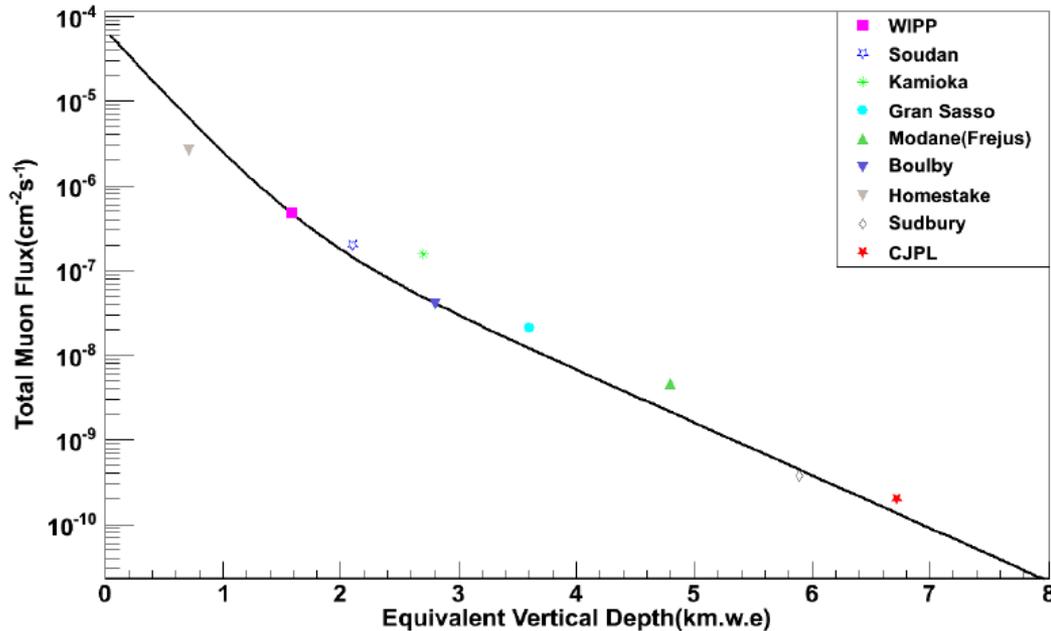
- 宇宙线muon引入的本底(报告的主要内容)

- 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:

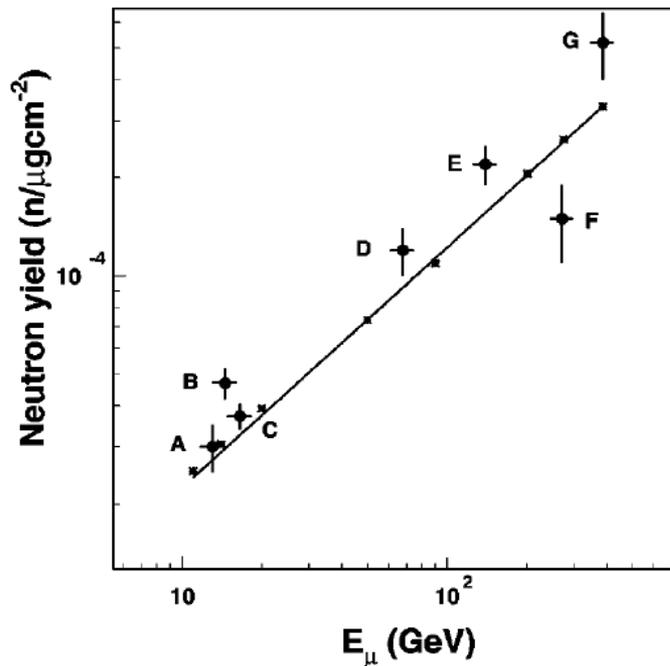
- 比如其中SNO实验；
  - SNO~6000米水当量
  - 探测器内muon事例率 ~3/hour.
  - 探测介质重水：D2O
  - 直接veto

暗物质和无中微子双 $\beta$ 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。

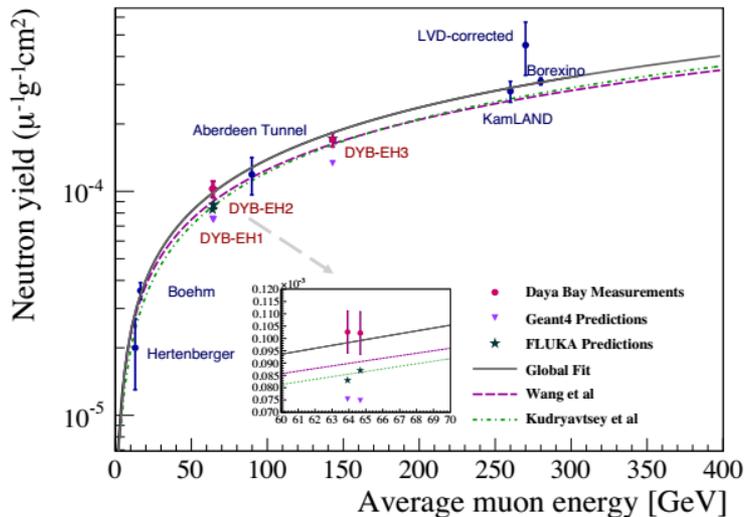
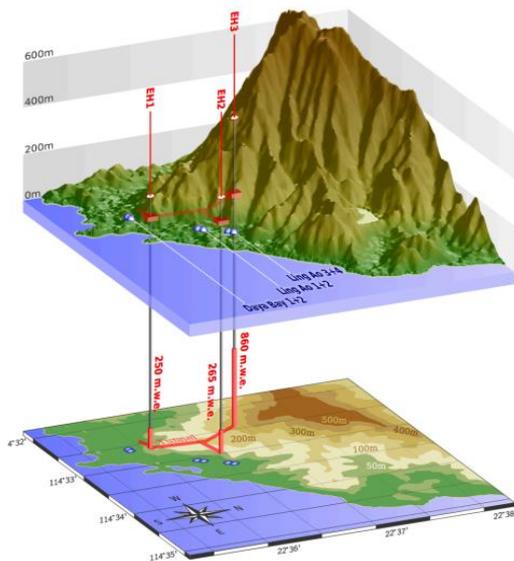
$$N_n = 4.14 E_\mu^{0.74} \times 10^{-6} \text{ neutron}/(\mu\text{g cm}^{-2})$$



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



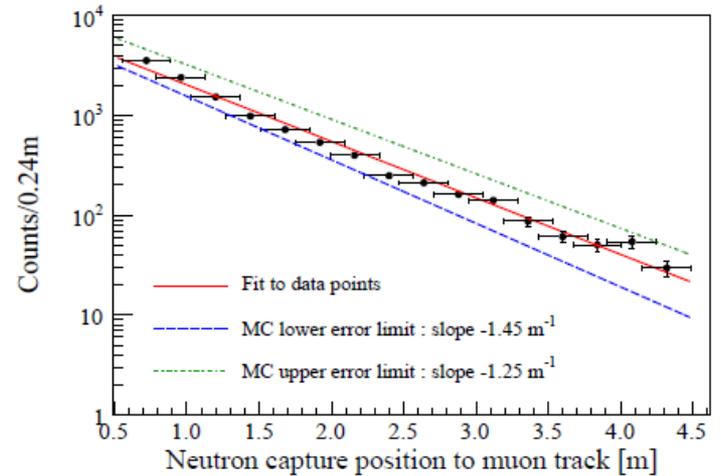
	EH1	EH2	EH3
$E_{avg}^{\mu}$ (GeV)	63.9 ± 3.8	64.7 ± 3.9	143.0 ± 8.6
Measured Values ( $\times 10^{-5} \mu^{-1} g^{-1} cm^2$ )			
$Y_n$	10.26 ± 0.86	10.22 ± 0.87	17.03 ± 1.22
MC Predictions ( $\times 10^{-5} \mu^{-1} g^{-1} cm^2$ )			
$Y_n$ (GEANT4)	7.53 ± 0.01	7.47 ± 0.05	13.35 ± 0.03
$Y_n$ (FLUKA)	8.34 ± 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  $0.77 \pm 0.03$ 。
- 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。

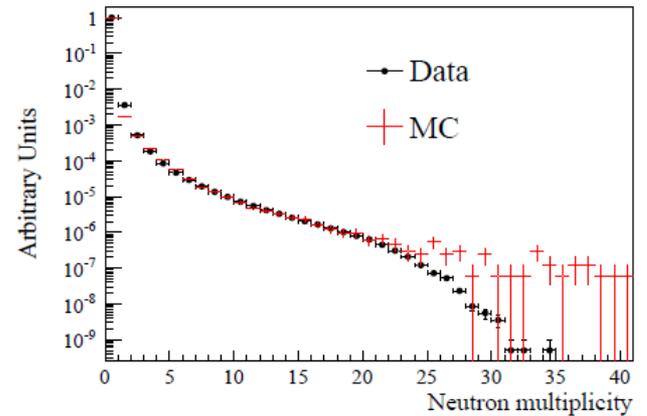
# 中子传播和多重度

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。

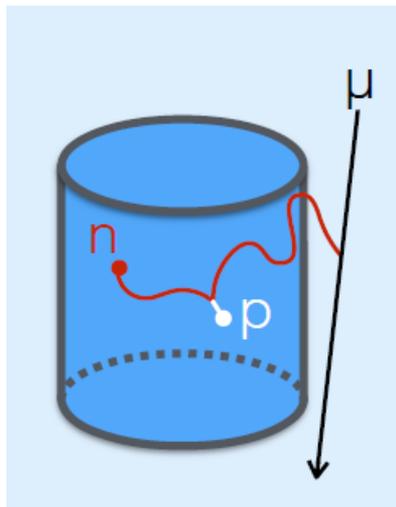


**Phys. Rev. D 97, 052009**

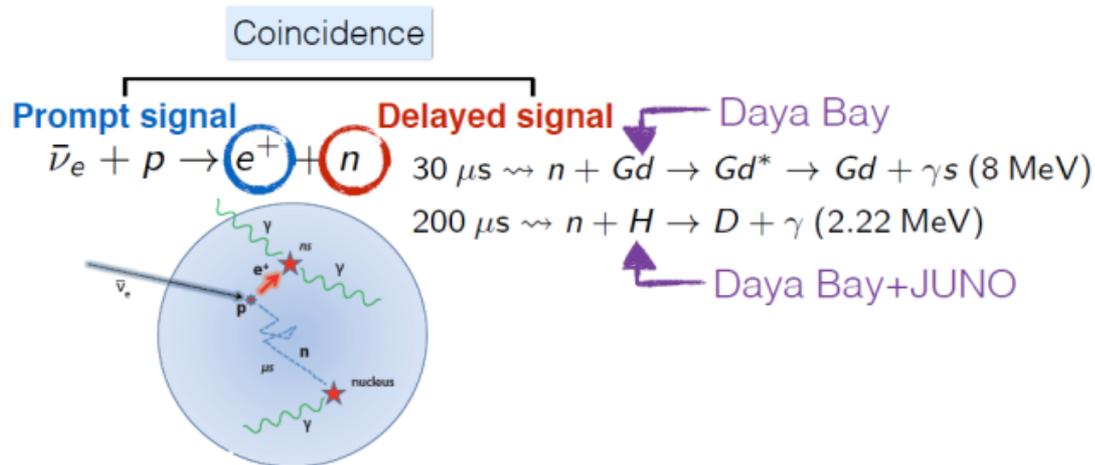
# 快中子本底(I)

- 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，DayaBay, 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

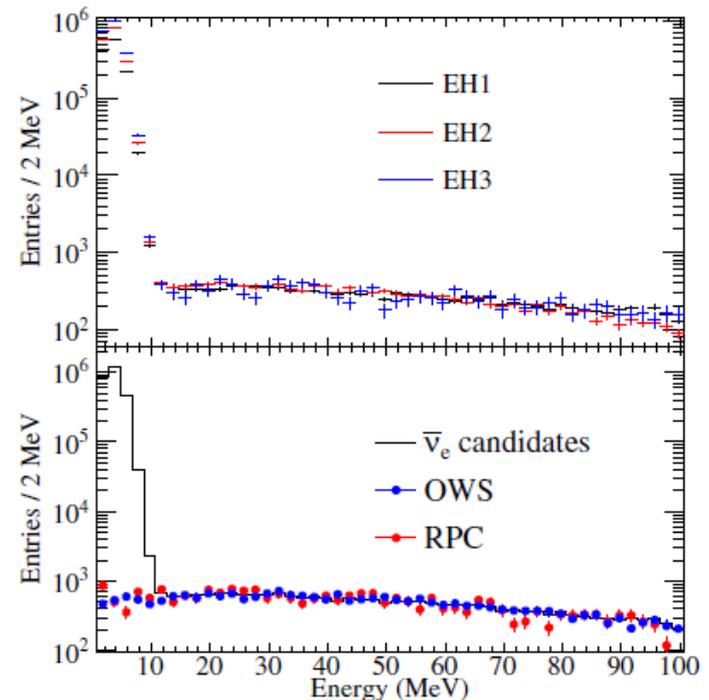


# 快中子本底(II)

- 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)	$0.79 \pm 0.10$	$0.57 \pm 0.07$	$0.05 \pm 0.01$
B/S	0.12%	0.10%	0.07%
$\Delta B/B$	13%	13%	20%

Phys. Rev. D.95.072006

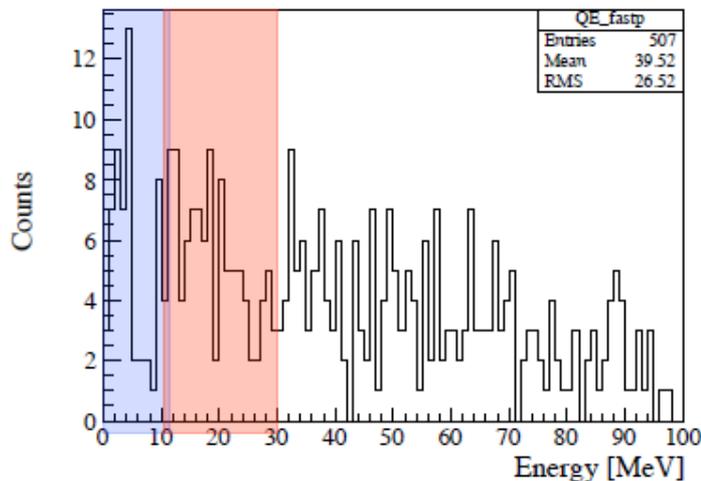


- muon引入的中子本底研究上中子产额，模拟和数据对比，传播，快中子本底能谱的研究，相对来说比较全面。

# 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)

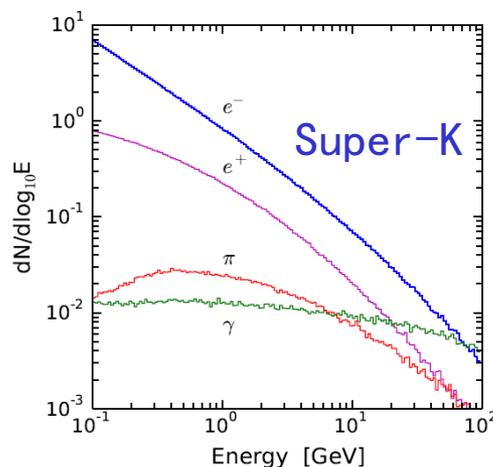
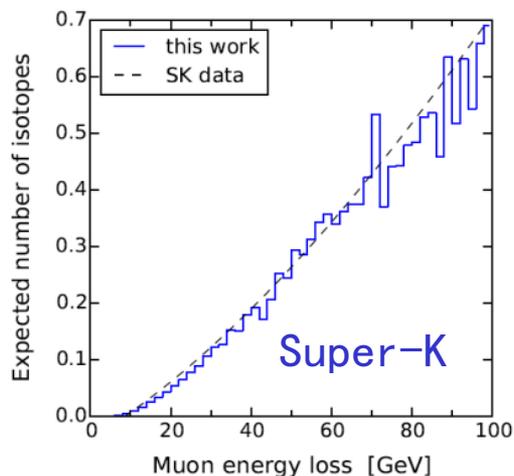
0.067/day ~ 24.6/year

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 $\mu$ (%)
			Ref. [10]	FLUKA calc.	This measurement	This measurement
$n$	207.5 $\mu\text{s}$	2.225 (capt. $\gamma$ )	–	2097 $\pm$ 13	2787 $\pm$ 311	64 $\pm$ 5
$^{12}\text{B}$	29.1 ms	13.4 ( $\beta^-$ )	–	27.8 $\pm$ 1.9	42.9 $\pm$ 3.3	68 $\pm$ 2
$^{12}\text{N}$	15.9 ms	17.3 ( $\beta^+$ )	–	0.77 $\pm$ 0.08	1.8 $\pm$ 0.4	77 $\pm$ 14
$^8\text{Li}$	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
$^8\text{B}$	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
$^9\text{C}$	182.5 ms	16.5 ( $\beta^+$ )	2.3 $\pm$ 0.9	1.35 $\pm$ 0.12	3.0 $\pm$ 1.2	91 $\pm$ 32
$^8\text{He}$	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
$^9\text{Li}$	257.2 ms	13.6 ( $\beta^- \gamma n$ )		3.16 $\pm$ 0.25	2.2 $\pm$ 0.2	77 $\pm$ 6
$^{11}\text{C}$	29.4 min	1.98 ( $\beta^+$ )	421 $\pm$ 68	416 $\pm$ 27	866 $\pm$ 153	62 $\pm$ 10
$^{10}\text{C}$	27.8 s	3.65 ( $\beta^+ \gamma$ )	54 $\pm$ 12	19.1 $\pm$ 1.3	16.5 $\pm$ 1.9	76 $\pm$ 6
$^{11}\text{Be}$	19.9 s	11.5 ( $\beta^-$ )	<1.1	0.84 $\pm$ 0.09	1.1 $\pm$ 0.2	74 $\pm$ 12
$^6\text{He}$	1.16 s	3.51 ( $\beta^-$ )	7.5 $\pm$ 1.5	12.08 $\pm$ 0.83	–	–
$^7\text{Be}$	76.9 day	0.478 (EC $\gamma$ )	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

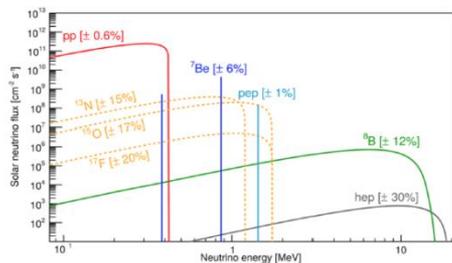
	GEANT4 Model III	GEANT4 Model IV — $\langle E_\mu \rangle = 283 \pm 19 \text{ GeV}$ —	FLUKA	Borexino	KamLAND $\langle E_\mu \rangle = 260 \pm 8 \text{ GeV}$
<b>Isotopes</b>	Yield [ $10^{-7} (\mu\text{g}/\text{cm}^2)^{-1}$ ]				
$^{12}\text{N}$	$1.11 \pm 0.13$	$3.0 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.2$	$< 1.1$	$1.8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

- 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。

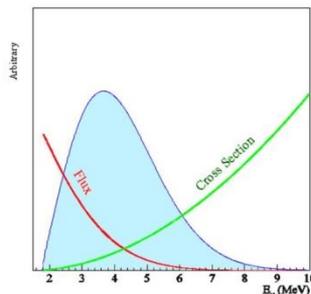
# 同位素对实验影响

- 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

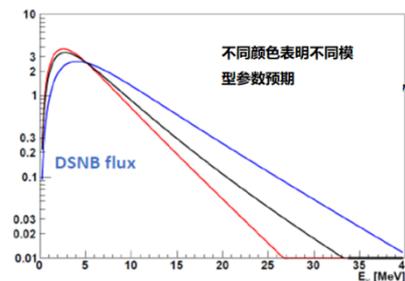
	Lifetime in KamLAND LS	Radiation energy (MeV)
$n$	207.5 $\mu$ s	2.225 (capt. $\gamma$ )
$^{12}\text{B}$	29.1 ms	13.4 ( $\beta^-$ )
$^{12}\text{N}$	15.9 ms	17.3 ( $\beta^+$ )
$^8\text{Li}$	1.21 s	16.0 ( $\beta^- \alpha$ )
$^8\text{B}$	1.11 s	18.0 ( $\beta^+ \alpha$ )
$^9\text{C}$	182.5 ms	16.5 ( $\beta^+$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



太阳中微子能谱 (SSM)



反应堆中微子能谱



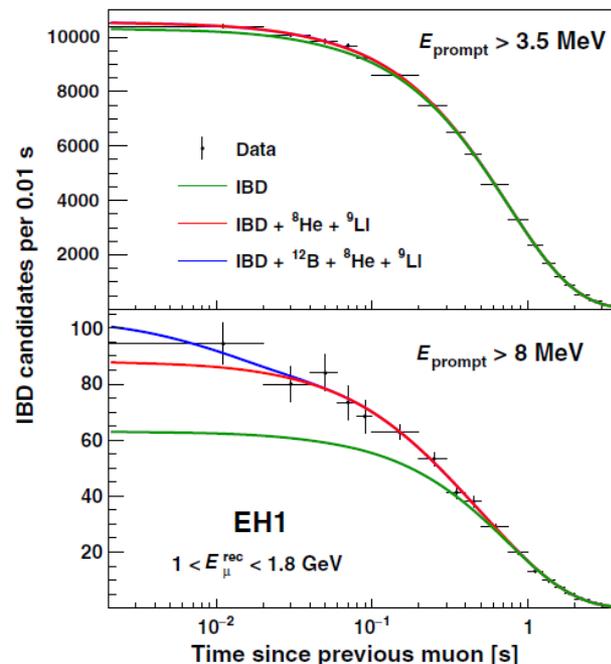
超新星弥散中微子

(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

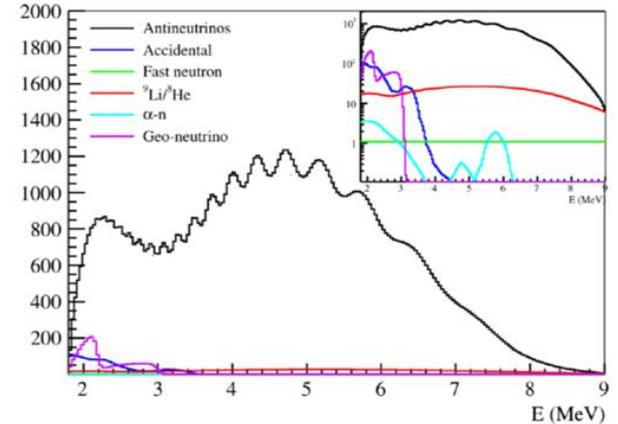
- Li9/He8本底控制的水平
  - S/B: 0.3-0.4%，
  - 系统误差30-40%水平



	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- $\nu$ s	Accidental	${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	Fast $n$	$(\alpha, n)$
-	-	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				

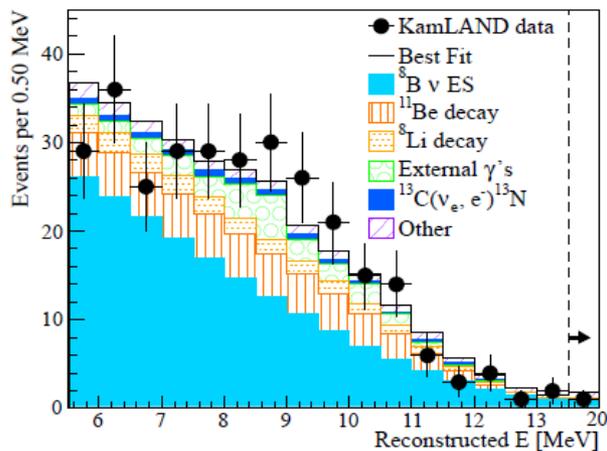
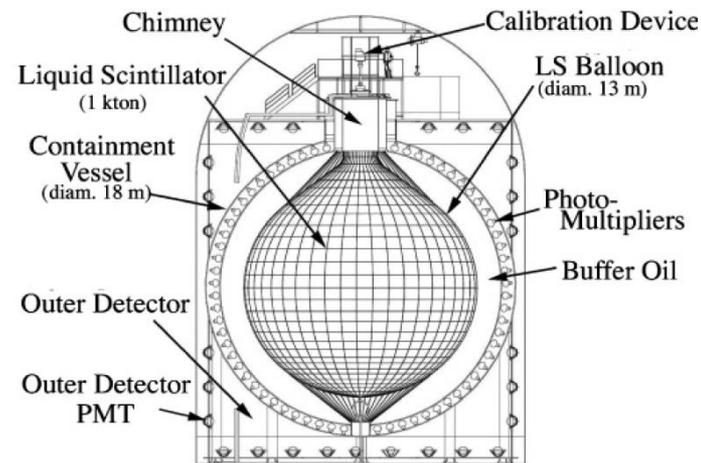
The efficiencies of antineutrino selection cuts, signal and backgrounds rates.

- 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

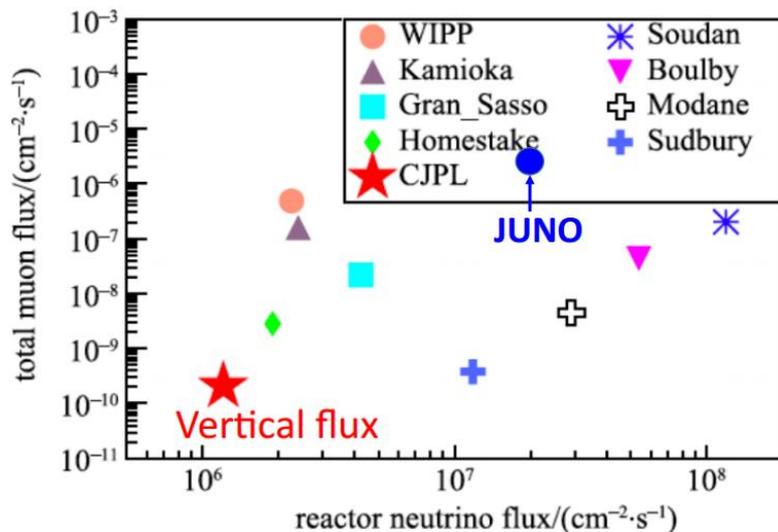
- KamLAND:
  - ~2700 meters水当量覆盖;
  - ~900吨的液闪, 探测器内muon事例率0.2Hz ;
- B8 太阳中微子的研究
- 宇宙线本底压低
  - B12, 200ms veto, 去除 B12/N12;
  - 5MeV cut ;
  - 非散裂muon (<700, 000p. e. ): 3米半径的圆柱体veto
  - 散裂muon, 没有径迹, 整个探测器做5s veto;
  - 活时间62.4%



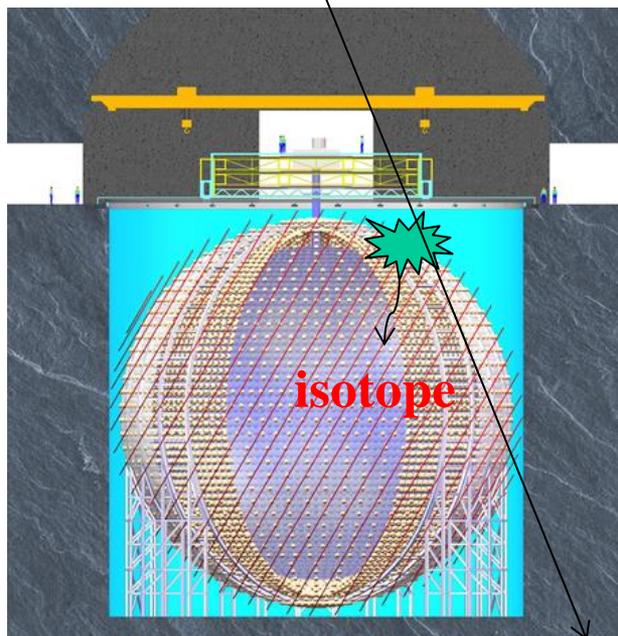
Source	Uncertainty (%)
$^{11}\text{Be}$	10.8
$^8\text{Li}$ and $^8\text{B}$	3.3
External gamma rays	6.8
Other Backgrounds	1.1
Detection Efficiency	6.3
Energy Scale	0.8

- 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;

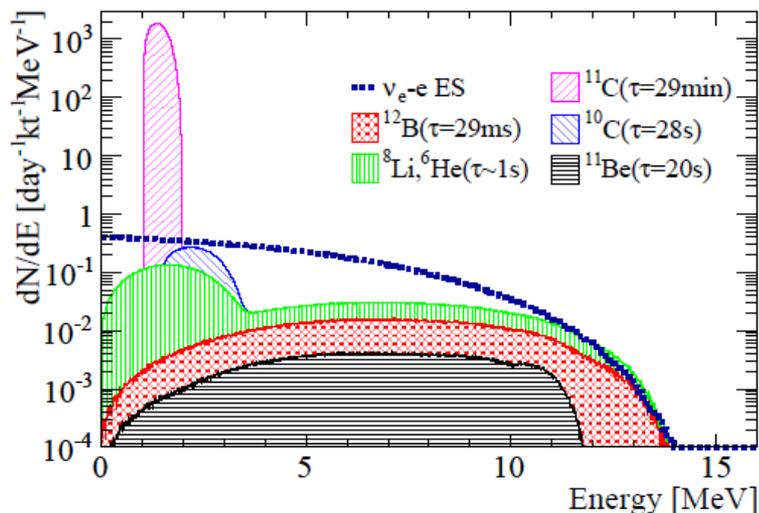
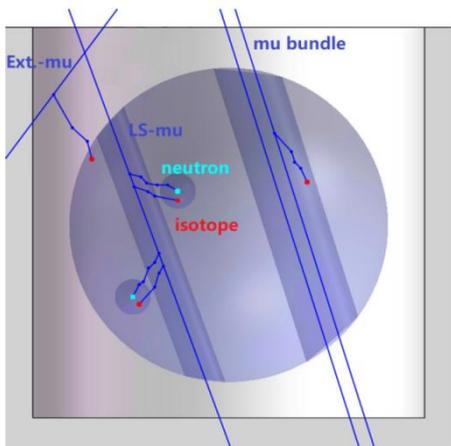


Isotope	Live time	Yield (/day)		Neutron-acc. eff
		Total(G4)	Yield by extrapolation	
<sup>12</sup> B	29.1 ms	1058.9	2282.0	90.4%
<sup>9</sup> Li	257.2 ms	67.9	117.0	96.3%
<sup>9</sup> C	182.5 ms	20.6	159.6	>99%
<sup>8</sup> Li	1.21 s	725.2	649.0	93.9%
<sup>6</sup> He	1.16 s	526.3	2185.6	94.7%
<sup>8</sup> B	1.11 s	34.7	446.8	>99%
<sup>10</sup> C	27.8 s	816.8	877.7	>99%
<sup>11</sup> Be	19.9 s	9.2	58.5	96.2%
<sup>11</sup> C	29.4 min	11811.6	46065.4	98.1%
<sup>16</sup> 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	$^{12}\text{B}$	$^8\text{Li}$	$^{10}\text{C}$	$^6\text{He}$	$^{11}\text{Be}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$\bar{\nu}$ -e ES	Total bkg	B8 signal	
										$\text{dm}21=7.5\text{e-}5\text{eV}^2$	$\text{dm}21=4.8\text{e-}5\text{eV}^2$
(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%			

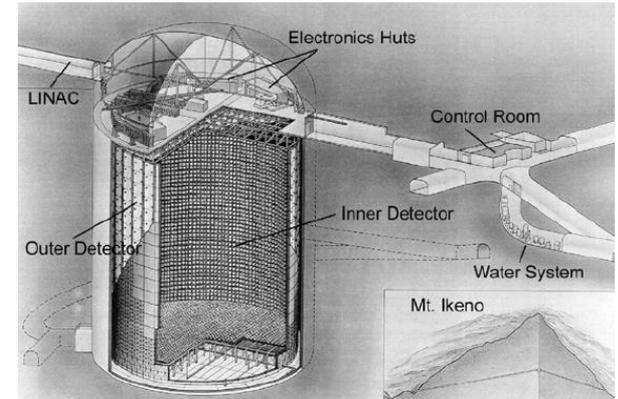
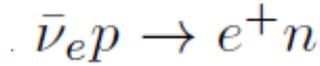
Chinese Physics C Vol. 45, No. 1 (2021)

- 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
  - $\sim 0.5\text{cpd/kton}$
- 本底误差的估计：1-10%

# 弥散超新星中微子

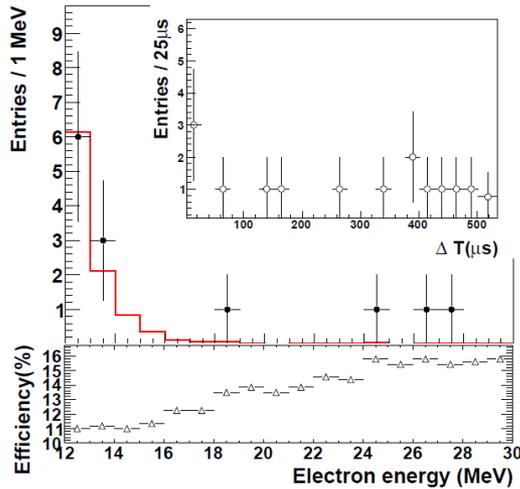
- Super-Kamiokande:

- 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

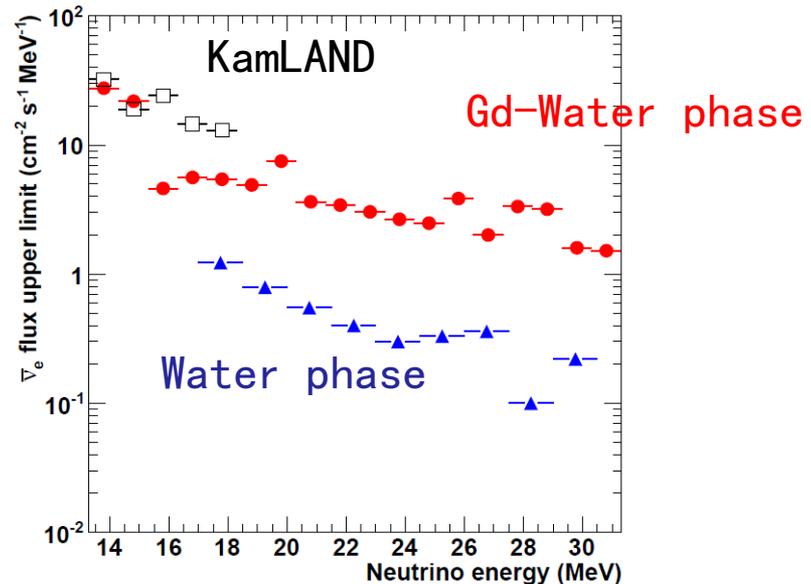


- 有了neutron tag,可以对其他相关的物理研究可以用中子veto, 有效降低本底

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！