



利用LHAASO探测 超新星中微子

刘栋, 马欣华, 冯存峰

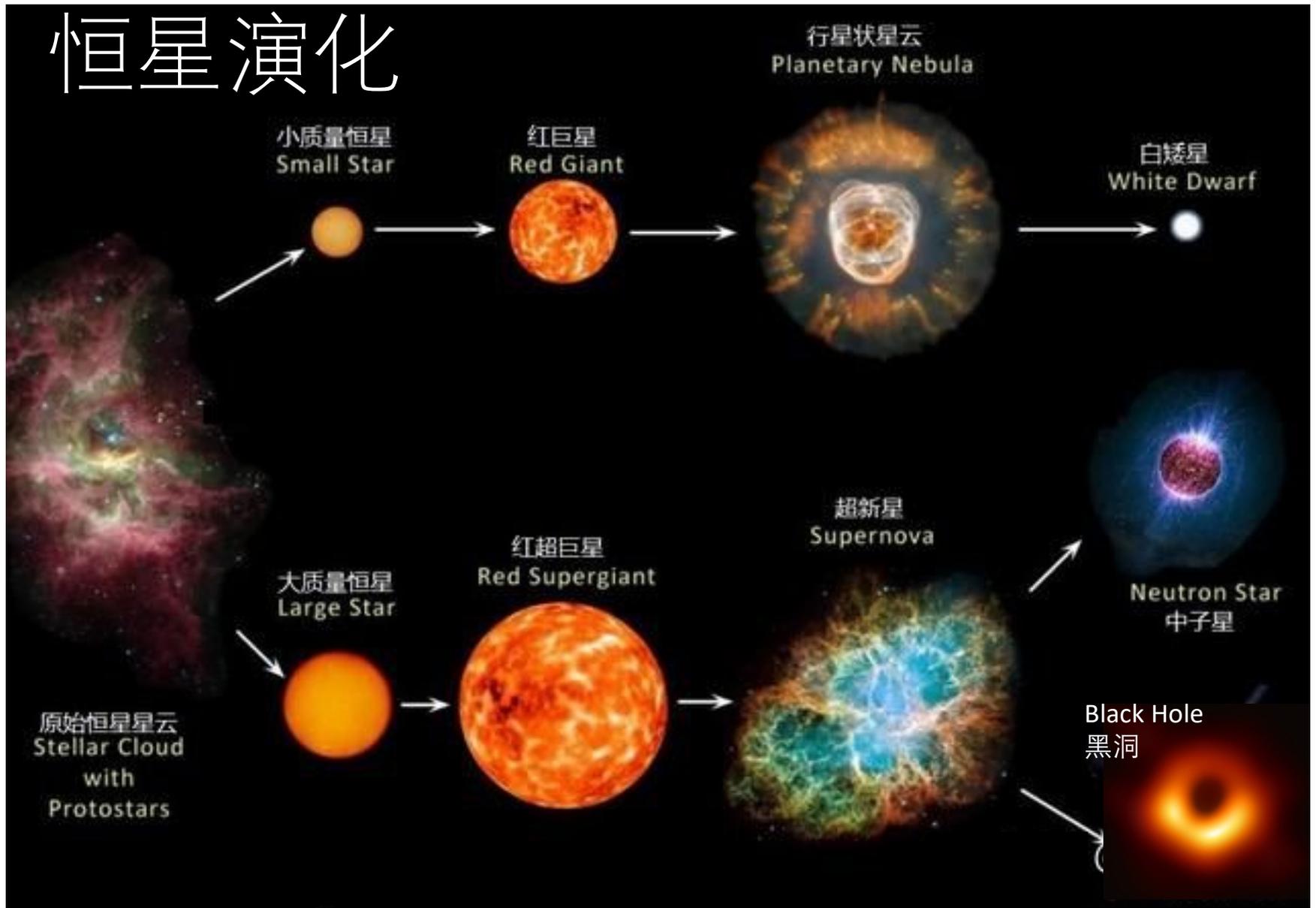
山东大学/高能所

2019年4月14日

内容

- 超新星SN1987A
- LHAASO与其它观测超新星中微子的实验的比较
- MD方面的考虑
- WCDA方面的考虑
- 小结

恒星演化

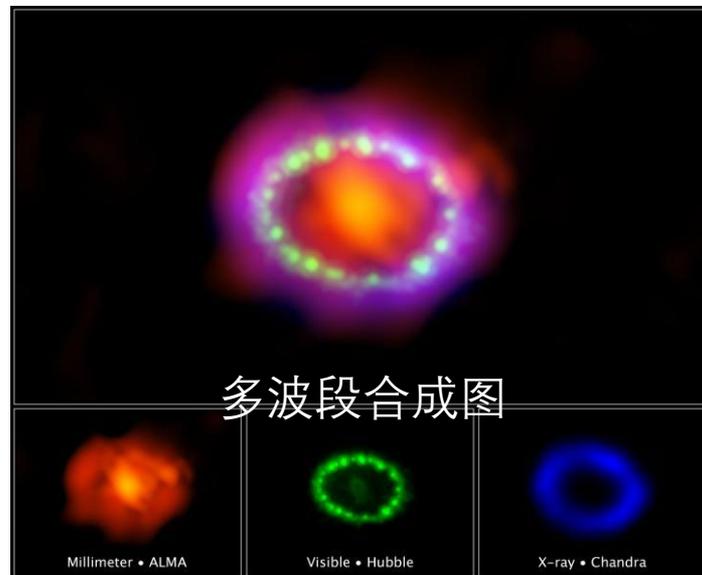
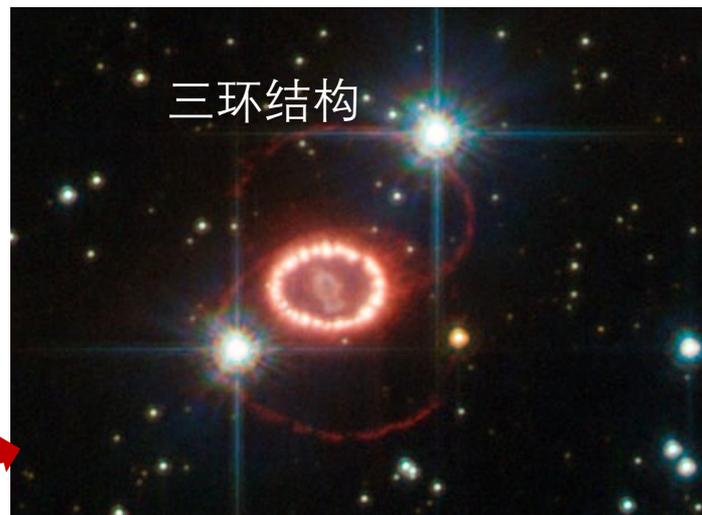


大质量的恒星核燃烧终止、核芯超出临界质量时会出现引力坍缩，发生超新星爆发

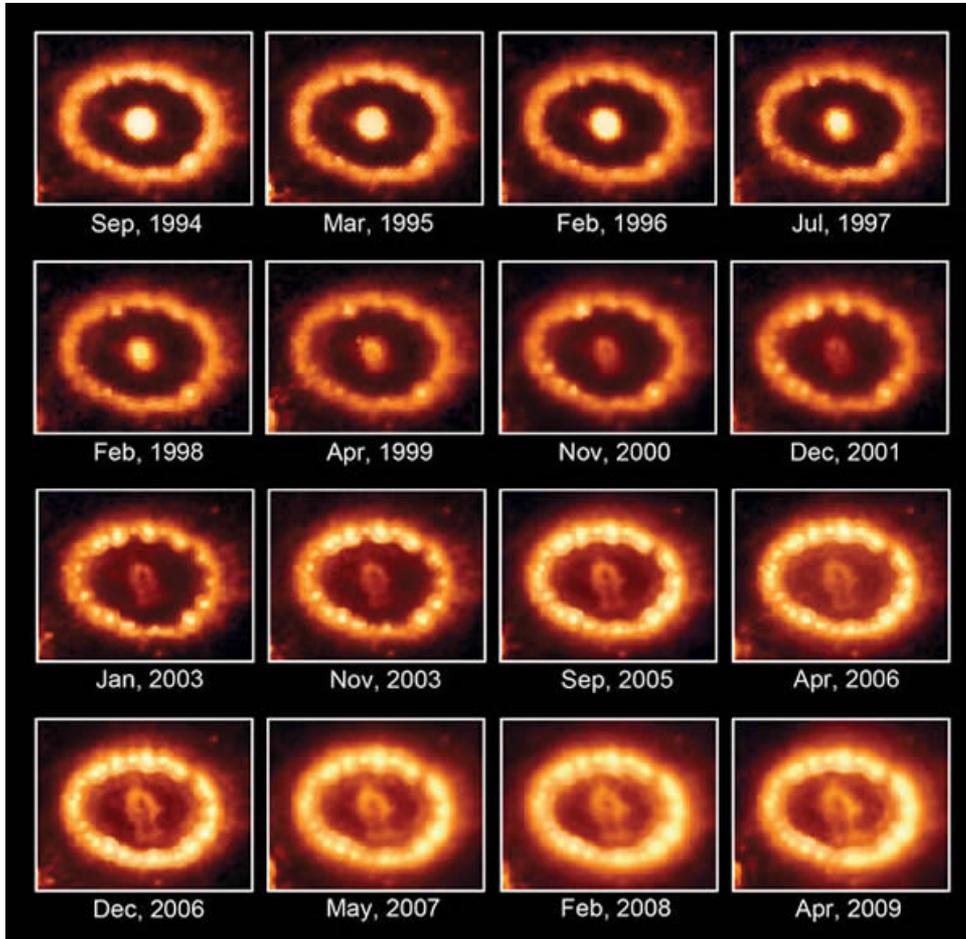
超新星SN1987A

1987年2月23日，
大麦哲伦星云中SN1987A超新星爆发
距离地球16.8万光年 (51.4 kpc)

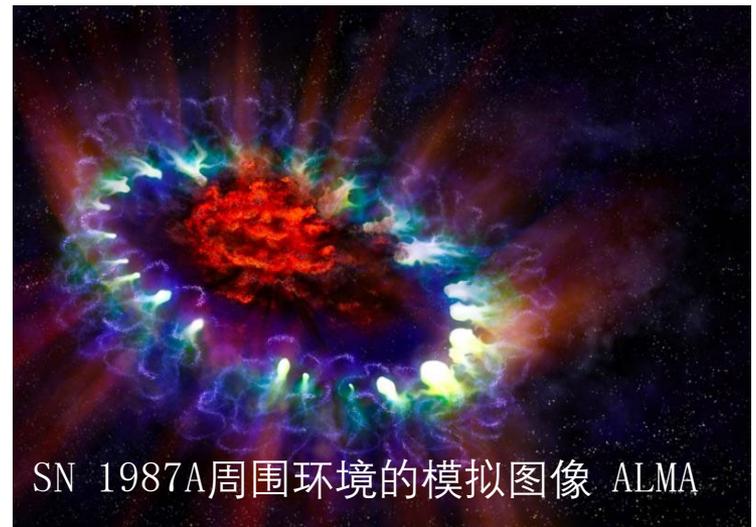
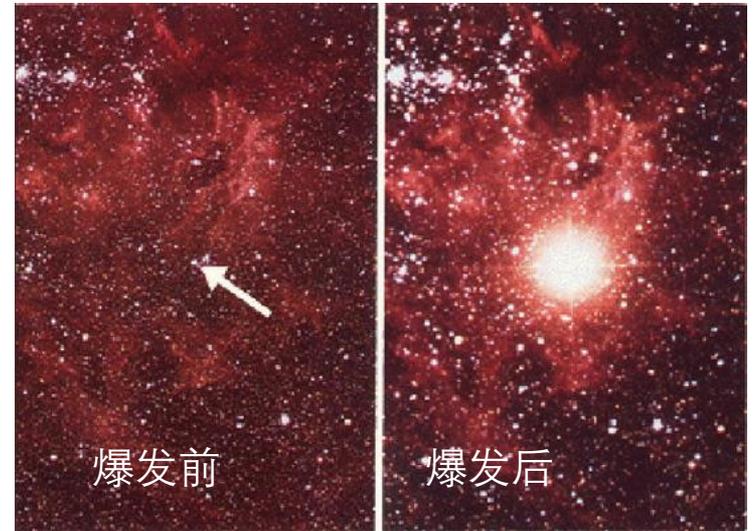
第一次详细研究超新星的发展



SN1987A



1994-2009 NASA 哈勃望远镜
[arXiv:1106.2300](https://arxiv.org/abs/1106.2300).



SN 1987A周围环境的模拟图像 ALMA

SN1987A中微子观测

arXiv:1702.08713

- Baksan , IMB , Kamiokande-II三家实验同时探测到了反中微子, 这些电子反中微子的能量几十MeV, 在头1秒内聚集了近一半的中微子, 大多数中微子在头2秒内到达。
- 除了太阳以外, SN1987A是第一个, 也是目前为止唯一的一个观测到的中微子天体源, 开启了宇宙天体多信使研究的大门。

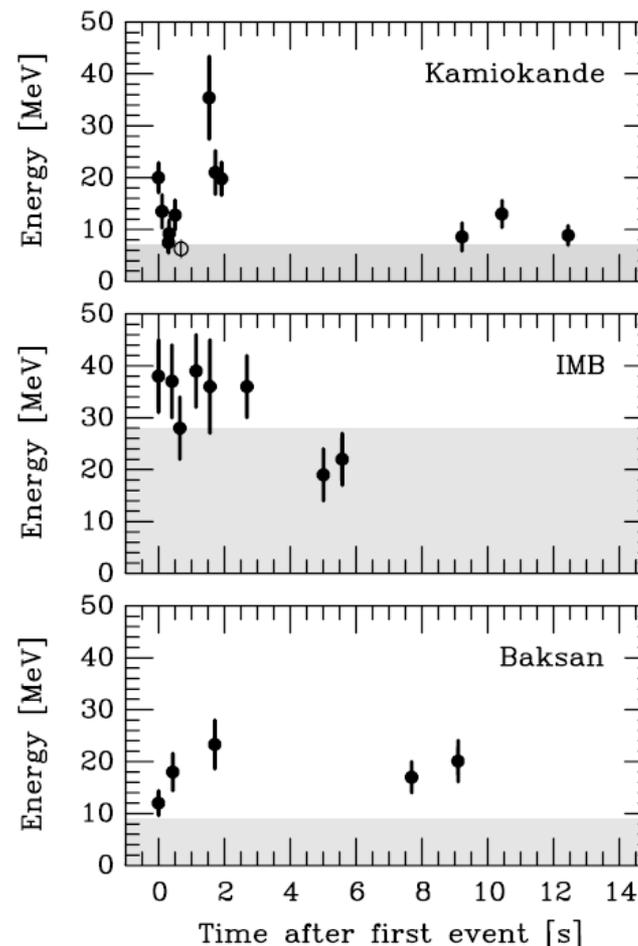


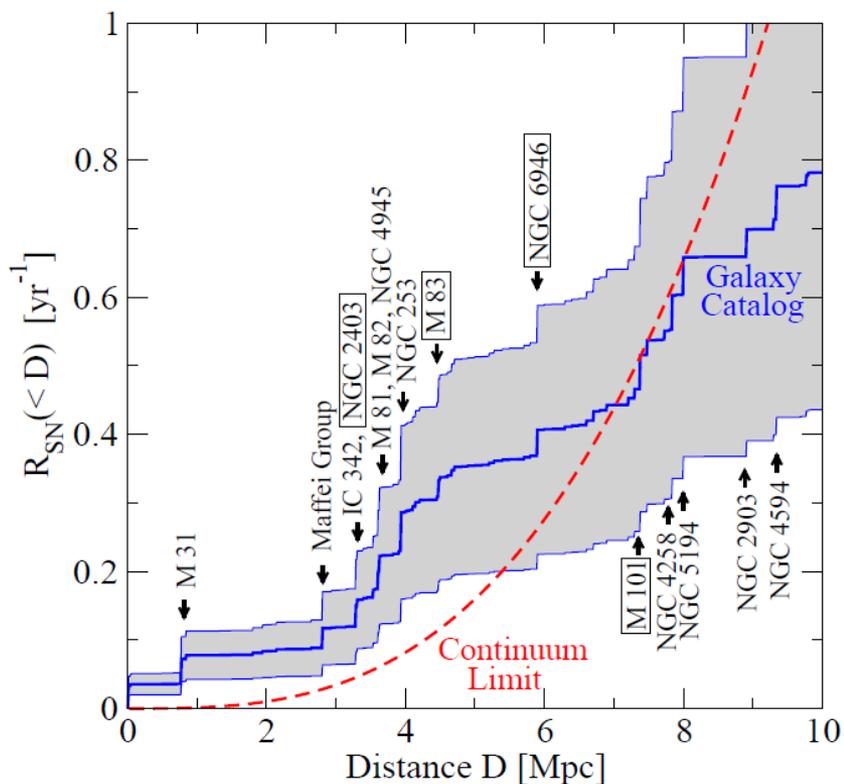
Figure 1.7 SN1987A neutrinos were observed at Kamiokande^[29,30], IMB^[31,32], and Baksan^[33,34] experiments. The energies represent the detected energy of positrons from inverse beta decay reactions. The shaded area corresponds to a trigger efficiency less than 30%. (From Ref. [7])

超新星中微子

- 超新星爆发会释放大量各种味道的中微子，平均能量10-20 MeV，携带约99% 的超新星爆发能量。
- 中微子蕴藏了大质量恒星演化过程的丰富信息，超新星爆发机制、演化过程、中微子产生机制等课题都是天体物理的研究热点。
- 中微子从产生到传播至地球的过程中，具有集体效应、共振(MSW)效应、超新星震荡波效应以及地球物质效应等多种效应，对研究中微子属性和超出标准模型新物理有着不可替代的作用。
- 探测超新星中微子对粒子物理、天体物理、核物理、以及宇宙学都具有重要意义。

超新星爆发率

预计的超新星爆发率与其距地球的距离



S. Ando, Phys.Rev.Lett., 2005, 95:171101.

银河系 ~ 10 kpc

SN1987A 51.4 kpc

银河系以及邻近星系（如大麦哲伦星系、大犬座矮星系）内的超新星爆发事例每百年几个。

需要大型的实验长期、稳定运行，以提高观测超新星中微子的灵敏度。



SNEWS

- 世界上多个大型实验相继开展了超新星中微子探测研究
- 联网国际超新星预警系统（**SNEWS**, SuperNova Early Warning System）是在超新星中微子实验之间建立的全球网络，用以全天监测银河系以及邻近星系内的超新星中微子，给出超新星的预警信号。
- 目前有7家实验入网SNEWS，包括Super-K, LVD, IceCube, KamLAND, Borexino, HALO以及大亚湾中微子实验(Daya Bay)。未来将建成并且加入SNEWS的中微子实验有DUNE和江门中微子实验(JUNO)
- 入网要求：误触发率每月1次silent trigger，每3个月1次golden trigger

SNEWS : <https://snews.bnl.gov/>



What is SNEWS?

SNEWS News

Background
Information

Getting a SNEWS Alert

Amateur Astronomers

Mailing Lists

SNEWS Working Group
Info

Meetings

Related Links

History of Astronomy

The Name Game

Contact People

SNEWS: SuperNova Early Warning System



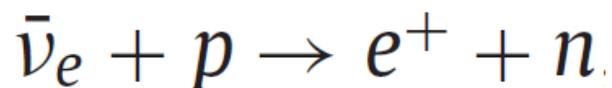
Coming soon:

SNEWS 2.0 Workshop: Supernova Neutrinos in the Multi-Messenger Era, Sudbury, June 14-17, 2019

World-wide, several detectors currently running or nearing completion are sensitive to a core-collapse supernova neutrino signal in the Milky Way. The neutrino burst signal emerges promptly from a supernova's core, whereas it may take hours for the first photons to be visible. Therefore, the detection of the neutrino burst from the next Galactic supernova can provide an early warning for astronomers. Requiring a coincident signal from several detectors will provide the astronomical community with a very high confidence early warning of the supernova's occurrence. In addition, a neutrino burst alert may be able to serve as a trigger for detectors that are not able to trigger on a supernova signal by themselves, allowing extra data to be saved.

超新星中微子探测方法

除了DUNE（液氩TPC探测器）和HALO（铅和 ^3He ）探测电子中微子以外，其他实验探测电子反中微子的反 β 衰变（IBD），中微子的能量大部分给了正电子



IBD实验按照探测方法分成两大类：

	探测方法	靶物质	靶质量→ IBD事例数	本底
第一类	通过事例重建挑选出IBD事例	液体闪烁体或者水	靶质量不大，导致IBD事例数偏低。	大幅度压低本底
第二类	不能够挑出中微子事例，记录事例率变化，寻找高显著涨高。	水（冰）	靶质量很大，从而IBD事例数很高	本底高

LHAASO与其它实验的比较

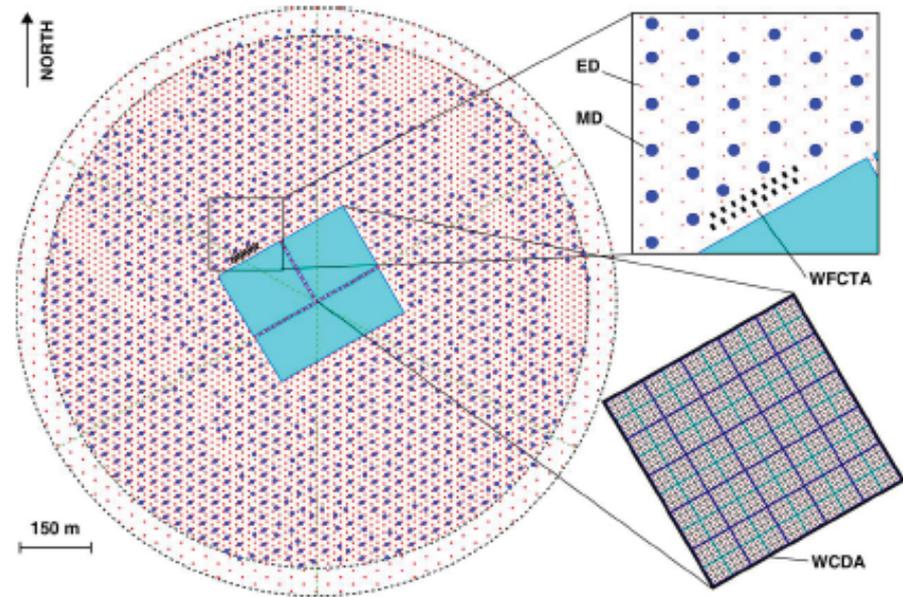
实验	探测器类型	靶质量 (kton)	IBD事例数	阈能 (MeV)	物质覆盖	探测器单元数及距离	单个探测器本底率(Hz)	
第一类	KamLAND	液体闪烁体	1	300	0.35	地下1000m (2700 e.m.w.)	单体	4×10^{-6}
	LVD	液体闪烁体	1	300	4	地下1400m (3400 e.m.w.)	单体	5×10^{-4}
	Borexino	液体闪烁体	0.3	100	0.2	地下1400m (3400 e.m.w.)	单体	-
	Daya Bay	液体闪烁体	0.33	110	0.7	地下250/265/860 e.m.w	8个, 紧邻到1公里不等	0.02
	JUNO	液体闪烁体	20	6700	0.5	地下700m	单体	0.001
	Super-K	水切伦科夫光	32	7000	7	地下1000m (2700 e.m.w.)	单体	0.002
	IceCube	冰切伦科夫光	1000	134000	-	冰下1450m-2450m	5160DOMs, 7m,72/42m	540→286
第二类	LHAASO-WCDA	水切伦科夫光	300	20000	20	地面	3120个, 紧邻	>30k
	LHAASO-MD	水切伦科夫光	51	12750	5	地面, 2.5m土覆盖	1171个, 30m	6k→600→300→...
	KM3NeT/ORCA	水切伦科夫光	8000?	-	-	水下2475m	18 DOMs, 9m,20m, 31PMTs/DOM	几百Hz

LHAASO

水切伦科夫光探测器：

◆ WCDA

◆ MD



- 1) MD和WCDA水量分别为51kton和300kton，靶质量巨大，IBD事例数很高；
- 2) 多探测器分散布局，拥有空间均匀性，可以有效提高实验的灵敏度。

反 β 衰变IBD $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

LHAASO-MD

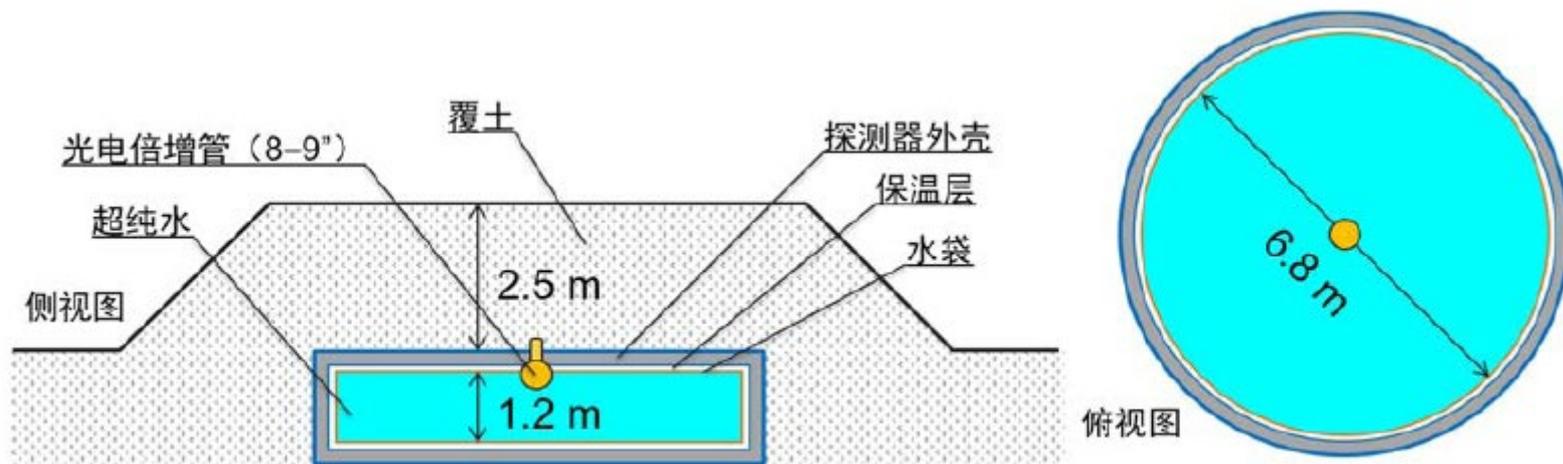
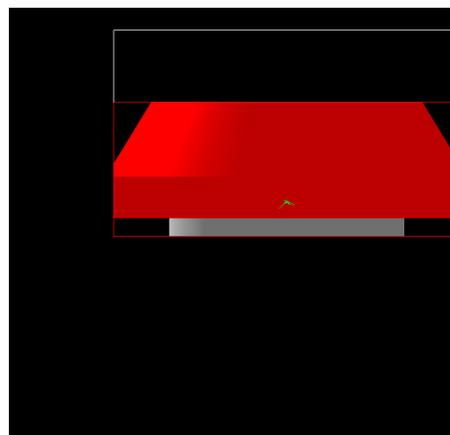
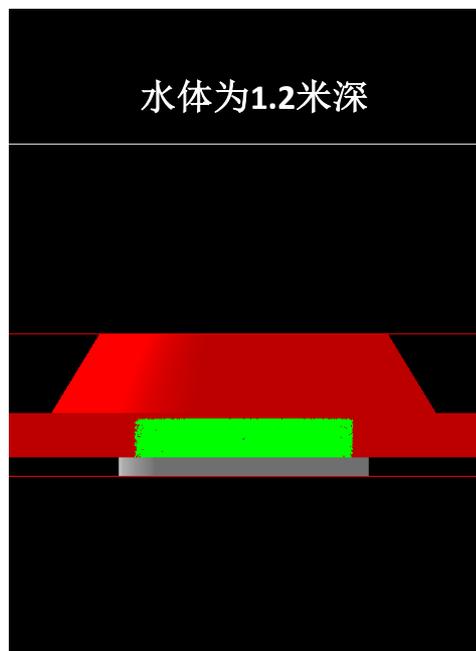


图 3.1.4-3: MD 结构尺寸。

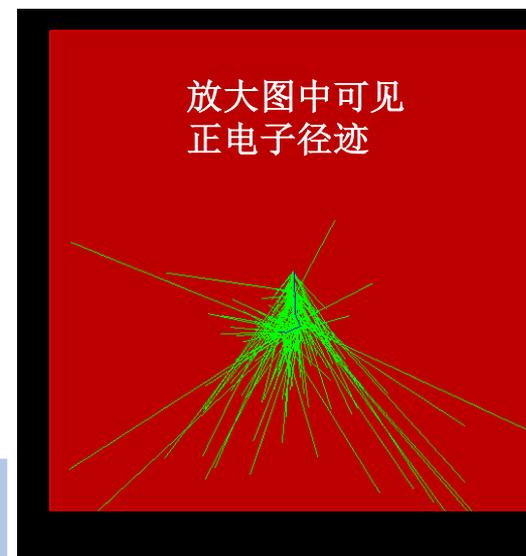
- MD 探测器总数1171 个，间距30m，水量0.044kton/PMT，总共51kton
- PMT阈值5mV~1.7pe (1个muon产生70pe)
- 单道计数率~ 6 kHz

MD 模拟

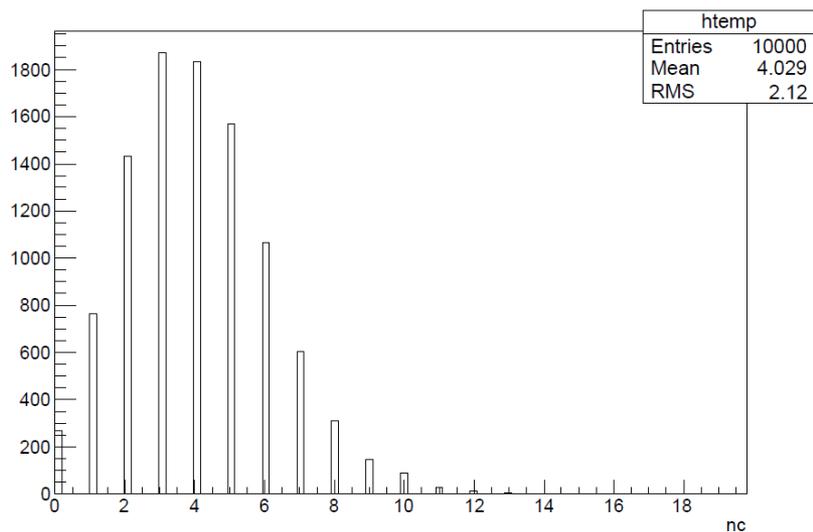
- 在水体正中央，垂直向下方向，生成10MeV的正电子事例 (程宁)



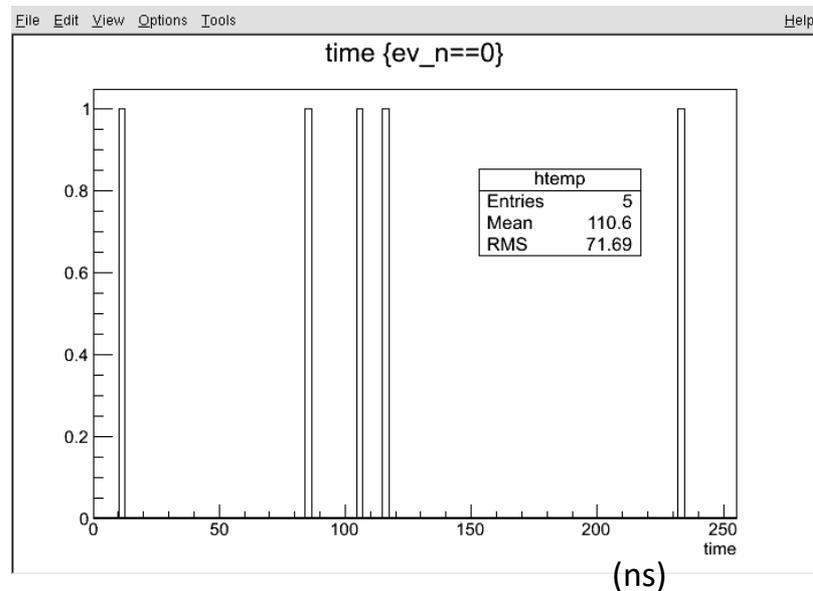
→水袋的吸收设为1时，生成的事例的径迹如图所示



MD 模拟

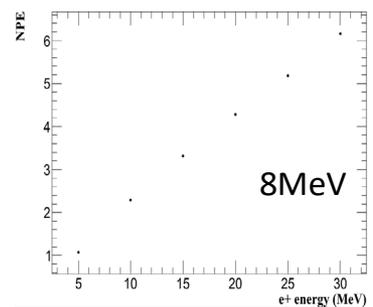
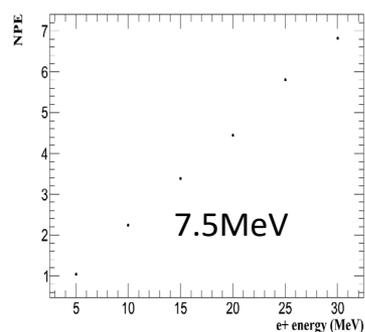
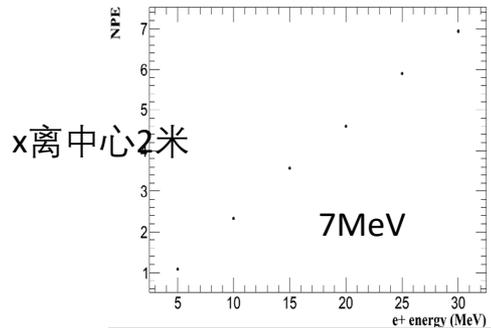
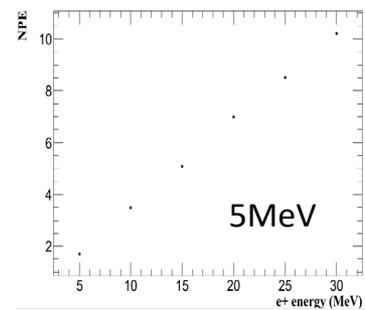
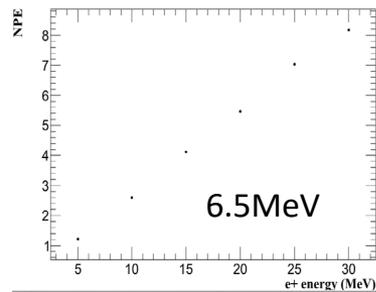
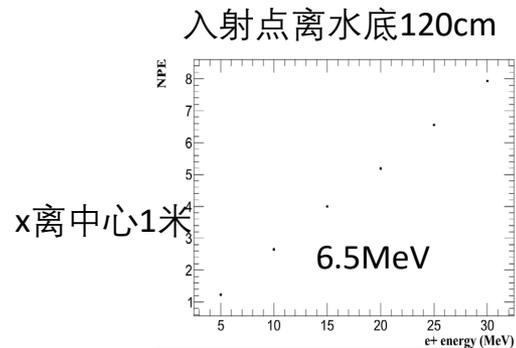
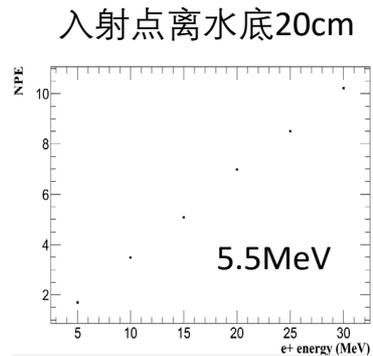
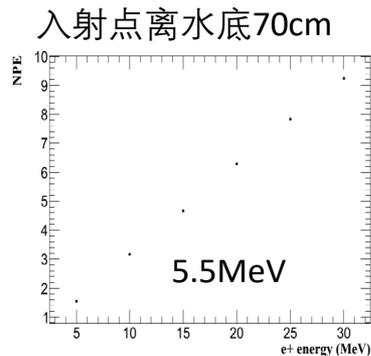
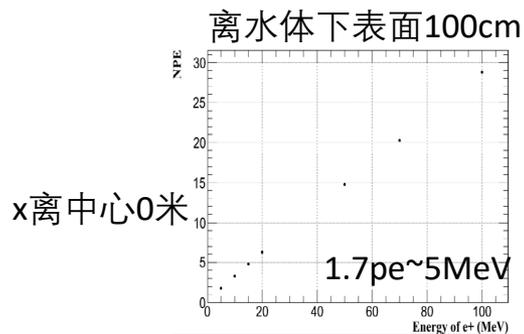


- 10000个事例产生的光电子数分布，平均4个光电子



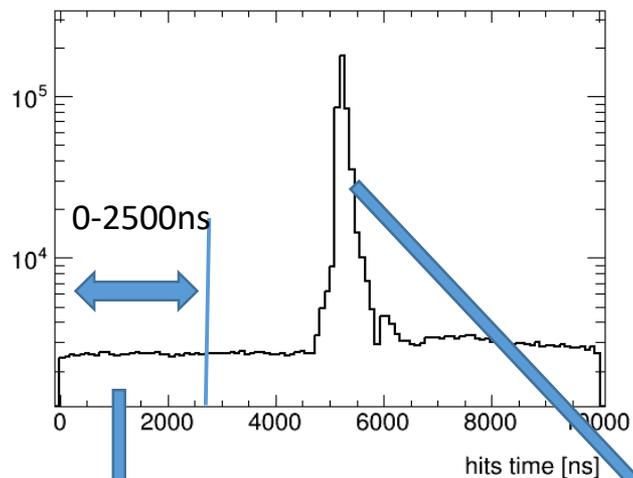
- 1个事例，共有5个pe
- 横轴是5个pe的出现时刻（单位ns）
- 时间0点是入射e+原初的起始时刻

垂直入射e⁺ (李秀荣)

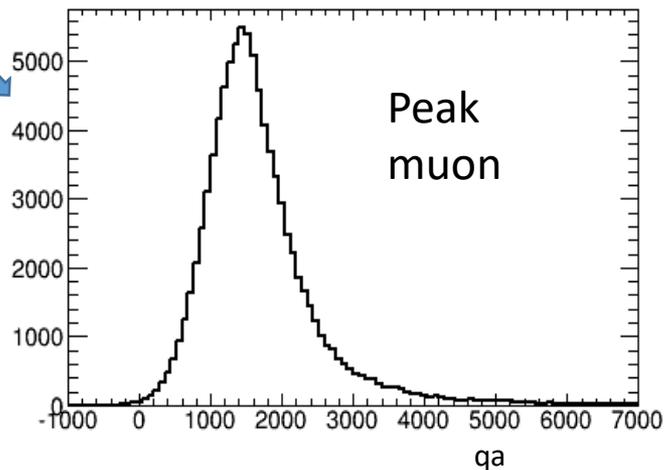
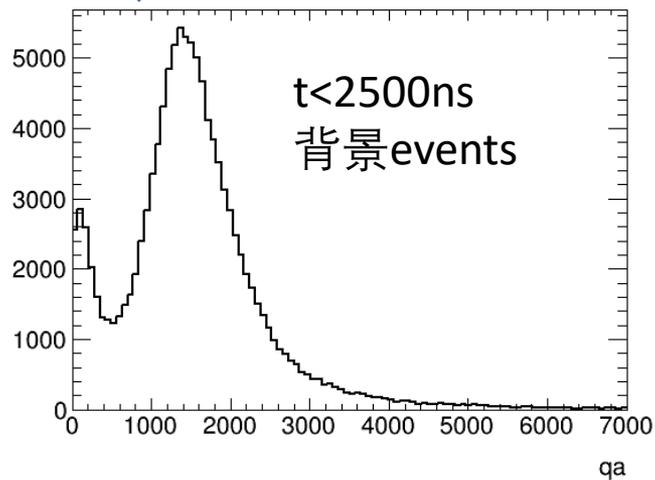


MD:
10MeV正电子
产生3.3pe, 阈
能5MeV (1.7pe)

MD事例



ED触发的MD事例
[/eos/lhaaso/experiment/ed/
decode_data/2019/](/eos/lhaaso/experiment/ed/decode_data/2019/)



降低本底的方法之一：能量cut，去除高能的宇宙线单 μ 事例，
 $\sim 6\text{kHz} \rightarrow 600\text{Hz}$

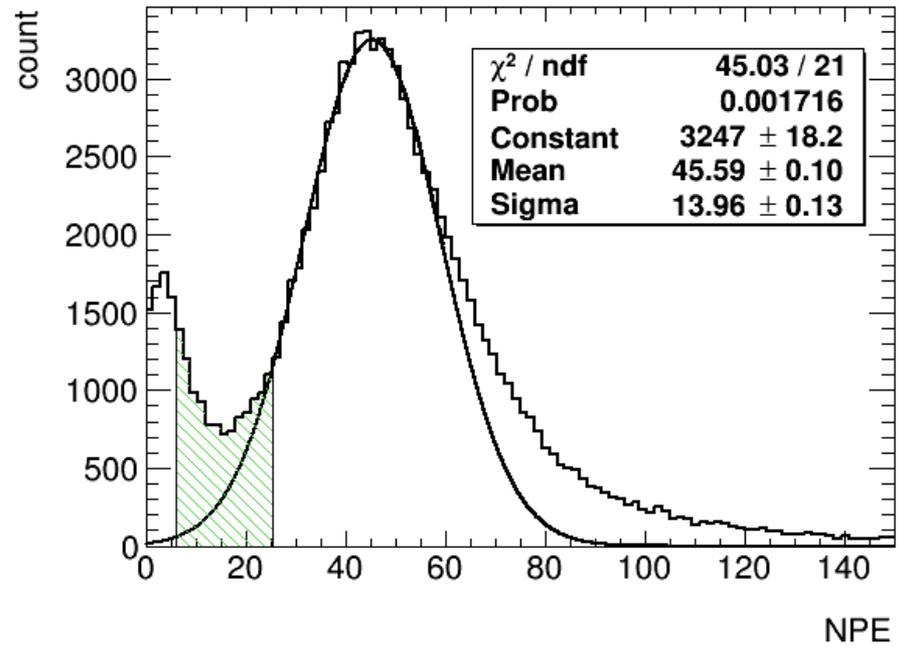
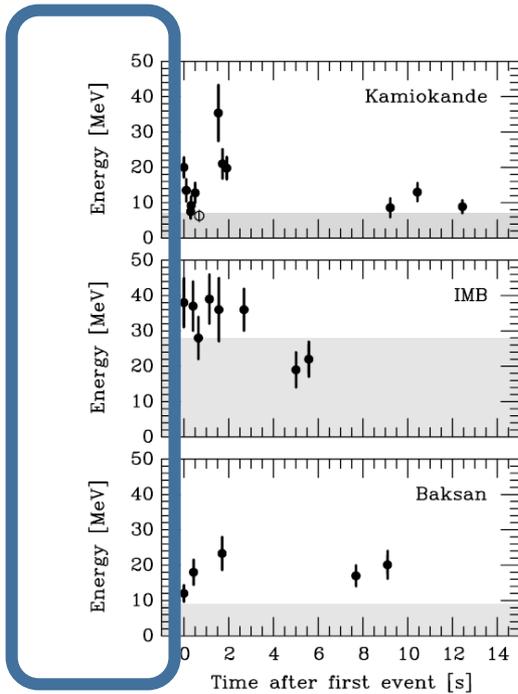


Figure 1.7 SN1987A neutrinos were observed at Kamiokande^[29,30], IMB^[31,32], and Baksan^[33,34] experiments. The energies represent the detected energy of positrons from inverse beta decay reactions. The shaded area corresponds to a trigger efficiency less than 30%. (From Ref. [7])

MD事例率

超新星爆发单个探测器1秒内得到中微子~5个，第二秒~2个

已有decode数据，每个文件对应1个多小时真实时间

~400k个events，每个event取前2500ns

$400k * 2500ns / 10^9 \sim 1s$ ，对应1秒无触发数据

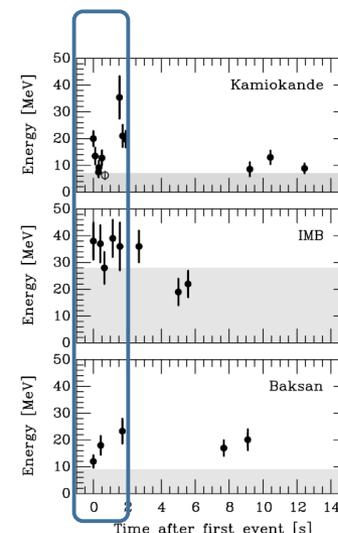
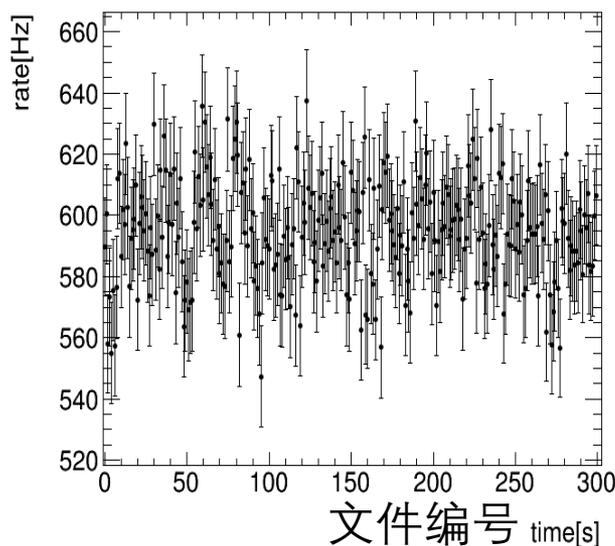
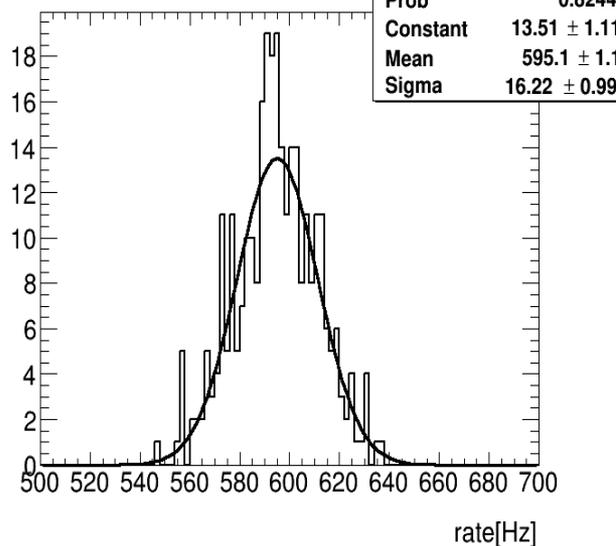


Figure 1.7 SN1987A neutrinos were observed at Kamiokande^[29,30], IMB^[31,32], and Baksan^[33,34] experiments. The energies represent the detected energy of positrons from inverse beta decay reactions. The shaded area corresponds to a trigger efficiency less than 30%. (From

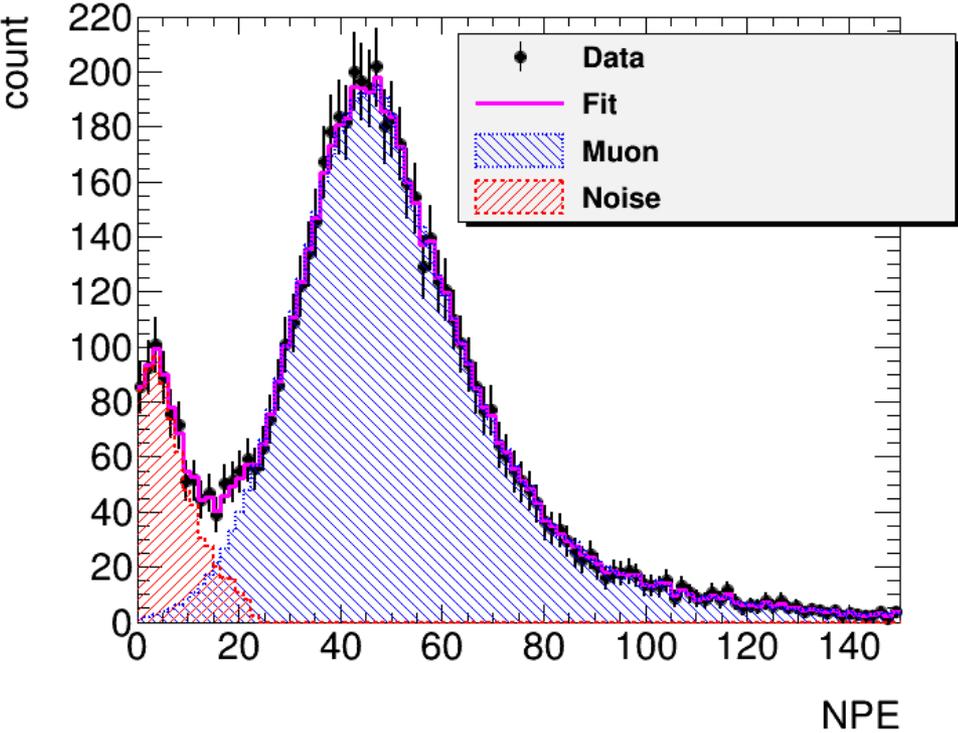


MD事例数随时间的变化



300秒时间内事例率统计

降低本底的方法之二：拟合辨别单 μ 子和PMT噪音



降低本底的方法之三：artificial dead time (IceCube), 600Hz→300Hz

The data acquisition was designed to reduce the noise rate by eliminating the excess hits, while keeping the random arrivals. The signal-to-noise ratio of the measurement can be improved by enforcing an artificial dead time τ after every count, configured to $250\mu\text{s}$ by a field programmable gate array in the DOM. This reduces the noise rate from 540 Hz to 286 Hz at the cost of some 13% dead time for signal. The choice of $250\mu\text{s}$ optimizes sensitivity to the Lawrence-Livermore model (Totani et al. 1997) for distances up to 75 kpc, when neglecting the effect of after-pulses following the signal. A dead time $\tau > 110\mu\text{s}$ guarantees

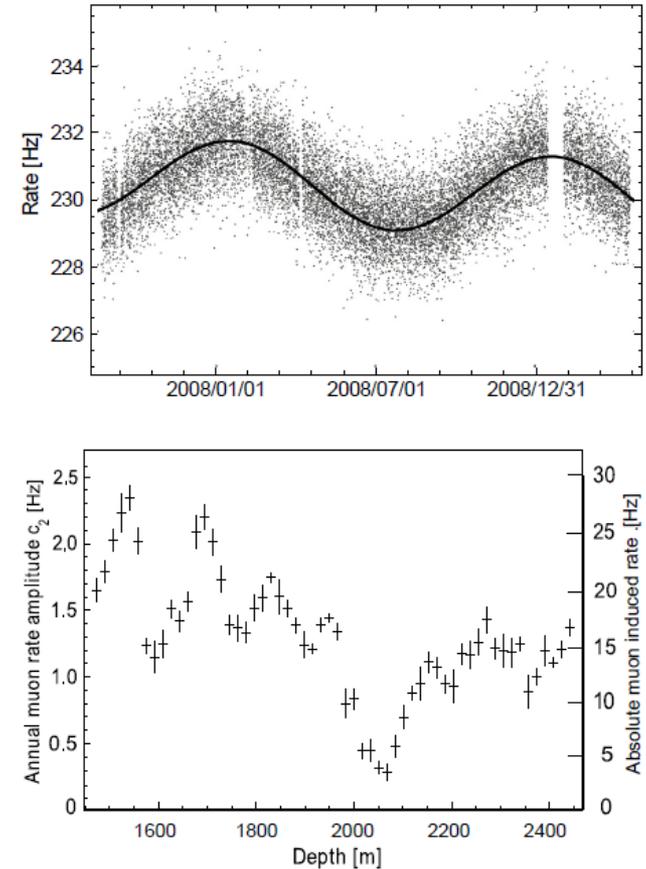


Fig. 7. Top: rate of a typical DOM as function of time covering 556 days of lifetime as measured in 0.5 s bins (baseline suppressed). The line corresponds to a rate fit according to Eq. (12). Bottom: parameter c_2 and estimated muon induced rate as function of depth. The variation with depth is mostly due to the optical properties of the ice and muons ranging out.

降低本底后，可以采取IceCube的分析方法寻找超出的事例率

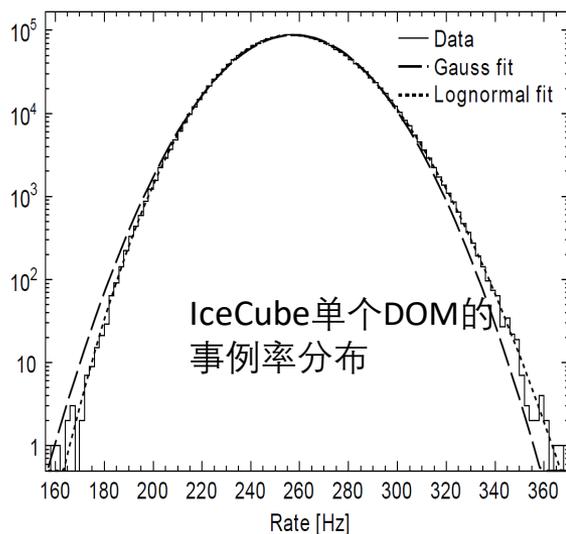


Fig. 8. Rate distribution of a typical standard efficiency DOM taken over 29 consecutive days. Each measurement corresponds to 0.5 s integration time. Gaussian and lognormal fits are shown.

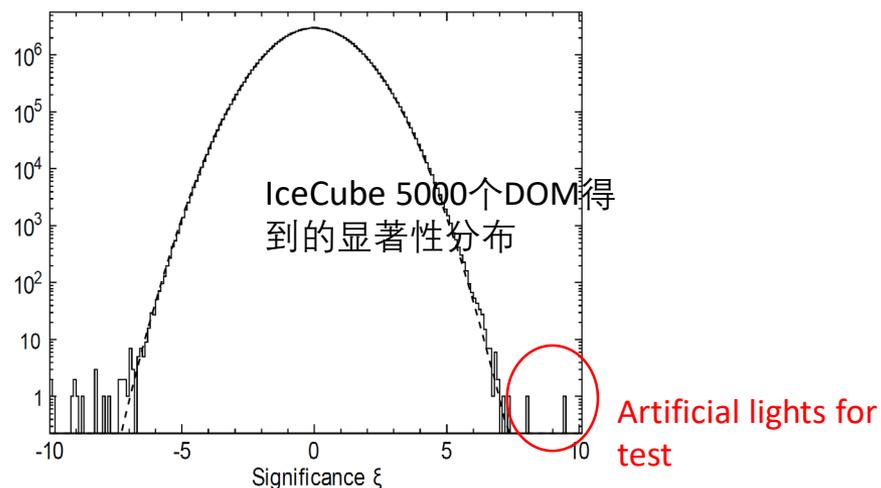
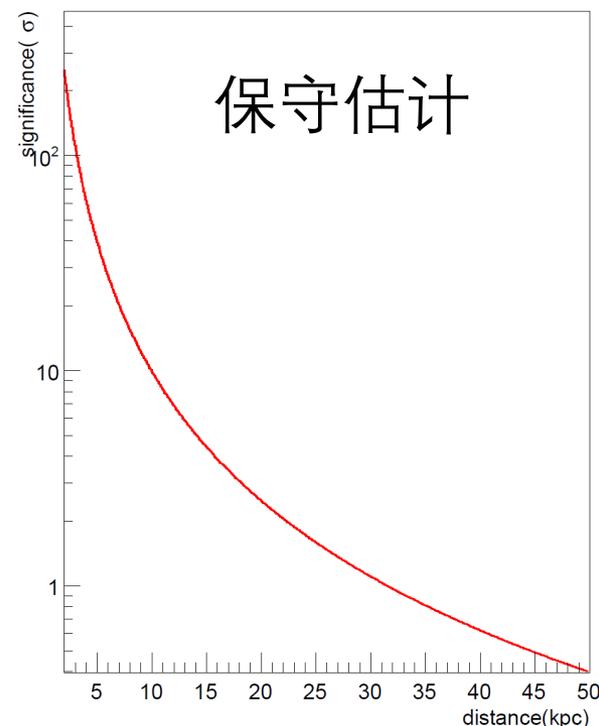


Fig. 9. Significance distribution in 0.5 s binning for a detector uptime of 556 days with 22 and 40 strings deployed. The two outliers at $\xi = 8$ and 9.5 occurred during test runs employing artificial light. The dashed line shows a Gaussian fit with $\sigma = 1.27$.

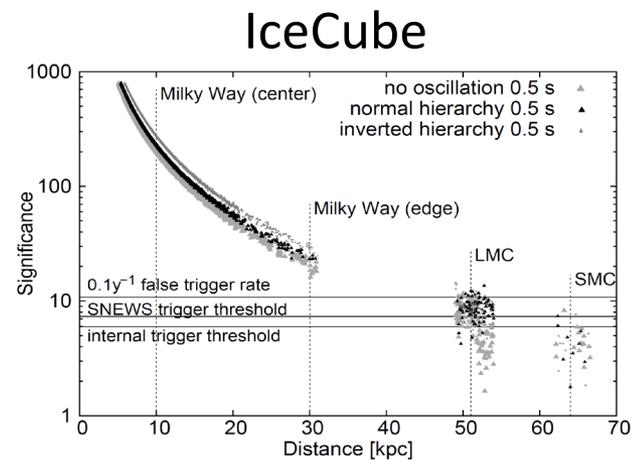
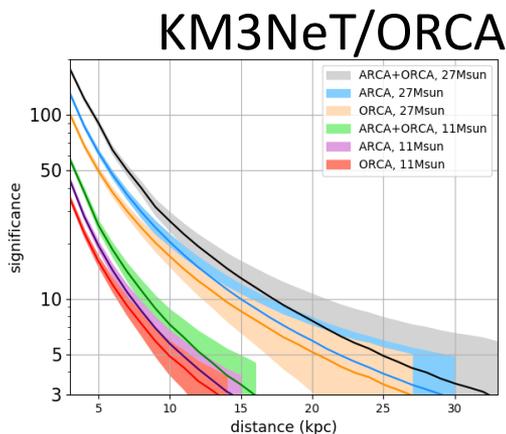
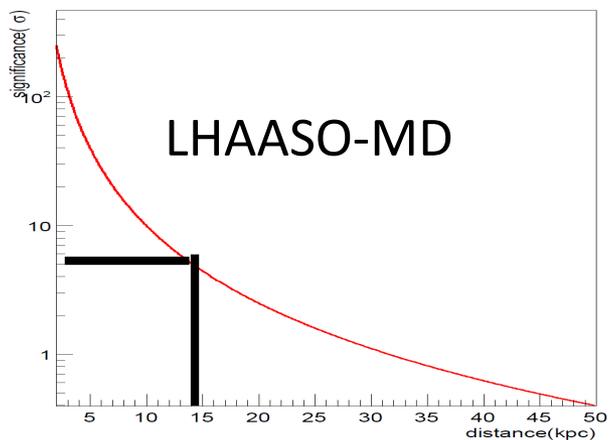
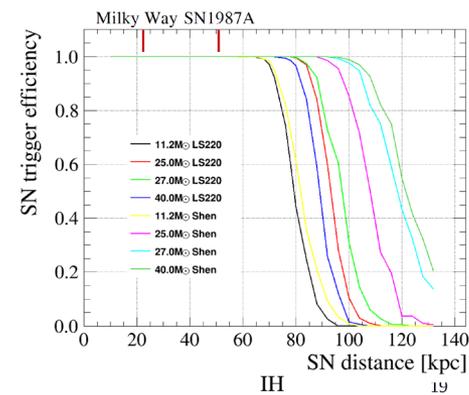
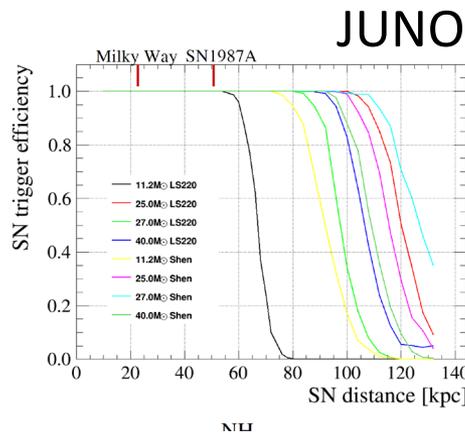
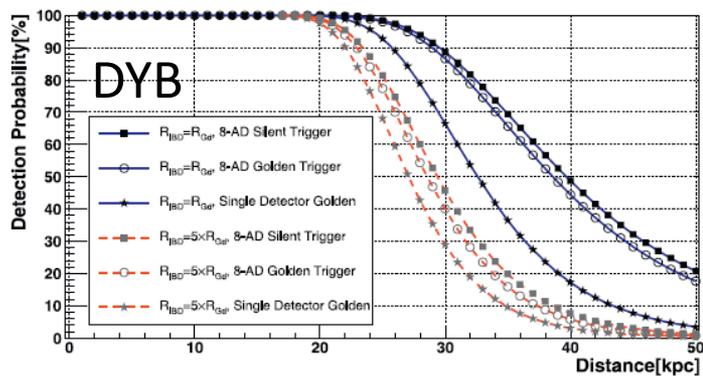
$$\mathcal{L}(\Delta\mu) = \prod_{i=1}^{N_{\text{DOM}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \langle \sigma_i \rangle} \exp\left(-\frac{(r_i - (\langle r_i \rangle + \epsilon_i \Delta\mu))^2}{2\langle \sigma_i \rangle^2}\right).$$

显著性估算

- 类1987A, 10kpc, 在MD阵列中, 阈能5MeV, 10秒内产生IBD事例12750个, 头1秒内产生正电子 $12750/2=6375$ 个
- 平均单个探测器1秒内得到中微子 $6375/1171=5$ 个
- 平均单个探测器本底 300Hz
- 平均单个探测器显著性 $5/\sqrt{300}=0.3\sigma$
- 1171个探测器显著性 $5*\sqrt{1171}/\sqrt{300}=10\sigma$



灵敏度比较



进一步增加MD灵敏度

1. 可以尝试阈值由5mV (1.7pe) 降到3mV (1pe) , L0 (单个探测器过阈) 触发率由6kHz升到11kHz (左雄) 。10MeV中微子触发效率平均50% (中微子的大部分能量传递给了正电子) 。能量越高触发效率会越高, 而中微子能谱的最可几值在20MeV左右, 20MeV的触发效率会很高。
2. 可以尝试进一步**降低本底的方法**: 改变目前的L0触发 (单个脉冲幅度 >1.7pe) , 在FPGA实现8ns滑动窗口、在608ns时间窗口内做积分得到Q值, 大于2个光电子时产生L0触发 (王玺, 常进帆) 。如果MD噪音率11kHz, 那末平均90us一个噪音, 在时间窗口608ns内噪音平均0.007个, 而10MeV中微子在这时间窗口里平均产生4个光电子, >>0.007, 也就是说, 在时间窗口内只要有2个光电子就基本上排除噪音了。需要FPGA编程处理, 并且在实际数据中检查可行性。

LHAASO-WCDA

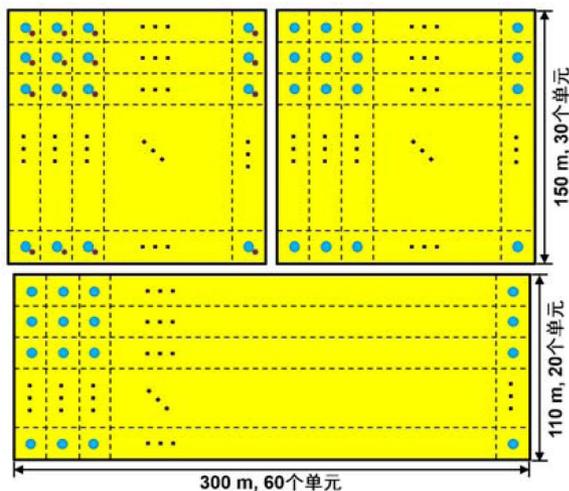
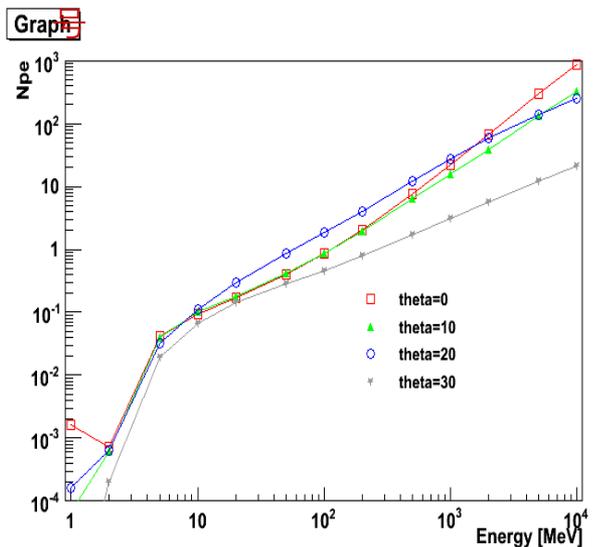


图 4.1.4-1: WCDA 的布局示意图。便于工程建设，整个水池分为 2 个 150 m×150 m 和 1 个 300 m×110 m 水池，池间距 5 m。

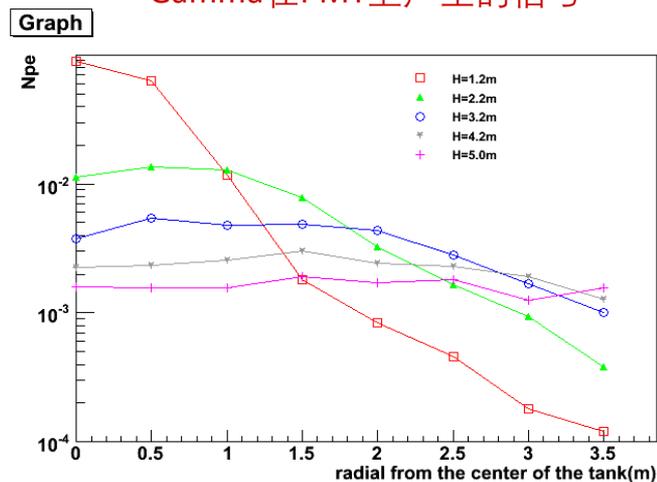
- 78,000m² 全覆盖式布局，有效水深为4m，共3 个水池，分为3,000个单元
- 水量0.1kton/PMT， 总共300kton。
- PMT阈值1/3pe， 单路计数率在30 kHz以上

WCDA模拟

水深为5m时正中心不同方向、不同能量入射的e+在PMT上产生的信号



不同位置垂直入射的20MeV的Gamma在PMT上产生的信号



当水深大于4m时，PMT接受的光电子数和探测效率各处均匀

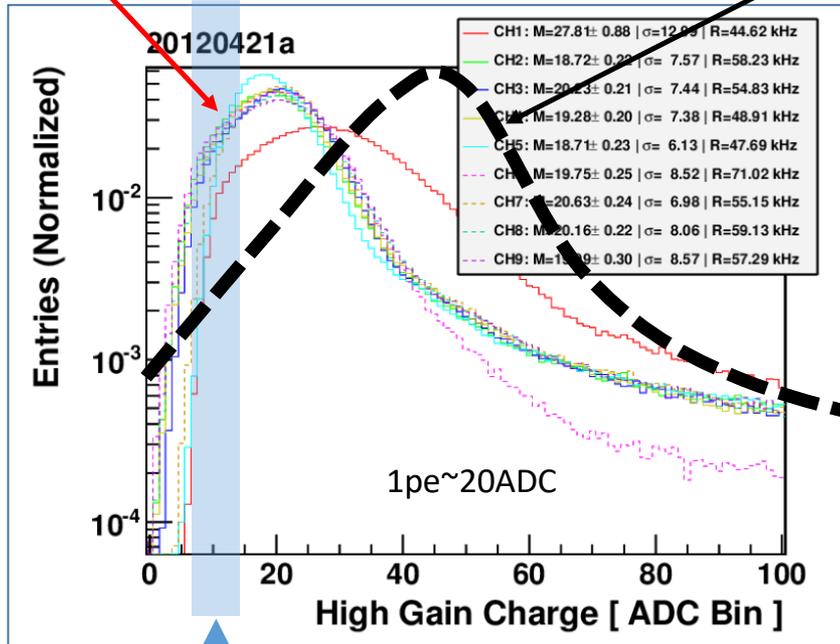
WCDA (吴含荣) :

10MeV正电子产生0.1pe, 阈能20MeV (1/3pe)

WCDA-PMT响应

8" PMT

20" PMT???



20-70MeV



小结

本研究关键：降低本底，提高探测灵敏度

下一步计划：

- 详细计算灵敏度：加入中微子能谱、正电子能谱、探测器响应模拟（参数化）、真实的信号幅度谱和时间差分布，最终得到不同SN距离的显著性（探测效率）
- 得到几个探测器之间的符合概率，确定宇宙线shower带来的影响

目标：实现LHAASO探测超新星中微子、争取入网SNEWS

Thank you!