

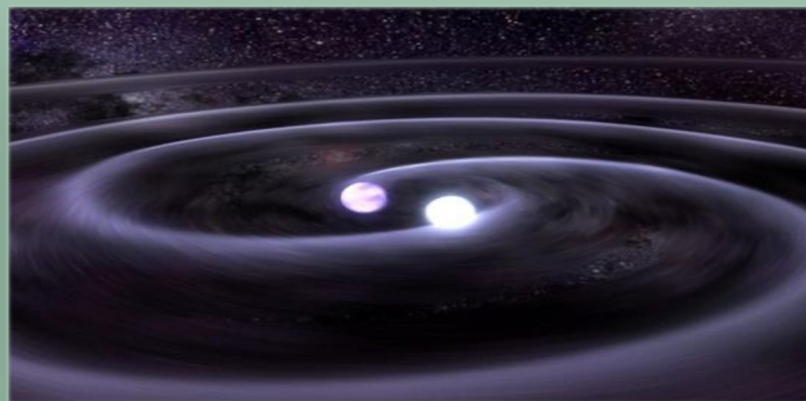
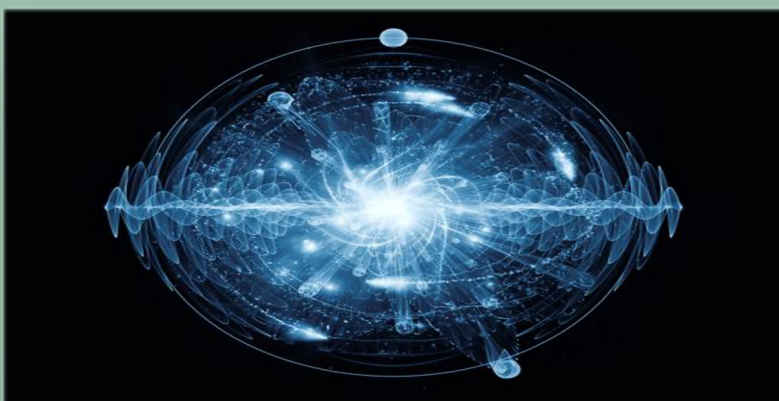


中微子探测及相关物理

杨莉莉

中山大学物理与天文学院

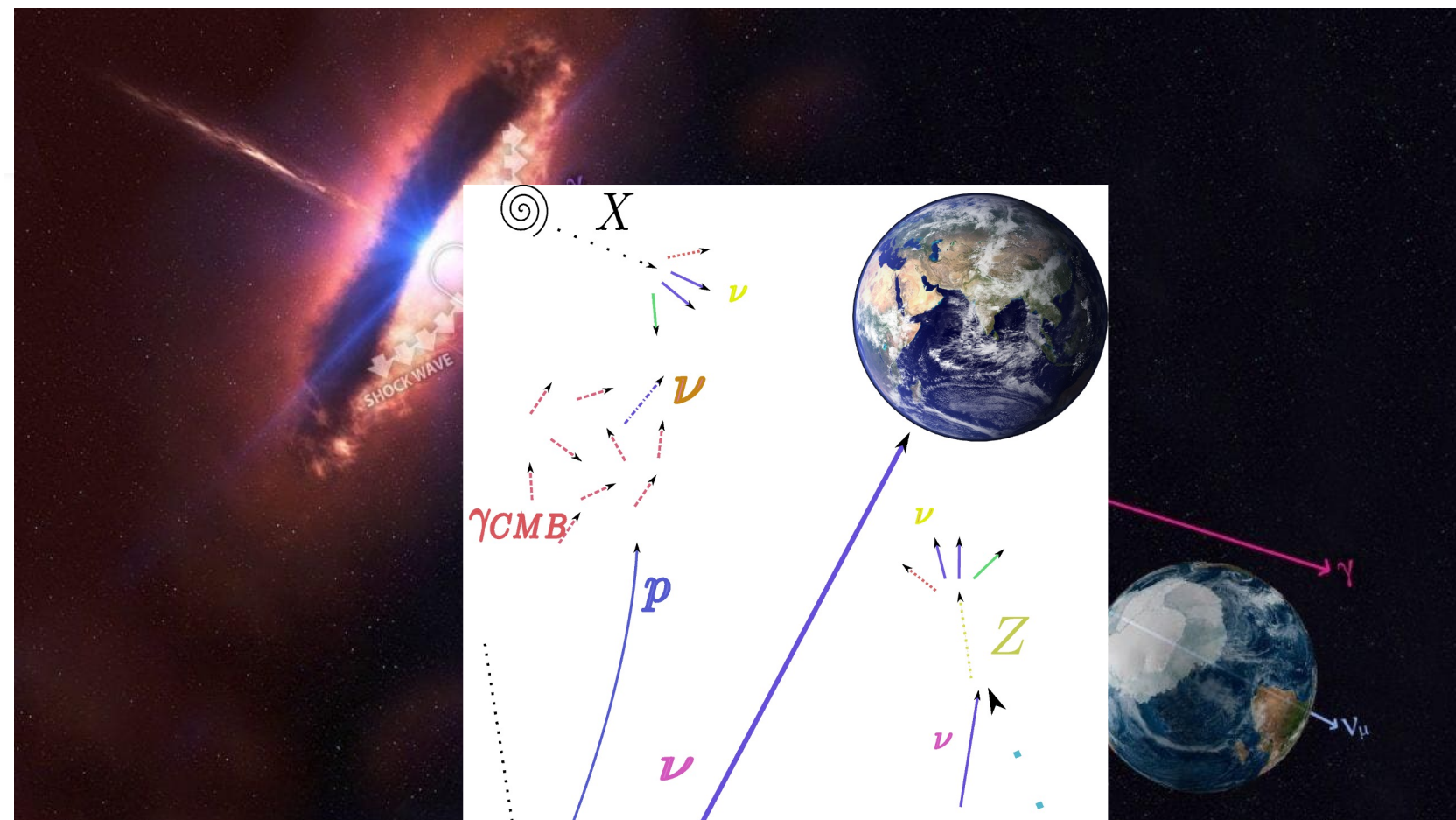
2024年8月9日



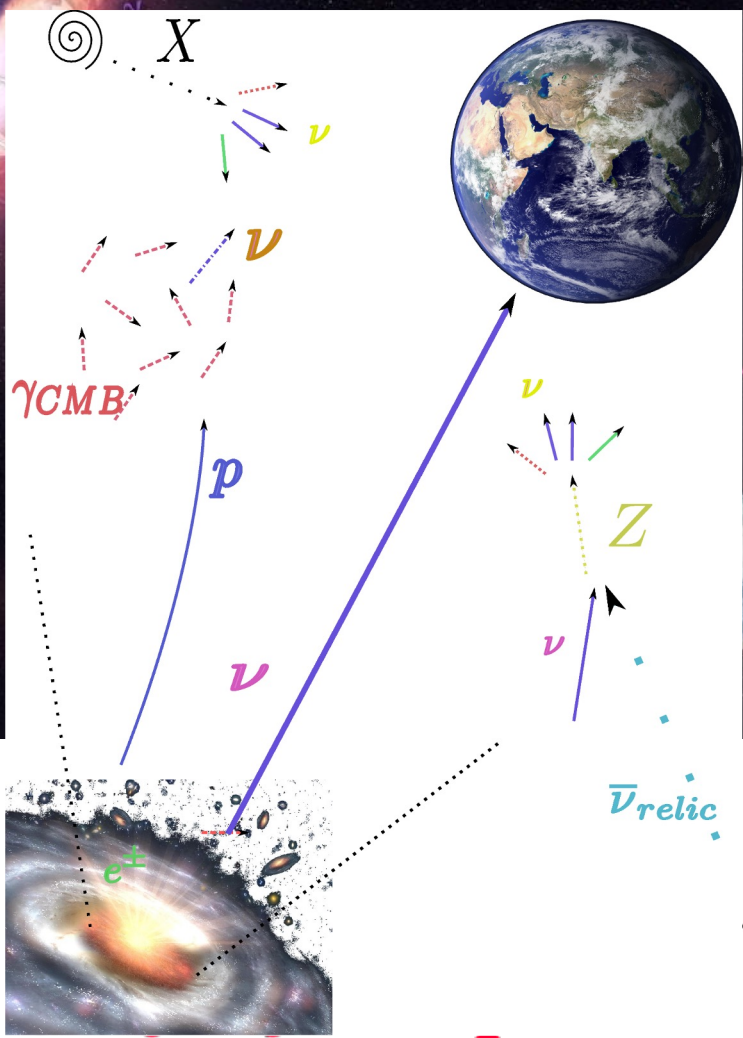
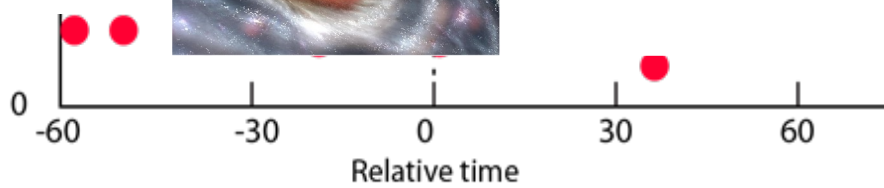
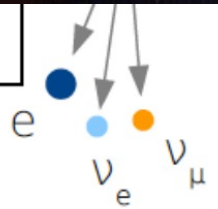
主要内容

- 中微子物理以及天文
- 中微子探测
- 多信使时代的中微子天文
- 现在以及未来



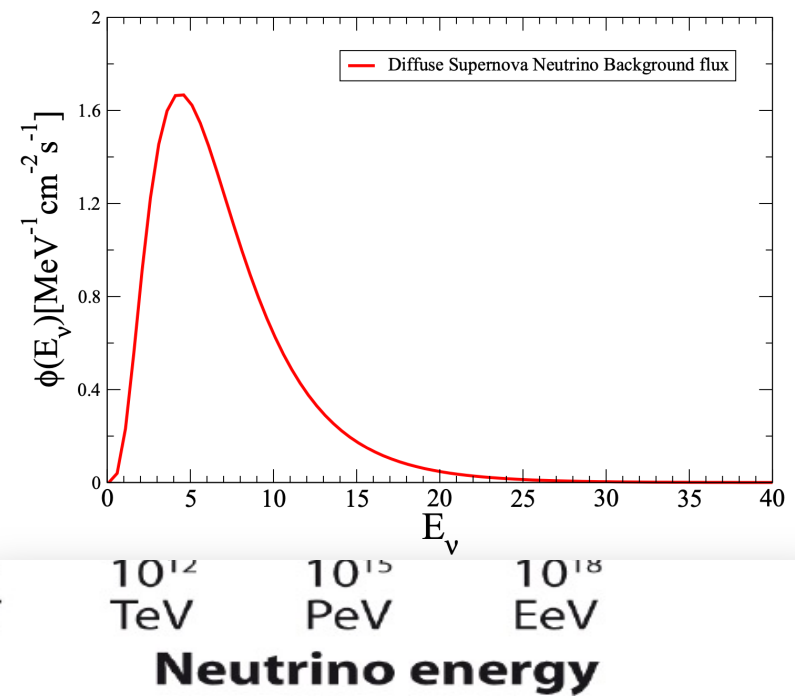
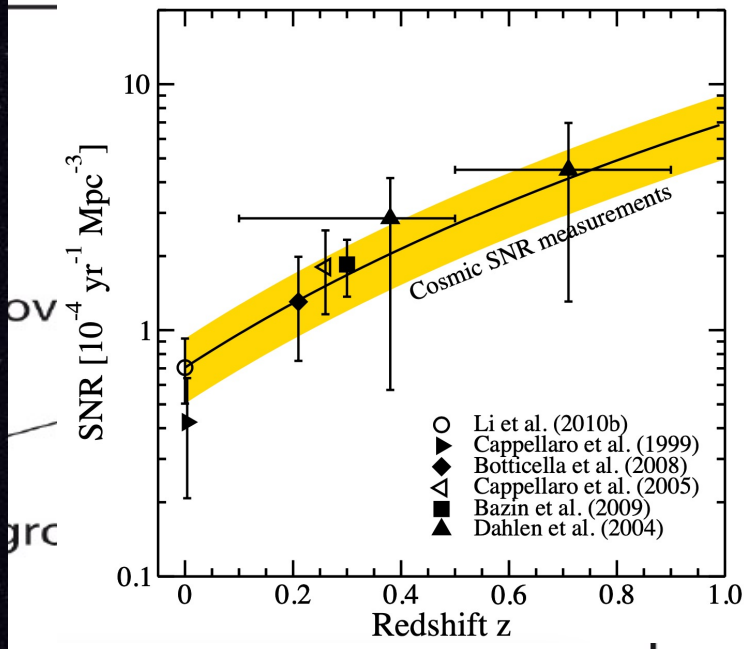
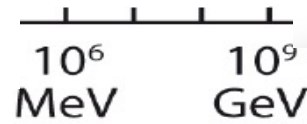


$\sim E^{-3.7}$



$\nu_\tau \sim 1/20 * \nu_\mu$
 $\sim E^{-2.7}$

Courtesy: A



中微子探测：

要探测中微子，首先它需要进入到探测器进行碰撞，产生可以探测的信号。

$$\text{两种反应过程} \begin{cases} \text{Charge Current } \bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \\ \text{Neutral Current } \nu + e \rightarrow \nu + e \end{cases}$$

对于CC碰撞，产生相应的轻子，但是会要求中微子能量大于轻子的质量。

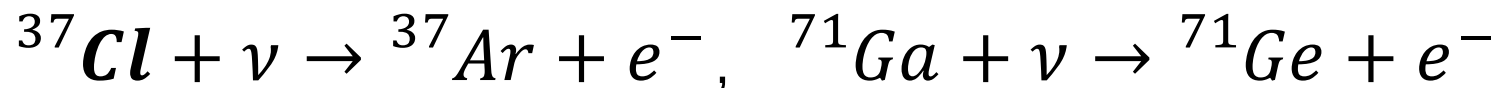
探测的方法取决于科学目标，通常情况下，一个中微子探测器应该有以下几点考量：

1. 要探测什么能量的中微子，要测多少个？探测器的质量
2. 要利用哪种中微子碰撞？ ν_e, ν_μ, ν_τ ？CC还是NC？
3. 你要探测什么样的信号？决定了探测方法
4. 背景？如何消除？
5. 预算和周期？

不可能一个实验实现全部的愿望，以目标为导向

中微子探测技术:

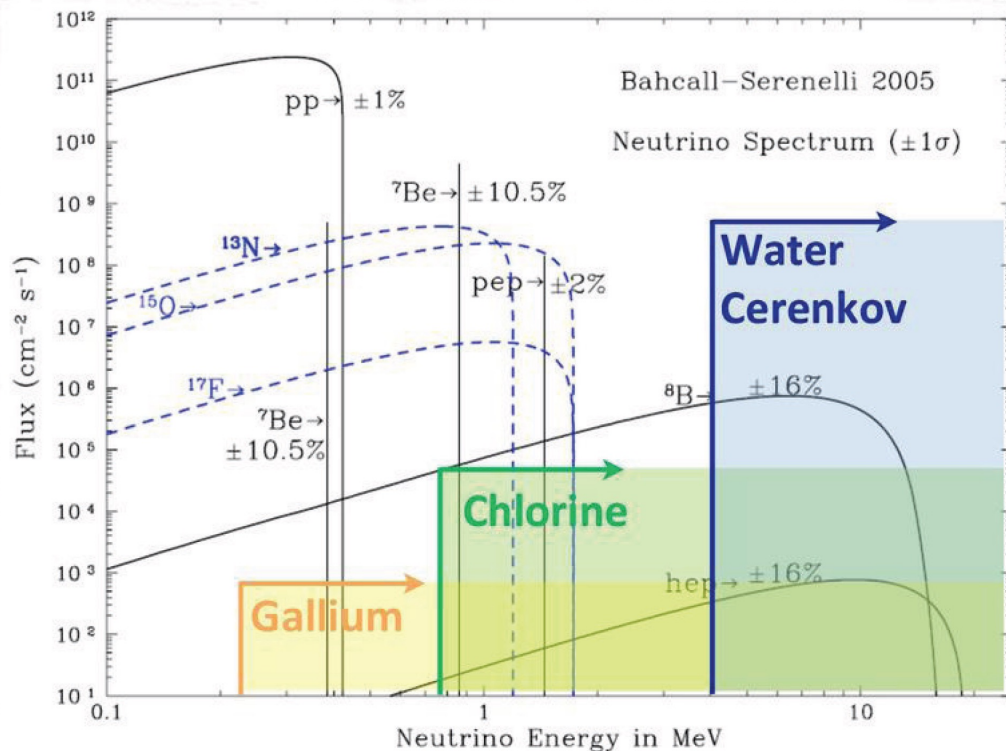
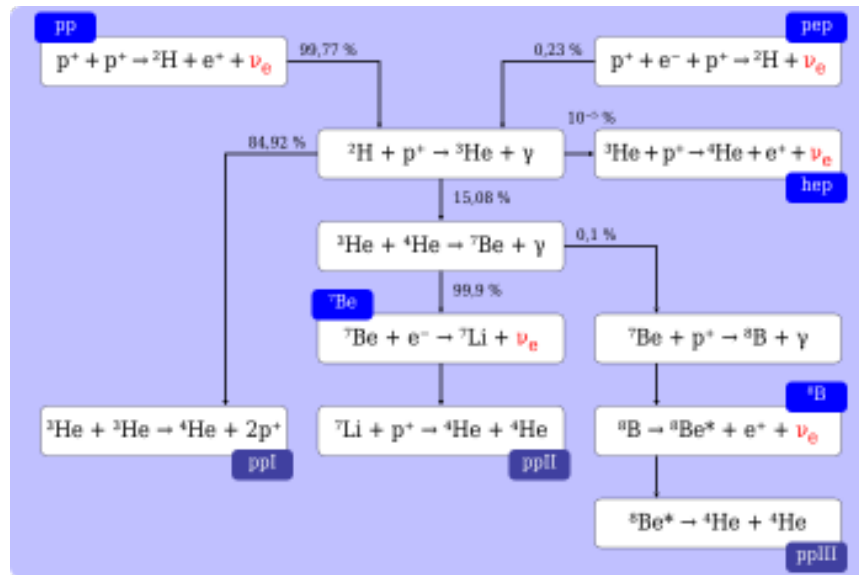
1. 放射化学实验 (radiochemical)



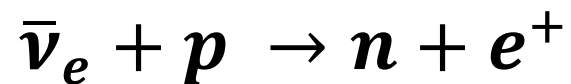
优势: 可以探测低能中微子, 阈值为0.233 MeV

劣势: 无法探测方向以及能量, 时间分辨率较差

相关的实验: Homestake (Cl), SAGE (Ga), GALLEX/GNO (Ga)



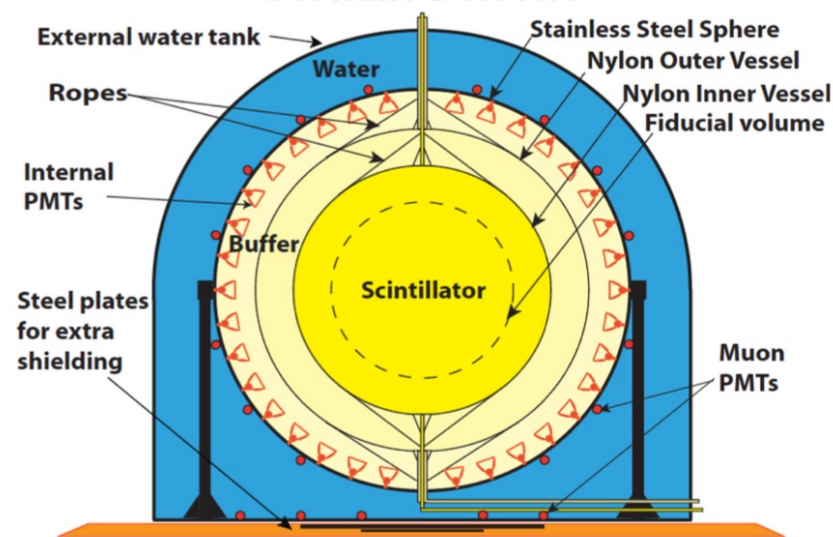
2. 液体闪烁体探测器



液体闪烁体作为有机复合物，p作为靶粒子。产生的正电子很快湮灭，产生两个伽马粒子。接着中子被捕获（几个到几百个微秒），产生额外的伽马信号。信号的符合，可以去除背景。

优势：时间以及能量分辨
劣势：无法探测方向

能量阈值为几个MeV



相关的实验：Borexino (太阳中微子)，KAMLAND (反应堆中微子振荡实验)，MiniBooNE (加速器中微子振荡实验)，SNO+ (建设中)

3. Tracking实验

通过探测CC碰撞中产生的轻子，追踪这些粒子的轨迹。可以对电子以及缪子进行分辨。

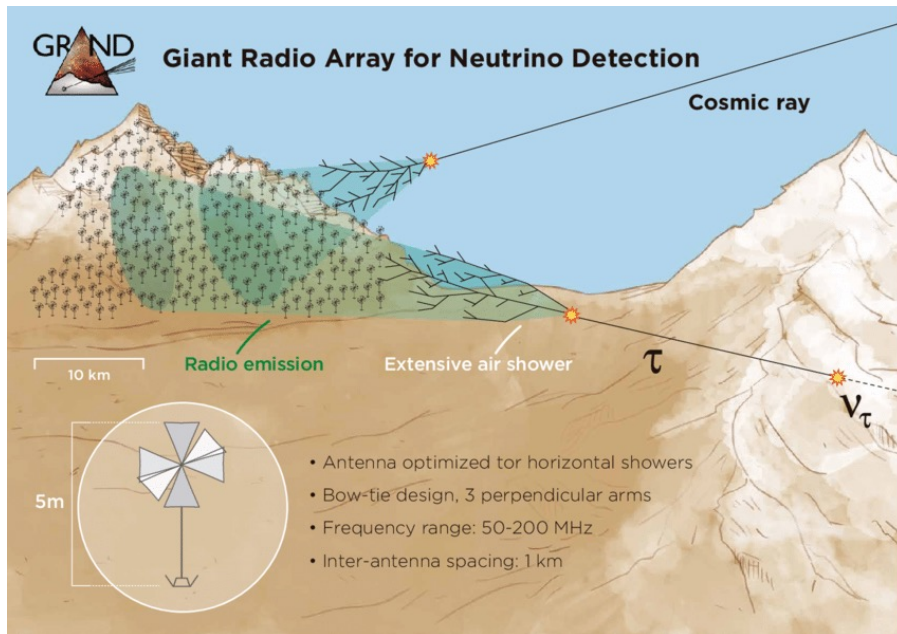


优势：分辨事件类型，更适合缪子中微子探测

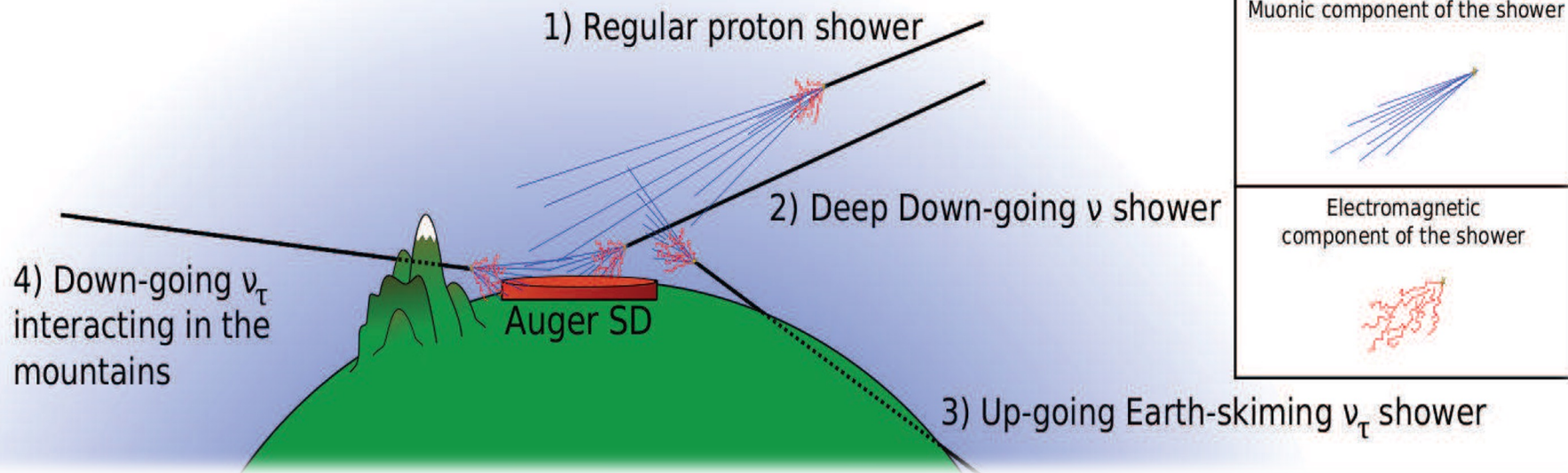
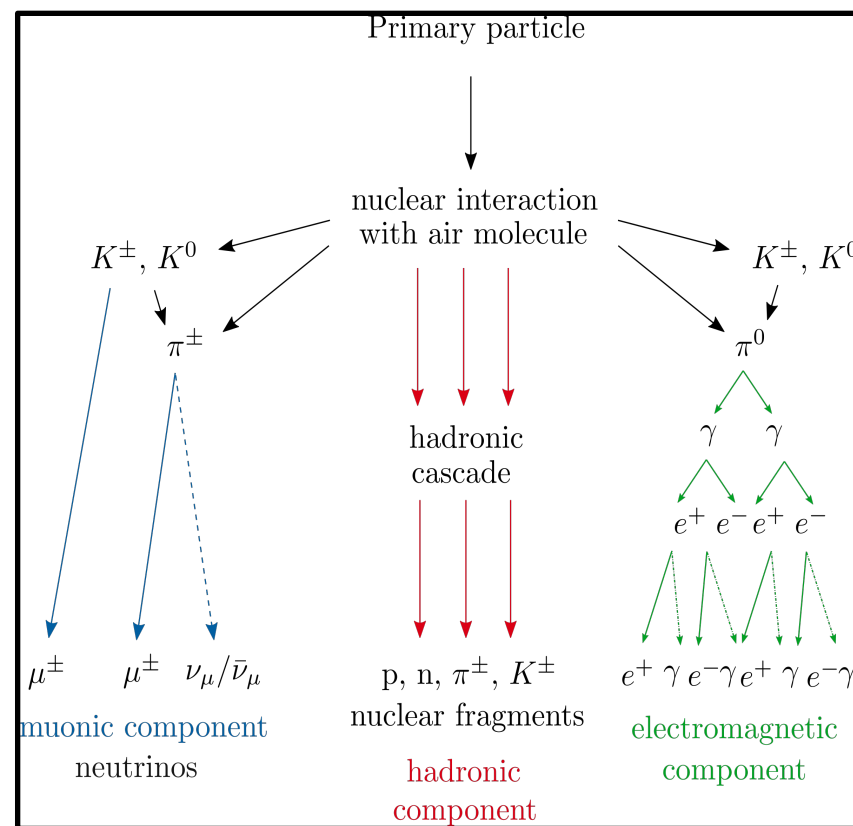
能量阈值为GeV

相关的实验：MINOS(中微子振荡)，MINERνA(中微子碰撞)，ICARUS(中微子振荡实验)

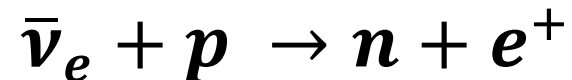
4. EAS 中微子探测



探测广沿大气簇射的信号



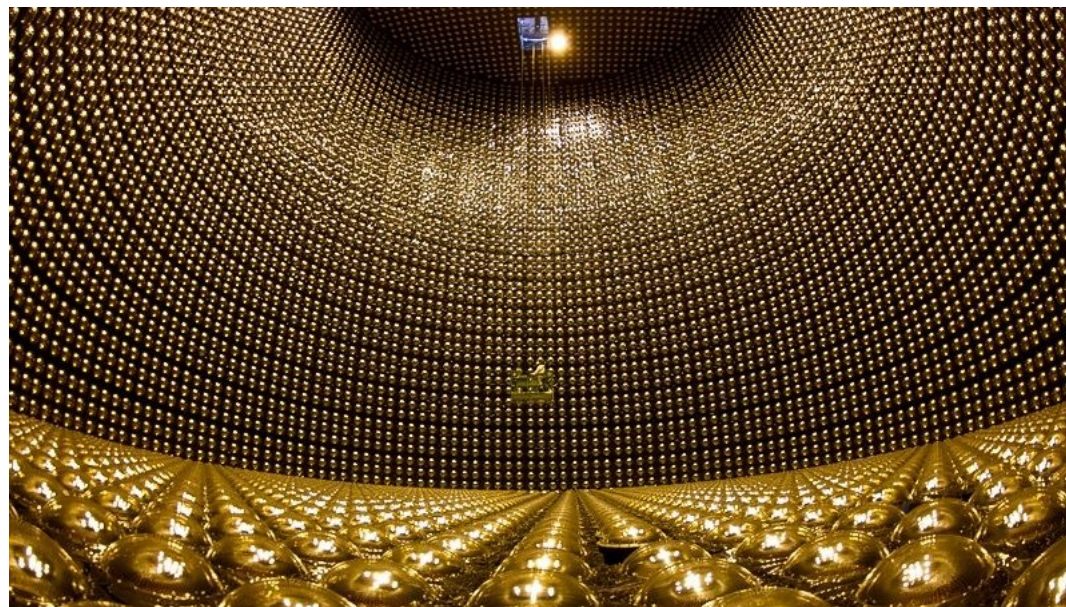
5. 水切伦科夫实验



当粒子在水中的速度超过光在水中的速度时（电子能量大于0.77 MeV, 缪子大于160 MeV, 陶子大于2.7 GeV），会产生切伦科夫辐射，蓝色的光锥。

包括两种，低能（阈值MeV）和高能中微子探测（几百个GeV）。

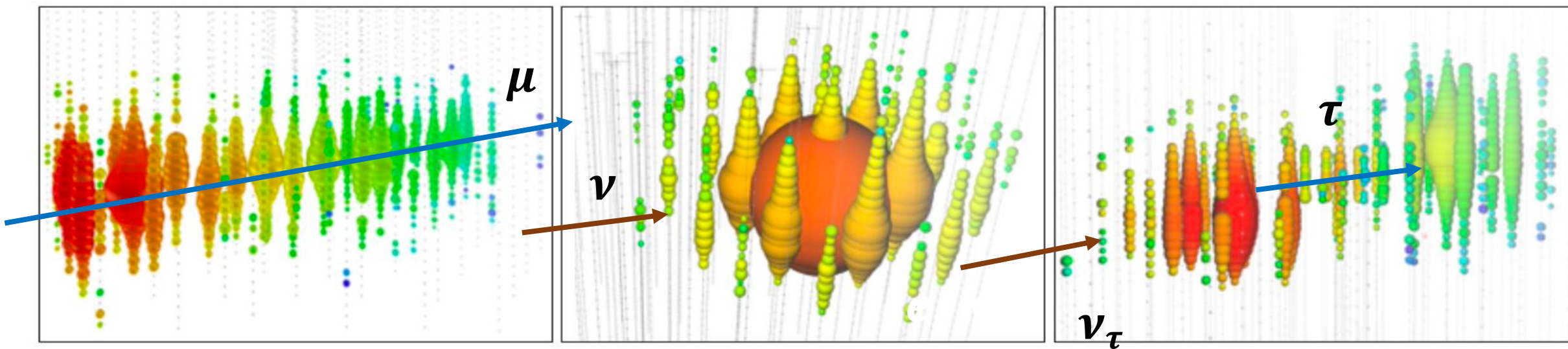
相关的实验：SK, IceCube, KM3NeT, Baikal





信号形态:

IceCube Gen2, arXiv:2008.04323v1



径迹型事件

角度分辨较好
能量分辨较差

簇射型事件

能量分辨较好
角度分辨较差

双包型事件

通常探测高能 ν_τ ,
才能分辨出特征

海水中的背景:

大气缪子

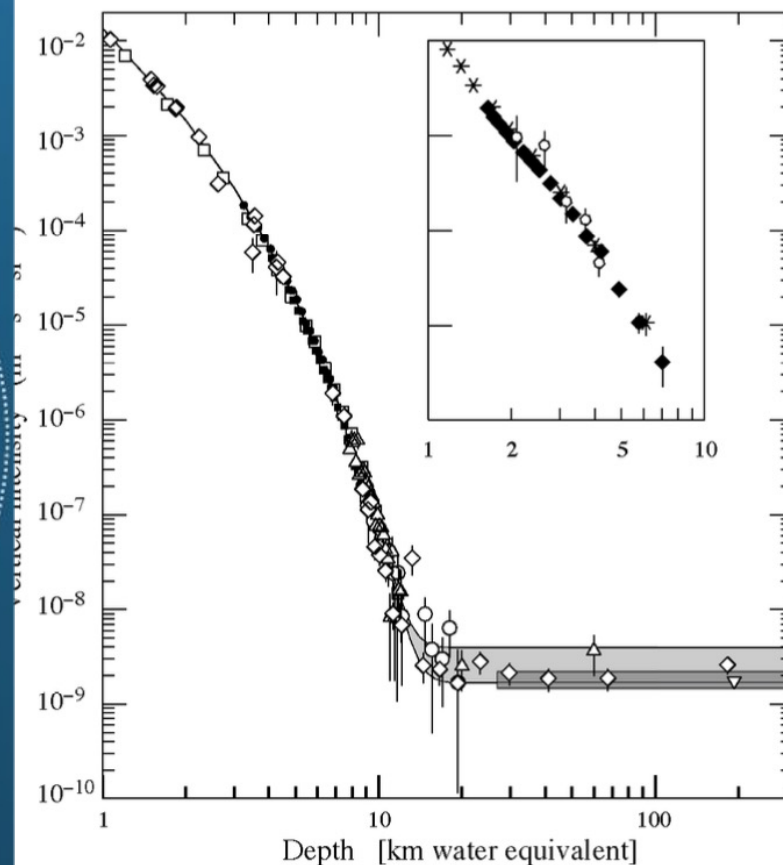
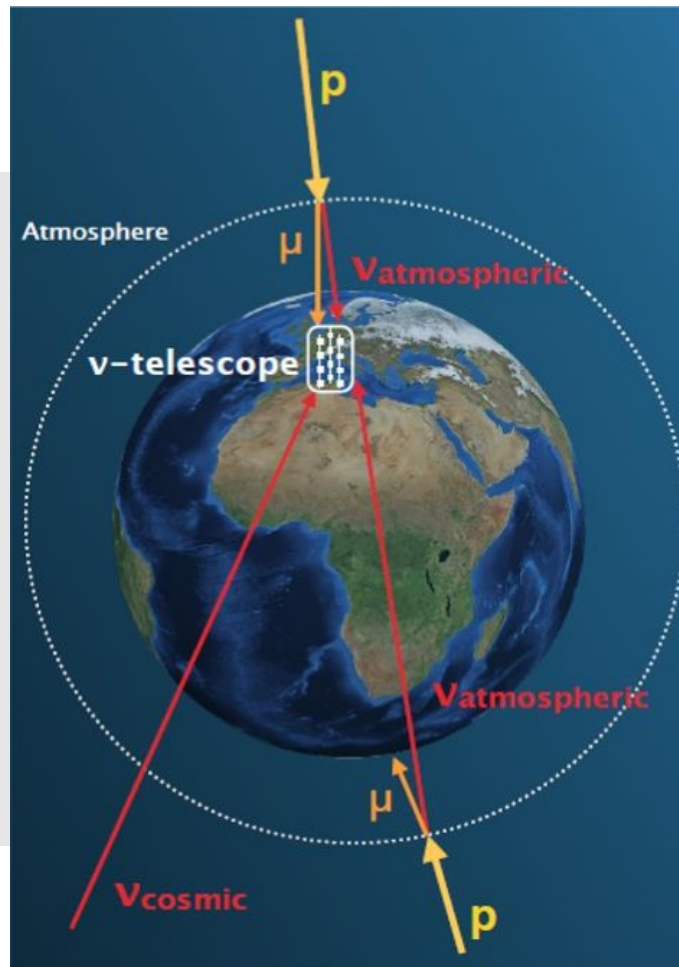
方向选择 → 选择向上的中微子事件

探测器标定

大气中微子

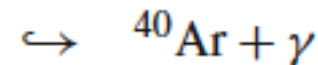
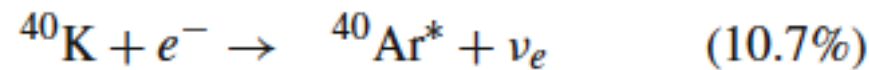
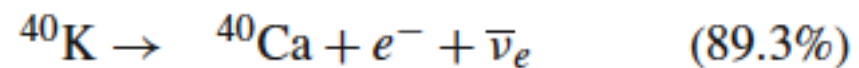
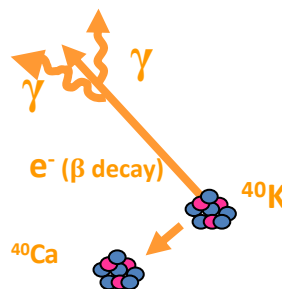
不可去除的背景噪音

中微子振荡 → 质量顺序



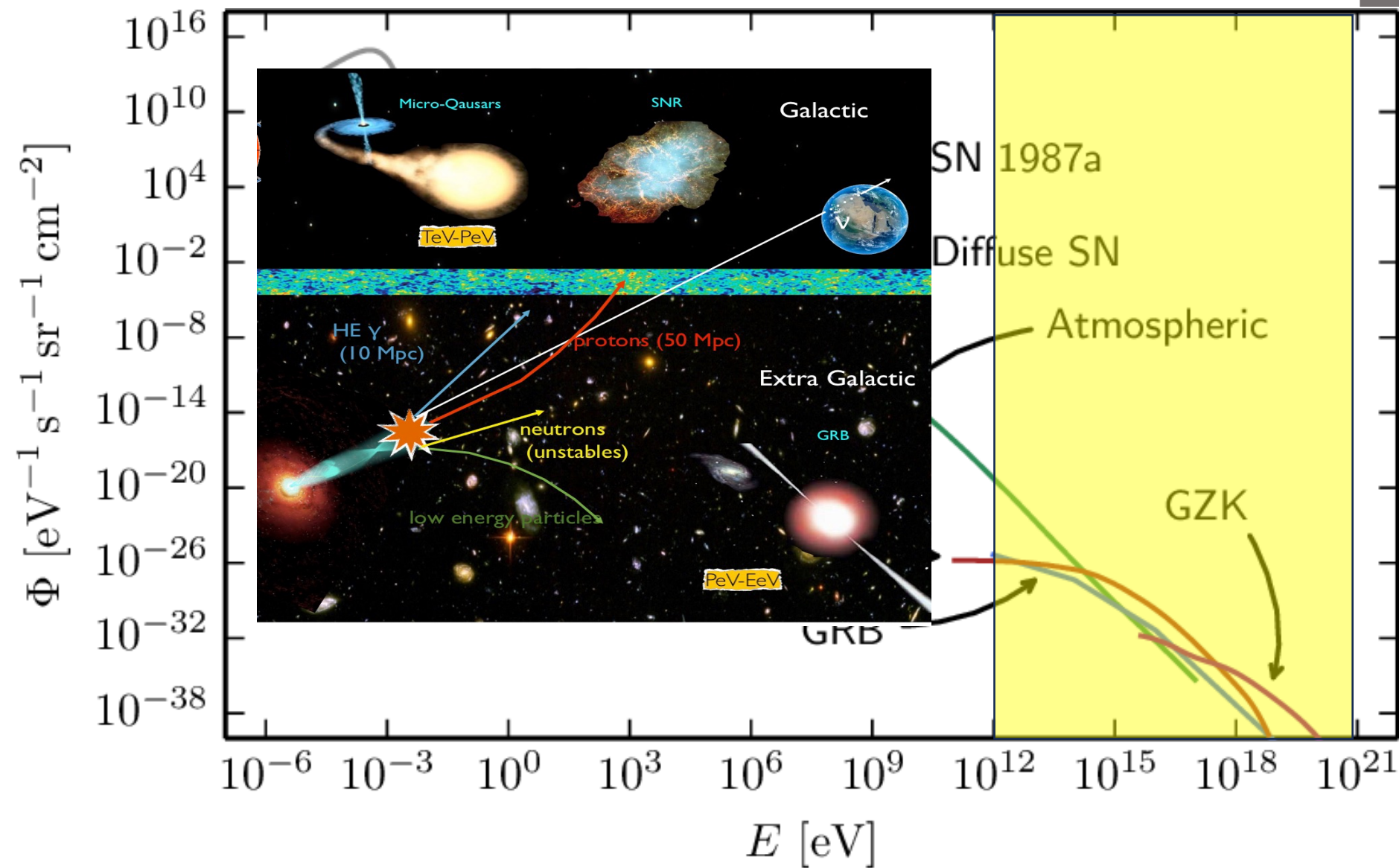
环境噪音

- ^{40}K 衰变
- 生物发光



多信使时代的中微子天文

最佳信使: 不受偏转, 不被吸收
多信使观测的绝佳手段



光学望远镜: TAROT, MASTER, LCOGT, ZTF, LSST...

- Easy access follow-up of large error box
- Characterisation of the potential counterpart with spectroscopy (nature, redshift...)

X射线望远镜: Swift, INTEGRAL, SVOM, THESEUS, ATHENA...

- Very clean sky
- Provide transient triggers (GRB, AGN, Novae...)
- ToO program (not so easy access)

伽马射线望远镜: Fermi-LAT

- All-sky complete monitoring
- Provide transient triggers (GRB, AGN...)

射电望远镜: Parkes, MWA, Lofar, Nenufar, ASKAP, SKA...

- Provide triggers (FRB...)
- Follow-up

甚高能伽马射线望远镜: HESS, MAGIC, CTA...

- Most natural common science case
- Follow-up (not easy access)

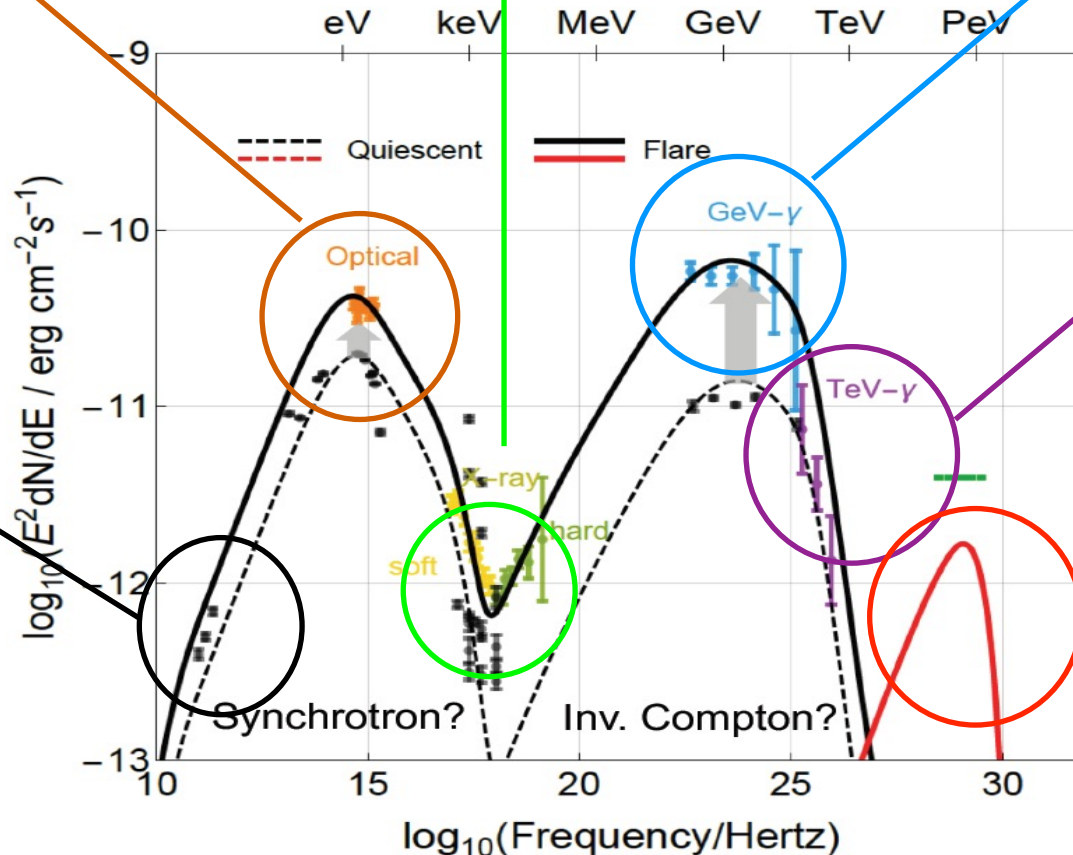
超高能伽马射线望远镜: HAWC, LHAASO...

- All-sky monitoring
- Provide triggers

中微子望远镜: KM3NeT, IceCube, GVD...

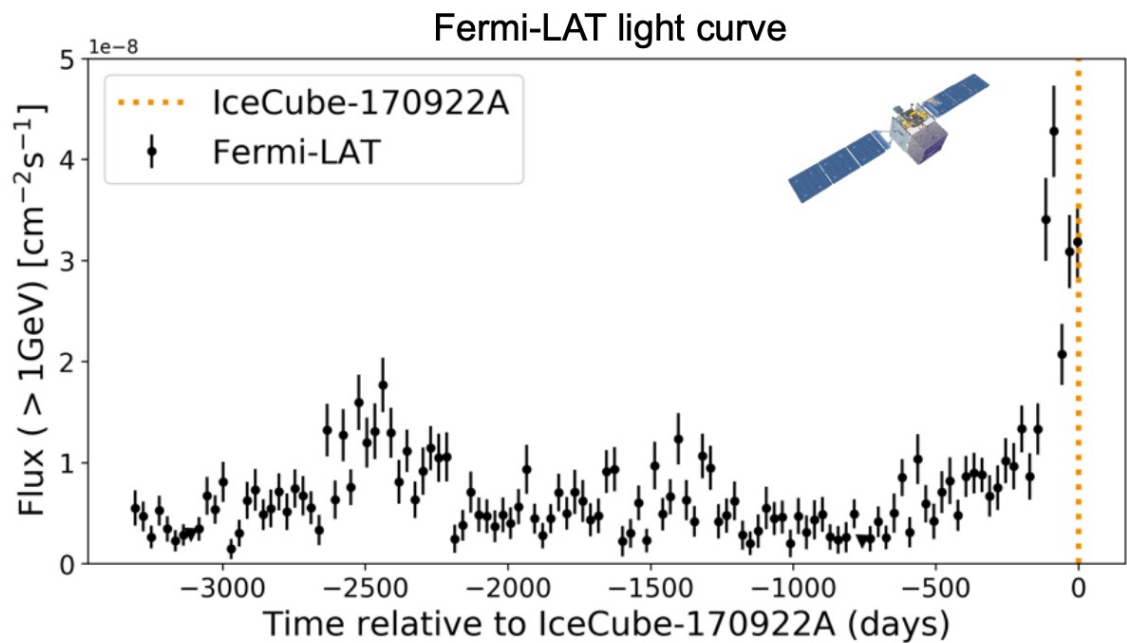
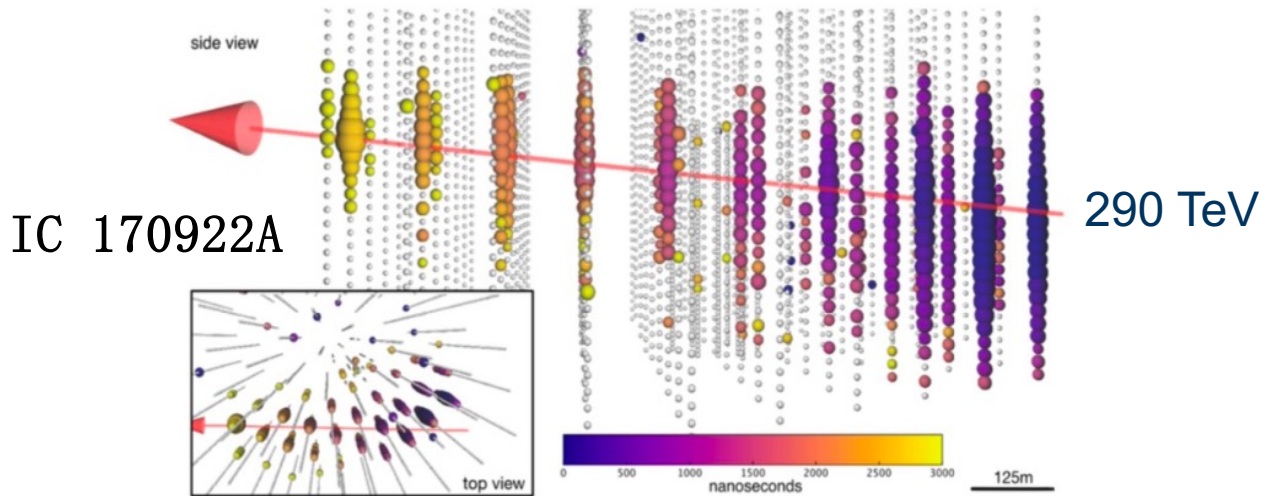
- Mutual follow-up
- Confirmation of sources, improve significance

+ LIGO/VIRGO

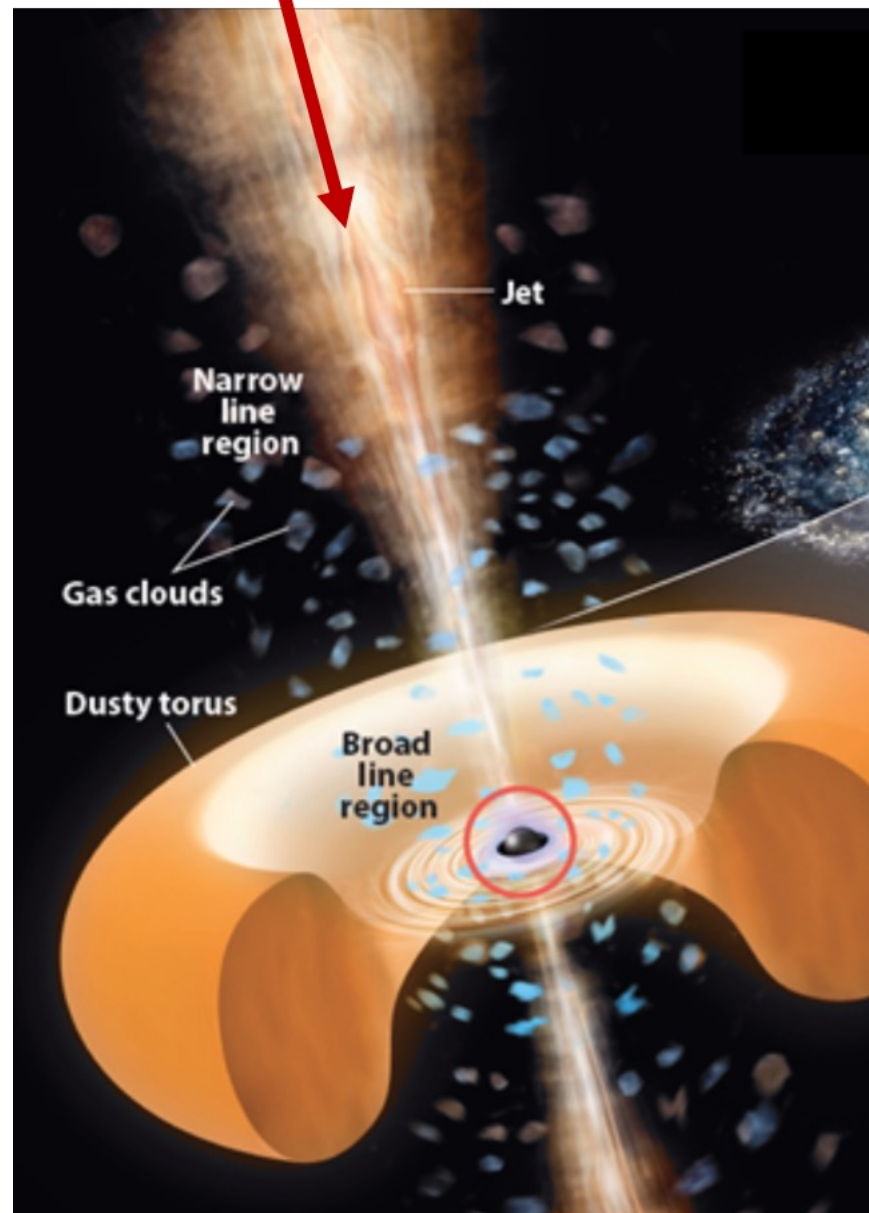


当前的成就

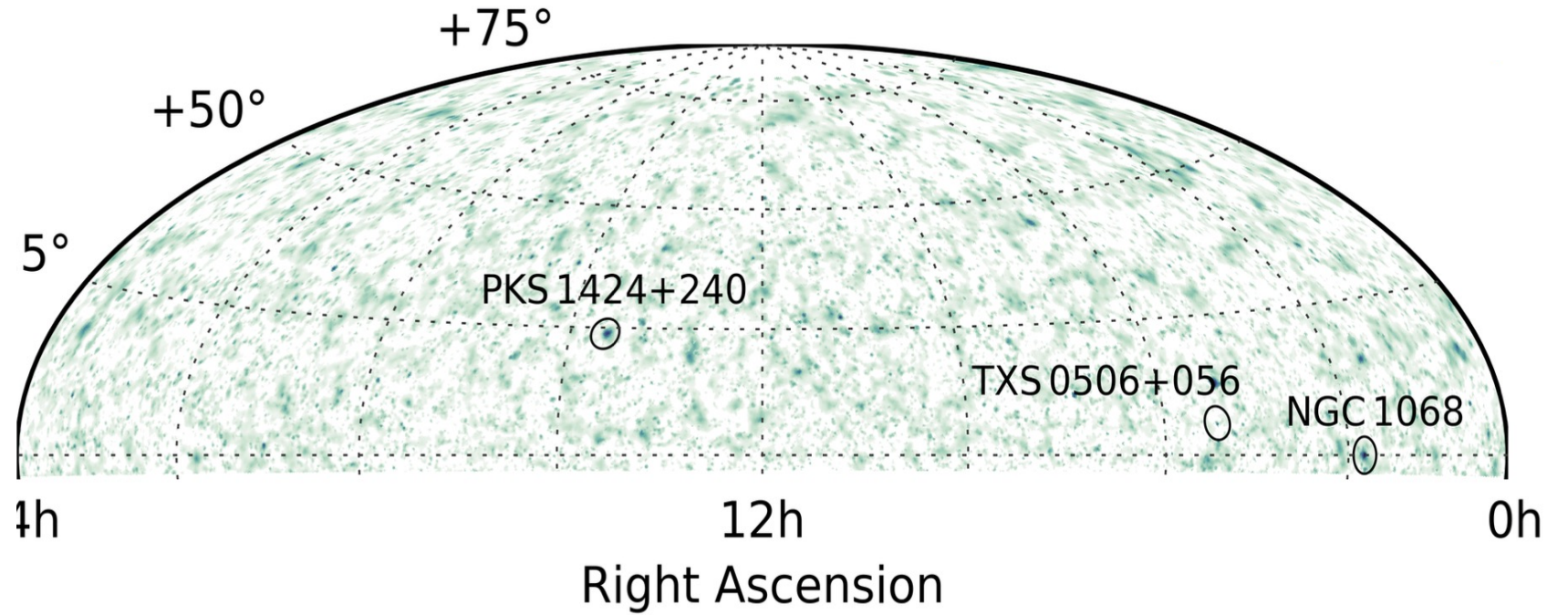
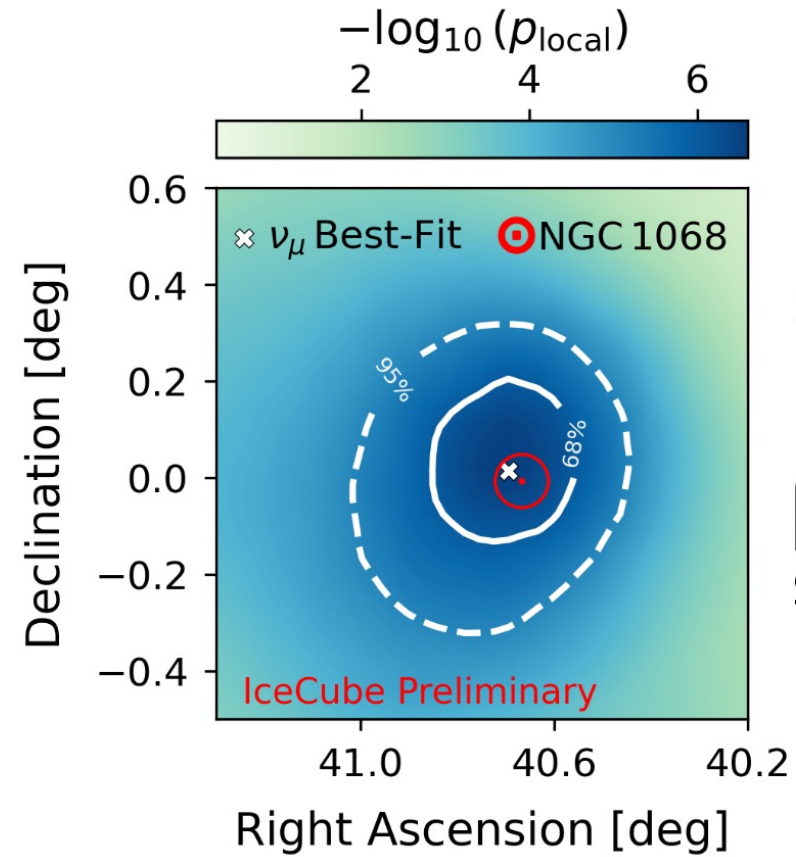
Science 2018



Blazar



Science 378 (2022) 538-543

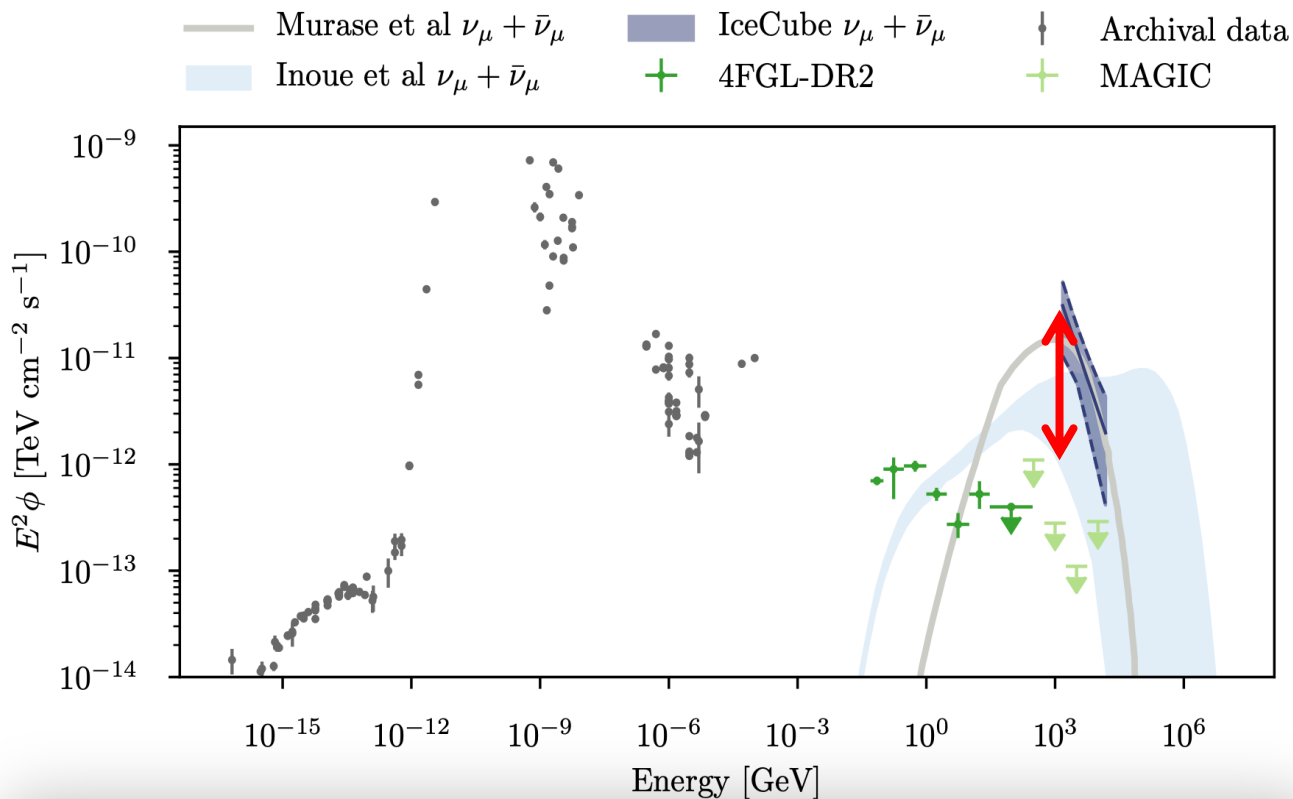


NGC 1068: 4.2 σ

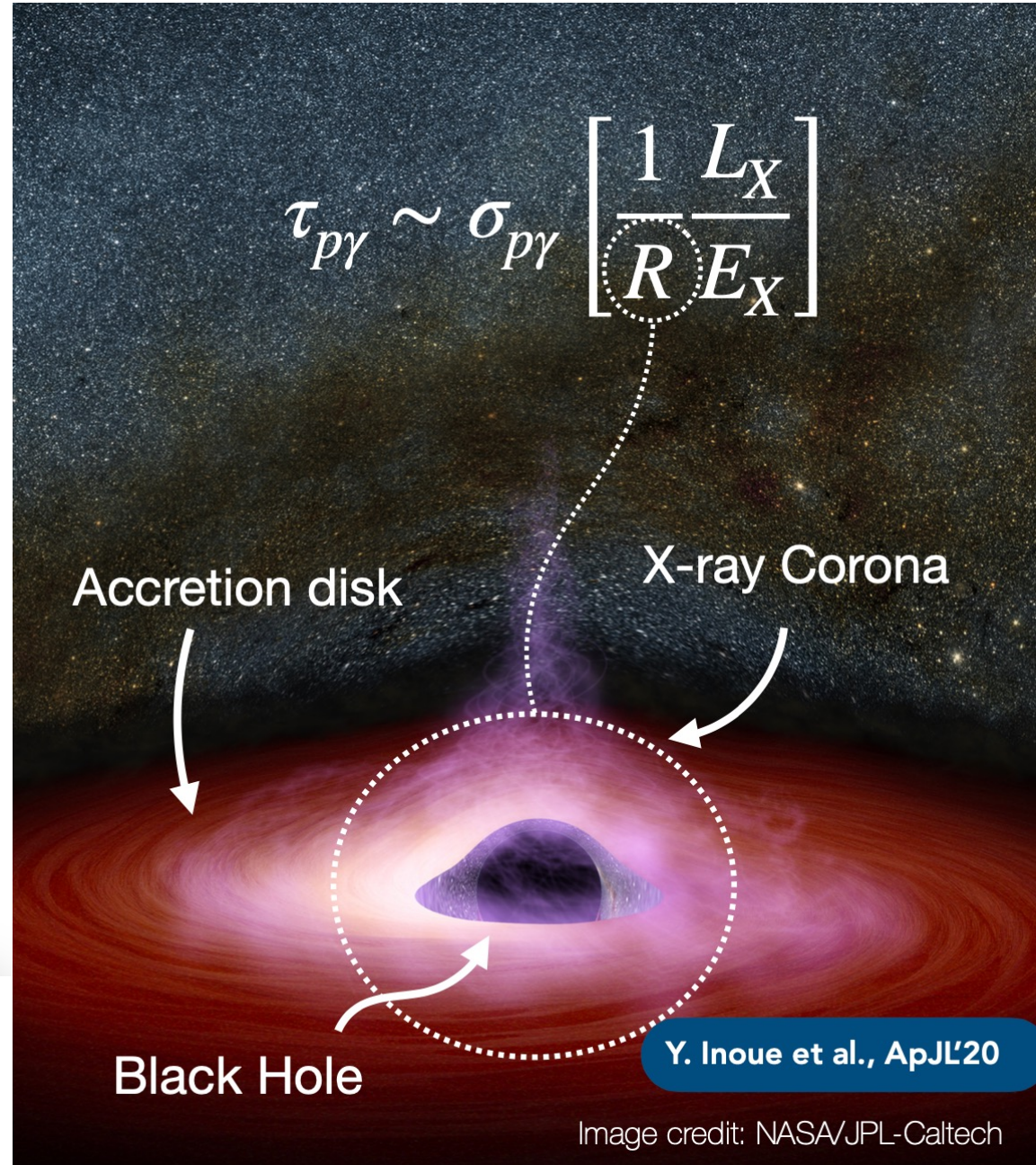
TXS 0506+056: 3.5 σ

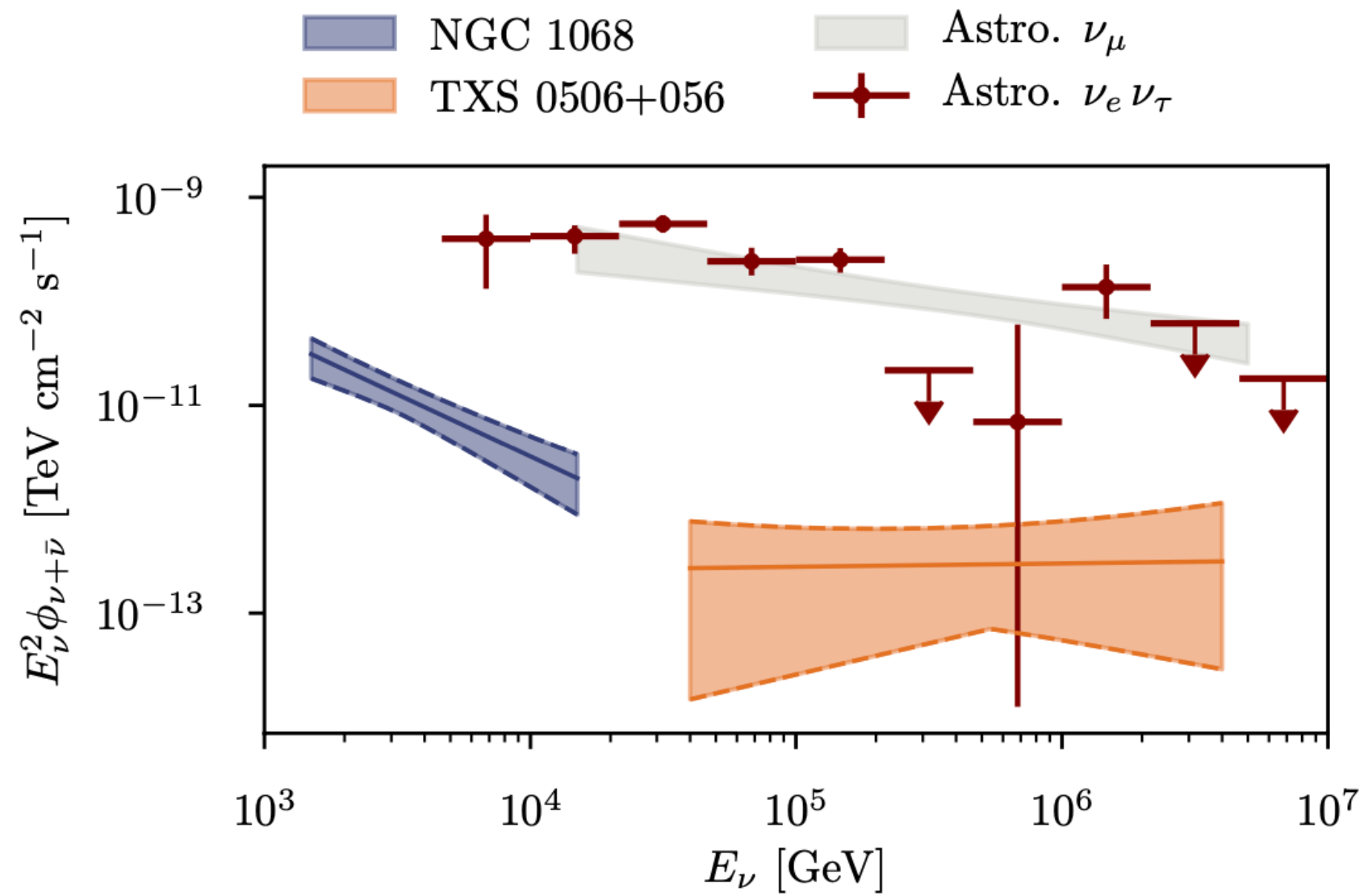
PKS 1424+240: 3.7 σ

NGC 1068的多信使观测数据



伽马射线被吸收掉了

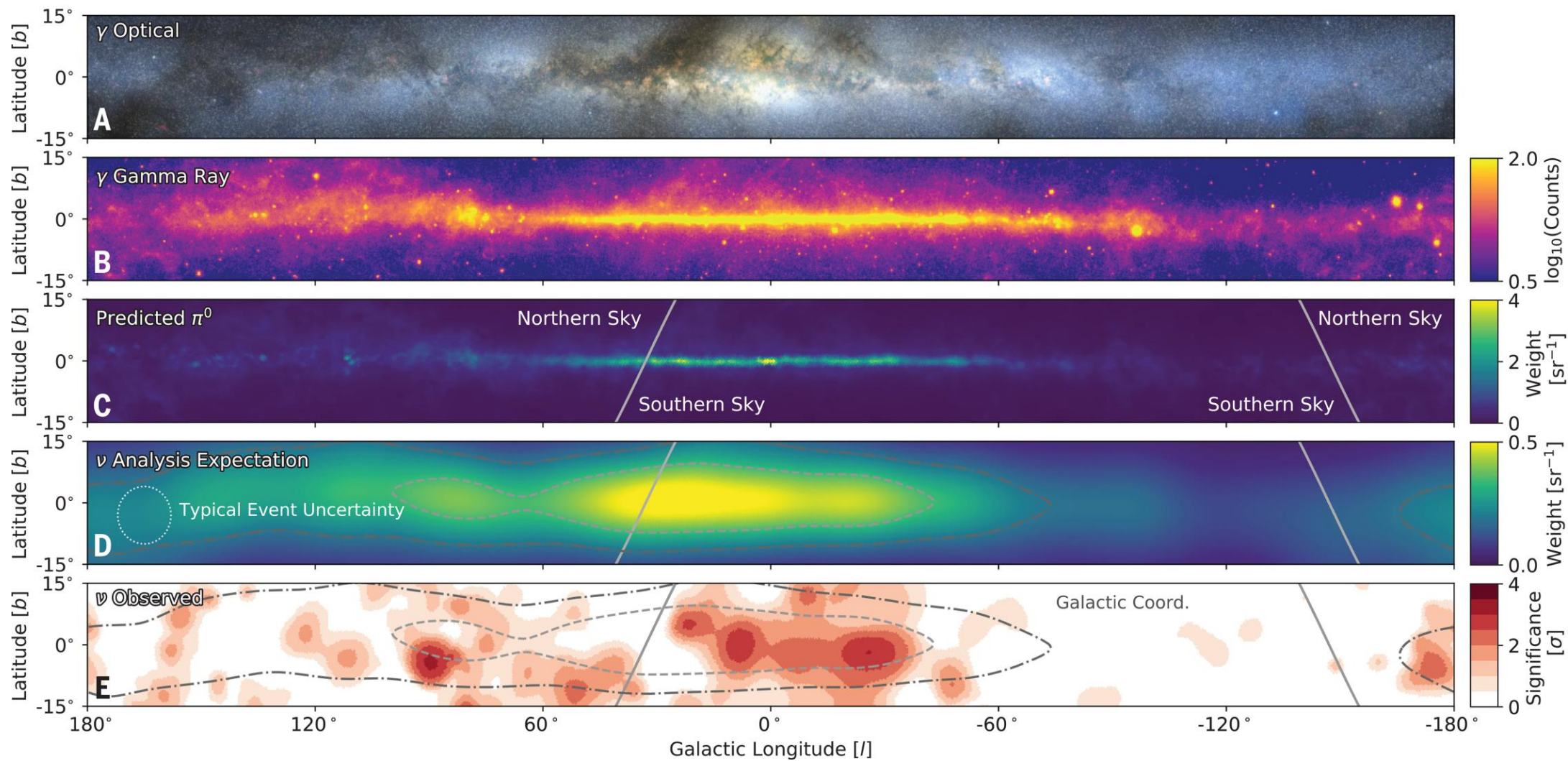




NGC 1068 和 TXS 0506+056 代表了两大类不同的中微子源，只贡献了不到1%的中微子事件。

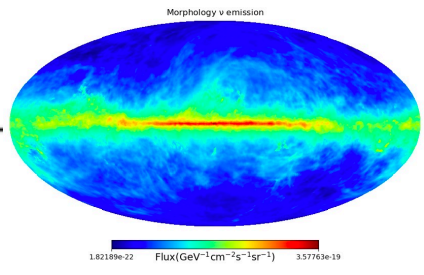
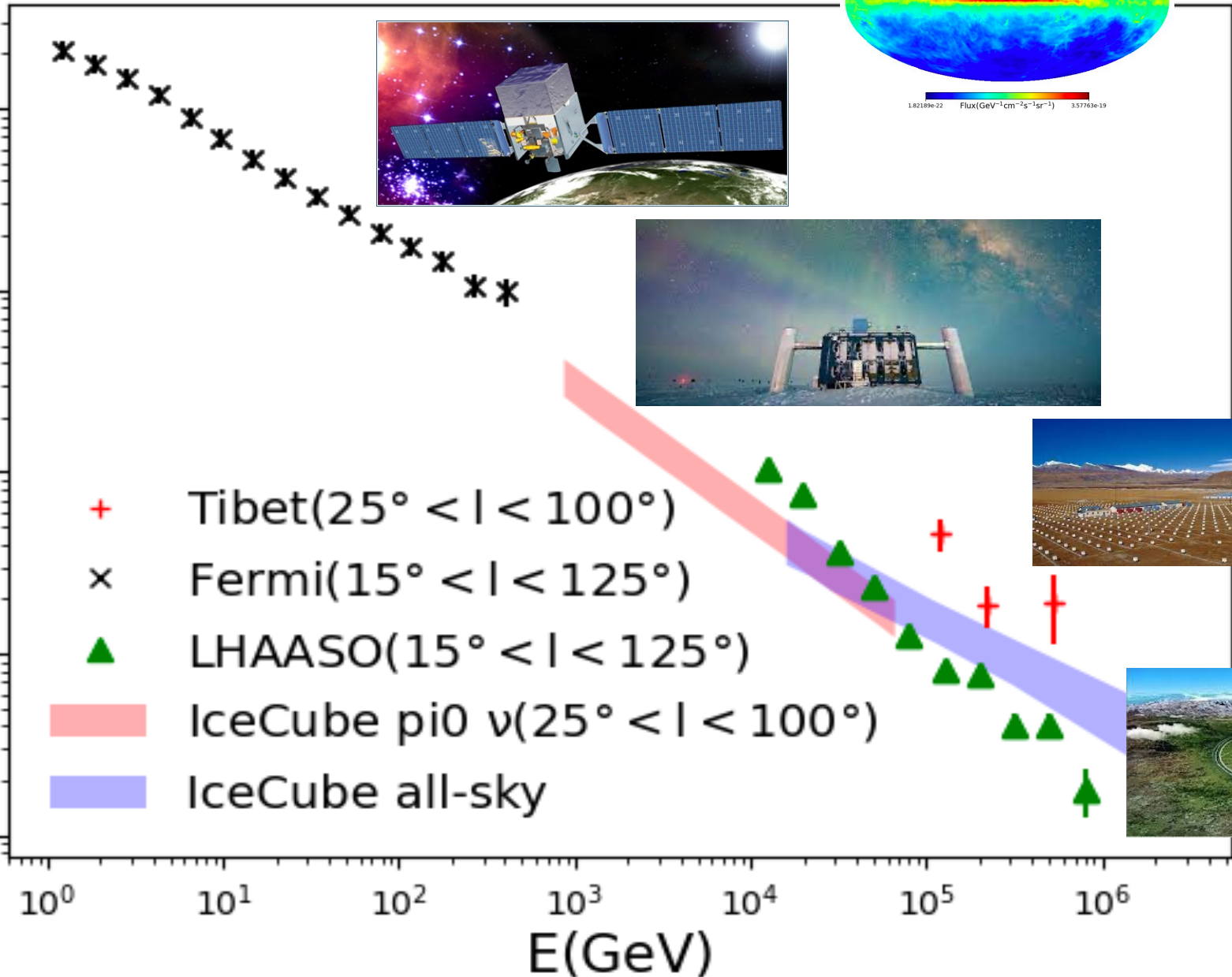
中微子的起源可能来自于更多其他较弱的源

银盘的中微子超出



首次对银盘的中微子观测： 4.5σ

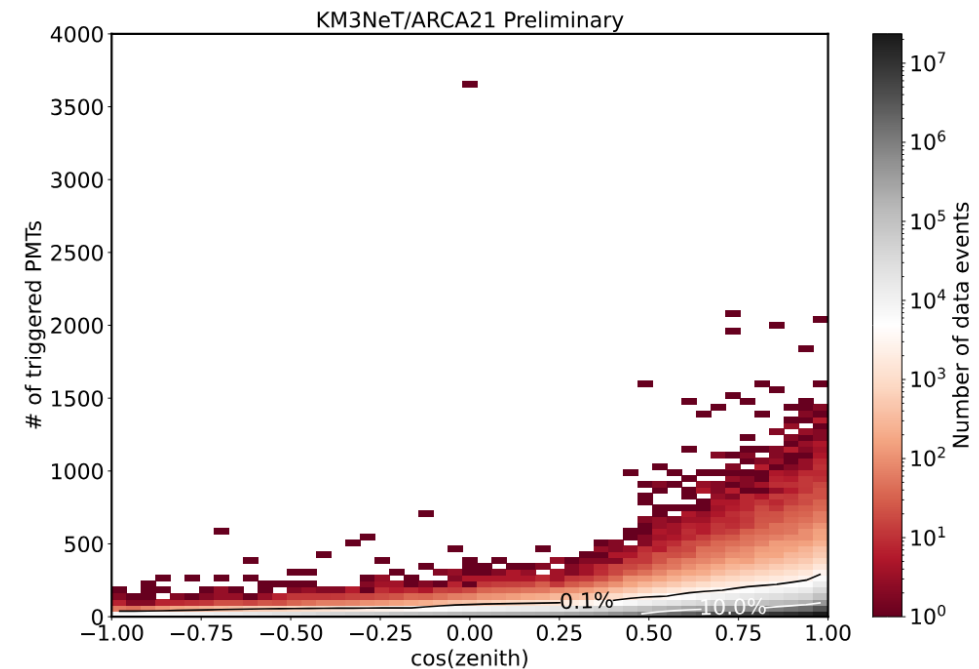
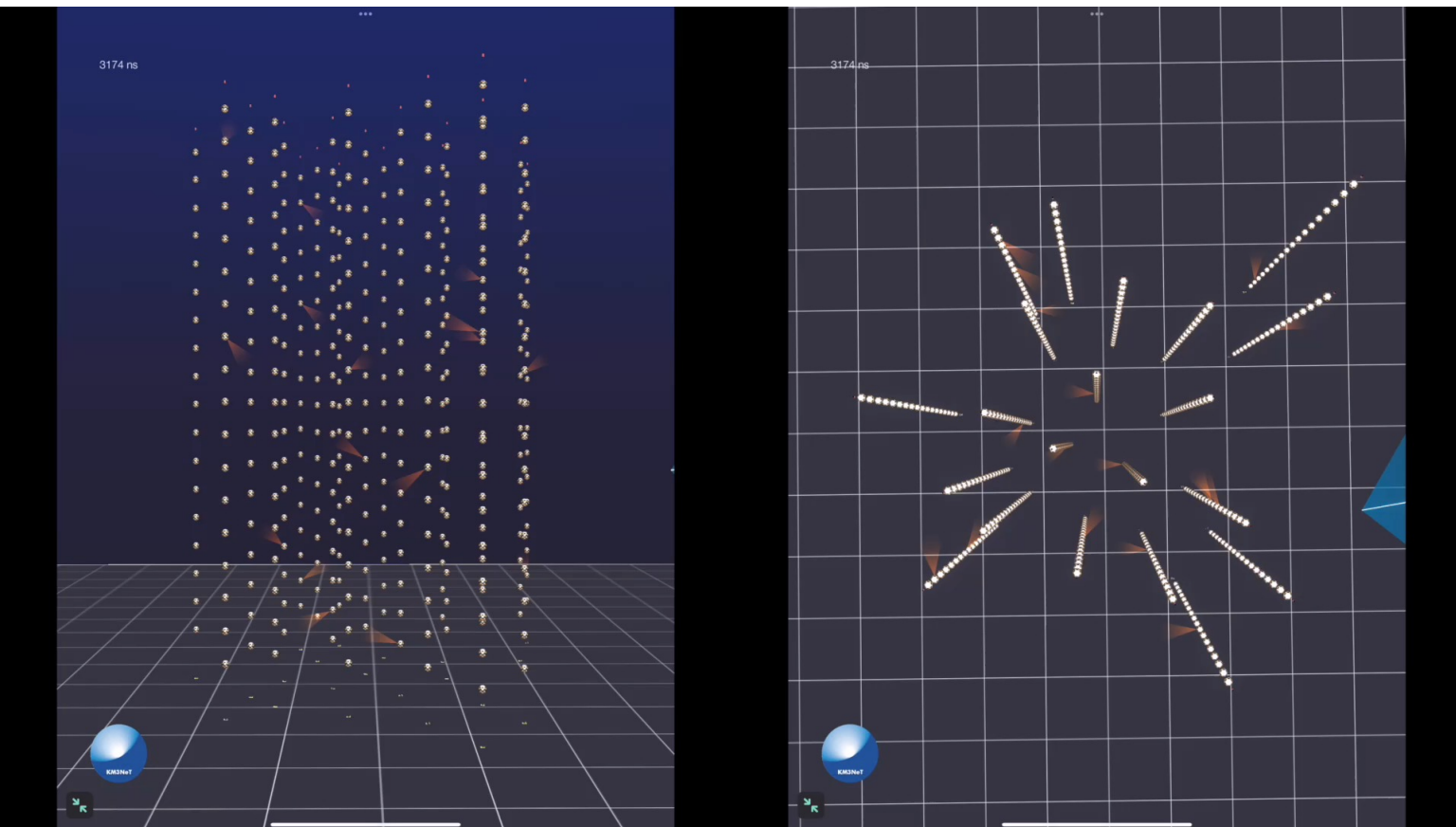
$E^2 dN/dE(\text{GeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1})$



银河系内的天体源只贡献了10%左右的中微子



KM3NeT观测到了当前最高能量的中微子事件



水平事件 (1度)
3672个PMT (35%) 被触发
对应几十个PeV缪子中微子

展望：

1. 高能中微子探测方式已经被验证可行
2. 多个中微子候选体已经被发现，给予了指导作用
3. 为了提高统计量，从而确认中微子起源，下一代的中微子探测器被提出来，并且在积极筹划中
4. 结合多信使观测，将能够对天体现象的性质进行限制
5. 随着实验项目的增多，观测策略也得到了完善