

未来 τ 中微子望远镜的新物理前景

黄国远 (Guo-yuan Huang)

基于 [JCAP02\(2022\)038](#), [arXiv:2204.10347](#), GYH, S. Jana, M. Lindner and W. Rodejohann; [arXiv:2207.02222](#), GYH



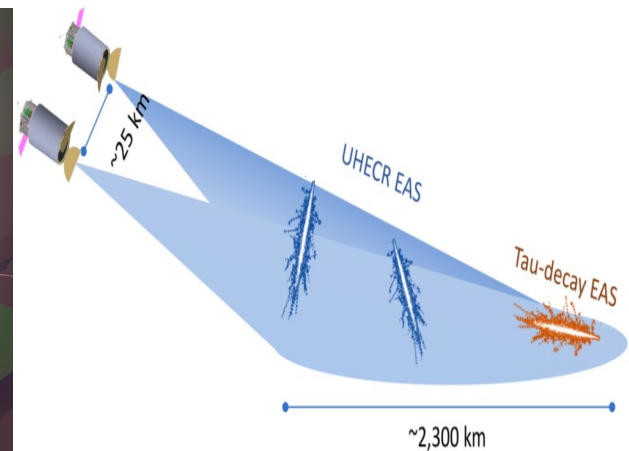
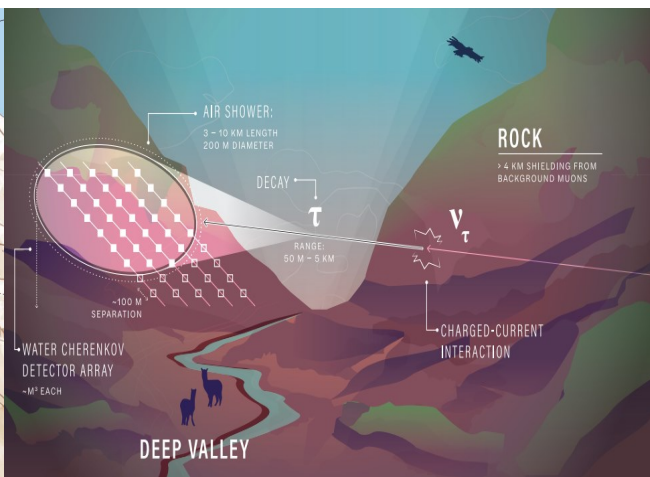
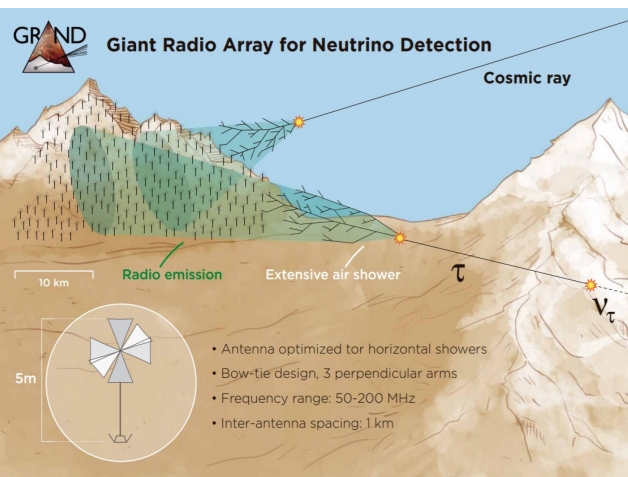
Unterstützt von / Supported by



Alexander von Humboldt
Stiftung / Foundation

要点

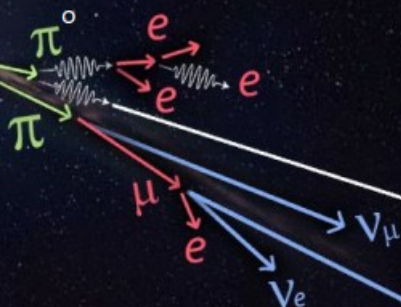
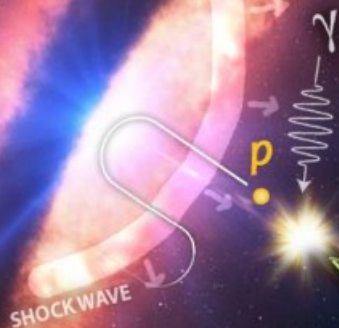
- GZK 中微子的产生
- 未来的实验提案
- 新物理前景
- 灵敏度
- 其他可能性



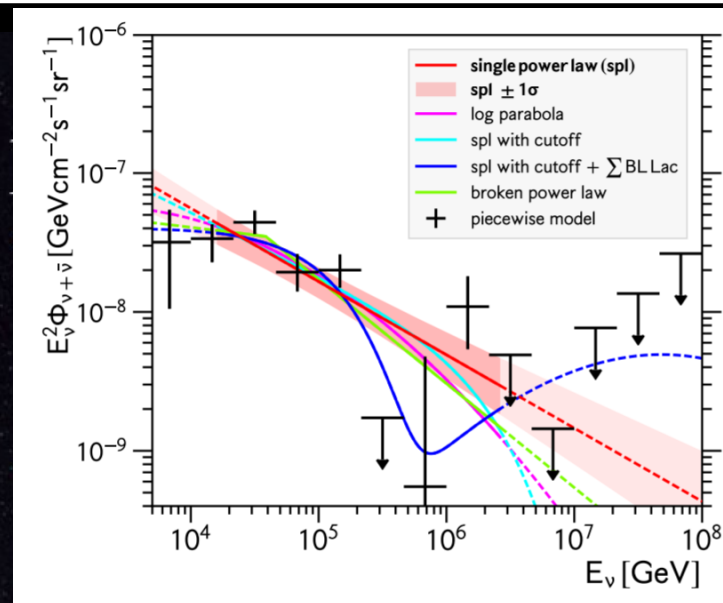
超高能中微子产生

IceCube, PRL 125 (2020) 121104

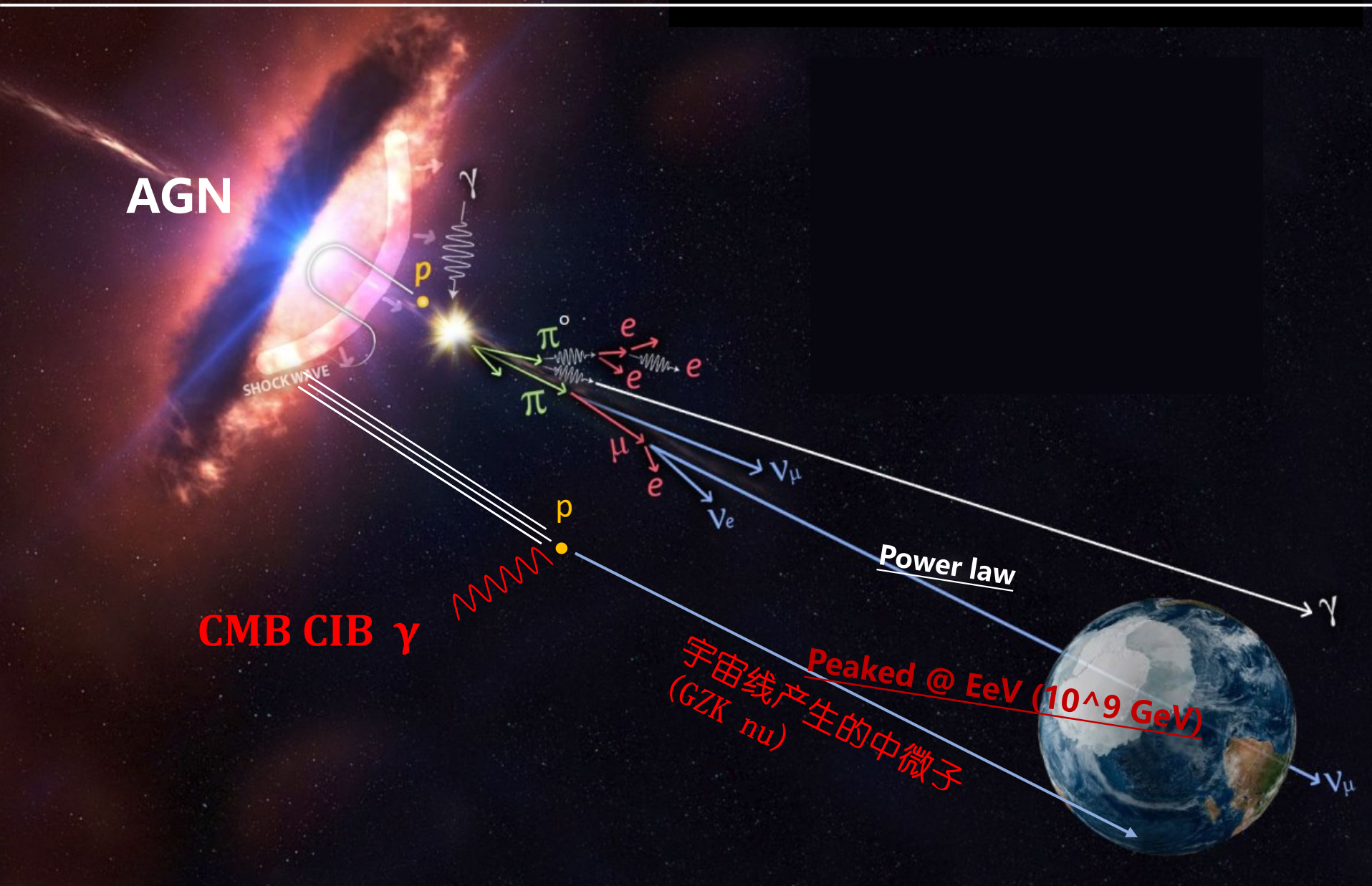
AGN

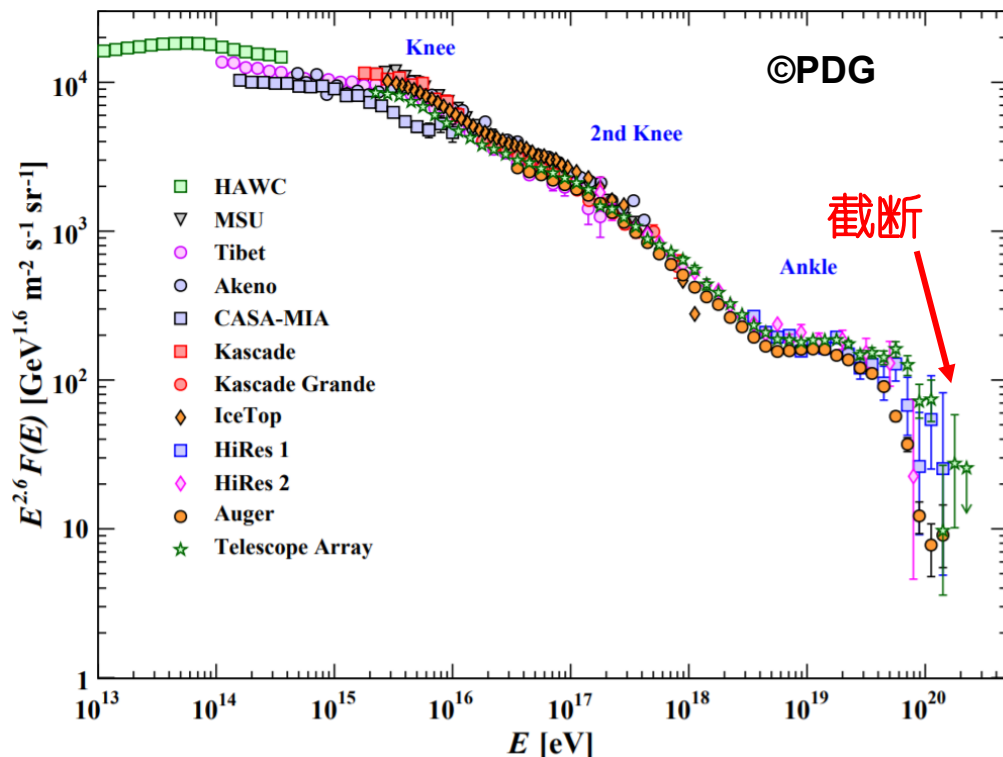


Not charged Power law



自2011年完全建成之后, IceCube 探测阵列已经公布了接近100个超高能中微子事例 (100 TeV–10 PeV), 具备很清晰的天文起源特征.





*宇宙线一般认为是从极端的天体环境中产生，根据 Fermi 加速机制，能量大致满足幂指数分布。

E. Fermi, Phys. Rev. 75 (1949) 1169

*实验观测在宇宙线能谱中存在一个截断，这个截断由 Greisen、Zatsepin 和 Kuzmin 预言。

K. Greisen, PRL 16 (1966) 748,

G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, JETPL 4 (1966) 78

宇宙线和微波背景碰撞产生 GZK 中微子

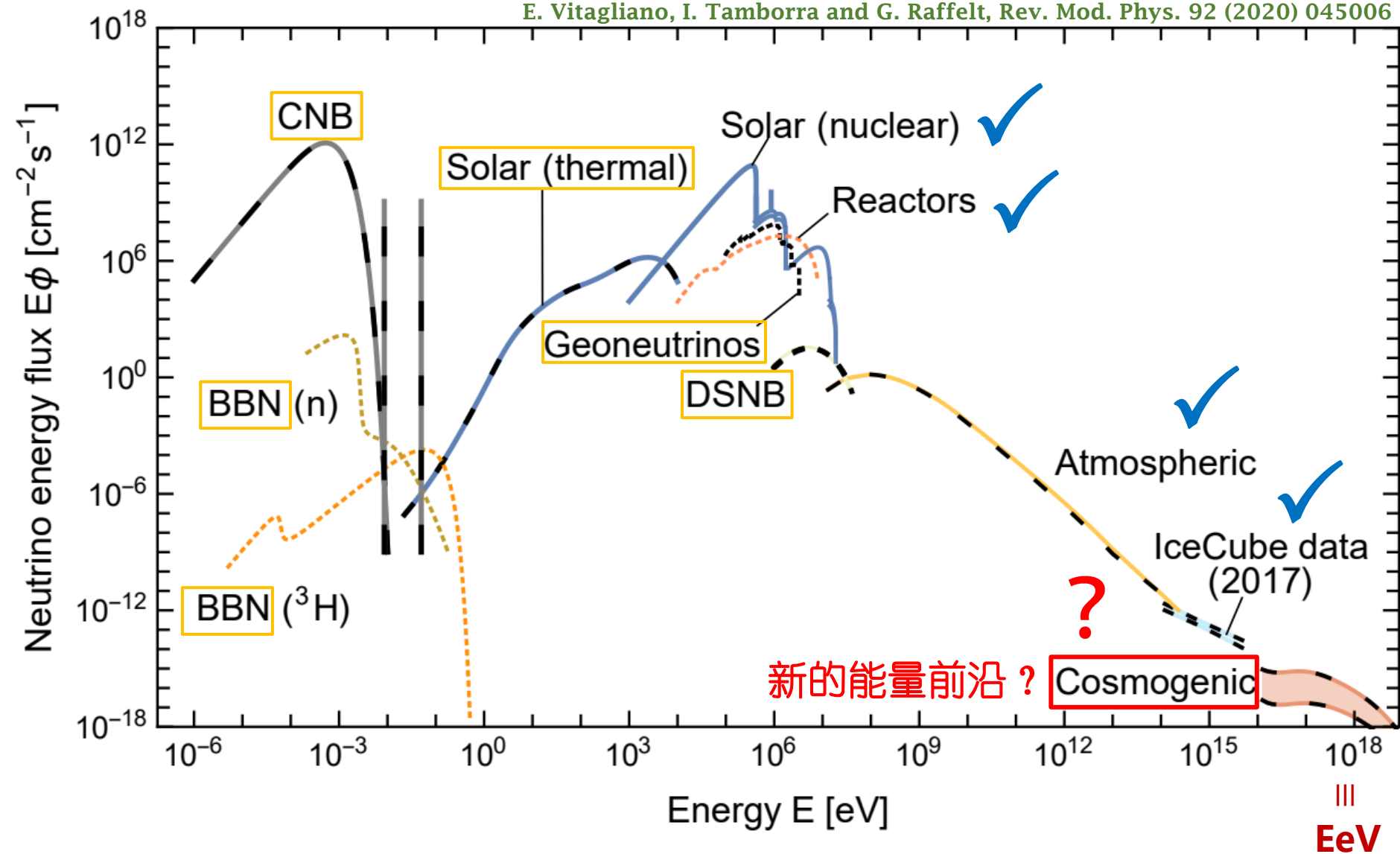
- $p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow p \text{ (or } n) + n\pi$ **Very efficient for $E_p \gtrsim 50 \text{ EeV}$** $(p_p + p_\gamma)^2 > (M_n + M_\pi)^2$
- $p + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \Delta^+(1232) \rightarrow p + \pi^0 \text{ (or } n + \pi^+)$
- $\pi \rightarrow \nu + \dots$ $E_\nu \approx \mathcal{O}(1 \text{ EeV})$

此过程质心系能量只有 1 GeV，因此这里的截面计算非常标准。

CR+CMB (CIB) = 非常有保障的 EeV 中微子源

V. S. Berezinsky, G. T. Zatsepin, PLB 28 (1969) 423

E. Vitagliano, I. Tamborra and G. Raffelt, Rev. Mod. Phys. 92 (2020) 045006



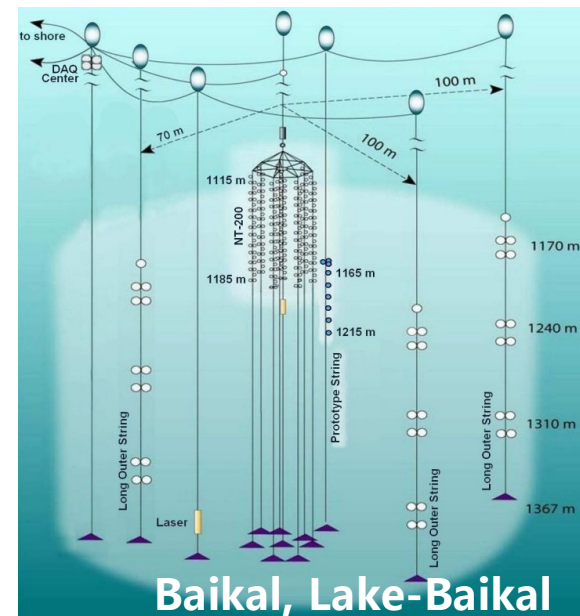
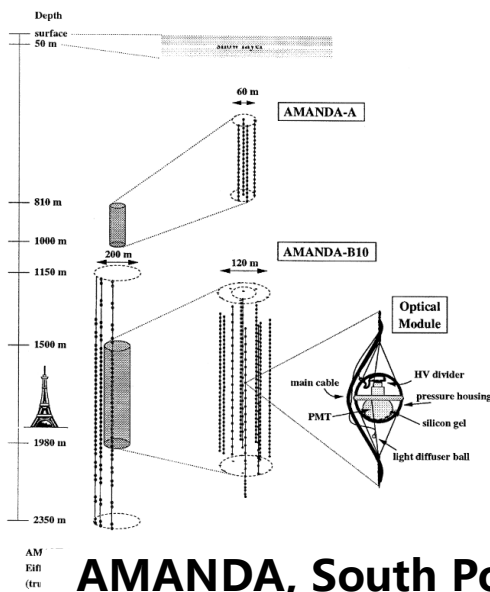
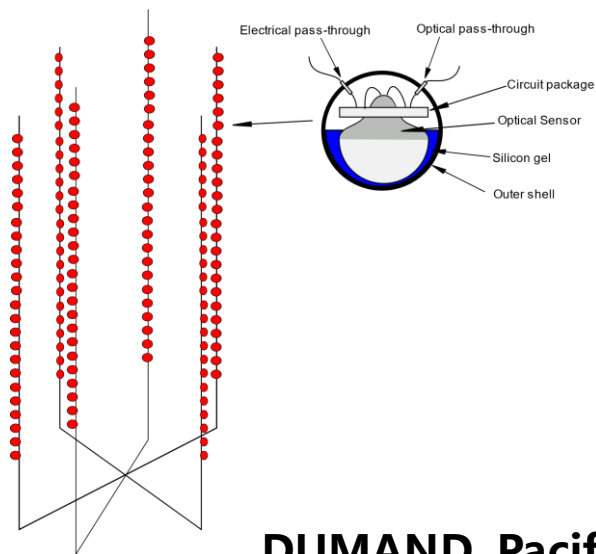
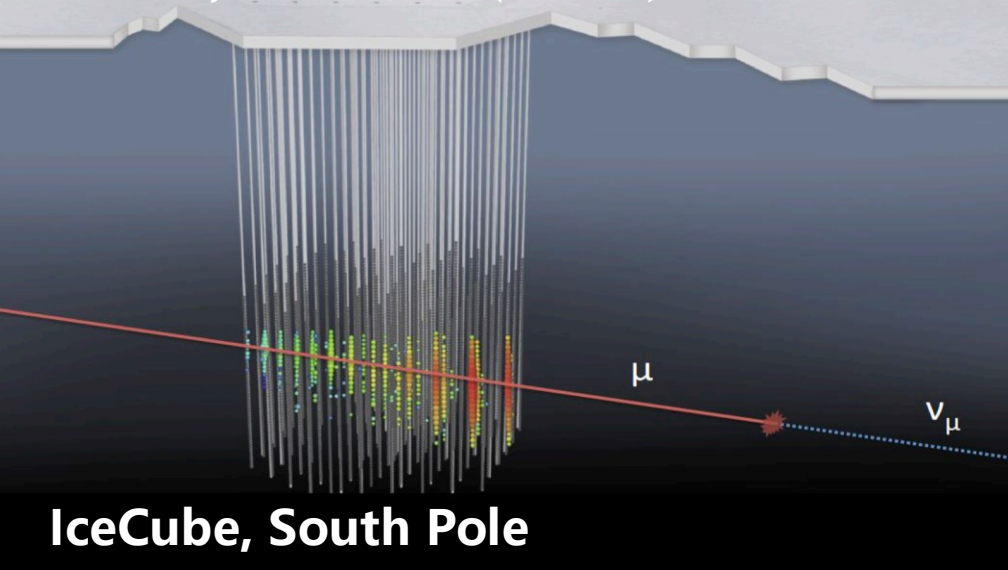
TeV 到 PeV 超高能中微子实验

5

冰基或水基的 **Cherenkov**
Markov, ICHEP 60 (1960) 578

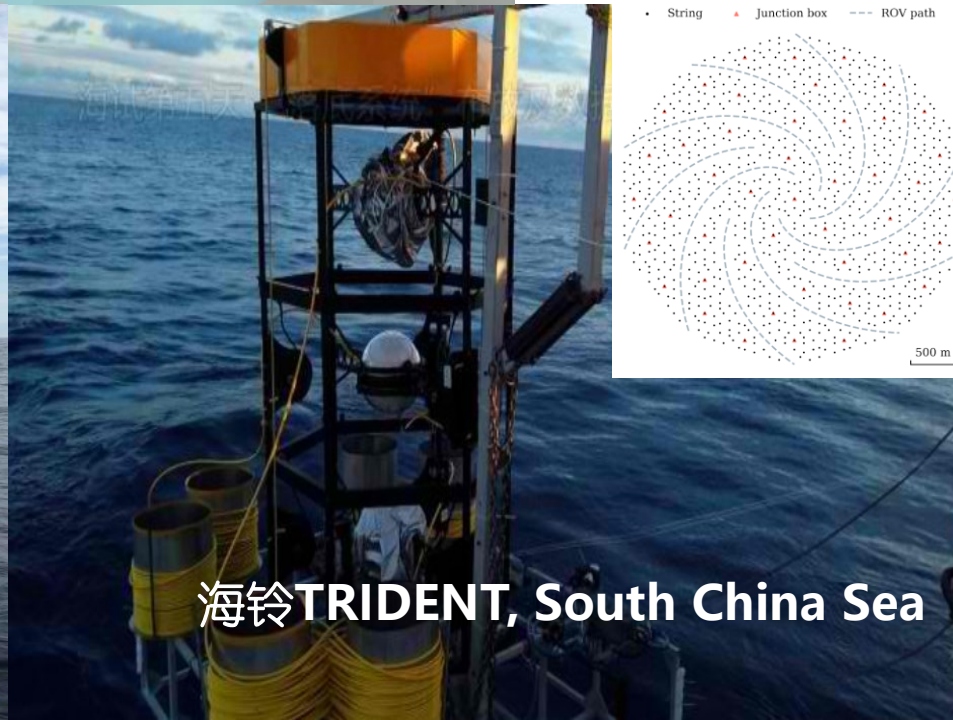
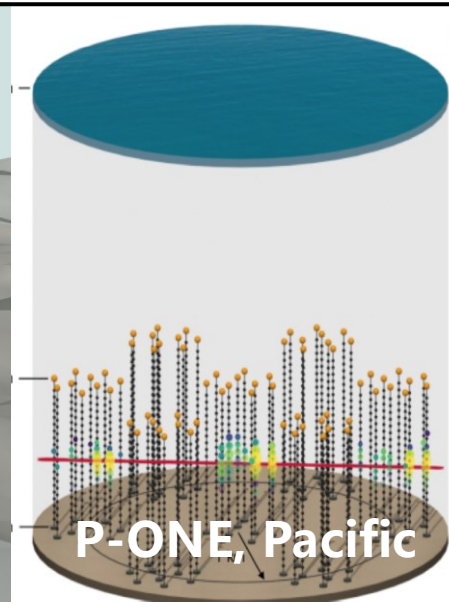
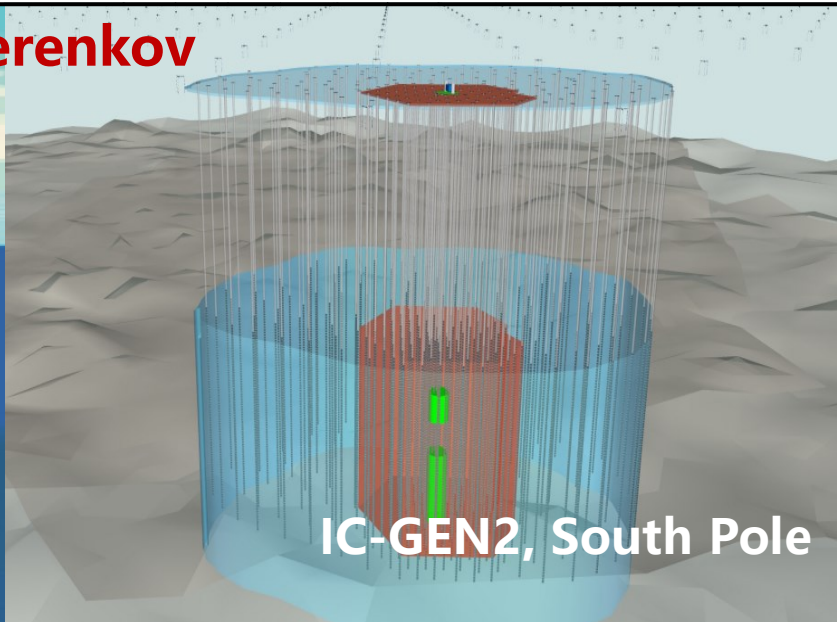
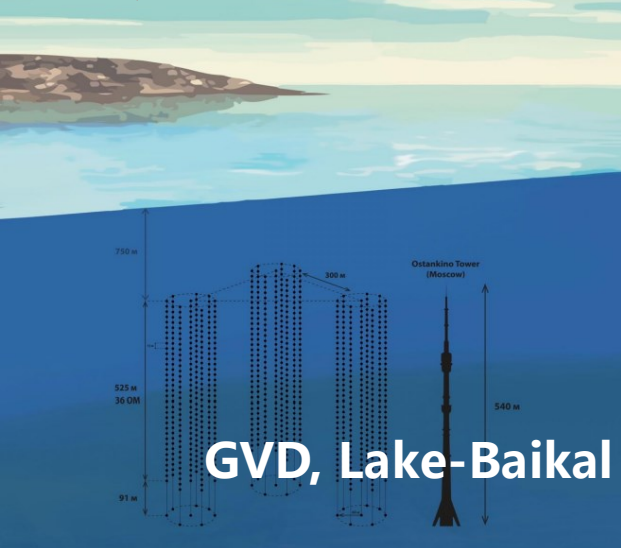
目前来说最为成功

+声学

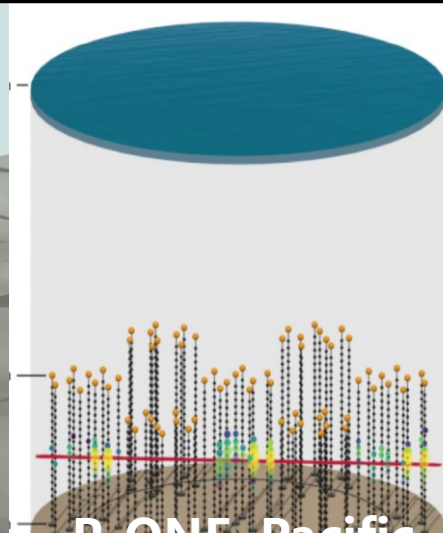
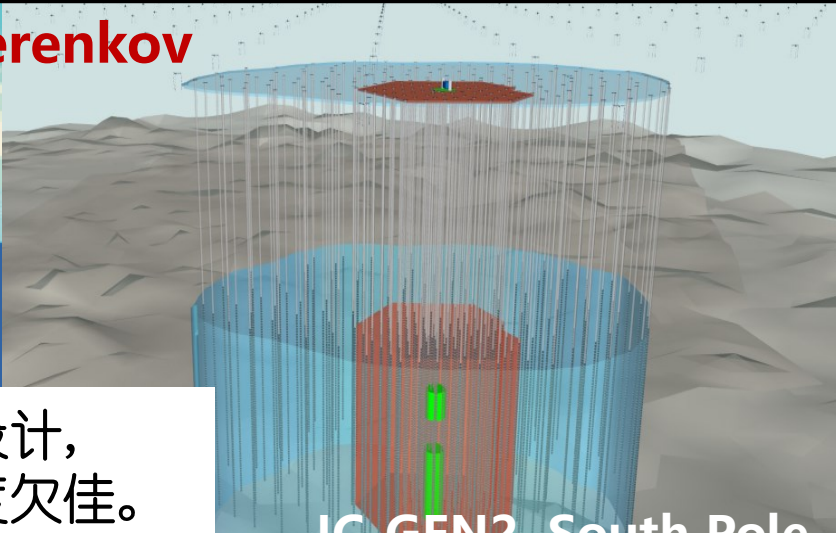
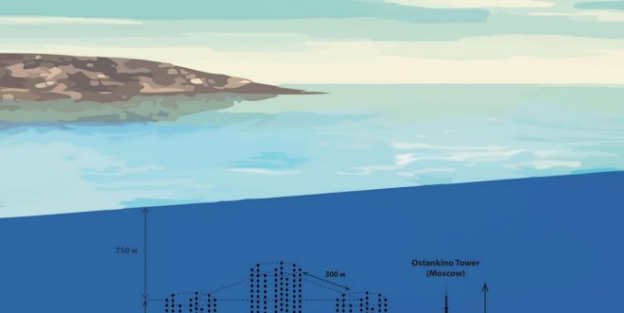


TeV 到 PeV 超高能中微子实验

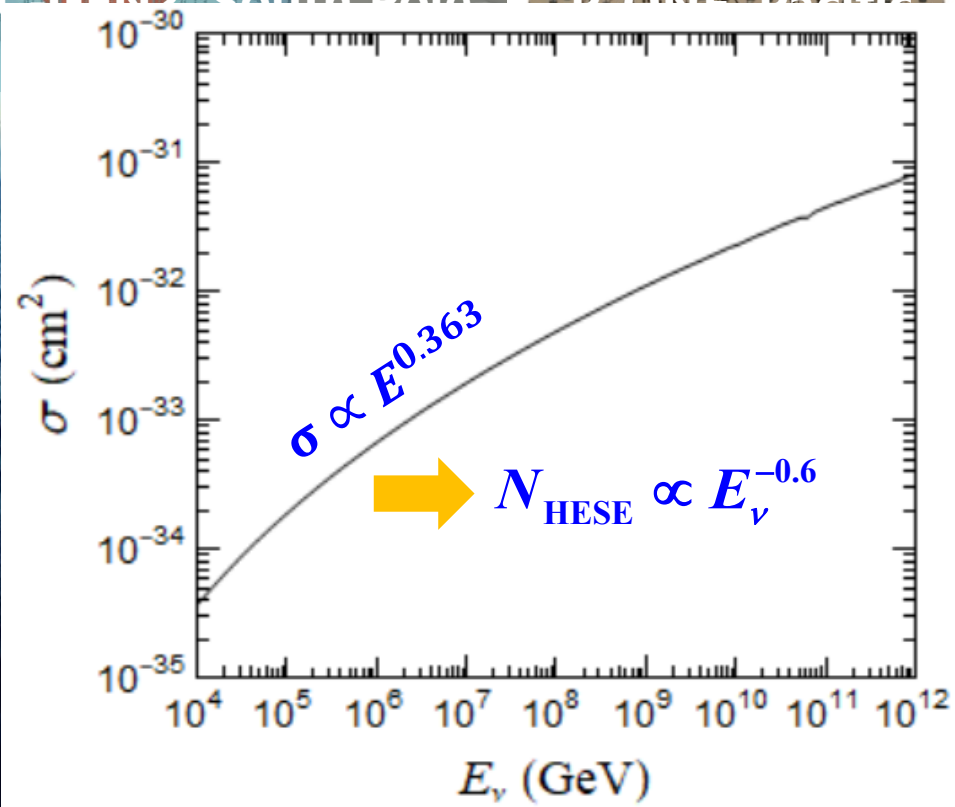
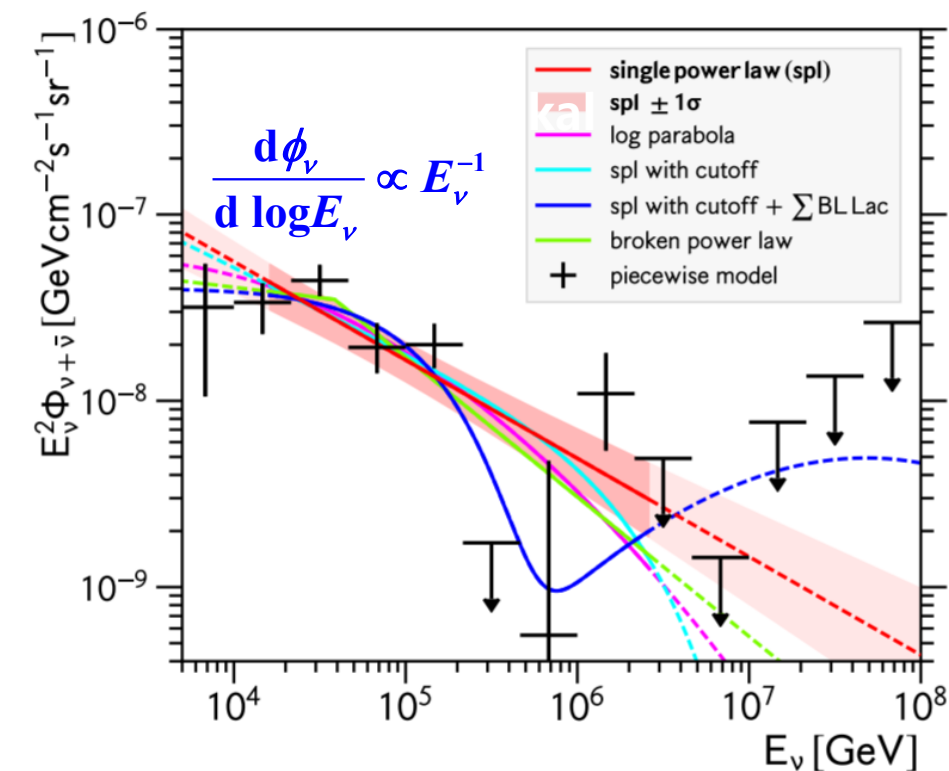
下一代冰基和水基的 Cherenkov



下一代冰基和水基的 Cherenkov



为 TeV-PeV 的中微子而设计，
对于 EeV 中微子的灵敏度欠佳。

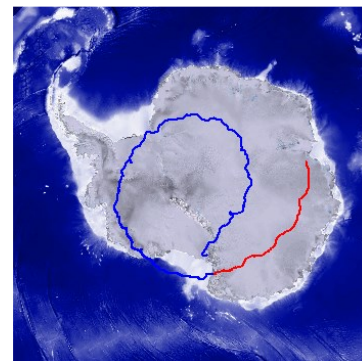
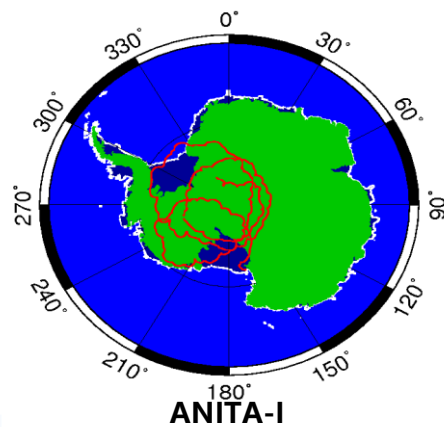
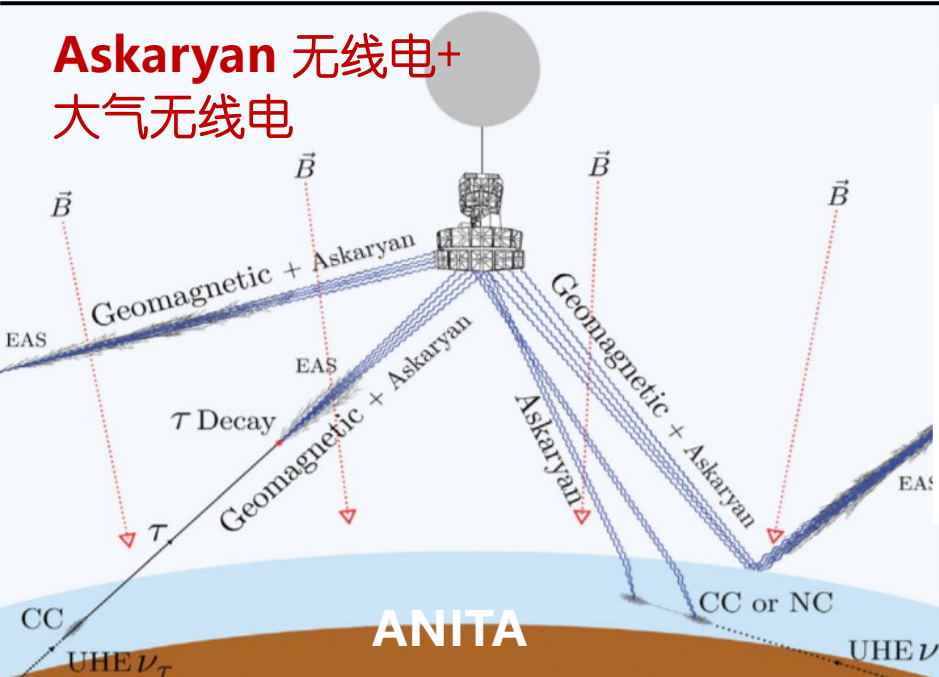


Technique	Approx. time of proposal or detection
冰基或水基的 Cherenkov	Markov, ICHEP 60 (1960) 578
声学	Askaryan, Sov. JAE 3 (1957) 921
荧光	Greisen et. al., e.g. Proc. 9thICCR (1965) 609
簇射粒子直接探测	Linsley et. al., PRL 6 (1961) 485
大气 Cherenkov	Galbraith and Jelley, Nature 171 (1953) 349
Askaryan 效应	Askaryan, Sov.Phys.JETP 14 (1962) 441
大气射电探测	Jelley, Il Nuovo Cimento 8 (1958) 578
雷达回波	Blackett and Lovell, Proc. Roy. Soc., 177 (1941) 183



EeV已有的实验和提案

**Askaryan 无线电+
大气无线电**

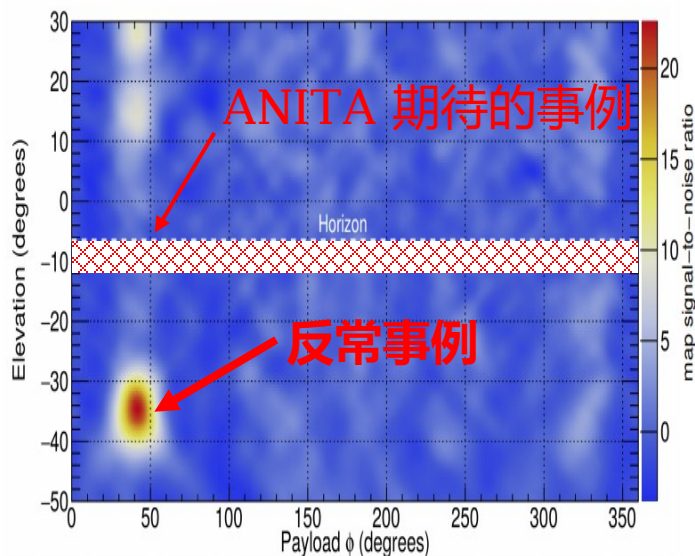


ANITA-III

关于新物理解释有大概
40+ 文章



Ev. 15717147, Horizontal Polarization



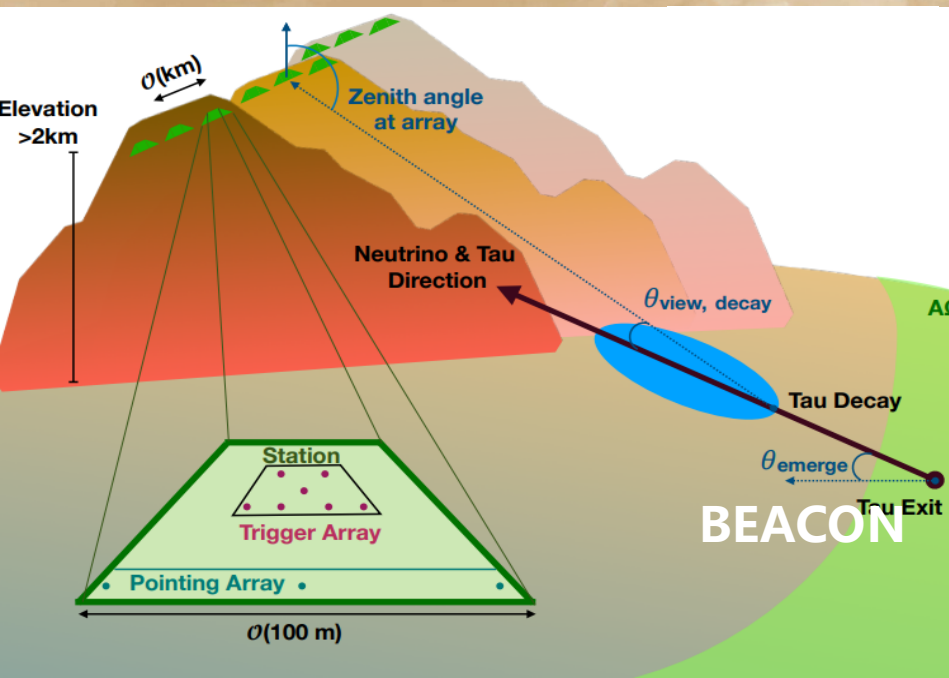
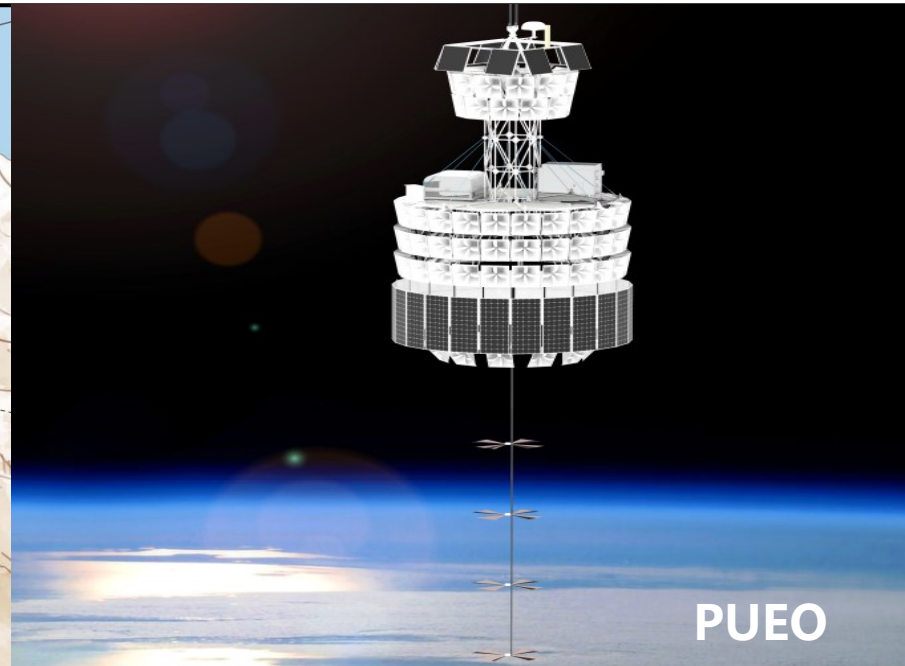
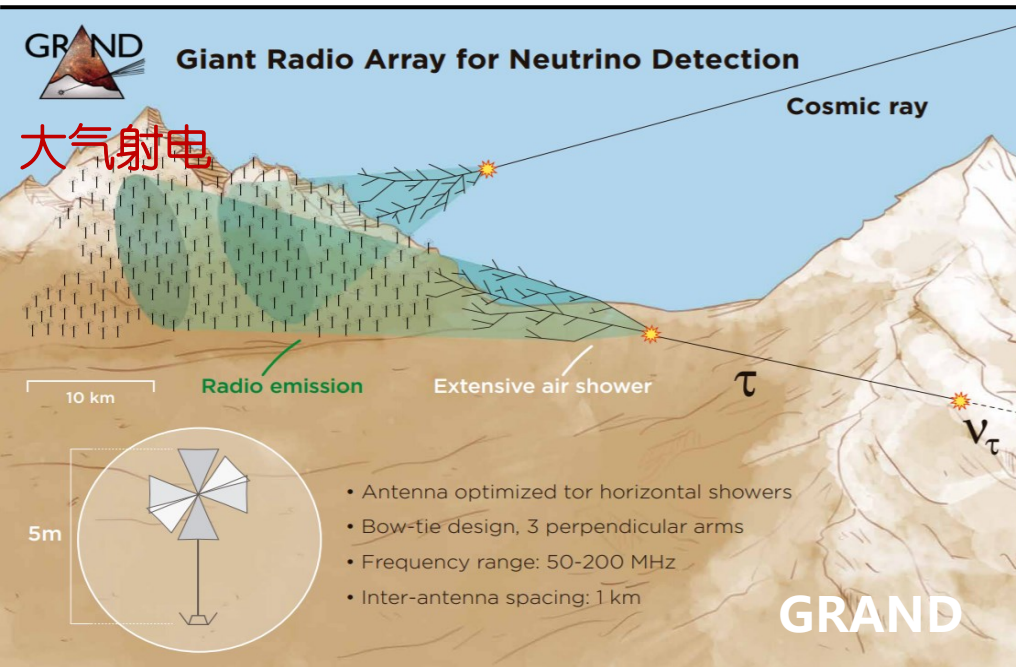
新物理解释跟已有的
ANITA-IV 结果不太一
致

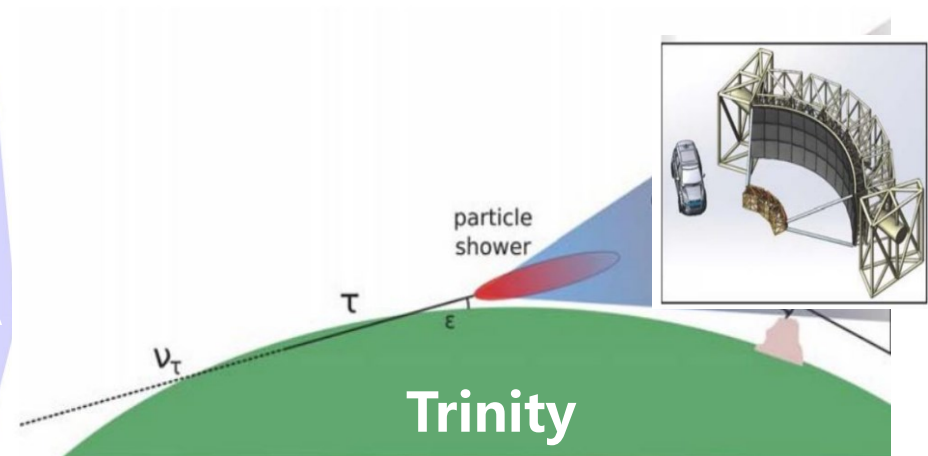
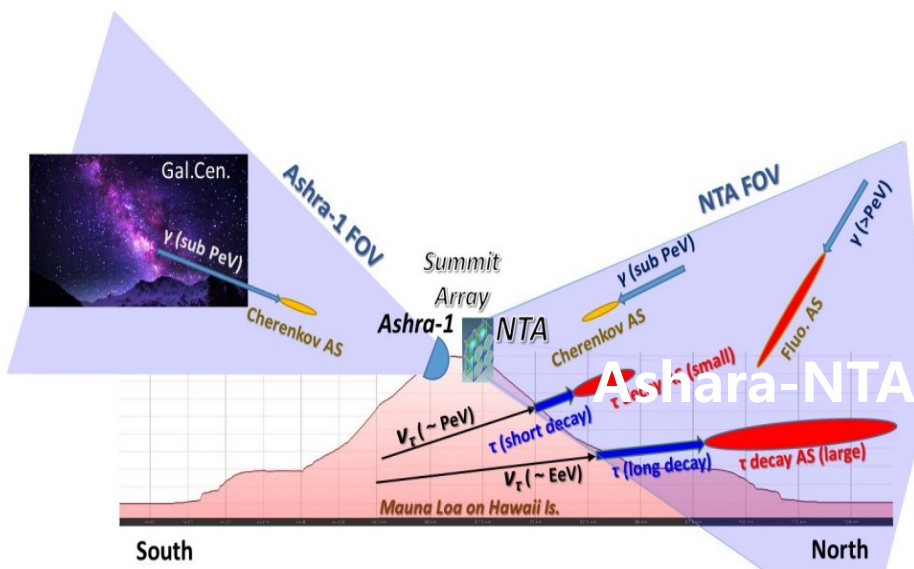
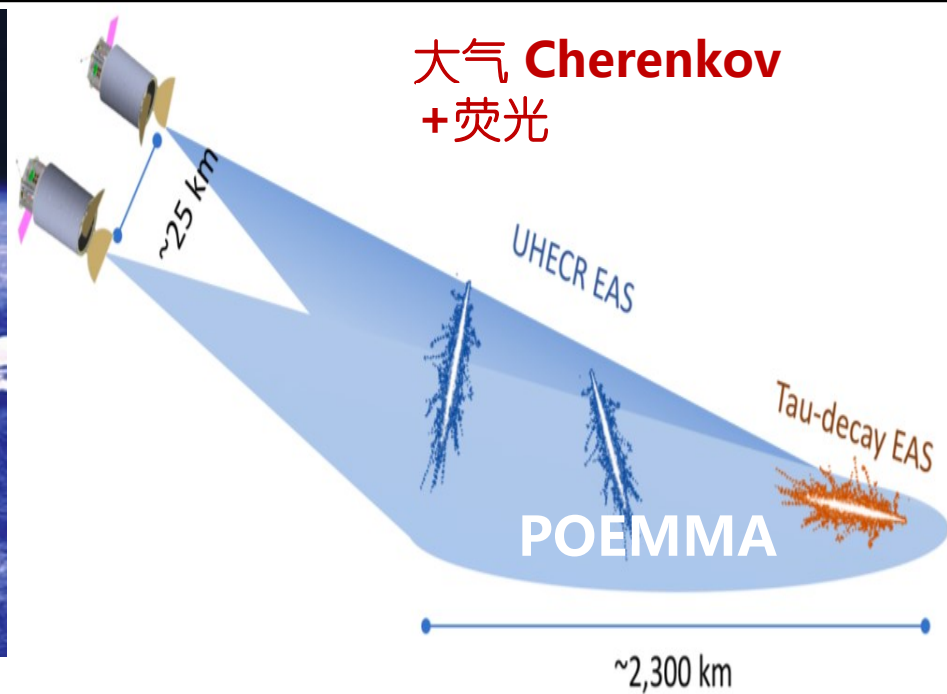
ANITA, PRL 126 (2021) 071103
ANITA, PRD 105 (2022) 042001

其他未考虑的实验因素,
比如 subsurface?

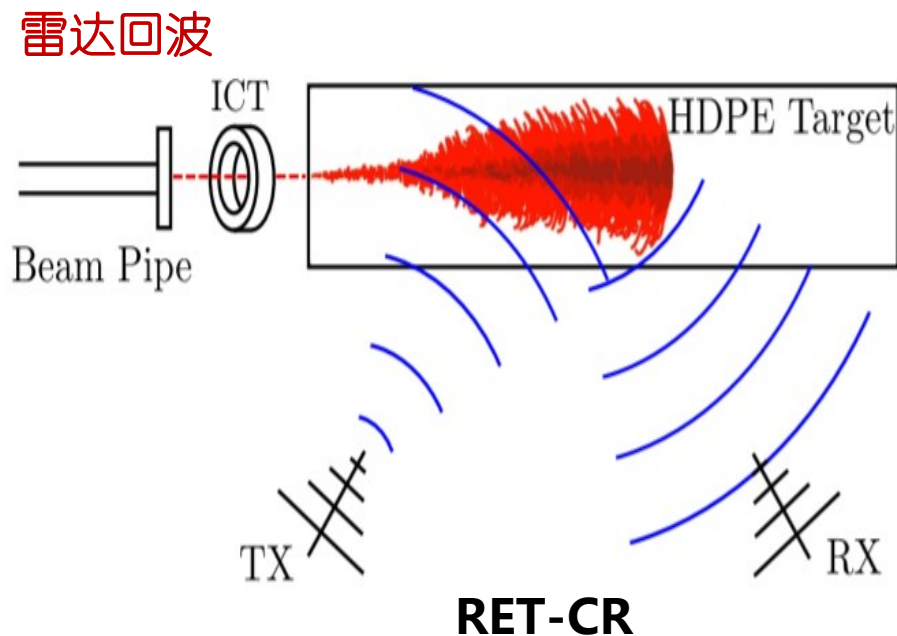
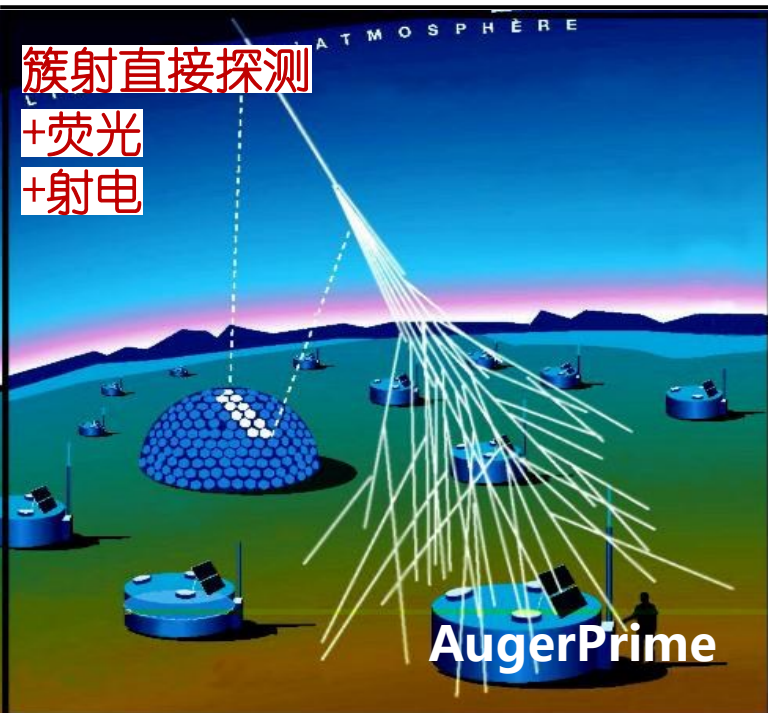
I. Shoemaker et al, 1905.02846
D. Smith et al., 2009.13010

GeV已有的实验和提案





EeV已有的实验和提案



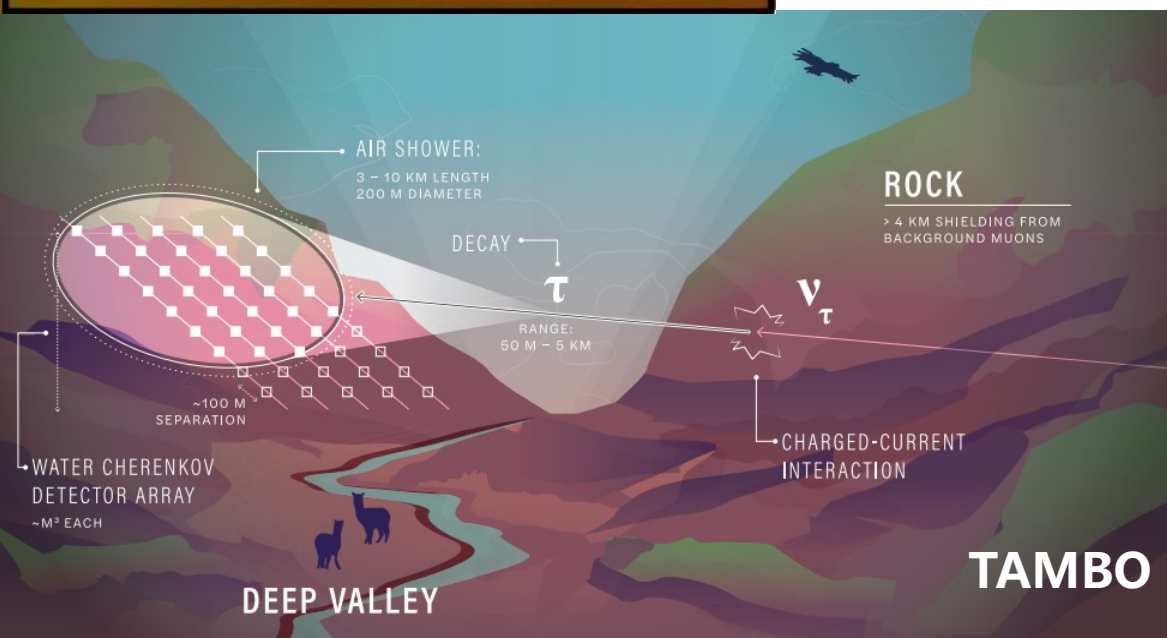
更多方案

● Transition radiation

Ginzburg and Frank, J. Phys. 9 (1945) 353
Motloch et al., PRD 93 (2016) 043010

● Radio emission from sudden death of shower

Revenu and Marin, ICRC2013, 0398

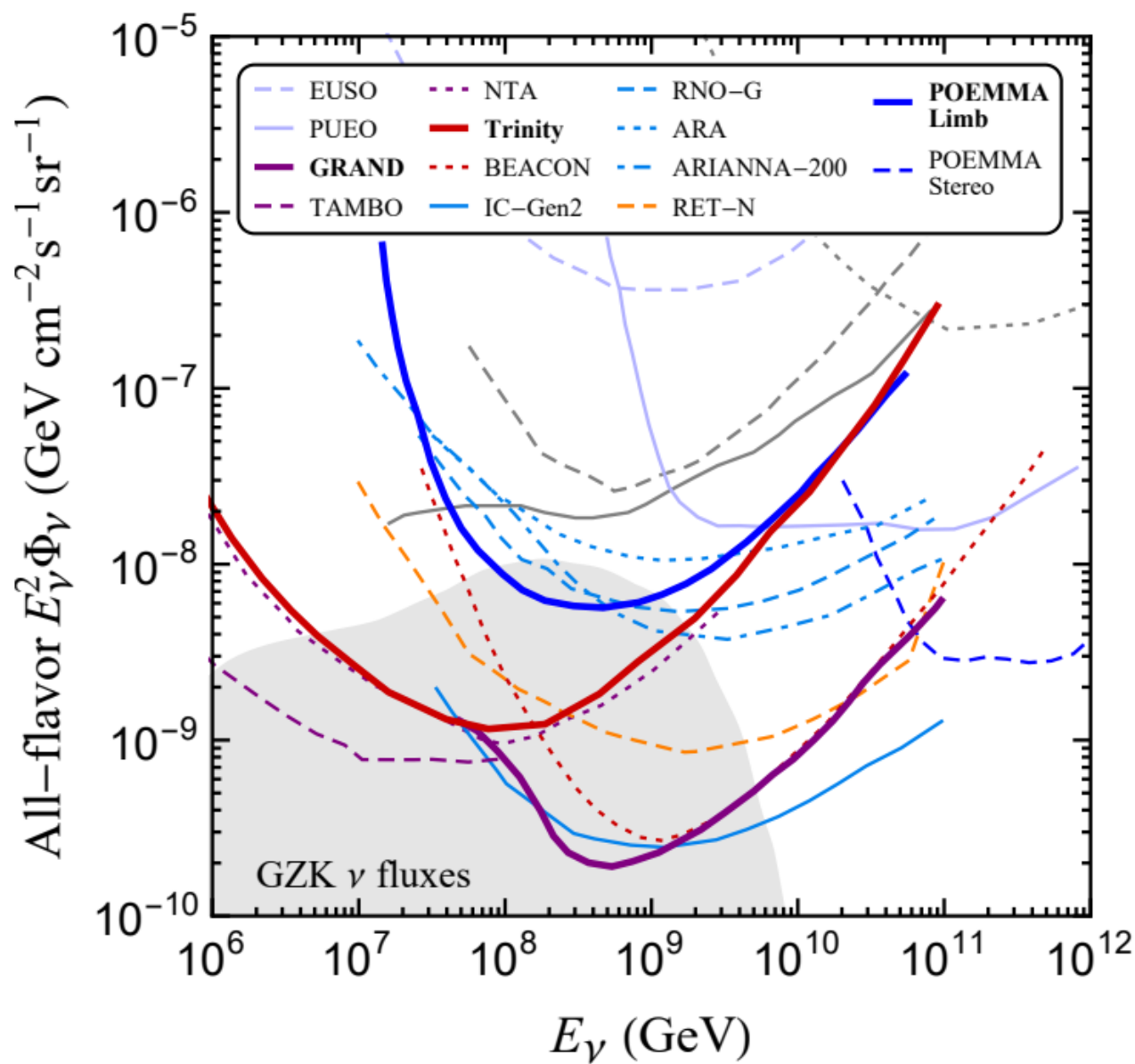


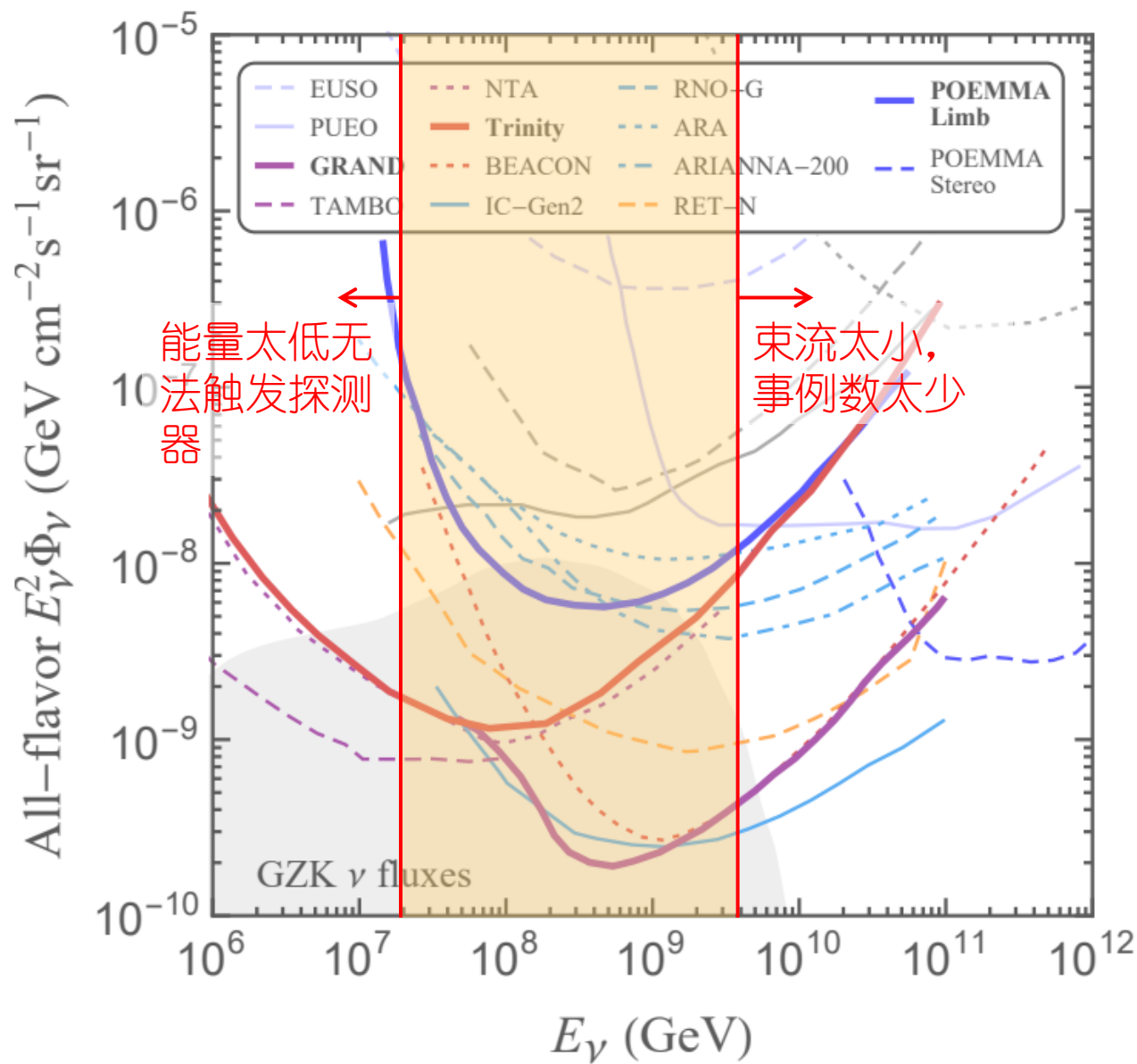
EeV已有的实验和提案

Telescope	Geography	Technique	Energy	ν flavor	$E_\nu^2\Phi_\nu$	Assumed time
EUSO-SPB2 [134–136]	Balloon	Atm-Cher, Fluo	> 10 EeV	ν_τ	2.1×10^{-7}	100 d
PUEO [137, 138]	Balloon	Atm-radio, Aska	> 0.4 EeV	$\nu_\tau, \nu_{e,\mu,\tau}$	6.3×10^{-9}	100 d
POEMMA-Limb [109]	Satellite	Atm-Cher	> 10 PeV	ν_τ	3.2×10^{-9}	5 yr
POEMMA-Stereo [109]	Satellite	Fluo	> 20 EeV	ν_τ	1.6×10^{-9}	5 yr
GRAND [103, 104]	Mtn-val	Atm-radio	> 50 PeV	ν_τ	1.3×10^{-10}	10 yr
TAMBO [139]	Mtn-val	Atm-Cher	> 3 PeV	ν_τ	4.6×10^{-10}	10 yr
Ashra-NTA [140]	Mtn-val	Atm-Cher, Fluo	> 1 PeV	ν_τ	5.5×10^{-10}	10 yr
Trinity [105–108]	Mtn-top	Atm-Cher	> 1 PeV	ν_τ	5.9×10^{-10}	10 yr
BEACON [141, 142]	Mtn-top	Atm-radio	> 10 PeV	ν_τ	1.9×10^{-10}	10 yr
IC-Gen2 Radio [143, 144]	In-ice	Aska	> 30 PeV	$\nu_{e,\mu,\tau}$	1.2×10^{-10}	10 yr
RNO-G [145, 146]	In-ice	Aska	> 30 PeV	$\nu_{e,\mu,\tau}$	2.4×10^{-9}	10 yr
ARA [147]	In-ice	Aska	> 30 PeV	$\nu_{e,\mu,\tau}$	4.3×10^{-9}	by 2022
ARIANNA-200 [148]	In-ice	Aska	> 10 PeV	$\nu_{e,\mu,\tau}$	1.8×10^{-9}	10 yr
RET-N [149–151]	In-ice	Radar echo	> 8 PeV	$\nu_{e,\mu,\tau}$	4.0×10^{-10}	5 yr

这里只列出了对 EeV 中微子敏感的实验

Askaryan 效应和雷达回波可以用来探测所有味道的中微子。
其他的手段基本上只对 τ 中微子敏感，这是因为 τ 在 EeV 时的衰变长度大概是 50 km。
而 e 在产生后立即发生电磁簇射， μ 的衰变长度过长。

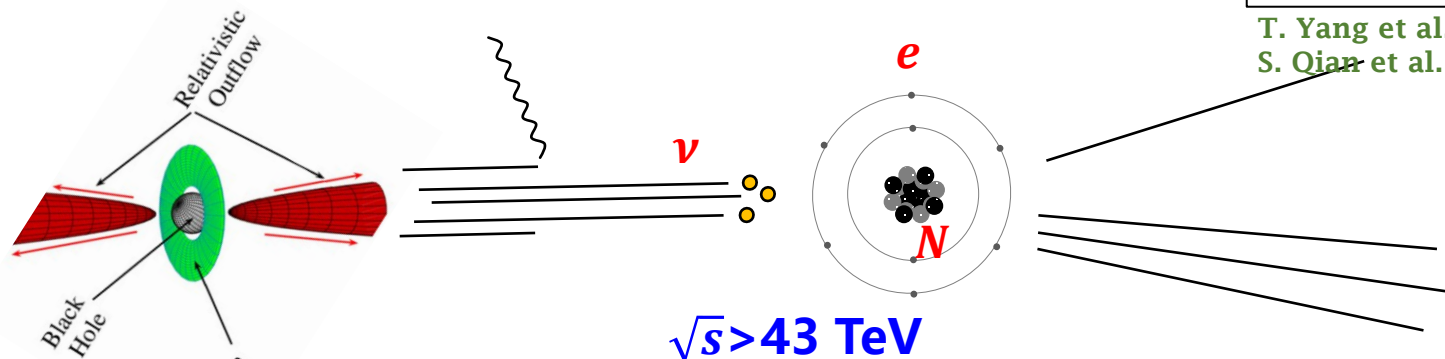


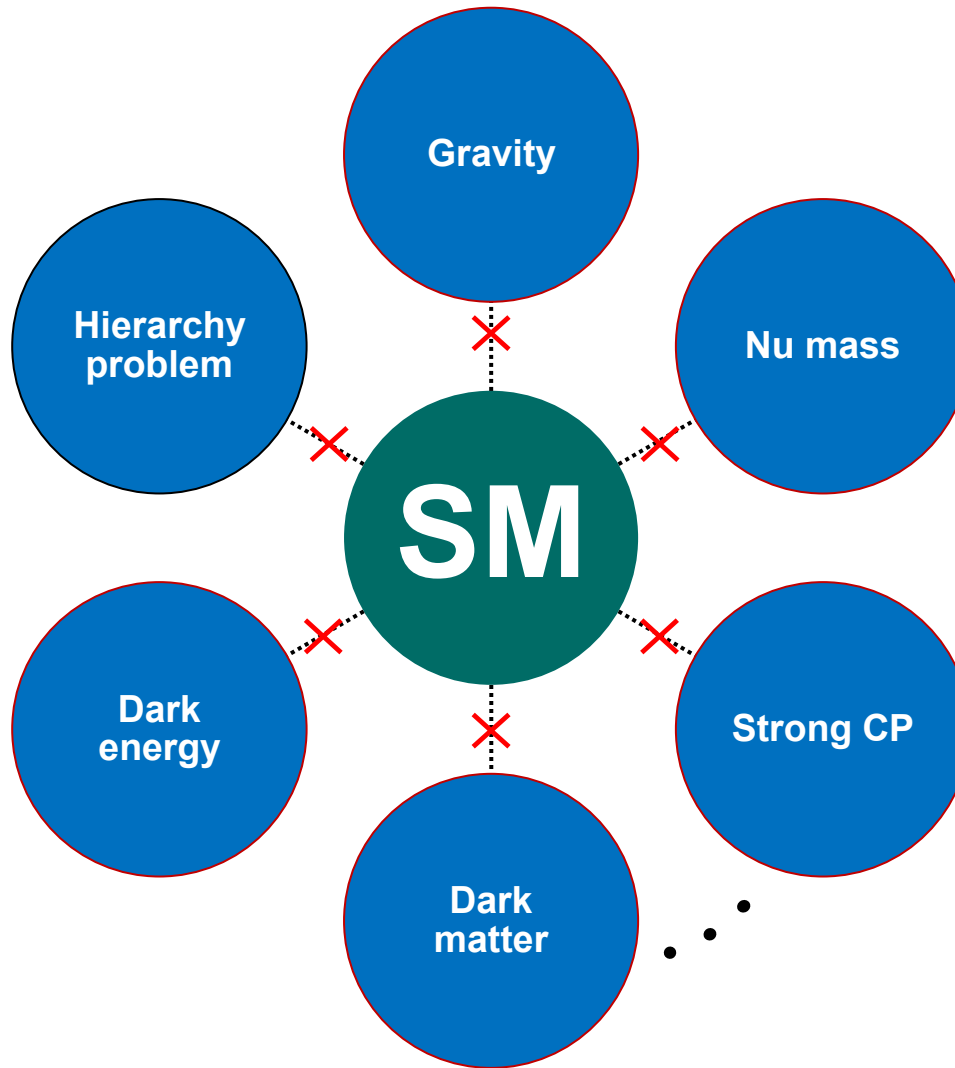


- GZK 中微子的探测对于多信使天文学很重要。
 - ✓ 提升我们对于宇宙线加速机制的理解
 - ✓ 宇宙线的组分
 - ✓ 宇宙再电离的历史
- GZK 中微子望远镜可以看作是一个粒子对撞机。我们有免费的超高能中微子束流和地球物质进行对撞，在宇宙线本底之上有着非常干净的信号。
 - ✓ 对于 ν - N 对撞，质心系能量可以高达约 43 TeV。
 - ✓ LHC 有类似的 ν - N 碰撞过程，比如 FASER ν 只有 43 GeV。
 - ✓ 很适合用来研究更小尺度的中微子相关新物理。

电子-中微子对撞机？
中微子-中微子对撞机？

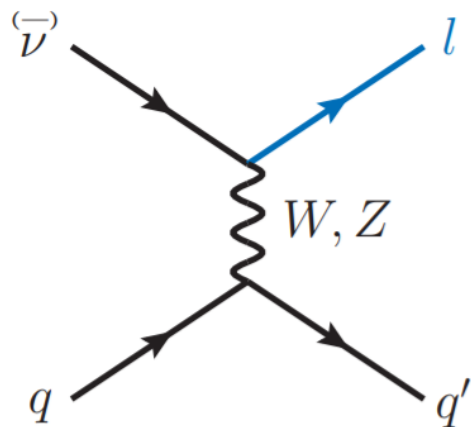
T. Yang et al., arXiv:2204.11871
S. Qian et al., arXiv:2205.15350



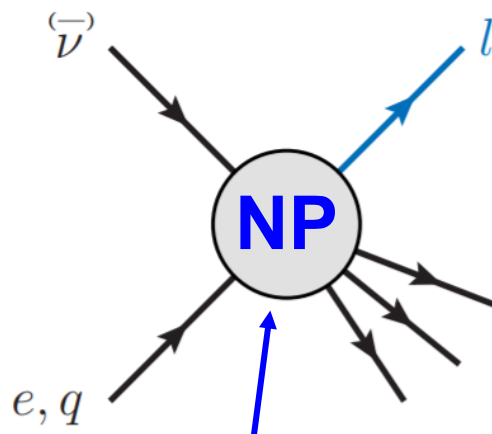


- **B physics anomalies.**
 - **Muon $g-2$.**
 - **CDF W mass**
 - **Neutron lifetime.**
 - **Beryllium decay.**
 - **Short-baseline anomaly.**
 - **ANITA**
 - **Lithium-7 abundance**
 - **Hubble tension**
 - **Small-scale structure**
 - etc...
- } Muonphilic new degrees of freedom?
What about tau?
- } Decay into dark matter?
- Sterile neutrino at eV scale?
Long-lived new degrees of freedom?
- } Challenging the Standard Λ CDM paradigm

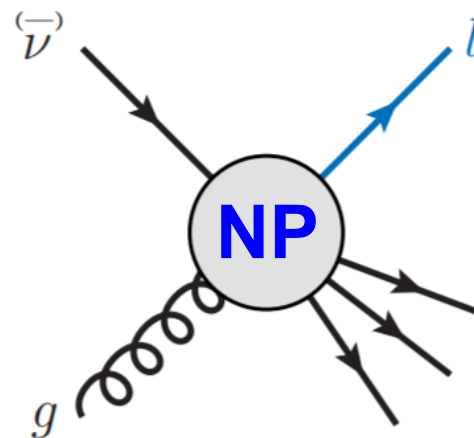
不过有些反常正在消失



过程代表图



可能的
新物理

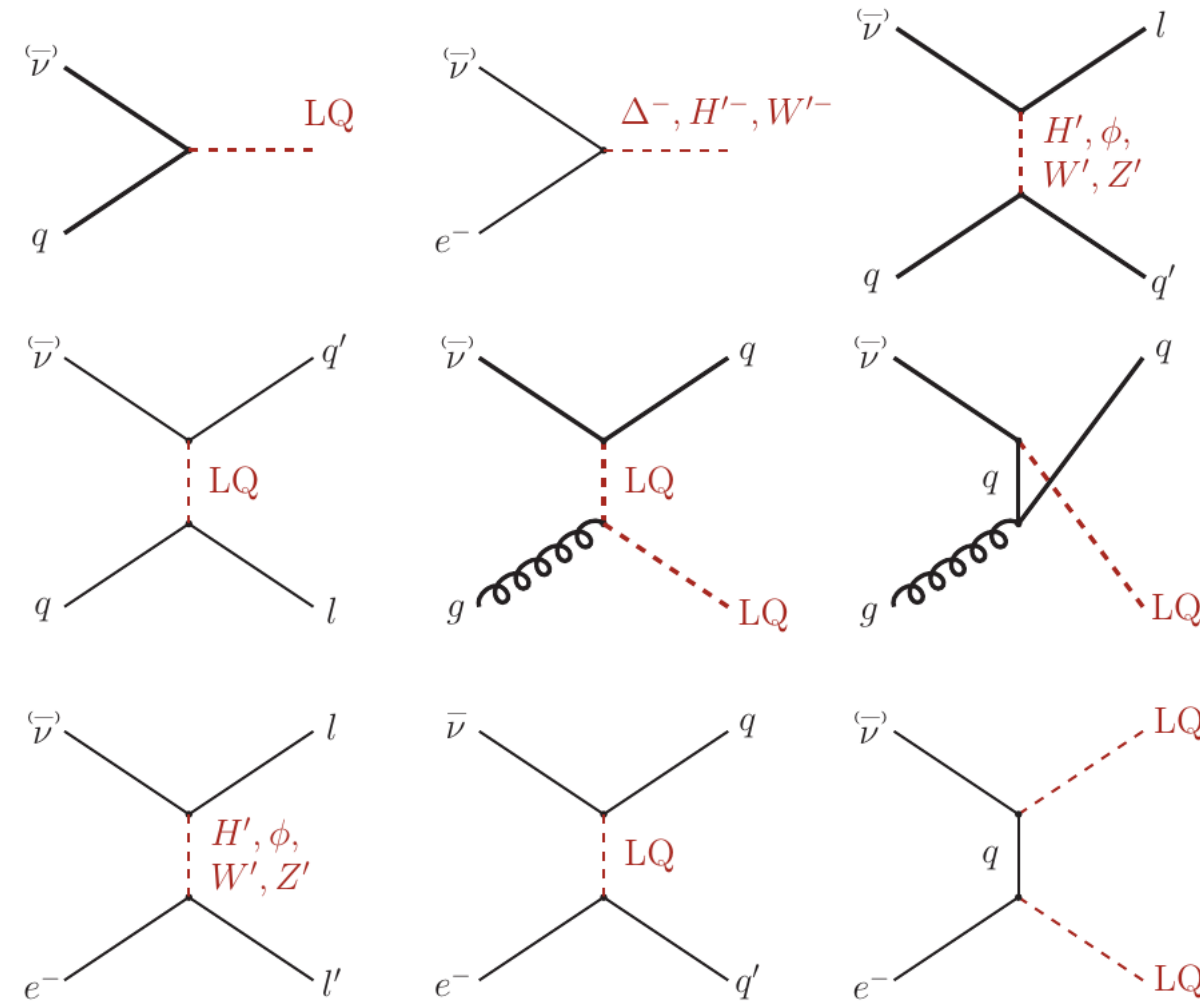


光子部分子呢?? (受压
低, 之后会涉及)

能用 τ 中微子望远镜做什么？限制中微子散射强度。
我们假设除了标准模型粒子之外没有其他轻的费米子。
新的中介粒子寿命很短，活跃的自由度只包含标准模型粒子。

存在理论预言寿命较长的新粒子，比如惰性中微子和暗物质，
可以参考 40+ ANITA 文章。

我们的束流: **neutrino + electron, quark, gluon**



Leptoquark

$$y_{i\alpha}^{\text{QL}} \bar{Q}^c{}^i (\epsilon \sigma^a) L^\alpha S_3^a$$

Charged/neutral Higgs

$$y_{\alpha\beta}^l h^- \bar{l}_\alpha \nu_\beta^c + y_{\alpha\beta}^q h^- \bar{D}_\alpha U_\beta$$

W'

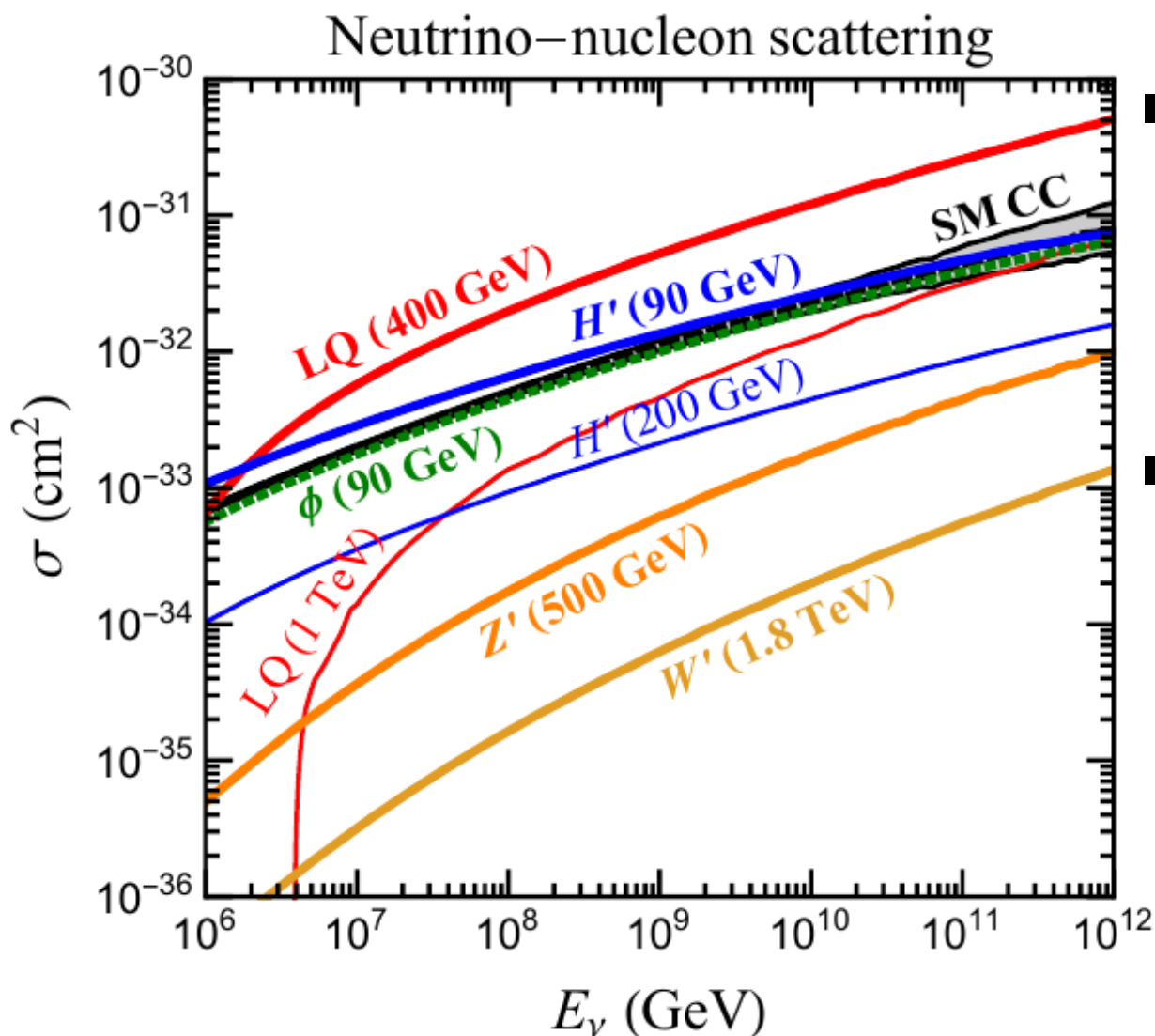
$$\frac{g'}{2\sqrt{2}} W'_\mu \bar{f}^i \gamma^\mu (1 \pm \gamma_5) f^j$$

Z'

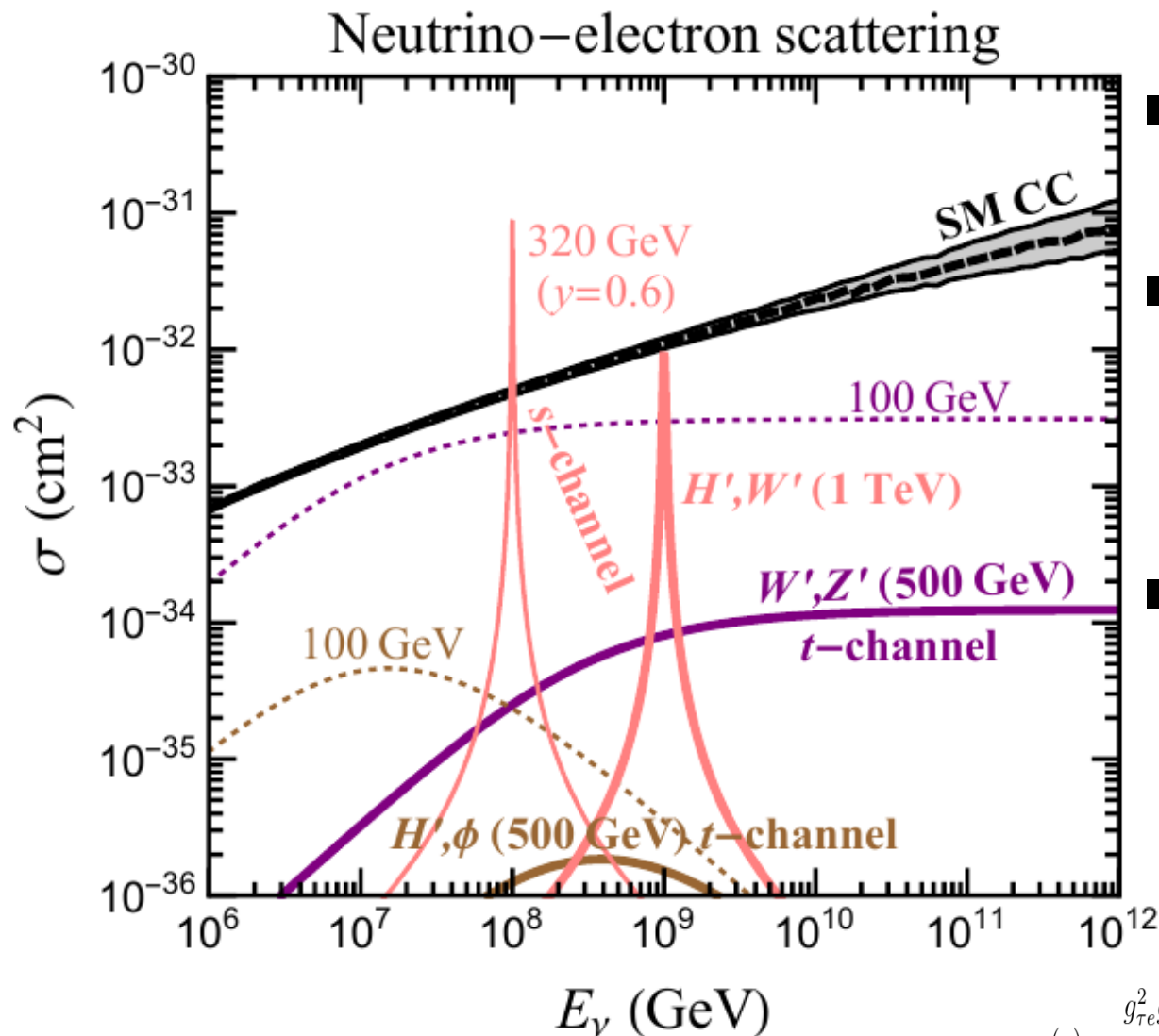
$$\frac{g'}{2\sqrt{2}} Z'_\mu \bar{f}^i \gamma^\mu (1 \pm \gamma_5) f^j$$

Leptophilic forces

$$y^l \phi \bar{l} l + y^\nu \phi \bar{\nu} \nu$$



- 强相互作用受到夸克和胶子PDFs的增强。对于EeV能量的中微子，第二代和第三代夸克的PDF可以和第一代ud比拟。
- 然而，标准模型的带电流和中性流过程会贡献无法去除的本底。



■ 两类贡献：s共振道和t道

■ s道在高能会受到很强的压低

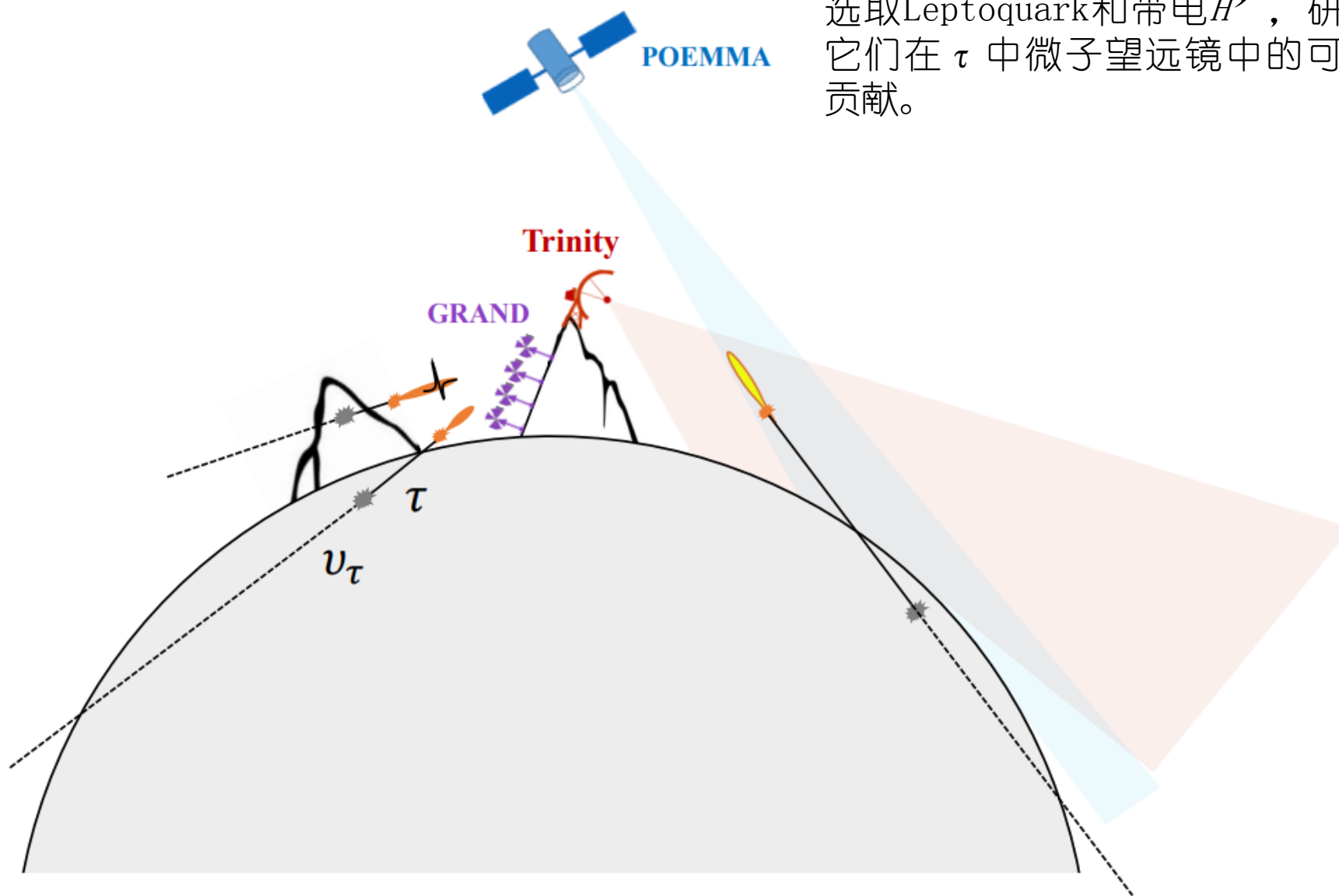
$$\sigma(s) = 8\pi\Gamma_{H'}^2 \frac{s/M_{H'}^2}{(s - M_{H'}^2)^2 + (M_{H'}\Gamma_{H'})^2}$$

■ t道在动量交换很小的时候会很强，但也受到新粒子质量的限制。

$$\sigma_{H'}(s) = \frac{Y_{\tau e}^2 Y_{\beta e}^2 \left[\frac{s(2M_{H'}^2 + s)}{M_{H'}^2 + s} + 2M_{H'}^2 \ln \frac{M_{H'}^2}{M_{H'}^2 + s} \right]}{32\pi s^2}$$

$$\sigma_{W'}(s) = \frac{g_{\tau e}^2 g_{\beta e}^2 \left[2(M_{W'}^2 + s)^2 \ln \left(\frac{M_{W'}^2}{M_{W'}^2 + s} \right) + s \left(2 \frac{M_{W'}^4 + s^2}{M_{W'}^2} + 3s \right) \right]}{8\pi s^2 (M_{W'}^2 + s)}$$

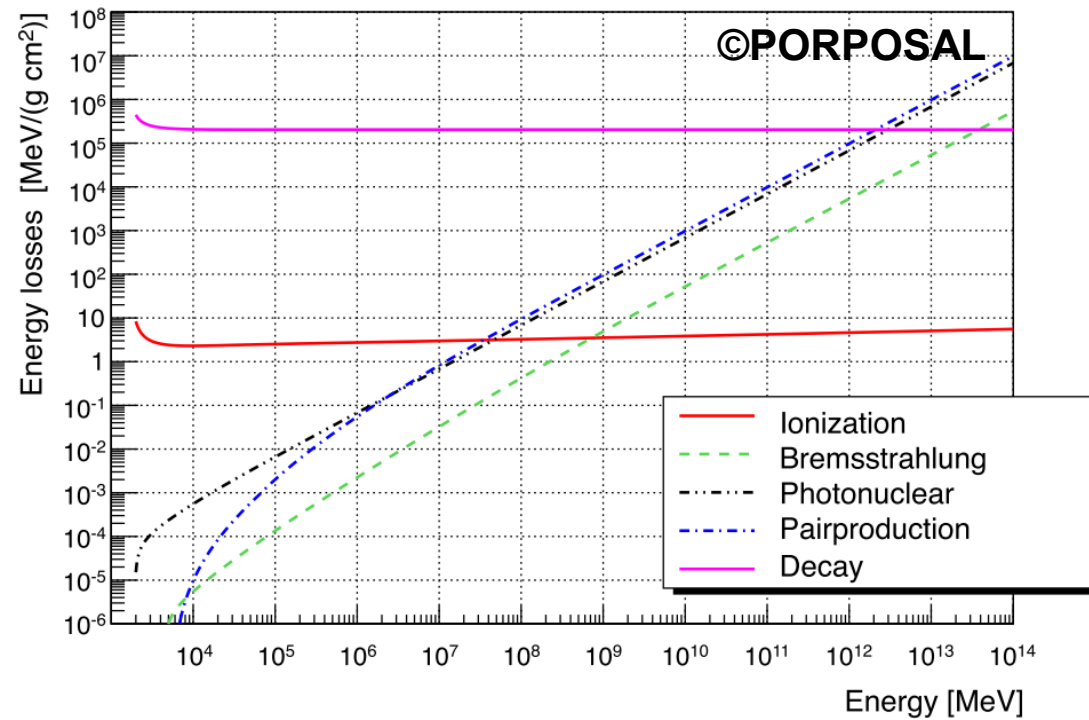
选取Leptoquark和带电 H' ，研究它们在 τ 中微子望远镜中的可能贡献。



$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu} \right) = & - N_A \rho (\sigma_{\text{SM}}^{\text{cc}} + \sigma_{\text{SM}}^{\text{nc}} + \sigma_{\text{NP}}) \frac{d\Phi_\nu}{dE_\nu} & \text{--- attenuation} \\
 & + N_A \rho \int dE'_\nu \frac{d\Phi_\nu}{dE'_\nu} \frac{1}{E'_\nu} \left(\frac{d\sigma_{\text{SM}}^{\text{nc}}}{dz} + \frac{d\sigma_{\text{NP}}^{\text{nc}}}{dz} \right) \Big|_{z=\frac{E_\nu}{E'_\nu}} & \text{--- neutral-current} \\
 & & \text{regeneration} \\
 & + \int dE'_\tau \frac{d\Phi_\tau}{dE'_\tau} \frac{1}{E'_\tau} \frac{d\Gamma_\tau}{\Gamma_\tau dz}, & \text{--- tau regeneration} \\
 \frac{d}{dt} \left(\frac{d\Phi_\tau}{dE_\tau} \right) = & - \Gamma_\tau \frac{d\Phi_\tau}{dE_\tau} - N_A \frac{\rho}{A} [\sigma_{\text{pp}} + \sigma_{\text{pn}}] \frac{d\Phi_\tau}{dE_\tau} & \text{--- tau decay and} \\
 & & \text{hard energy loss} \\
 & + N_A \frac{\rho}{A} \int dE'_\tau \frac{d\Phi_\tau}{dE'_\tau} \frac{1}{E'_\tau} \left(\frac{d\sigma_{\text{pp}}}{dz} + \frac{d\sigma_{\text{pn}}}{dz} \right) \Big|_{z=\frac{E_\tau}{E'_\tau}} & \text{--- regeneration from} \\
 & & \text{hard scattering} \\
 & + \rho \frac{\partial}{\partial E_\tau} \left[(\beta_{\text{pp}} + \beta_{\text{pn}} + \beta_{\text{brems}}) E_\tau \frac{d\Phi_\tau}{dE_\tau} \right] & \text{--- continuous energy} \\
 & & \text{loss} \\
 & + N_A \rho \int dE'_\nu \frac{d\Phi_\nu}{dE'_\nu} \frac{1}{E'_\nu} \left(\frac{d\sigma_{\text{SM}}^{\text{cc}}}{dz} + \frac{d\sigma_{\text{NP}}}{dz} \right) \Big|_{z=\frac{E_\tau}{E'_\nu}}, & \text{--- tau conversion} \\
 & & \text{from neutrinos}
 \end{aligned}$$

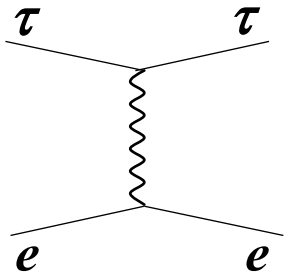
$$N_{\text{P}} = \int dE_\tau \int d\cos\theta_\oplus \int d\cos\theta_{\text{tr}} \int d\phi_{\text{tr}} \frac{d\Phi_\tau}{dE_\tau d\Omega_{\text{tr}}} \cos\theta_{\text{tr}} 2\pi R_\oplus^2 P_{\text{det}} T$$

$$P_{\text{det}} = \int ds p_{\text{decay}}(E_\tau, s) p_{\text{det}}(E_\tau, \theta_\oplus, \theta_{\text{tr}}, \phi_{\text{tr}}, s)$$

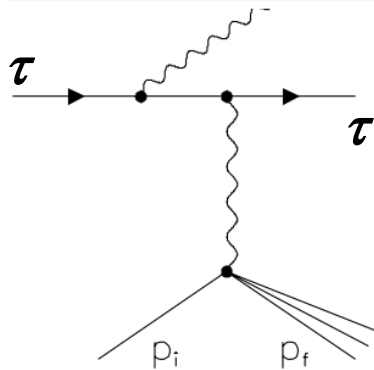


$E_\tau \sim \text{EeV}$ 时，在地球物质中的平均自由程和衰变长度相当。因此 τ 的能量损失过程需要加入到传播方程。

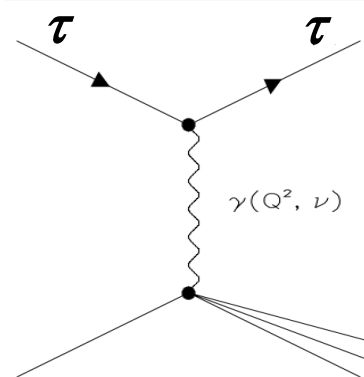
Ionization



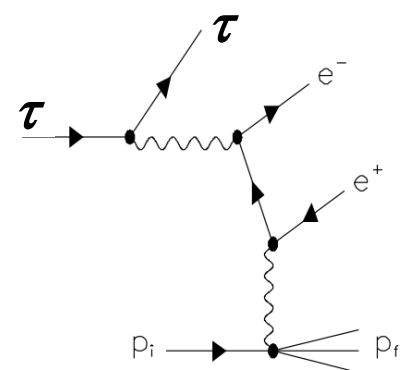
Bremsstrahlung

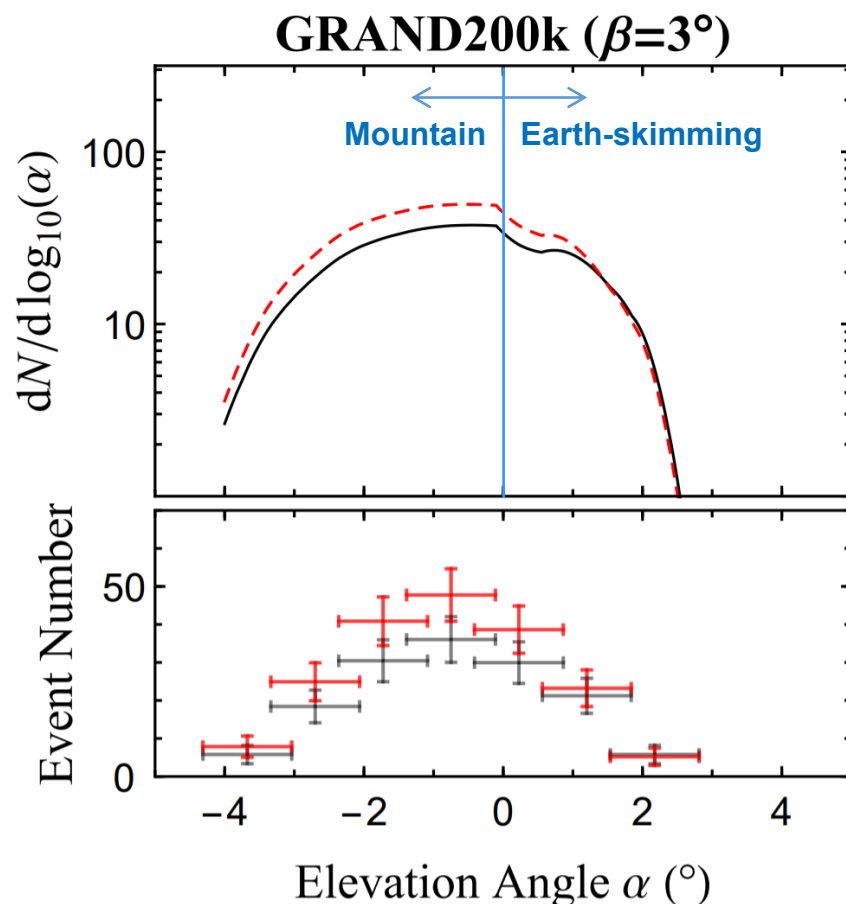
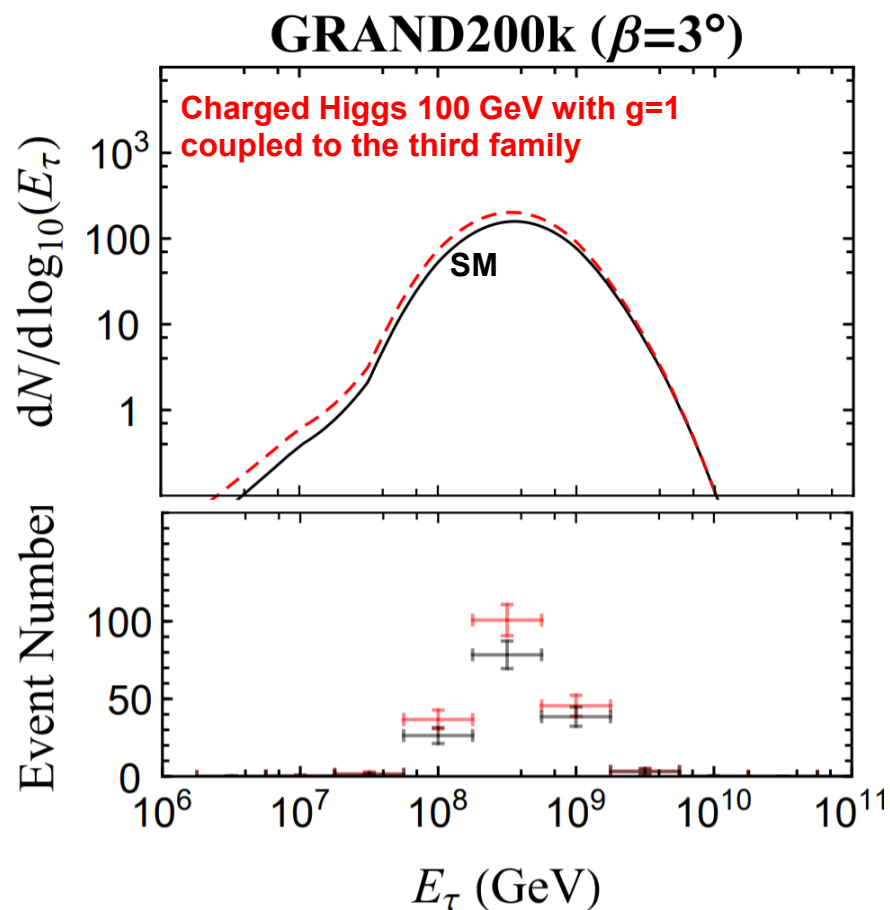


Photonuclear

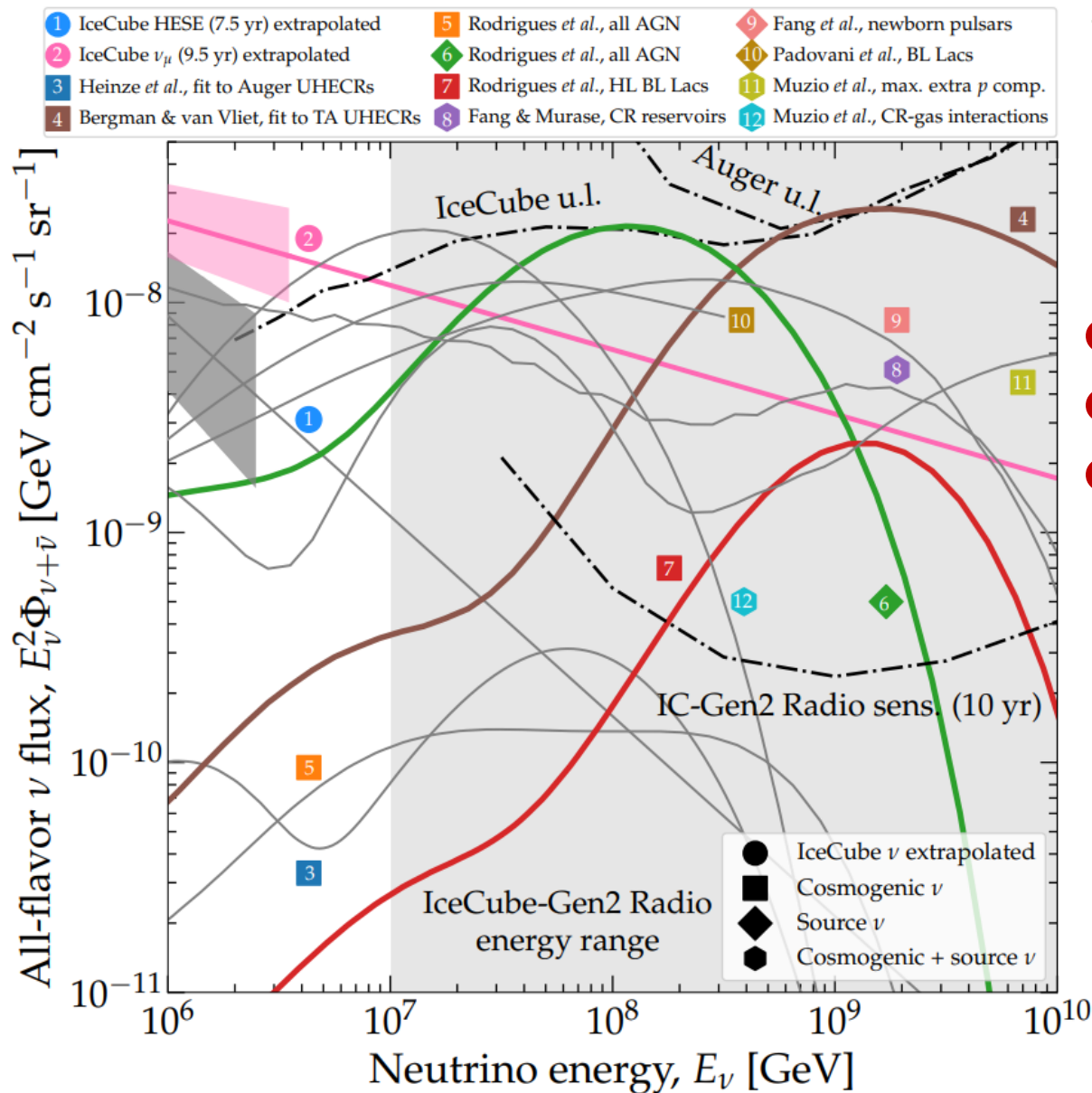


Pair production





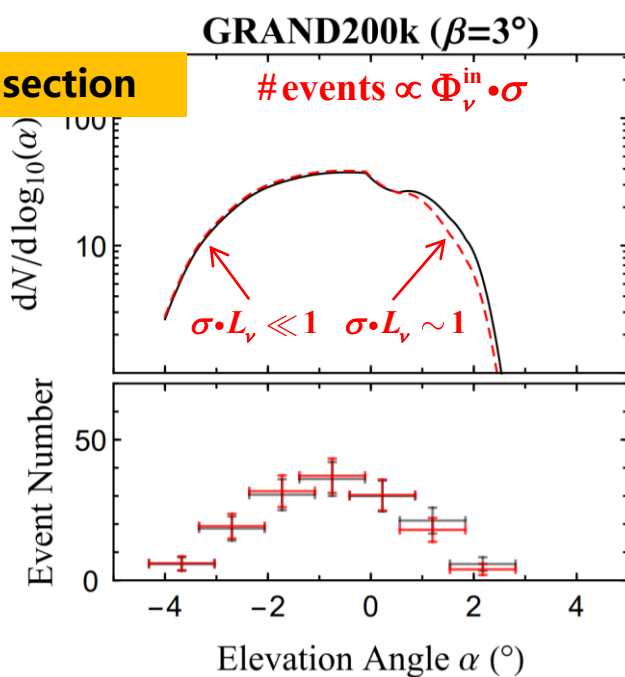
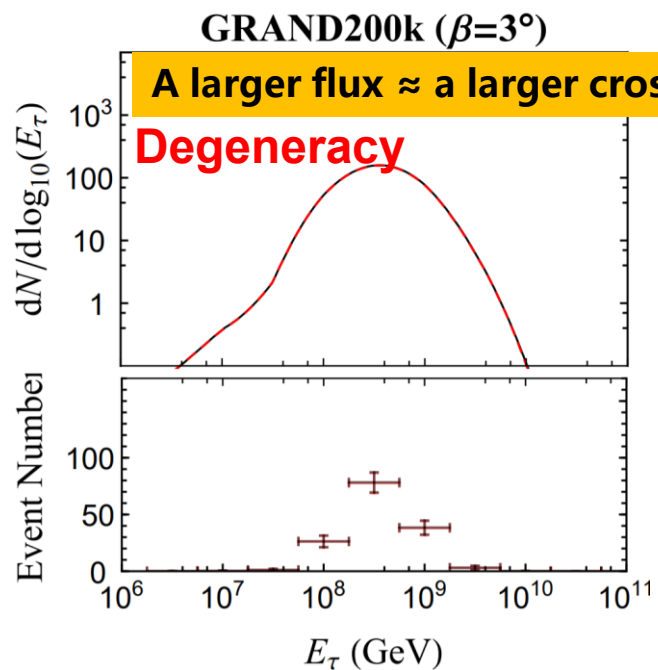
不过注意这里初始的中微子束流是固定的。
但实验分析中，我们并不清楚 GZK 中微子具体的束流分布



V. B. Valera, M. Bustamante, C. Glaser, JHEP 06 (2022) 105

中微子束流的分布
有一定的不确定度

- 宇宙线能谱和构成
- Reionization 历史
- 点源的模型构造



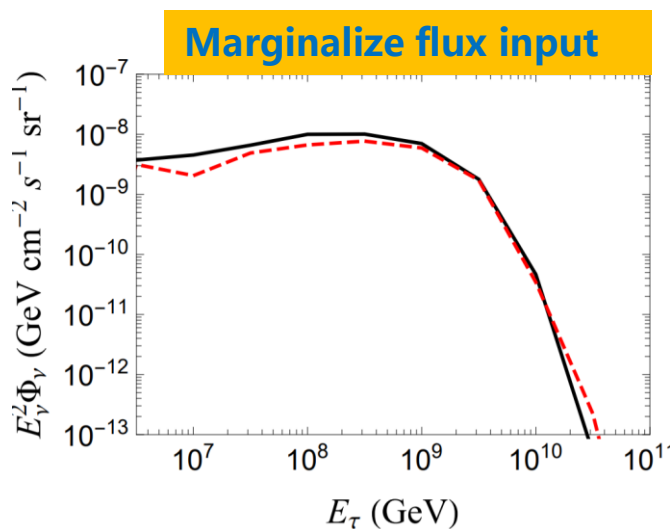
幸运的是，事例率的角度分布中的不同会一直保持。

$$\# \text{events} \propto \Phi_\nu^{\text{in}} \exp(-\sigma \cdot L_\nu) \cdot \sigma$$

$$\exp(-\sigma \cdot L_\nu) \approx 1 - \sigma \cdot L_\nu + \dots$$

$\sigma \cdot L_\nu$ 要足够大来破除流强和截面的简并度。

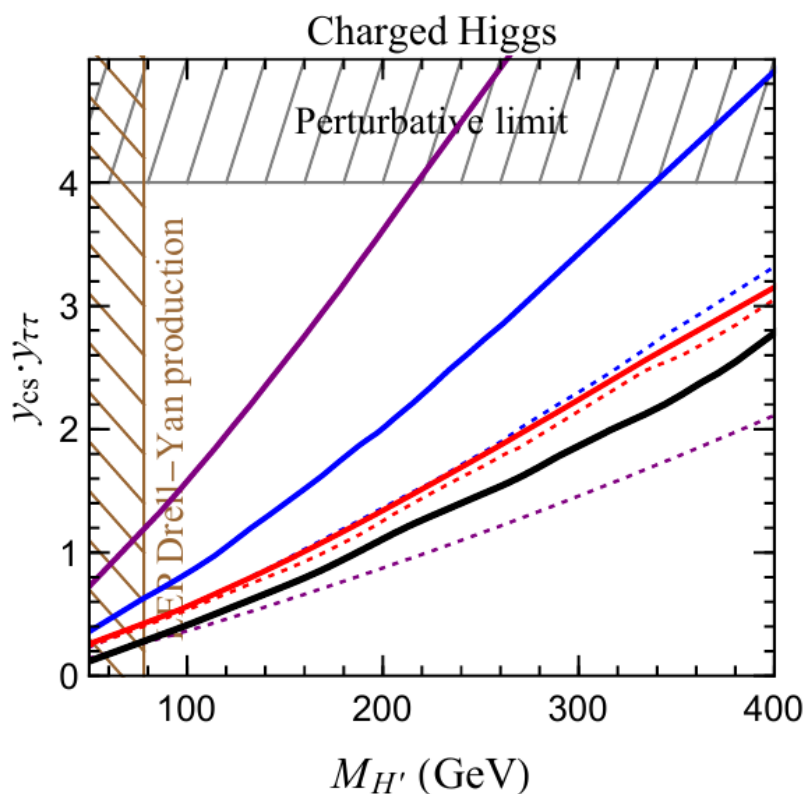
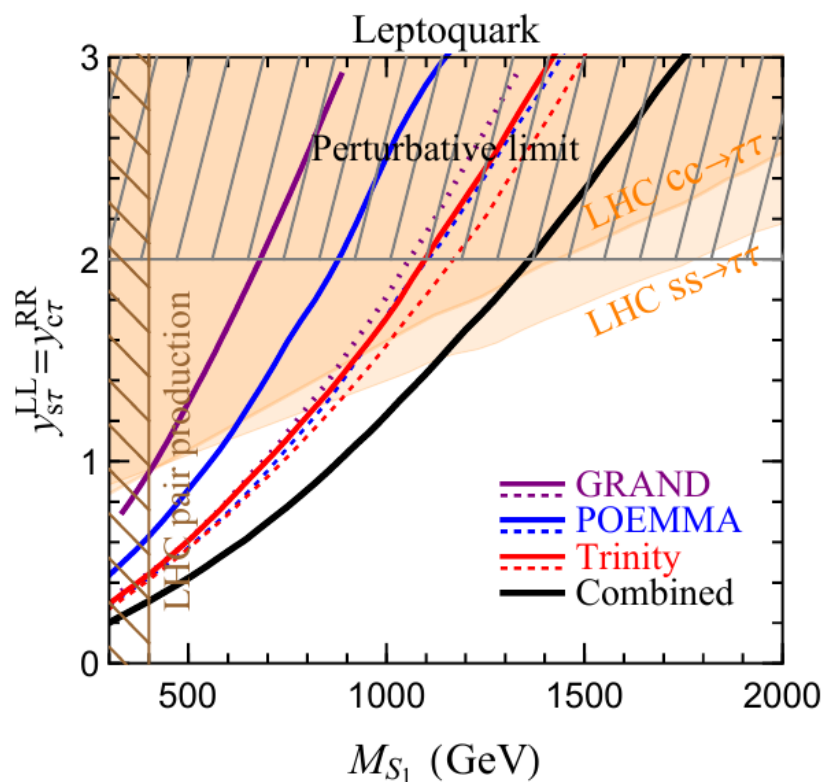
$$\sigma \cdot L_\nu \approx \mathcal{O}(1) \text{ best}$$



中微子能谱的具体形状未知，因此对其输入进行最小化

$$\chi_{\min}^2 = \text{Min}_{\Phi_\nu^{\text{in}}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{\text{bins}}} \frac{(n_i^{\text{th}} - n_i^{\text{exp}})^2}{n_i^{\text{th}} + \sigma_{\text{PDF},i}^2} \right\}$$

可能的理论先验和其他的实验观测可以提高这里的灵敏度。



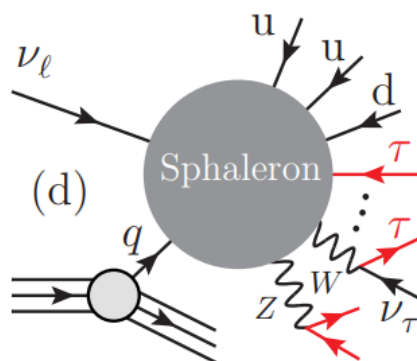
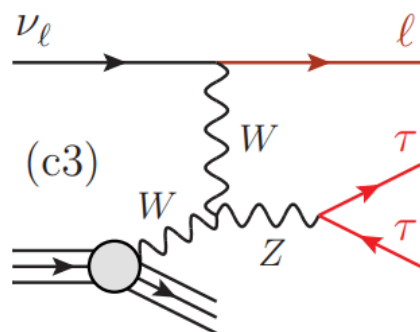
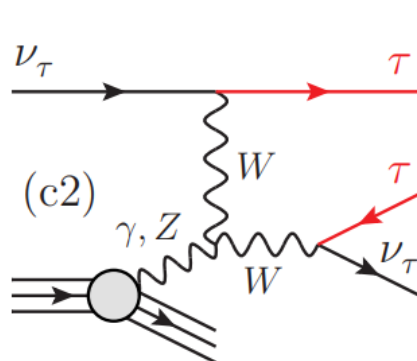
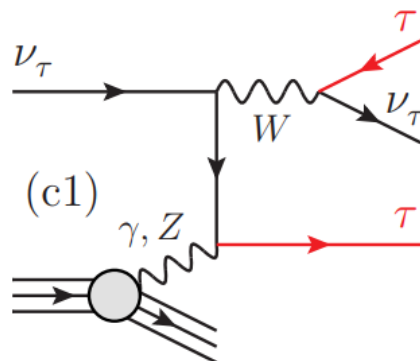
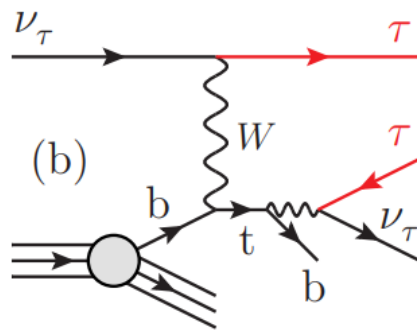
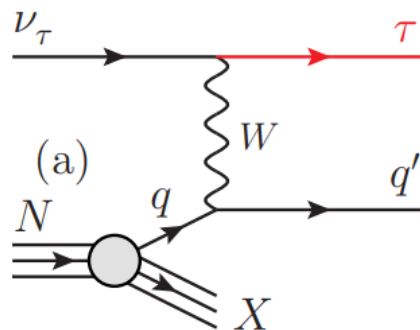
对撞机上已有的限制

- LHC pair production process sets a lower limit
- t -channel leptoquark exchange at LHC
- LEP Drell-Yan production

τ 中微子望远镜的潜力

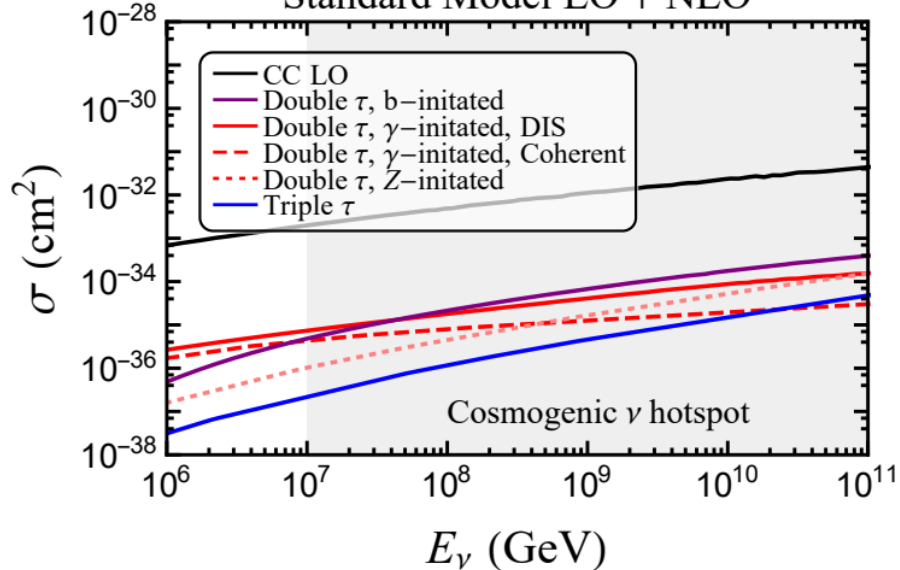
- For the couplings, we highlight the sensitivity to second and third families
- The combination of different telescopes is very useful

主要限制还是不可去除的标准模型本底。

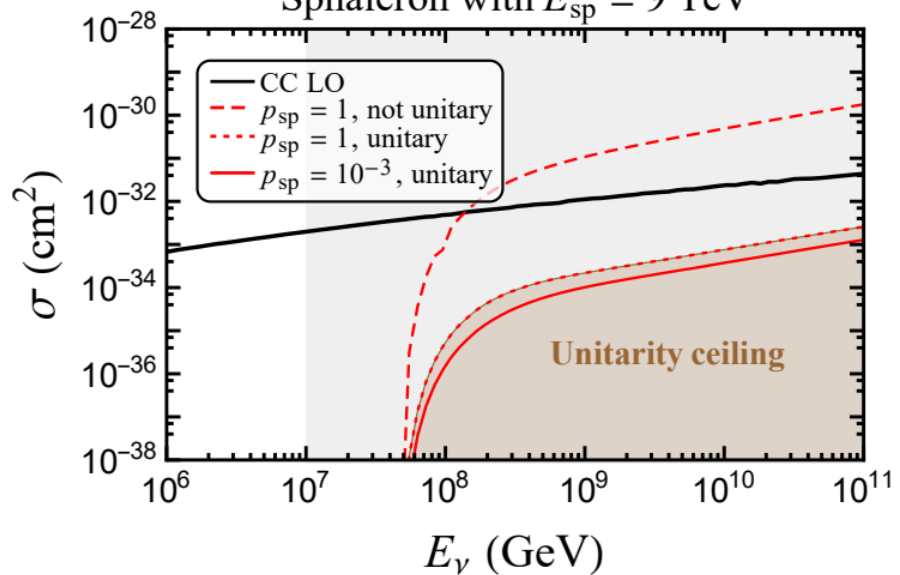


arXiv:2207.02222, GYH

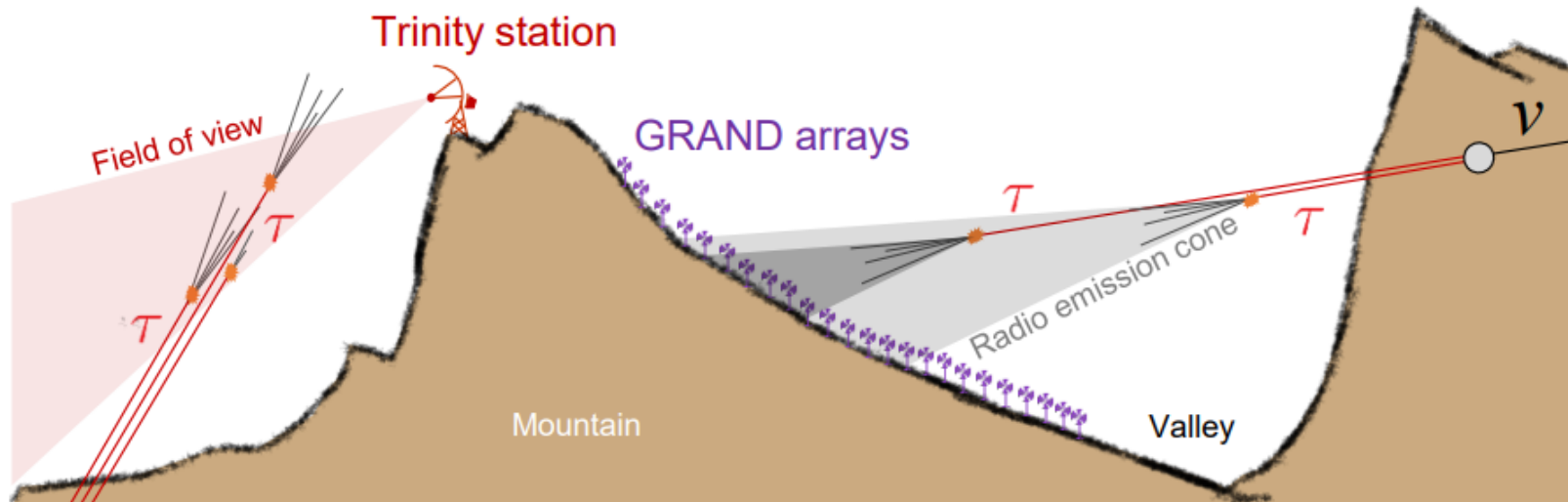
Standard Model LO + NLO



Sphaleron with $E_{sp} = 9$ TeV



Telescopes	Single τ	Double τ	Triple τ	Sphaleron $n\tau$
Ashra-NTA [33]	19	0.2	0.007	0.7 (0.5)
BEACON [30, 31]	137	1.6	0.062	7.1 (5)
GRAND [20]	178	2.1	0.082	10 (7)
Trinity [21, 22]	16	0.2	0.006	0.6 (0.4)
TAMBO [29]	> 7	> 0.1	> 0.002	> 0.11 (0.08)



➤ Lorentz 对称性破坏, 量子引力

S. Coleman and S. L. Glashow, PLB 405 (1997) 249; C. A. Argüelles, T. Katori and J. Salvado, PRL 115 (2015) 161303
M.C. Gonzalez-Garcia, F. Halzen and M. Maltoni, PRD 71 (2005) 093010; J. Liao and D. Marfatia, PRD 97 (2018) 041302
K. Murase, PRL 103 (2009) 081102; P. W. Gorham et al., PRD 86 (2012) 103006;
IceCube, Nature Physic, 14 (2018) 961; IceCube, arXiv:2111.04654

➤ 等效原理的检测

A. Esmaili et al. PRD 89 (2014) 1130003;
Z.-Y. Wang, R.-Y. Liu and X.-Y. Wang, PRL 116 (2016) 151101;
D.F.G. Fiorillo et al., JCAP 04 (2021) 079; M. Chianese et al., Symmetry 13 (2021) 1353

➤ 第五种力 (fifth force)

M. Bustamante and S. K. Agarwalla, PRL 122 (2019) 061103

➤ 幺正性

X.-J. Xu, H.-J. He and W. Rodejohann, JCAP 12 (2014) 039; M. Ahlers, M. Bustamante and S. Mu, PRD 98 (2018) 123023;
P. B. Denton and J. Gehrlein, arXiv:2109.14575

➤ 微型黑洞

Y. Uehara, PTP 107 (2002) 621; J. Alvarez-Muniz et al., PRD 65 (2002) 124015;
S. I. Dutta, M. H. Reno and I. Sarcevic, PRD 66 (2002) 033002; M. Kowalski, A. Ringwald and H. Tu, PLB 529 (2002) 1; P. Jain et al., PRD 66 (2002) 065018; D. Stojkovic, G. D. Starkman and D.-C. Dai, PRL 96 (2006) 041303; and many more....

MAYBE MORE

优点

- ✓ Tau中微子望远镜可看作是一个中微子-核子(电子)对撞机，它的质心系能量可以高达 $43(1) \text{ TeV}$ 。
- ✓ 在相关的能标处，第二代和第三代夸克的PDFs不再受到很强的压低，跟第一代u和d夸克相当。
- ✓ 原则上对于和中微子相关的新物理非常灵敏。

缺点

- ✓ 初始的束流能量分布不集中，而且不受控制。
- ✓ 标准模型的带电流与中性流过程是很难去除的本底。
- ✓ 根据它的探测原理，事例的种类很有限。这可以通过加入双爆和多爆事例的寻找得到一些改善。

THANK YOU VERY MUCH!