

# Радио-регистрация нейтрино в эксперименте AURA на Южном полюсе

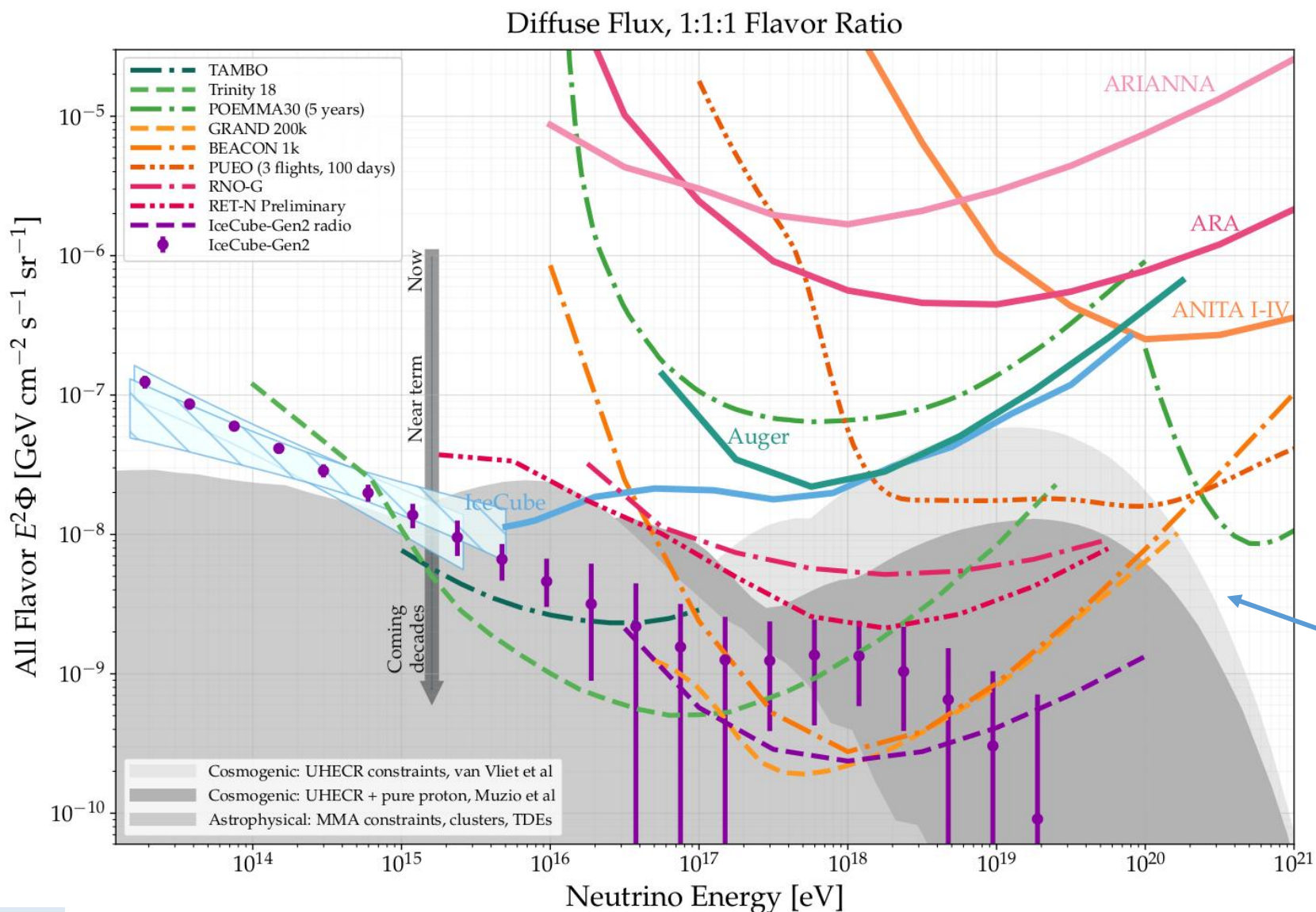
Михайлова М.В.<sup>1</sup>, Бессон Д.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ

<sup>2</sup>Канзасский университет

ВККЛ 2022

# Нейтринные ледовые радио-эксперименты



- Радио-эксперименты: ARA, ARIANNA, RNO-G, IceCube-Gen2 radio
- Цели: регистрация космических нейтрино УВЭ ( $E > 10$  ПэВ)
- Метод регистрации: по радио-импульсам
- Мишень: лед

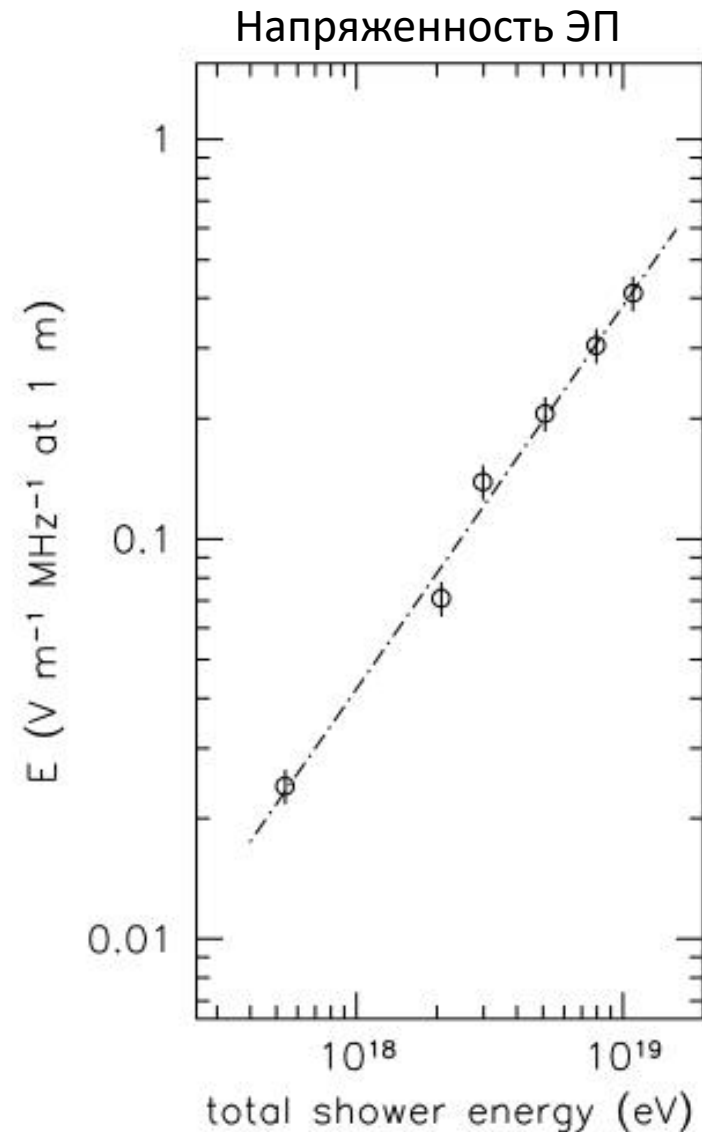
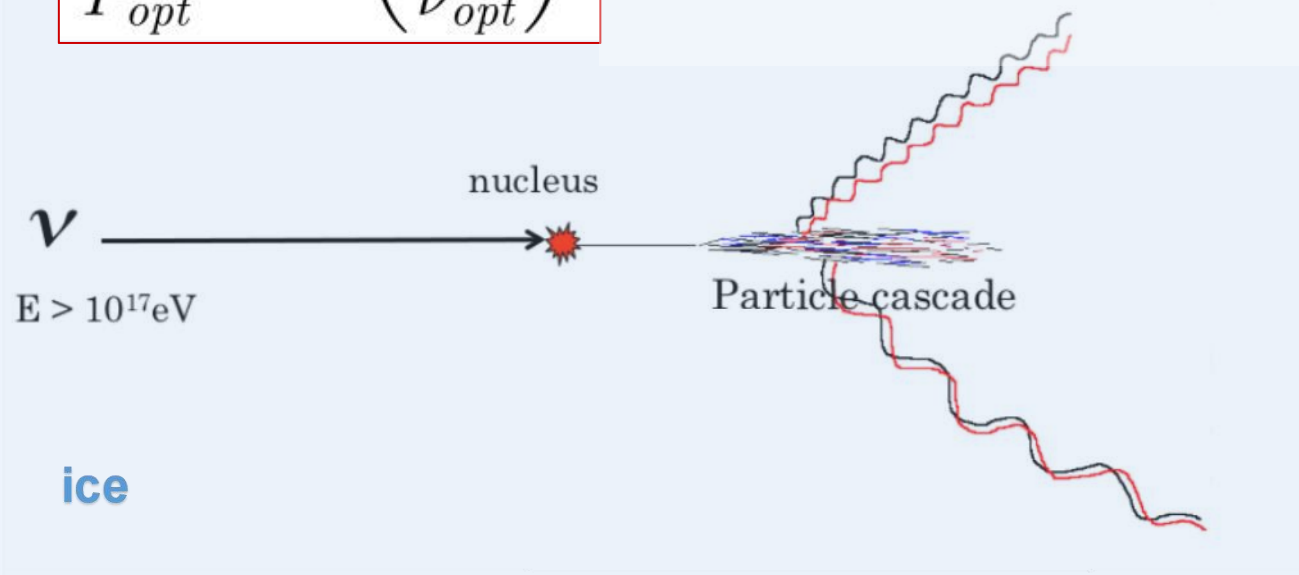
Ожидаемая чувствительность для различных экспериментов к потокам нейтрино, рассчитанная для 10 лет работы

# Эффект Аскарьяна 1962

- **Когерентное радиоизлучение каскада в диэлектрической среде**
- Развитие ливня от  $\nu$  во льду:
  - Образуется избыток отрицательного заряда
  - Черенковское излучение в радиодиапазоне усиливается за счет эффекта когерентности

$$\frac{P_{rad}}{P_{opt}} = N \left( \frac{\nu_{rad}}{\nu_{opt}} \right)^2$$

при избытке электронов  $N \approx 10^{18} - 10^{20}$   $P_{rad}$  достигает  $P_{opt}$



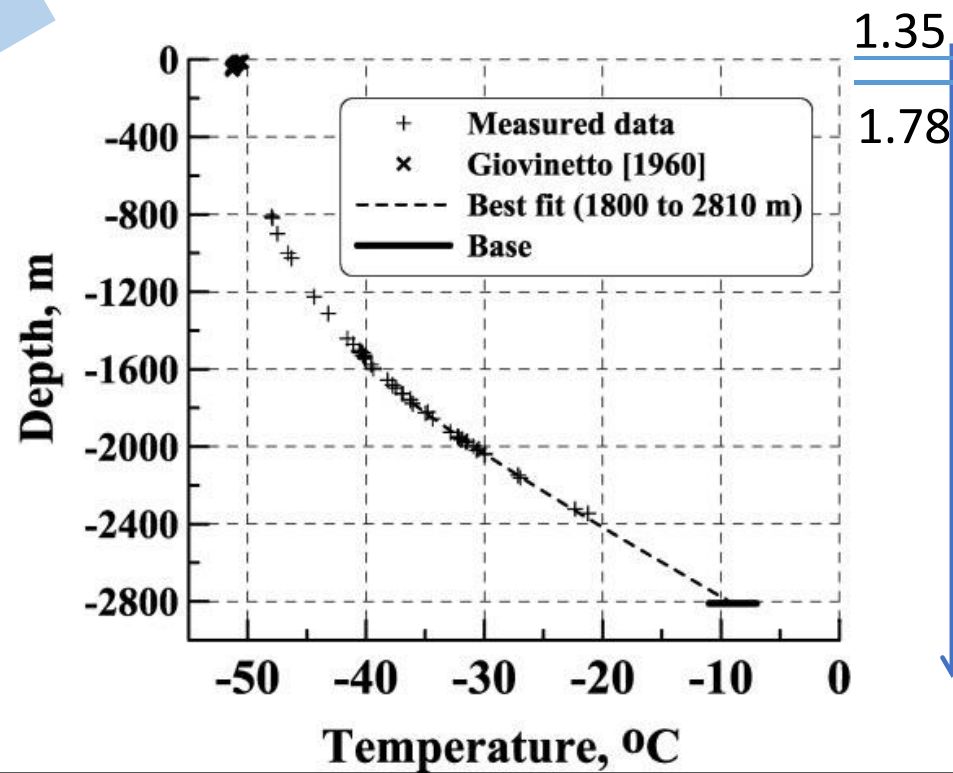
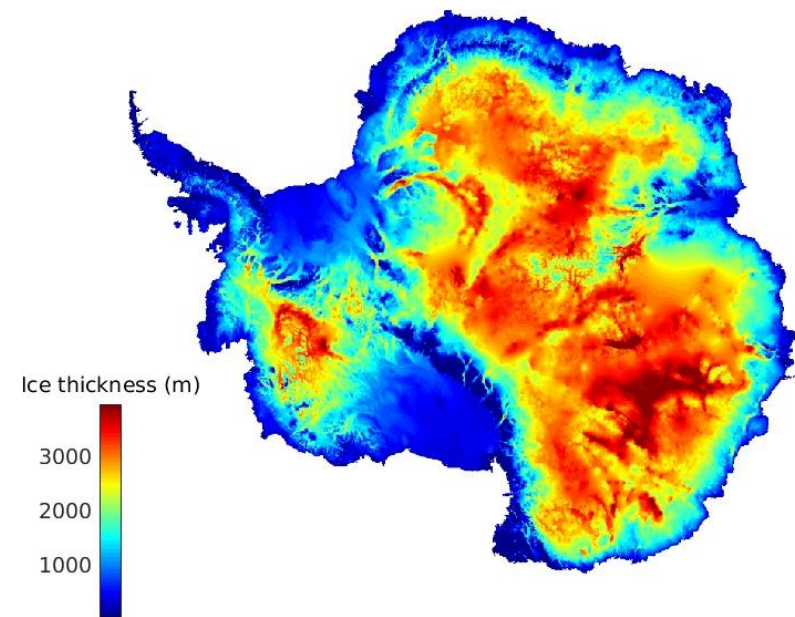
D. Saltzberg et al.  
[arXiv:hep-ex/0011001](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0011001)

- Мощность сигнала  $P_{rad} \propto E^2$

# Свойства полярного льда

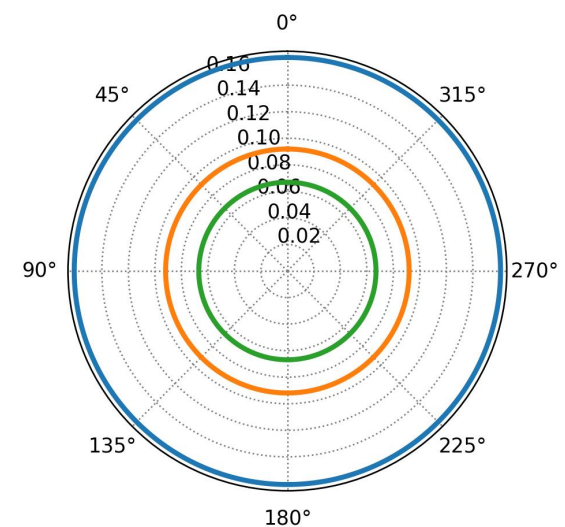
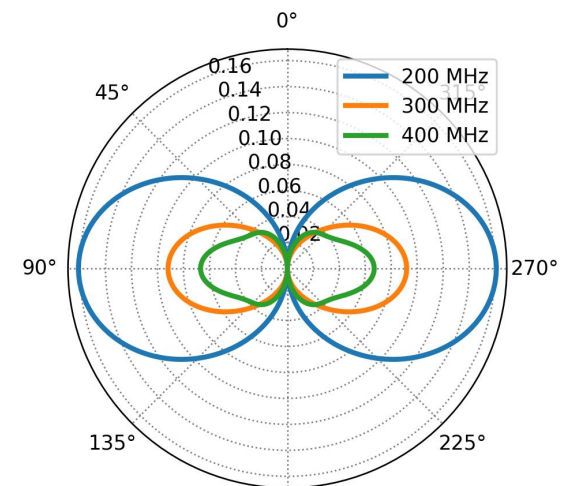
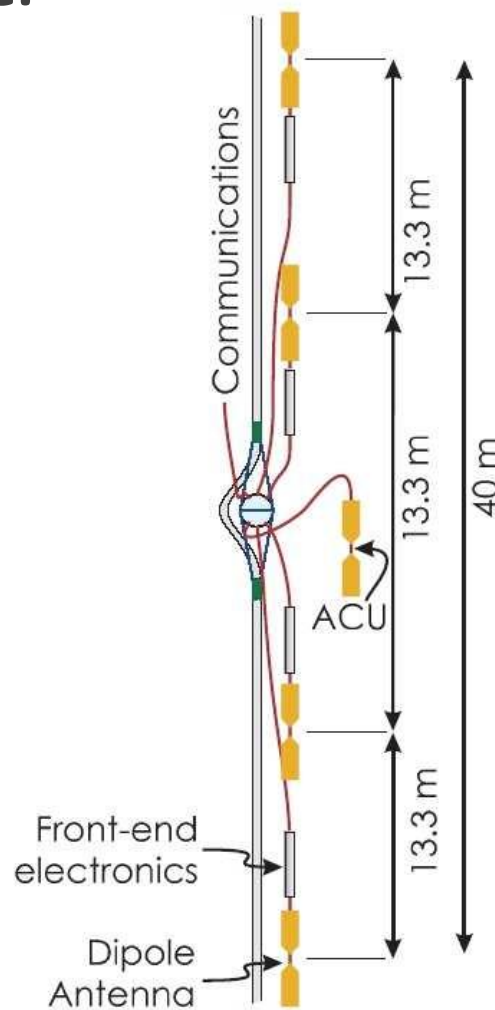
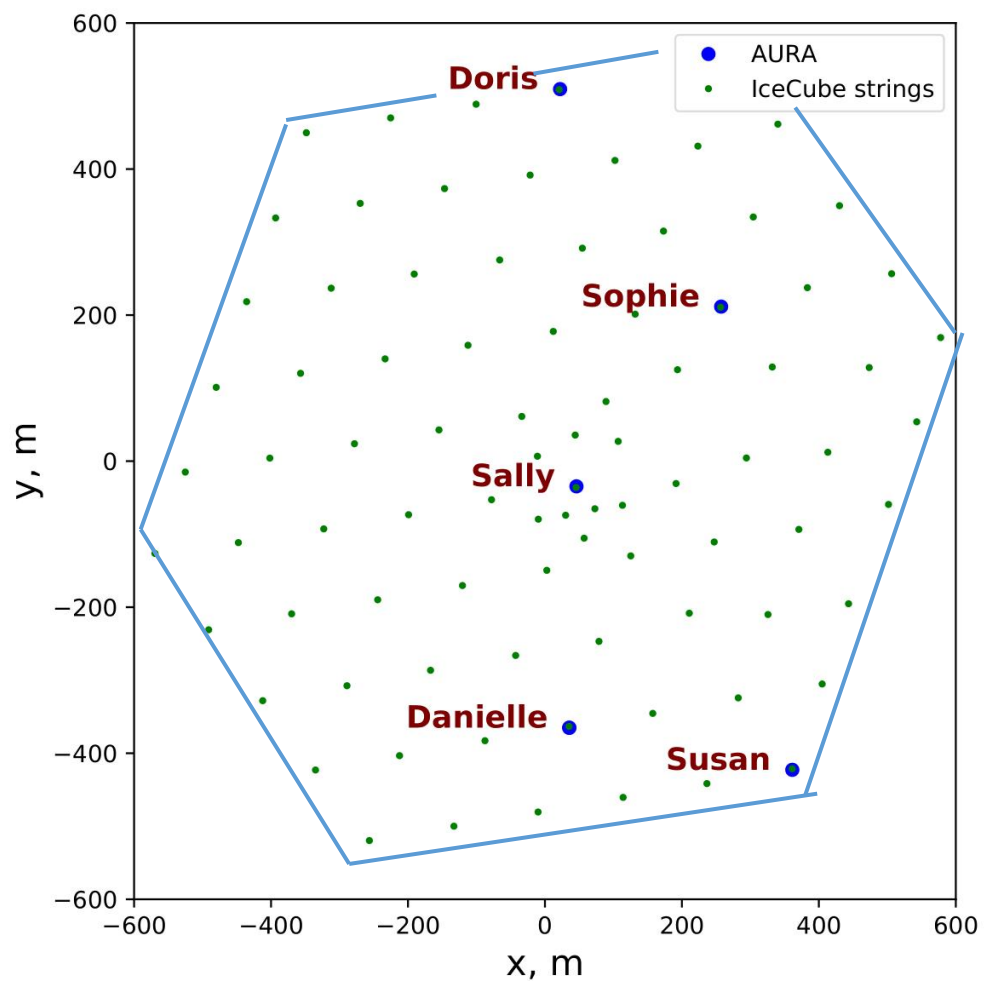
- Толщина ледяного покрова: 2800 м
- Прозрачность полярного льда:  
 $L_{\text{atten}}(\lambda = 1 \text{ м}) \sim 1500 \text{ м}$ ,  $L_{\text{atten}}(\lambda = 400 \text{ нм}) \sim 120 \text{ м}$
- Низкий уровень теплового шума
- Относительно небольшая антропогенная активность.

- Возможно просматривать огромные объемы льда в поисках черенковских биполярных радиоимпульсов от нейтрино с помощью разреженного радиомассива

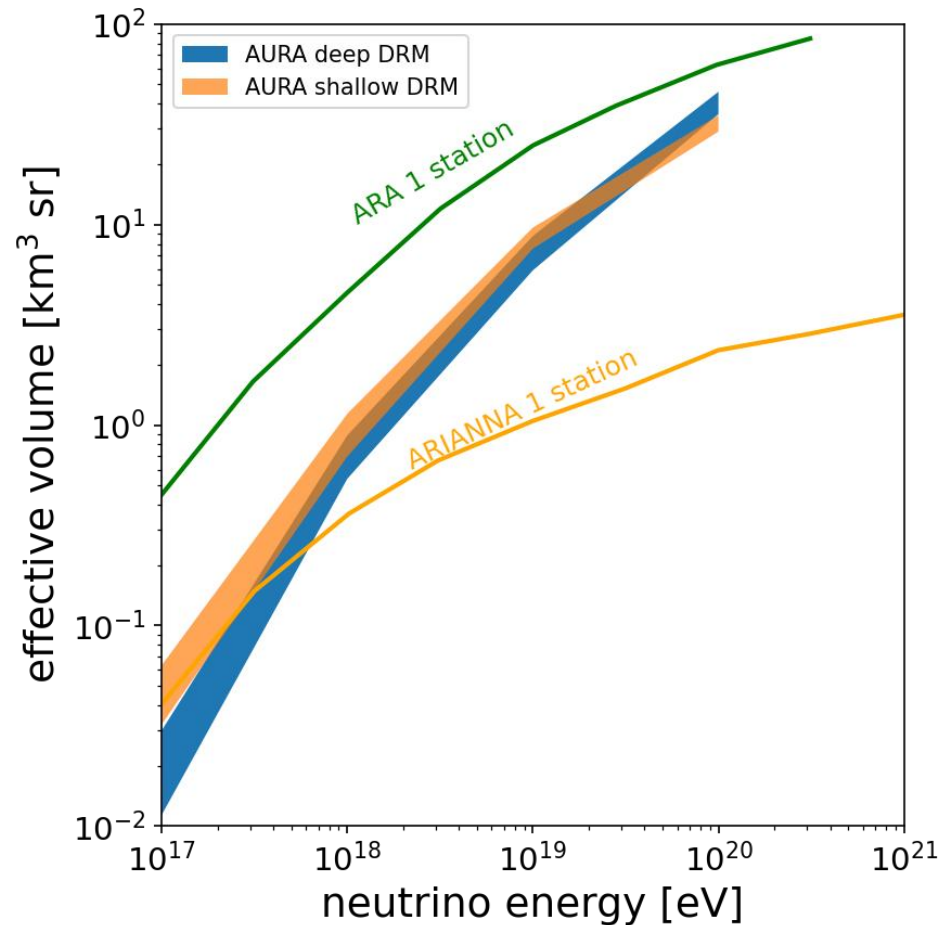


# Эксперимент AURA 2007-2011

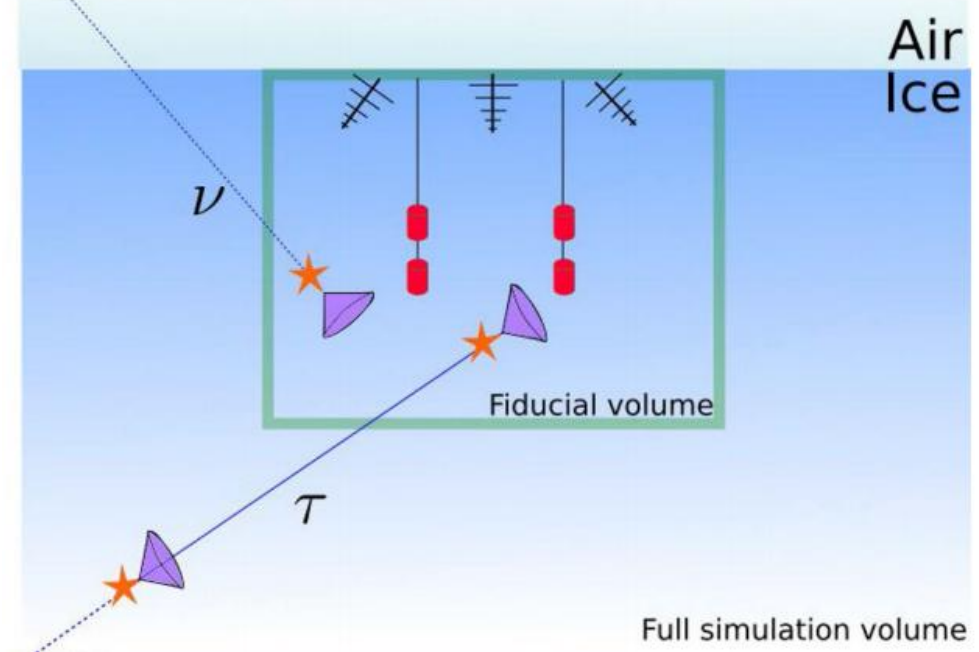
- Askaryan Under-Ice Radio Array - пробный радиомассив, размещенный в отверстиях эксперимента IceCube.



# Эффективный объем детектора



- Для расчета  $V_{\text{eff}}$  использовался программный пакет NuRadioMC [C. Glaser et al., [European Physics Journal C 80, 77 \(2020\)](#), [arXiv:1906.01670](#)]
- Сравнение с  $V_{\text{eff}}$  станции ARIANNA [1] и ARA [2]

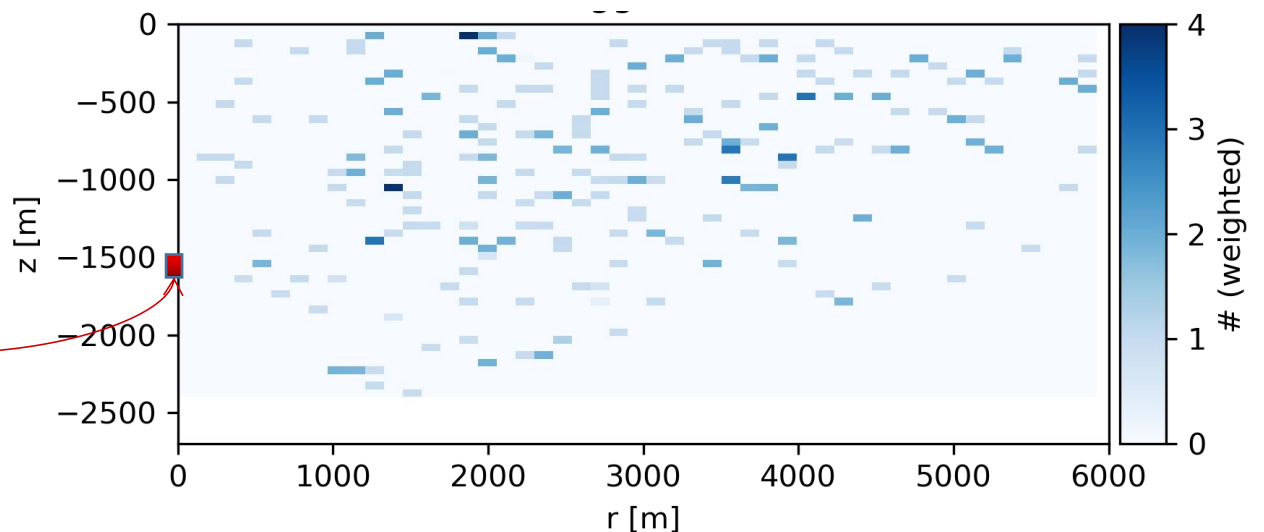
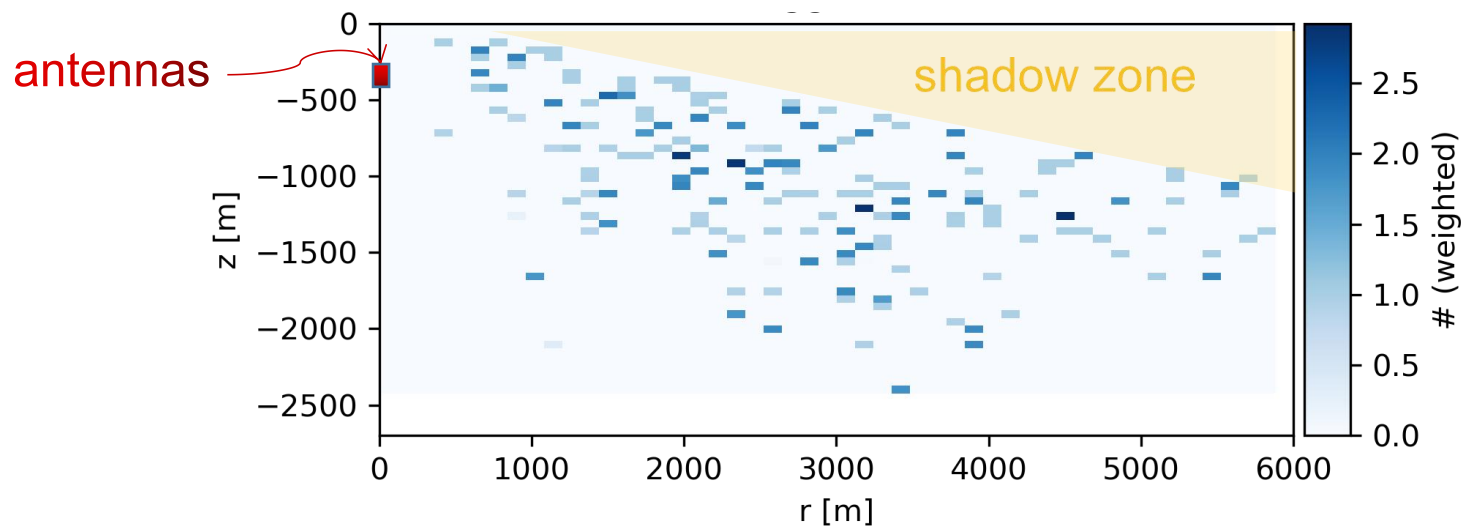


$$V_{\text{eff}} = \frac{V}{N} \sum_{i \in \text{triggered}} \omega_i$$

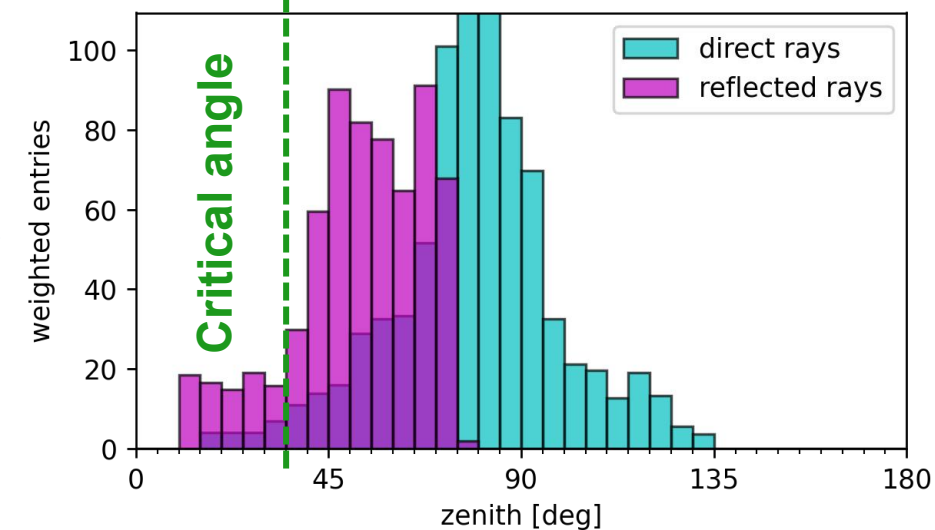
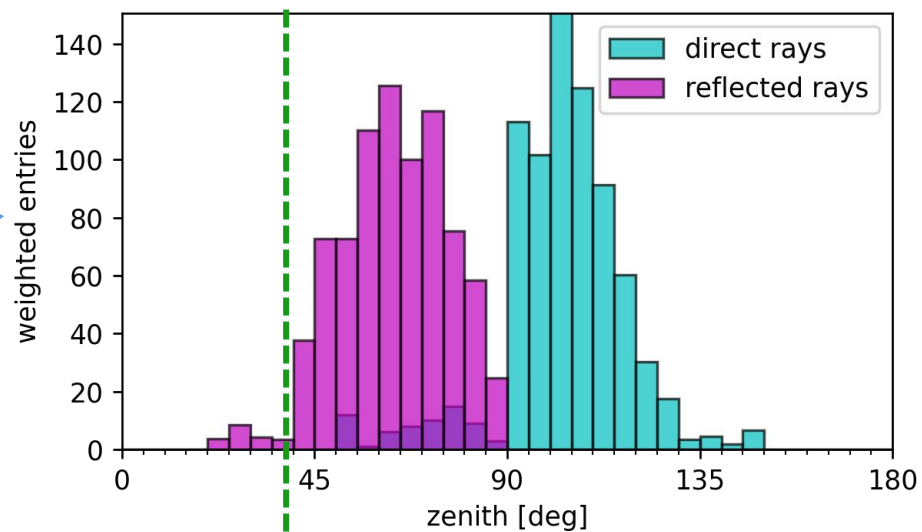
$N$  — число смоделированных нейтринных событий;  
 $V$  — объем, в котором проводилось моделирование;  
 $\omega_i$  — вес, просуммированный по всем зарегистрированным событиям  $i$ . (вероятность частиц достичь объем  $V$ , учитывающая непрозрачность Земли для нейтрино высоких энергий)

# Направление прихода нейтринных сигналов

Распределение вершин взаимодействий нейтрино во льду относительно антенн (моделирование)

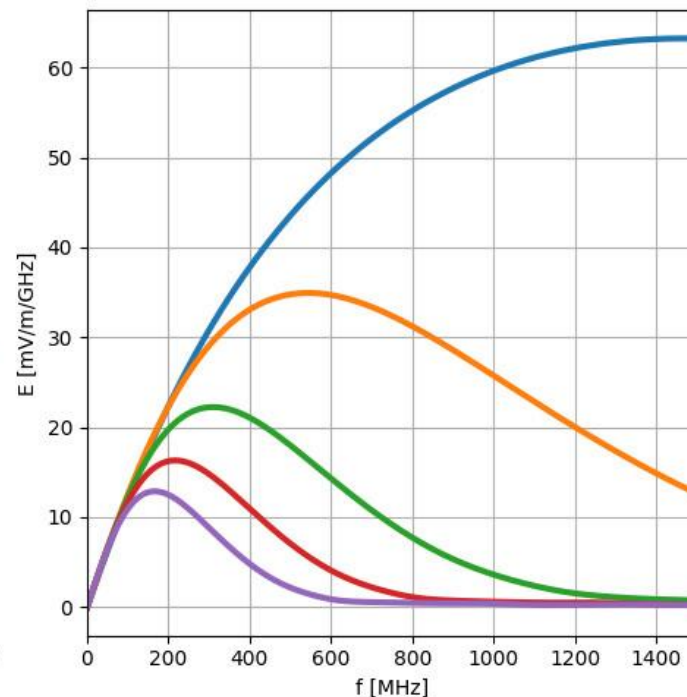
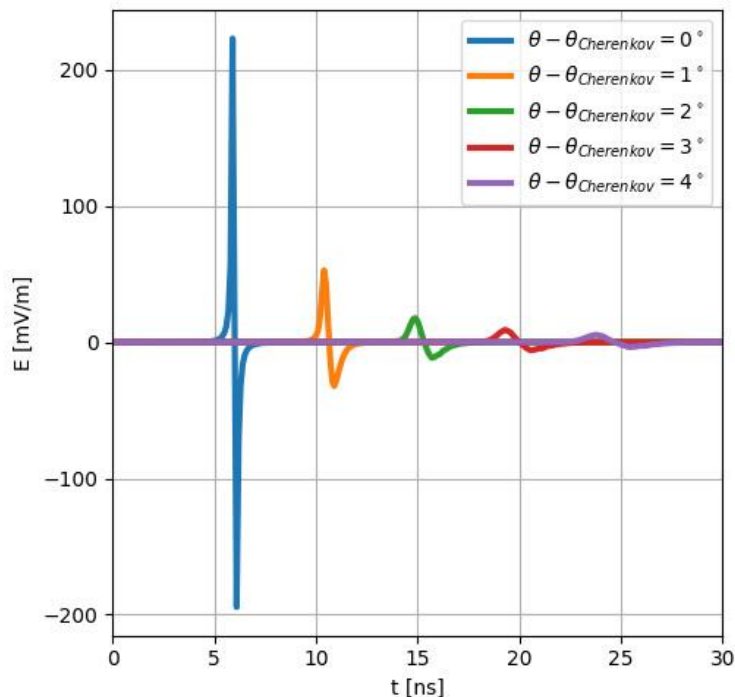


Распределение углов прихода сигналов в антенны (моделирование)



# Нейтринные импульсы

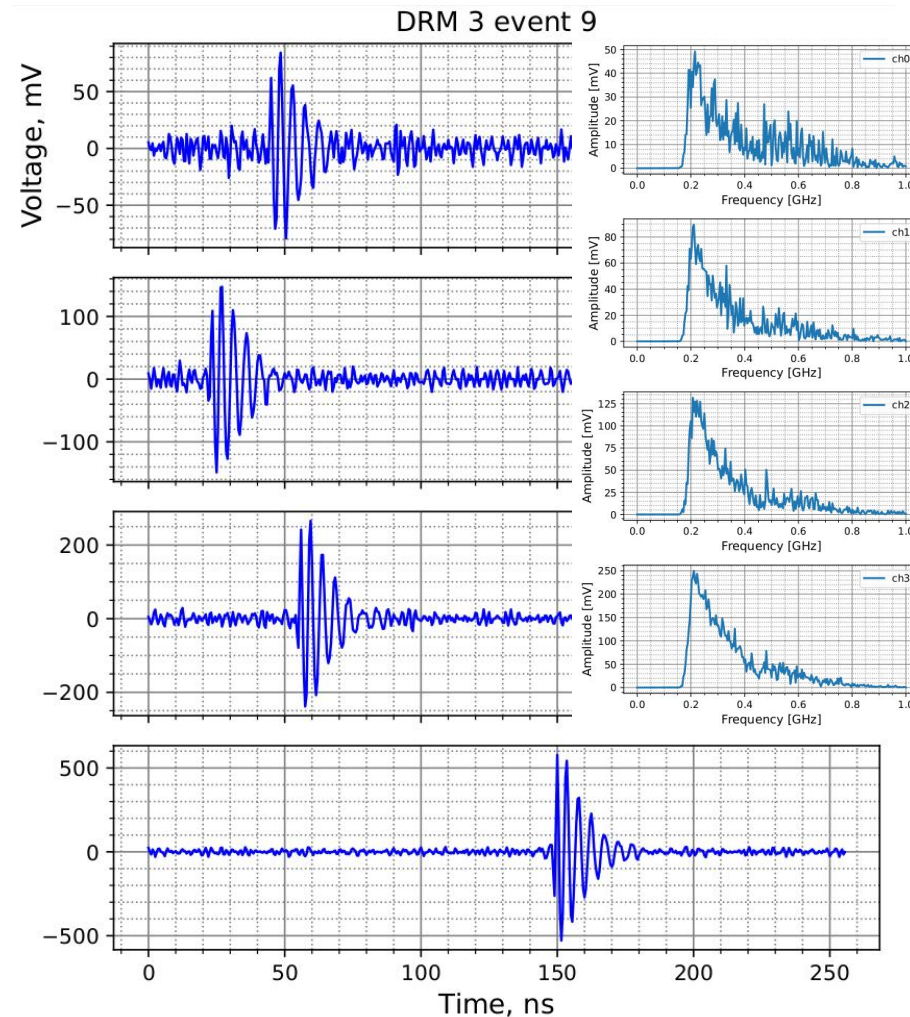
- наносекундные широкополосные (10 MHz — 1GHz) импульсы от ливня с энергией 1 EeV (сигналы разнесены по времени)



J. A. Aguilar et al. (RNO-G Collaboration), JINST 16 P03025 2021.

$$\frac{\varepsilon_c^{1m}}{\text{V/m/MHz}}(E_{sh}, f) = 2.53 \times 10^{-7} \cdot \frac{E_{sh}}{\text{TeV}} \cdot \frac{f}{f_0} \cdot \frac{1}{1 + (\frac{f}{f_0})^{1.44}}$$

Моделирование сигналов от нейтрино с энергией  $10^{19}$  эВ в 4х каналах радиомодуля



Параметризация Alvarez2000



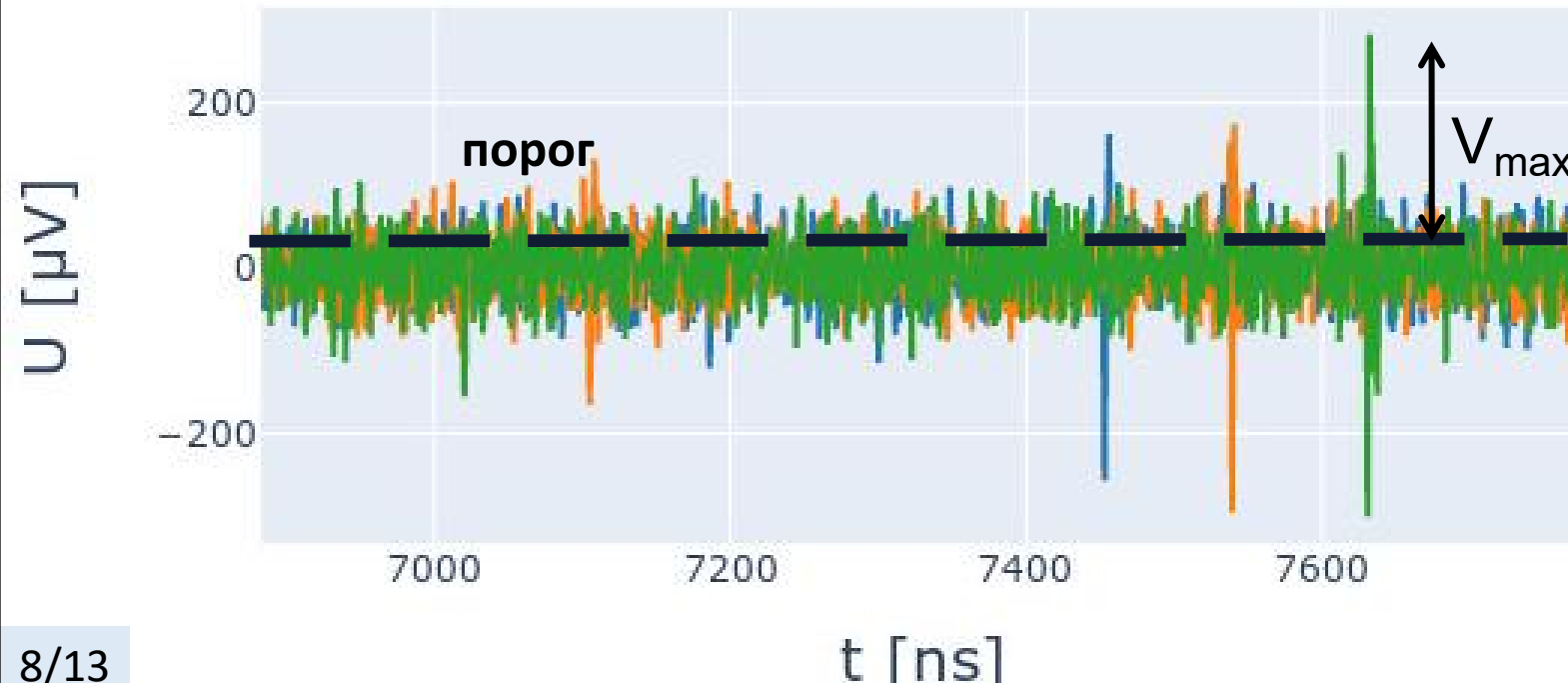
# Анализ данных 2009-2011 гг

	Данные 2009 – 2011 гг		
радио—кластер	Sally	Danielle	Doris
Начальное кол-во триггеров	~ 11 млн.	~ 7.8 млн.	~ 5.5 млн.
$V_{max} > 5\sigma_{noise}$	25%	27%	31%

- Для отбора событий были разработаны критерии отбора, первым из которых - условие:

$$V_{max} > 5\sigma_{noise}$$

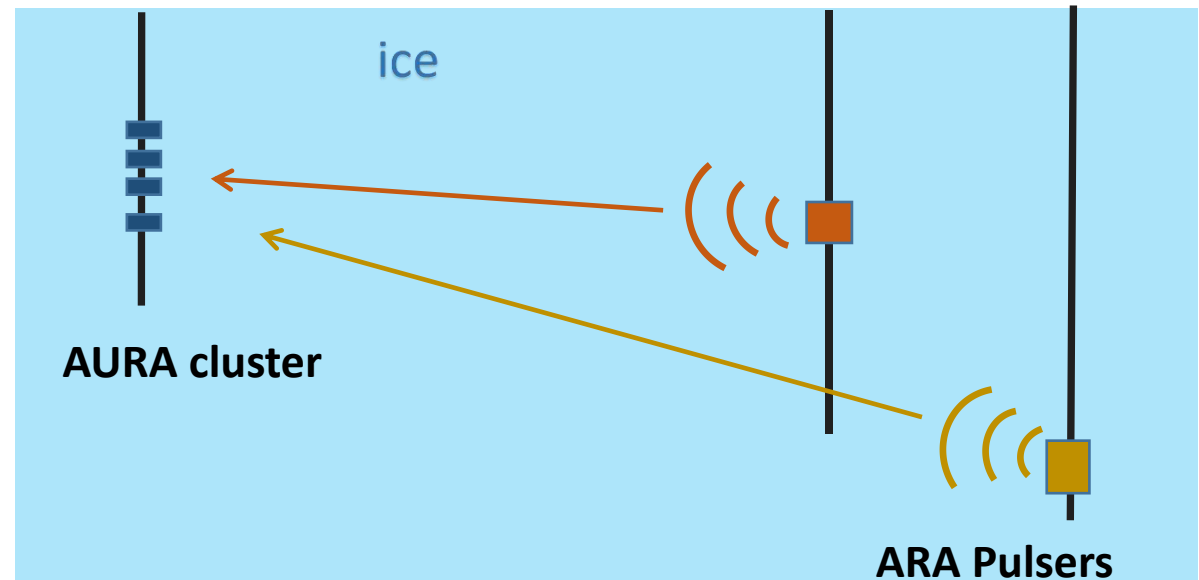
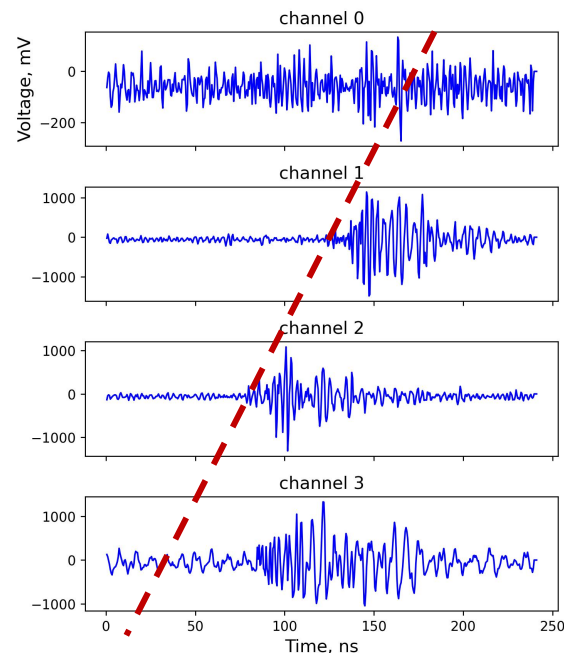
- подавления тепловых шумов



# Анализ данных 2009-2011 гг

радио—кластер	Данные 2009 – 2011 гг			Сигналы от генераторов		
	Sally	Danielle	Doris	Sally	Danielle	Doris
Начальное кол-во триггеров	~ 11 млн.	~ 7.8 млн.	~ 5.5 млн.	23	82	271
$V_{max} > 5\sigma_{noise}$	25%	27%	31%	$91_{-19}^{+9}\%$	$98_{-11}^{+2}\%$	$100_{-6}^{+0}\%$
Реконструкция $\theta$	10.3%	18%	28%	$87_{-19}^{+13}\%$	$95_{-11}^{+5}\%$	$96_{-6}^{+4}\%$

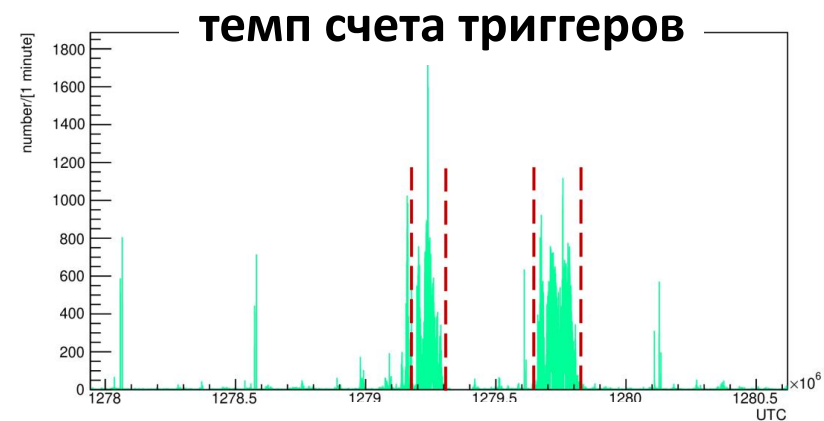
- Наличие определенного угла прихода - дополнительное подавление тепловых шумов



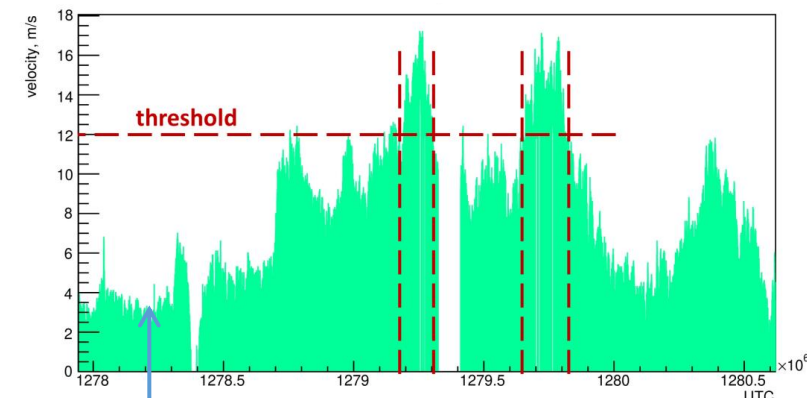
Калибровка по сигналам генератора

# Анализ данных 2009-2011 гг

	Данные 2009 – 2011 гг		
радио—кластер	Sally	Danielle	Doris
Начальное кол-во триггеров	~ 11 млн.	~ 7.8 млн.	~ 5.5 млн.
$V_{max} > 5\sigma_{noise}$	25%	27%	31%
Реконструкция $\theta$	10.3%	18%	28%
Искл. постоянных шумов	10.0%	10%	18%
Искл. зашумленных дней	0.4%	1.2%	6%



темпа счета триггеров



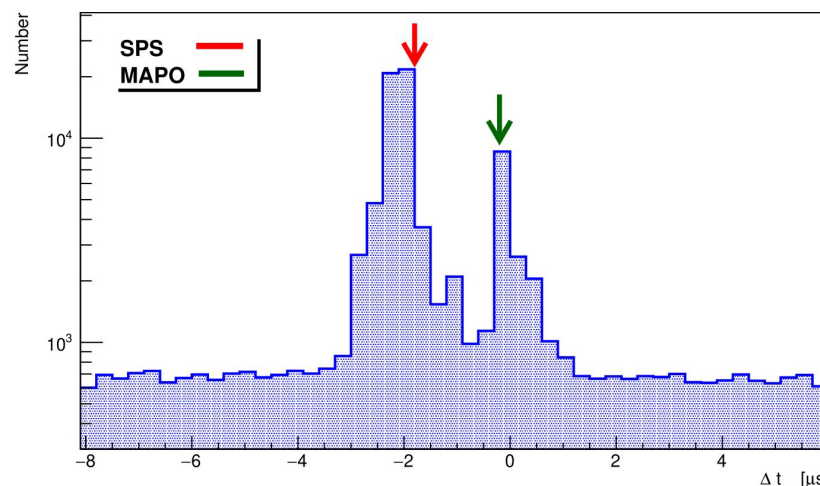
скорость ветра

Времена сильного ветра сопровождаются повышением темпа счета

Распределение задержек сигналов между DRM-ами позволяет выявить ист-к шумов

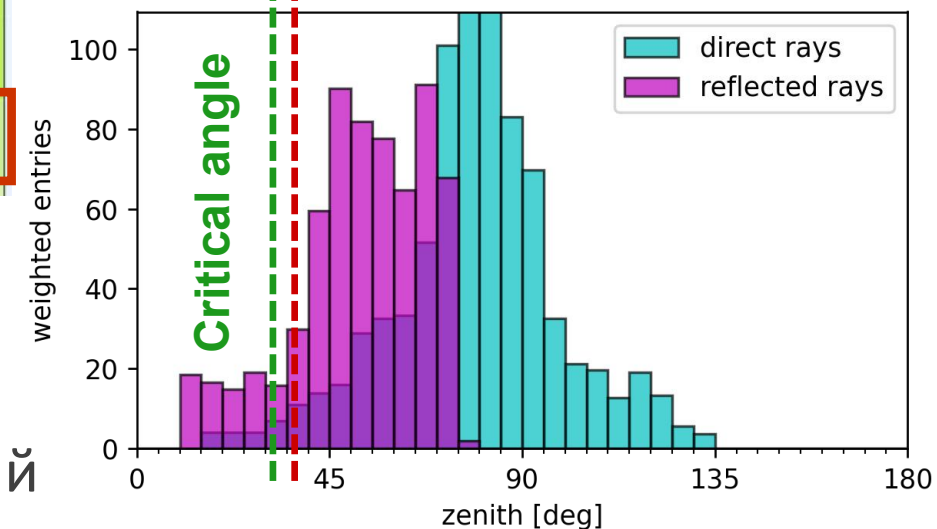
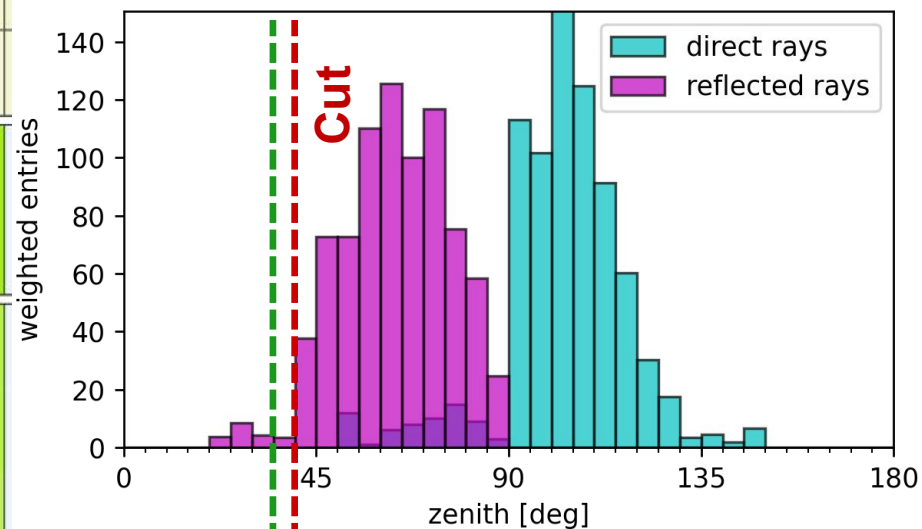


Delays between Danielle and Doris 2009



# Анализ данных 2009-2011 гг

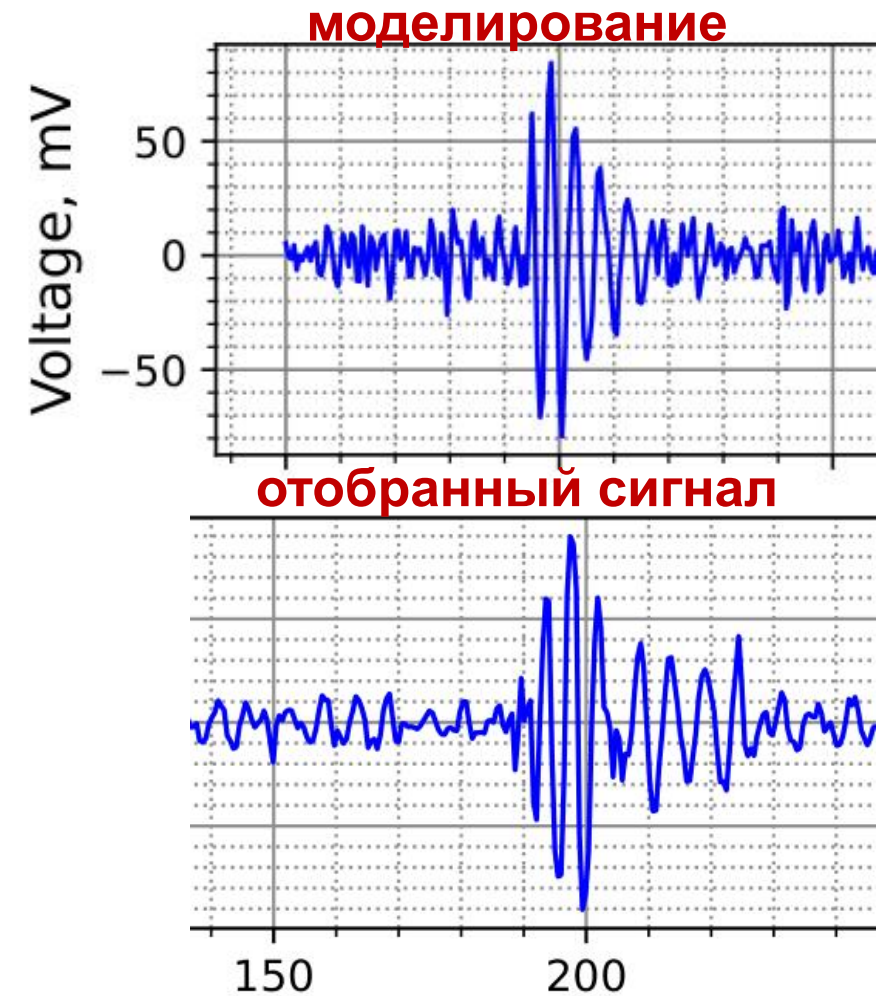
	Данные 2009 – 2011 гг		
радио—кластер	Sally	Danielle	Doris
Начальное кол-во триггеров	~ 11 млн.	~ 7.8 млн.	~ 5.5 млн.
$V_{max} > 5\sigma_{noise}$	25%	27%	31%
Реконструкция $\theta$	10.3%	18%	28%
Искл. постоянных шумов	10.0%	10%	18%
Искл. зашумленных дней	0.4%	1.2%	6%
$\theta > 40^\circ$	0.009%	0.10%	1.6%



Большинство радиоимпульсов от нейтрино приходит в детектор под углами меньше критического ( $35^\circ$ ), что позволяет исключить большинство поверхностных событий по направлению прихода сигналов в радио-кластер

# Анализ данных 2009-2011 гг

радио—кластер	Данные 2009 – 2011 гг		
	Sally	Danielle	Doris
Начальное кол-во триггеров	~ 11 млн.	~ 7.8 млн.	~ 5.5 млн.
$V_{max} > 5\sigma_{noise}$	25%	27%	31%
Реконструкция $\theta$	10.3%	18%	28%
Искл. постоянных шумов	10.0%	10%	18%
Искл. зашумленных дней	0.4%	1.2%	6%
$\theta > 40^\circ$	0.009%	0.10%	1.6%
Искл. шаблонных событий	0.007%	0.016%	0.12%
Анализ характ-к сигналов	<0.003%	<0.006%	<0.015%



Характеристики сигнала: длительность, амплитуда, нарастание фронта, частотный спектр

# Верхний предел диффузного потока нейтрино

$$E^2 \Phi(E) \leq \frac{FC_{90} E L(E)}{\ln 10 d \log E V_{\text{eff}} \sum_i (\epsilon_i t_i)}$$

- $E$  - энергия нейтрино,
- $d \log E = 1$  ширина бина (установленная на 1 декаду)
- $V_{\text{eff}}$  - эффективный объем 1 станции
- $L$  - длина взаимодействия
- $t_i$  - время работы станции
- $\epsilon_i$  - эффективность анализа для станции
- $FC_{90} = 2.44$  - the Feldman Cousins 90% confidence upper limit

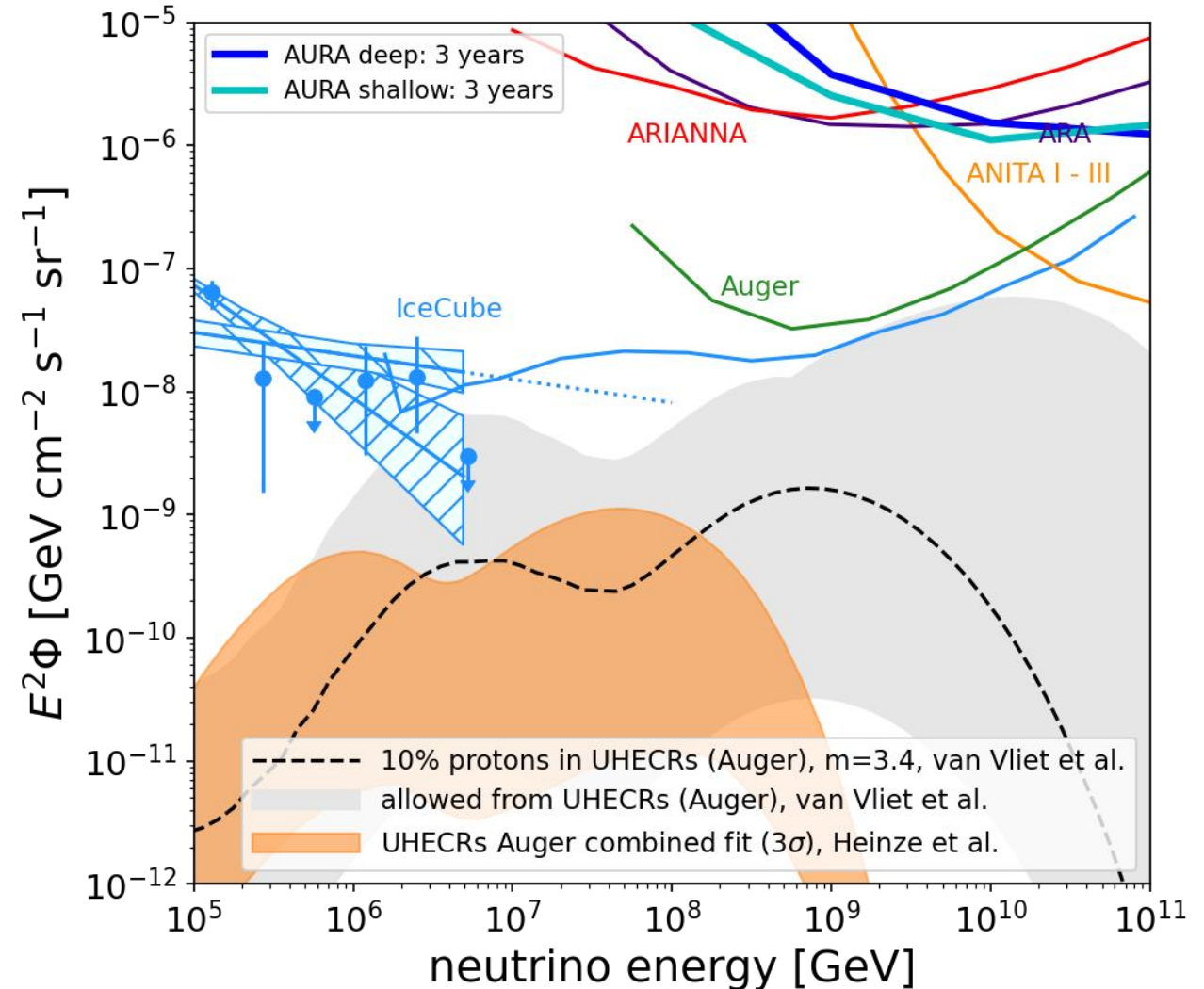
Срание с другими экспериментами:

ARIANNA 7.96 станций × лет [1]

ARA 7.5 месяца данных, 2 станции [2]

ANITA 3 полета [3]

модели потоков космогенных нейтрино [4,5]



**Спасибо за внимание!**

## Ссылки

- [1] [A. Anker et al JCAP03\(2020\)053](#)
- [2] [Allison P. et al. \(ARA Collaboration\), arXiv:1809.04573, 2018](#)
- [3] ANITA collaboration, Phys. Rev. D 98 (2018) 022001 [[arXiv:1803.02719](#)]
- [4] Vliet et al, Phys. Rev. D 100 (2019) 021302 [[arXiv:1901.01899](#)]
- [5] J. Heinze et al, Astrophys. J. 873 (2019) 88 [[arXiv:1901.03338](#)]