

Литературный обзор по теме:

**Реконструкция источника нейтрино с помощью радиочастотных
нейтринных телескопов**

**(Природные шумы в радиочастотных нейтринных телескопах и
их применение для калибровки)**

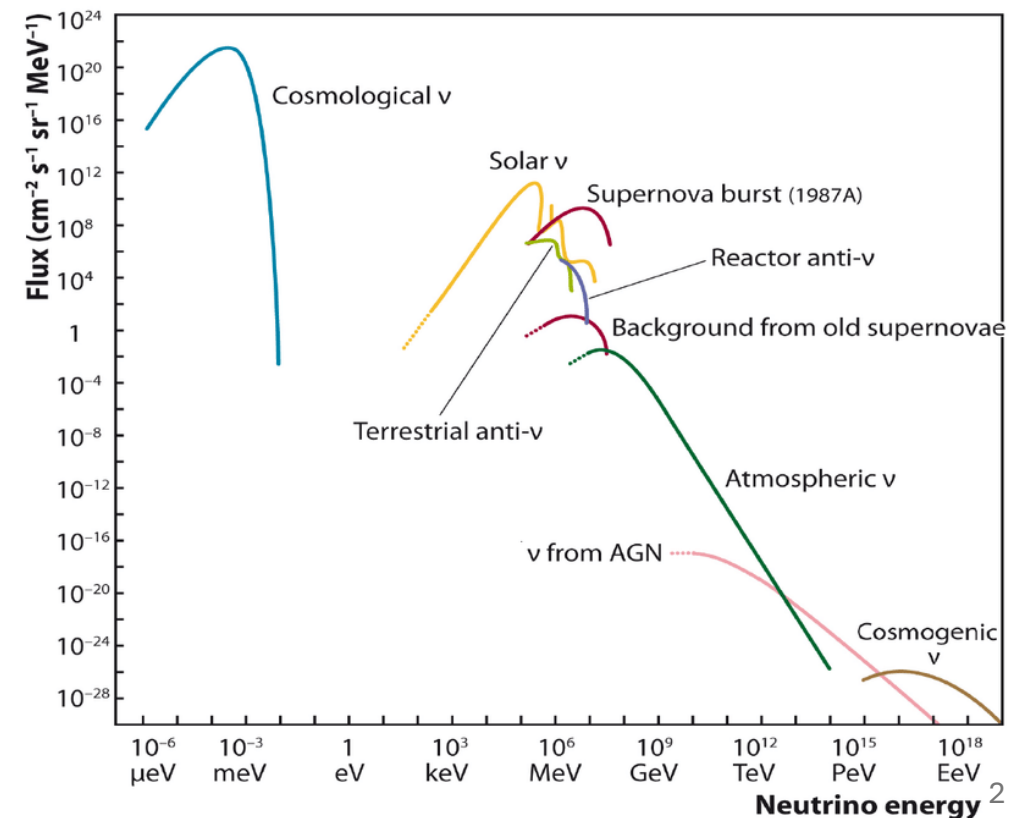
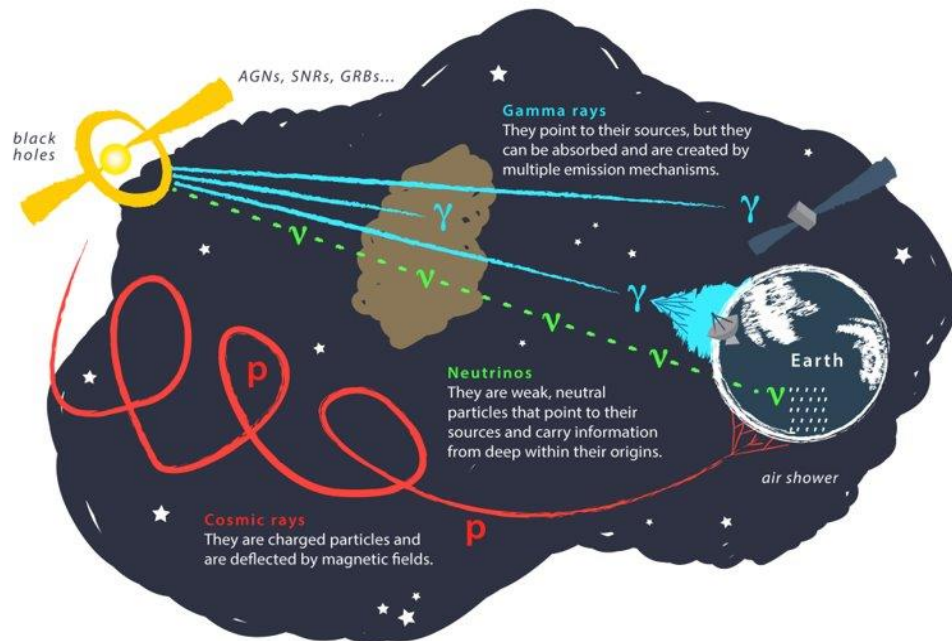
Аспирант: М.В. Михайлова

Руководитель: В.М. Грачев

Консультант: Д. Бессон

Нейтринная астрономия

- 1987 вспышка сверхновой SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке. три детектора (Kamiokande-II, IMB, Waksan) зарегистрировали поток нейтрино за несколько часов до видимого света [1]
- 2001–2002 Разрешение «Проблемы солнечных нейтрино» (SNO) [2]
- 2004 Проект IceCube - 1 км³



Астрофизические нейтрино $10^{12} \text{ эВ} < E < 10^{16} \text{ эВ}$

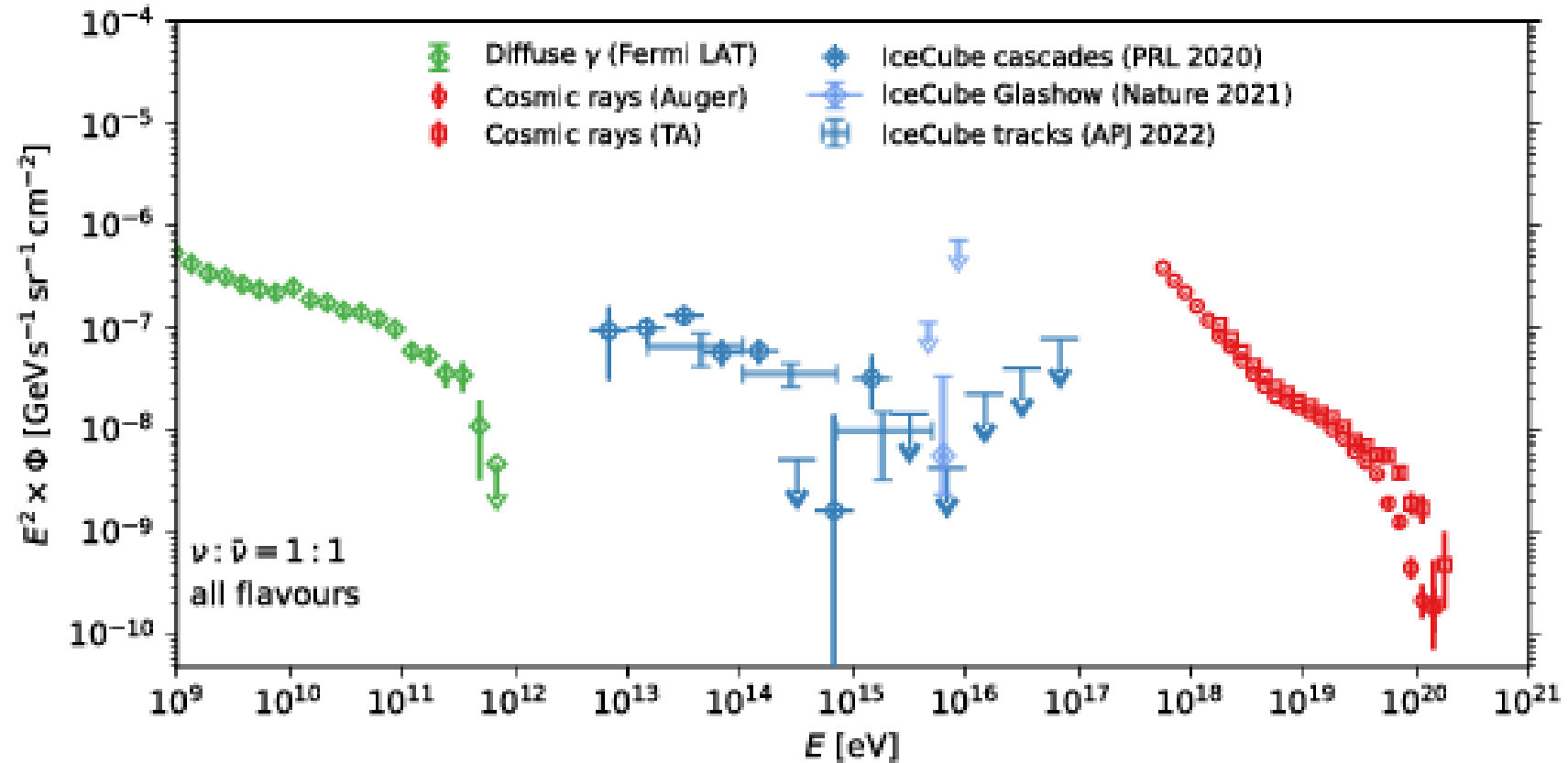
$$p \gamma \longrightarrow \Delta^+ \longrightarrow \begin{cases} p \pi^0 & , \text{ fraction } 2/3 \\ n \pi^+ & , \text{ fraction } 1/3 \end{cases}$$

$$pp \longrightarrow \begin{cases} pp \pi^0 & , \text{ fraction } 2/3 \\ pn \pi^+ & , \text{ fraction } 1/3. \end{cases}$$

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu \longrightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu$$

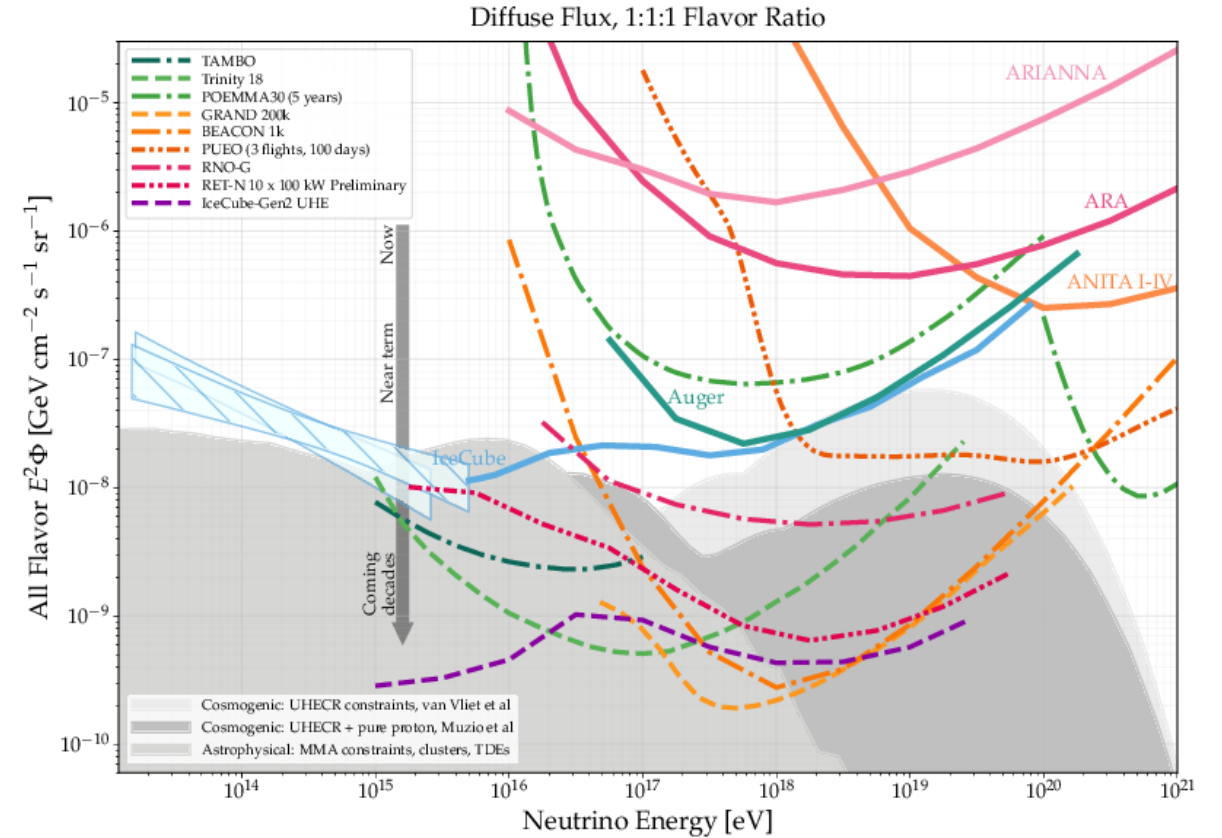
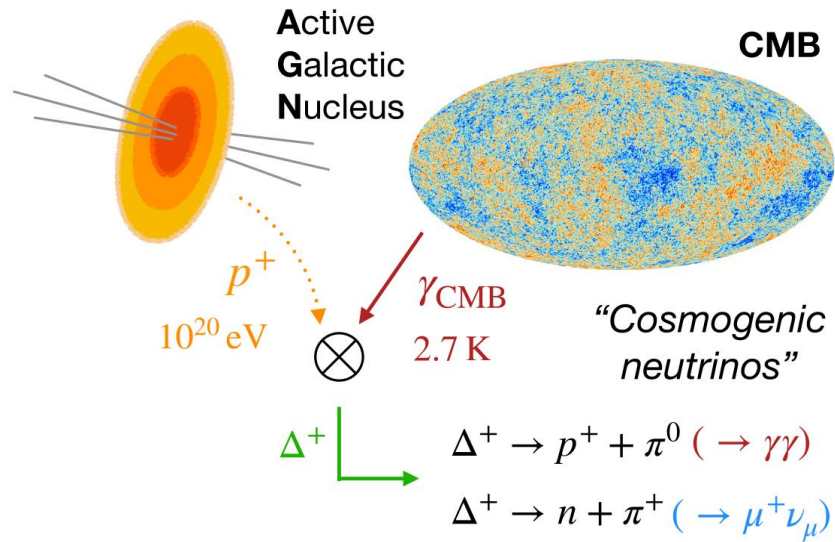
$$\pi^- \longrightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \longrightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \bar{\nu}_\mu.$$

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma \gamma.$$



- 2013: обнаружение первого диффузного потока астрофизических нейтрино, внегалактического происхождения [3]
- **2018 : TXS 0506+056** в гамма-диапазоне (FERMI-LAT, MAGIC) [4]
- 2023: нейтрино с $E \sim 100 \text{ PeV}$ в строящейся обсерватории KM3NeT/ARCA (Средиземное море) [5]

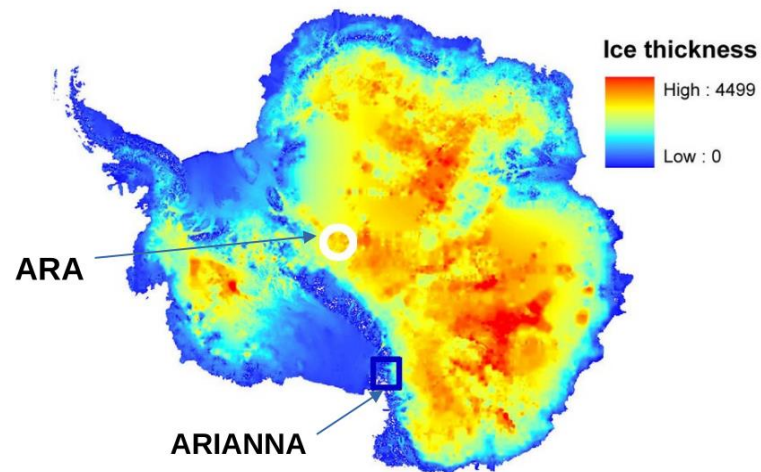
Космогенные или ГЗК-нейтрино



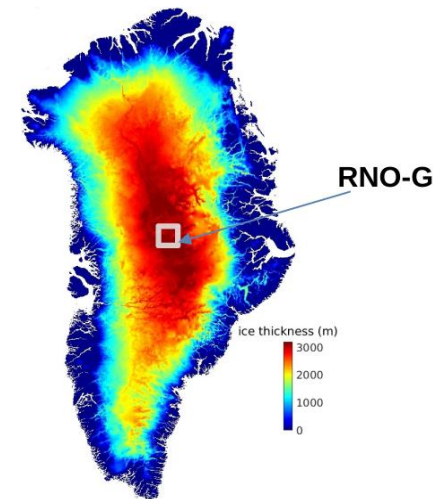
- 1966: К. Грейзен, Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин - ГЗК нейтрино [6,7]
- Энергии: $\sim 10^{16}$ эВ до $\sim 10^{21}$ эВ
- Ожидается: $O(10^{-2})$ взаимодей-й/ $\text{км}^3/\text{год}$
- Требуемый инструментальный объем: $O(100)$ км^3

Радиорегистрация во льду

- Радиопрозрачность льда: $L_{\text{atten}} (\lambda = 1\text{ м}) \sim 1.5\text{ км}$
(для оптич. диапазона $\sim 100\text{ м}$)
- Мониторинг огромных объемов льда с помощью разреженного массива радиоантенн



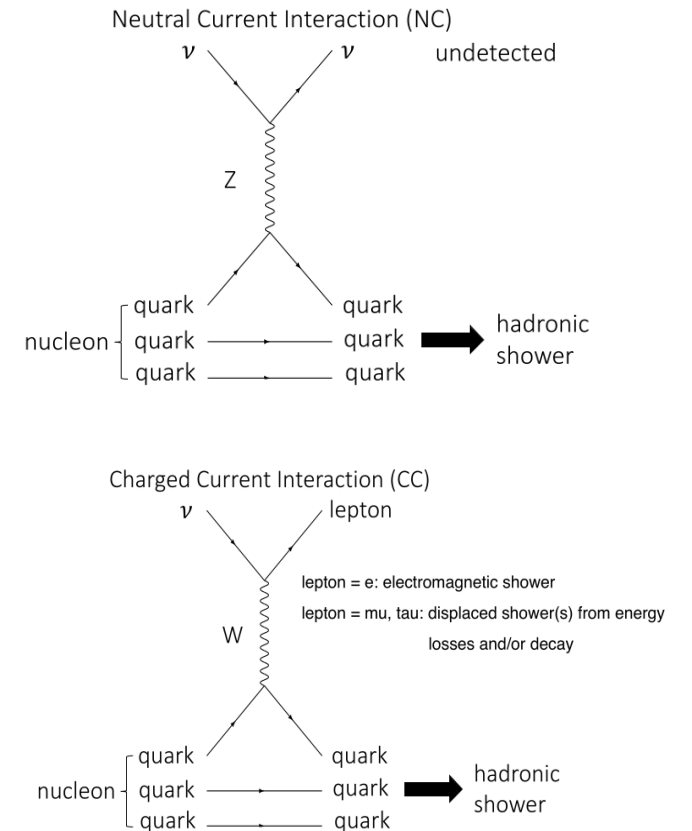
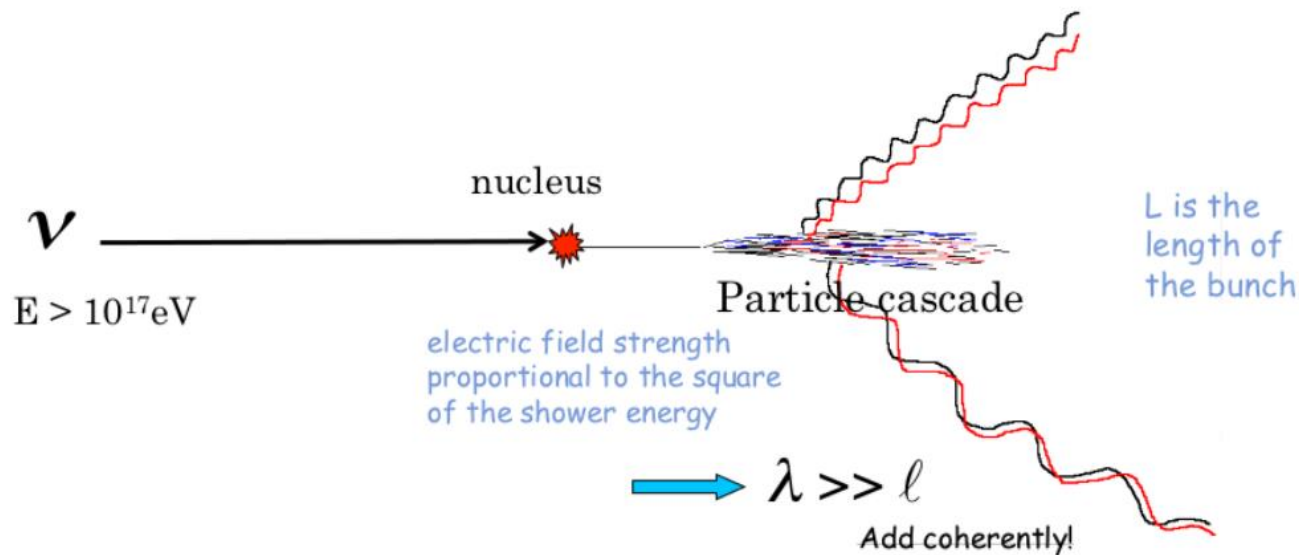
South Pole
2800 m thick ice sheet



Greenland
3000 m thick ice sheet

Эффект Аскарьяна

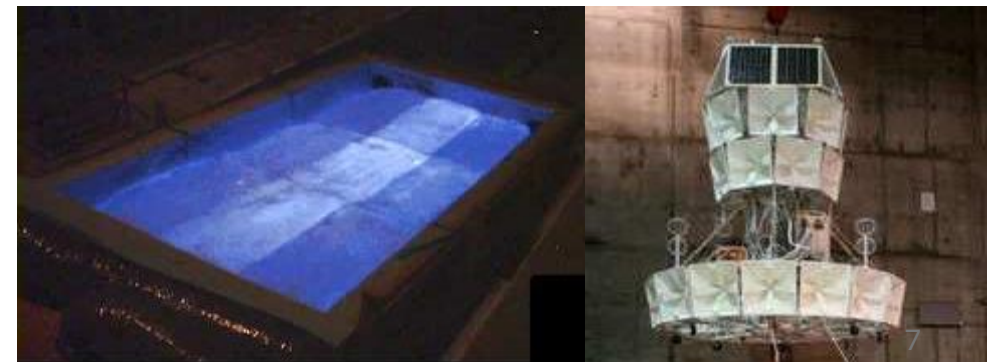
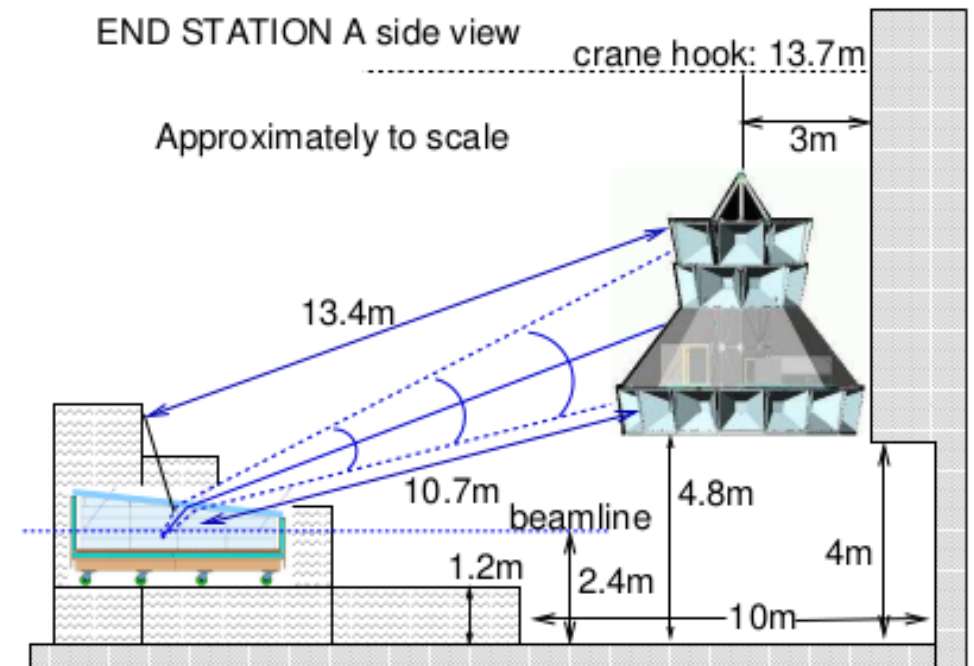
- Образование избытка электронов в каскаде ~20% (Аскарьян, 1961 [8]):
 - комптоновское рассеяния электронов
 - аннигиляция позитронов при развитии ливня
- Мощность сигнала $P_{\text{rad}} \propto E^2$



Экспериментальное подтверждение

Эксперимент SLAC T486, 2006 [9]

- мишень - чистый лед
- ливни создаются электронами 28.5 ГэВ
- пучок: 10^9 электронов за 10 пс
- полная энергия ливня 3×10^{19} eV
- EGS моделирование: зарядовая асимметрия $\sim 20\%$.
- ANITA :
 - 32 рупорные антенны (200-1200 МГц)
 - 8 антенн с вертикальной поляризацией



Радиорегистарция во льду



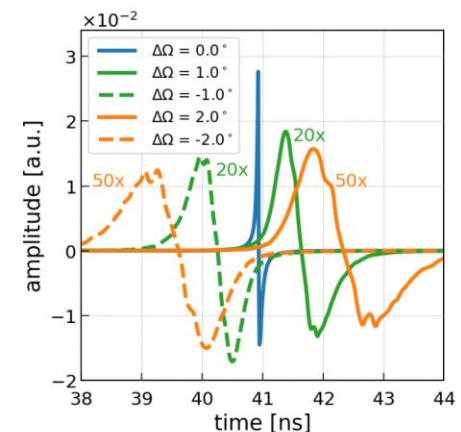
Surface

Deep

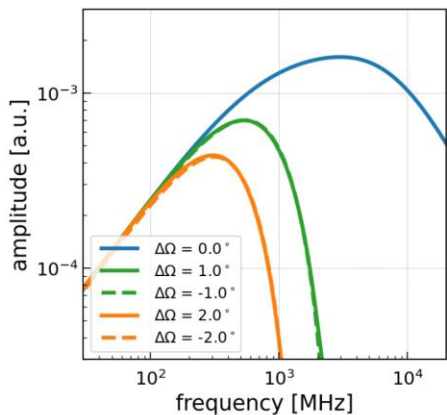
Askaryan Radiation

Neutrino ν

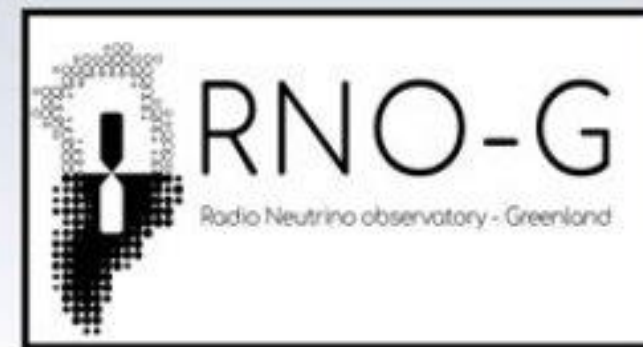
vertex



Импульсы \sim нс

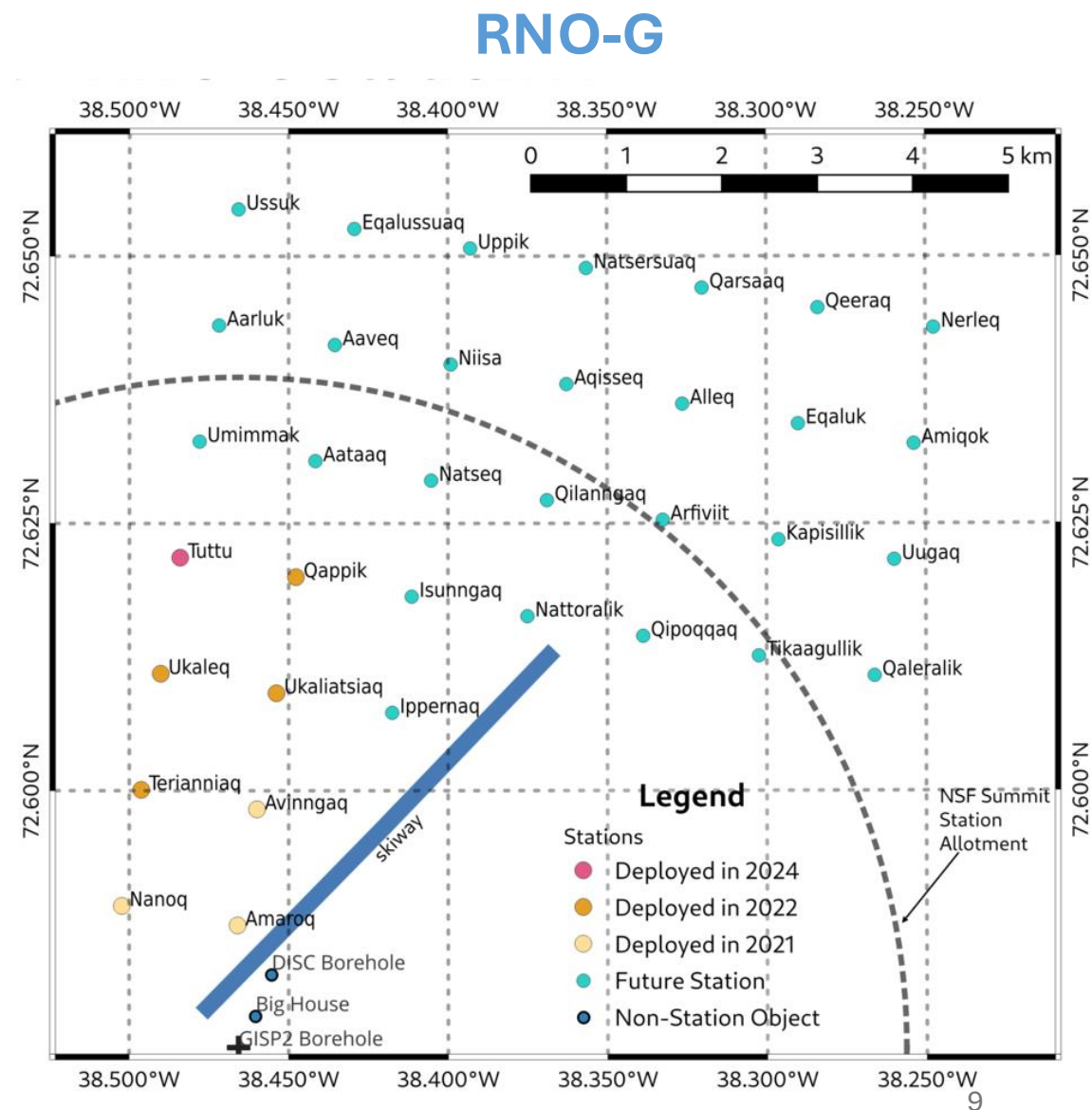
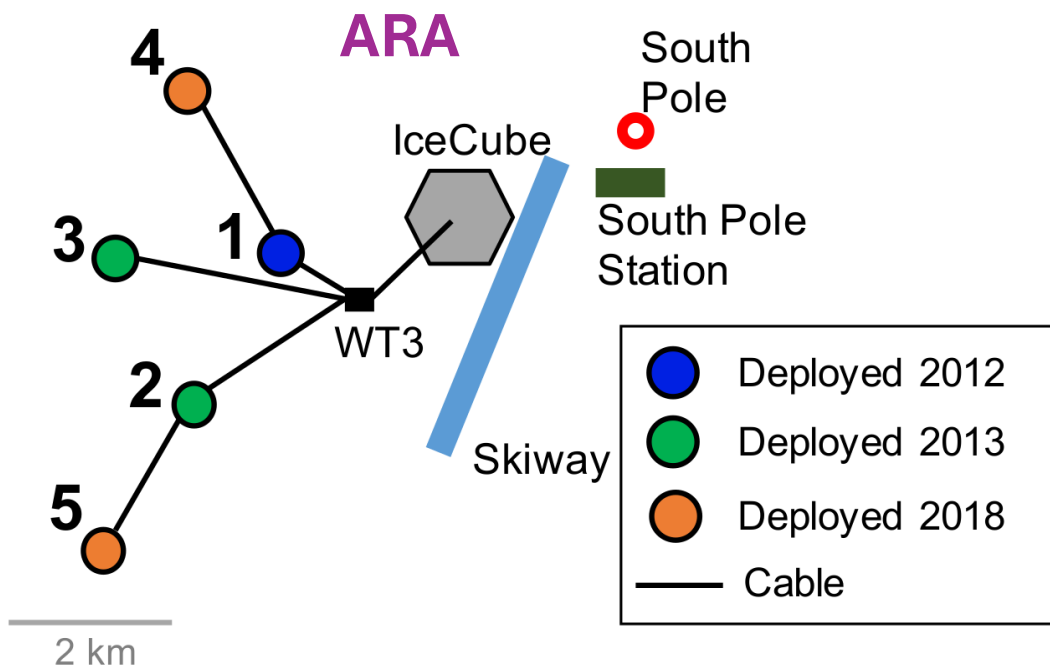


10 MHz – \sim 1 GHz



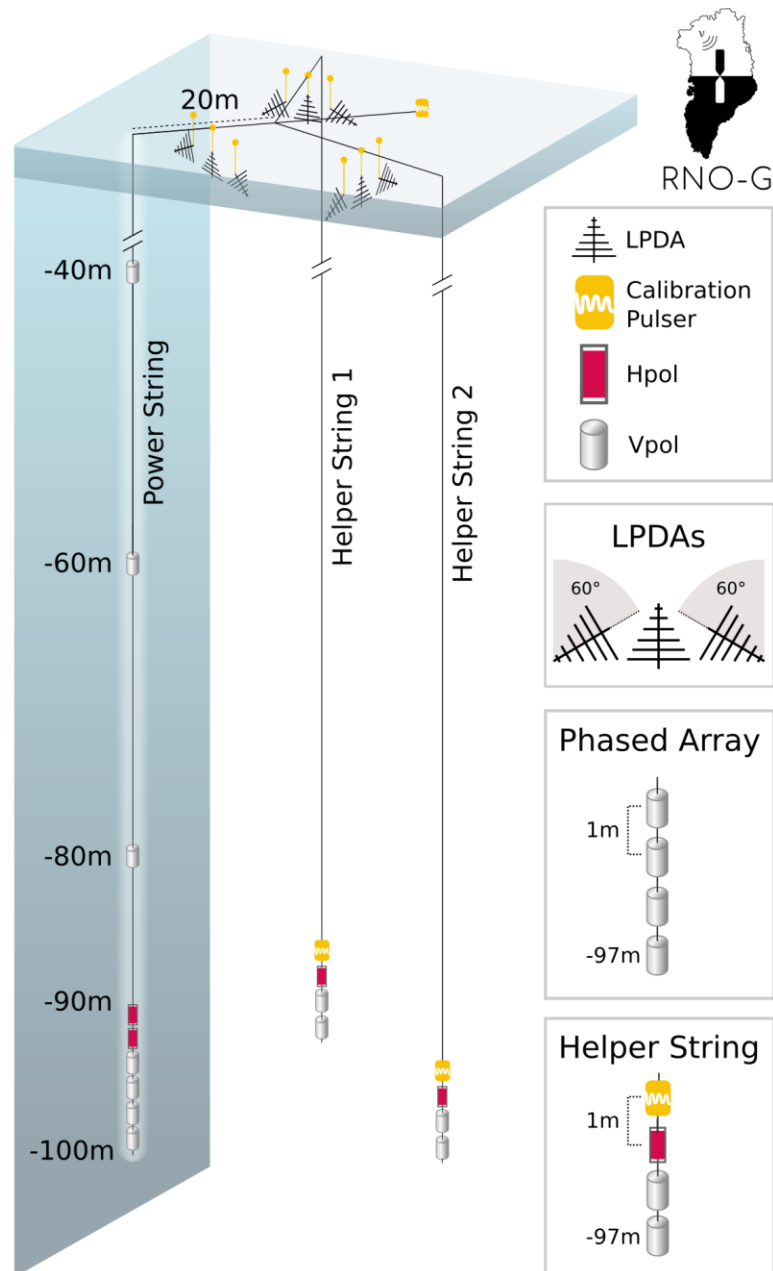
Радиодетекторы нейтрино во льду

- Эксперименты: ARA, ARIANNA, RNO-G
- Станции расположены на расстоянии нескольких километров друг от друга
- Каждая станция может независимо:
 - Обнаруживать нейтрино
 - Восстанавливать их энергию и направление



Концепция станций

**Глубокая
компонента:**
регистрация
нейтрино



**Поверхностная
компонента:**

- Регистрация КЛ
- КЛ вето

Низкопороговый (2σ) триггер с компактной фазированной антенной решеткой.

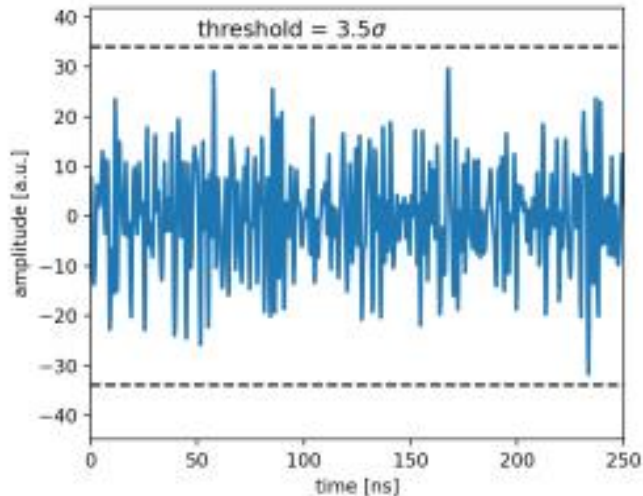
Антенны на вспомогательной гирлянде обеспечивают реконструкцию.

Фоновые условия

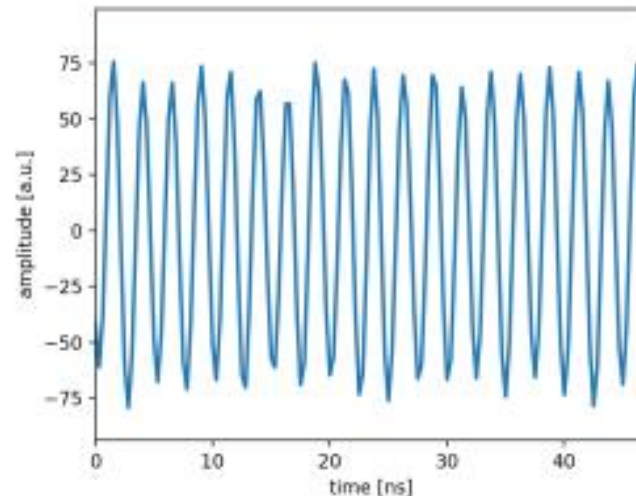
- Прогнозируемые потоки нейтрино сверхвысоких энергий и космических лучей малы
- Фоновые условия имеют огромное значение для нейтринных экспериментов

Задачи радиоэкспериментов по поиску нейтрино:

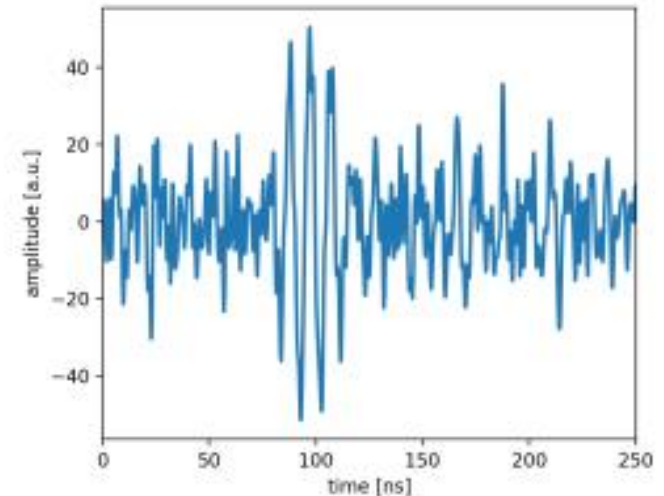
- отделить редкие события взаимодействия нейтрино от радиошума
- минимизировать шум и в то же время максимизировать эффективность регистрации



Constant background



Continuous waves



Impulsive noise signals

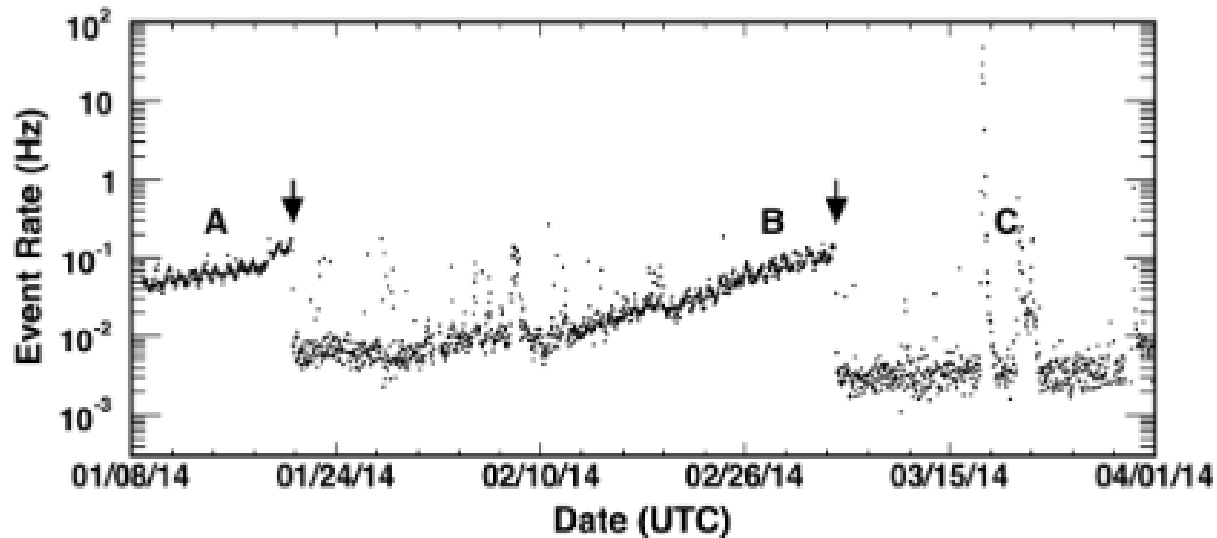
Импульсные шумы

- Антропогенный шум (радиосвязь, самолеты, ...)
- Тепловые триггеры
- Ливни от мюонов во льду
- ШАЛ (геомагнитное излучение, переходное излучение)

- **Коронные разряды во время штормов**
- **Солнечные вспышки**

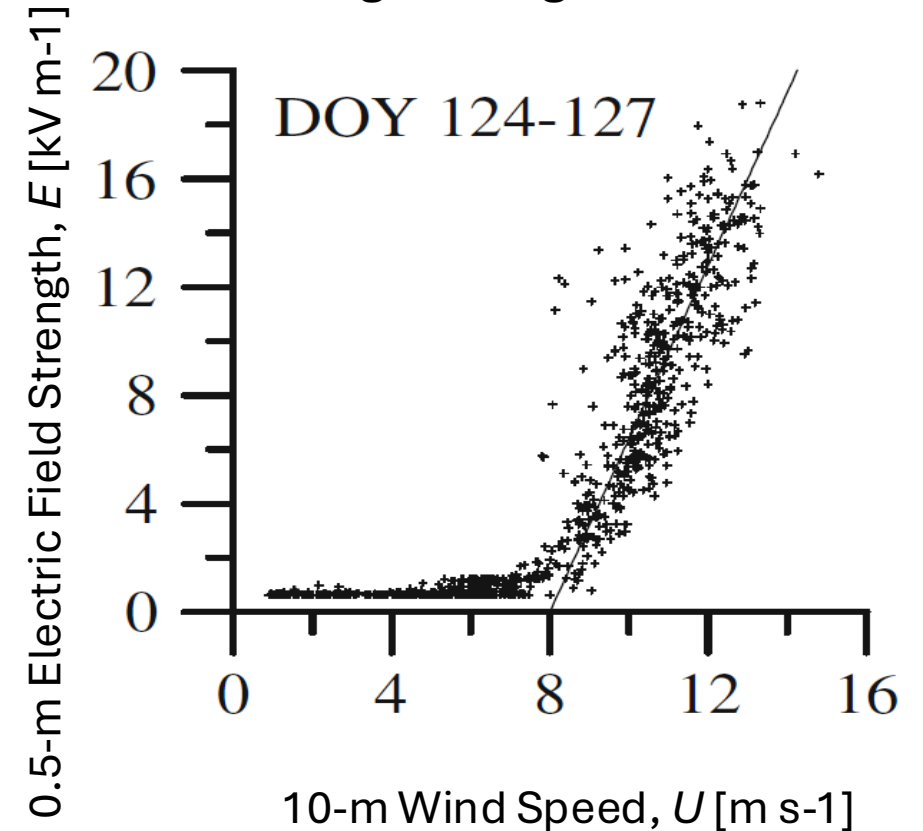
Коронные разряды во время штормов

Сильный ветер → Асимметричное трение частиц снега о поверхность льда → Разделение зарядов → Высокая напряженность электрического поля → Коронный разряд → **Радиопомехи**



ARIANNA, 2014: увеличение темпа счета (C) при ветре > 10 м/с [10]

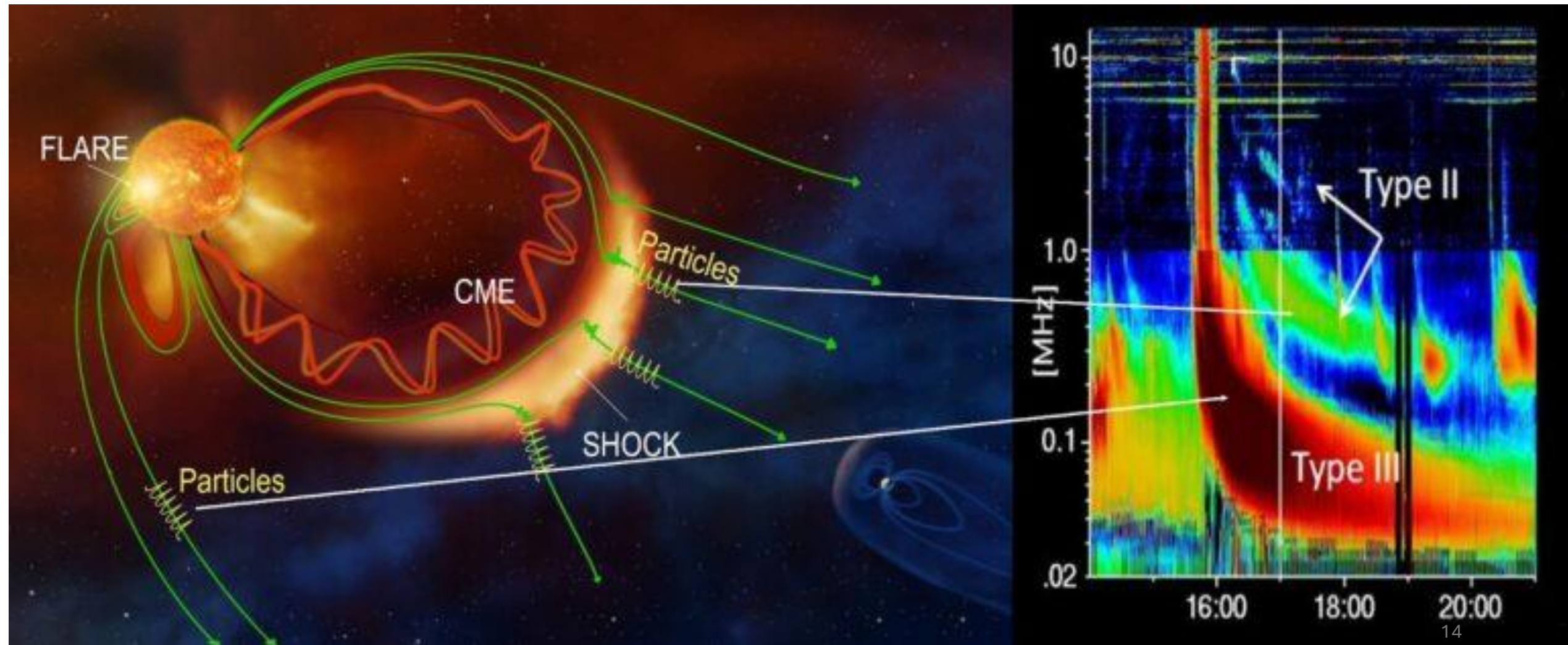
Measurements of **electric field** during blowing snow events



[Mark Gordon · Peter A. Taylor.
[Boundary-layer meteorology 130 \(2009\)](#)]

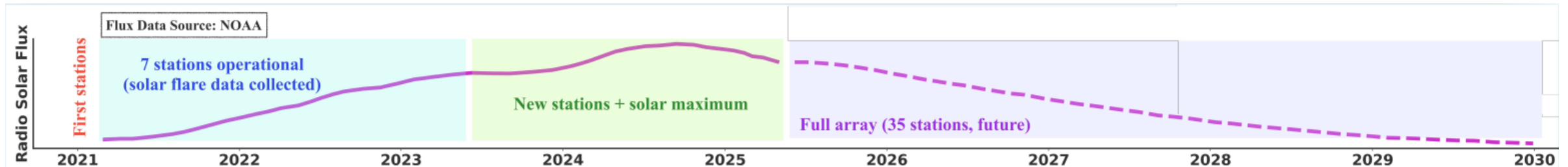
Солнечные радиовсплески

Солнечные радиовсплески обычно связаны со вспышечной активностью и классифицируются на основе спектральных и временных характеристик на 5 основных типов



Солнечные всплески в нейтринных радиодетекторах

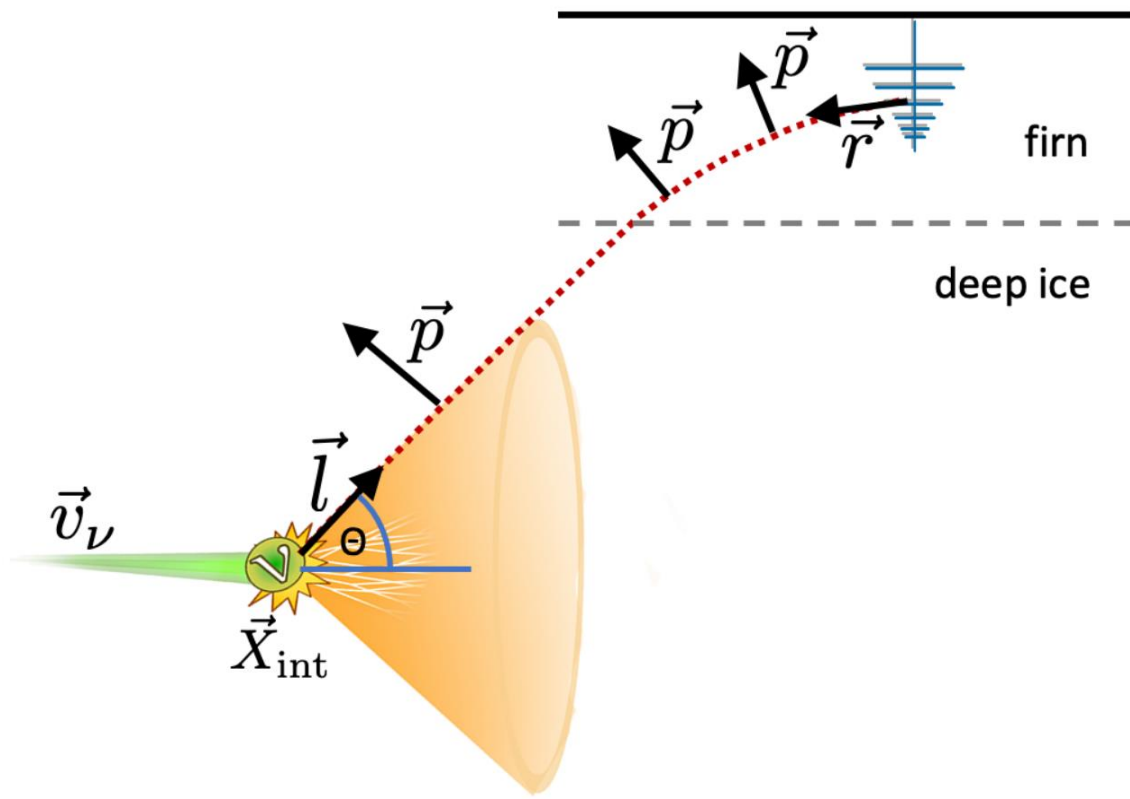
- 13 февраля 2011: В поверхностных антеннах ARA наблюдалось резкое повышение мощности, согласующиеся по времени с данными спектрометра солнечных радиовспышек GBSRBS [11].
- 15 февраля 2011: были зарегистрированы события от вспышки, которые прошли критерии отбора нейтрино [12]
- RNO-G (Гренландия) размещение станций приходится на период максимума солнечной активности



Калибровка детектора по солнечным радио всплескам

Реконструкция направления нейтрино

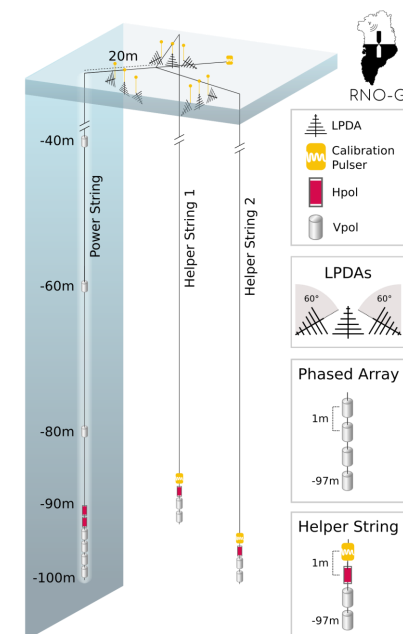
- поляризация сигнала
- направление прихода
- угол наблюдения



Калибровка

- абсолютная ориентация станций
- положение антенн (наклон скважин)
- модель льда

повышение точности реконструкции направления



Заключение

- Радиометод эффективен для регистрации нейтрино сверхвысоких энергий во льду
- Текущая самая большая радиообсерватория RNO-G (8 станций из 35) стремится достичь площади в 50 км^2 , чтобы обнаружить поток космогенных нейтрино
- Из-за низкой ожидаемой частоты взаимодействий нейтрино, требуется тщательное понимание всевозможных радиошумов в детекторе
- Некоторые источники фона можно использовать для калибровки детектора

Список литературы

1. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A / K. Hirata [и др.] // Physical Review Letters. — 1987. — т. 58, № 14. — с. 1490.
2. Ahmad Q. R. et al. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory //Physical review letters. – 2002. – Т. 89. – №. 1. – С. 011301.
3. M. Ackermann, M. Bustamante, L. Lu, N. Otte, et al. High-energy and ultra-high-energy neutrinos: A snowmass white paper. Journal of high energy astrophysics, 36:55–110, 2022.
4. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert / M. Aartsen [et al.] // Science. — 2018. — Vol. 361, no. 6398. — P. 147–151
5. Neronov A., Oikonomou F., Semikoz D. KM3-230213A: An ultrahigh energy neutrino from a year-long astrophysical transient //Physical Review D. – 2026. – Т. 113. – №. 8. – С. 083024.
6. Greisen K. End to the cosmic-ray spectrum? // Physical Review Letters. — 1966. — Vol. 16, no. 17. — P. 748.
7. Zatsepin G. T., Kuzmin V. A. Upper limit of the spectrum of cosmic rays // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 1966. — Vol. 4. — P. 78.
8. Askaryan G. Excess negative charge of an electron-photon shower and its coherent radio emission // Soviet Physics JETP-USSR. — 1962. — Vol. 14, no. 2. — P. 441–443.
9. Observations of the Askaryan effect in ice / P. Gorham [et al.] // Physical Review Letters. — 2007. — Vol. 99, no. 17. — P. 171101.

Список литературы 2

10. Barwick S. W. et al. Design and performance of the ARIANNA HRA-3 neutrino detector systems //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2015. – Т. 62. – №. 5. – С. 2202-2215.
Design and initial performance of the Askaryan Radio Array prototype EeV neutrino detector at the South Pole / P. Allison [et al.] // Astroparticle Physics. — 2012. — Vol. 35, no. 7. — P. 457–477. (26)
11. Observation of reconstructable radio emission coincident with an x-class solar flare in the Askaryan radio array prototype station / P. Allison [et al.] // arXiv preprint arXiv:1807.03335. — 2018. (48)
12. Becker J. K. High-energy neutrinos in the context of multimessenger astrophysics // Physics Reports. — 2008. — Vol. 458, no. 4/5. — P. 173–246.
J. Aguilar, P. Allison, D. Besson, et al. Status and recent results from the Radio Neutrino Observatory in Greenland (RNO-G). PoS, ICRC2023:1043, 2023.
13. Design and sensitivity of the Radio Neutrino Observatory in Greenland (RNO-G) / J. Aguilar [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2021. — Vol. 16, no. 03. — P03025.
14. Gordon M., Taylor P. A. The electric field during blowing snow events // Boundary-layer meteorology. — 2009. — Vol. 130, no. 1. — P. 97–115.
15. Schmidt D. S., Schmidt R., Dent J. Electrostatic force in blowing snow // Boundary-Layer Meteorology. — 1999. — Vol. 93, no. 1. — P. 29–45.
16. Dulk G. A. Radio emission from the sun and stars // Annual review of astronomy and astrophysics. — 1985. — Vol. 23, no. 1. — P. 169– 224.