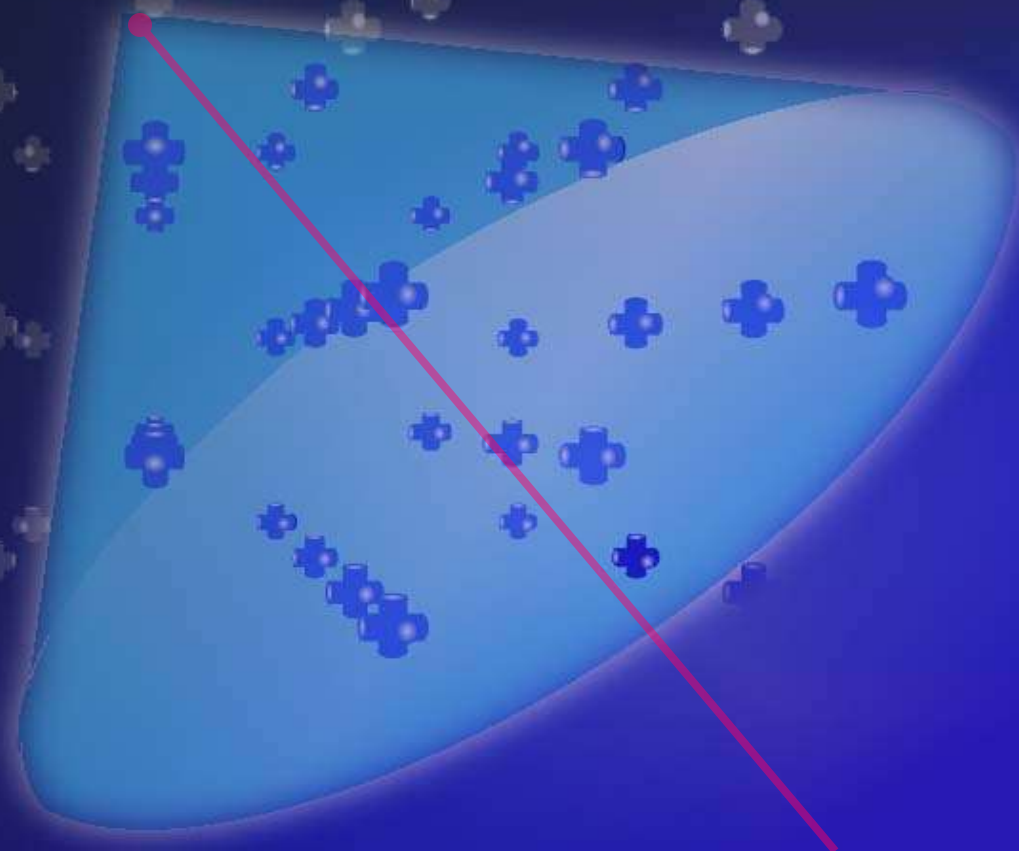


Черенковские водные детекторы

Петрухин А.А.
Яшин И.И.



- **1960 г.** - М.А.Марков – идея использовать естественные водные объемы для проведения исследований нейтрино высоких энергий
 - **70-е годы** – проект DUMAND (США)
проект Байкал (СССР)
проект НЕВОД (СССР)
 - **80-е годы** – IMB и КАМИОКАНДЕ – первые подземные ЧВД с массой > 1 кТ
 - **1987 г.** - регистрация нейтрино от вспышки сверхновой SN1987A
 - **1994 г.** - запуск НЕВОД (МИФИ, Россия)
 - **1993-1998 г.г.** - развертывание нейтринного телескопа NT200 (оз.Байкал)
 - **2000 г.** - запуск AMANDA-II (Ю.Полюс, Антарктида)
- 

Почему вода?

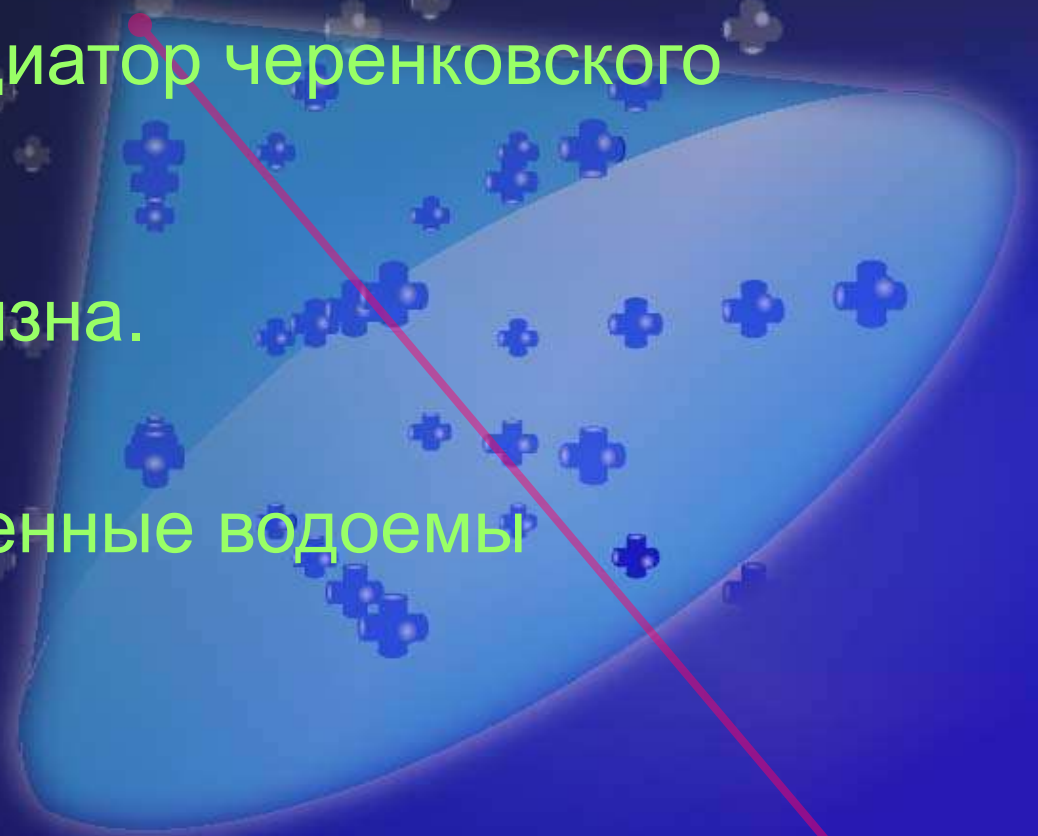
1. Энергетический спектр первичного космического излучения:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}, (\gamma \approx 2.7 \text{ для } E < 10^{15} \text{ эВ})$$

2. Одновременно радиатор черенковского излучения и мишень.

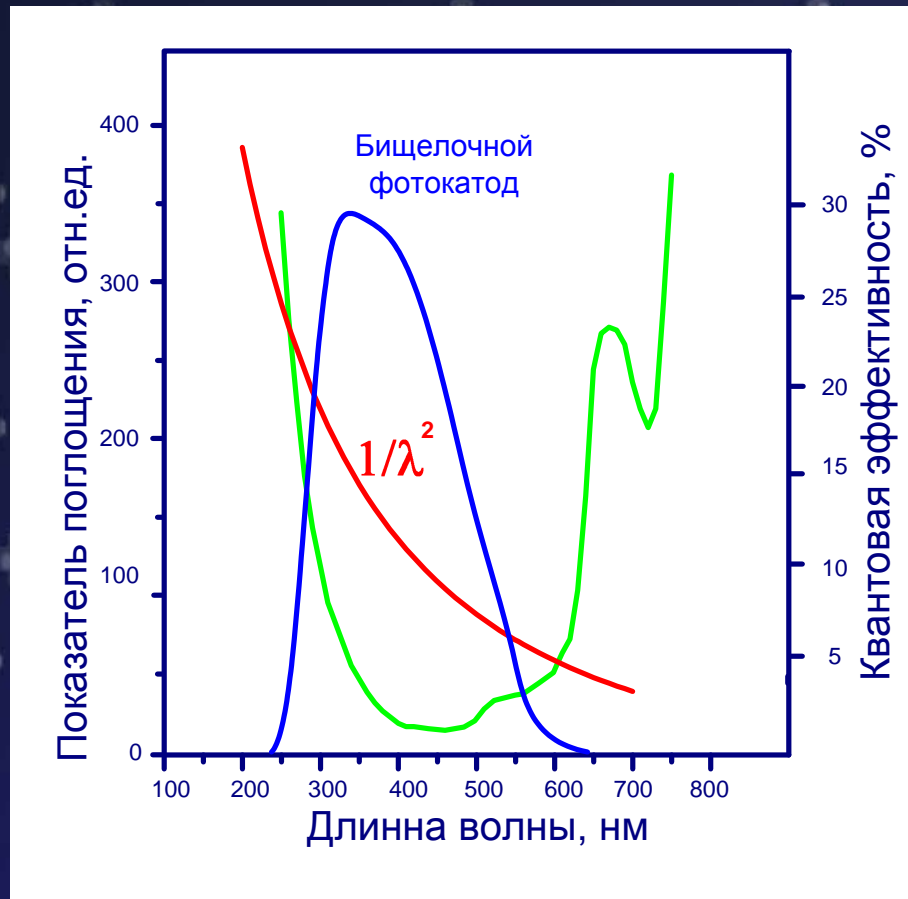
3. Простота и дешевизна.

4. Огромные естественные водоемы



Оптические свойства

Ослабление потока фотонов в воде =
поглощение + рассеяние

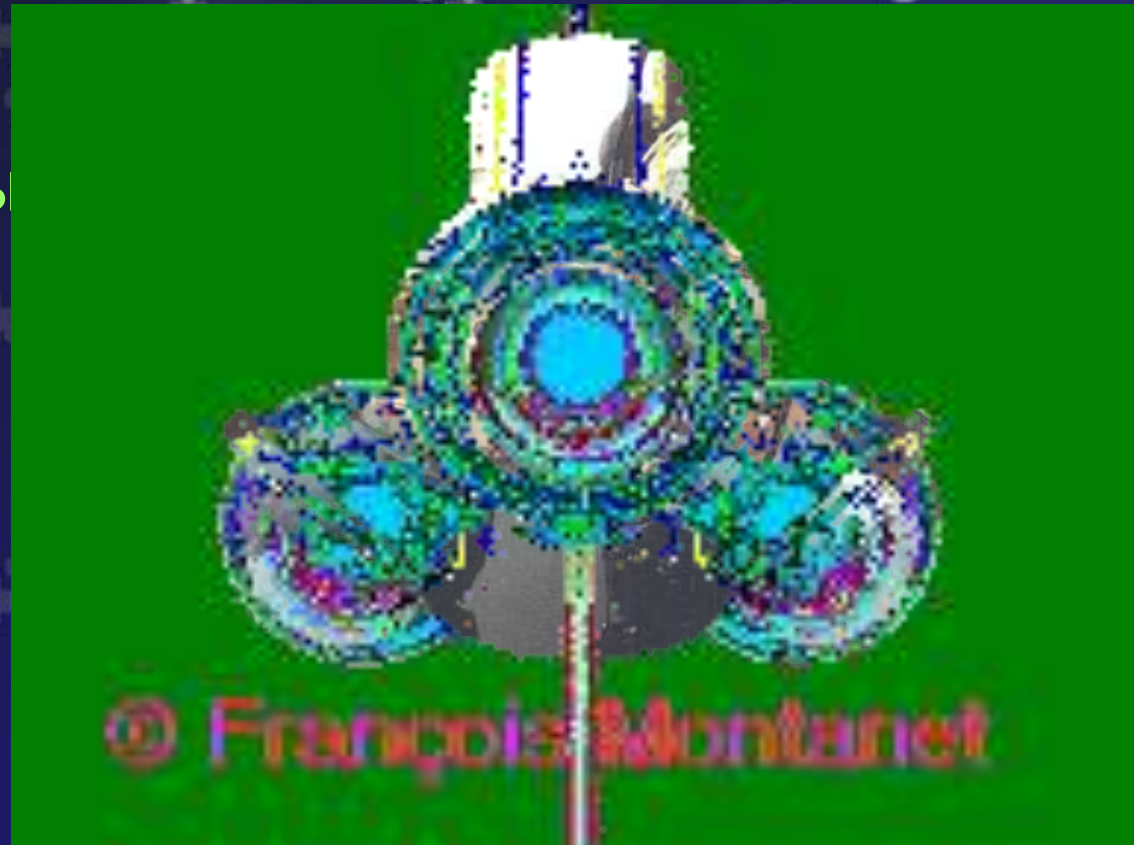


Оптические модули

- Регистрирующие модули на базе ФЭУ

Бентос-сферы

Кластерные системы

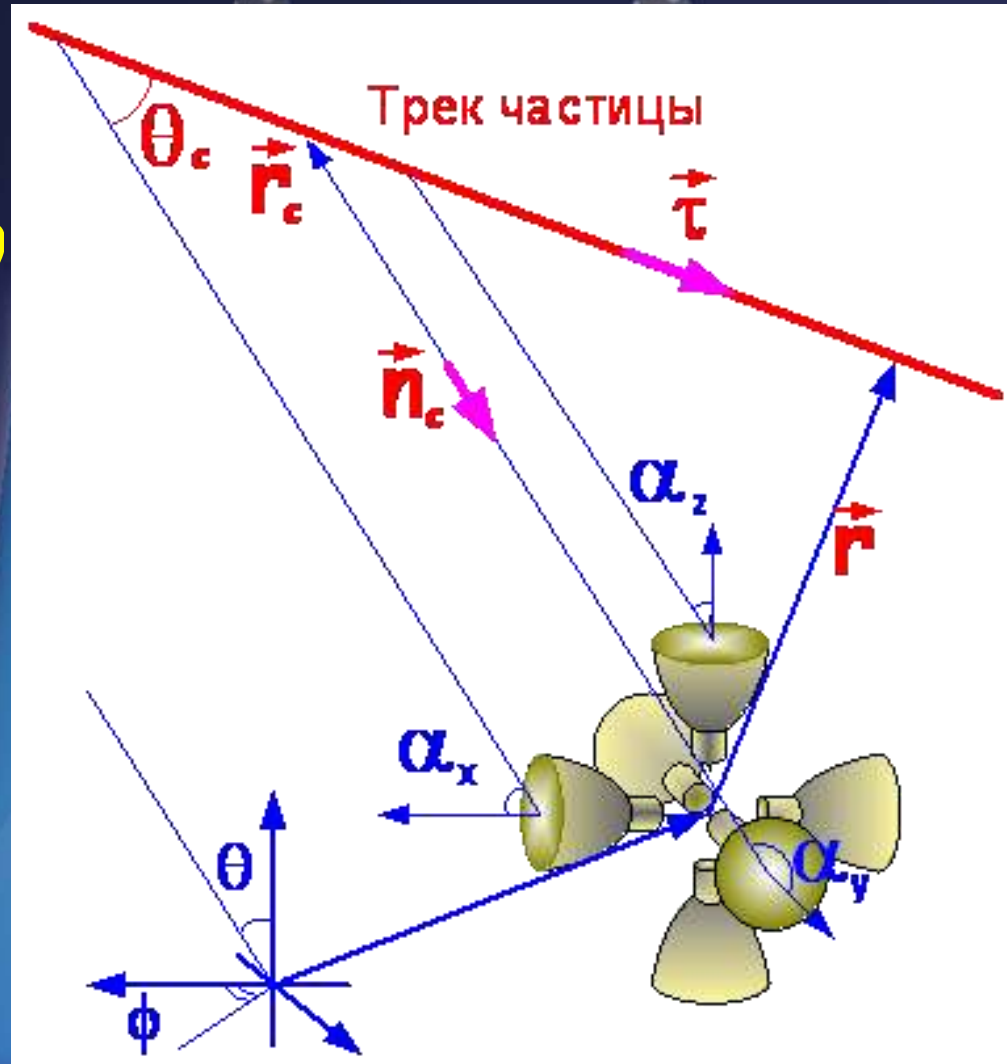


Оптические модули

Квазисферические системы на базе ФЭУ

$$A_i \approx \frac{\cos \alpha_i}{r \cdot \sin \theta_c} \exp(-r/l \cdot \sin \theta_c)$$

$$B = \sqrt{\sum_i A_i^2} = \frac{C}{r} \exp(-r/l \cdot \sin \theta_c)$$



Черенковские водные детекторы

- Наземные, подземные, глубоководные (естественные ледники)
- Регистрирующие системы: распределенные системы ФЭУ
 - Периферийные
 - Пространственные решетки
- Реконструкция:
 - Времяпролетная методика
 - Амплитудный анализ



Физические задачи

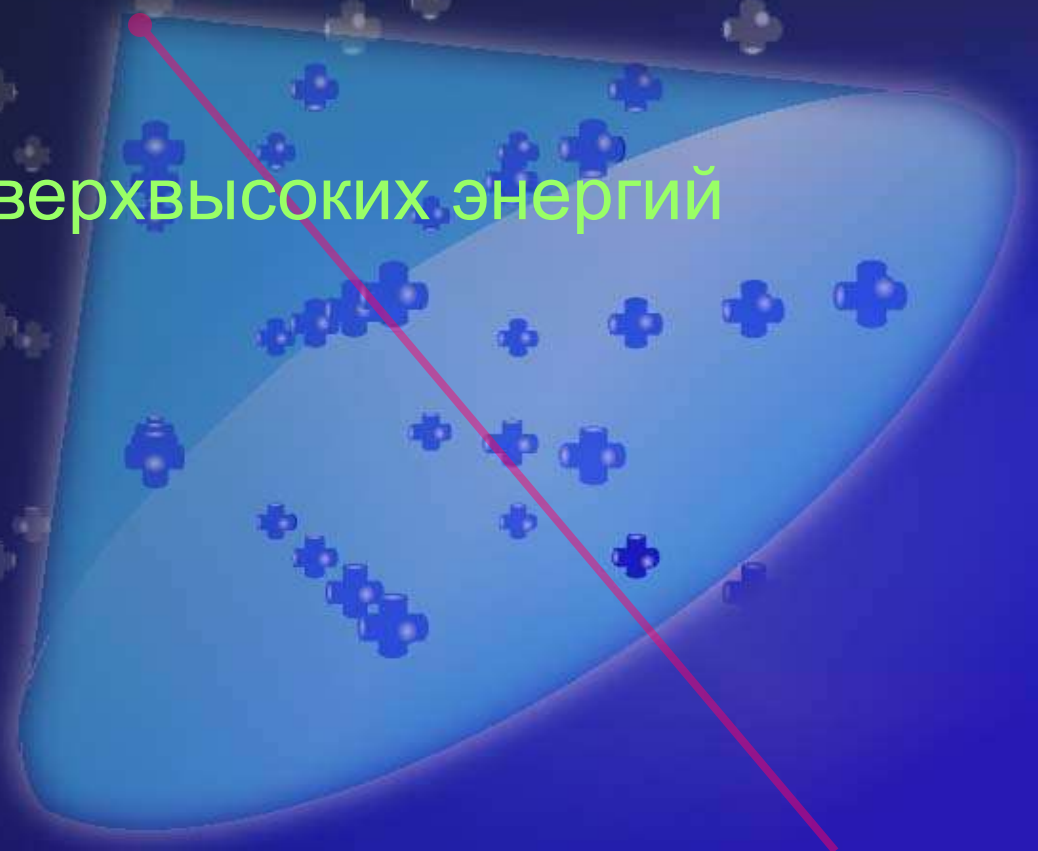
Физика частиц высоких энергий

- Распад протона $SU(5) \Rightarrow p \rightarrow e^+ + \pi^0$
 $\tau_p \sim 1.0 \times 10^{30}$ лет
1 тонна (6×10^{29} нуклонов) - 1 распад за 10 лет
 - Осцилляции нейтрино
 - Поиск магнитного монополя
 - WIMPs
 - Новая физика . . .
-

Физические задачи

Астрофизика

- Нейтринная астрофизика и астрономия
- Гамма - астрономия
- Космические лучи сверхвысоких энергий
-



Детекторы

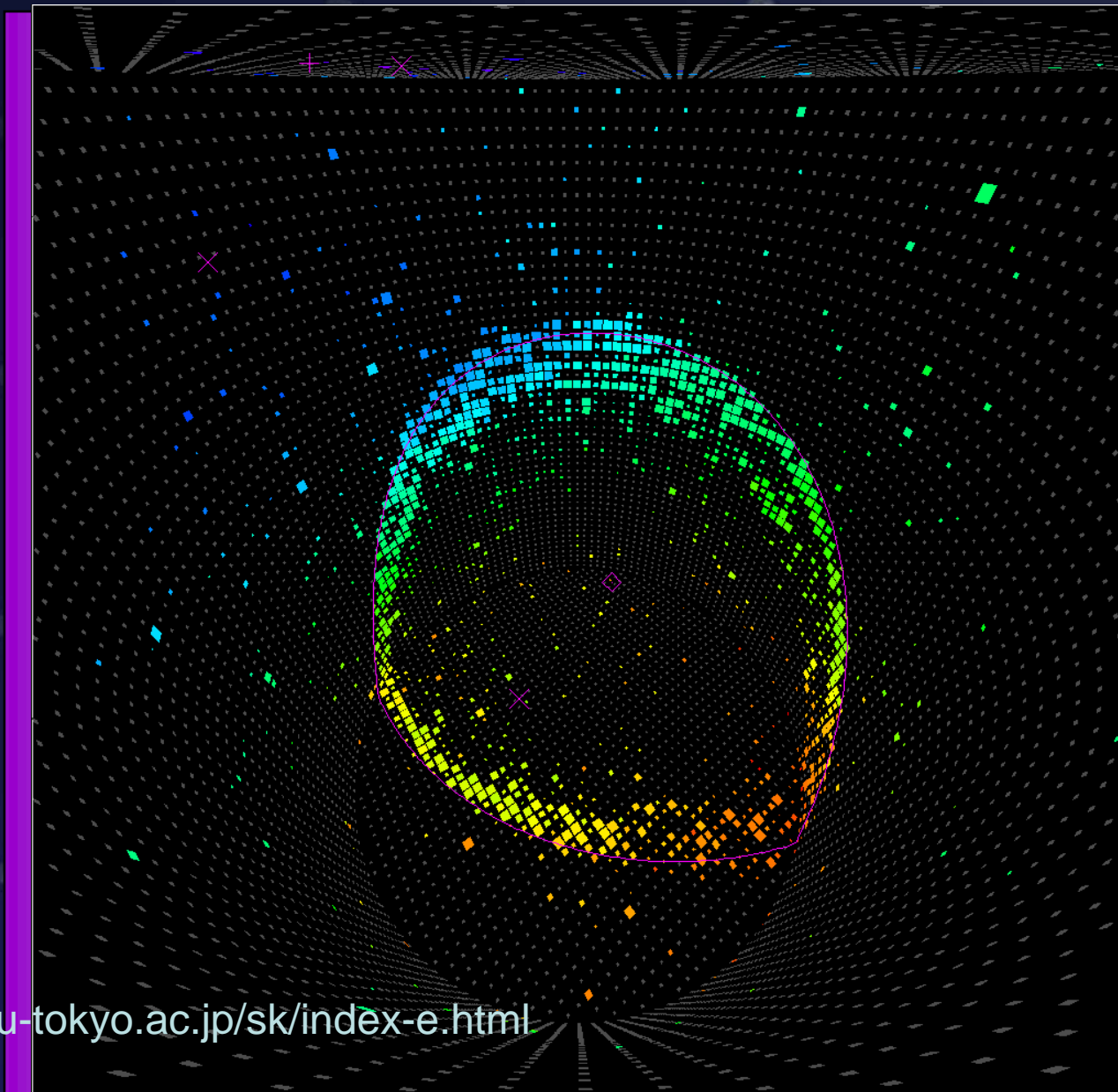
- **Подземные:**
 - IMB (США) (8 кт), Kamiokande (3 кт)
 - Super-Kamiokande (Япония) (50 кт)
 - SNO (Канада) (1000 т d_2O), SNO+
- **Подводные (- ледные) нейтринные телескопы:**
 - NT-200 (оз.Байкал, Россия) ($\sim 1000 \text{ м}^2$), NT-200+, NTГига
 - AMANDA (Ю.Полюс, Антарктида) ($30\,000 \text{ м}^2$)
 - ANTARES (Средиземное море, Франция) ($0,1 \text{ км}^2$)
 - NESTOR (Средиземное море, Греция) ($0,07 \text{ км}^2$)
 - NEMO (Средиземное море, Сицилия) (1 км^3)
 - ICECUBE (Ю.Полюс, Антарктида) (1 км^3)
- **Наземные:**
 - НЕВОД (МИФИ, Россия) (2 кт)
 - MILAGRO (США) (5000 м^2), HAWC (США-Мексика)
 - Обсерватория Пьер Оже (Аргентина, США) (3000 км^2)
 - . . .

SuperKamiokande



- Глубина – 1000 м.
- Цилиндр 41.4м 39.3м.
- 50 000 тонн воды.
- 11 200 ФЭУ (50 см диаметр)
- Порог по энергии – 5 МэВ.

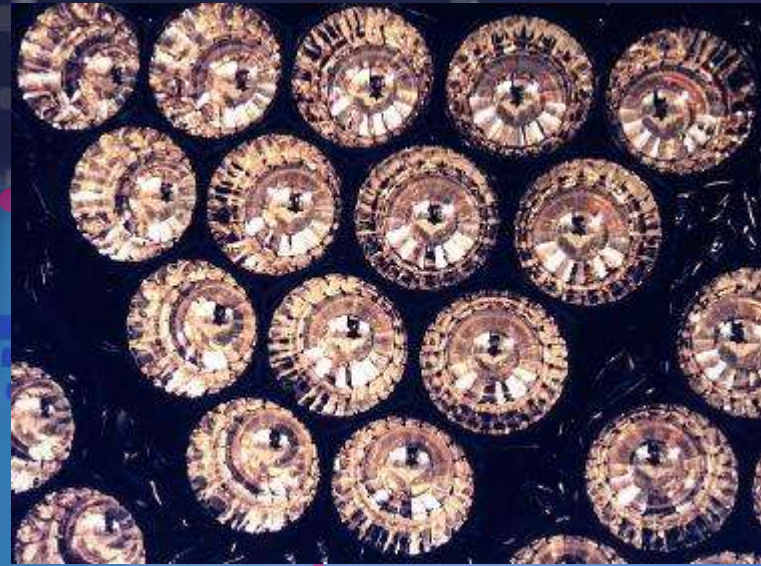
Super-Kamiokande



Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

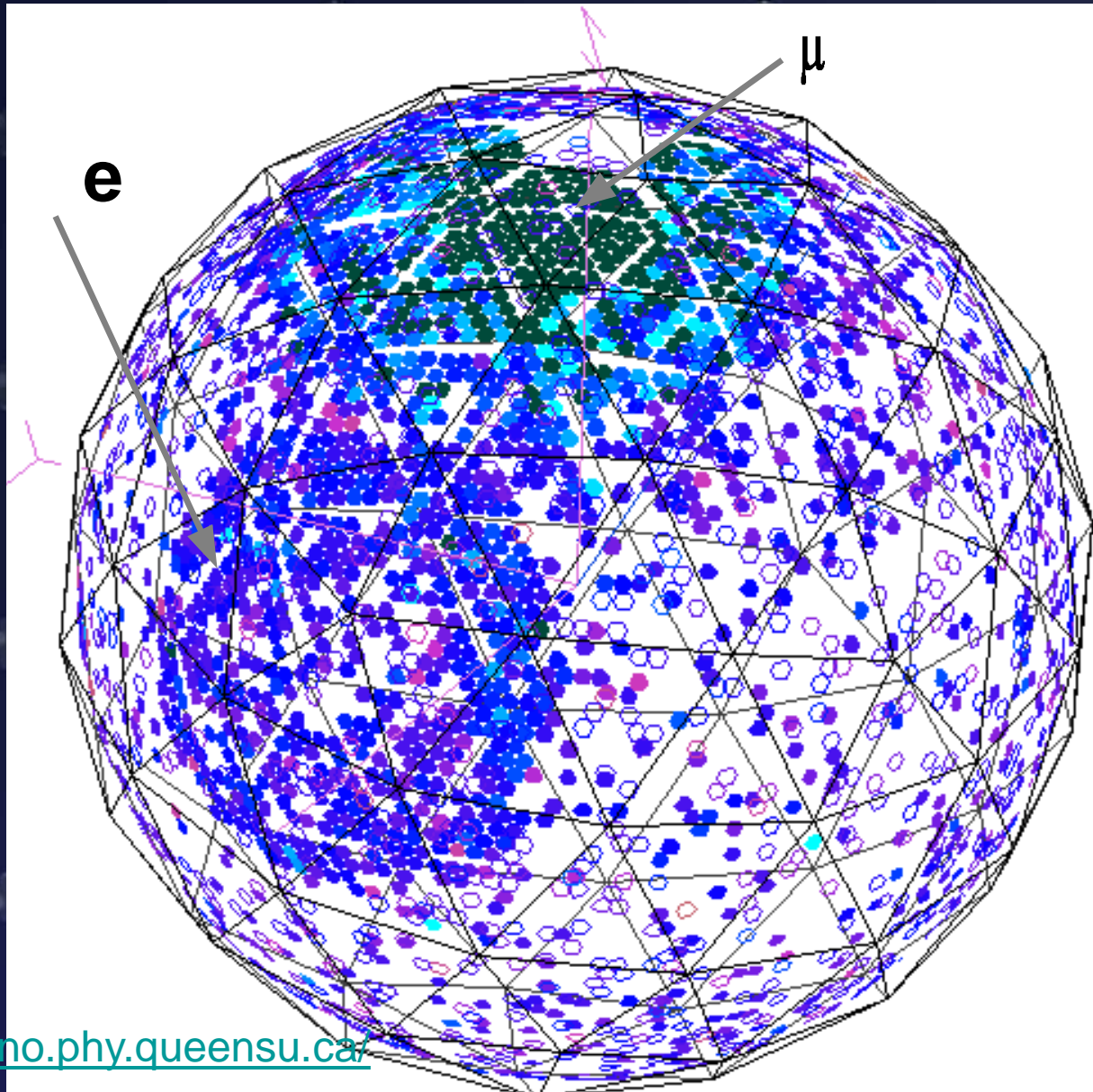


- Глубина 2073 м
- 10000 8" ФЭУ



- Внутренний объем - 1000 м³ d₂O в акриловом сосуде (12 м диаметр, 5 см стенка)
- Внешний объем - 7000 м³ воды

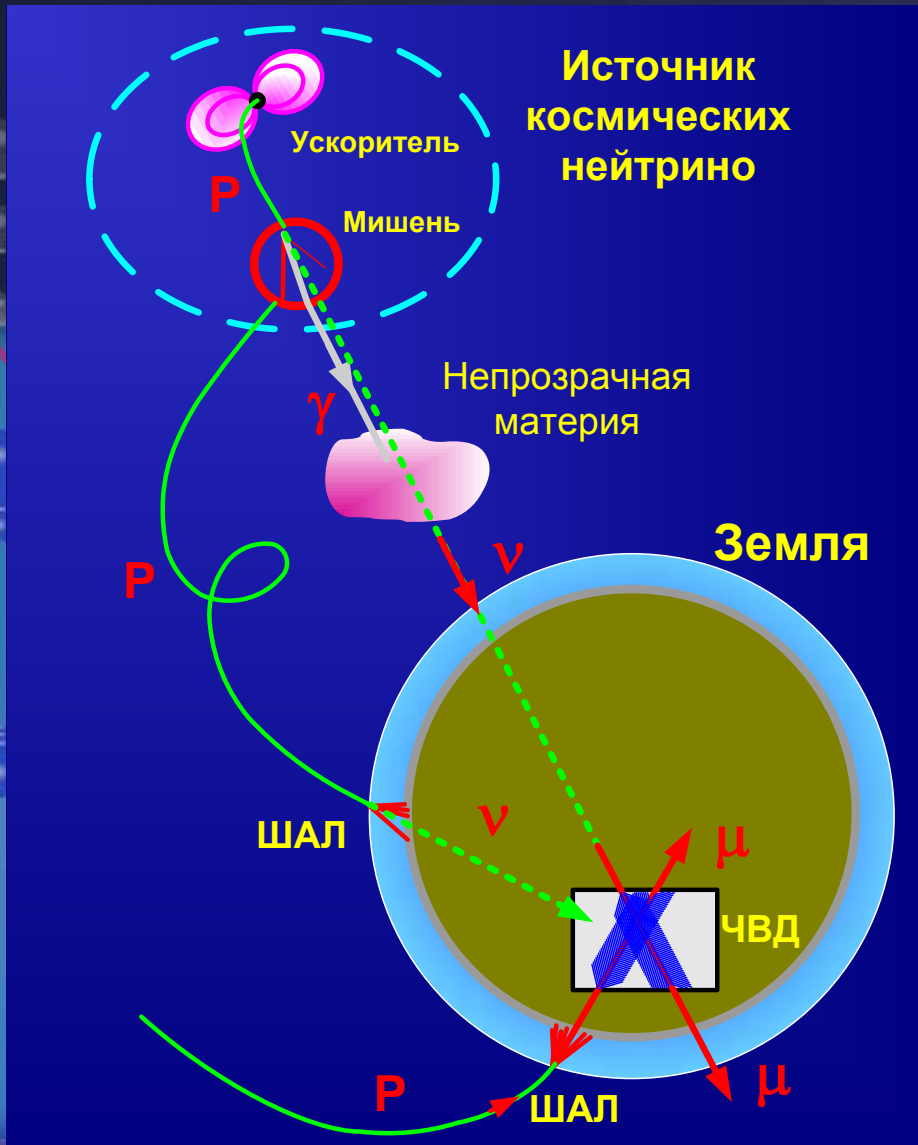
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



Глубоководные Нейтринные телескопы

Физические задачи:

- Атмосферные нейтрино.
- Галактические нейтрино.
- Диффузный поток нейтрино.
- Внегалактические и галактические источники.
- Поиск Темной материи (нейтрино от WIMPs).
- Поиск магнитного монополя.

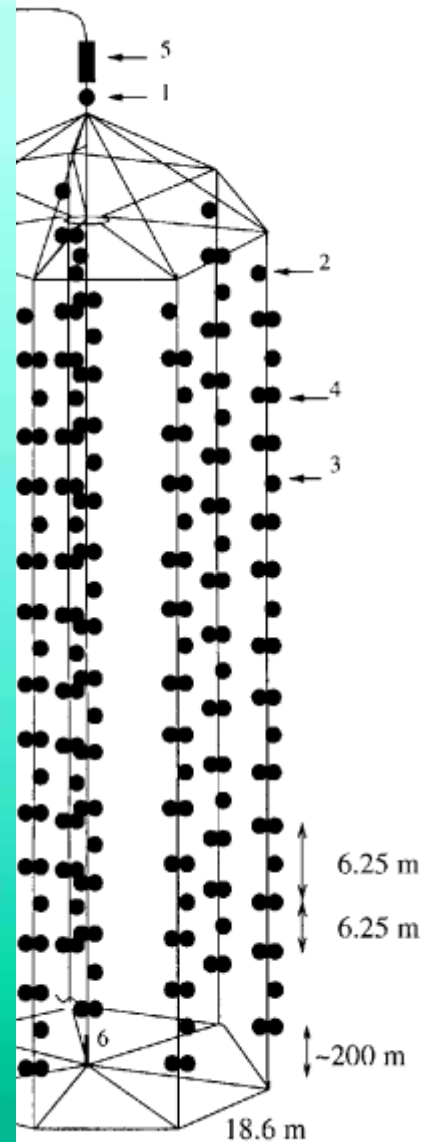
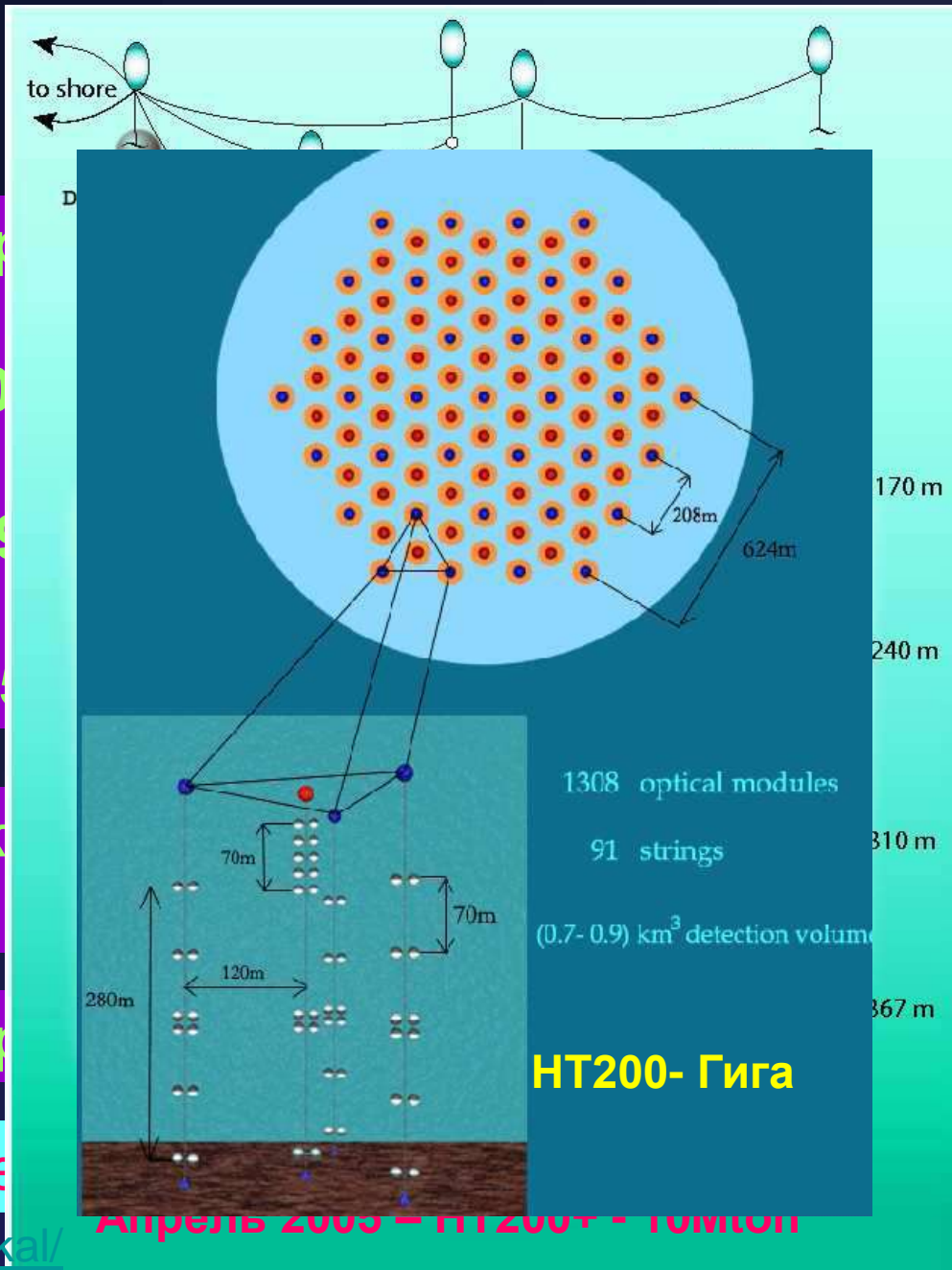


- 3600 м от берега
- глубина 1100 м
- 192 ОМ (с 1998)
- $S_{эфф} \sim 1000-1500 \text{ км}^2$

Первый глубоководный телескоп.

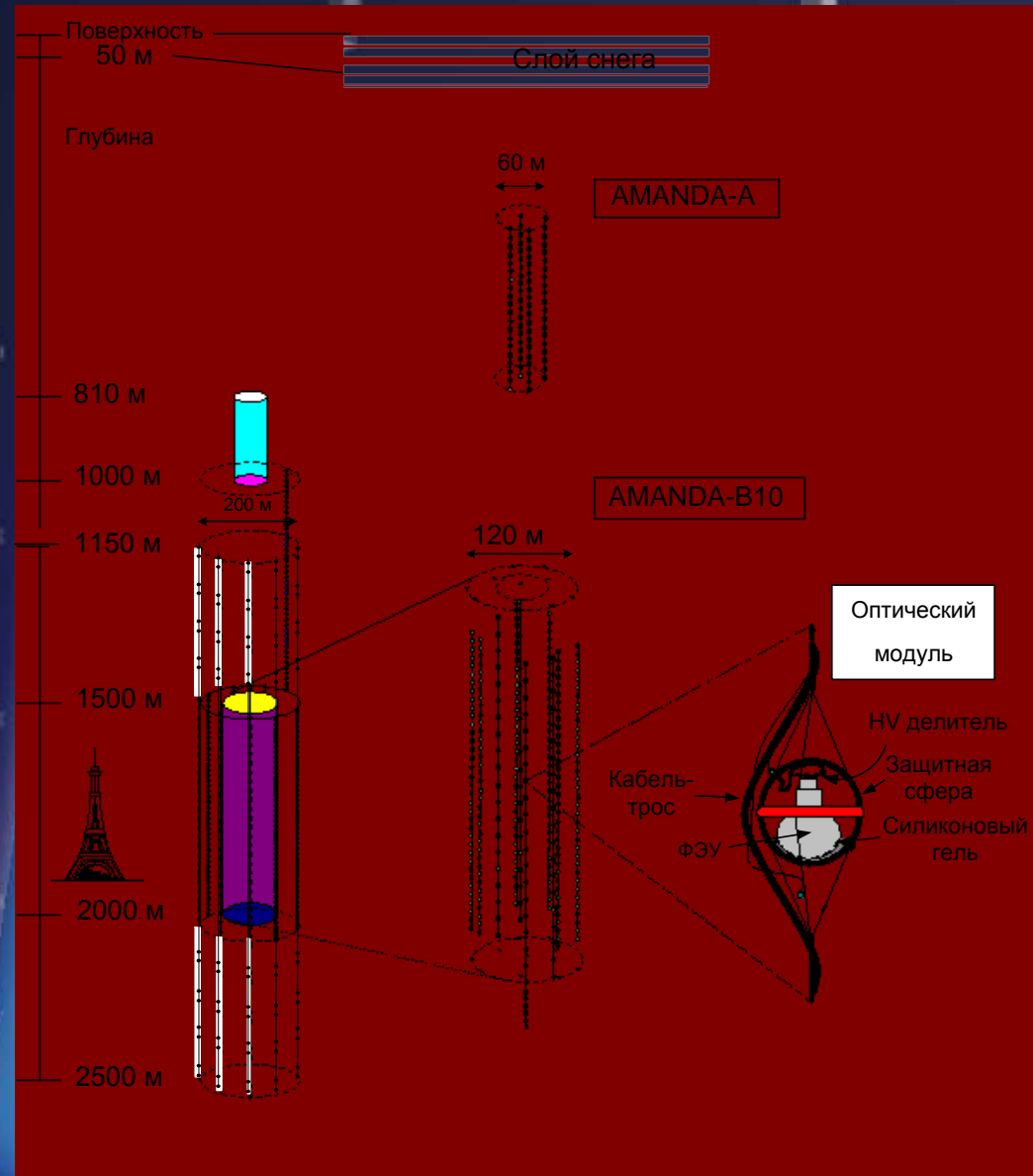
Первая регистрация

Развертывание



AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)

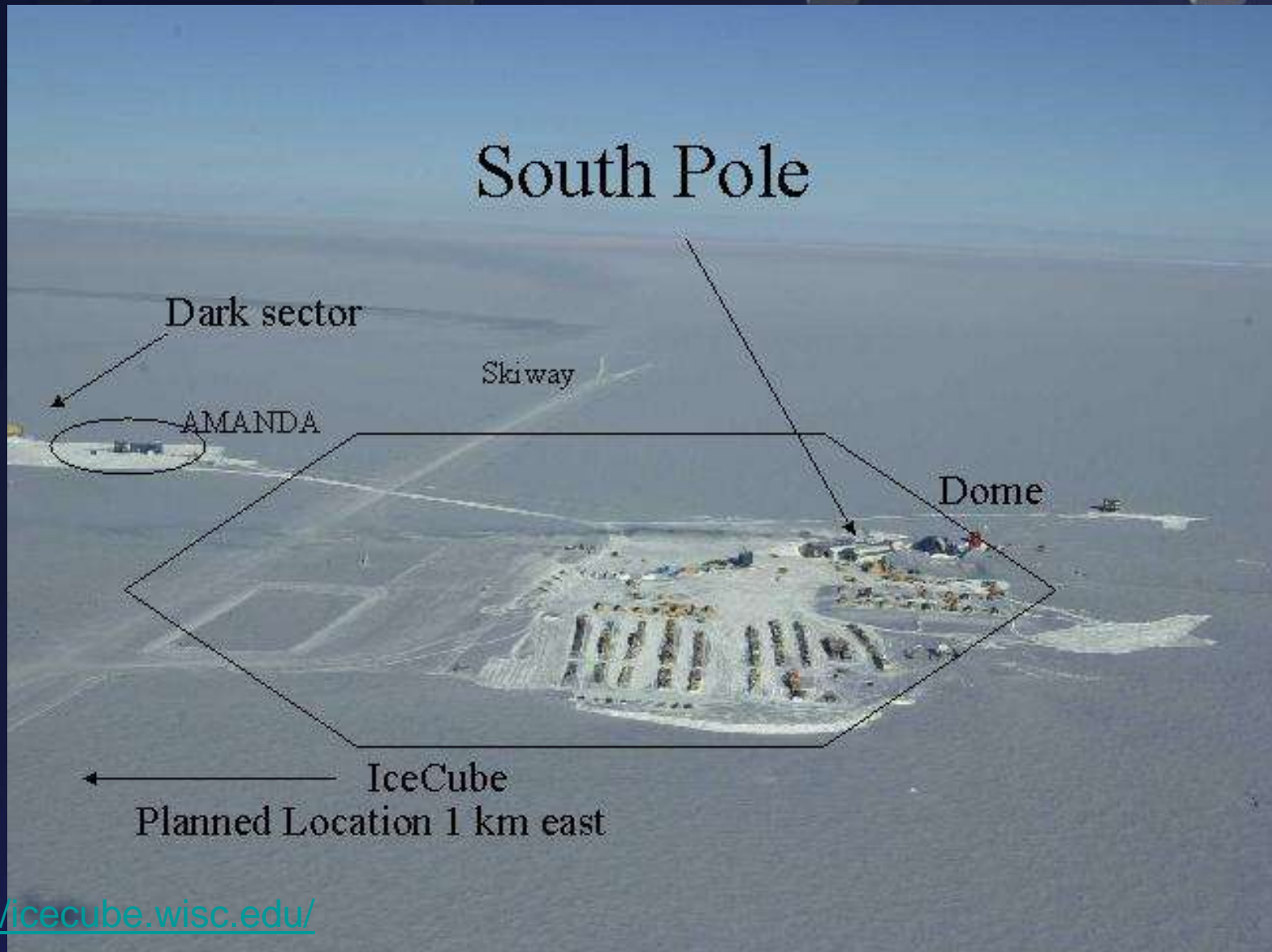
- Антарктический лед.
- Южный полюс.
- Глубина – 1500-2000 м.
- 677 8" ФЭУ на 19 гирляндах.
- $S_{\text{эфф}} \sim 30000 \text{ м}^2$.
- Угловая точность $\sim 2.5^\circ$.



AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)



ICECUBE



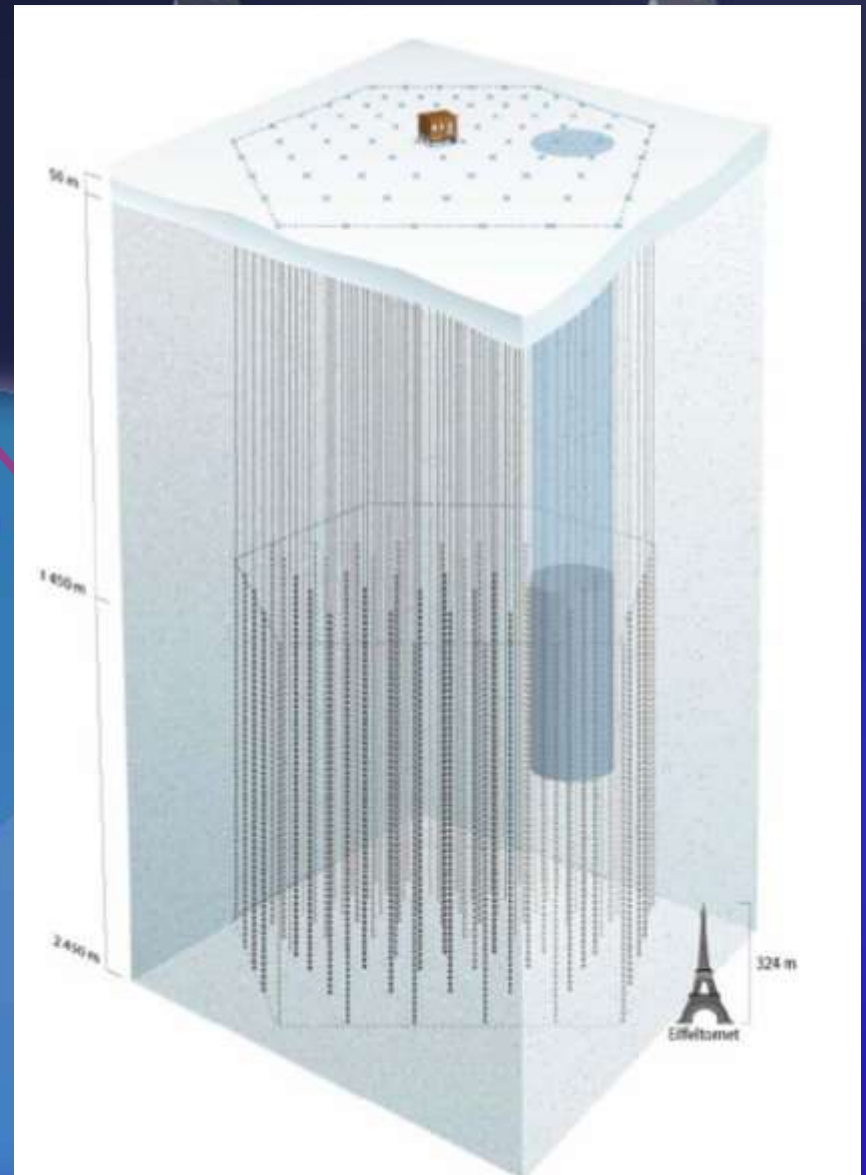
ICESUBE

- 80 гирлянд, 4800 ФЭУ

- Объем – 1 км³ (1 Гт)

- Регистрация нейтрино всех типов с энергиями от 10⁷ эВ (SN) до 10²⁰ эВ

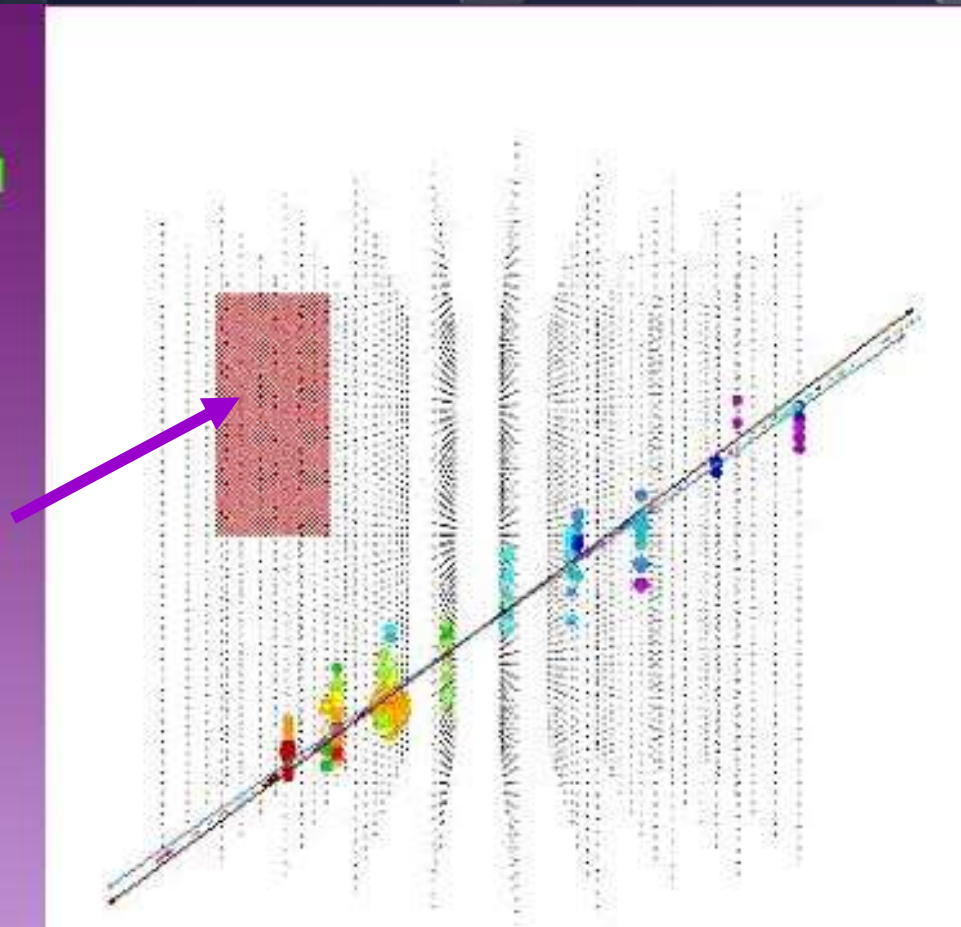
- 300 атм. нейтрино в день



ICESUBE

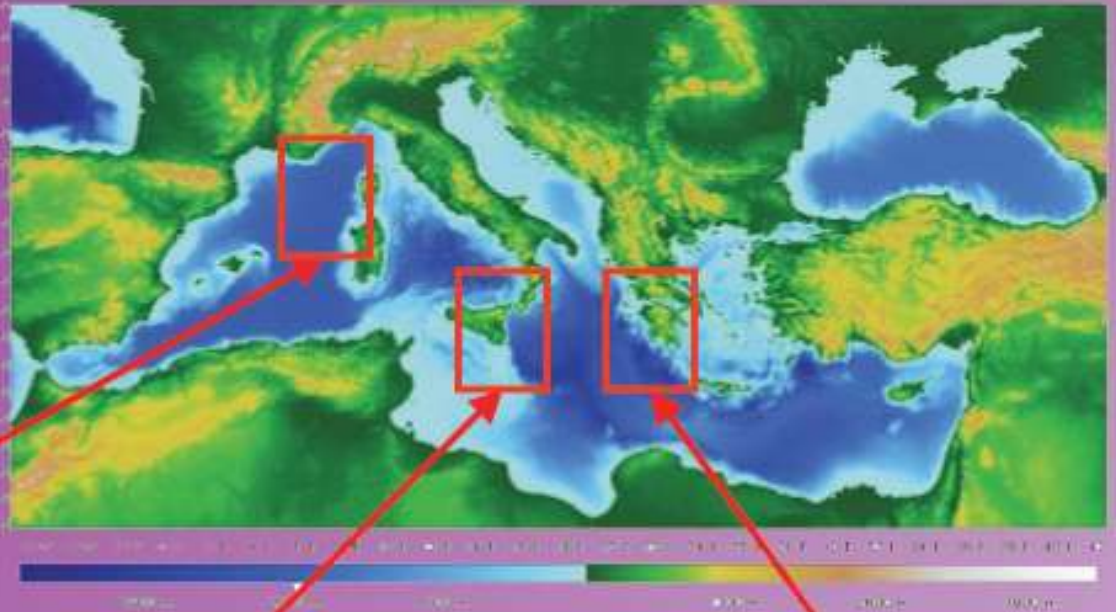
Мюон из нижней
полусферы

AMANDA-II



1 km

ЧВД в Средиземном море



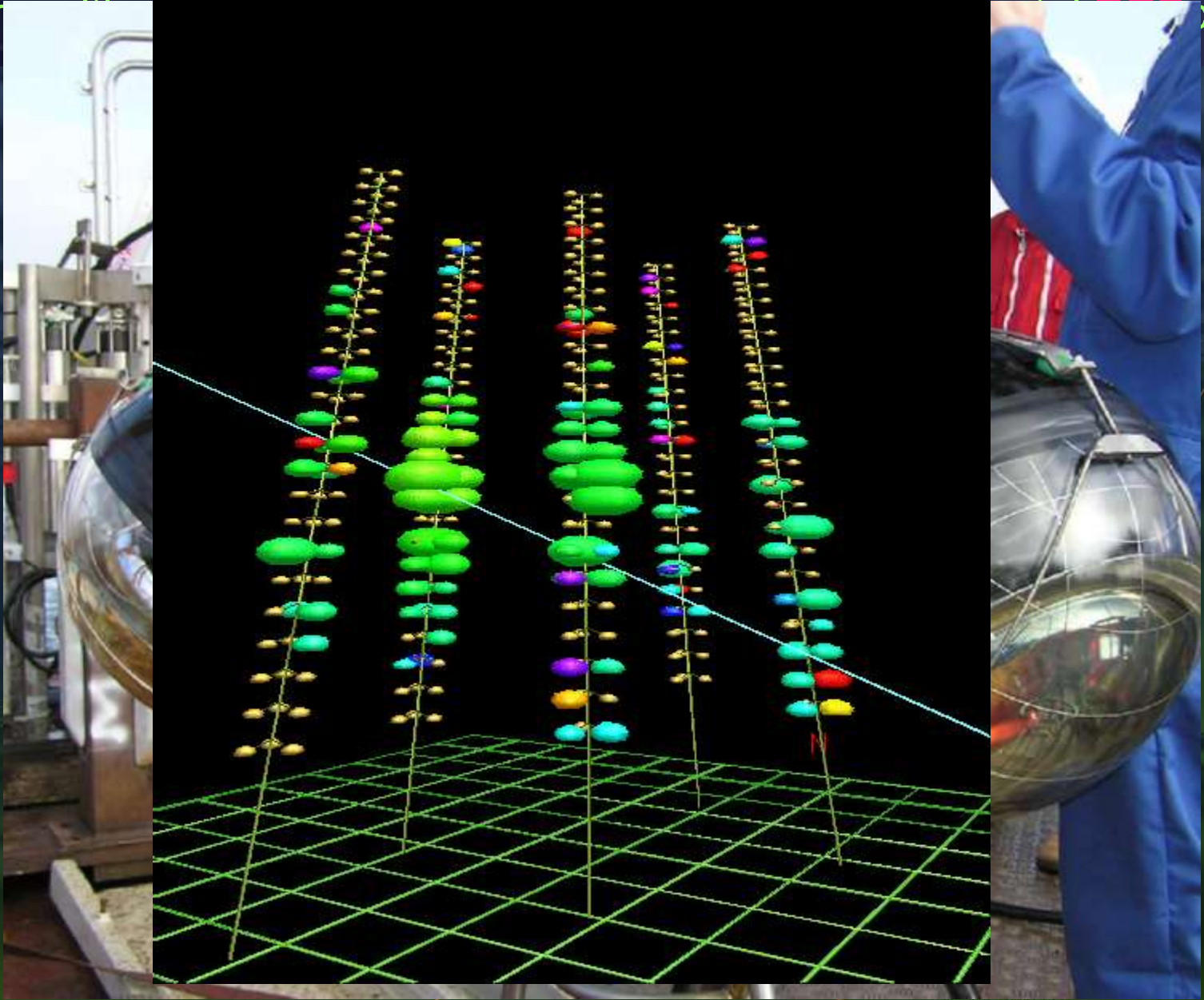
ANTARES

Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch

- 25 км от г. Тулон.
- Глубина 2.4 км.
- 1000 10" ФЭУ.
- 13 гирлянд (400 м).
- $S_{\text{эфф}} \sim 0.1 \text{ км}^2$.
- $l (\lambda=470 \text{ нм}) \sim 50 \text{ м}$.
- Реконструкция ($>10 \text{ ТэВ}$)
 ~ 0.2

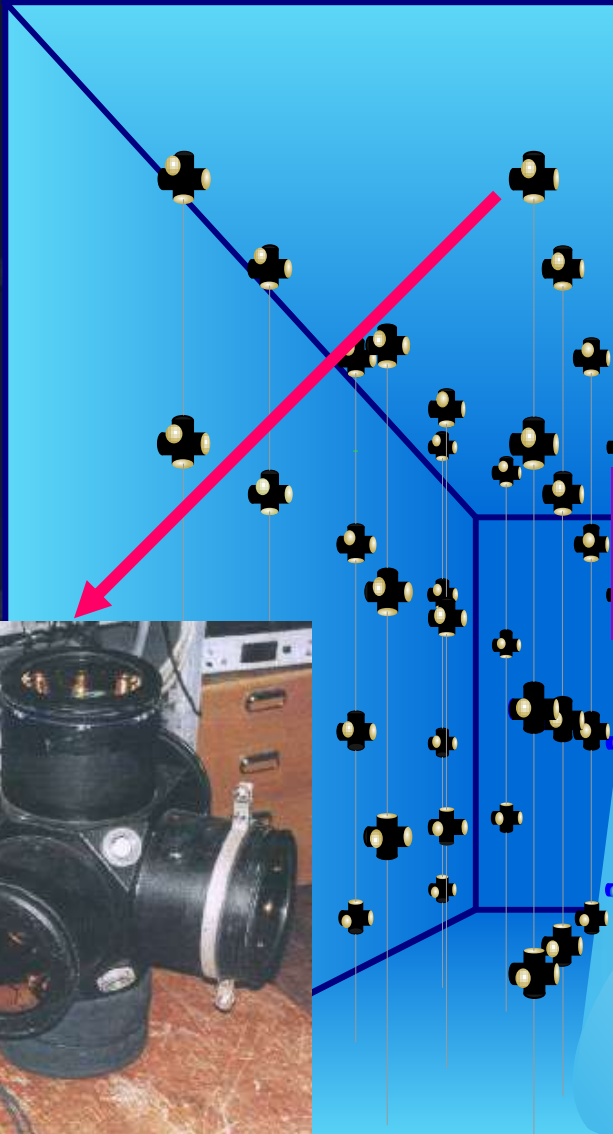
Astronom

search



НЕВОД

Нейтронный ВОдный Детектор



- На поверхности Земли.

- **Многофункциональность:**
основные компоненты космических лучей

- 9м 9м 26м ~2000 м³

- **Регистрирующая система:**
регулярная решетка КСМ.

- ФЭУ-49Б, ФЭУ-200 – до 1500 шт.

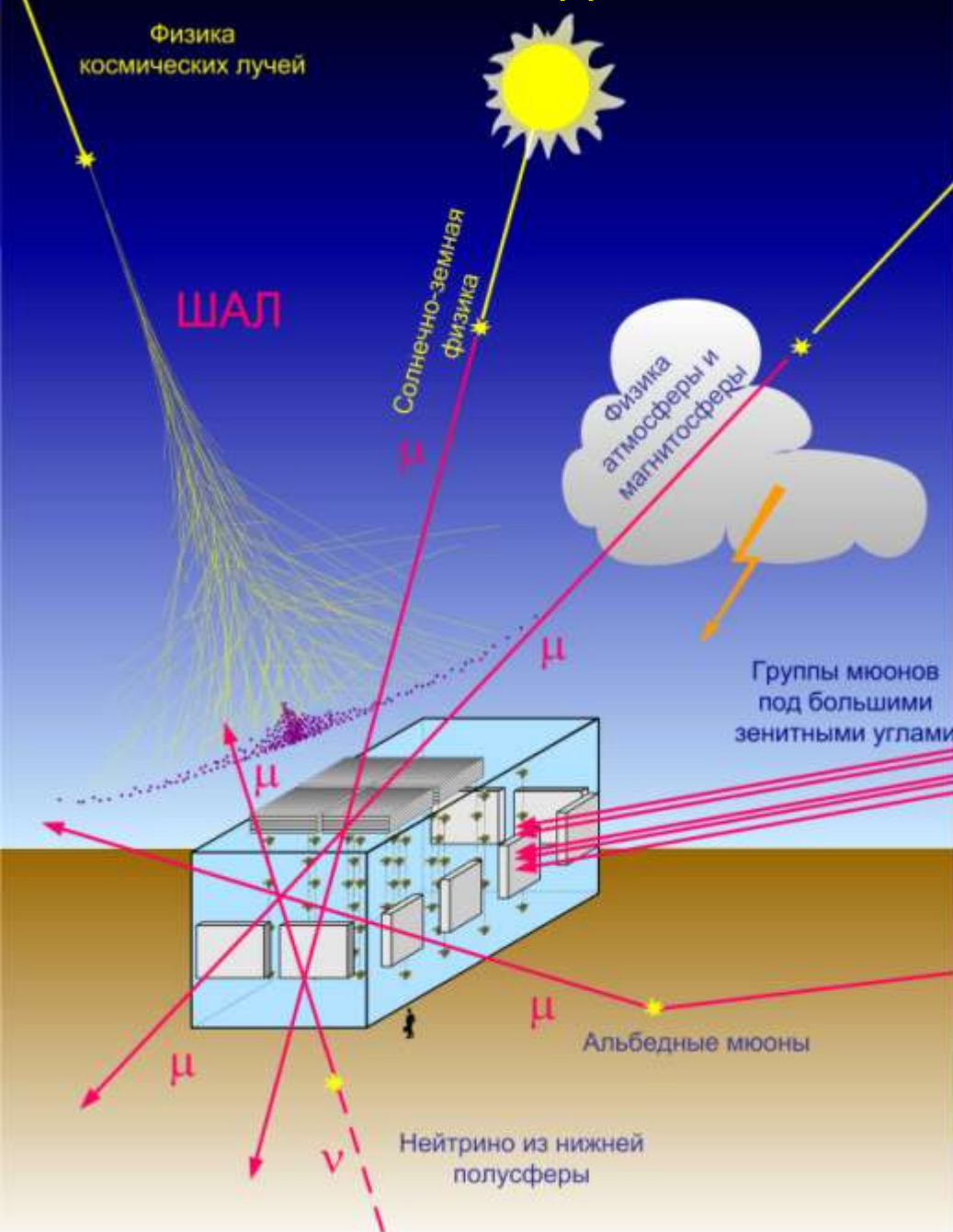
- **ОМ** – Квазисферический измерительный модуль (КСМ).

- Изотропная чувствительность.

- Амплитудный анализ.

Основные задачи

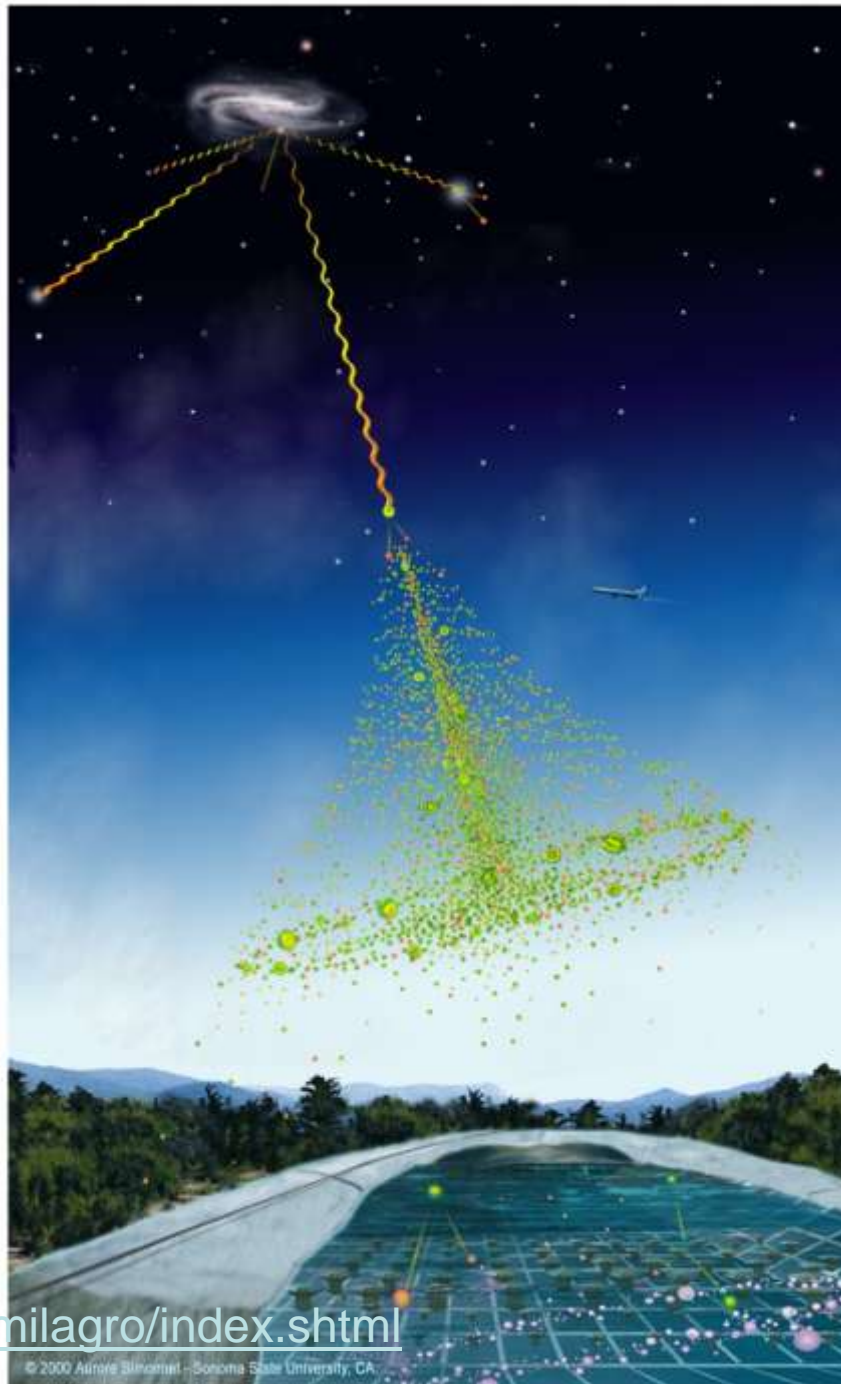
Вторые Черенковские чтения. ФИАН. 2009.



ЭК НЕВОД

- 2008 – 2009 – модернизация регистрирующей системы;
- Поверхностный детектор.
- Внешний триггер – установка ШАЛ.

Multiple In

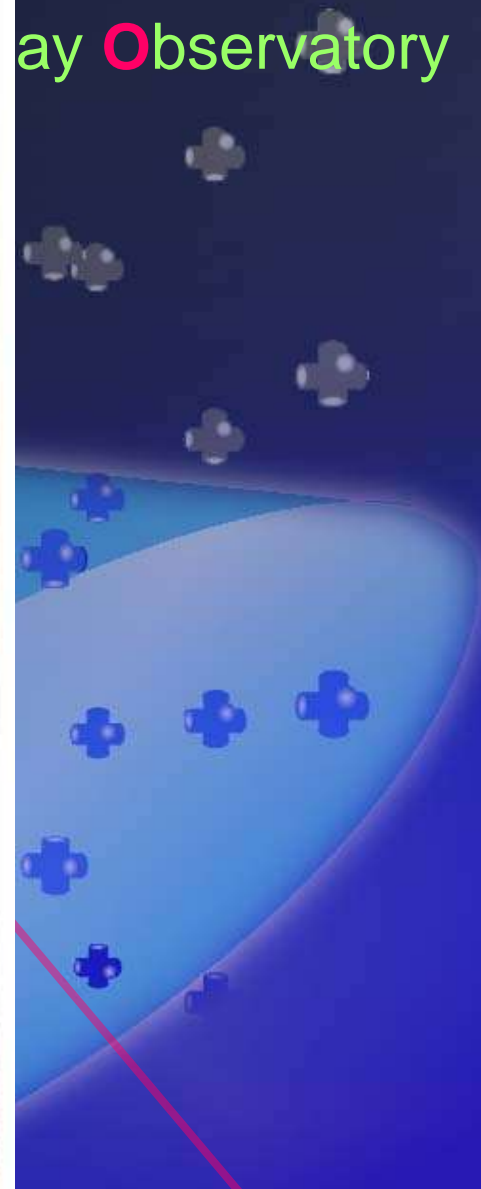


<http://www.lanl.gov/milagro/index.shtml>

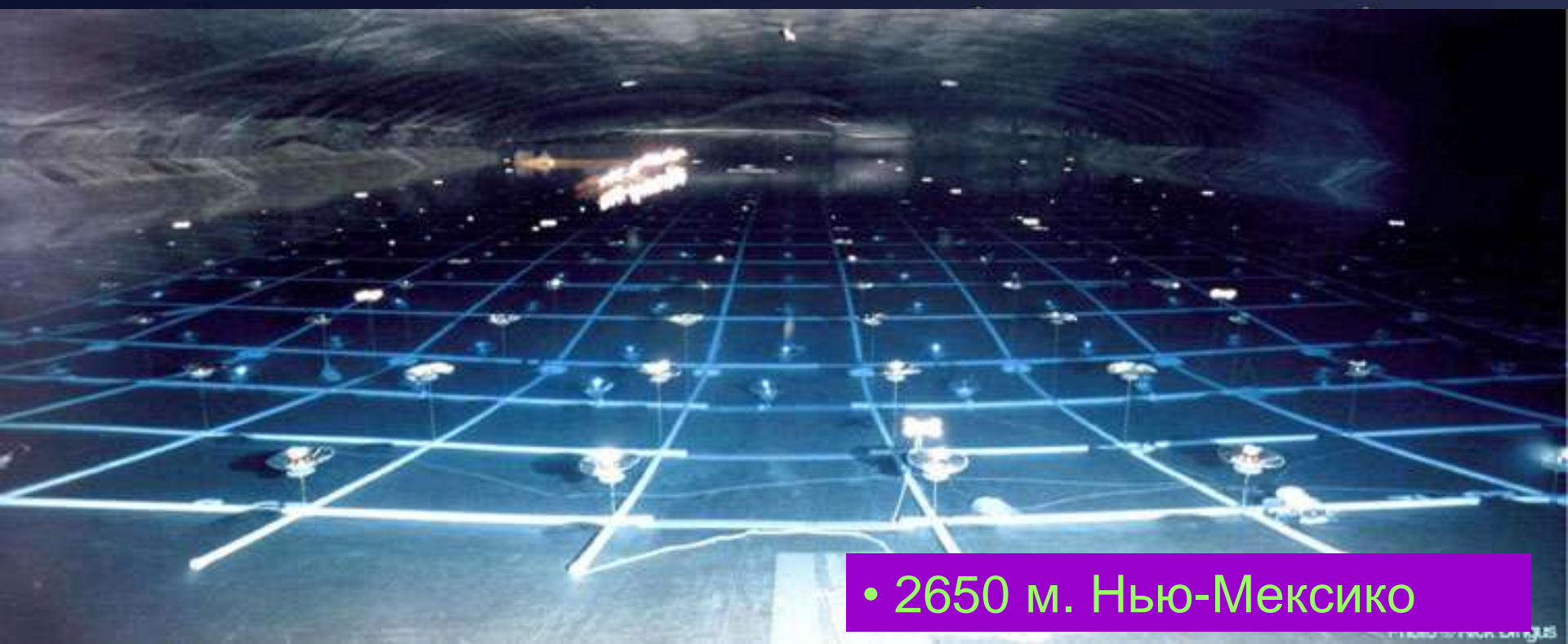
© 2000 Aline Binzani - Sonoma State University, CA

ие чтения. ФИАН. 2009.

ay Observatory



MILAGRO



• 2650 м. Нью-Мексико

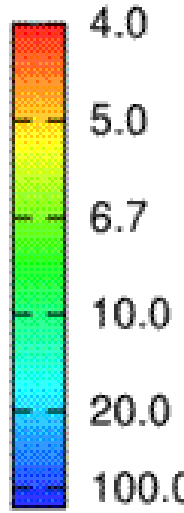
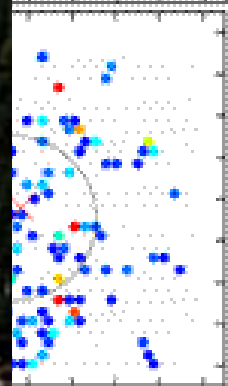
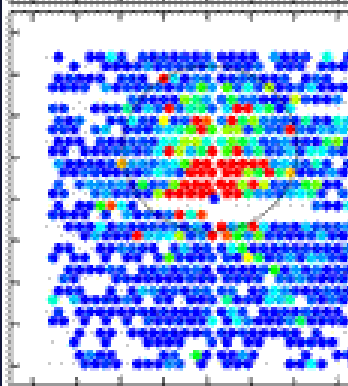
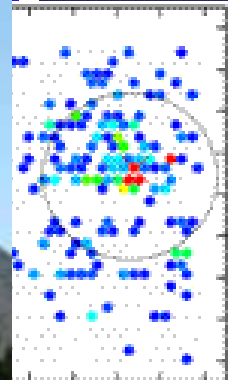
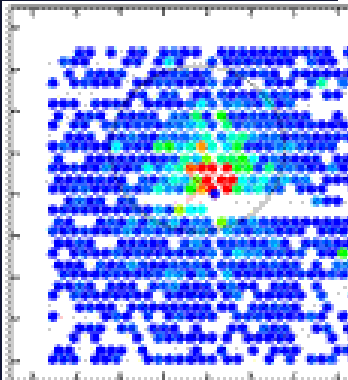
• Гамма - астрономия:
от 250 ГэВ до 50 ТэВ

723 8" ФЭУ (2 слоя)

HAWC

The High Altitude Water Cherenkov Experiment

Sierra Negra, Mexico

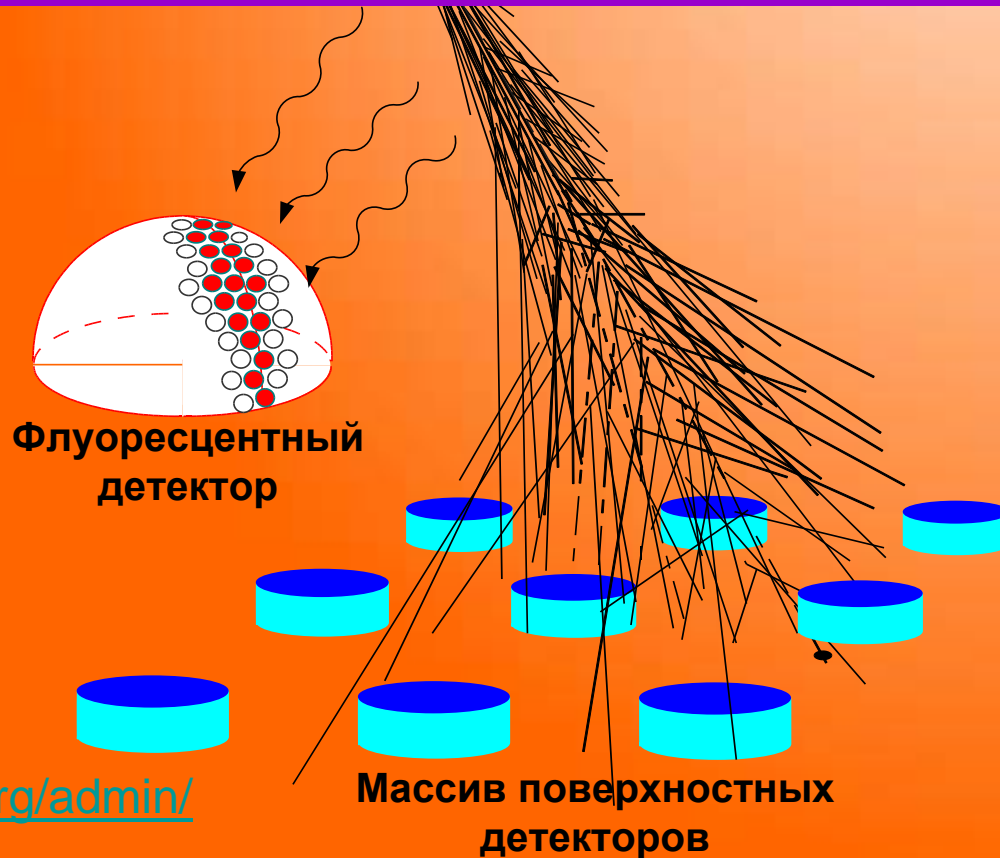


<http://umdgrb.umd.edu/hawc/index.php>

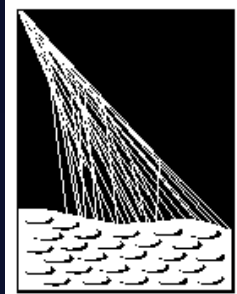
Studs + 100
Triangles + 100

Гибридный метод регистрации ШАЛ:

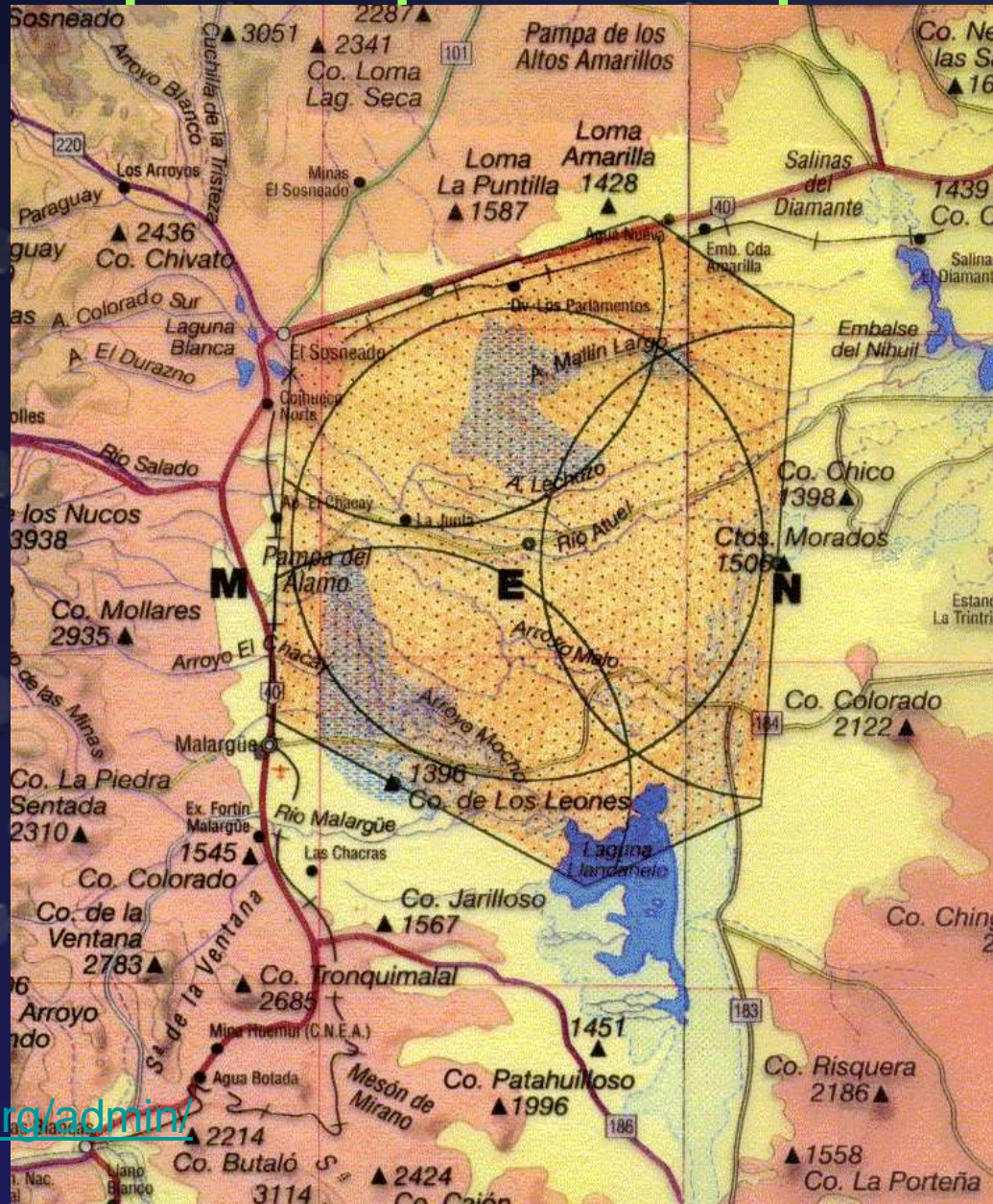
- массив ШАЛ (1600 ПД на площади $\sim 3000 \text{ км}^2$)
расстояние между детекторами – 1,5 км
- флуоресцентные детекторы



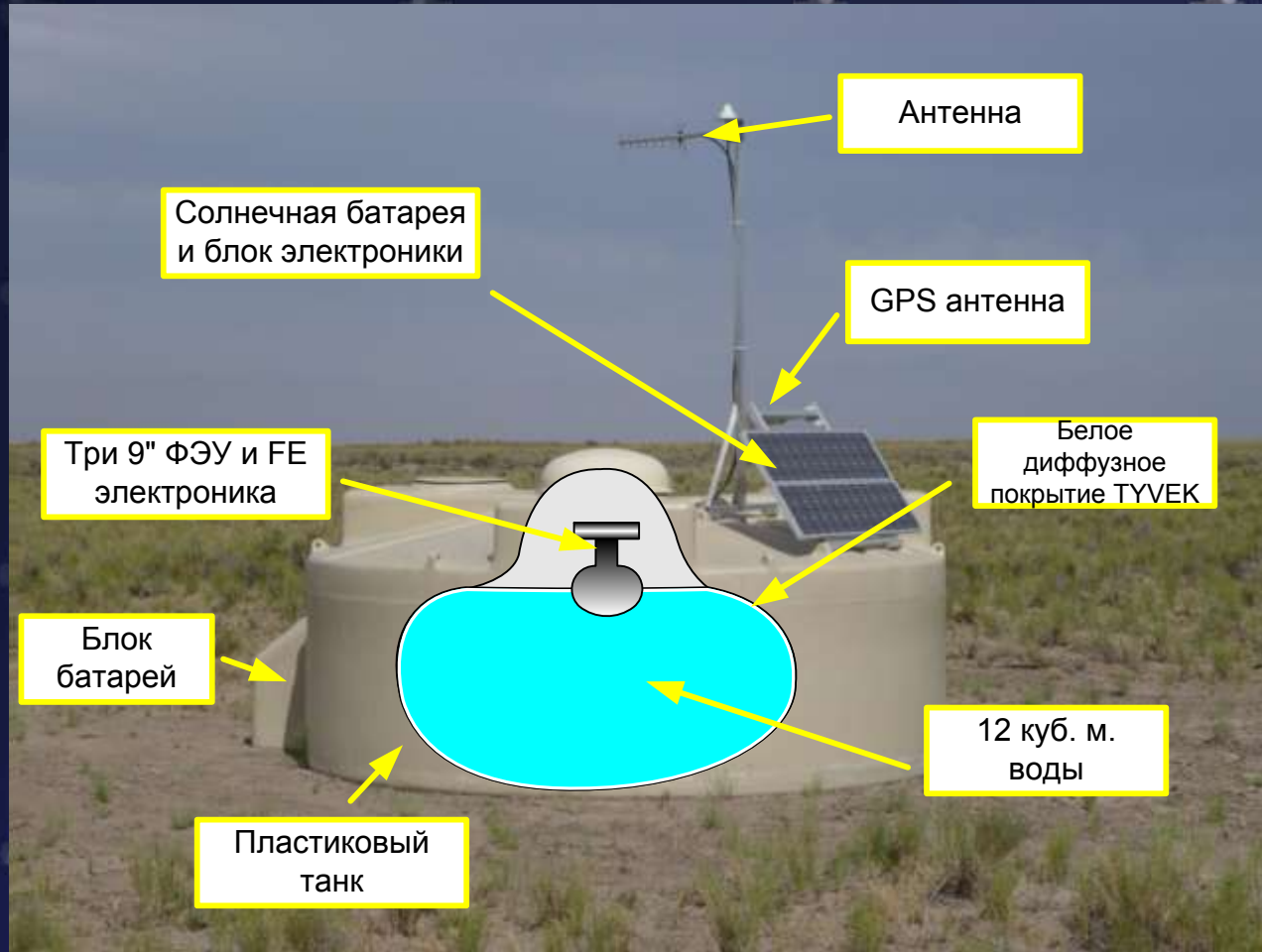
Обсерватория Пьер Оже



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY



Обсерватория Пьер Оже



Перспективы до 2015

- Нейтринные телескопы:
 - 1 км³ в Ю. и С. (?) полушариях ;
 - Точечные нейтринные источники
- Обсерватория Пьер Оже (Ю. + С.)
 - Детальное исследование ГЗК области
 - ЕНЕ астрономия
- Исследования ПКЛ и взаимодействий в области энергий выше энергий LHC
- Новое поколение детекторов для гамма - астрономии (50 - 100 ТэВ)

Новая физика?!!!

Спасибо за внимание!!!

