



Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»

Научно-образовательный центр

НЕВОД



Черенковские водные детекторы в физике частиц и космических лучей

Петрухин А.А., Яшин И.И.

Десятые Черенковские чтения 18 апреля 2017 г.

Черенковское излучение

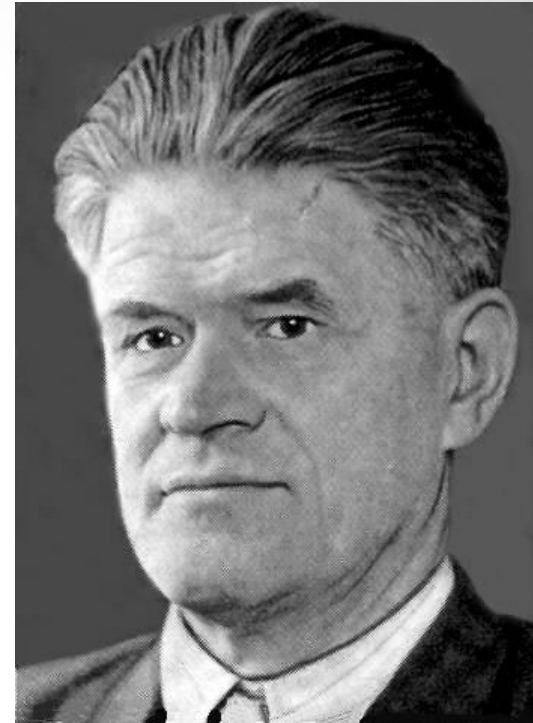
- 1934 г. П.А.Черенков – Открытие нового вида излучения

$$\cos \theta = \frac{1}{n \cdot \beta}$$

- 1937 г. И.Е. Тамм и И.М. Франк - теоретическое объяснение явления

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \cdot \beta^2} \right) \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

- 1958 г. - П. А. Черенков, И. Е. Тамм и И. М. Франк - Нобелевская премия по физике.



Классификация черенковских детекторов

➤ По радиатору:

Твердотельные
(ускорители)

Жидкостные
(водные)

Газовые
(ускорители, ШАЛ)



➤ По расположению (назначению):

Наземные
(μ , ШАЛ, ν ...)

Подземные
(ν , μ , редкие
события ...)

Подводные
(ν , μ высоких
энергий ...)

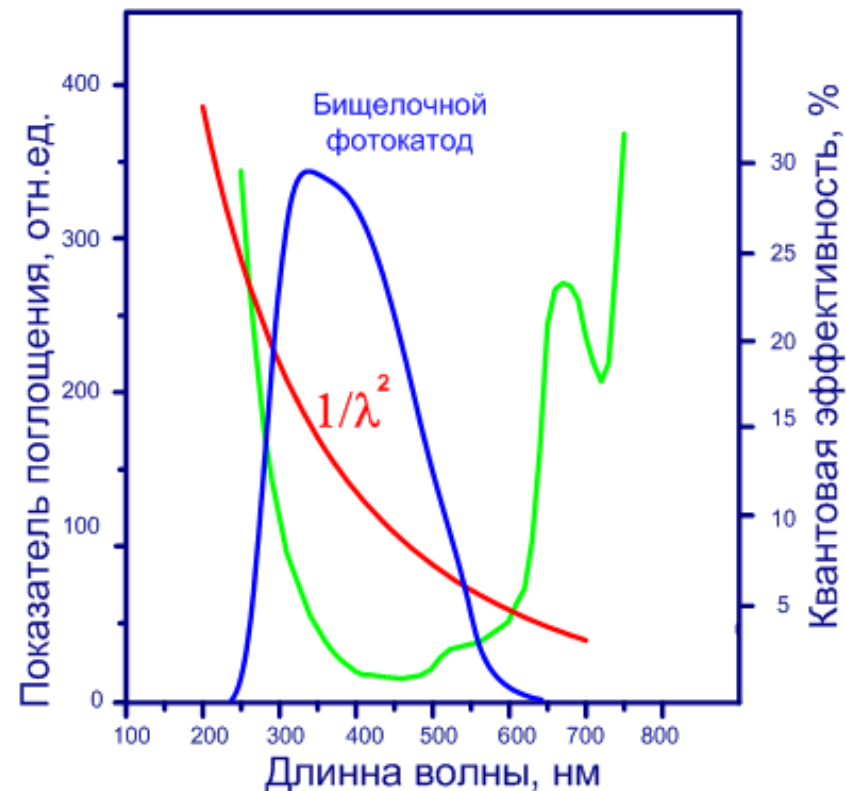
➤ По структуре:

Периферические
(наземные и подземные)

Решетчатые
(подводные (-ледные))

Преимущества воды

- Одновременно:
 - мишень для взаимодействия;
 - радиатор черенковского излучения.
- Простота конструкции и дешевизна.
- Огромные естественные водоемы
- Хорошая прозрачность
- Угол излучения 41°
- Большие расстояния между фотоприемниками



Наземные ЧВД

- Лабораторные прототипы (1934 - 1950)
от Черенкова до Jellee
- Детекторы ШАЛ
Hawerah Park, Pierre Auger
- Первый периферический детектор (ФИАН)
- Первый решетчатый детектор НЕВОД (МИФИ)
- Детекторы для γ -астрономии MILAGRO, HAWC

Наземные ЧВД

- Водный “детектор” П.А. Черенкова – 1934 г.

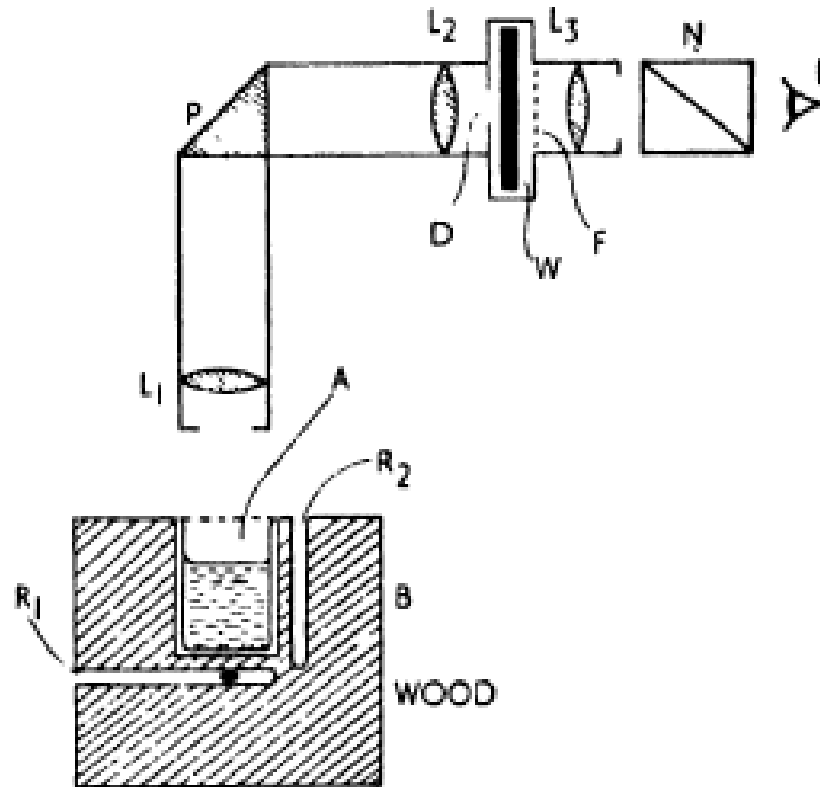


FIG. 1.4. Apparatus used by Čerenkov in his first experiment (1934).

Наземные ЧВД

- «Первый» ЧВД – 1947 г. (Weisz & Anderson)

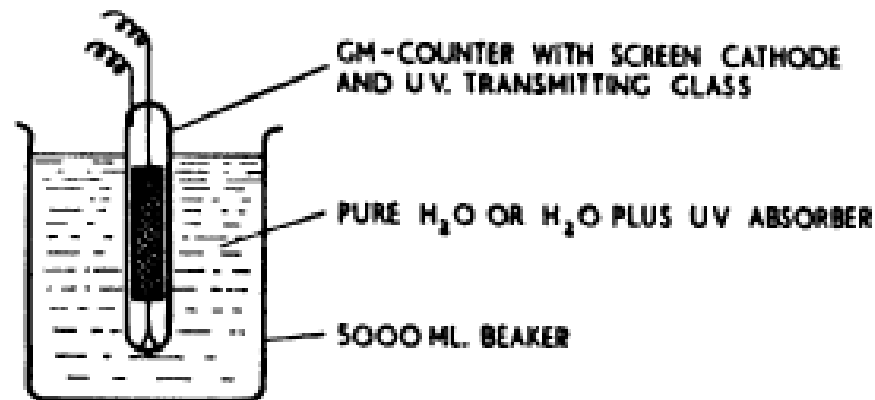


FIG. 4.5. The apparatus used by Weisz and Anderson (1947), to detect Čerenkov radiation produced by the passage of cosmic-rays through water, using photo-sensitive Geiger counters.

Наземные ЧВД

- Первый успешный ЧВД – 1951 г. (Jelley)

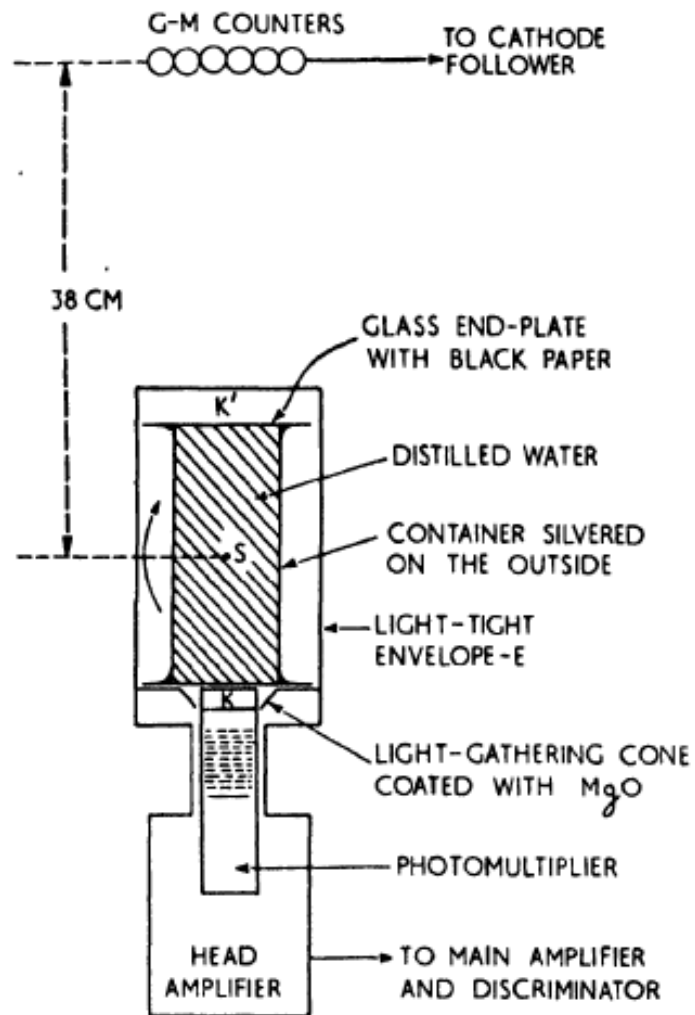


FIG. 4.6. The water detector used by Jelley (1951) to count single cosmic-ray μ -mesons.

Наземные ЧВД

➤ Первый ЧВД для ШАЛ (MIT) – 1959 г.

(Proc. Phys. Soc., 76, Part 1, №487, 1-16, 1960)

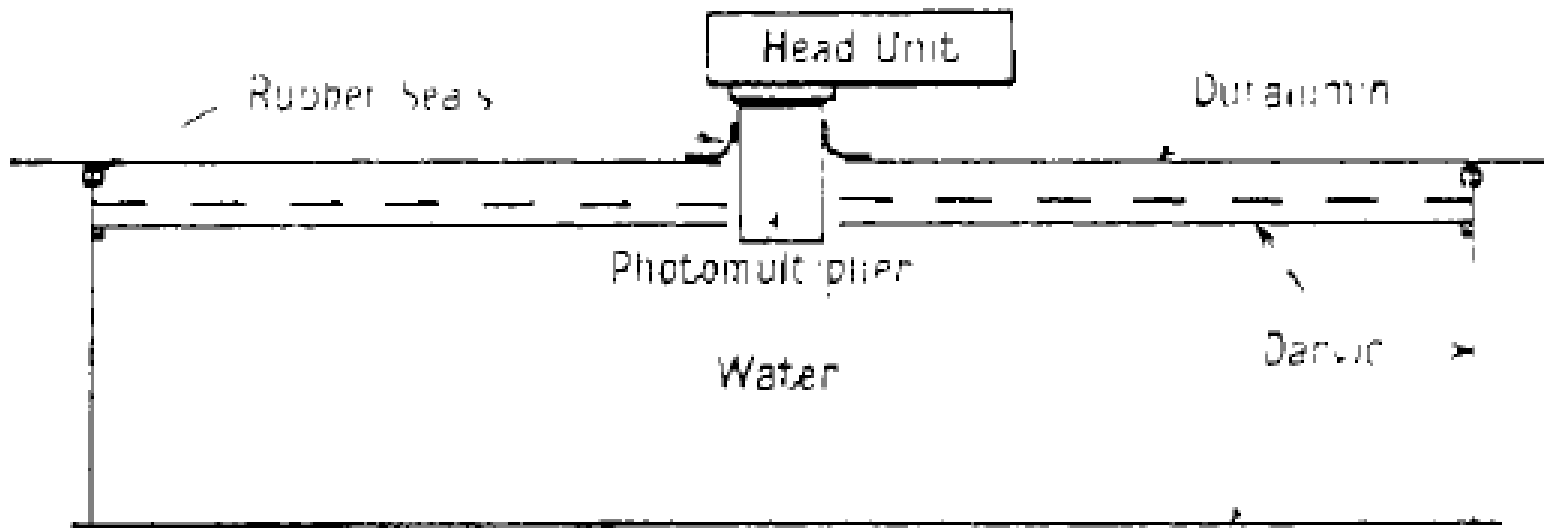


Figure 3 Cerenkov detector

Площадь 0,6 кв. м, толщина 20 см.

Четыре ЧВД на расстояниях 30 и 100 м

Наземные ЧВД

- ЧВД для установки ШАЛ (Leeds) – 1961/62 г.

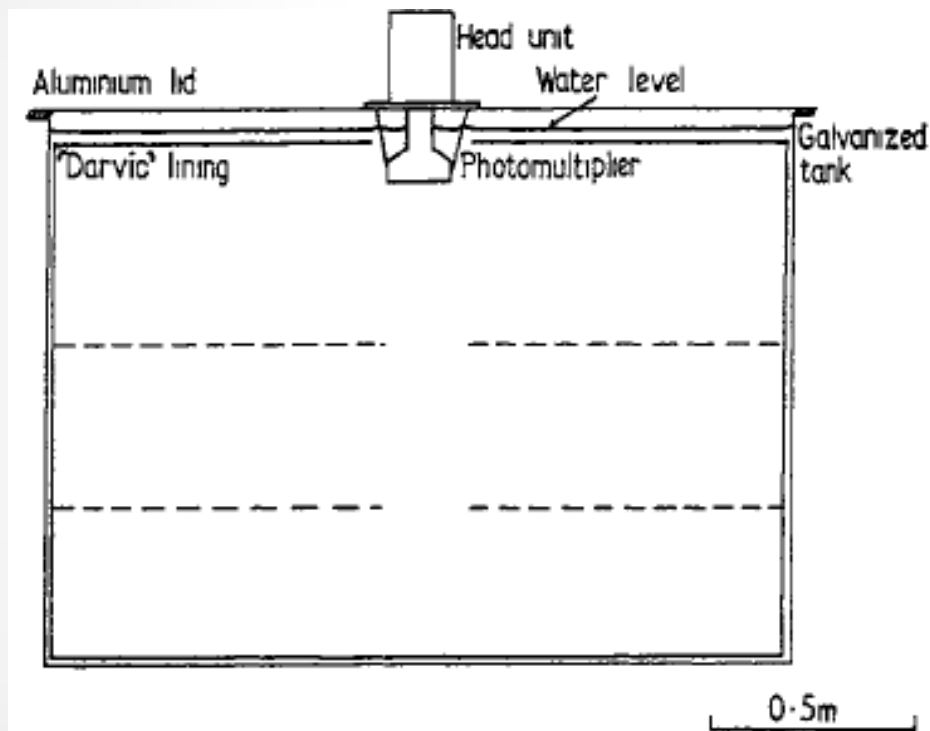


Figure 1. Cross section of Čerenkov detector.
The broken lines indicate the lower levels of
the top 'Darvic' sheet.

(Proc. Phys. Soc., **82**, 95-106,
1963).

Переменная толщина ЧВД:
38; 76 и 125 см.

Площадь основания
 $1.85 \times 1.24 \text{ м}^2$

Наземные ЧВД

➤ ЧВД в установке Haverah Park – 1962/1967 г.

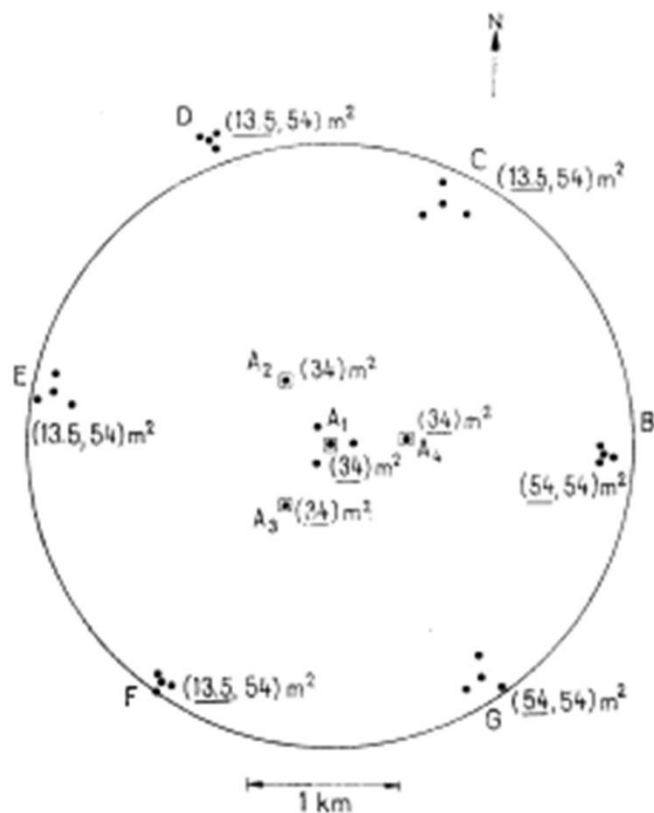


Fig. 1. The Haverah Park E.A.S. array

Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae 29, Suppl. 3, pp. 337–342, 1970

Объем одного ЧВД:
 $1.85 \times 1.24 \times 1.2 = 2.3 \text{ м}^3$

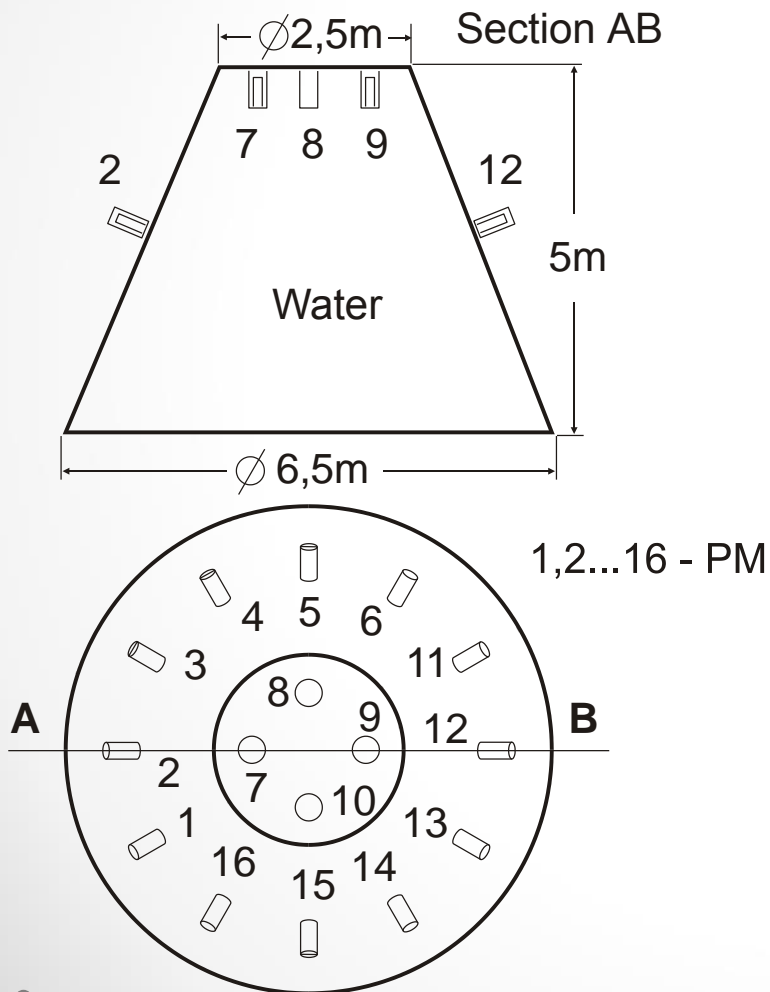
Одна станция: 15; 24; 60 ЧВД

Количество станций:
 4×15 ; 2×24 и 4×60

Общий объем: 0.8 кт

Наземные ЧВД

- Первый периферический ЧВД (ФИАН) – 1960 г.

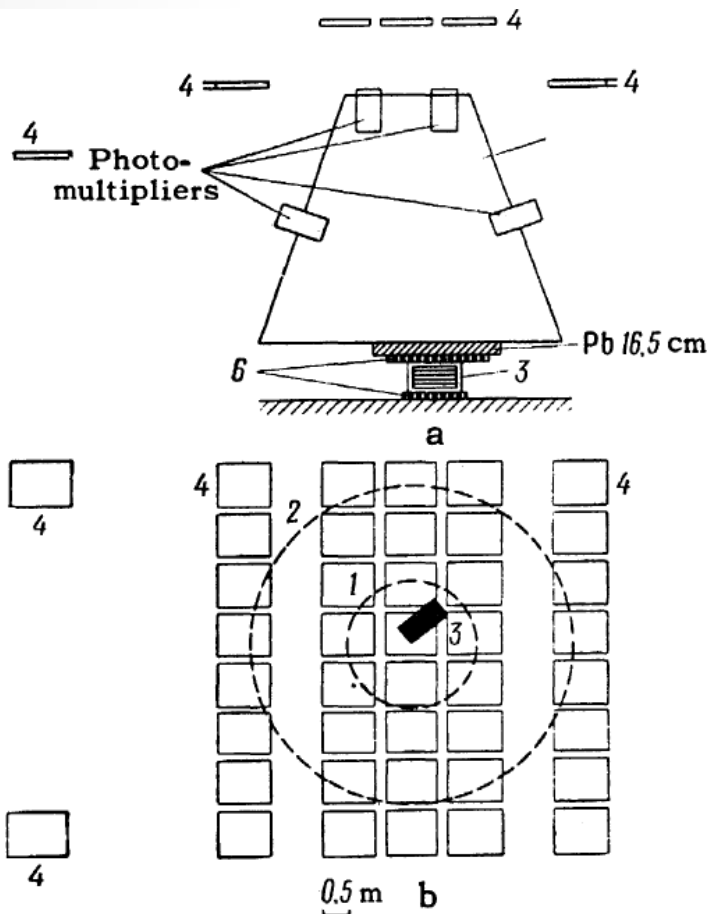


(N.L.Dadykin, PTE, №1, 60, 1962)

Объем детектора 85 куб. м,
16 фотоумножителей.

Наземные ЧВД

➤ Поиск групп мюонов в ЧВД (ФИАН) – 1963



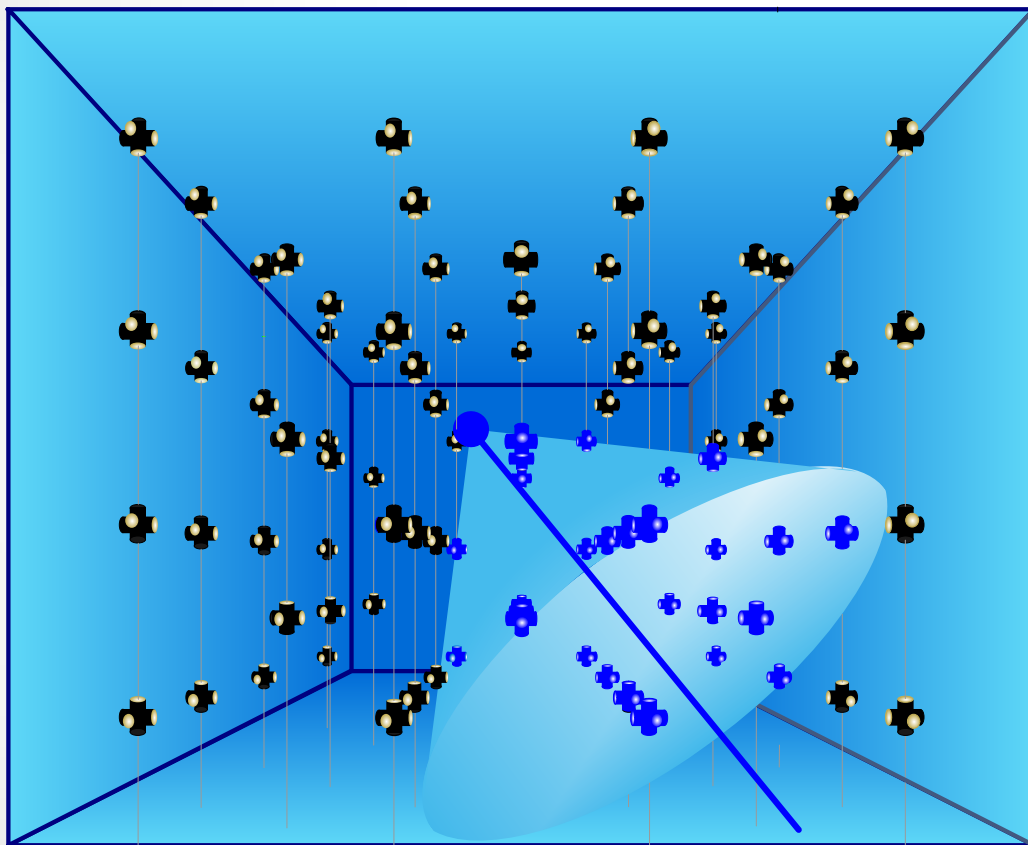
Yu. N. Vavilov
G.I. Pugachova
V.M. Fedorov

Sov. Phys. JEPT,
17, 333-336, 1963

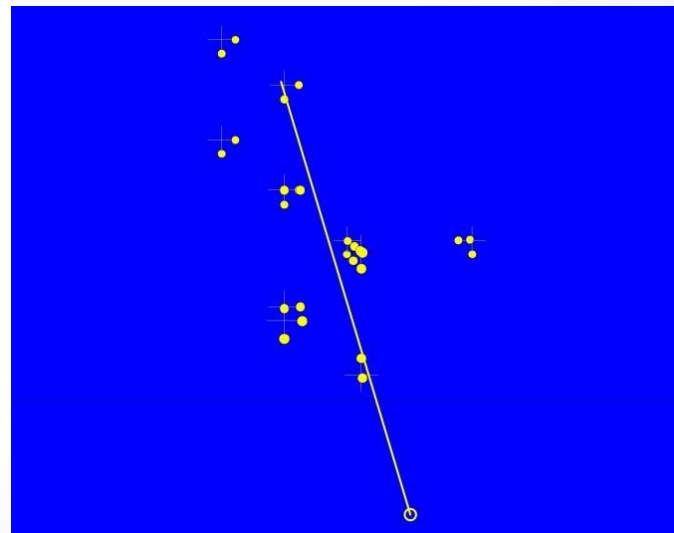
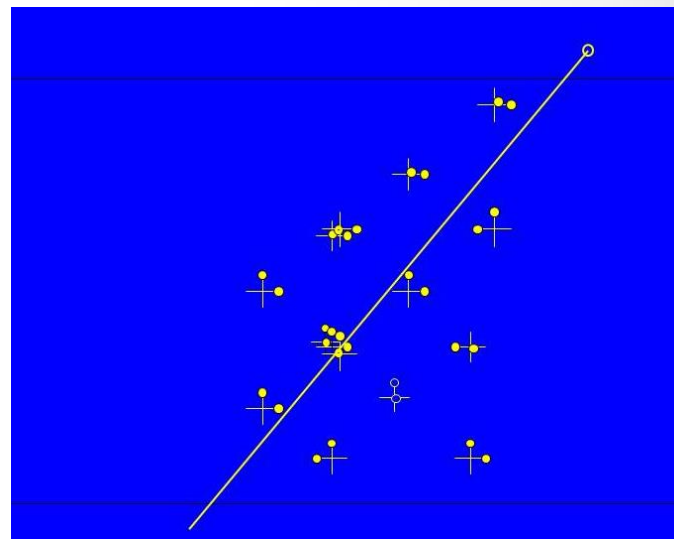
FIG. 1. Diagram of array: a – side view; b – top view.
1, 2 – upper and lower covers of the Cerenkov counter, 3 –
cloud chamber, 4 – trays with hodoscope counters, 5 – Ceren-
kov counter, 6 – Geiger-Muller counters.

Первый решетчатый ЧВД

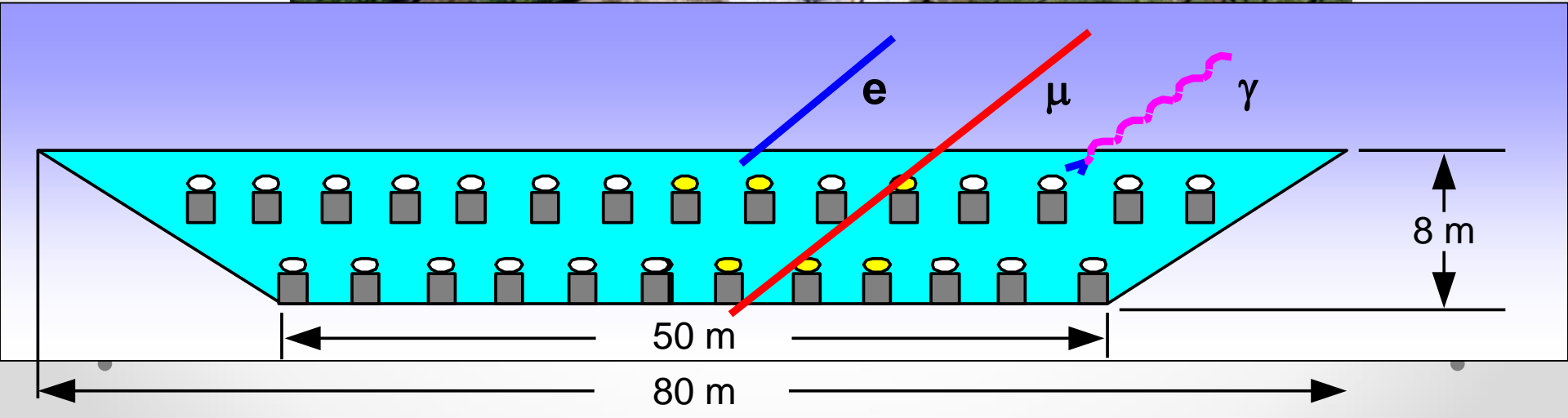
НЕВОД - Нейтринный ВОдный Детектор (1994)

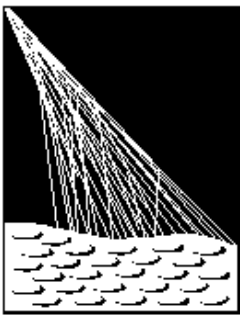


Объем 2000 куб. м,
546 фотоумножителей.



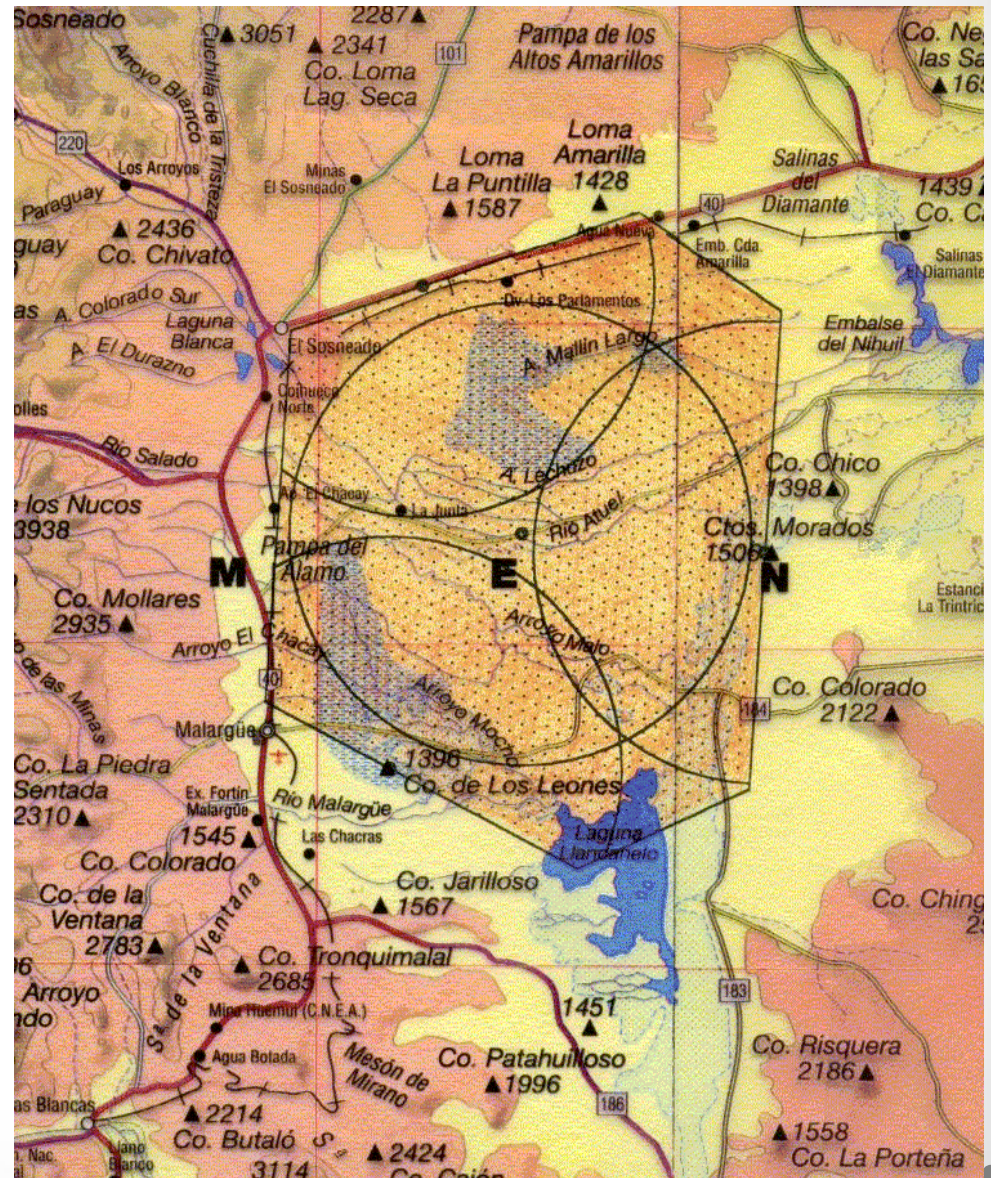
MILAGRO - 1999





PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Обсерватория Пьер Оже - 2008



Площадь – 3000 км²,
1600 ЧВД по 3 ФЭУ

ЧВД Обсерватории Пьер Оже



HAWC - High Altitude Water Cherenkov gamma-ray observatory - 2015



- 4600 м. Sierra Negra, Мексика

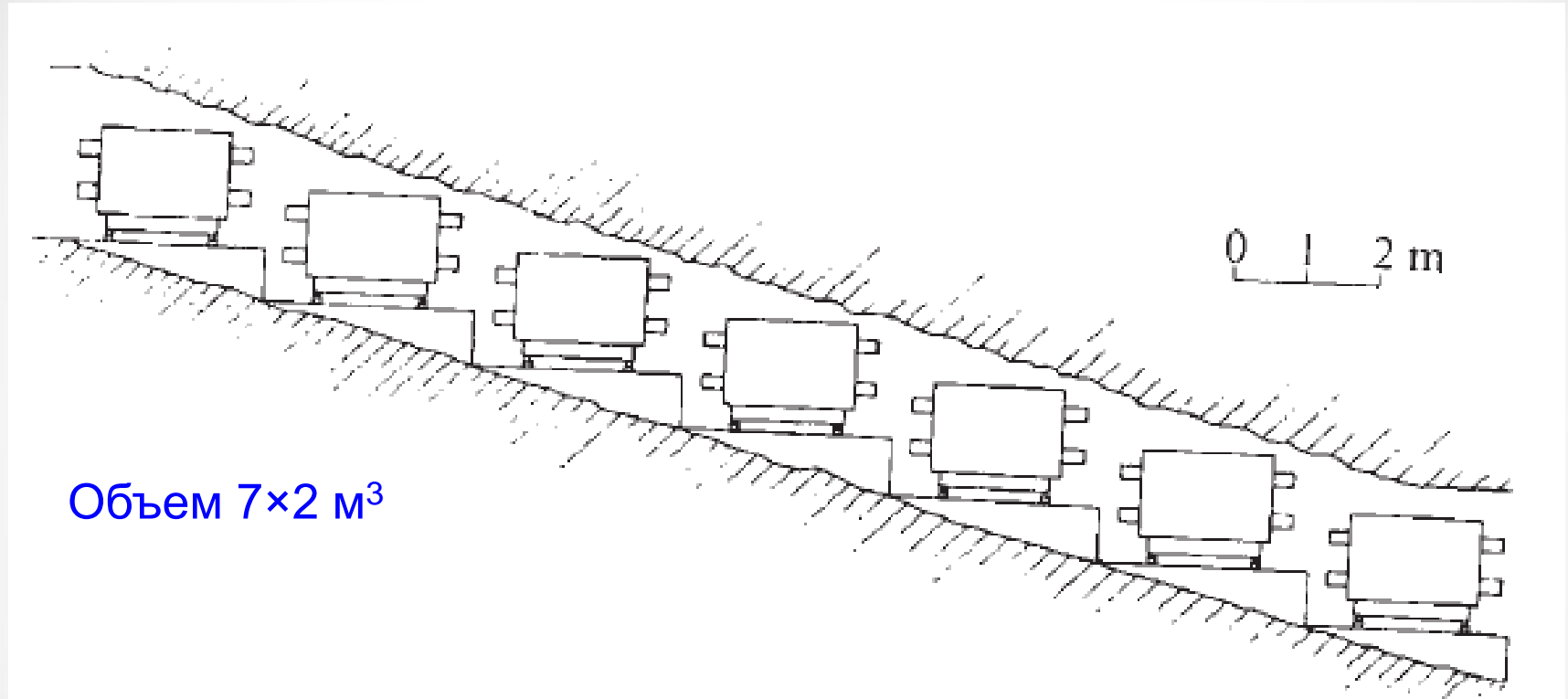
- Размеры ЧВД:
Диаметр – 7.3 м
Высота – 5 м

- 300 ЧВД с 4-мя 10" ФЭУ на дне каждого детектора
- Площадь установки – 22000 м²

Подземные ЧВД

- **Сеть ЧВД для регистрации нейтрино от Сверхновых:**
 - Homestake (США)& Mt. Blanc (Италия) (по 14 т)
 - Проект Homestake (США) (0.5 кт)
- **ЧВД для поиска распада протона:**
 - IMB (США) (8 кт)
 - Kamiokande (Япония) (3 кт)
- **ЧВД для исследования нейтринных осцилляций**
 - Super-Kamiokande (Япония) (50 кт)
 - SNO (Канада) (1 кт D₂O)

Homestake neutrino CWD -1974



Объем $7 \times 2 \text{ м}^3$

Fig. 1 Arrangement of water Cerenkov counters in a tunnel 1,480 m below surface in the Homestake Mine in Lead, South Dakota. The lowest right hand counter is No. 1 and the highest left hand one is No. 7.

Mt. Blanc neutrino CWD



Проект Homestake

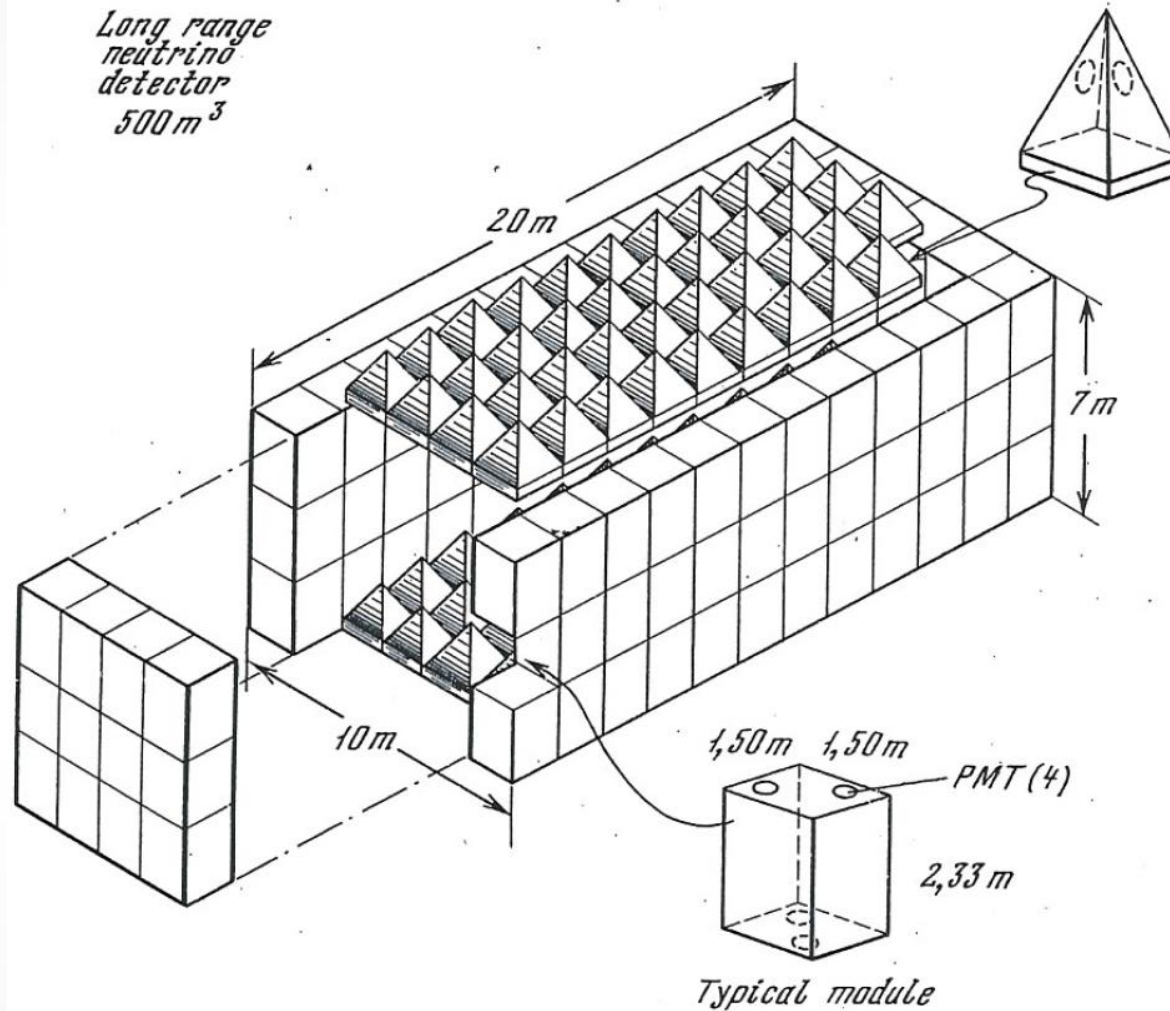


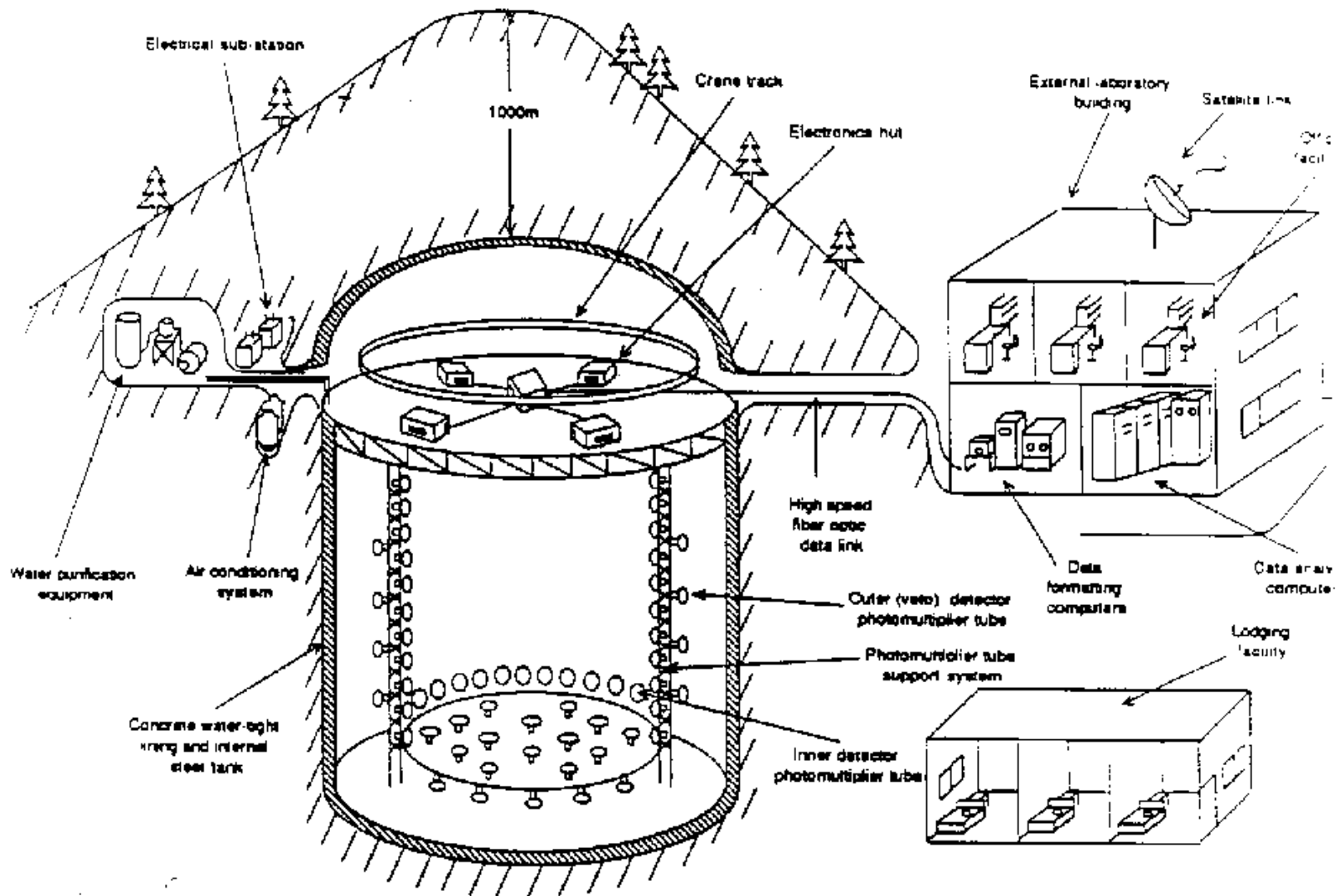
Figure 1. Drawing of The Long Range Neutrino Detector showing the location of the ninety-six H_2O Čerenkov counter modules that form the sidewalls of the detector and the 80 scintillation counters that form the roof and floor of the detector

IMB -1979 - 1989

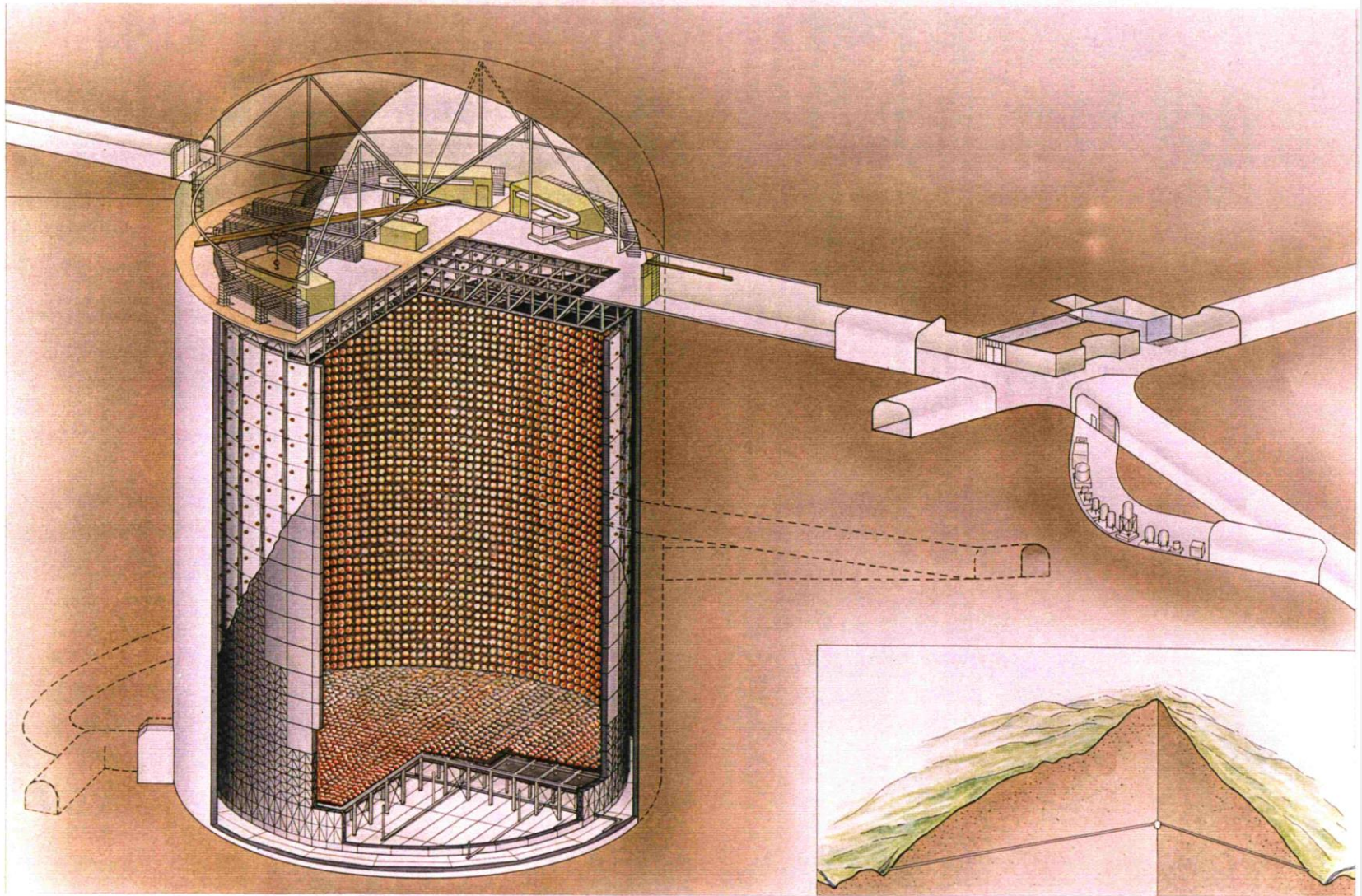


Объем $17 \times 17.5 \times 23 \text{ м}^3$
2048 фотоумножителей

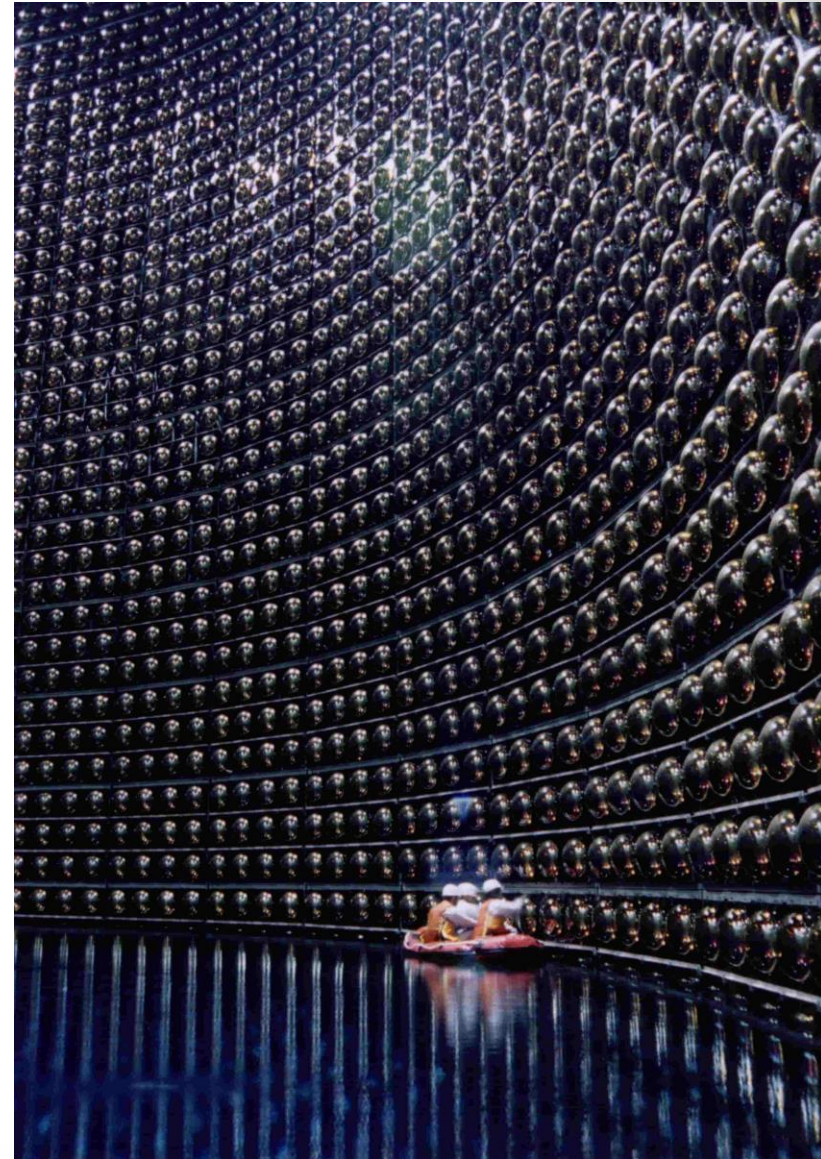
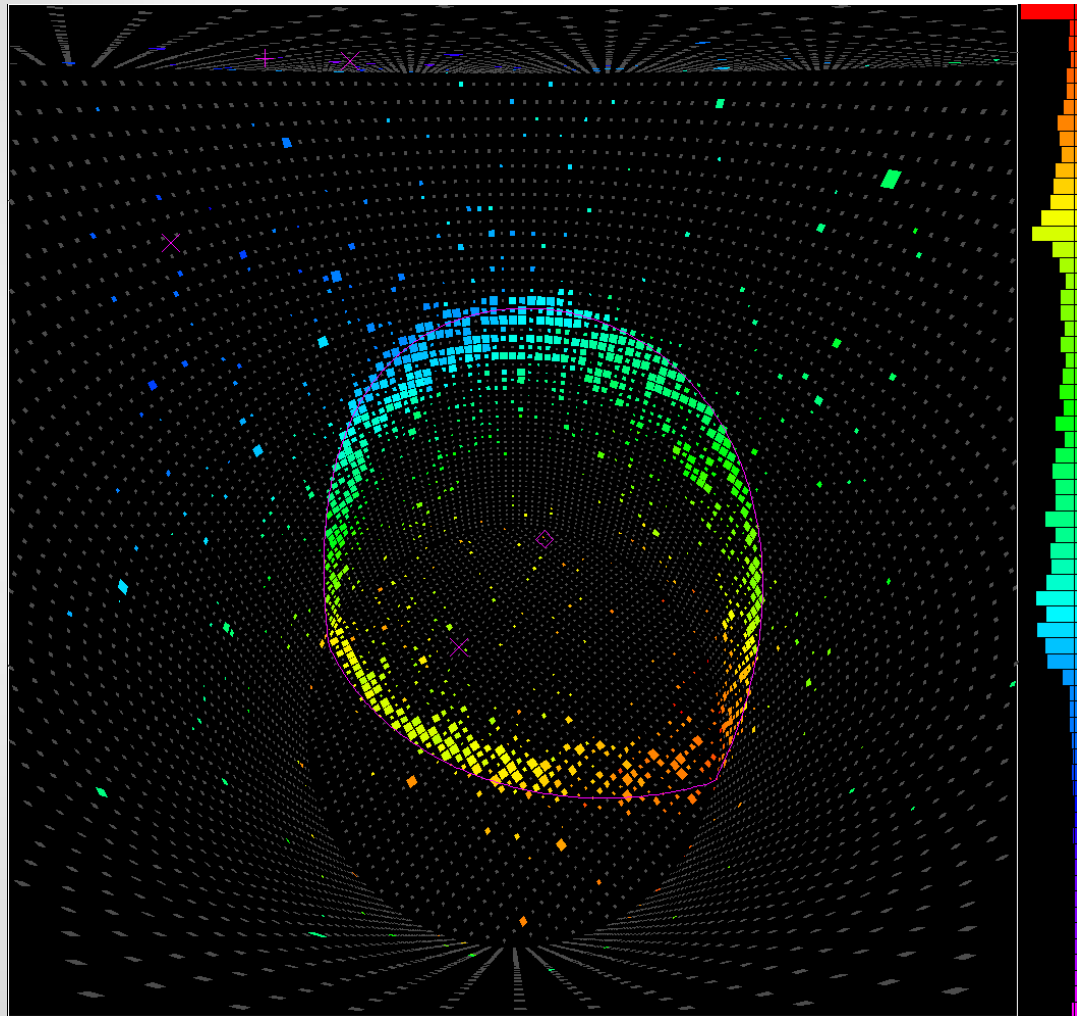
KamiokaNDE -1986



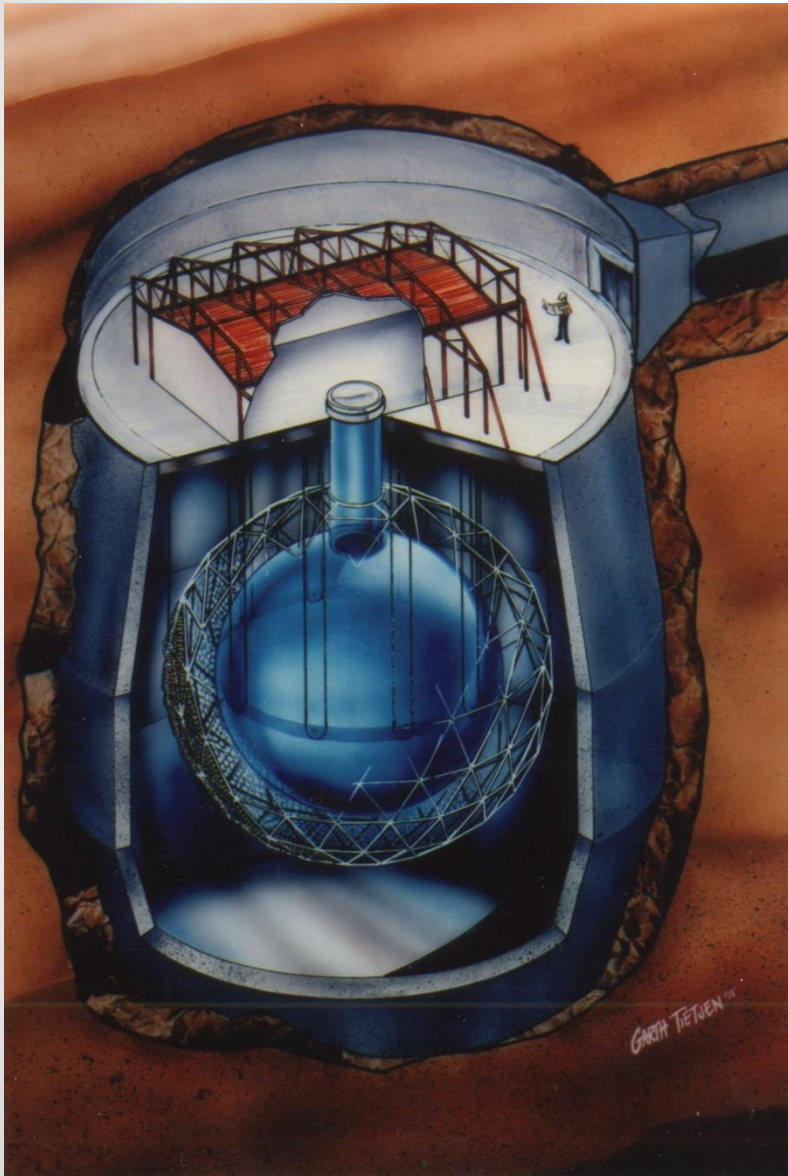
Super-Kamiokande – 1996/2008



Super-Kamiokande



Sudbury Neutrino Observatory (SNO) -1999



- 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

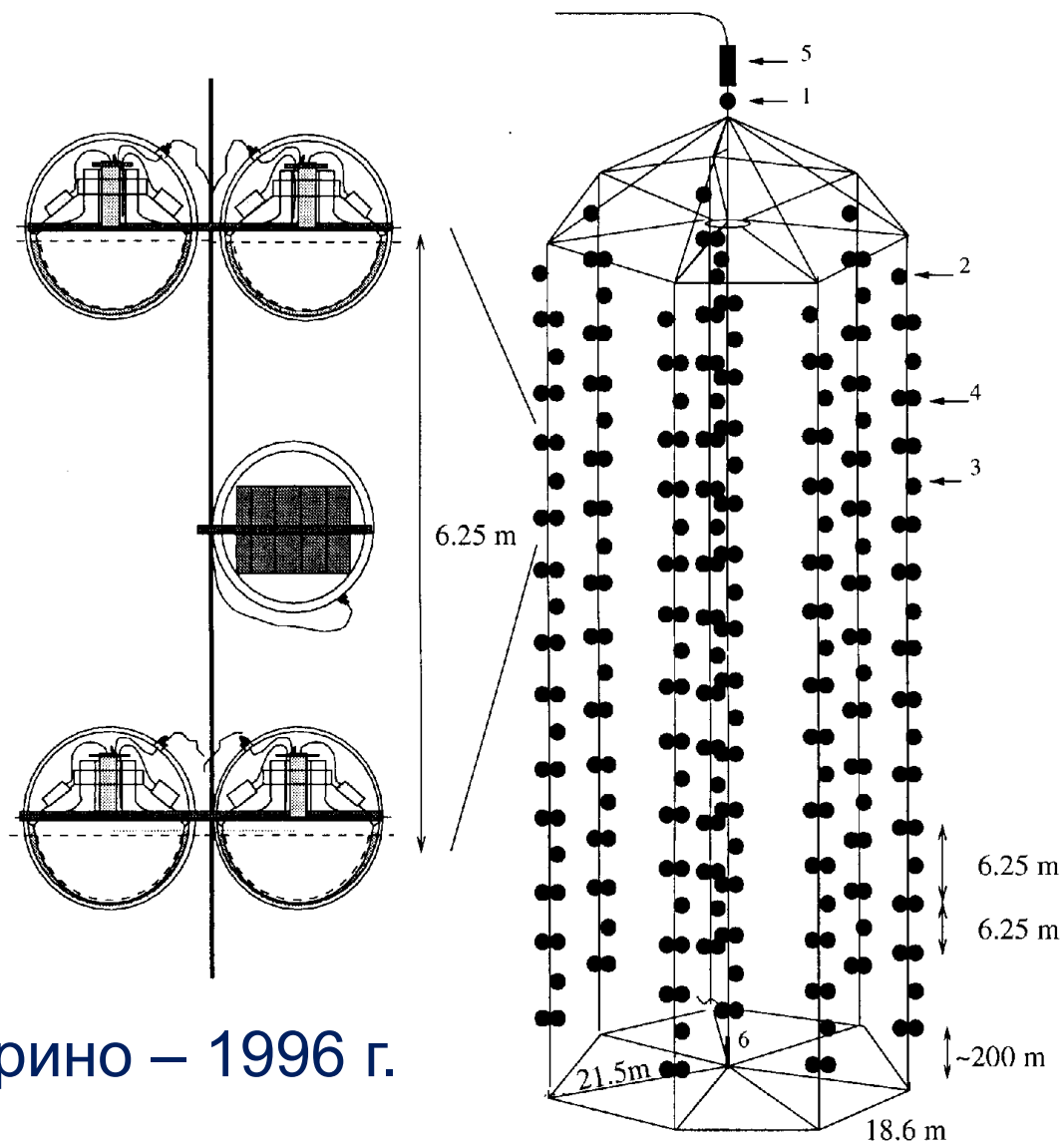
Подводные (-ледные) ЧВД

Нейтрино – малый поток и очень малое сечение → детектор большого объема (массы)

- **1960 г.** - *А.М.Марков* – идея использовать естественные водоемы для проведения исследований нейтрино высоких энергий
- **1975 г.** – проект **DUMAND** (США)
- **1977 г.** – проект **DUMAND-II** (совещание, Москва, ФИАН)
- **1998 г.** – нейтринный телескоп **NT-200** (Байкал, Россия)
- **2000 г.** – нейтринный телескоп **AMANDAII** (Ю.Полюс, Антарктида)
- **2008 г.** – нейтринный телескоп **ANTARES** (Средиземное море, Франция)
- **2010 г.** – нейтринный телескоп **IceCube** (Ю.Полюс, Антарктида)

НТ-200 (оз. Байкал)

- глубина 1100 м;
- 192 ОМ (с 1998 г.);
- $S_{\text{эфф}} \sim 1000-5000 \text{ м}^2$

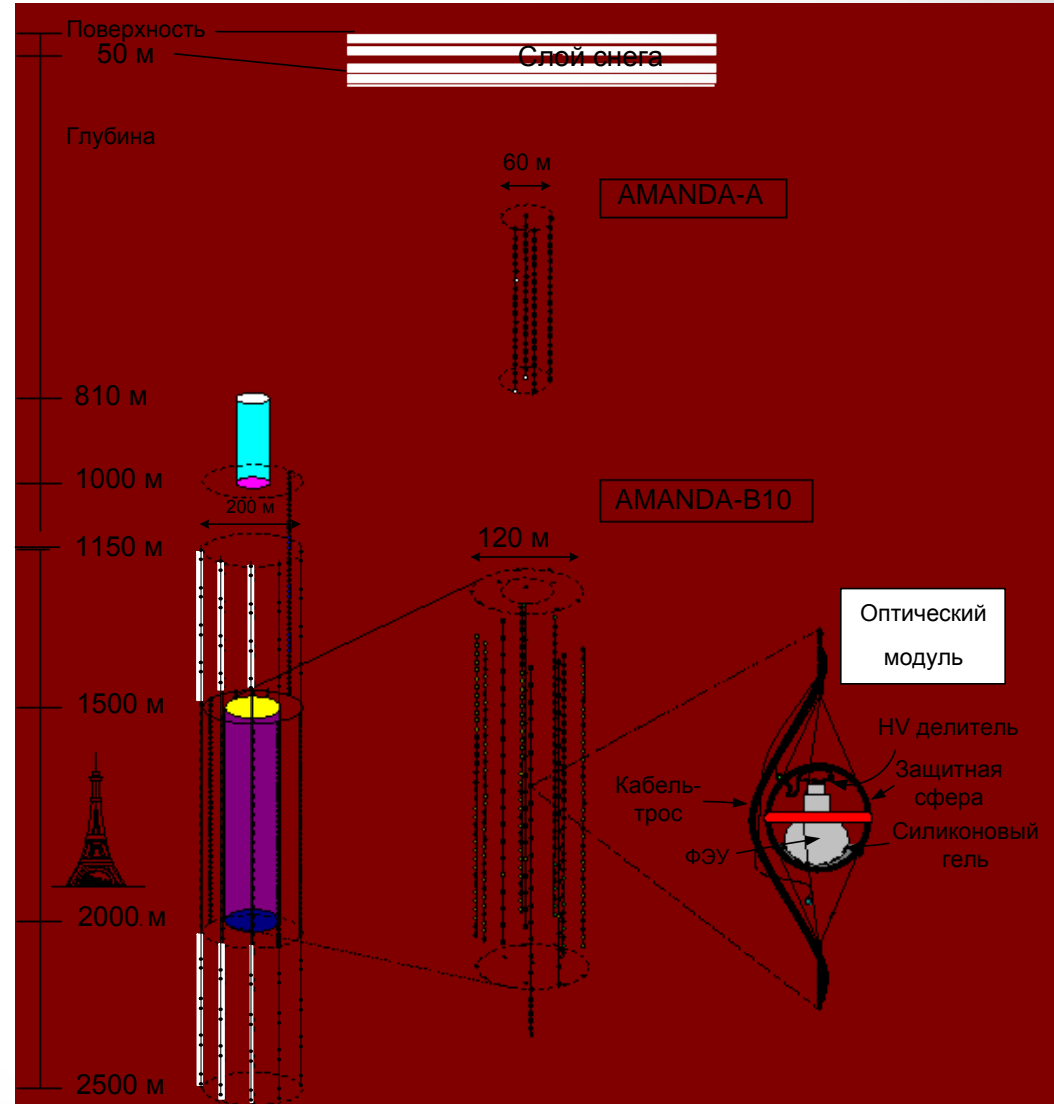


Первая регистрация нейтрино – 1996 г.

AMANDA

(Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)

- 2000 г.
- Глубина – 1500-2000 м.
- 677 8" ФЭУ на 19 гирляндах.
- $S_{\text{эфф}} \sim 30000 \text{ м}^2$.

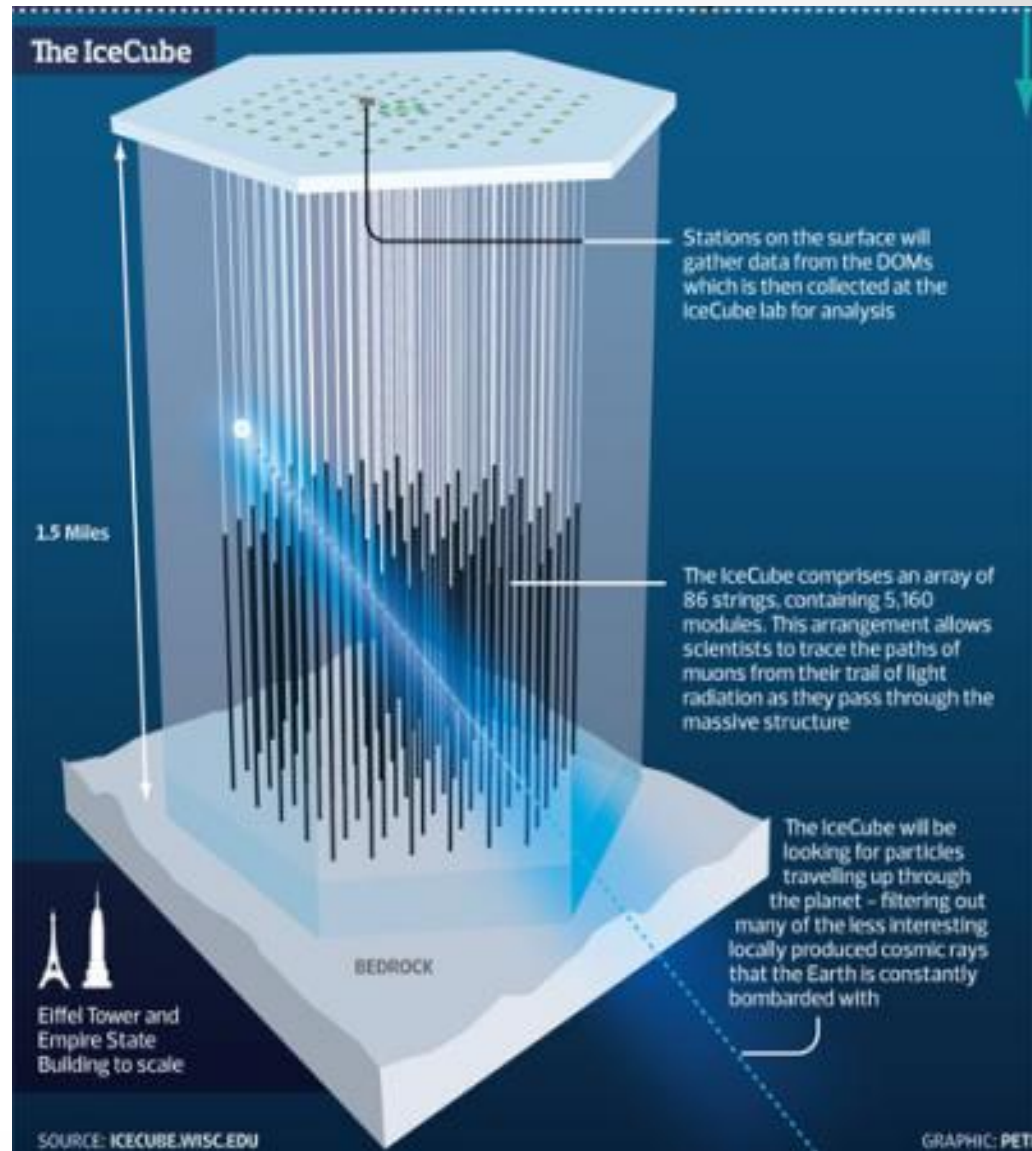


AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)

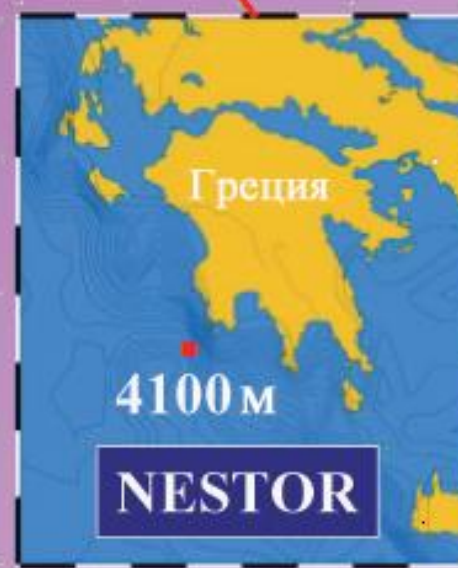
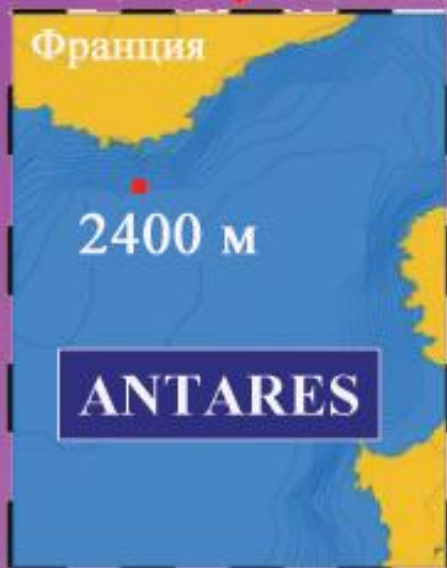
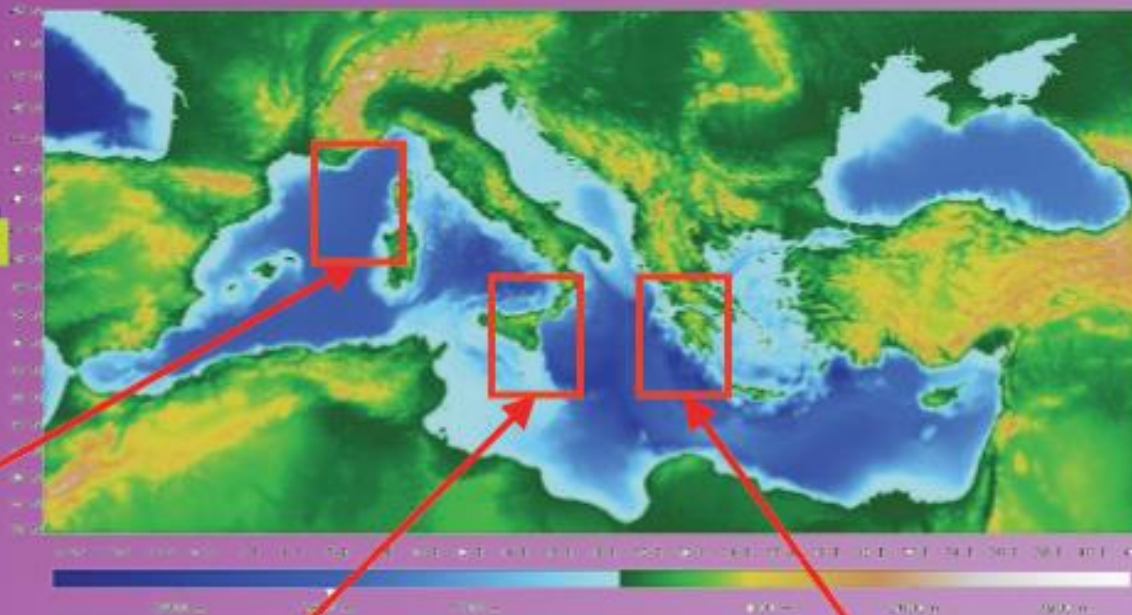


ICECUBE - 2010

- 80 гирлянд, 4800 ФЭУ
- Объем – 1км³ (1 Гт)
- 300 атм. нейтрино в день

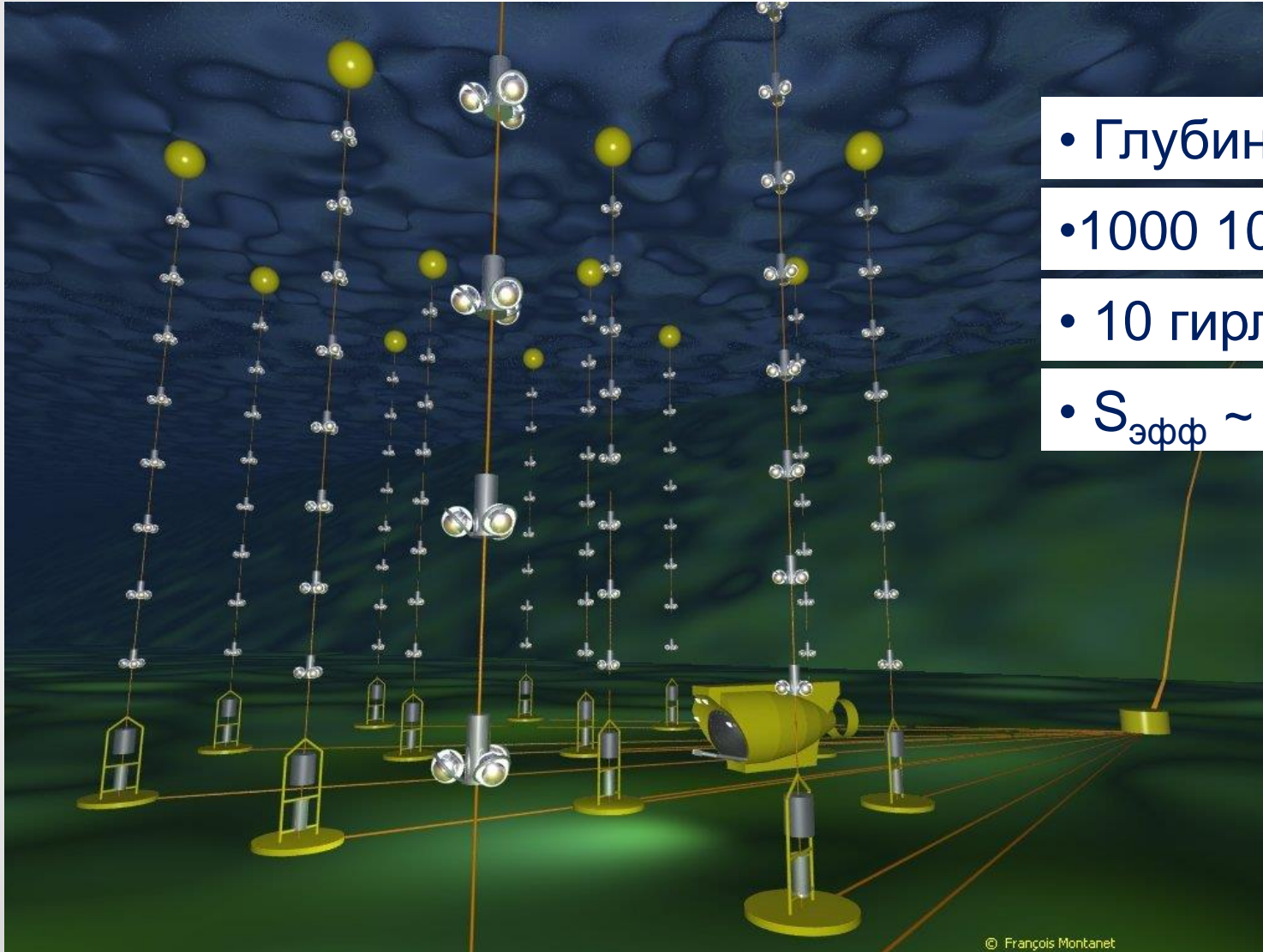


ЧВД в Средиземном море



ANTARES - 2008

Astronomy with a **N**eutrino **T**elescope and **A**byss environmental **RE**search



• Глубина 2.4 км.

• 1000 10" ФЭУ.

• 10 гирлянд (400 м).

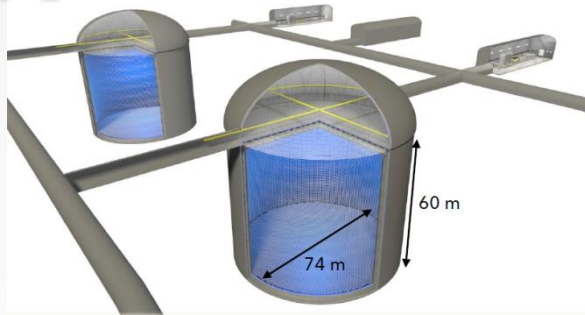
• $S_{\text{эфф}} \sim 0.1 \text{ км}^2.$

Некоторые результаты ЧВД

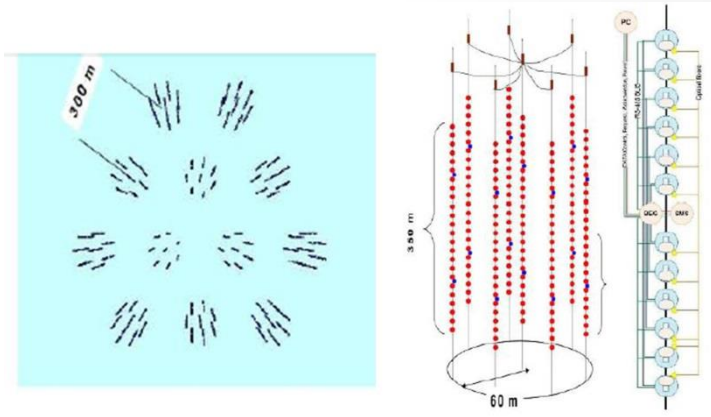
- ШАЛ - Haverah Park - 10^{15} - 10^{18} эВ
- Pierre Auger - ГЗК эффект
- γ – астрономия – MILAGRO, HAWC
- Осцилляции ν – S-Kamiokande, SNO
- ν в высоких энергий:
НЕВОД – ν на поверхности Земли,
IceCube – ν ПЭВ-ных энергий

Перспективы развития ЧВД

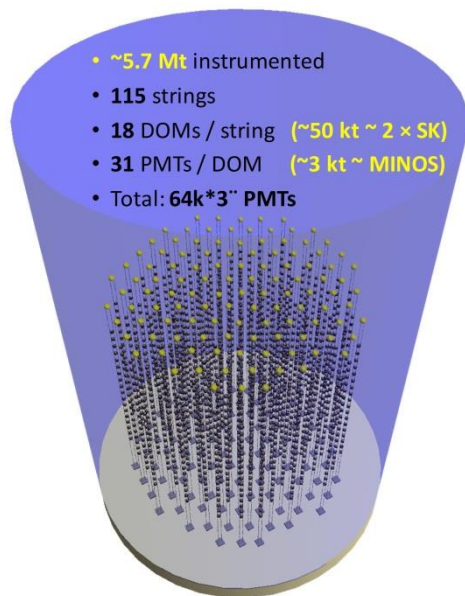
➤ Hyper-Kamiokande



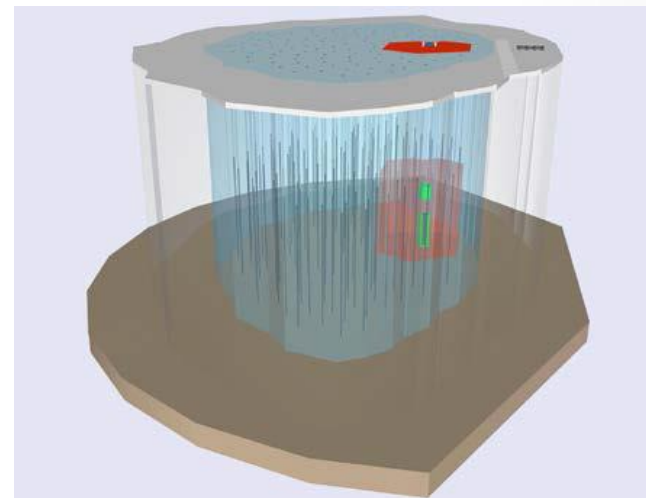
➤ Байкал - GVD



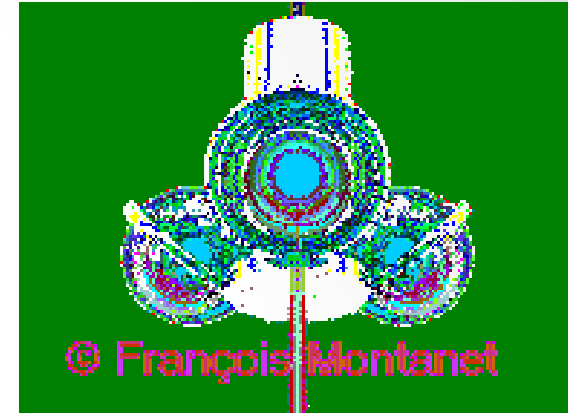
➤ KM3Net (ORCA)



➤ IceCube GenII



ΟΤ ΦΕΥ κ ΚΜΜ



© François Montanet



KM3NeT

Заключение

- Черенковские водные детекторы находят широкое применение в различных областях современной физики.
- Увеличение суммарной массы действующих ЧВД в зависимости от времени описывается экспоненциальной функцией.
- С помощью ЧВД получен целый ряд важных результатов.
- Нет сомнений, что создание нового поколения ЧВД приведет к новым достижениям в различных областях исследований.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

