

Фотоумножители в современных экспериментах в астрофизике частиц

Б.К.Лубсандоржиев

Институт ядерных исследований РАН

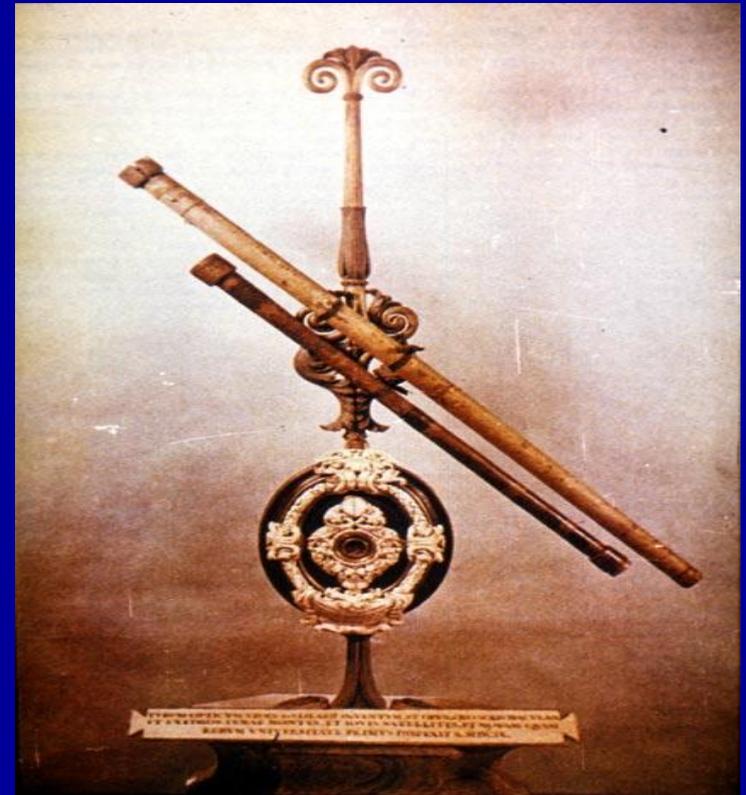
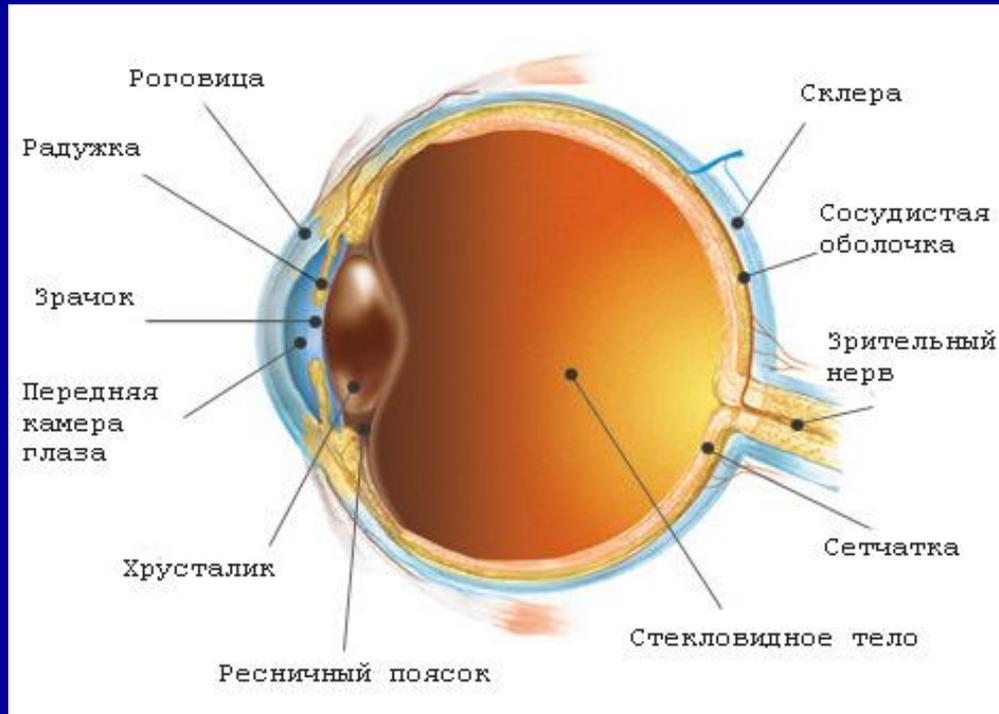
Семинар, посвященный 70-летию Л.Б.Безрукова
ИЯИ РАН, Питомник, 15 апреля 2015

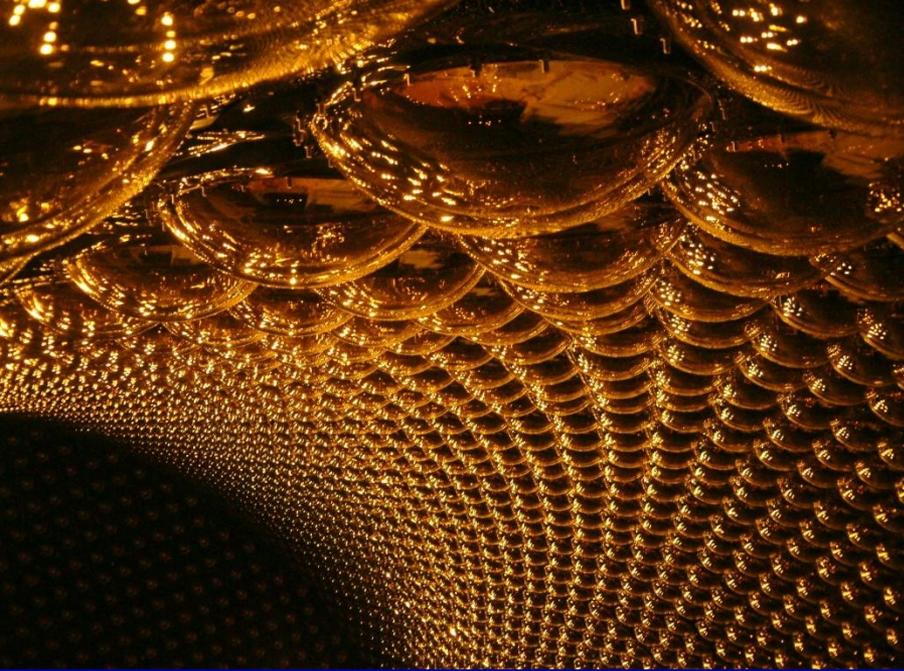
The real voyage of
discovery consists not in
seeking new landscapes but in
having new eyes

Марсель Пруст
“В поисках утраченного времени”

Фотодетекторы – глаза экспериментов

Фотоумножители используются в подавляющем большинстве экспериментов в астрофизике частиц!



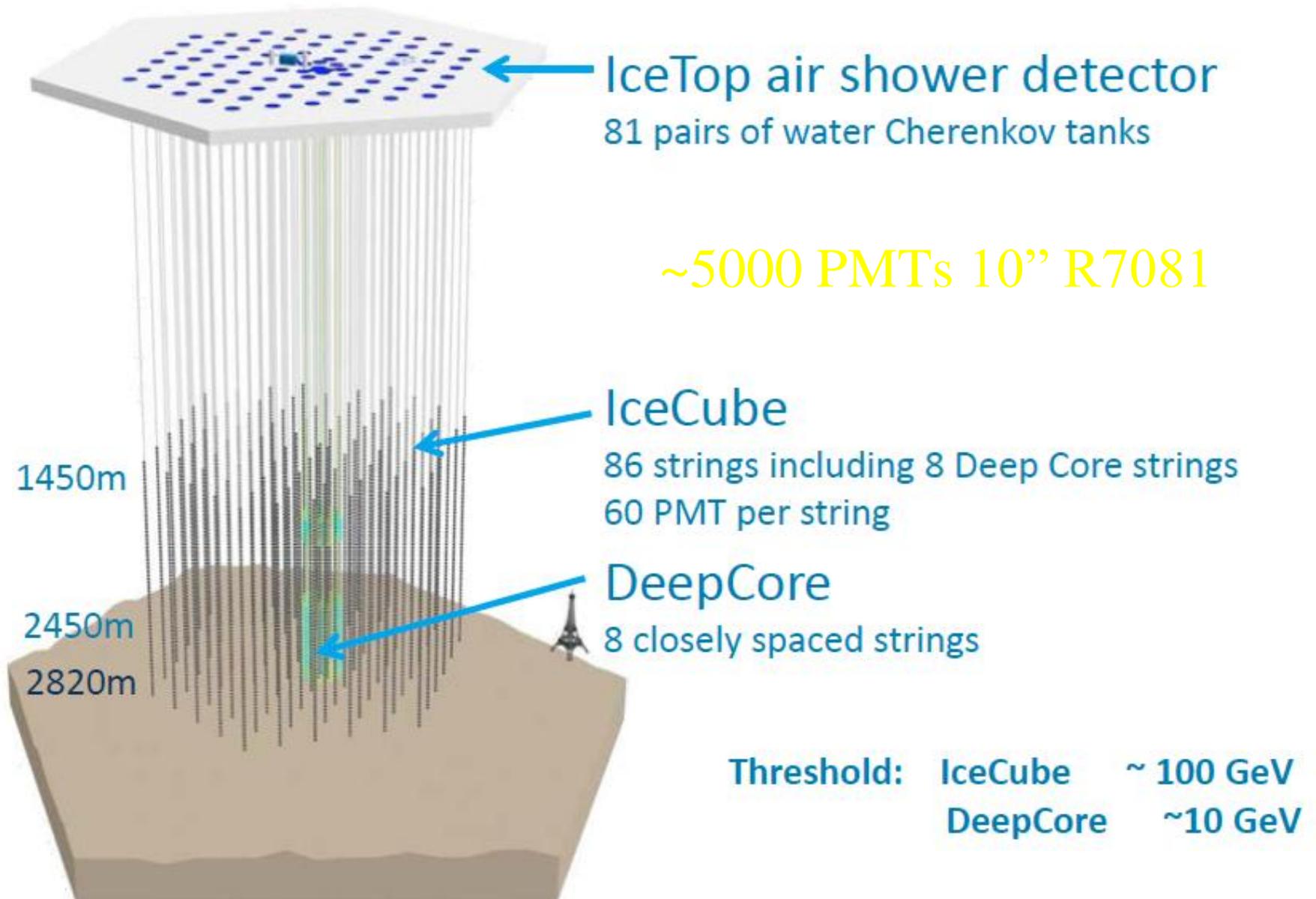


Super-KAMIOKANDE

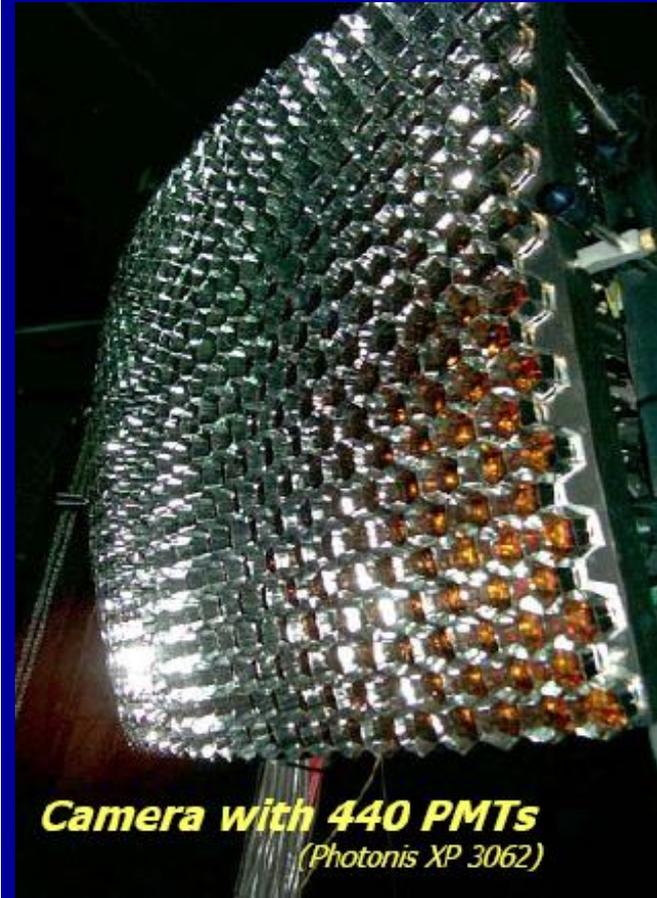
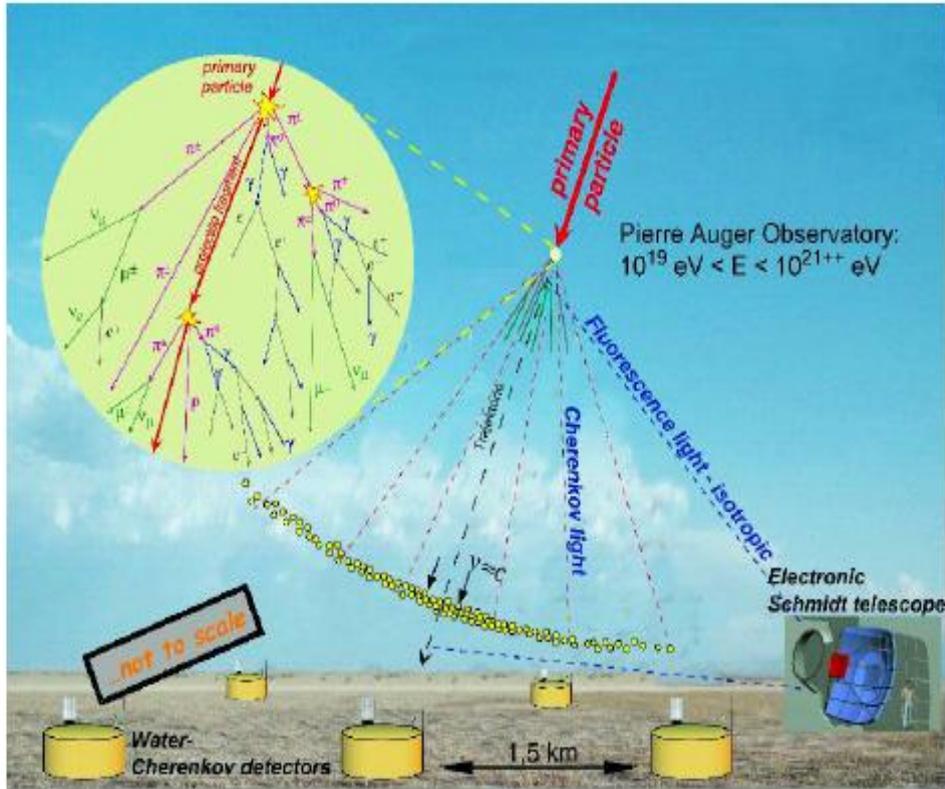
>11300 PMTs 20" R3600



IceCube Neutrino Observatory

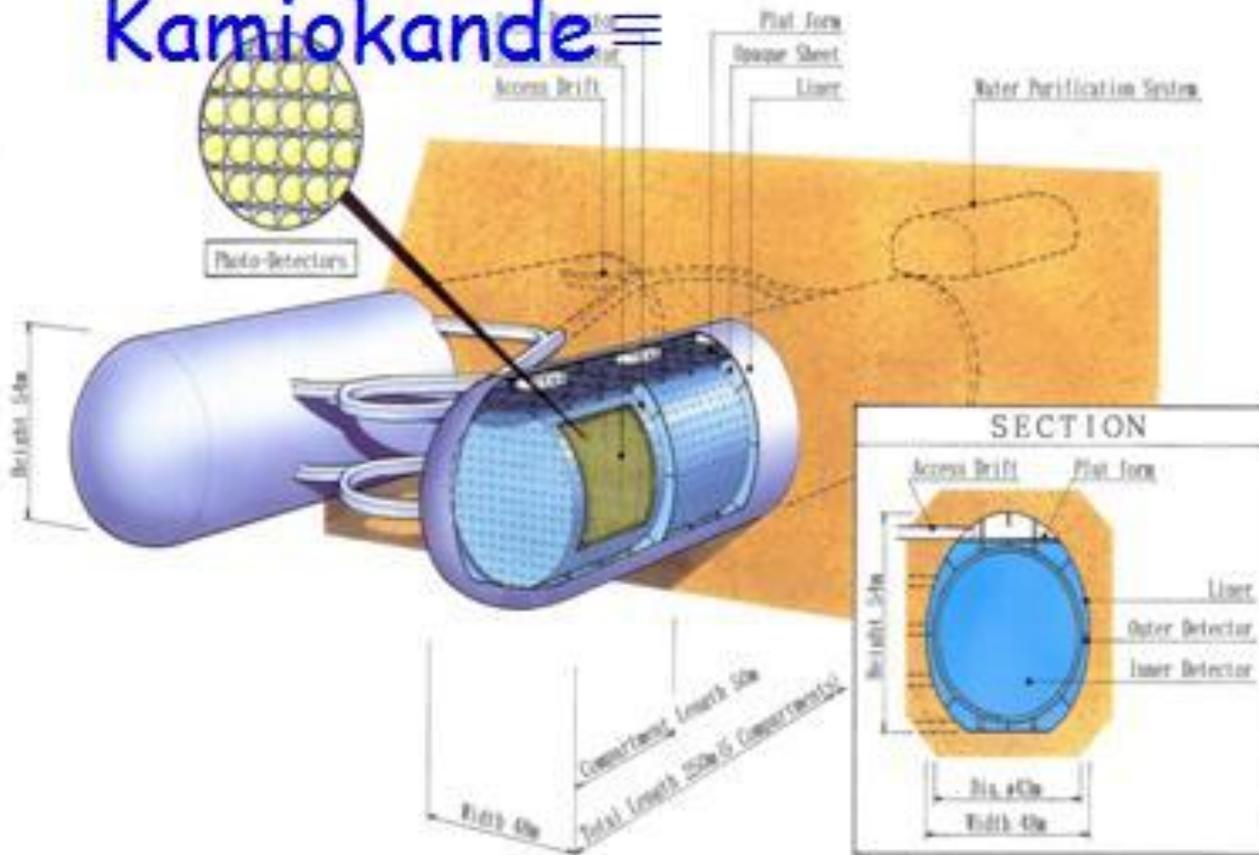


Extensive Air Showers @ Auger Hybrid-Detector



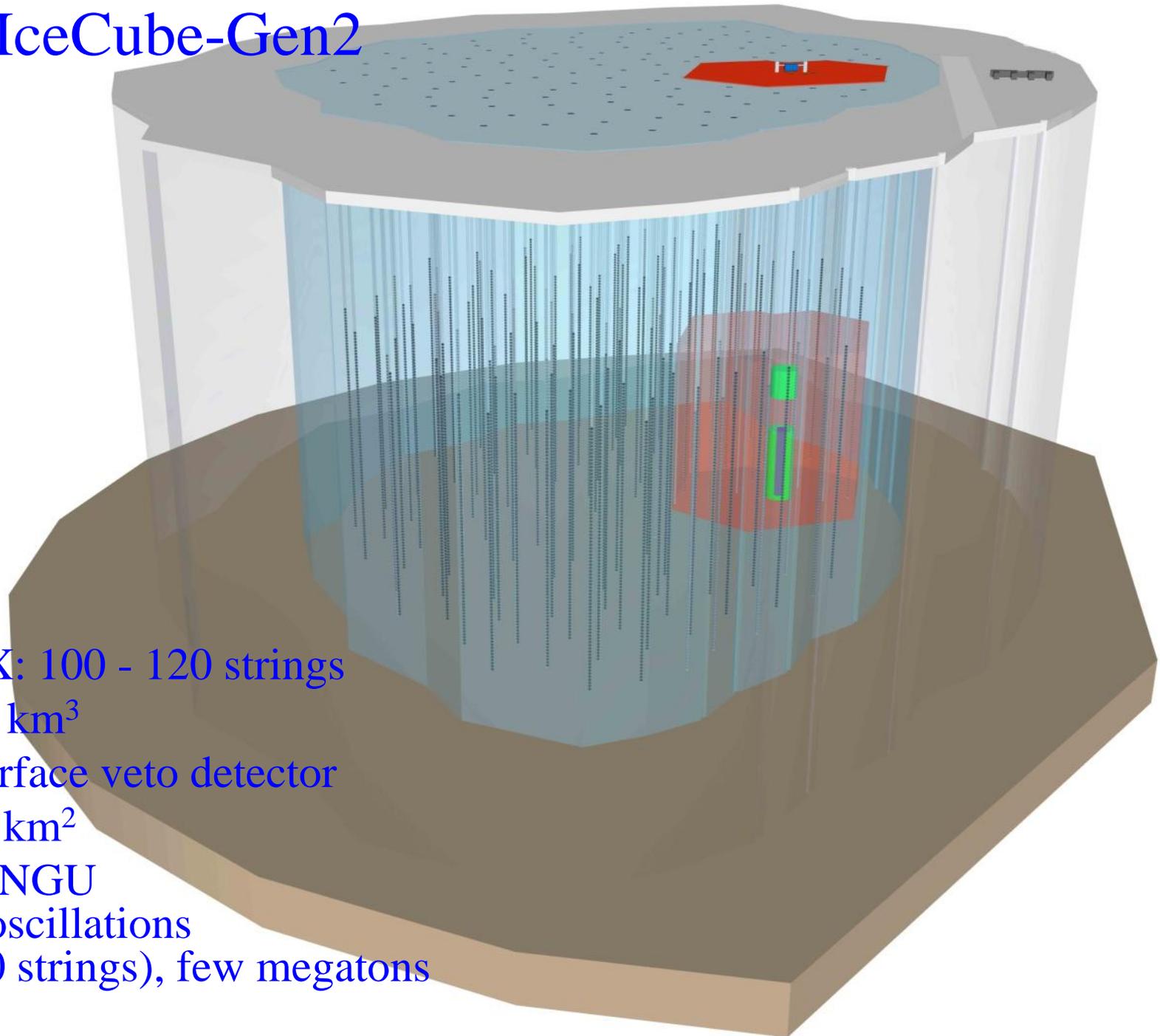
11000 3" PMTs + 4800 9" PMTs

DUE Hyper-Kamiokande



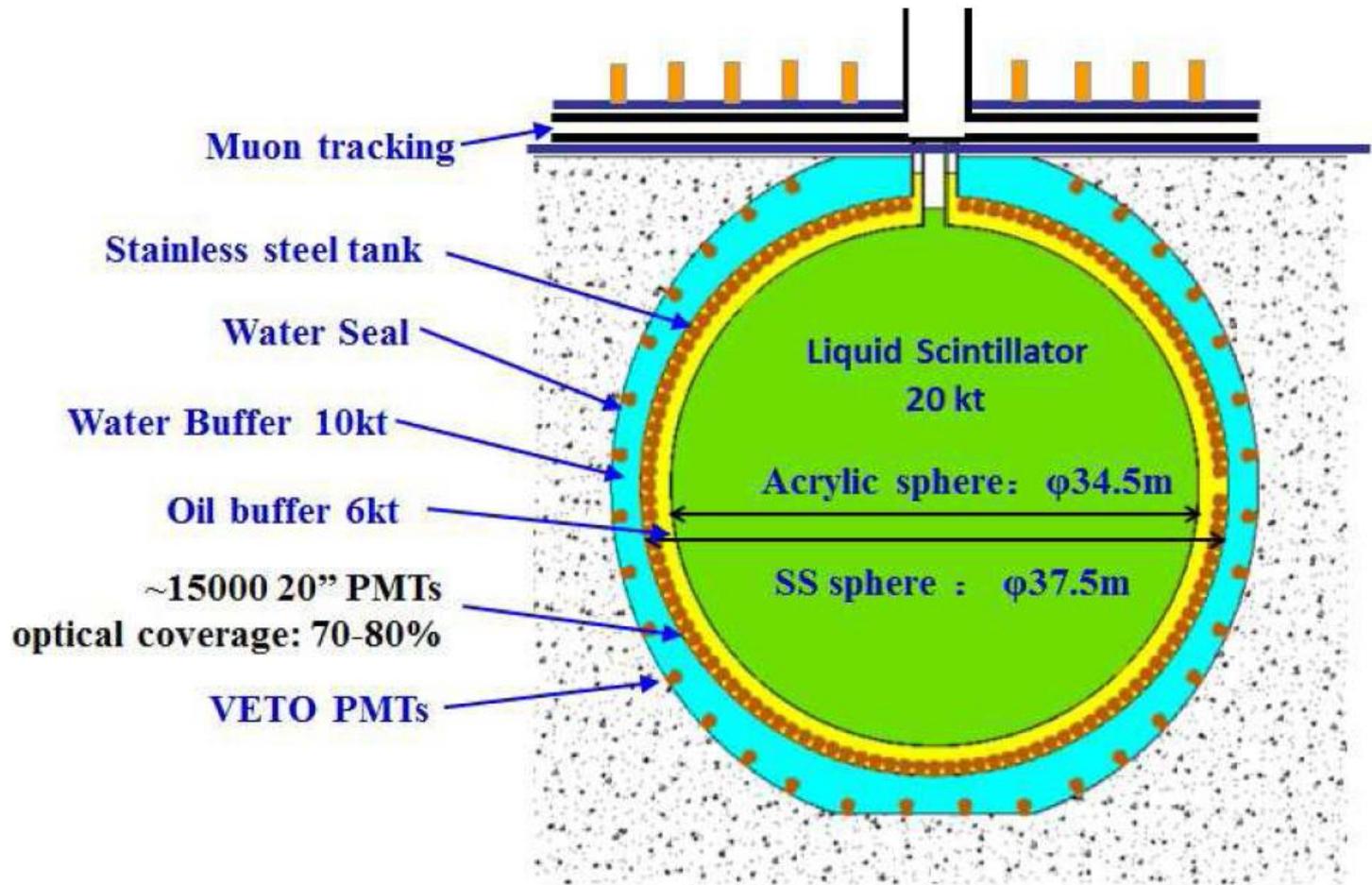
150 000 – 200 000!!! 20" PMTs

IceCube-Gen2



- HEX: 100 - 120 strings
7-14 km³
- + surface veto detector
120 km²
- + PINGU
for oscillations
(~40 strings), few megatons

JUNO



15000-20 000 20" PMTs

Проект эксперимента LENA

DETECTOR LAYOUT

Cavern

height: 115 m, diameter: 50 m
shielding from cosmic rays: ~4,000 m.w

Muon Veto

plastic scintillator panels (on top)
Water Cherenkov Detector
1,500 phototubes
100 kt of water
reduction of fast
neutron background

Steel Cylinder

height: 100 m, diameter: 30 m
70 kt of organic liquid
13,500 phototubes

Buffer

thickness: 2 m
non-scintillating organic liquid
shielding external radioactivity

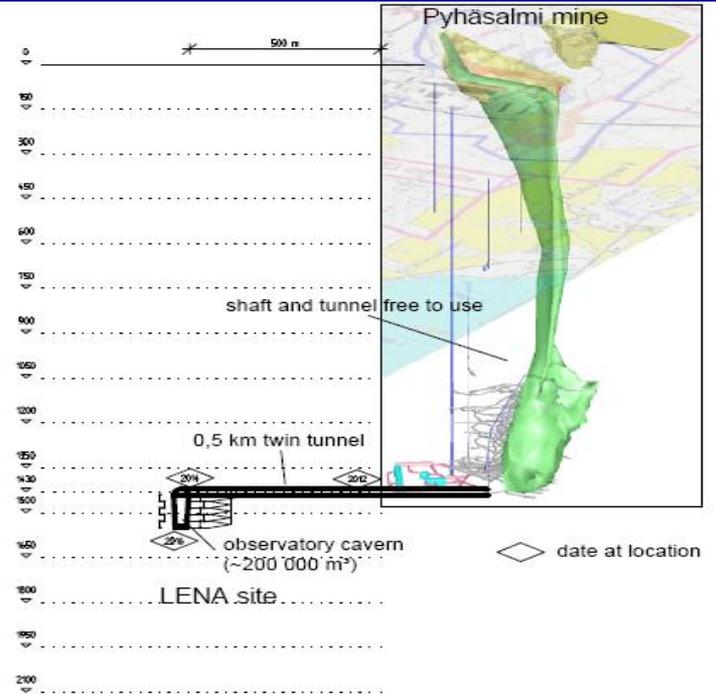
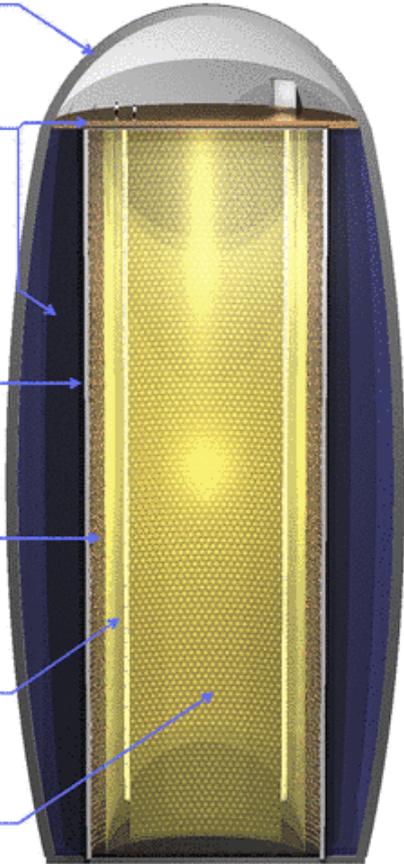
Nylon Vessel

parting buffer liquid
from liquid scintillator

Target Volume

height: 100 m, diameter: 26 m
50 kt of liquid scintillator

vertical design is favourable in terms of rock pressure and buoyancy forces



Schedule (excavation works):

- start 2012 earliest
- duration 4 years
- finish in 2016

15 000 PMTs (20")

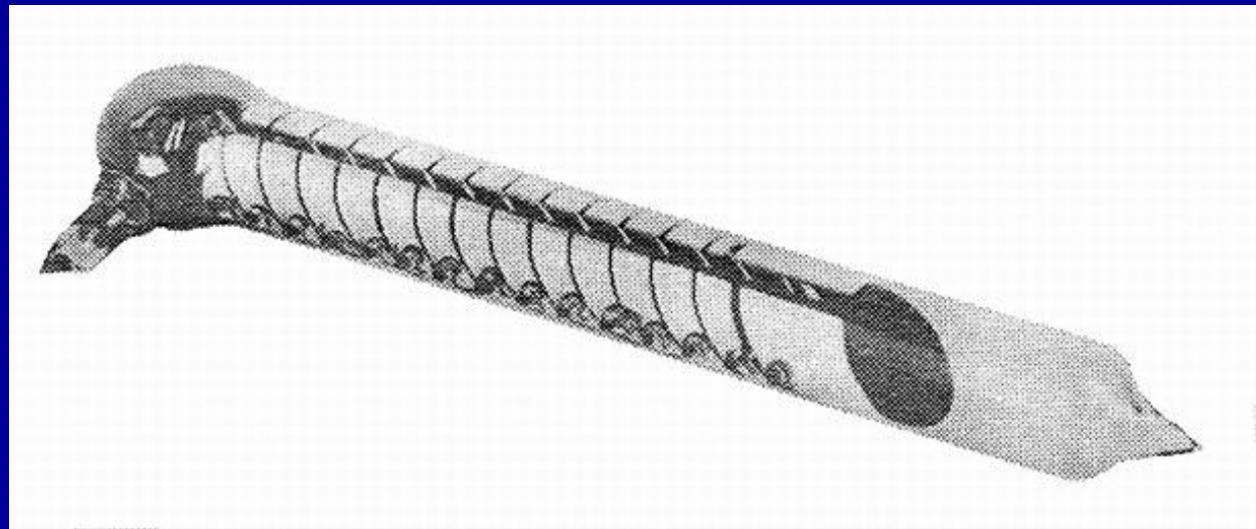
Кто?

Когда?

Где?

изобрел первый фотоумножитель

Фотоэлектронный умножитель – Кубецкий Л.А. 1930



Первый в мире фотоэлектронный умножитель
“Трубка Кубецкого”

Кубецкий Леонид Александрович
1906 - 1959

Детекторы фотонов

- Вакуумные фотодетекторы (ФЭУ, HPDs, HPMS, HAPDs и т.д.)
- Твердотельные фотодетекторы (фотодиоды, лавинные фотодиоды, кремниевые фотоумножители, фотоэмульсии и т.д.)
- Газовые фотоумножители



А.Е.Чудаков: “... любой большой эксперимент должен подобно локомотиву двигать вперед развитие новой экспериментальной техники, которая в свою очередь будет открывать новые возможности для будущих еще более чувствительных экспериментов”

A.E.Chudakov 1956-57.

Project of 0.5 m sphere with a scintillator in centre.

Not implemented.

N.Sclar 1959. Photodetector with electron bombarded Si-diode.

Pilot sample, 10^4 gain.

Kalibjan, 1963

Chevalier, 1966. The first really working hybrid tube with Si-diode.

G. van Aller et al. 1981-87.

The first Hybrid tube with luminescent screen – XP2600.

L.Bezrukov et al. 1983-1990. Quasar tubes. (Quasar-370, 1990-1998)

Hybrid phototube with luminescent screen

Why luminescent screen?

Luminescent screen - thin layer of scintillator
(monocrystal or phosphor) covered by aluminum foil

Electro-optical preamplifier (light amplifier) with
large photocathode + small conventional type PMT

Van Aller, Flyckt et al. 1981-87; Bezrukov, Lubsandorzhev et al. 1983-2001.

A number of scintillators are available only as phosphors (ZnO:Ga, LS, etc).

Sometimes it's better to work with phosphors.

$$PDE = QE \times CE \times K$$

K – probability to detect p.e. (*L.Bezrukov, V.Kabikov 1987*)

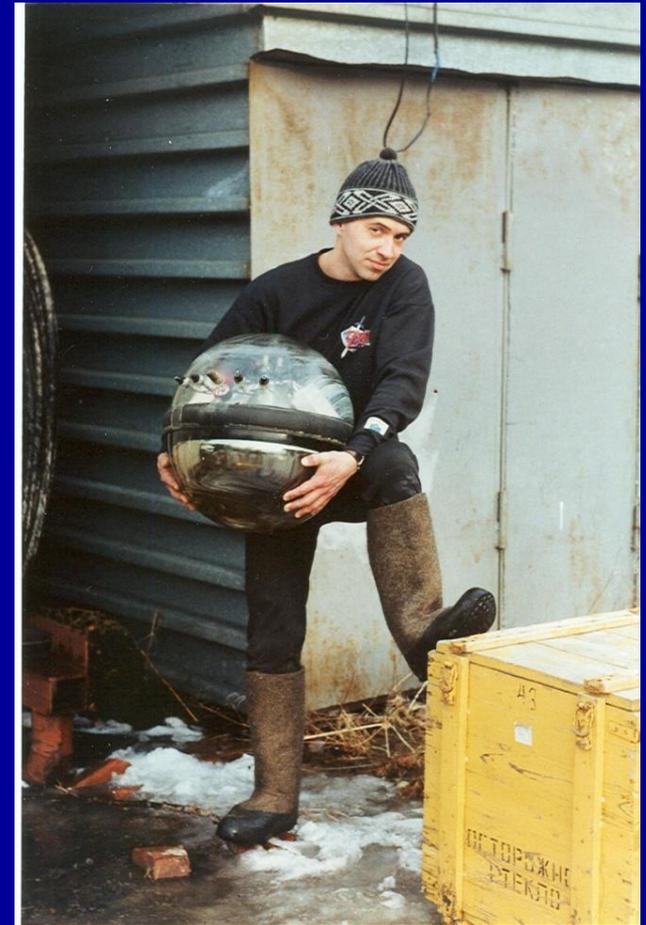
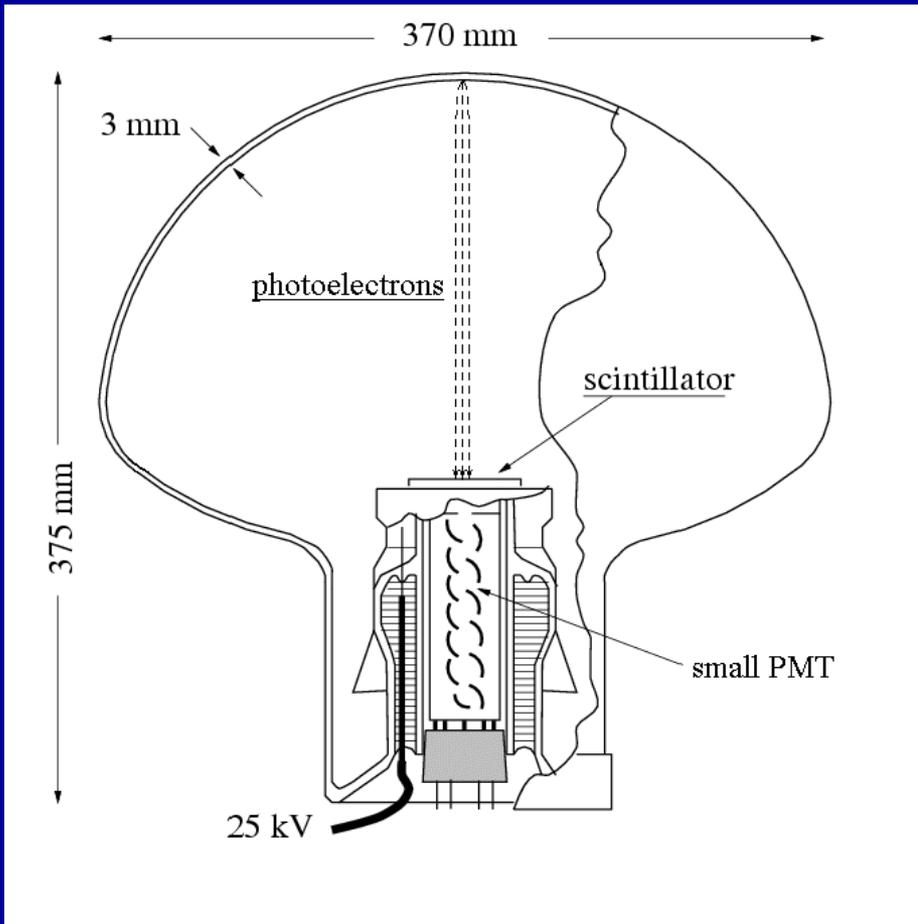
$$CE_{\text{eff}} = CE \times K$$

Гибридные фотодетекторы с люминесцентным экраном:

$$SE_{\text{eff}} \sim 100\% !!!$$

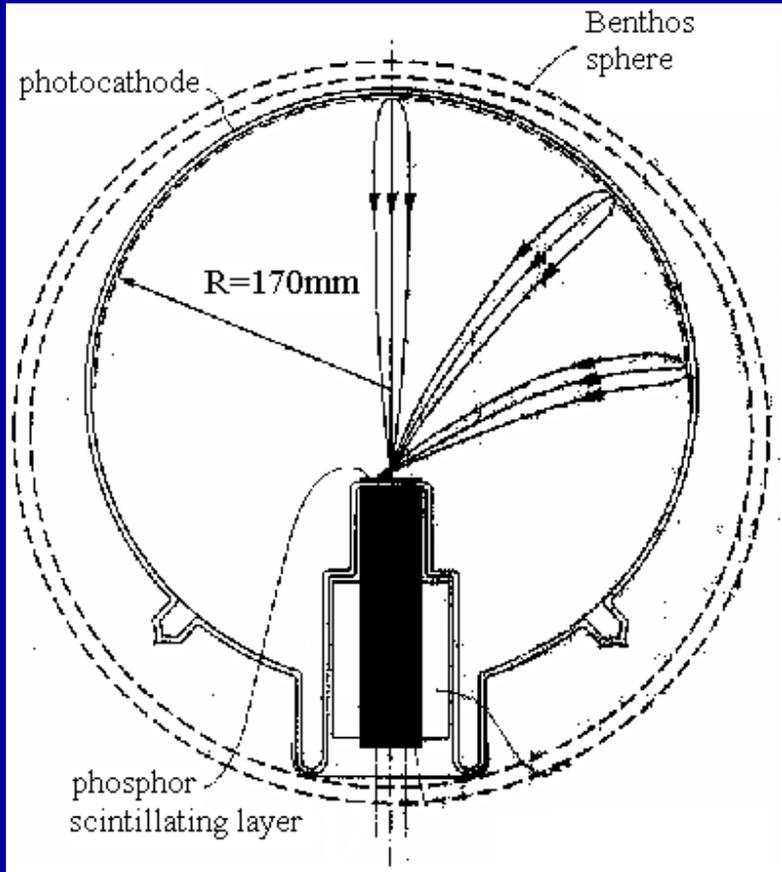
КВАЗАР-370

Гибридный фотодетектор для глубоководных
нейтринных экспериментов



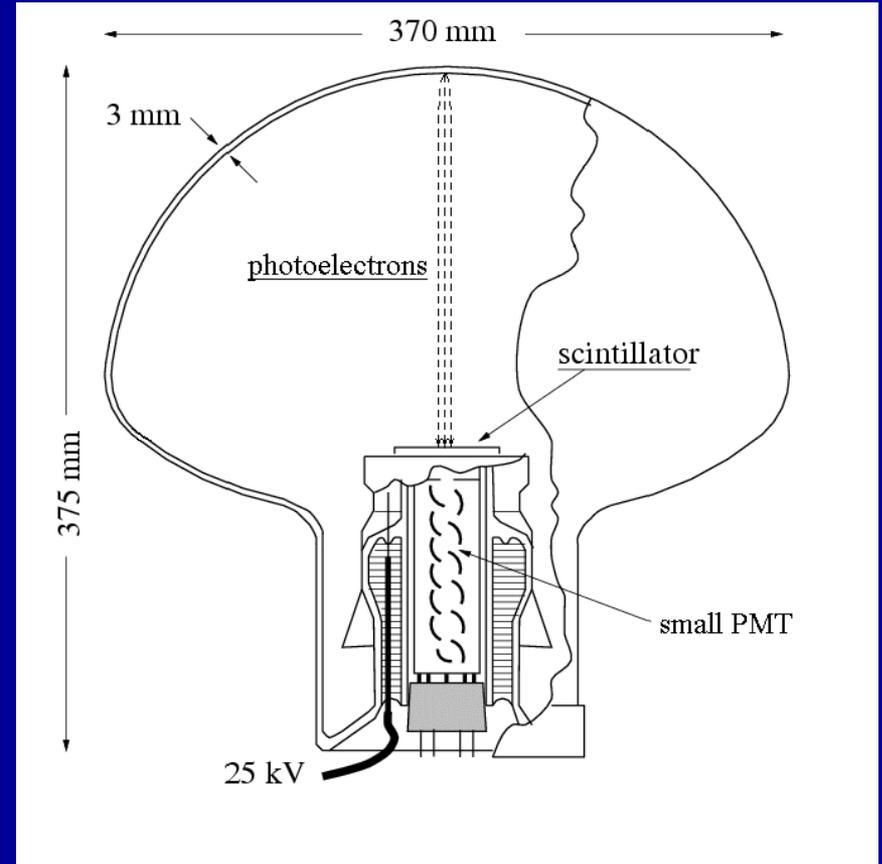
Совместная разработка ИЯИ РАН и ОКБ Катод, г.Новосибирск

XP2600



Transit time difference $\sim 5\text{ns}$.

QUASAR-370

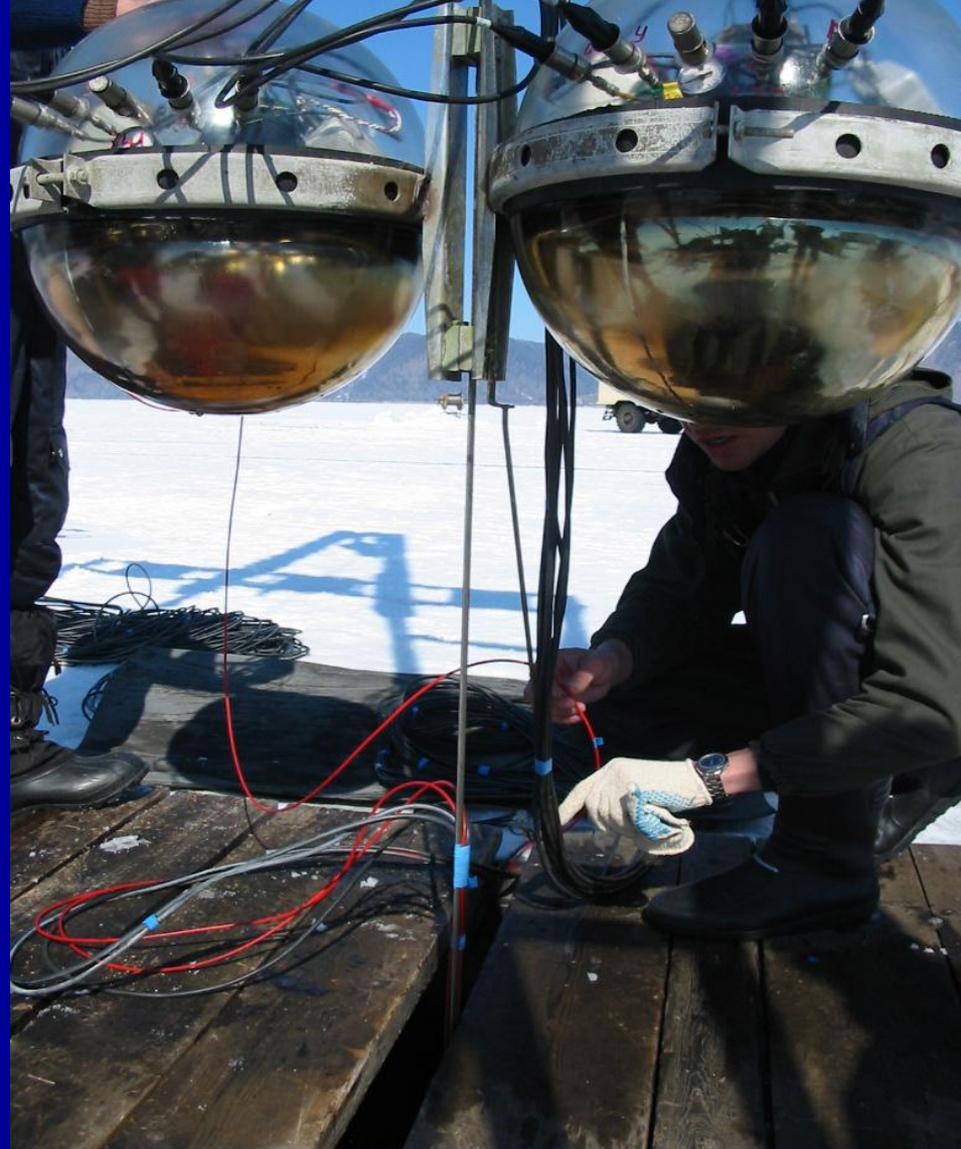


Transit time difference $\sim 0.8\text{ns}$!

“...the largest eye ever recorded, by the way, is a colossal 37 cm in diameter. The leviathan that could afford to carry such eyes around is a giant squid with 10-metre tentacles.. ”

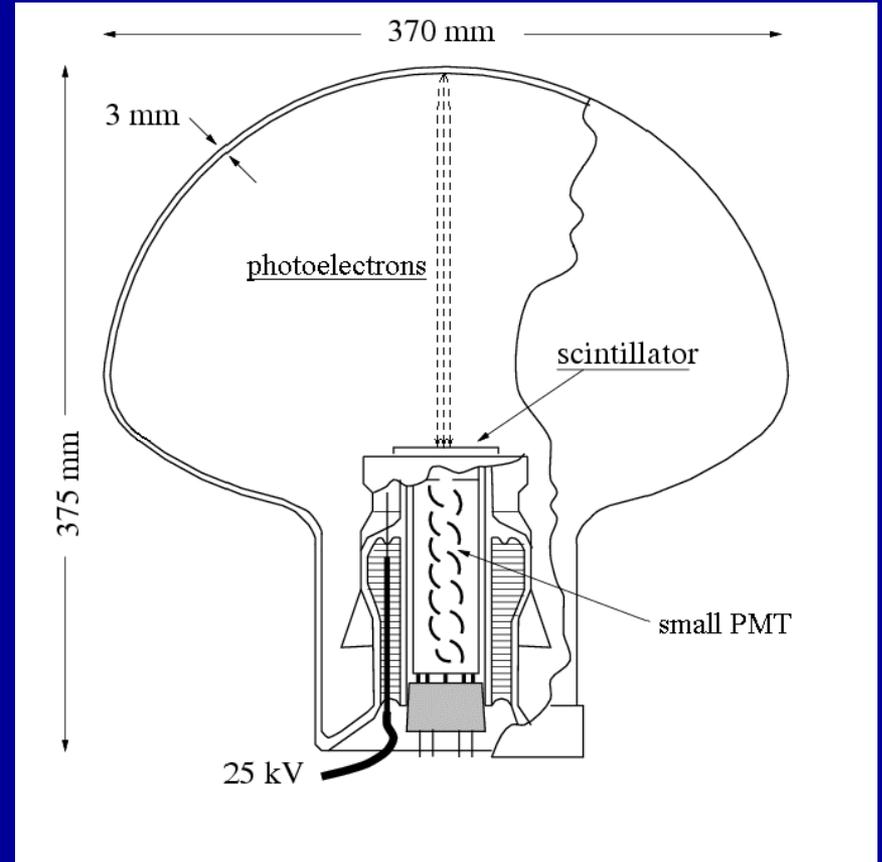
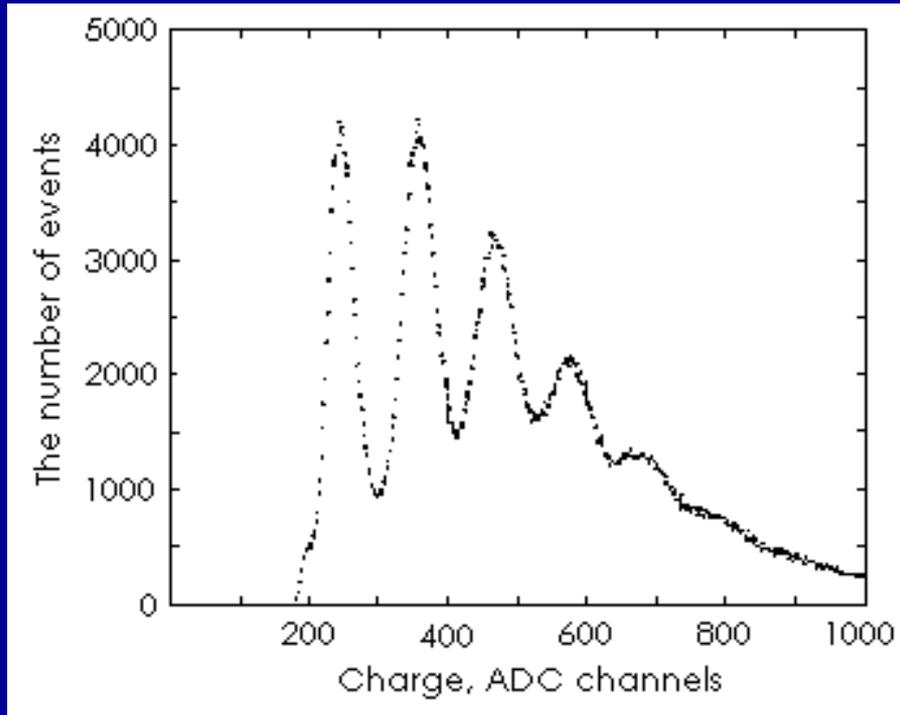
Richard Dawkins.
Climbing Mount Improbable. 1997





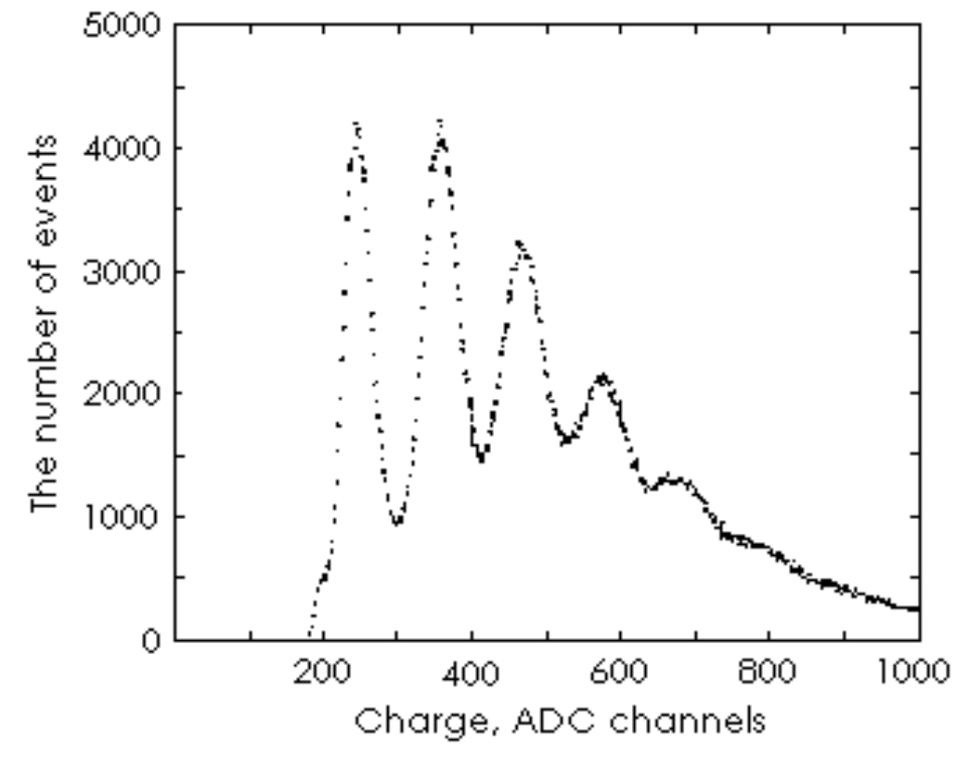
(KBA3AP-370Y, KBA3AP-370G, KBA3AP-370D, KBA3AP-370LSO, ...)

KBA3AP-370LSO

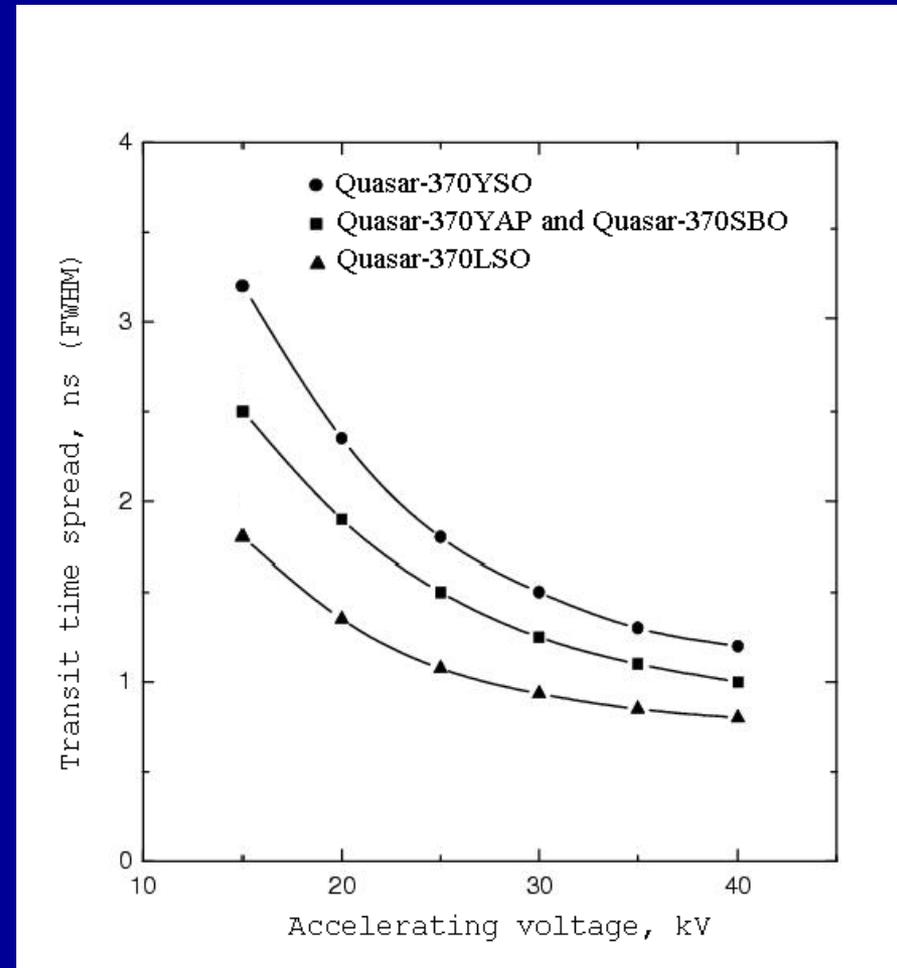


SER ~ 30-35%!

Jitter ≤ 1 ns (fwhm)!



Single electron resolution $\sim 30\text{-}35\%$
(fwhm)



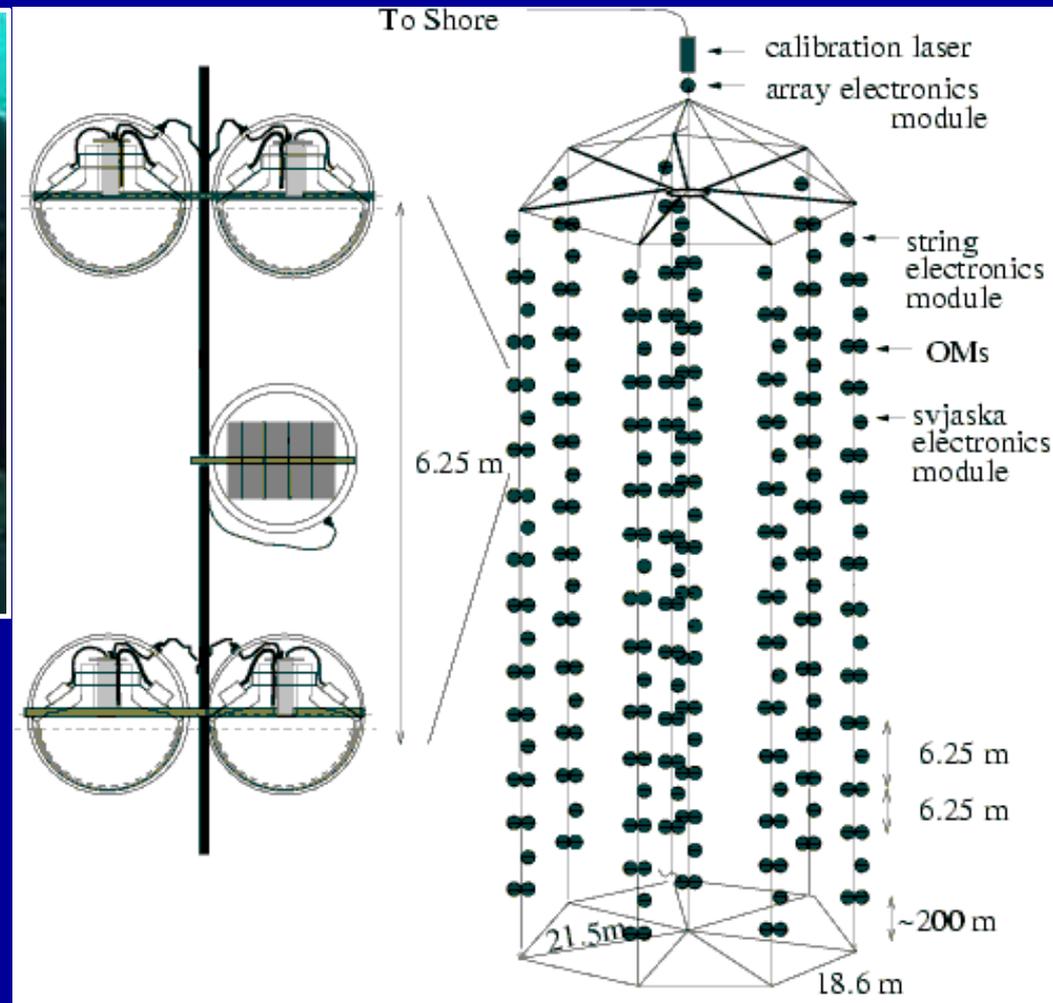
Jitter ~ 1 ns (fwhm)

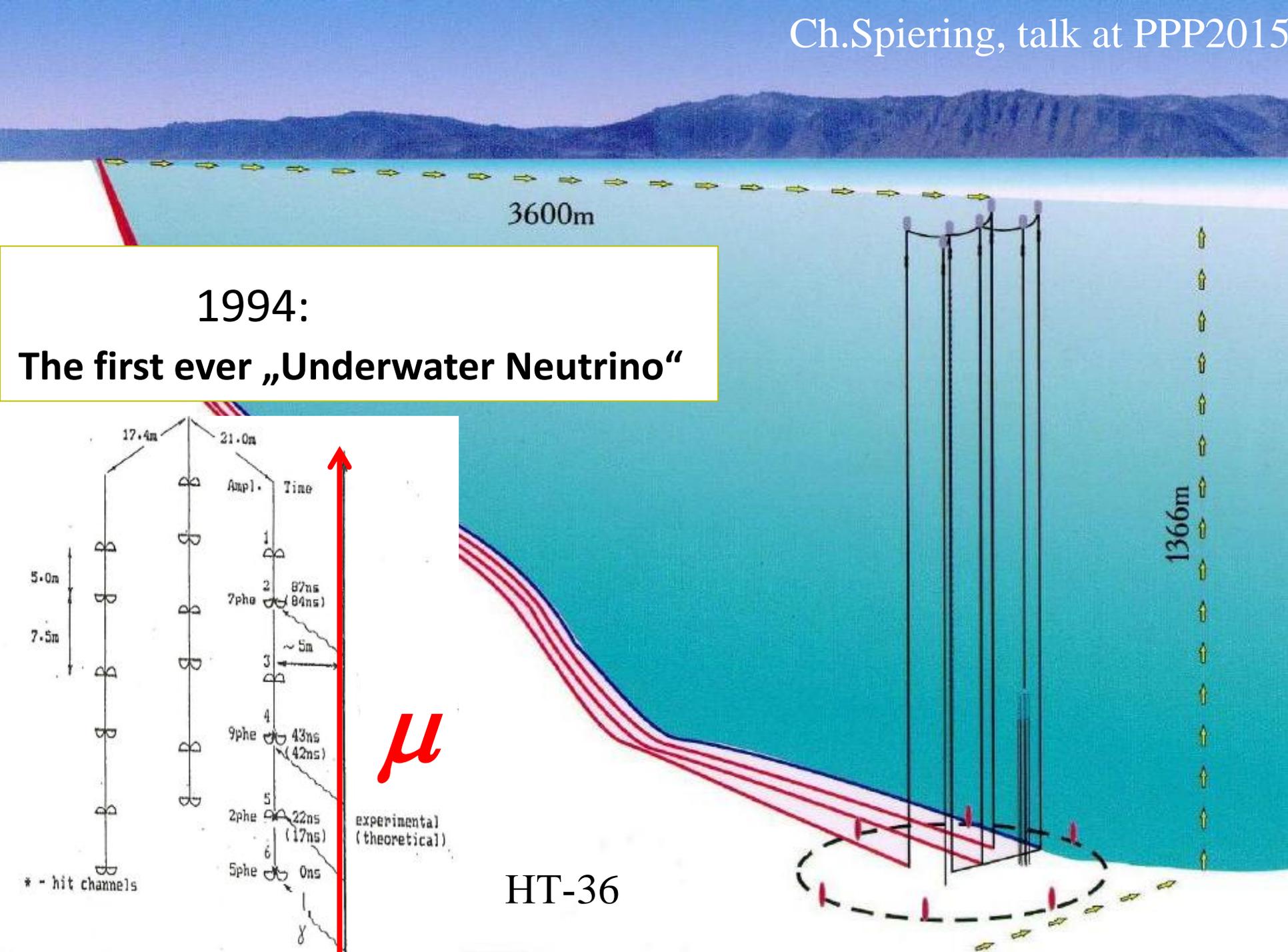
QUASAR-370 in the Lake Baikal Neutrino

Experiment (HT-200 & HT-200+)



226 QUASAR-370 phototubes operated in Lake Baikal

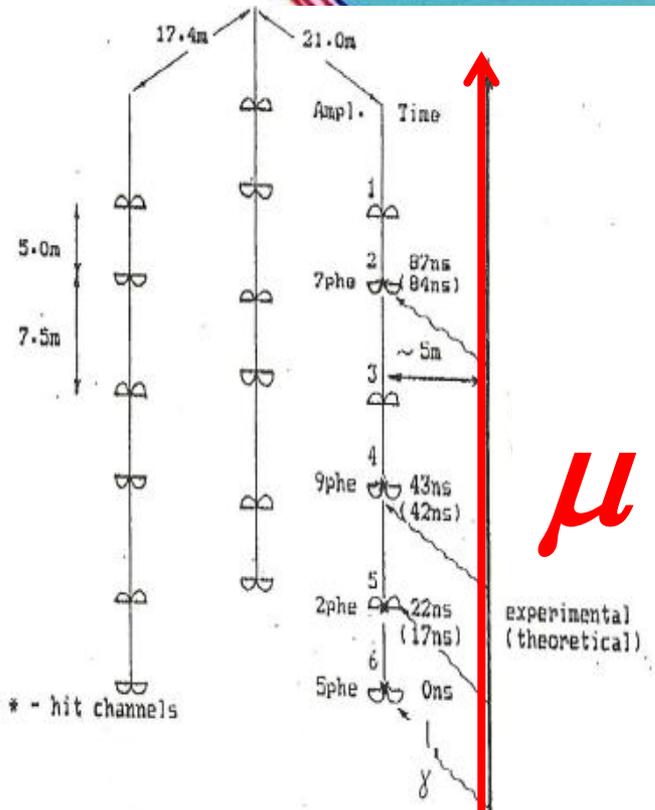




3600m

1994:

The first ever „Underwater Neutrino“



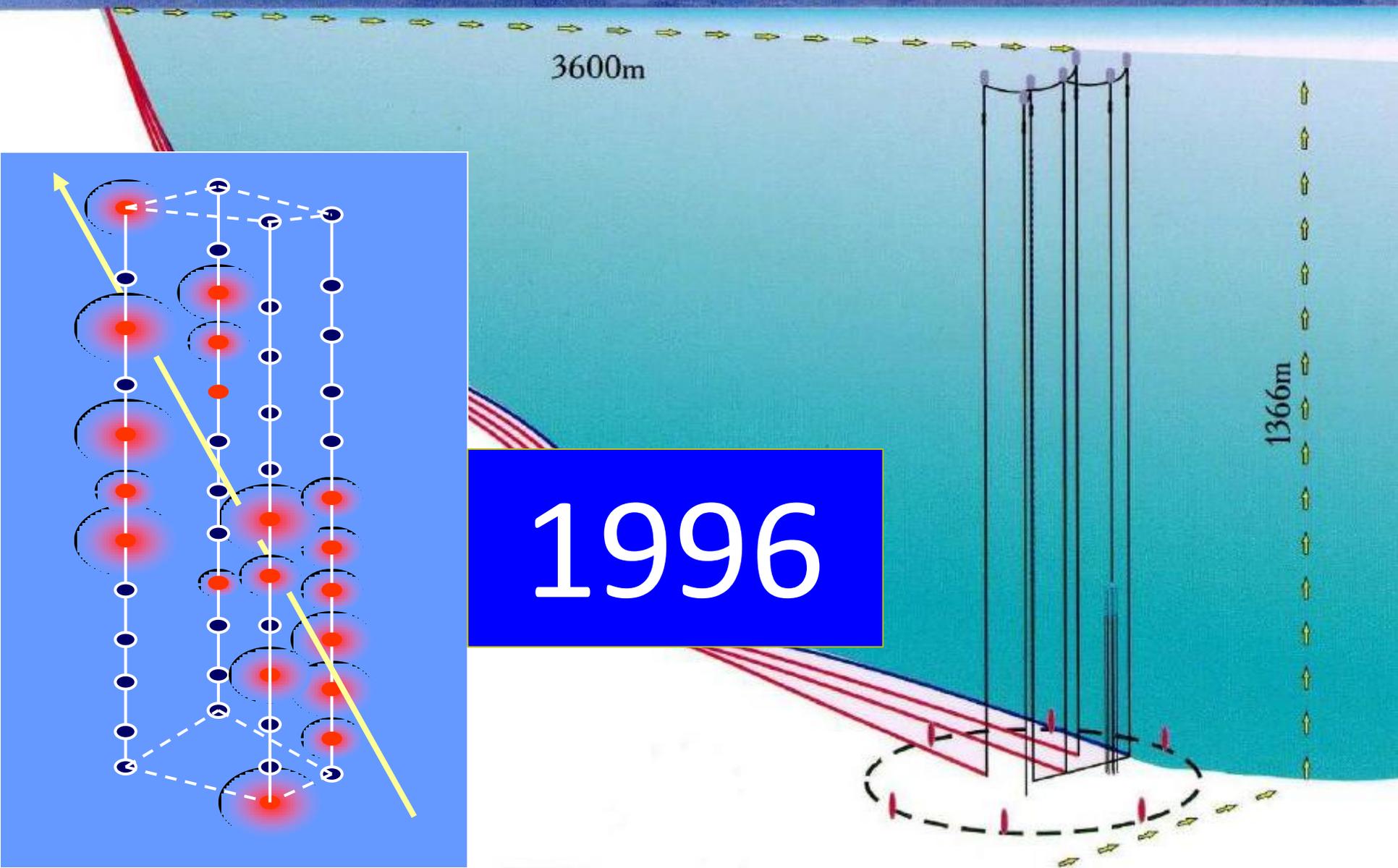
μ

experimental
(theoretical)

HT-36

1366m

A textbook underwater neutrino event



1996



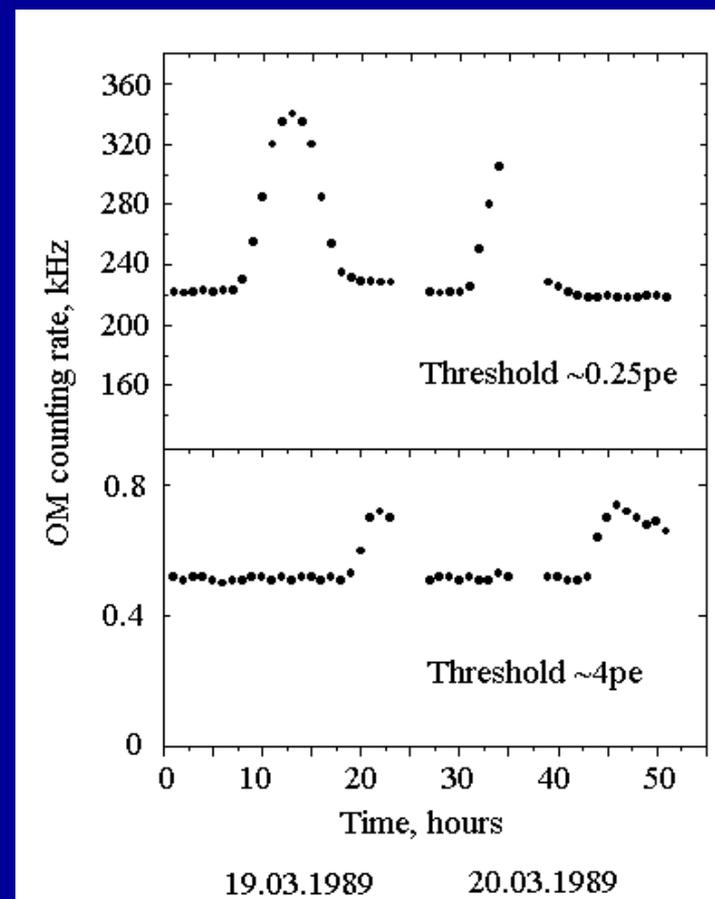
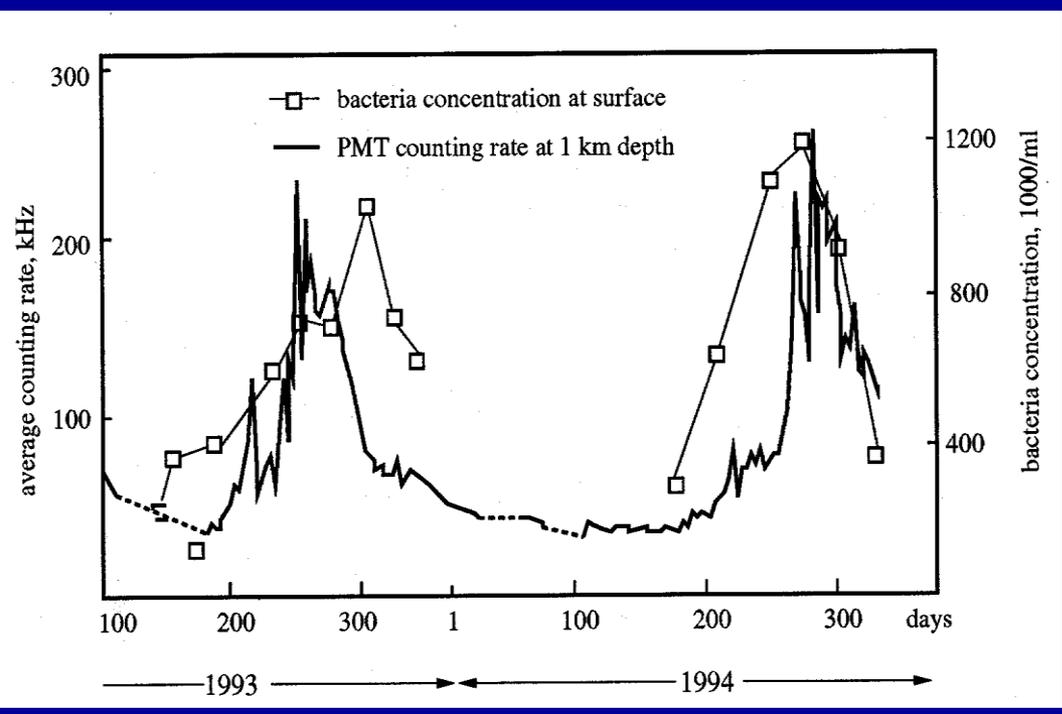
Квазары в Deutsches Museum

Открытие свечения водной среды оз.Байкал!!! (Безруков и др. 1981)

Сезонные вариации свечения, вертикальные течения, корреляции, ...

Указание на существование многофотонных вспышек!!!

Новые задачи для лимнологии



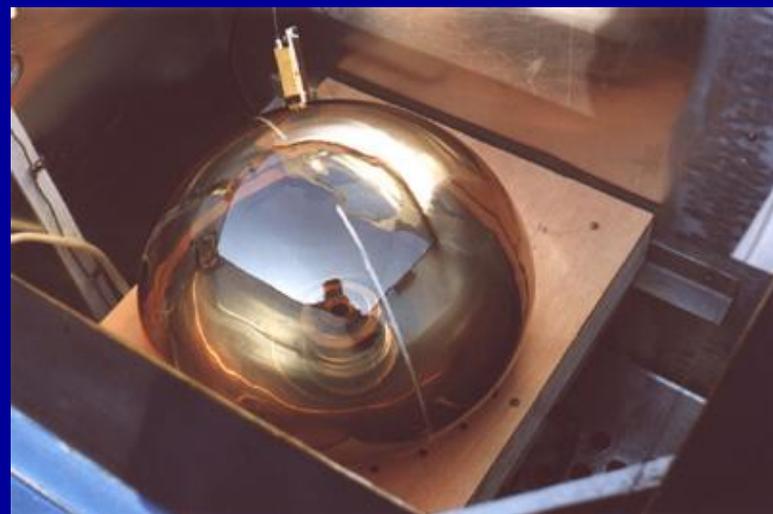
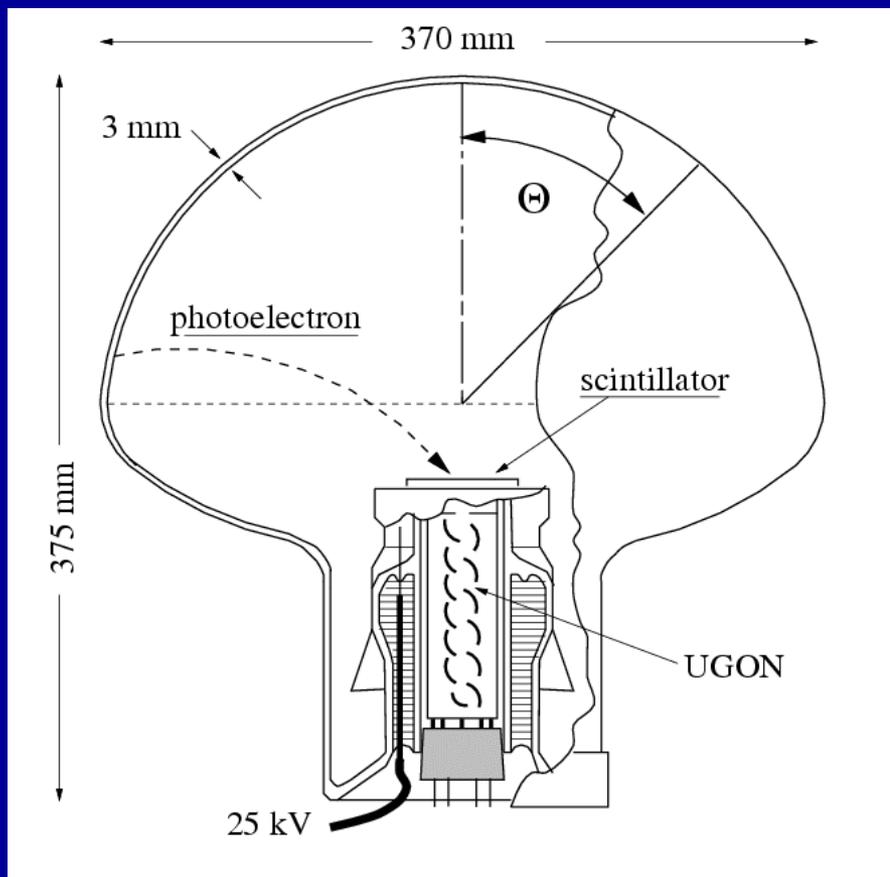
КВАЗАР-370G

для черенковских детекторов широких атмосферных ливней

Безруков и др. 1990-1995.

КВАЗАР-370G

для черенковских детекторов широких атмосферных ливней



TTS ~ 2 ns (FWHM)
SER ~ 70-80% (FWHM)
 $\Delta t < 1$ ns
CE ~ 100%

QUASAR-370G

37 cm extended bialkali low resistance hemispherical photocathode

2π acceptance, CE \sim 100%

YSO+BaF₂ luminescent screen (phosphor or monocrystal)

Small 6 stages high anode current PMT (200 μ A max DC current)

Jitter - 2 ns (FWHM)

SER – 70-80% (FWHM)

NIMA 2000 V.A442 P.368.

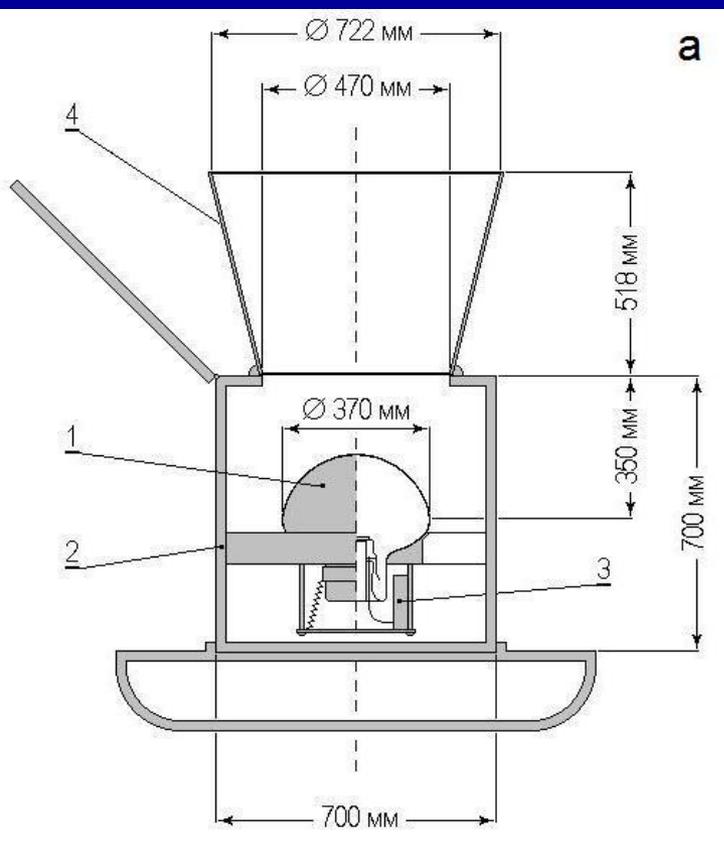
NIMA 2008. V. 595. P.58-61.

IEEE TNS 2008 Vol.55 Issue 3 Part2 P.1333-1337.

NIMA 2009. V. 602. P.201-204

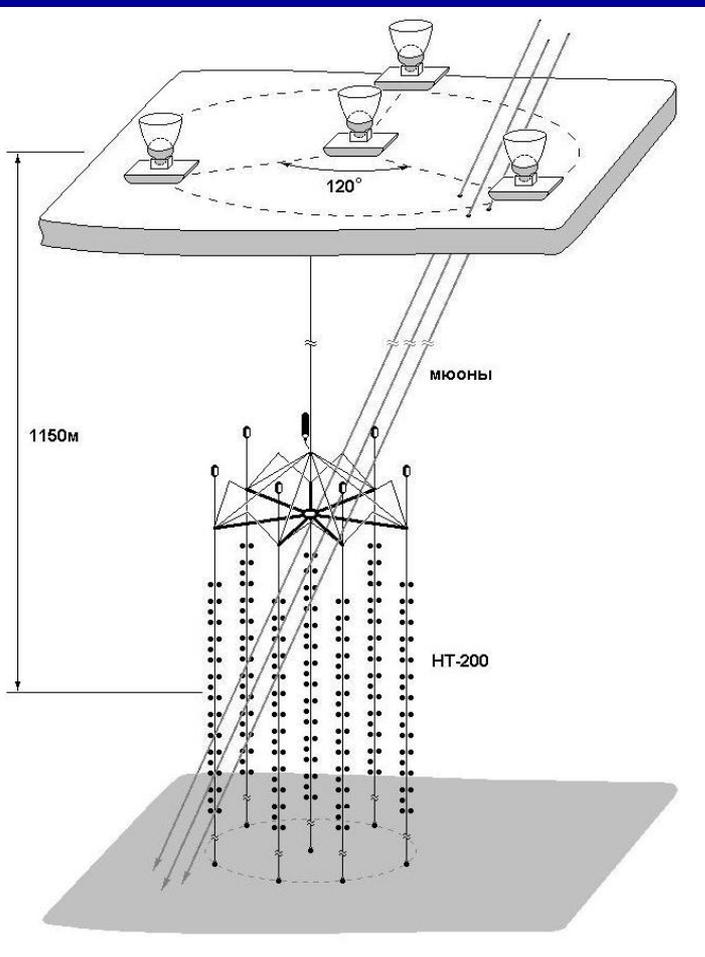
NIMA 2009. V. 610. P.68.

Наледный черенковский детектор ШАЛ

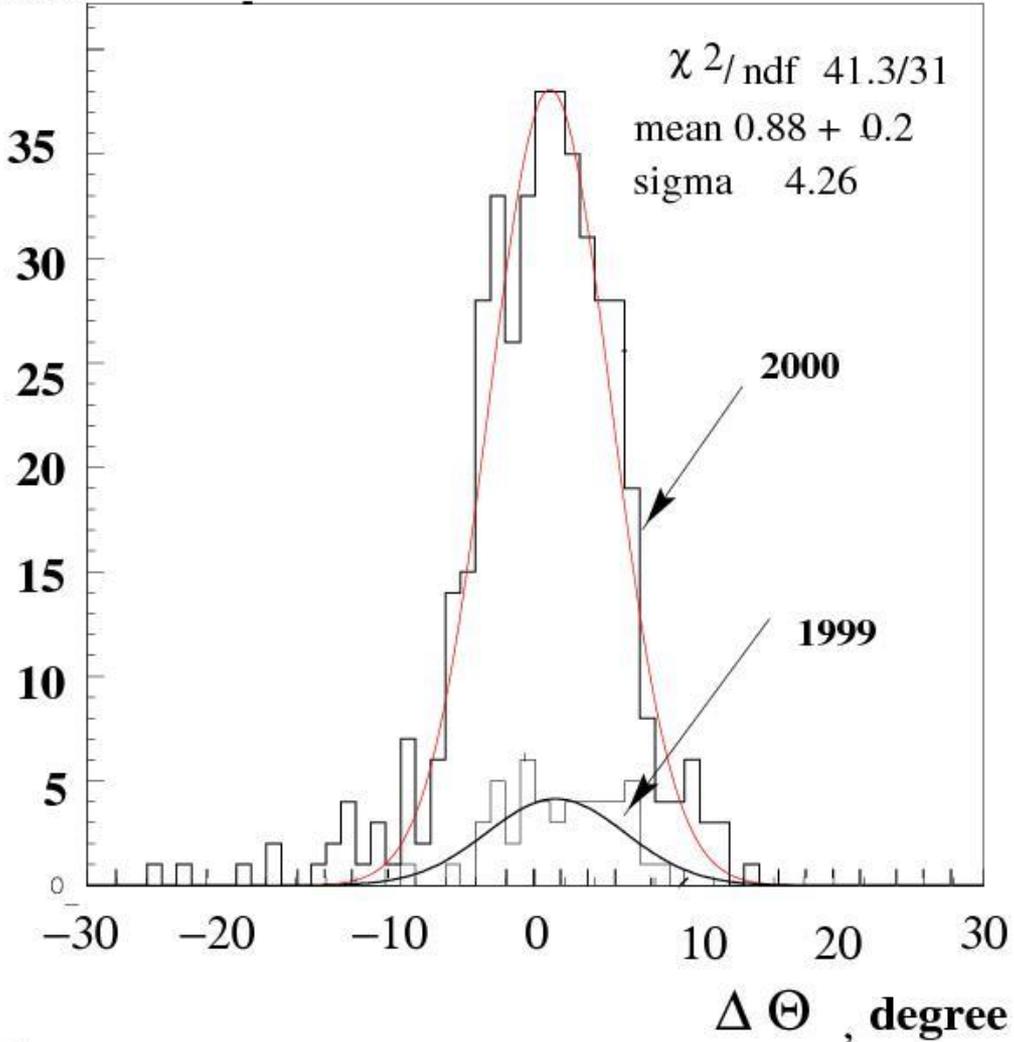


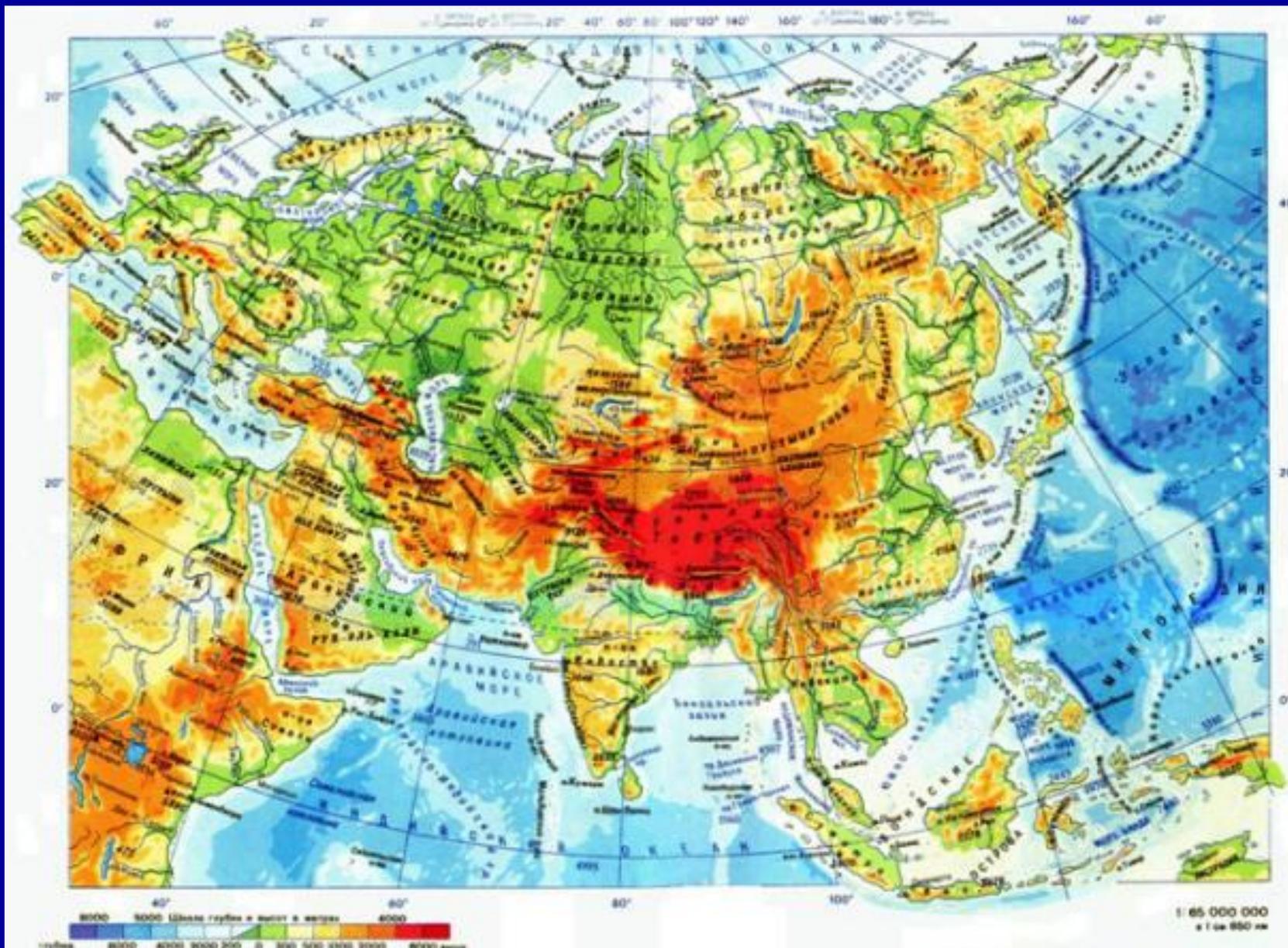
$E_{th} \sim 500 \text{ TeV}$, $\langle \theta \rangle \sim 0.5^\circ$



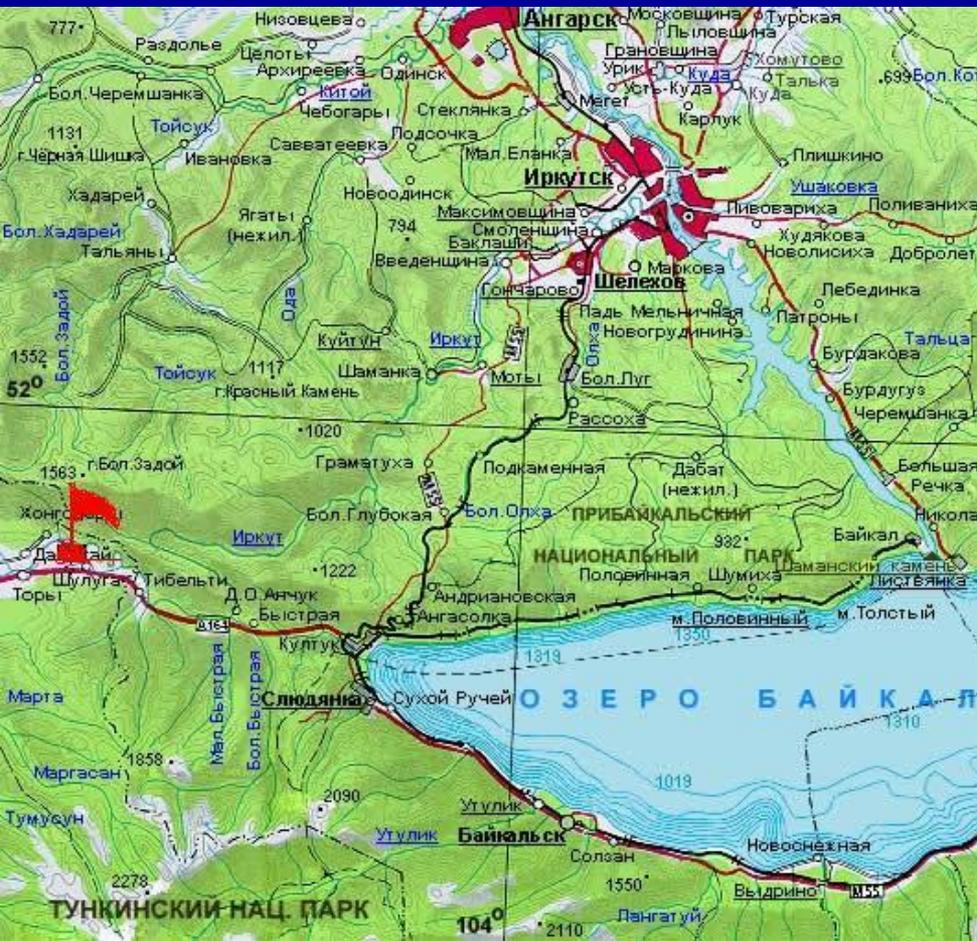


Events



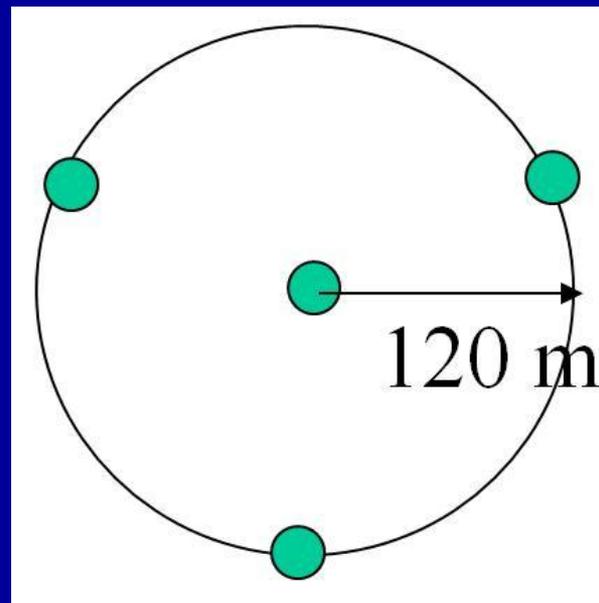


Тункинская долина, Республика Бурятия



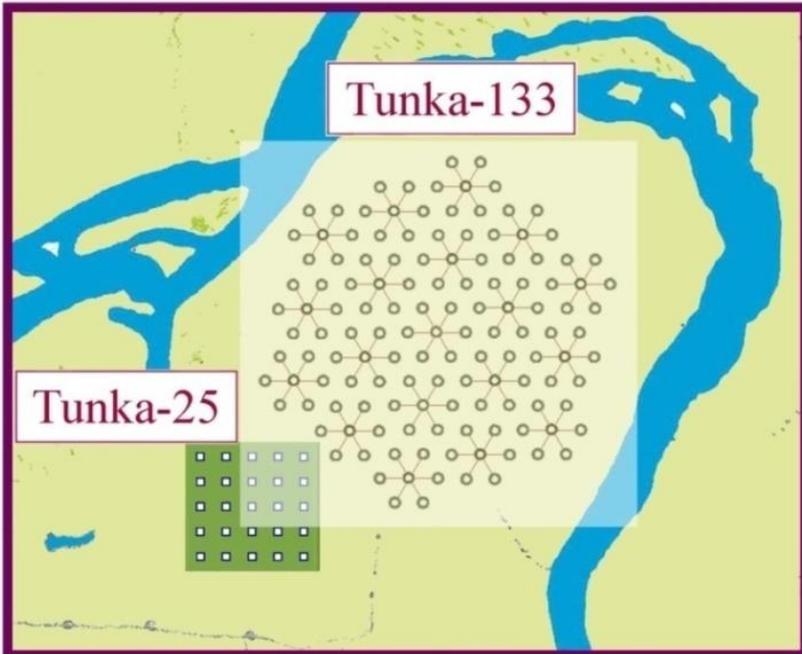
Tunka-4

4 фотодетектора QUASAR-370G



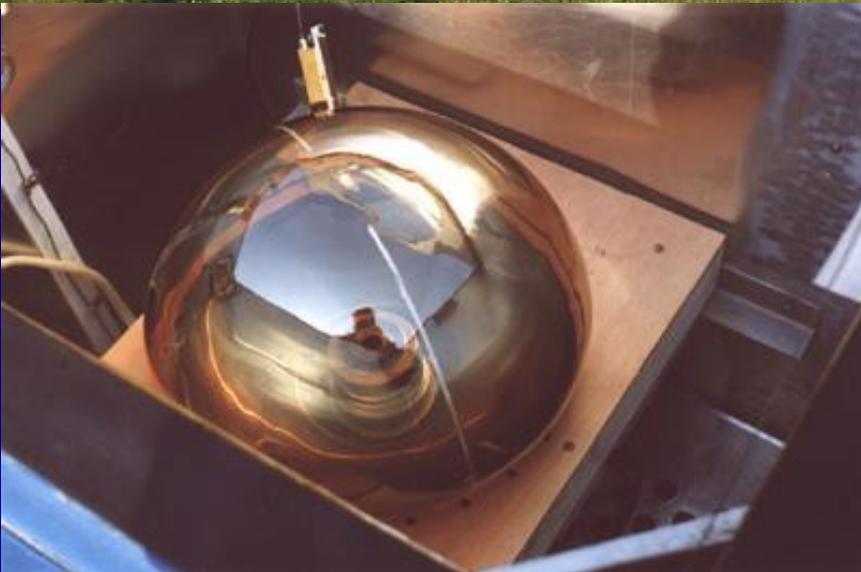
Черенковские эксперименты в Тункинской долине

1993 -



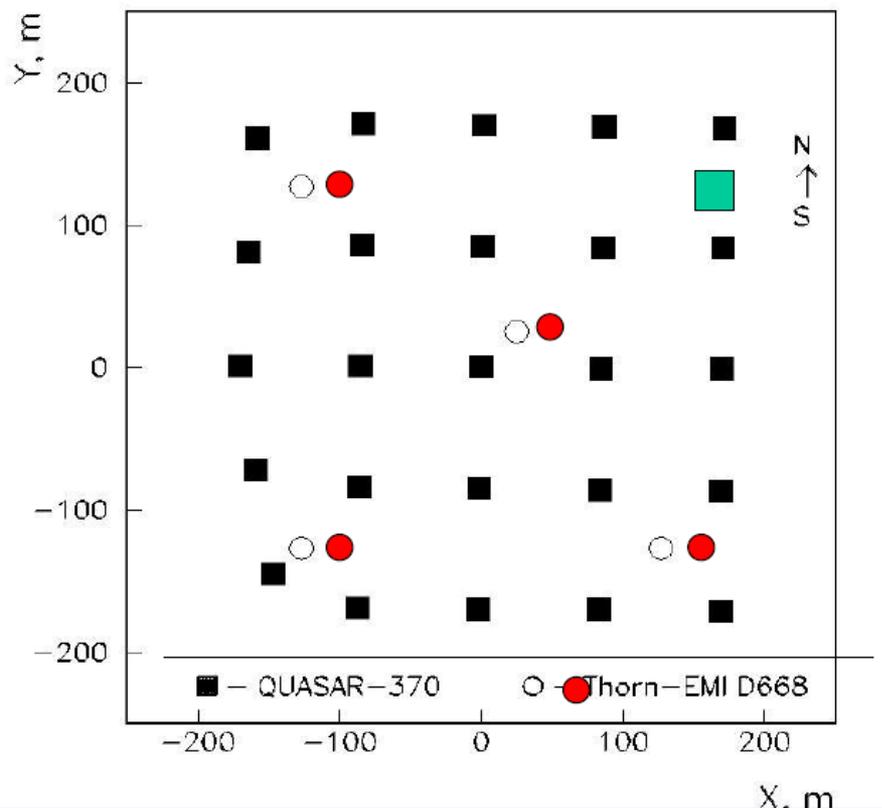
51° 48' 35" N
103° 04' 02" E
675 m a.s.l.

Эксперимент Тунка (Тунка-4, ..., Тунка-25, Тунка-133, ТАИГА)



Studies of primary cosmic rays energy spectrum and chemical composition around the «knee» region
The TUNKA experiment has been operating since 1993

TUNKA-25



25 large sensitive area hybrid phototubes QUASAR-370G (37cm in diameter)
Area $\sim 0.1\text{km}^2$, $E_{\text{th}} \sim 4 \times 10^{14}$ eV, angular resolution $\sim 0.5^\circ$

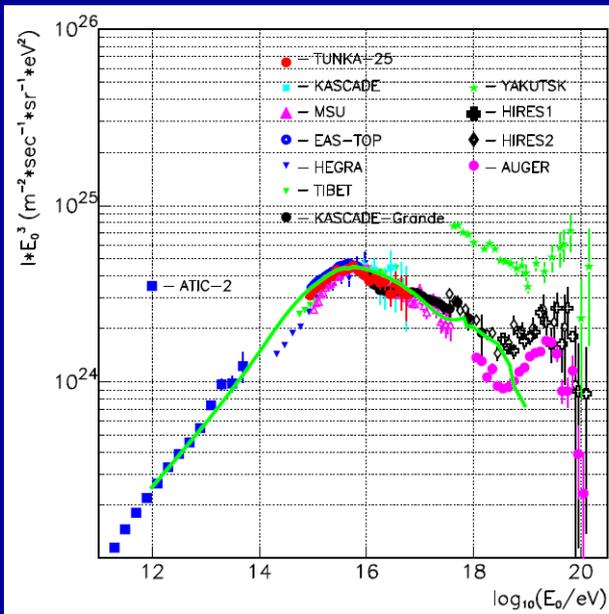
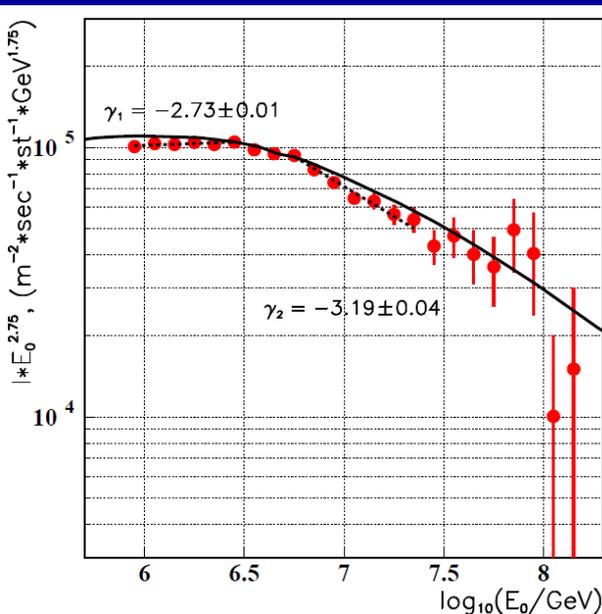
Studies of cosmic rays energy spectrum and mass composition
in the energy range of 10^{15} - 10^{17} eV

TUNKA-25: main results

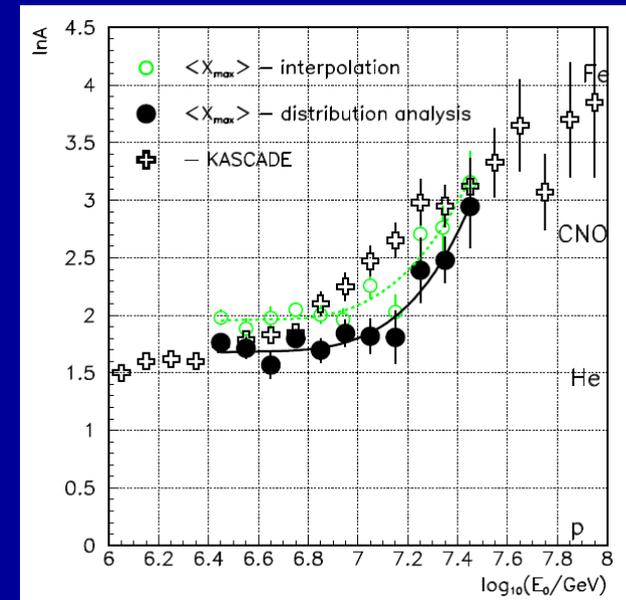
Cosmic ray energy spectrum and mass composition in the energy range of 10^{15} - 10^{17} eV

Astroparticle Physics 2013, V.50-52, P.18

Energy spectrum



Mass composition

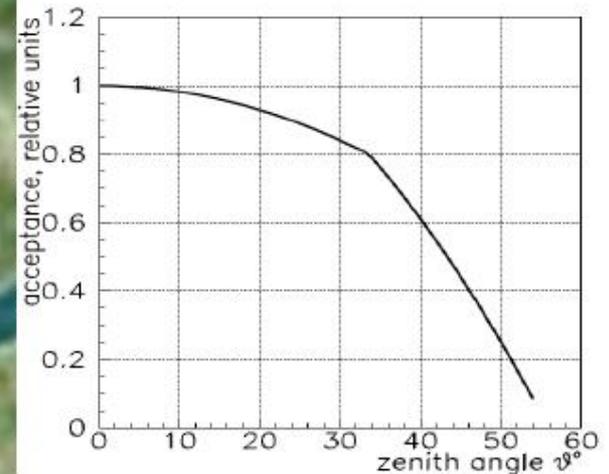
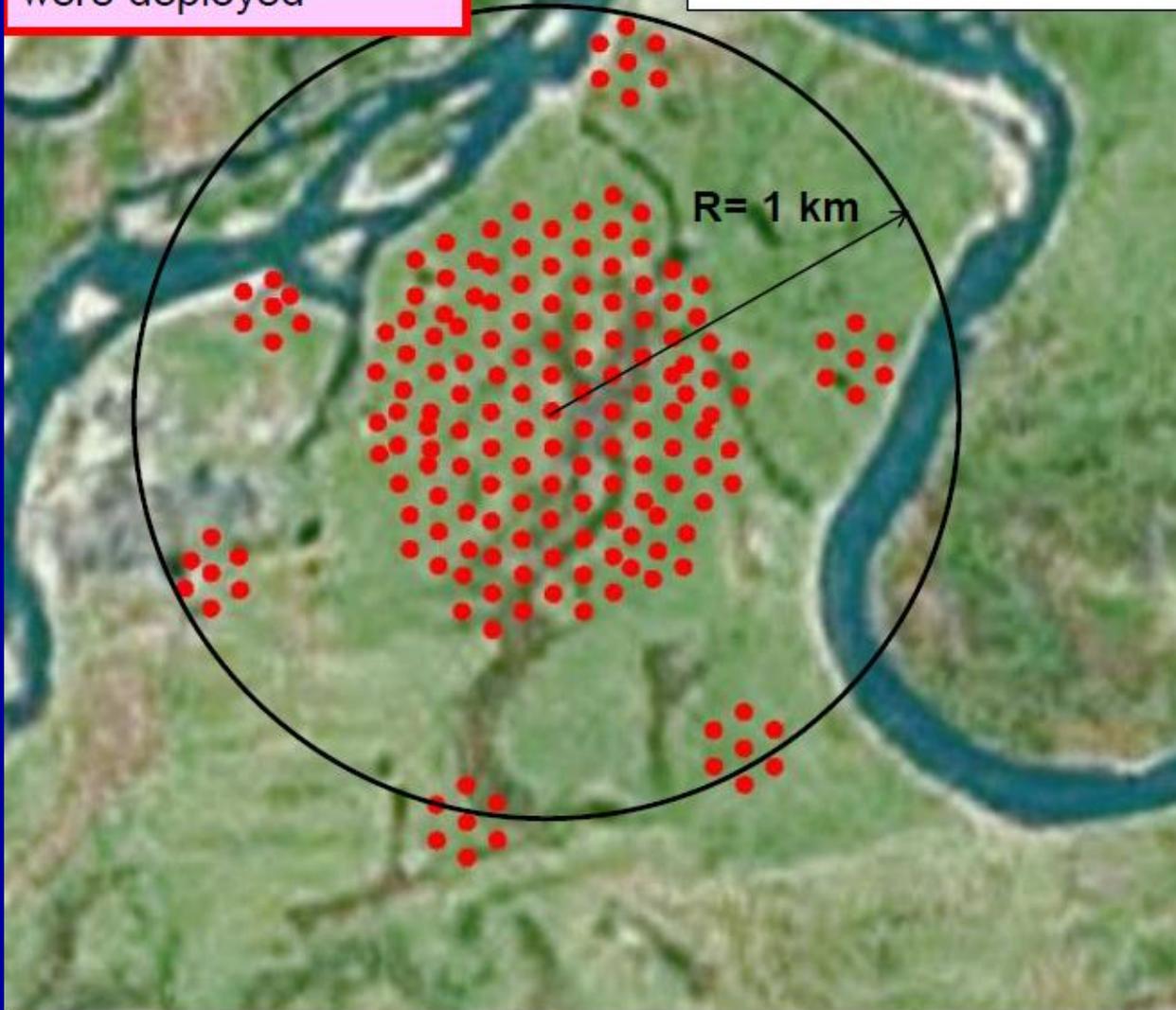


Тунка-133 (3 км², 175 фэу)

2010-2012

Six outer clusters were deployed

175 optical detectors (EMI 9350) covering an area of 3 км²



Angular sensitivity

TAIGA

(Tunka Advanced Instrument for cosmic ray and Gamma-Astronomy)

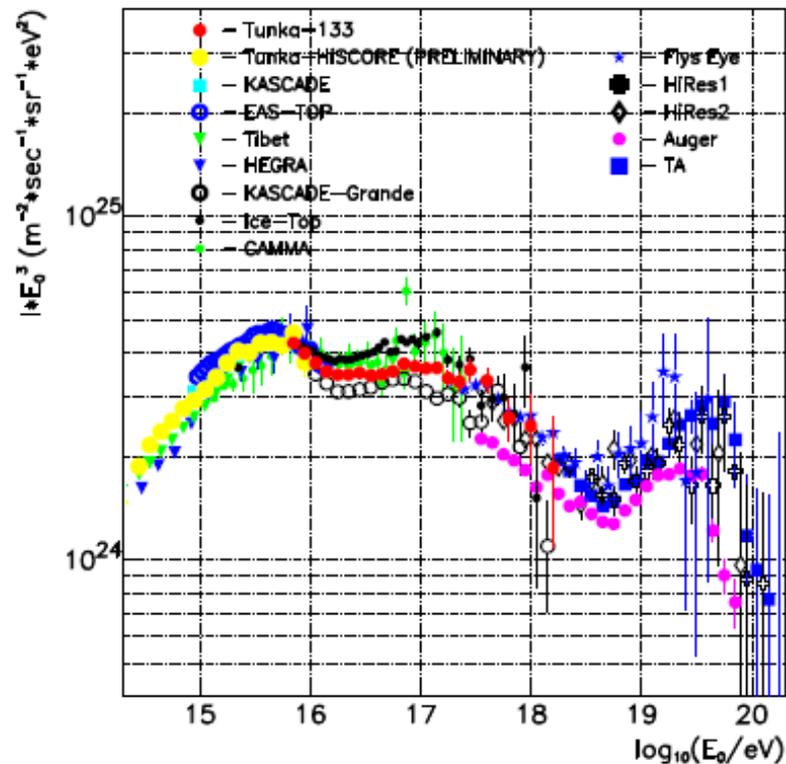
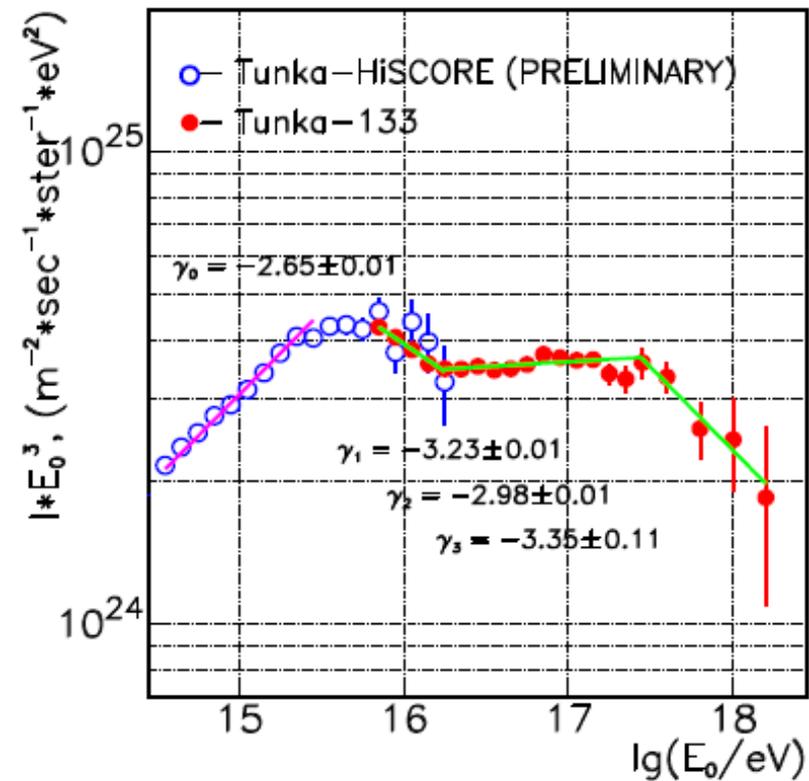


Широкоугольная
Черенковская установка
(HiSCORE, *M. Tluzikont et al*)

Сеть
телескопов
изображения
3-5 м²

Сеть мюонных
детекторов
10² - 10³ м².

Мульти-Тэвная гамма-астрономия и космические лучи с $E > 20$ ТэВ



Энергетический спектр ПКИ по данным Тунка-133 and Тунка-HiSCORE (9 stations)

Любой крупномасштабный физический эксперимент —
это не только физический эксперимент,
но и социальный эксперимент

В.А.Матвеев

ОАО КАТОД, г.Новосибирск



С 1988-го по 1993 год предприятие выживает во многом благодаря участию в уникальном проекте Российской академии наук — создании на Байкале подводного детектора для регистрации нейтрино, пришедших из далеких галактик. «Катод» разрабатывает и изготавливает фотоэлектронные умножители (ФЭУ) — основные приборы того детектора, что ученые разворачивают в глубинах озера. На «Катоде» этим ФЭУ дают звучное имя — «Квazarы». Катодовские «Квazarы» по основным характеристикам намного превзошли приборы японской фирмы Hamamatsu (мировой лидер в области разработки и производства ФЭУ). Отметим, что и по сей день никому не удалось превзойти прибор, созданный на «Катоде».

«Квazarы» стали последним «непрофильным» детищем сибиряков. Они поддержали «Катод» не только финансово: некоторые прорывные технические решения, родившиеся в процессе работы над «Квazarами», были использованы в новых ЭОПах.

ОАО КАТОД

Ведущее предприятие в России по производству приборов ночного видения

Успешно конкурирует на мировом рынке с ITT, Litton, Photonis и т.д.

HQE фотоумножители

Новые сцинтилляторы для гибридных фотодетекторов

Гибридные фотодетекторы большой площади с лавинными диодами

HP SiPM – гибридные фотодетекторы с SiPM

ФЭУ-МКП с большим временем жизни

ФЭУ-МКП большой площади

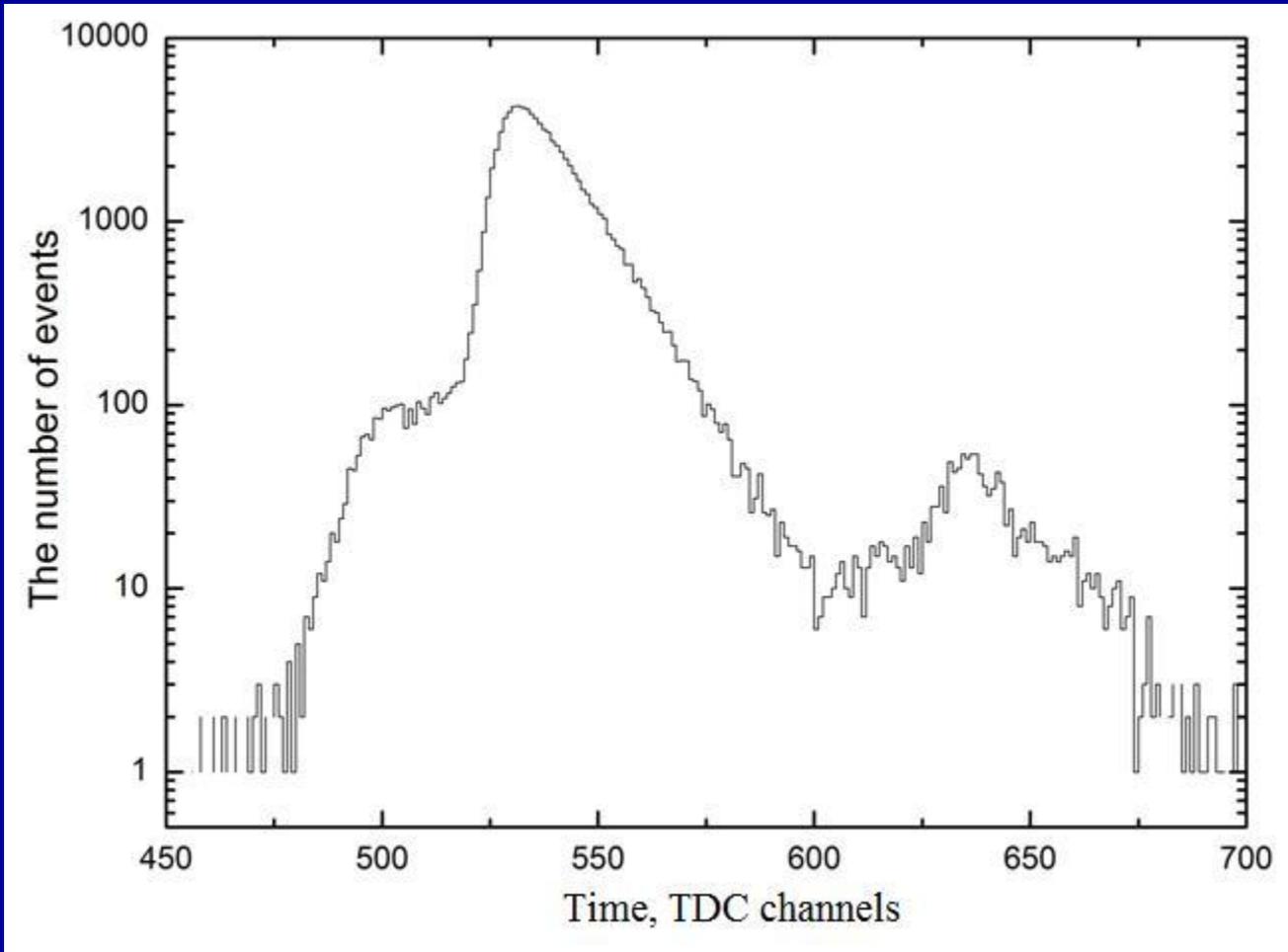
МКП-камеры большой площади

Кремниевые фотоумножители!!!

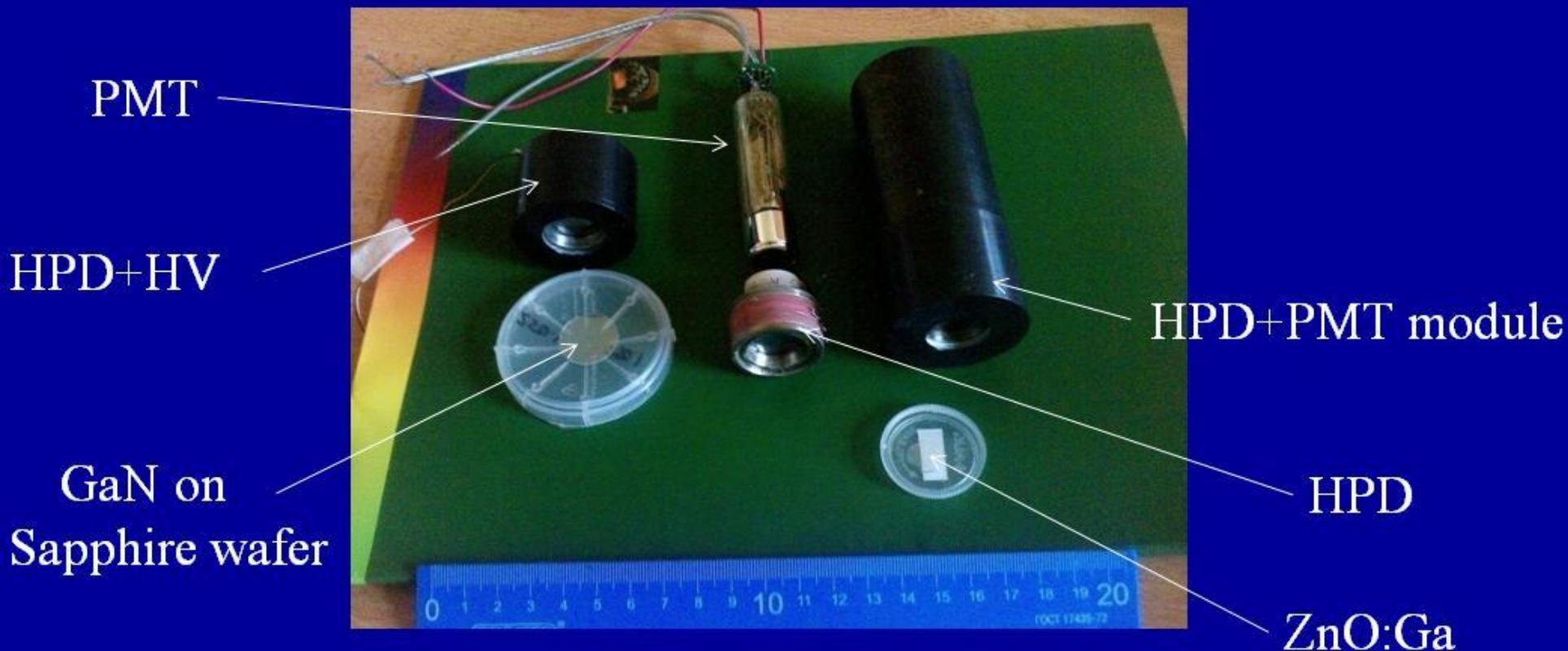
Ядерная фотоника. Безруков и др. 2005

ZnO:Ga

$\tau \sim 650$ ps, light yield ~ 1200 γ /MeV

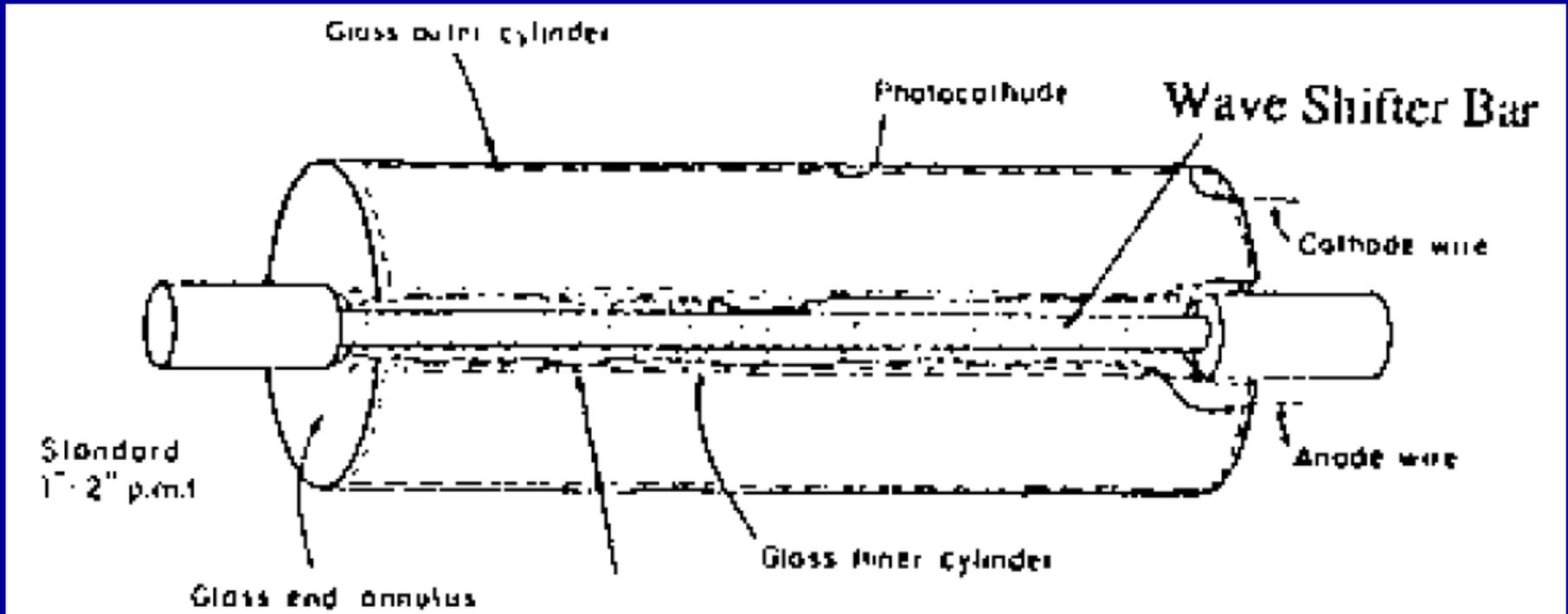


Пилотный образец гибридного фотодетектора с ZnO:Ga



Безруков, Лубсандоржиев, Полещук

“Barrel”-like hybrid phototube. D.Winn&C.Rubbia, 1981



“Old idea”

Not implemented ...

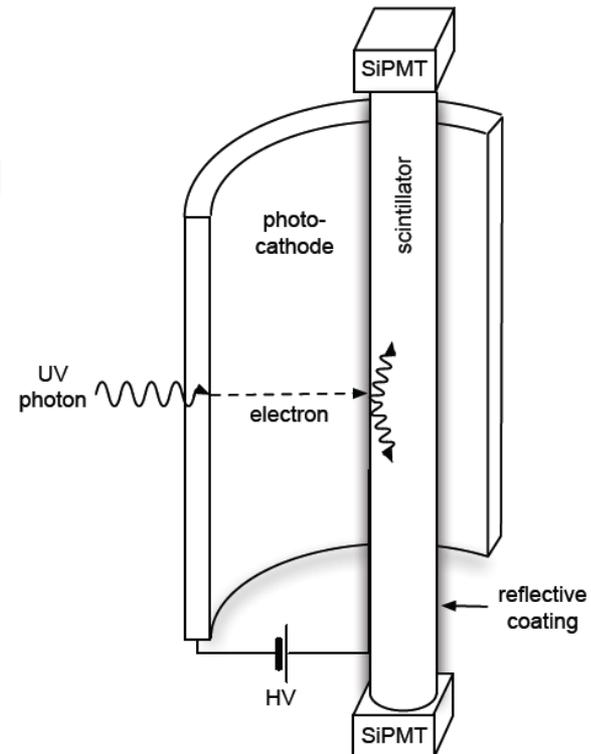
Hybrid Cylindrical OM (HyCOM)

Idea (stolen from Abalone)

- photocathode in pressure vessel
- photon amplification
- G-APD readout

Issues

- how to get the photocathode?
- (re-)absorption in scintillator?

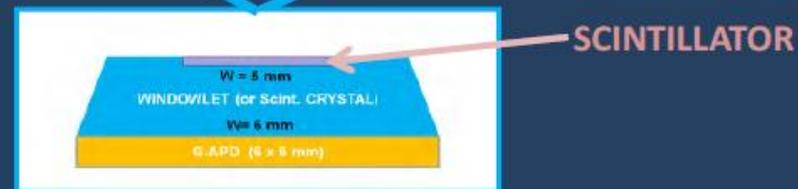
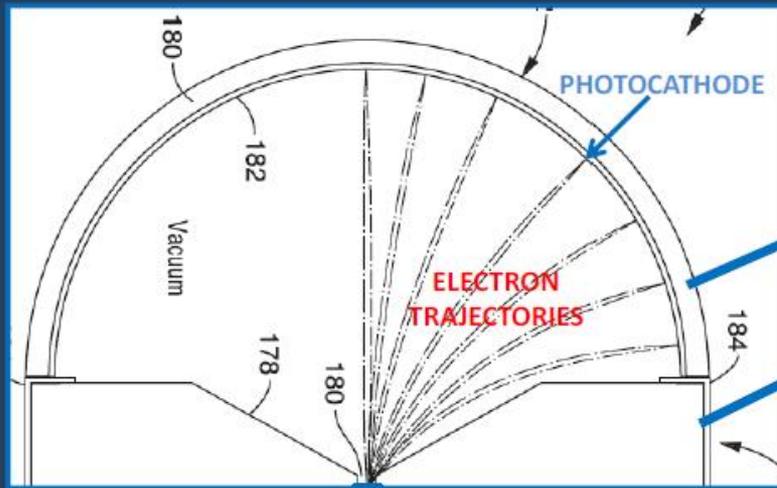


Idea (stolen from Abalone)???

“New” idea

D.Ferenc, Abalone hybrid photitube

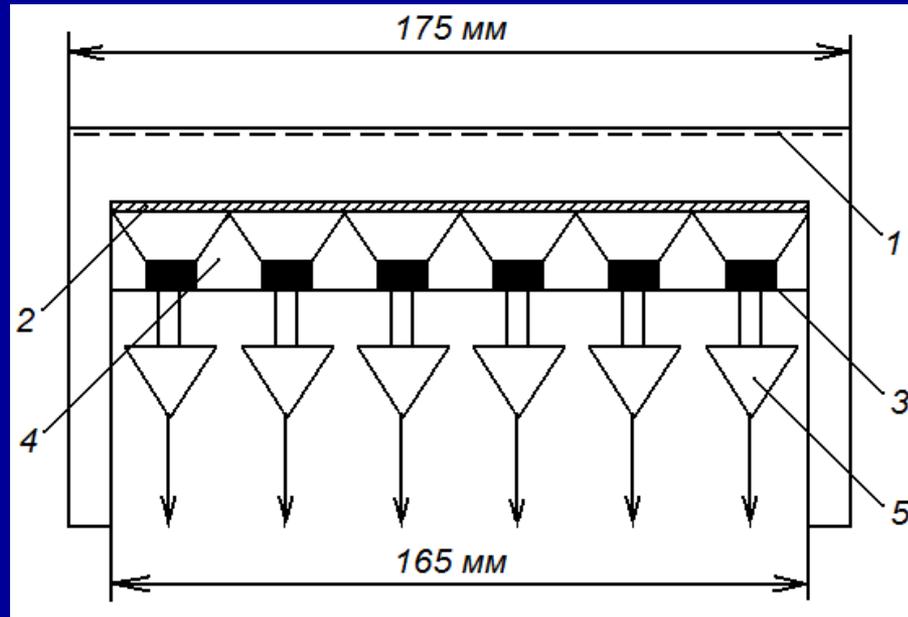
ABALONE



“New idea”

“Old idea”

Camera hybrid phototube.



Bezrukov et al. 1992

Optical preamp readout by a matrix of APDs

Spatial resolution - $< 1\text{ mm}$

Time resolution - $\sim 1\text{ ns}$

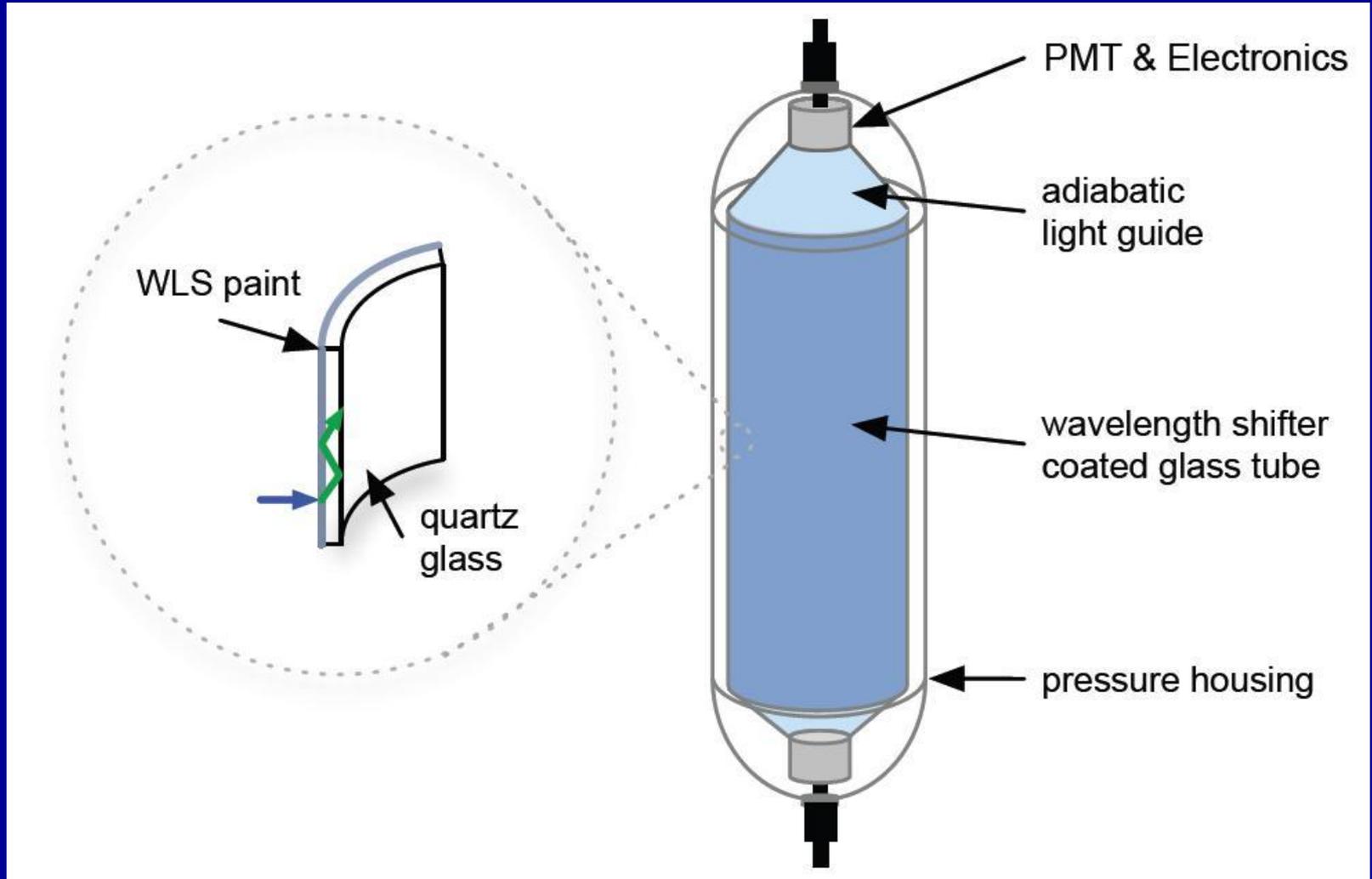
Esso Flyckt:

“New” & “Old” idea of multi PMTs OM



“New idea” – photodetector for PINGU

M.Kowalski, S.Boser et al.



Фотодетектор с прочным корпусом для глубоководных нейтринных телескопов. Безруков и др. 1986.

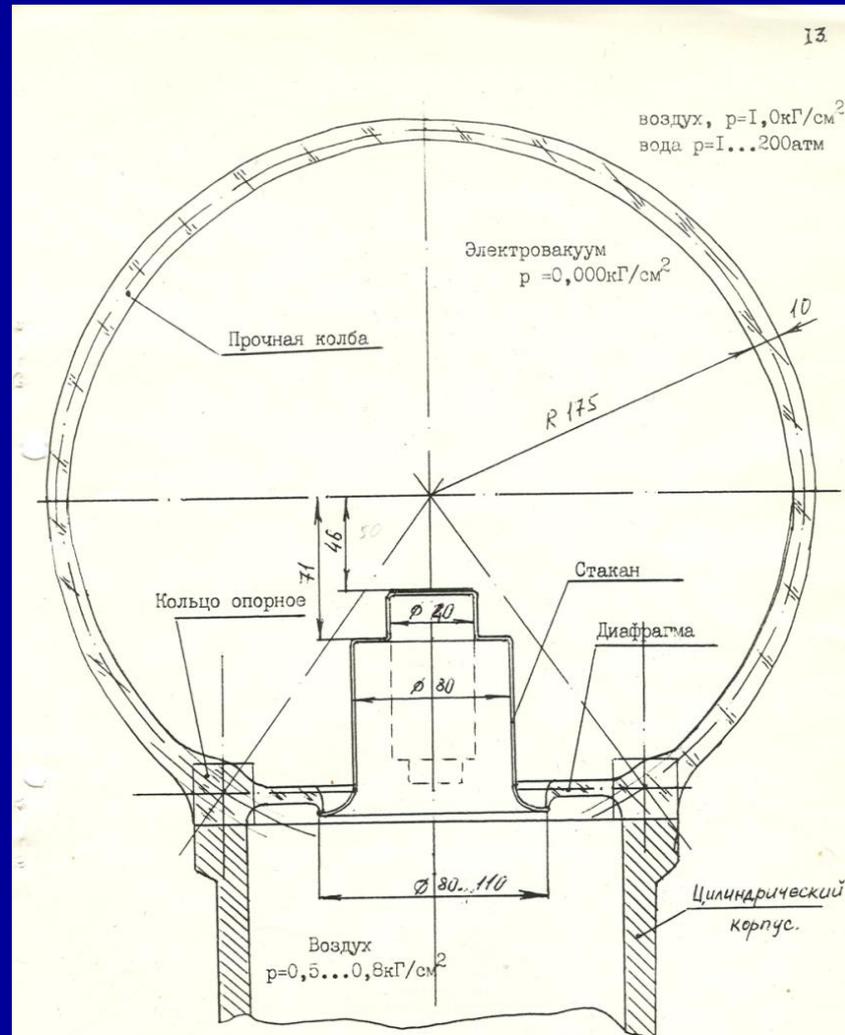
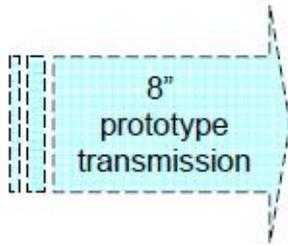
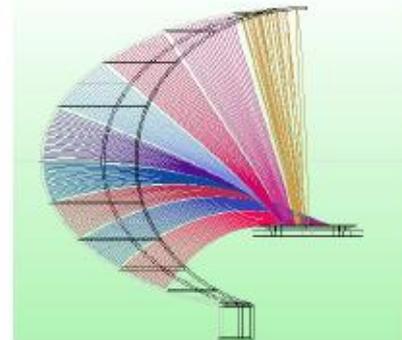


Рис.1. Изделие "Квazar"

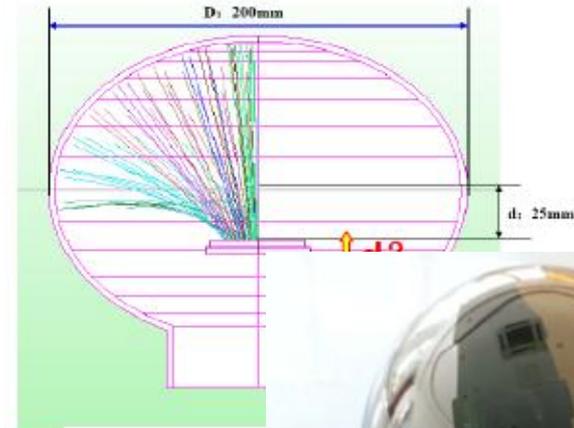
➤ 8” ellipse MCP-PMT



- Electron Multiplier:
small size MCP ($\phi = 18\text{mm}$)
- photocathode area:
transmission + reflection
photocathode



The photoelectron collected by the electron multiplier MCP



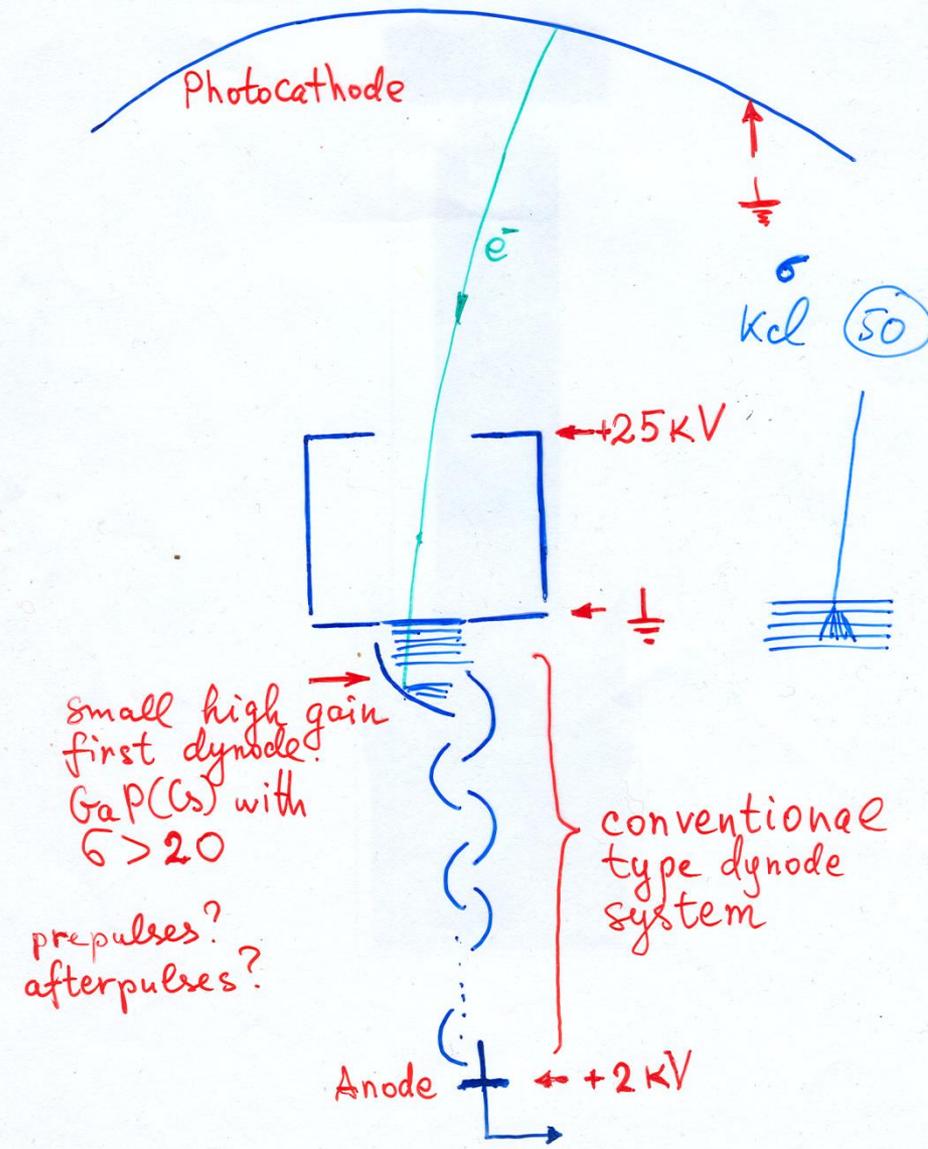
The overview

The hit position of the photoelectron in MCP was affected by the distance and the center of the ellipse. What is the best position for the better collection

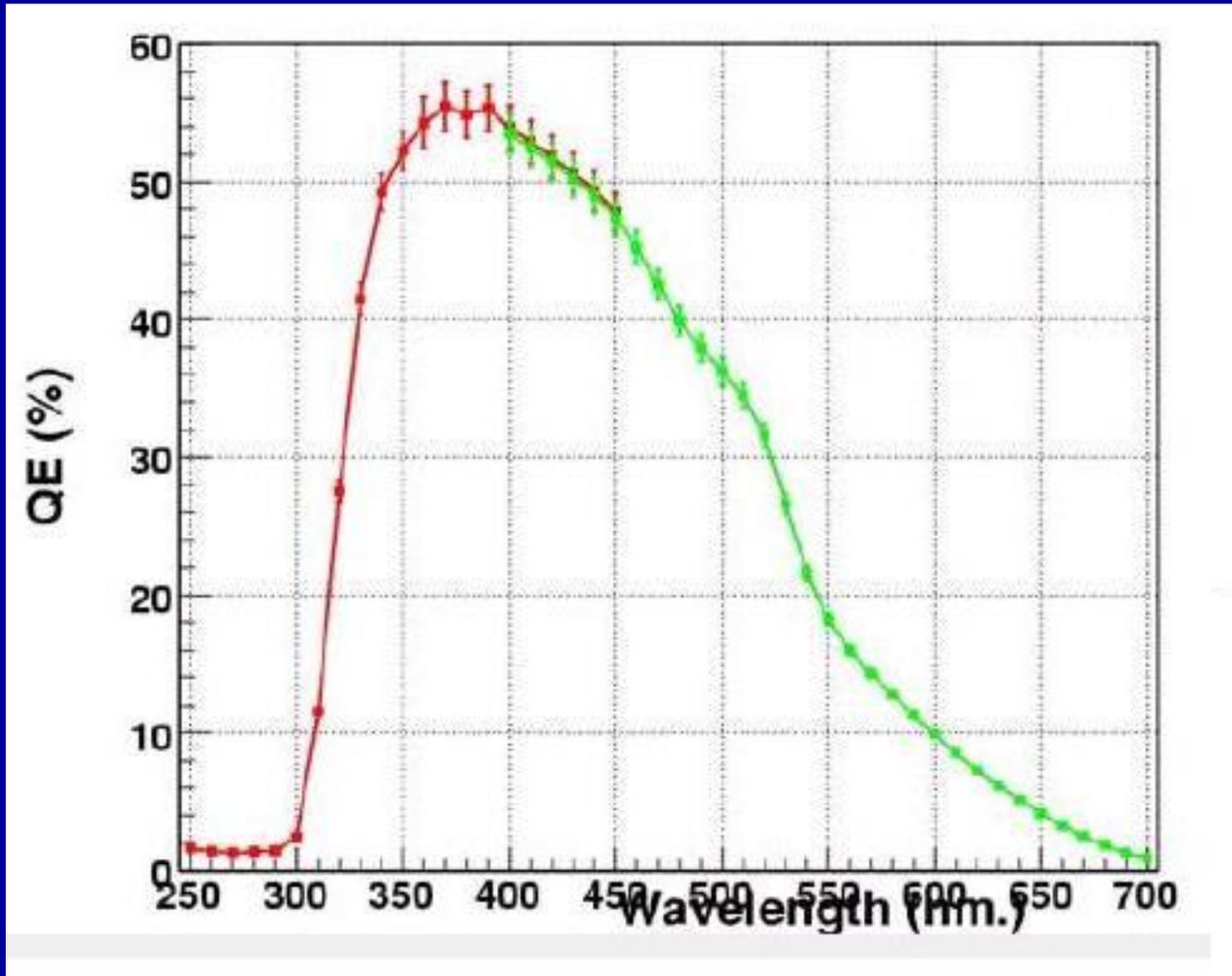


20" PMC-PMT

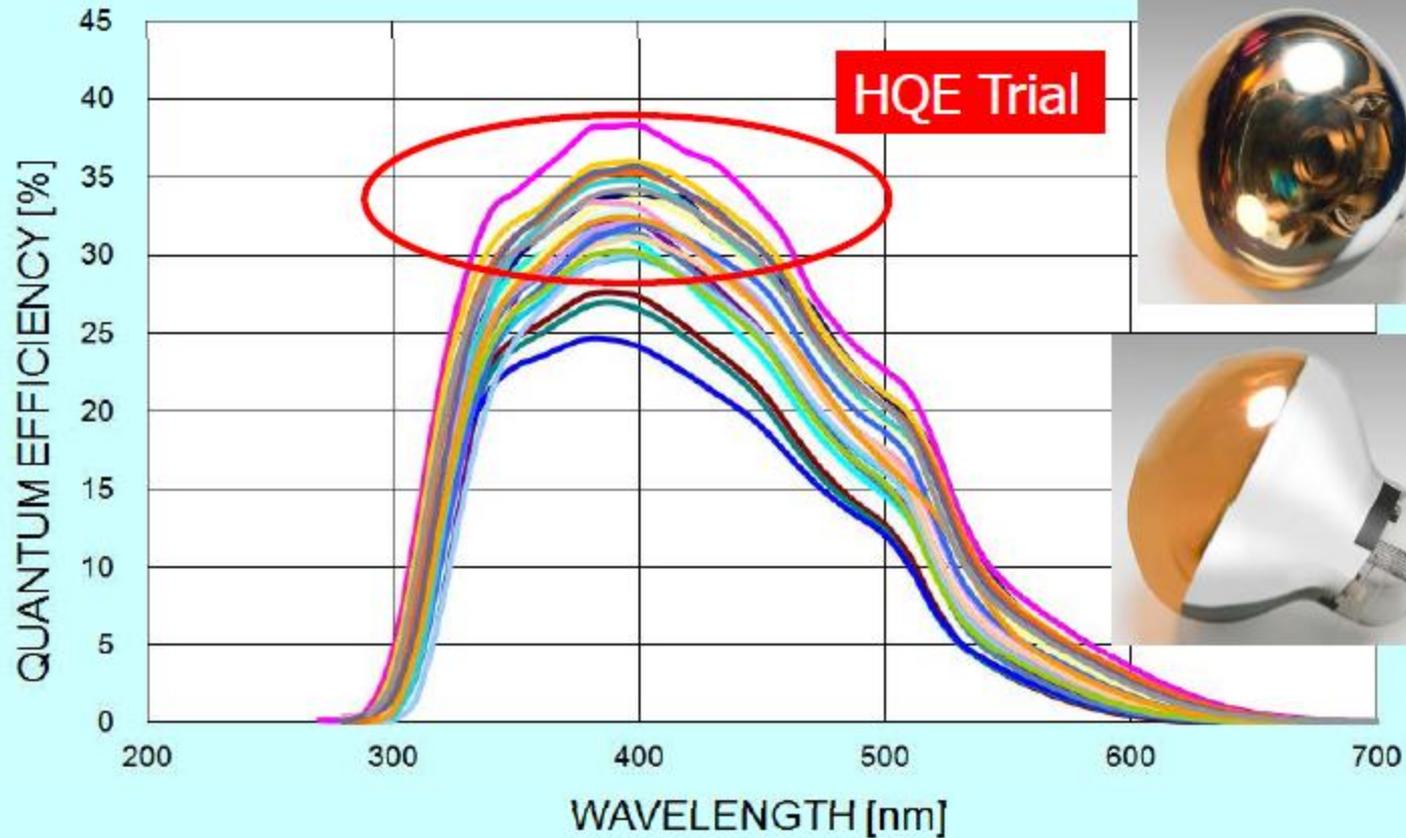
- Dissector like phototube.
Bezrukov 1990.



High QE PMTs (Photonis 3")



R12860 High QE Trial



R3600 vs R12860 (New)

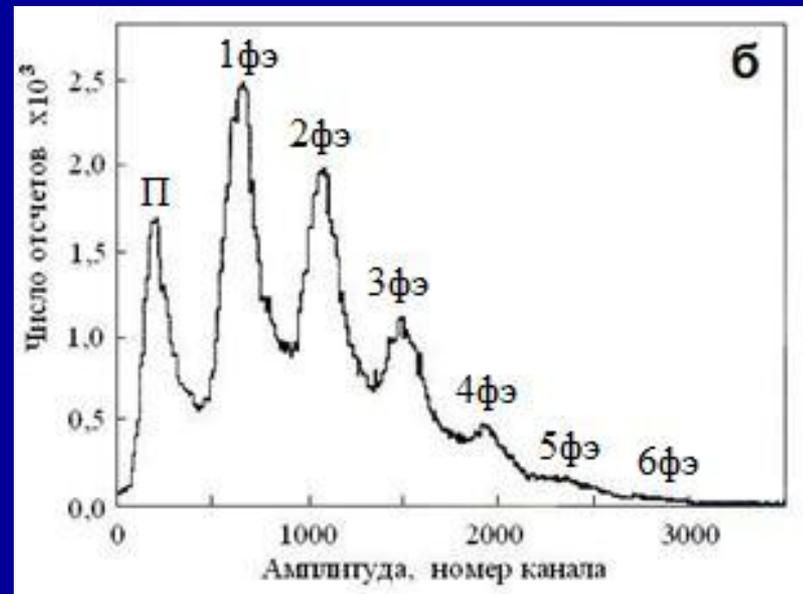
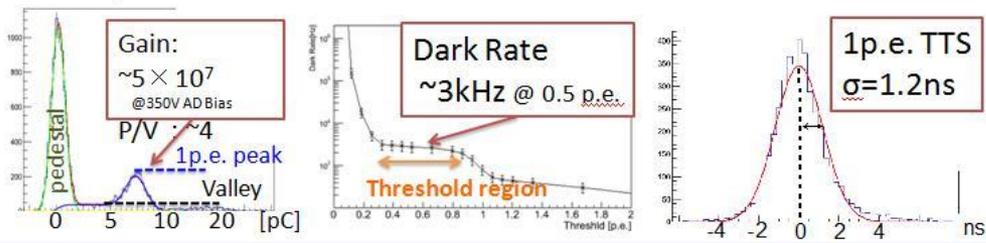
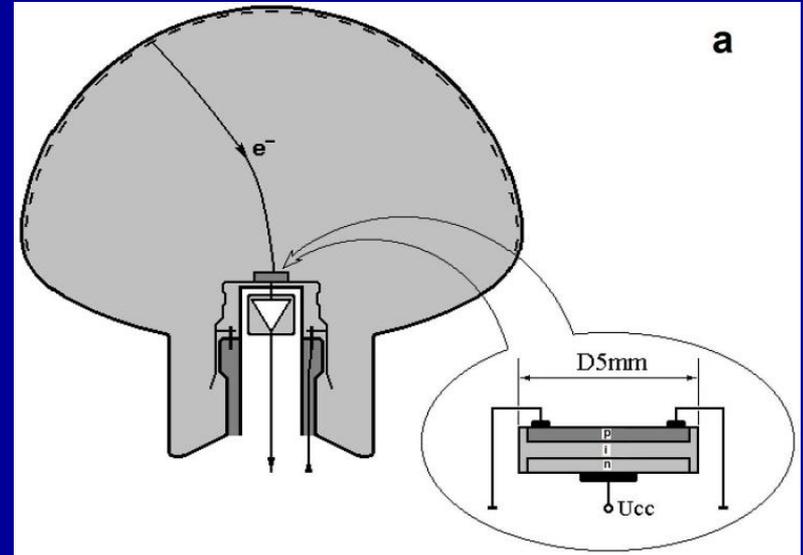
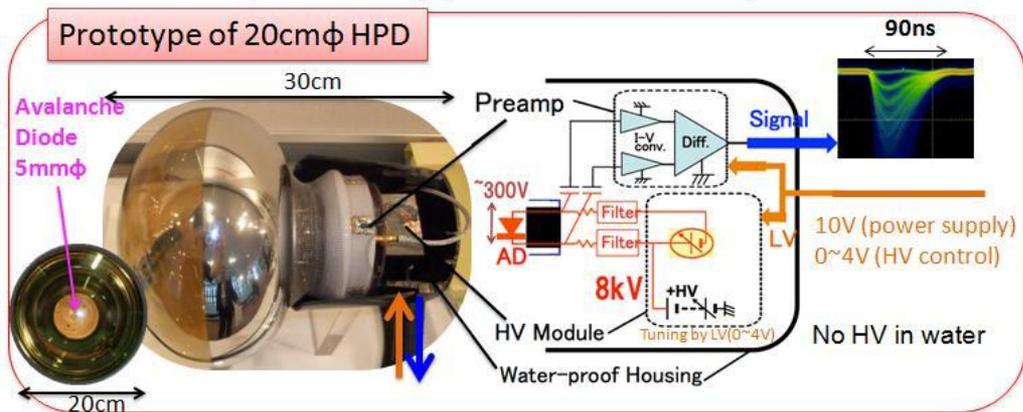
| Items | R12860 New 20 inch PMT | R3600 Current 20 inch PMT |
|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| Diameter | 508 mm | 508 mm |
| Effective Area | 460 mm min. | 460 mm min. |
| Tube Length | 610 mm | 610 mm |
| Collection Efficiency | 90% | 80% |
| Dynodes | LF/10-stage | VB/11-stage |
| GAIN | 1.0E+07 at 2000 V | 1.0E+07 at 2000 V |
| T.T.S. (FWHM) | 2.7 ns | 5.5 ns |
| P/V Ratio | >2.5 | 1.7 |
| Pressure Resistance | Approx. 0.9 MPa | 0.6 MPa |

HPD большой чувствительной площади

КВАЗАР-370D (1996)

HPD для Н-К (2013)

The prototype of 20cm ϕ HPD



Разработки фотодетекторов имеет много выходов:
фундаментальная наука, прикладная, социальная
сфера,

Фотодетекторы бурно развивающаяся область

Мы на пороге новых достижений в разработках
фотодетекторов

Новые возможности для экспериментов

.....



Леонид Борисович!

С ЮБИЛЕЕМ!!!