

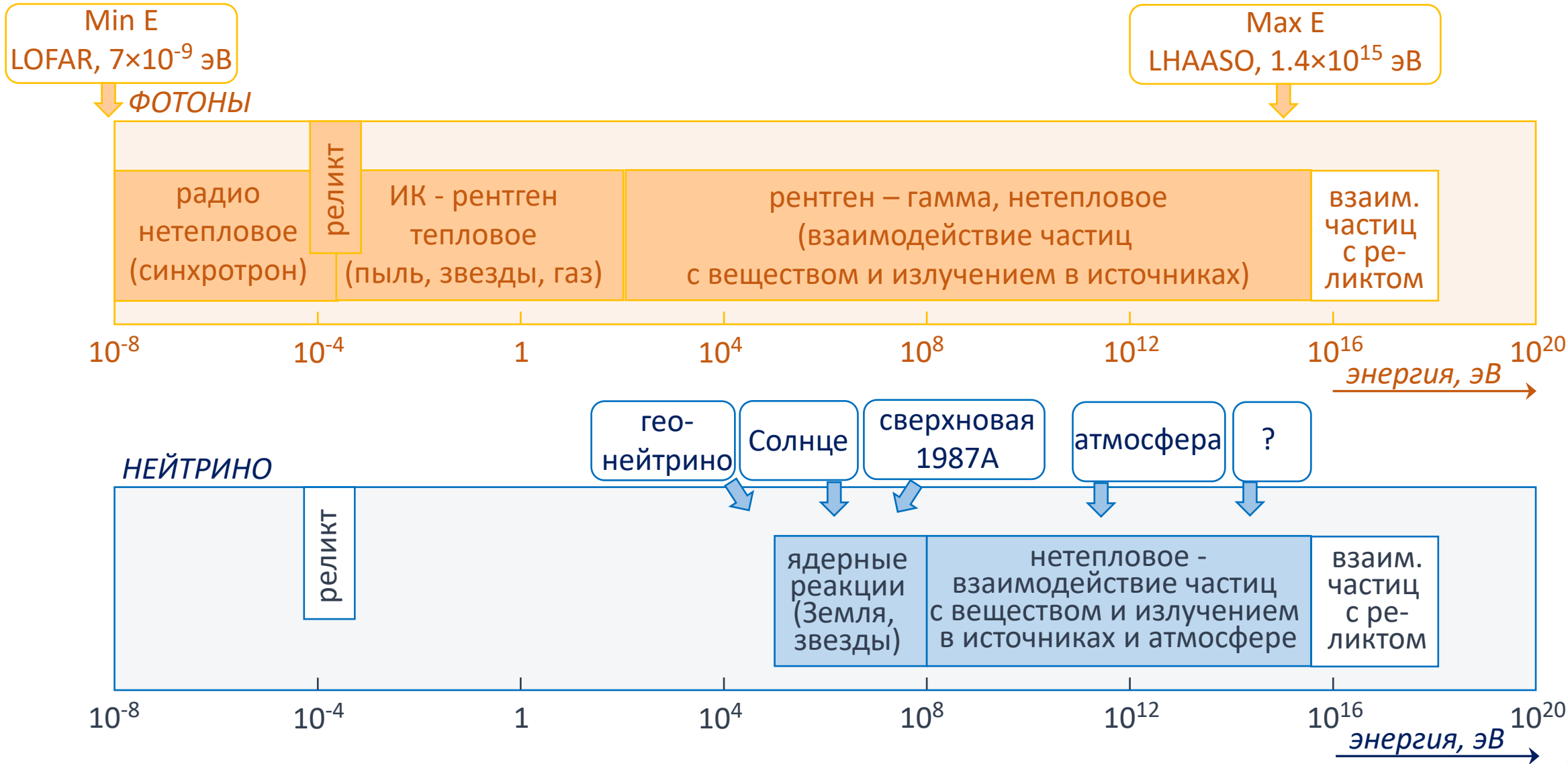
# Нейтринная астрономия

**Сергей Троицкий**  
(ИЯИ РАН)

*Президиум РАН, 22.02.2022*



# Природные источники фотонов и нейтрино



# Нейтрино

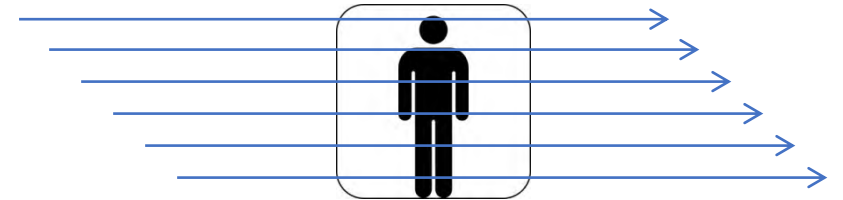
## слабое взаимодействие нейтрино с остальным веществом:

- очень трудно зарегистрировать
- зато приносят информацию из недоступных мест

*“не поймаешь нейтрино за бороду и не посадишь в пробирку”*

[В.С. Высоцкий, 1964]

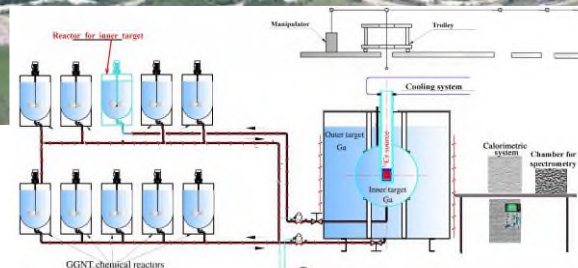
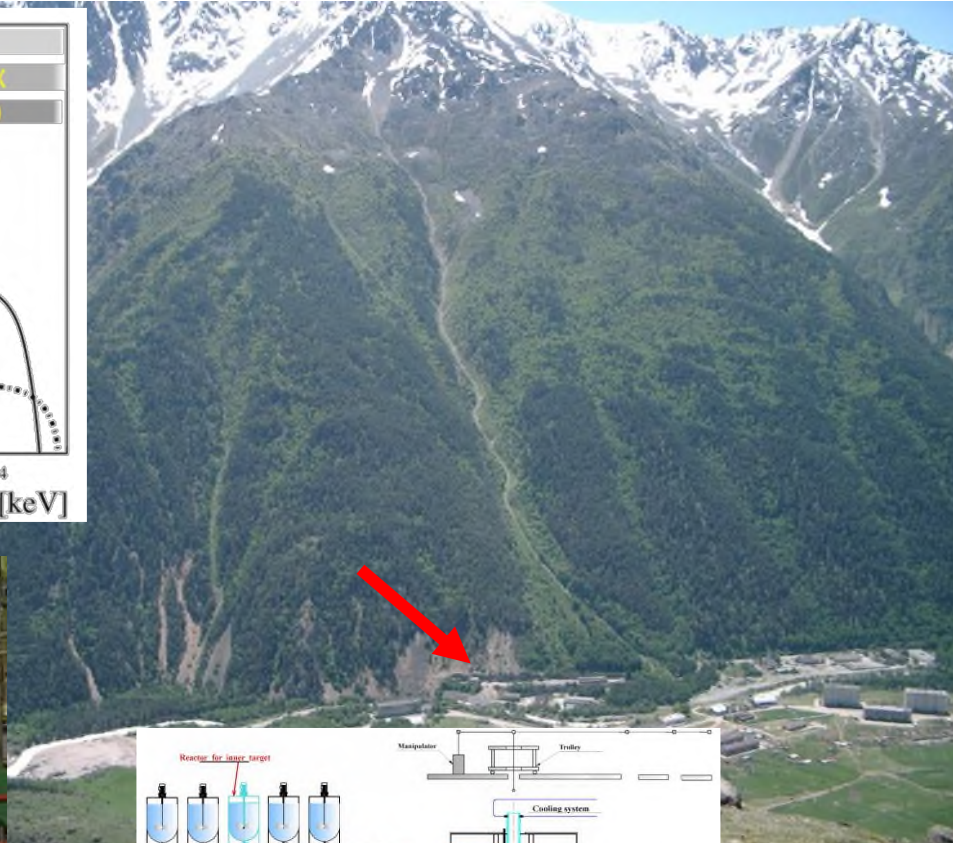
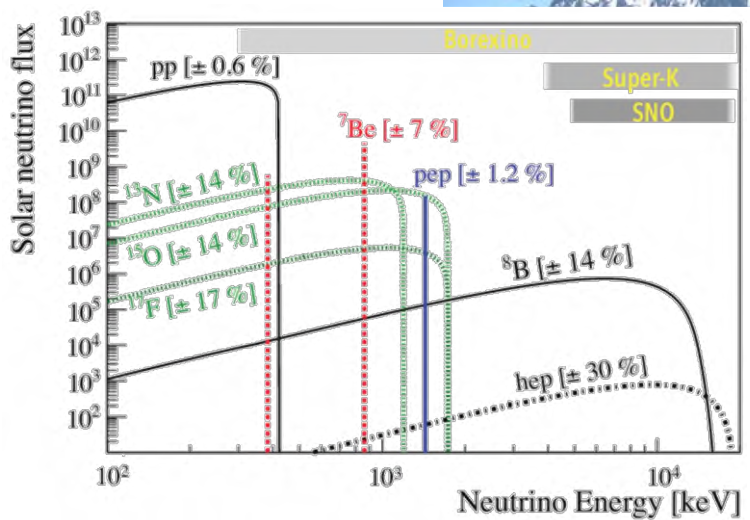
*каждую секунду через меня  
пролетают незамеченными  
 $\sim 10^{14}$  штук нейтрино...*



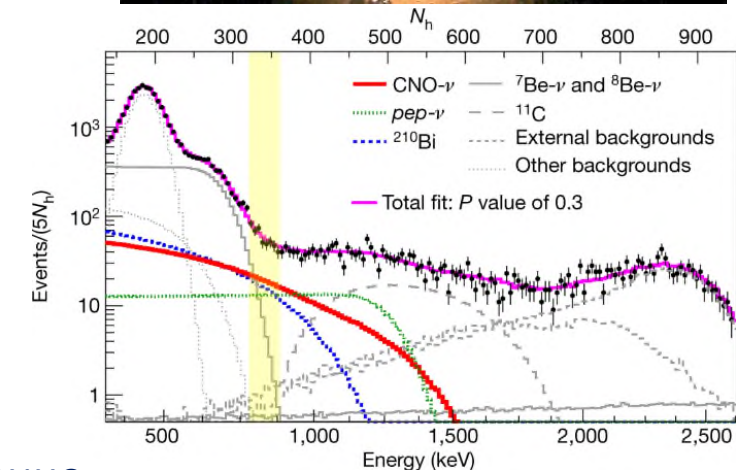
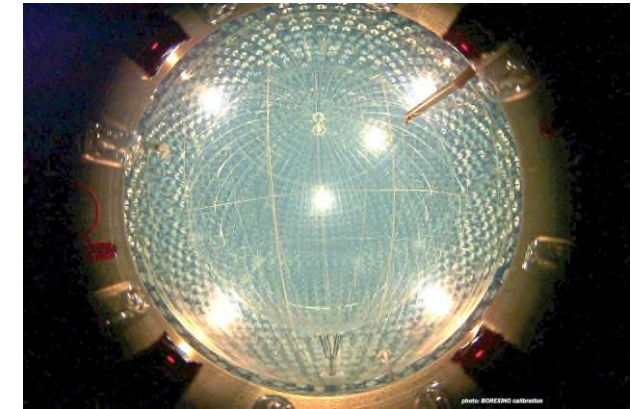
# Солнечные нейтрино

- термоядерные реакции в центре **Солнца**  
десяток экспериментов во всем мире, в т.ч.  
SAGE, Баксанская нейтринная обсерватория

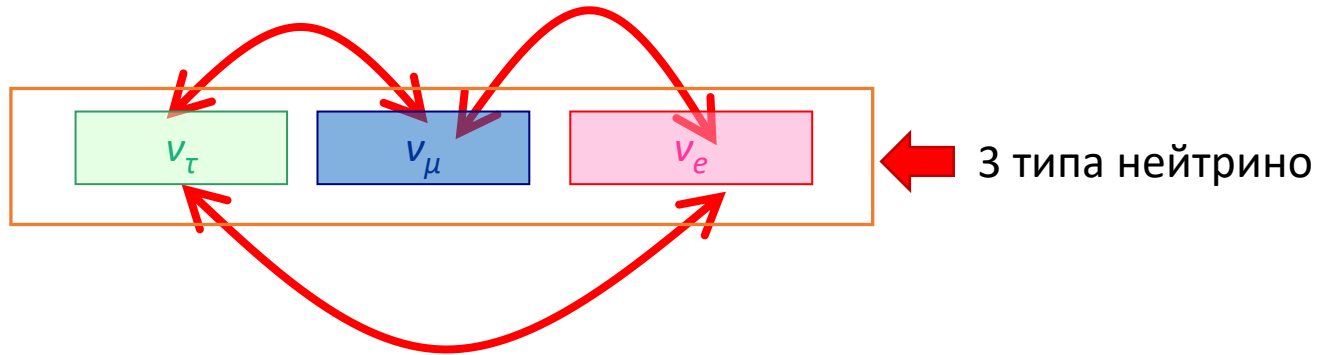
- современные исследования солнечных нейтрино
  - гелиосейсмология и хим.состав Солнца
  - CNO-цикл (BOREXINO, лаборатория Gran Sasso)



стерильные нейтрино  
BEST, 2021



# Нейтринная астрономия для физики частиц



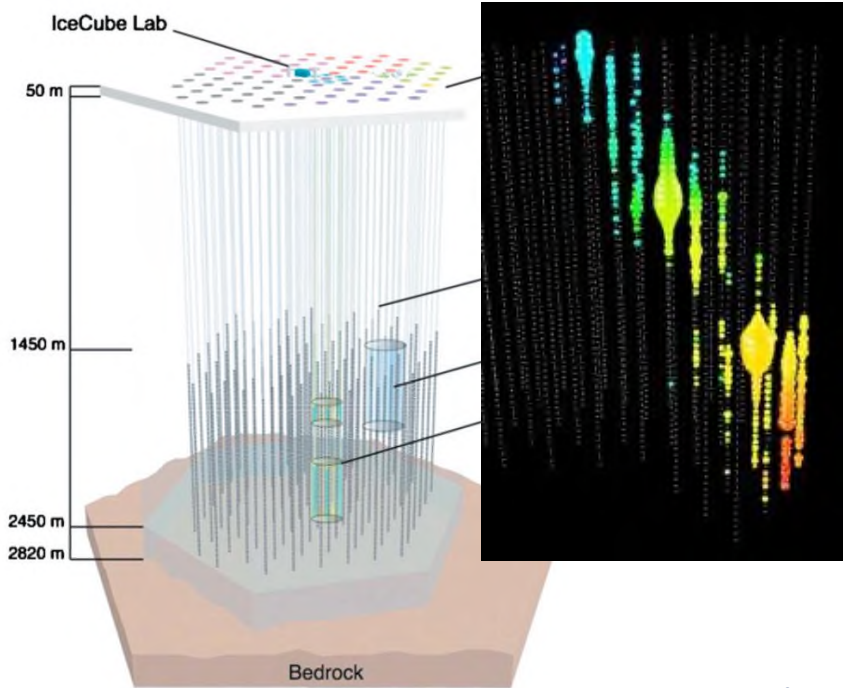
- потоки **солнечных нейтрино** не соответствовали предсказаниям модели Солнца
- объяснение: взаимные превращения (осцилляции) нейтрино
- затем подтверждены десятками экспериментов, в т.ч. лабораторными
- но такие превращения запрещены в Стандартной модели физики частиц

**взаимные превращения нейтрино зарегистрированы. Стандартная модель неполна.**





# Нейтрино высоких энергий

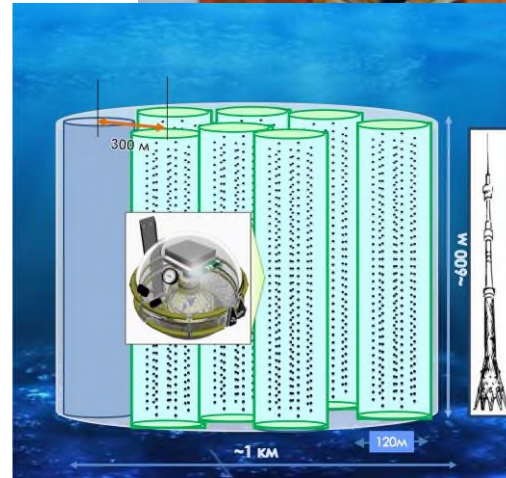


- Южный полюс, работает с 2008
- открытие внеземных нейтрино  $>60$  ТэВ
- источники нейтрино неизвестны!

## IceCube:

- Средиземное море, начинает работу

## KM3NeT:



## Baikal-GVD:

- точность определения направлений нейтрино в воде лучше, чем во льду
- официально запущен в 2021, но данные в неполной конфигурации с 2017
- в одной из мод регистрации рабочий объем Baikal-GVD порядка рабочего объема IceCube
- Юг+Север = наблюдение всего неба в нейтрино



Ministry of Science and Higher Education of Russia, Vokovskiy  
Vokovskiy is pushing a button to launch the Baikal-GVD neutrino  
telescope. Photo by Alex Shadrin / JINR





# Нейтрино высоких энергий: Байкал-ГВД

- первые 10 «байкальских» нейтрино (2018-2020) выше 100 ТэВ на фоне карты неба в гамма-диапазоне (Fermi LAT)

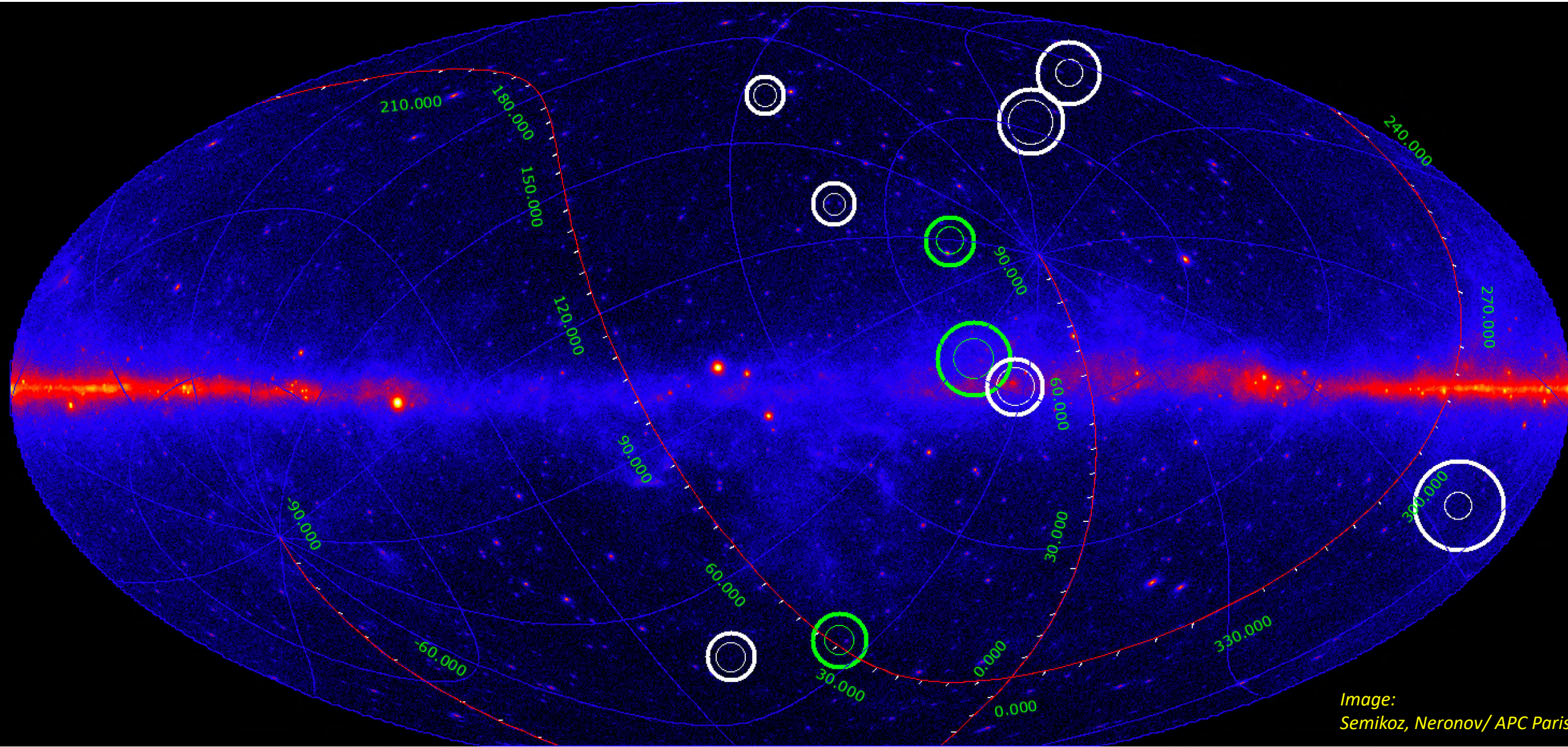
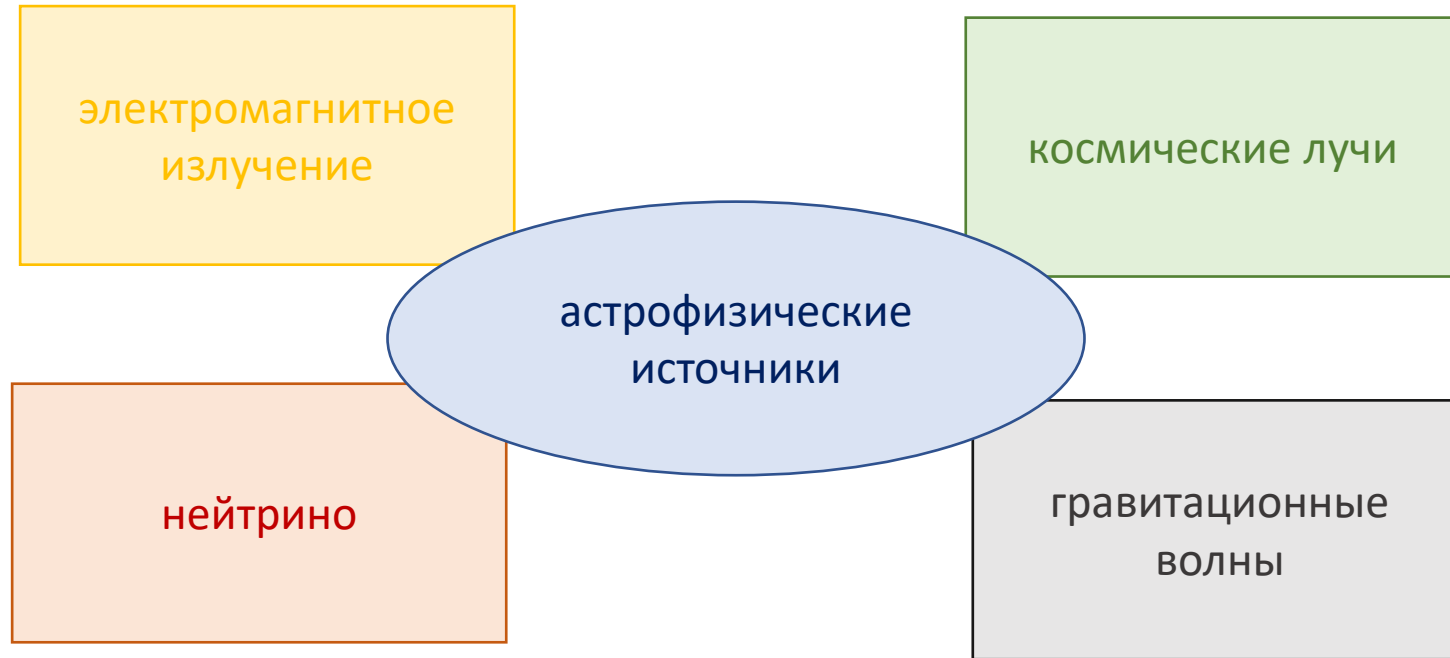


Image:  
Semikoz, Neronov/ APC Paris



# Многоканальный подход: нейтринная + обычная астрономия

- Из-за большого количества нейтрино, рождающихся на Земле и в ее атмосфере, выделение событий от астрофизических источников само по себе представляет серьезную проблему.



**MULTIMESSENGER ASTRONOMY / МНОГОКАНАЛЬНАЯ АСТРОНОМИЯ**

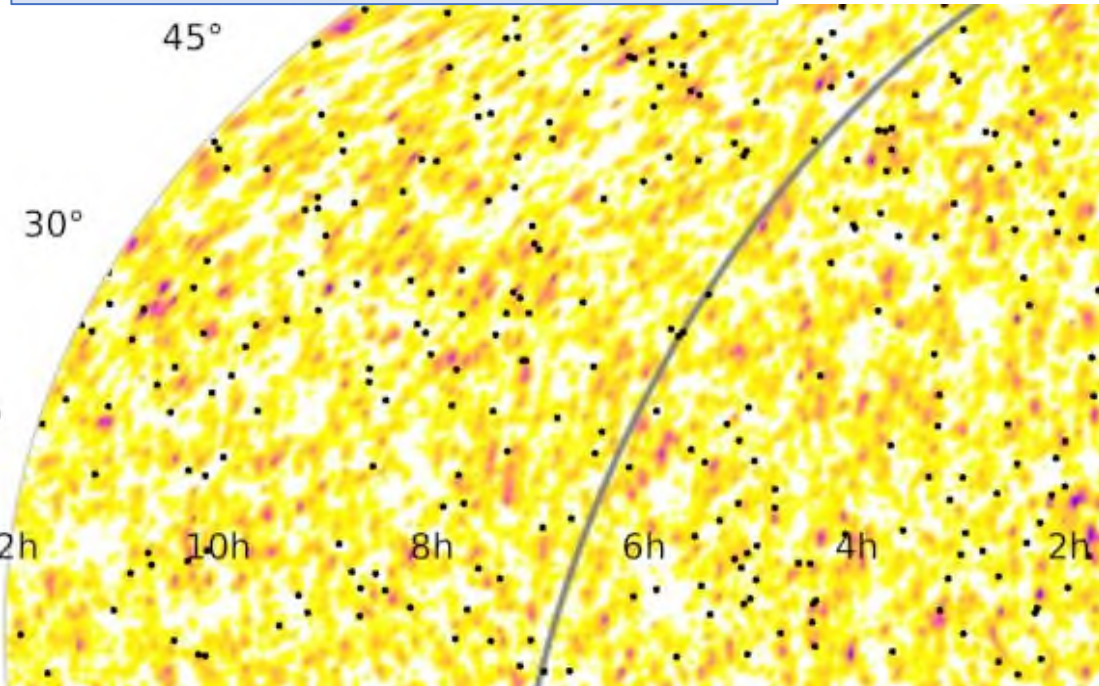




# Нейтрино высоких энергий от радиоблазаров? нейтрино+радио

активные ядра галактик – сверхмассивные черные дыры  
с релятивистскими выбросами, направленными на нас

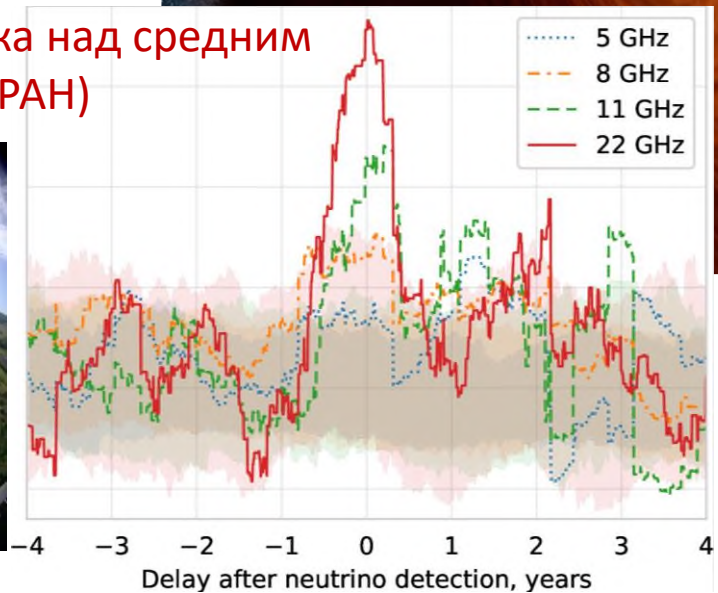
- Направления прихода нейтрино совпадают с радиоблазарами



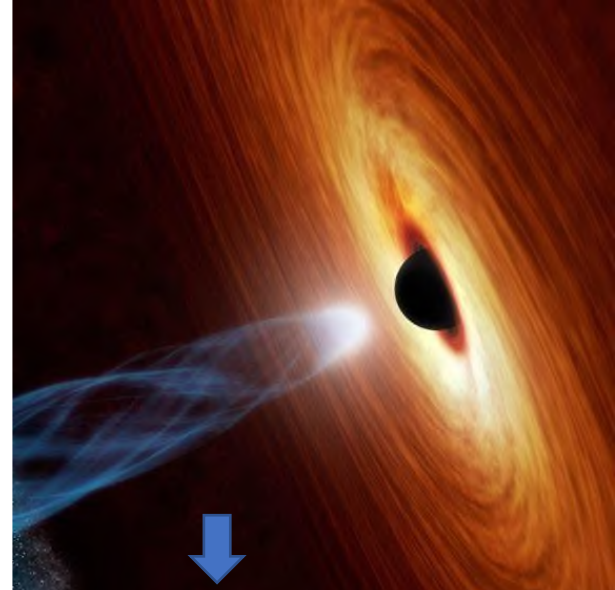
*Plavin et al., Astrophys.J. 908 (2021) 157*

- Времена прихода нейтрино совпадают с их радиовспышками

превышение радиопотока над средним  
(данные РАТАН-600 САО РАН)



*Plavin et al., Astrophys.J. 894 (2020) 101*



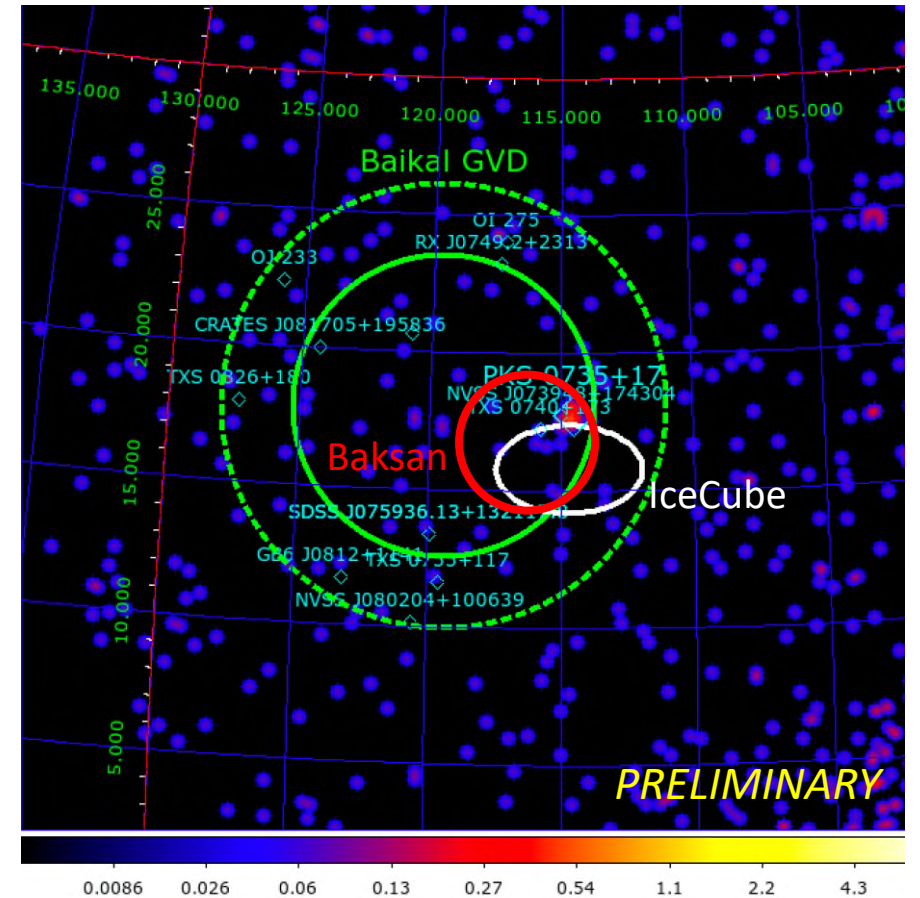
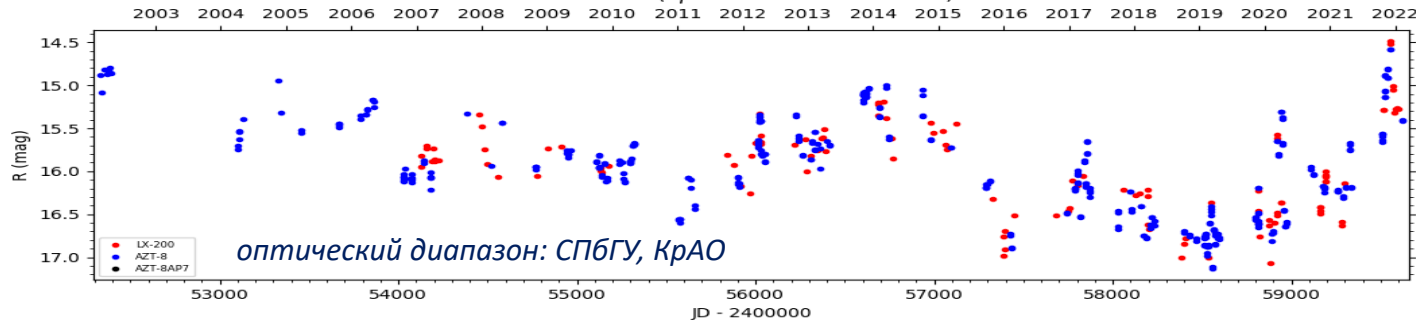
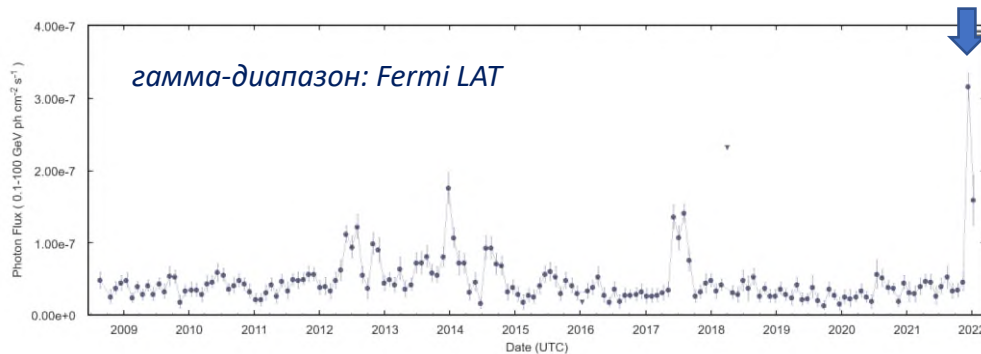
# Нейтрино высоких энергий от радиоблазаров? события 8 декабря 2021

04-21.12: историческая вспышка радиоблазара PKS 0735+17  
(оптика, рентген, гамма, начало вспышки в радио)

08.12: нейтрино 170 ТэВ, IceCube

08.12: нейтрино 43 ТэВ, Байкал-ГВД

04.12: нейтрино ~ТэВ, Баксан

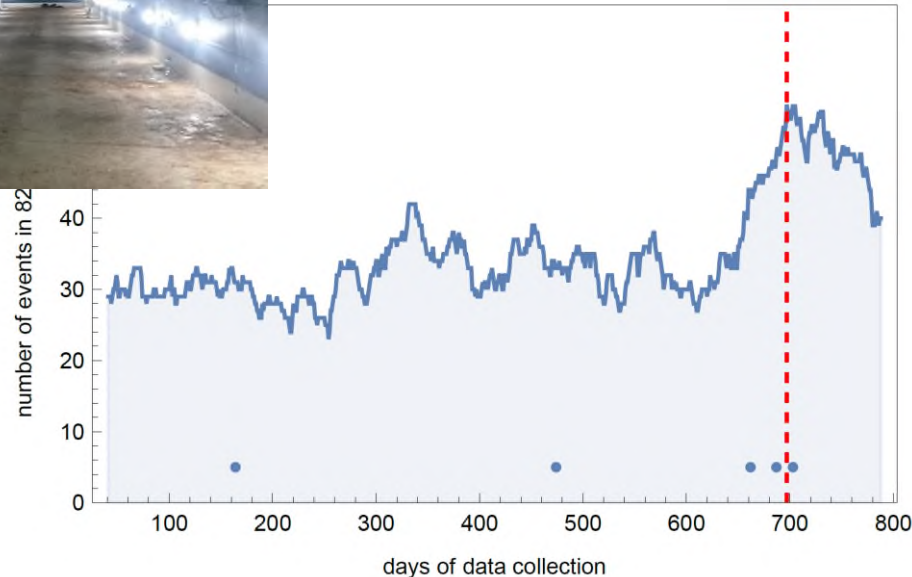




# Нейтрино высоких энергий от источников в Галактике?

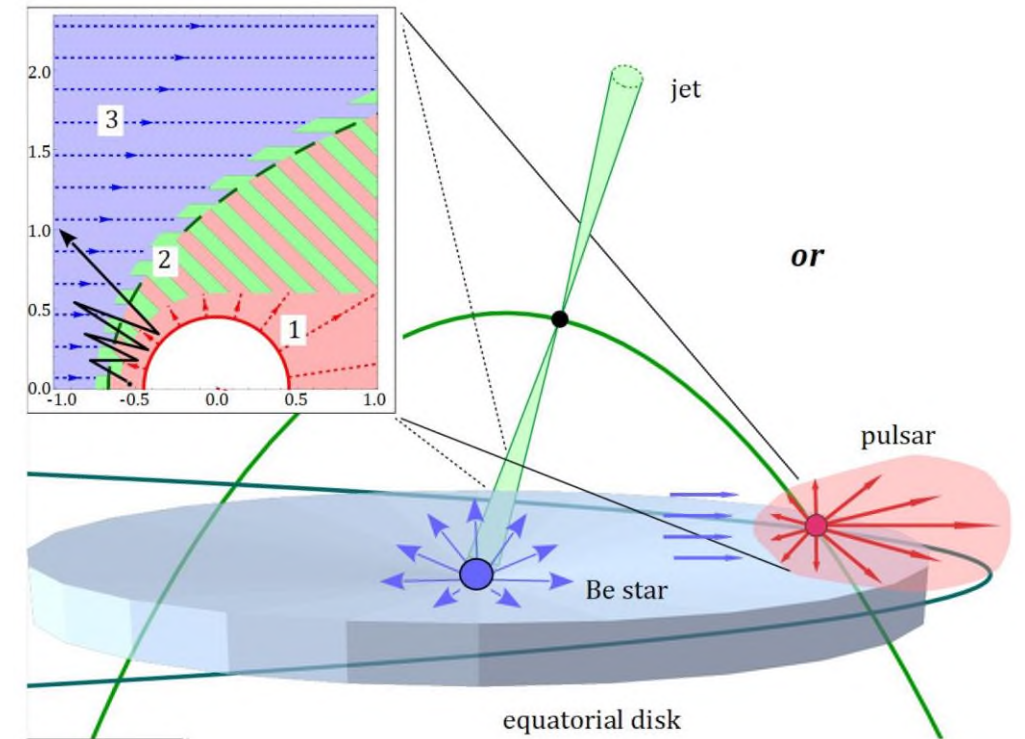
## нейтрино+гамма сверхвысоких энергий

- IceCube: нейтрино 150 ТэВ
- Ковер-2: вспышка гамма излучения >300 ТэВ



*Dzhappuev et al., Astrophys.J.Lett. 916 (2021) L22*

- область в созвездии Лебедя: много источников
- теория: двойная система PSR J2032+4127?



*Bykov et al., Astrophys.J.Lett. 921 (2021) L10*

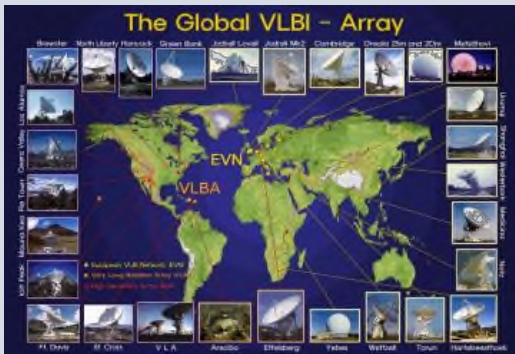




# Многоканальная астрономия, нейтрино+электромагнитная: будущее

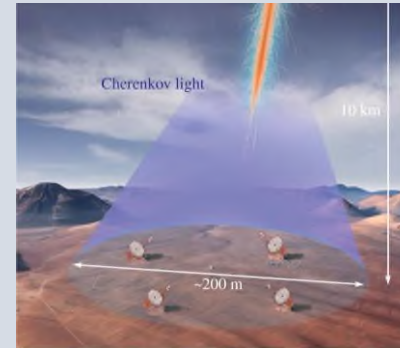
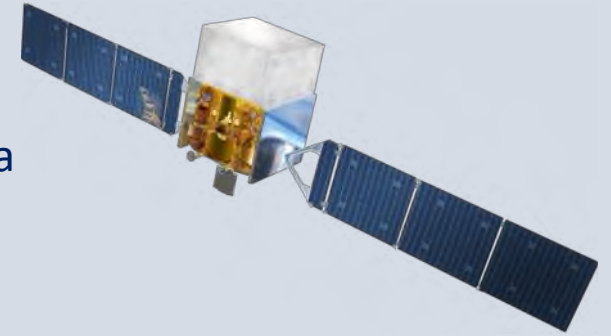
- нетепловое излучение, радио и гамма

постоянный мониторинг  
обычными радиотелескопами  
(идентификация источников  
нейтрино и их вспышек)  
PATAN-600, OVRO, Metsahovi...



радиоинтерферометрия со  
сверхдлинными базами  
(идентификация и изучение  
процессов, приводящих к  
излучению нейтрино в  
конкретных источниках)

гамма-телескоп Fermi LAT:  
на орбите с 2008 г.,  
нет даже проекта спутника  
ему на смену

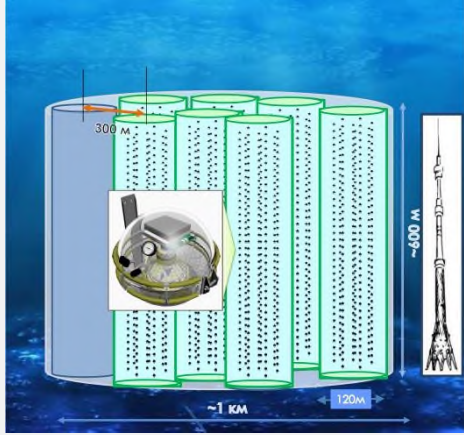


будущее этого диапазона -  
за «недорогими»  
наземными инструментами?  
ALEGRO, ФТИ им. Иоффе РАН

галактические источники:  
ПэВная гамма-астрономия  
Ковер-3 (Баксан), TAIGA  
(Бурятия)  
LHAASO, Tibet, HAWC,  
SWG0, ALPACA,...



# Заключение: нейтринные телескопы – установки «Мегасайенс»

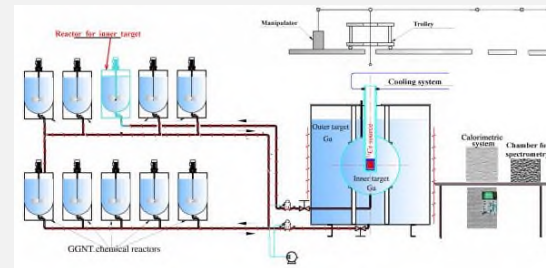


Байкальская глубоководная  
нейтринная обсерватория

пионерские работы в СССР и РФ  
– уникальная инфраструктура



Баксанская подземная  
нейтринная обсерватория  
ИЯИ РАН



Baikal-GVD

2021

0.4 км<sup>3</sup>

2024

1 км<sup>3</sup>

20??

5...10 км<sup>3</sup>

Разработка  
нейтринного телескопа  
высоких энергий  
нового поколения

современные результаты  
мирового уровня

для сохранения лидирующих  
позиций нужны адекватные  
материальные и кадровые  
ресурсы

ББНТ:

Большой баксанский  
нейтринный телескоп  
(проект)

