Семинар «Мониторинг и контроль качества данных в эксперименте JUNO»

Большакова Анастасия Евгеньевна

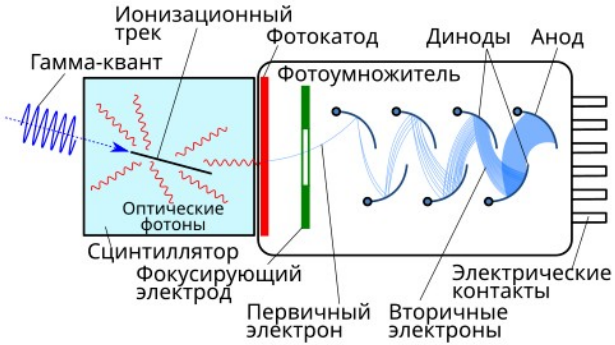
24 июня 2026 г.

Фотоумножитель

1934г. - Леонид Александрович Кубецкий изобрел первый в мире вакуумный многокаскадный фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)

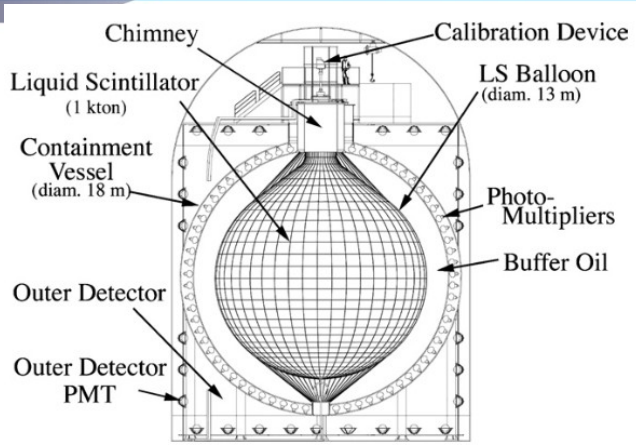
1953г – первый нейтринный эксперимент Herr Auge, использующий 2” фотоумножители

Использование: физика, медицина, астрономия, лазерная и астрономическая техника.





I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: KamLAND



KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) - эксперимент в скальной пещере обсерватории Камиока в Японских Альпах, Япония. Над детектором ~1000м горной породы (~2700 м.в.э.)

- Подтверждение осцилляций реакторных антинейтрино, поиск геонейтрино (геоанти-нейтрино), поиск безнейтринного двойного бета-распада, поиск астрофизических нейтрино, точное измерение параметров нейтринных осцилляций

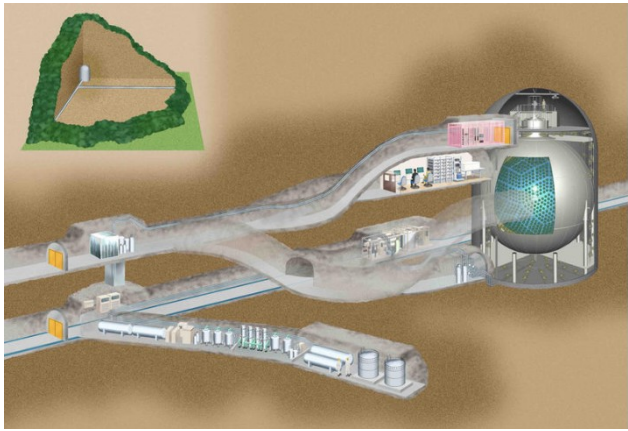
- Внутренний детектор содержит 1879 фотоумножителей на внутренней поверхности сферического защитного корпуса из нержавеющей стали радиусом 9 м: из них 1325 17” Hamamatsu R7250, а остальные 554 20” Hamamatsu R3600.

- 1 kT жидкого сцинтиллятора

- 13 м внутренний баллон

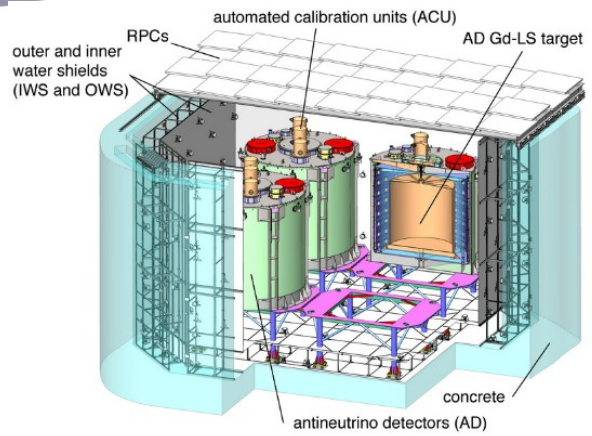
Table 3.5: Number of PMTs per type used in the detector.

PMT type	ID	OD	Chimney region	Sum per PMT type
20-inch	554	225	—	779
17-inch	1325	—	—	1325
8-inch	—	—	16	16
5-inch	—	—	6	6
Sum per region	1879	225	22	2126

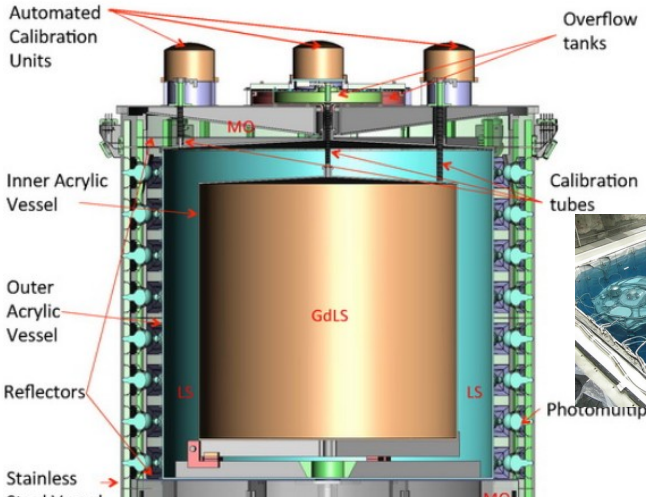


I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: Daya Bay

Daya Bay Reactor Neutrino Experiment - предназначен для измерения угла смешивания нейтрино θ_{13} с высокой точностью, детекторы которого расположены в одной дальней и двух ближних подземных экспериментальных площадках на разных расстояниях от трех пар реакторов.



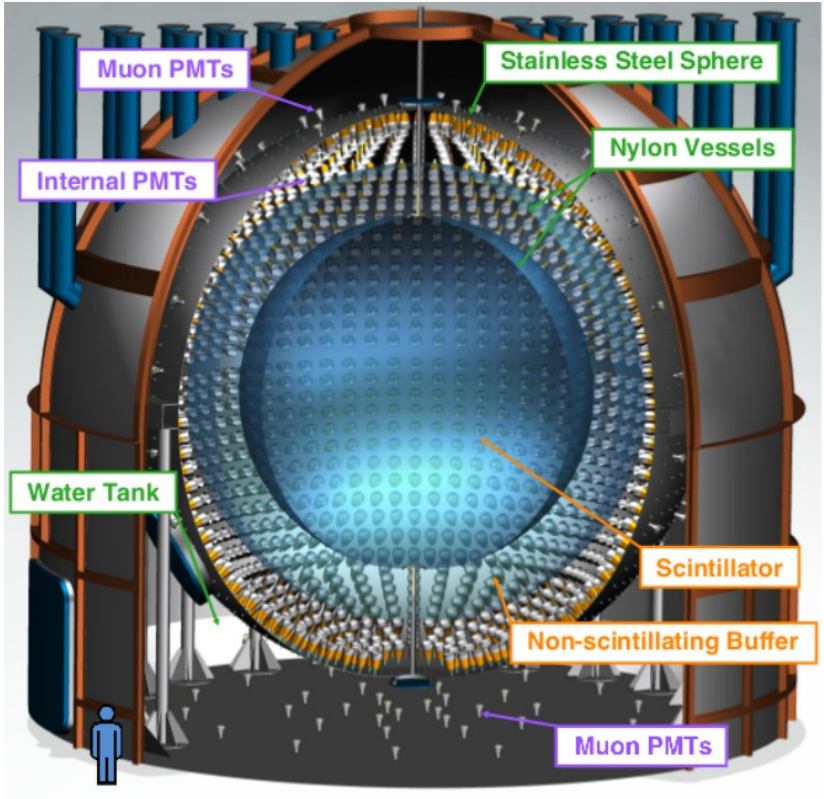
- Эксперимент был первым, в котором было измерено ненулевое значение θ_{13} со значением ≥ 5 стандартных отклонений
- 3 экспериментальных зала: ближние 360 и 500 м от реактора и дальний на 1,5-1,8 км
- 8 детекторов с 20т жидкого сцинтиллятора каждый
- 960 20” PMT в водных бассейнах: 619 новых Hamamatsu, ~341 фотоумножителей из эксперимента MACRO (288+288+384 для трех экспериментальных залов)
- 256x8 = 2048 8” фотоумножителей Hamamatsu в 8 внутренних детекторах (+Tyvek)



I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: Borexino

Borexino - жидко-сцинтилляционный детектор нейтрино, целю которого являлось измерение солнечных нейтрино (Гран-Сассо, Италия)

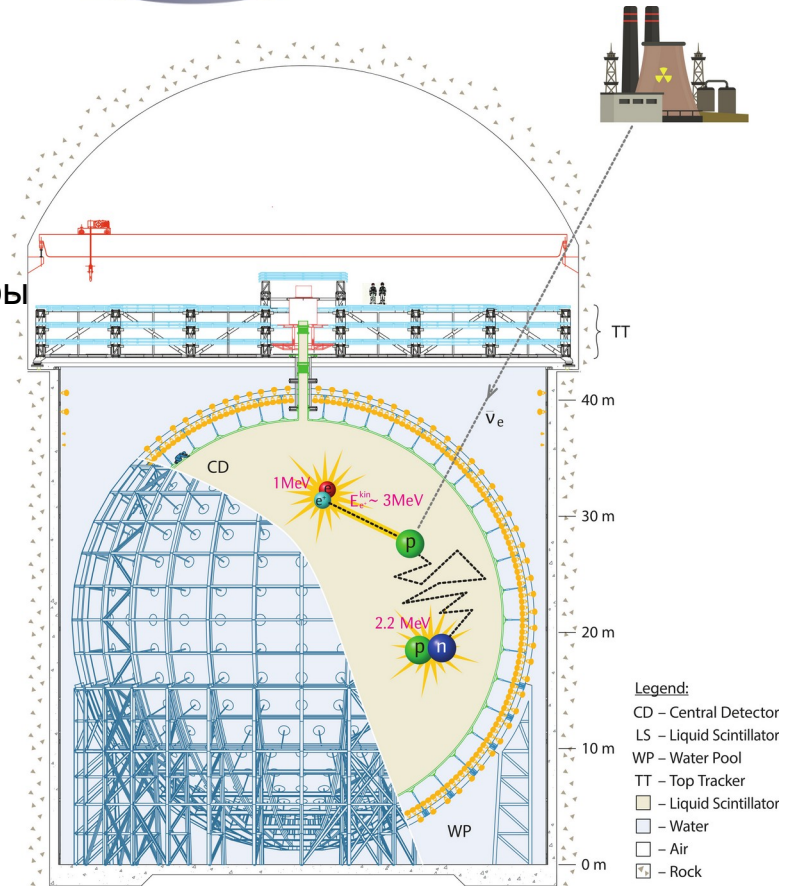
- скальный щит 3800 м.в.э подавляет поток космических мюонов в ≈106 раз
- Сфера из нержавеющей стали радиусом 6,85 м, нейлоновый баллон радиусом 4,25 м
- 280 тонн псевдокумена (1,2,4-триметилбензола, PC) + 1,5% PPO
- 2212 8” photomultiplier tubes (PMTs)
- цилиндрический резервуар ~1т. сверхчистой воды и оснащенный 208 3” фотоумножителями



I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: JUNO

Подземная нейтринная обсерватория Цзянмэнь (JUNO) - многоцелевой нейтринный эксперимент, расположенный на глубине 650 метров под землей на юге Китая

- 20 000т. жидкого сцинтиллятора внутри акриловой сферы диаметром 35м
- окружен 35 000т. воды
- в 52,5км от 8 ядерных реакторов (26,6 ГВт)
- энергетическое разрешение σ ≈ 3,4% при энергии 1МэВ
- контроль энергетической нелинейности ≈ 1%



I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: JUNO

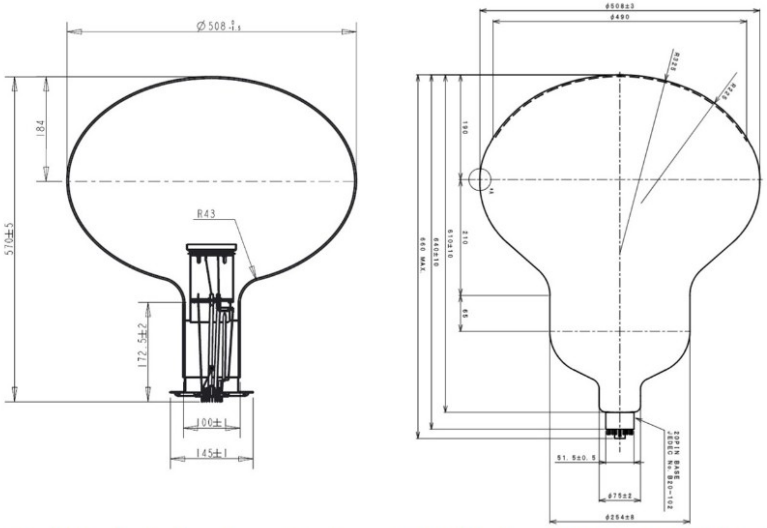


Fig. 2: Technical drawing of selected PMTs for JUNO: NNVT 20-inch MCP-PMT (type GDB-6201 [63], left) and HPK 20-inch dynode PMT (type R12860 [59], right).

Table 1: Main acceptance criteria for JUNO 20-inch PMTs.

	HPK R12860-50	NNVT GDB-6201
Parameter	Average (Limit)	Average (Limit)
QE	30.3 % ($\geq$ 27 %)	28.5 % ($\geq$ 26.5 %)
CE	95.6 %	98 % ($\geq$ 96 %)
Effective area ratio	96 % (93 %)	97 % ($\geq$ 96 %)
Gain	10^7	10^7
HV (for a 10^7 gain)	2000 V ($\leq$ 2500 V)	2500 V ($\leq$ 2800 V)
QE uniformity	5 % ($\leq$ 15 % inside 70°) 20 % ($\leq$ 30 % inside 80°)	8 % ($\leq$ 10 %)
TTS (FWHM)	2.7 ns ($\leq$ 3.5 ns)	12 ns ($\leq$ 15 ns)
P/V ratio	3 ($\geq$ 2.5)	3.5
Pre-pulse ratio (80 ns window, main pulse ~160 p.e.)	0.8 % ($\leq$ 1 %)	0.5 % ($\leq$ 1 %)
After-pulse ratio (0.5~20 µs window, main pulse ~160 p.e.)	10 % ($\leq$ 15 %)	10 % ($\leq$ 15 %)
Dark count rate (0.25 p.e., 22°C)	10 kHz ($\leq$ 50 kHz)	$\leq$ 50 kHz (if 24 % $\leq$ PDE < 27 %) $\leq$ 60 kHz (if 27 % $\leq$ PDE < 28 %) $\leq$ 80 kHz (if 28 % $\leq$ PDE < 29 %) $\leq$ 100 kHz (if 29 % $\leq$ PDE)
Glass radioactivity	^{238}U: < 400 ppb ^{232}Th: < 400 ppb ^{40}K: < 40 ppb	^{238}U: < 75 ppb ^{232}Th: < 75 ppb ^{40}K: < 30 ppb
Pressure tolerance	$\geq$ 0.8 MPa	> 1 MPa
Dimension tolerance[1]	508 (±3 mm) (diameter) < 10 mm (height)	508 (±3 mm) (diameter) < 10 mm (height)
Lifetime[2]	$\geq$ 20 years	$\geq$ 25 years

[1] The tolerance is ±3 mm with the lower limit required by the optical coverage and the upper limit constrained by the detector installation. It is larger than the specification of the NNVT PMT shown in Fig. 2.
[2] Gain decrease less than 50% in 20 years with the same HV.

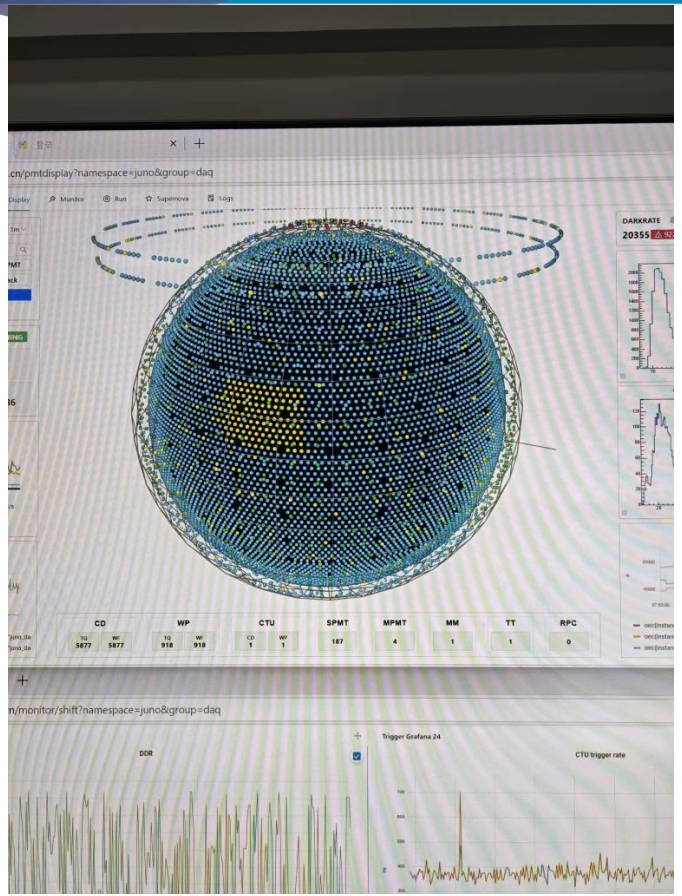
I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: JUNO

1)17596 20” фотоумножителей:
- 4939 динодных (Hamamatsu)
-12657 микроканальные (MCP)

2) 25587 3” фотоумножителей (China)

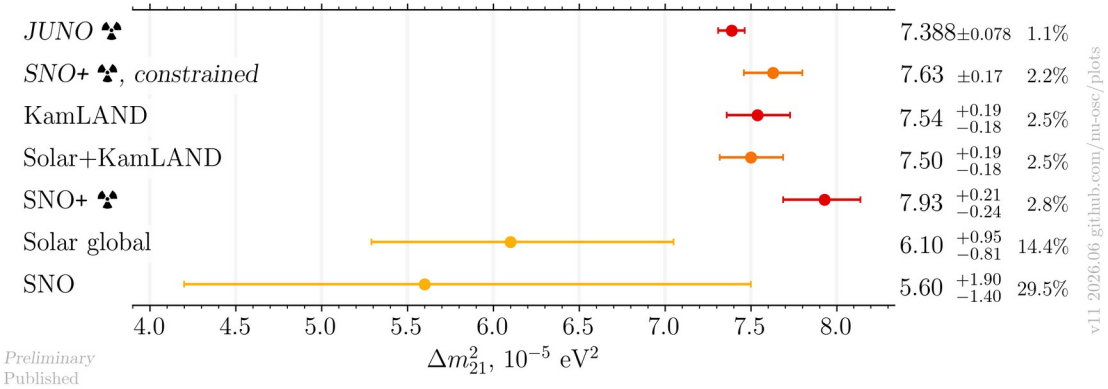
3) 2751 20” MCP, из них 348 в бассейне кольцами

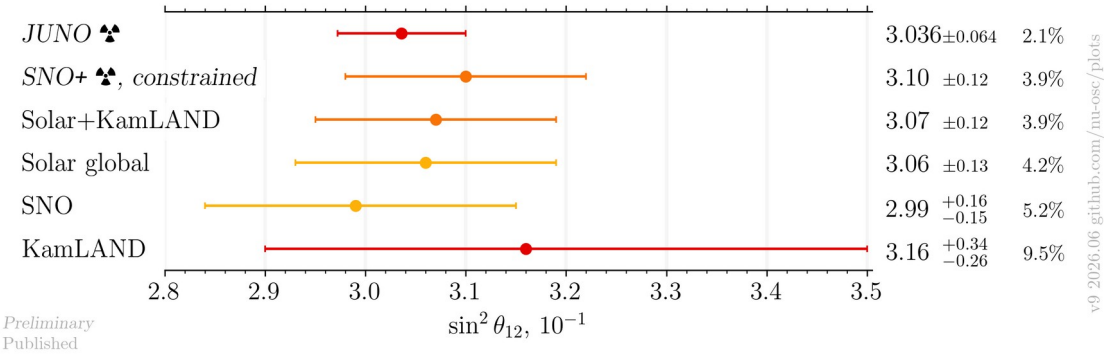
3) 600 8” фотоумножителей (Daya Bay)



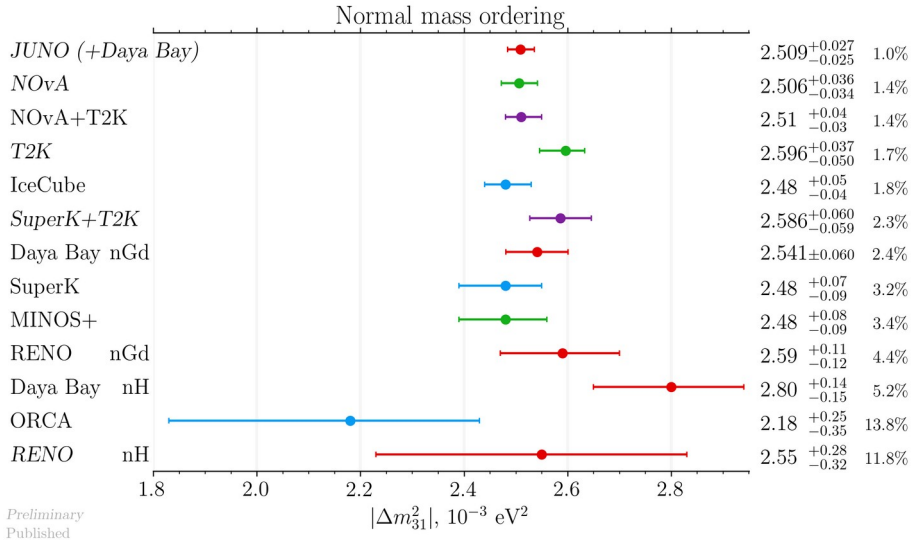
I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: JUNO

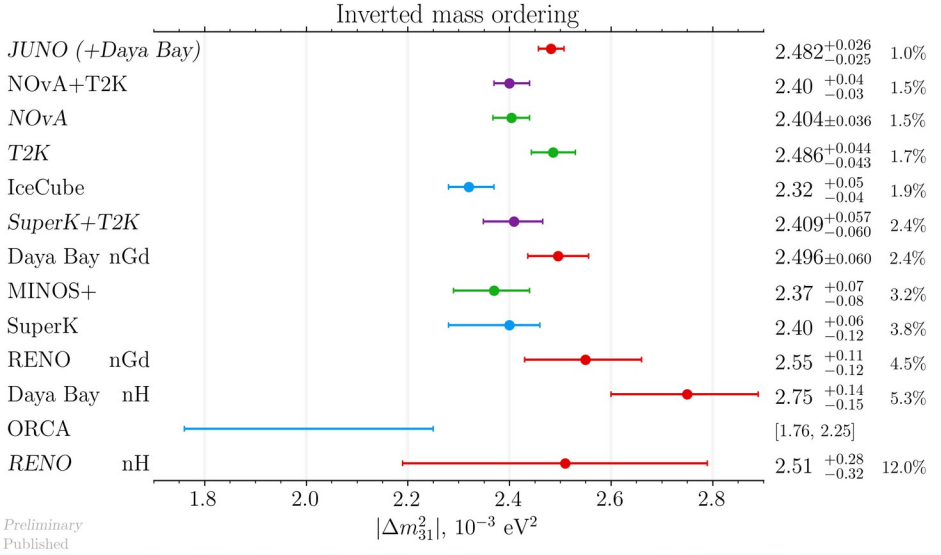






I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: JUNO

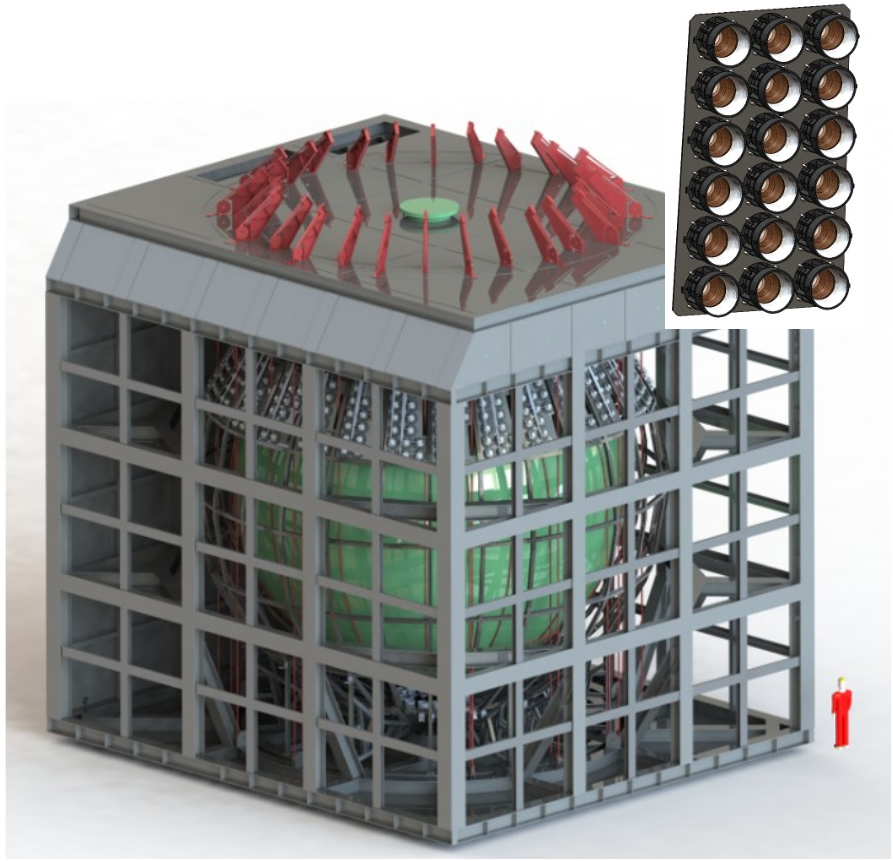




I Будущие нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: JNE

Jinping neutrino experiment (JNE) - эксперимент нового поколения по изучению солнечных нейтрино в китайском Цзиньпине (Китай).

- 2400м под землей (6720 м.в.э.) – т.е. самый глубокий
- ~3 000 8-inch MCP PMT
- жидкий сцинтиллятор (вода, растворы) внутри акриловой сферы диаметром 4,98м
- Позволит детектировать солнечные нейтрино, геонейтрино, нейтрино сверхновых и двойной безнейтринный бета-распад
- при использовании PMT и концентратора света (чаша с углом среза 70°) энергетическое разрешение улучшится более чем на 15% для событий в центре детектора JNE, а TTS увеличится не более чем на 0,3 нс



I Будущие нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: BLVST

Baksan Large Volume Scintillation Telescope - детектор большого объема, заполненный жидким сцинтиллятором, в Баксанской нейтринной обсерватории

- целевая масса 10 кт на глубине 4800 м.в.э.
- исследование спектра солнечных нейтрино и поиск нейтрино в реакциях CNO; изучение потока антинейтрино, испускаемых дочерними продуктами распада урана и тория, содержащимися в недрах Земли (геонейтрино)
- Сцинтиллятор на основе LAB: нефтеперерабатывающего завода "КИНЕФ"
- Прототип: цилиндрического резервуар, акриловая сфера d = 960 мм, конструкцию из нержавеющей стали, 420 кг сцинтиллятора на основе LAB (в планах 5 т), 20 10” Hamamatsu R7081-100 PMTs (планируются концентраторы)



Figure 1. External tank from polypropylene.



Figure 2. The acrylic sphere with stainless steel supporting structure.

I Будущие нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: THEIA

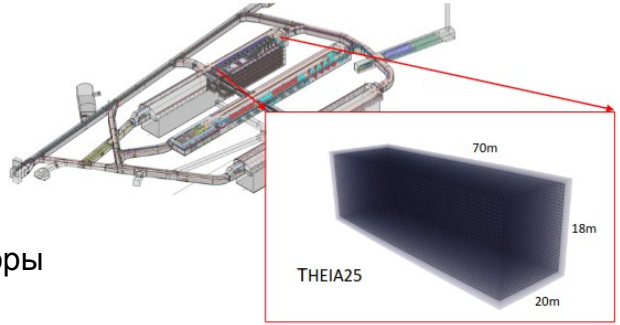
- кандидат на 4 пещеру, выкопанную для глубокого подземного нейтрино эксперимента Dune (USA)

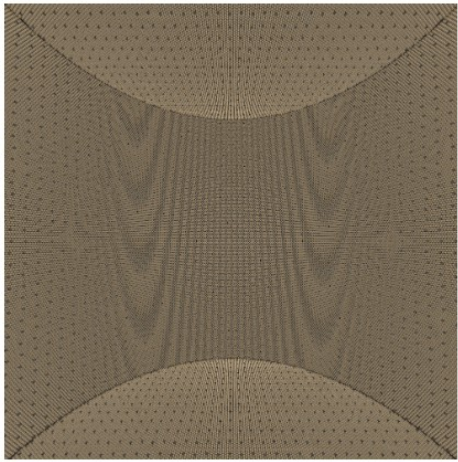
- Задачи Theia-25: нарушение CP и широкая программа физики низких энергий. Theia-100 рассчитана на 100 тыс. т.: включает в себя физику солнечных нейтрино низких и высоких энергий, определение порядка масс нейтрино и измерение фазы δ, нейтрино сверхновых и нейтрино вспышек сверхновых, поиск распада нуклонов, поиск безнейтринного двойного бета-распада

- Моделирование: 86% 10-inch PMT и 4% LAPPDs

- новые органические жидкие стинтилляторы или на водной основе

Theia - это проект нового “гибридного” оптического детектора нейтрино, улавливающий черенковский и сцинтилляционный свет одновременно.





II Энергетическое разрешение

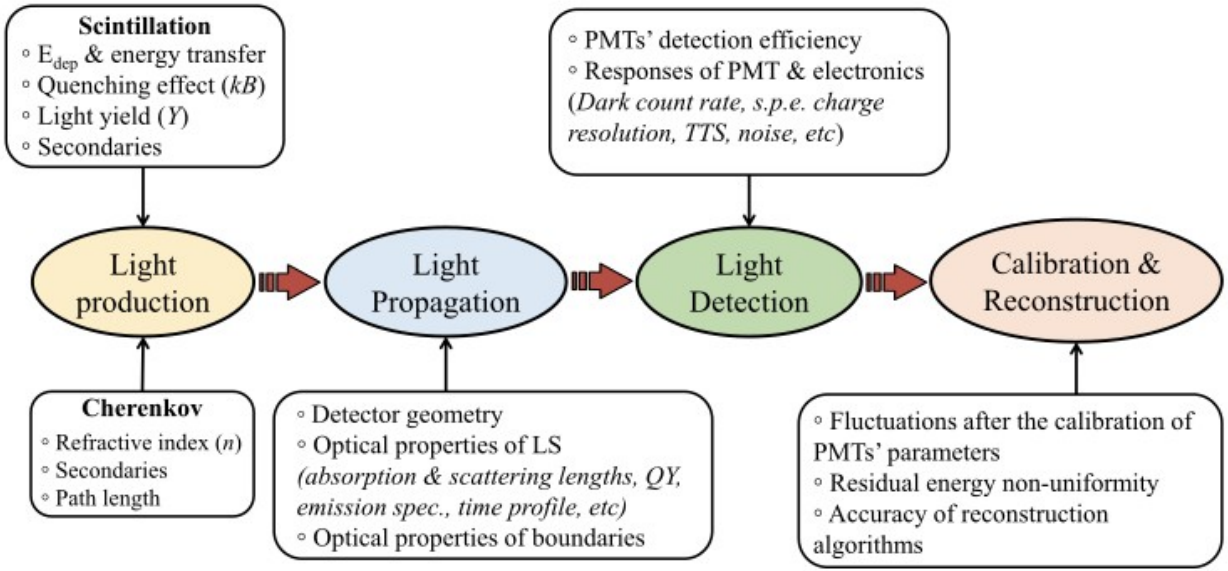


Fig. 2. (color online) Summary of the key factors impacting the energy resolution throughout the processes of light production, propagation, detection, calibration, and reconstruction.

II Энергетическое разрешение

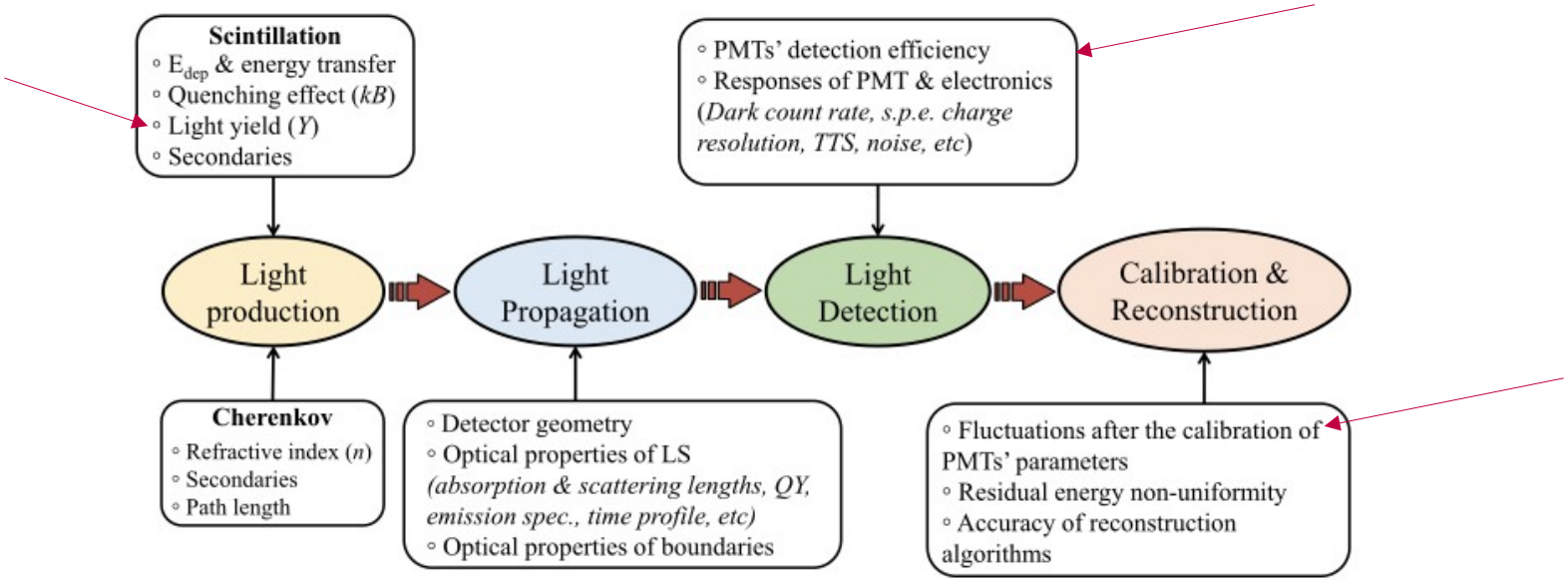
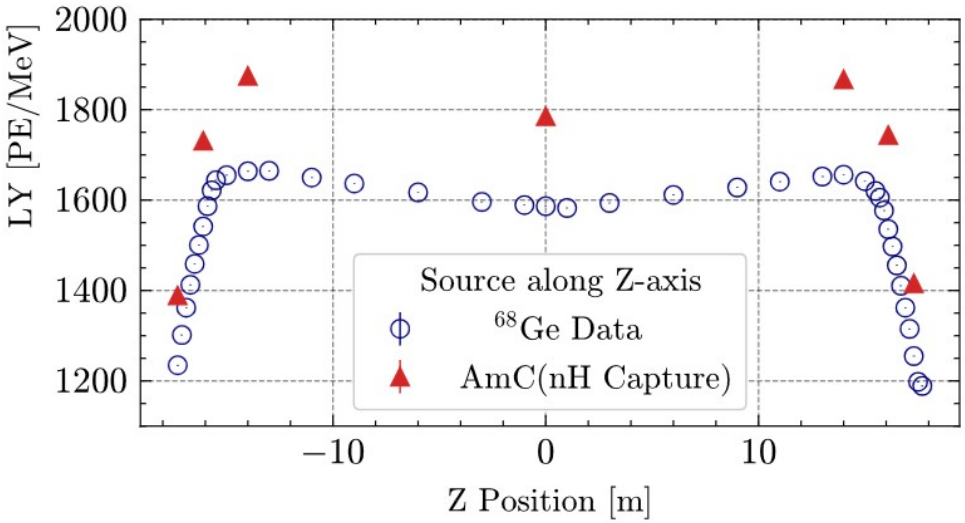
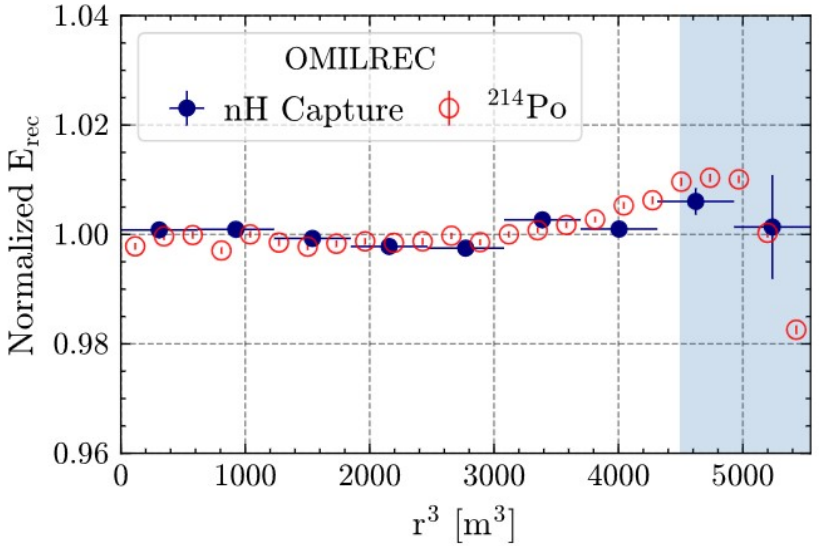


Fig. 2. (color online) Summary of the key factors impacting the energy resolution throughout the processes of light production, propagation, detection, calibration, and reconstruction.

Светоотдача и однородность детектора JUNO

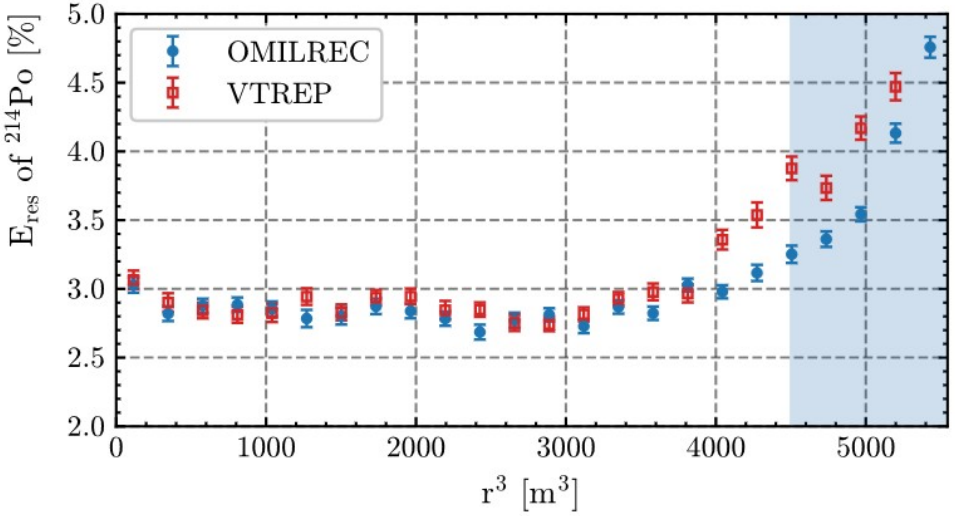


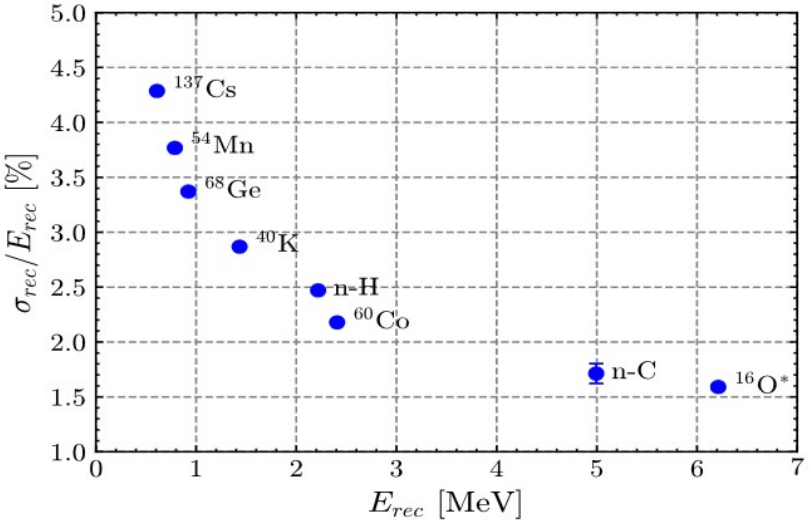


- ~1600 PE/МэВ для ^{68}Ge
- ~1800 PE/МэВ для захвата нейтронов
- ^{68}Ge ~3.5% @ 2× 0.511 MeV

Неравномерность восстановления энергии:
~ 1% в доверительном объеме ≈ < 16,5 м.

Энергетический отклик: энергетическое разрешение





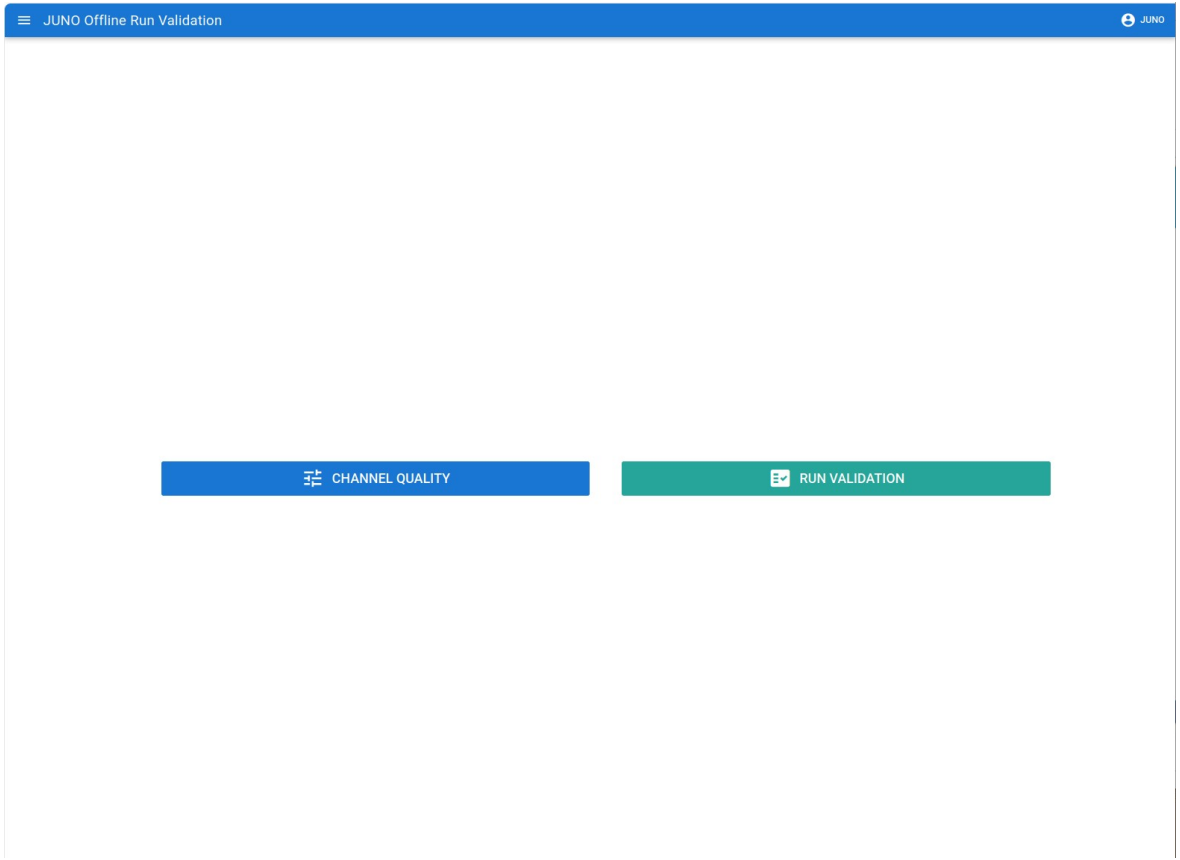
- Энергетическое разрешение для α от ^{214}Po составляет < 3% при 0,93 МэВ для большей части области R < 16,5 м

Энергетическое разрешение: 3,4% при энергии 0,9 МэВ (2 γ от ^{68}Ge)

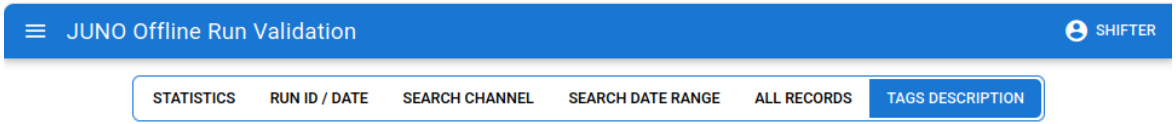
III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO

https://juno-dq.jinr.ru/

https://hep.tsinghua.edu.cn/juno-dq/



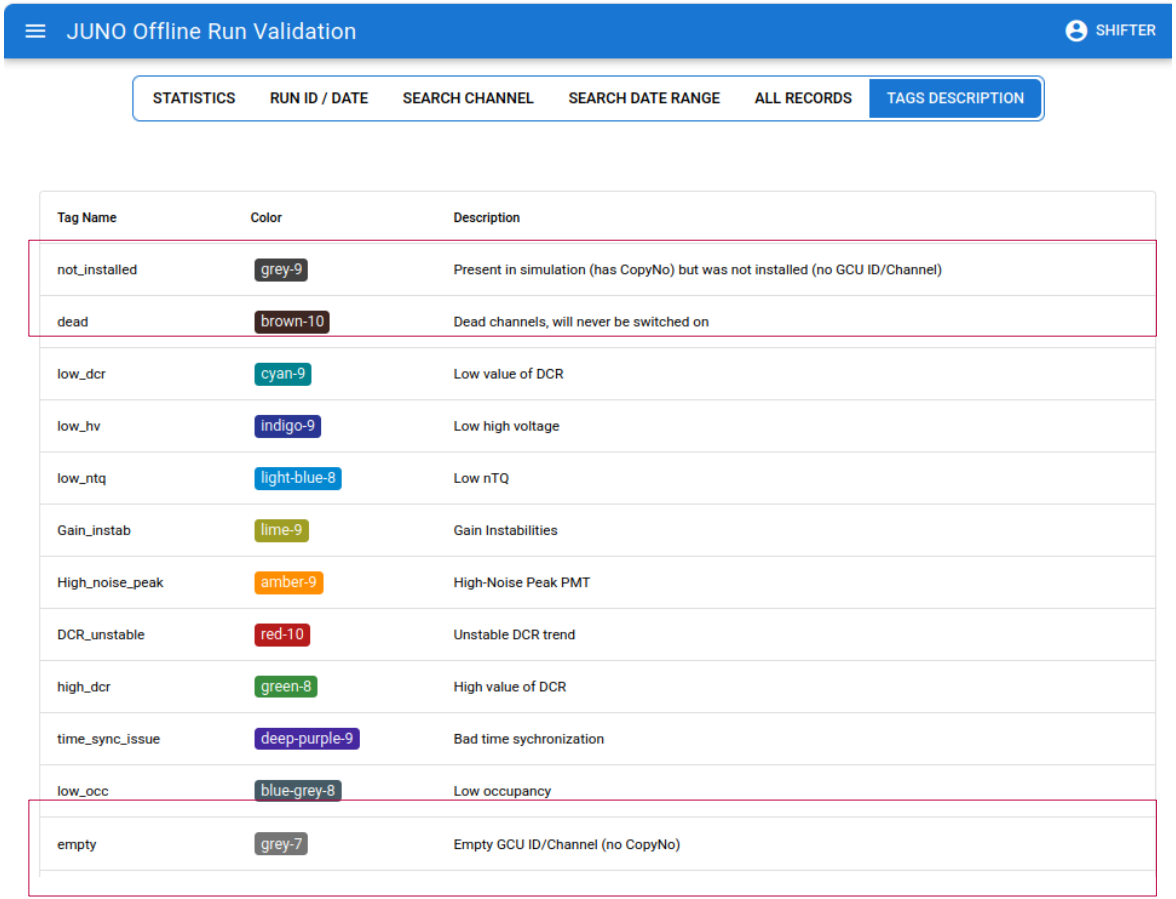
III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: CQ



Tag Name	Color	Description
not_installed	grey-9	Present in simulation (has CopyNo) but was not installed (no GCU ID/Channel)
dead	brown-10	Dead channels, will never be switched on
low_dcr	cyan-9	Low value of DCR
low_hv	indigo-9	Low high voltage
low_ntq	light-blue-8	Low nTQ
Gain_instab	lime-9	Gain Instabilities
High_noise_peak	amber-9	High-Noise Peak PMT
DCR_unstable	red-10	Unstable DCR trend
high_dcr	green-8	High value of DCR
time_sync_issue	deep-purple-9	Bad time sychronization
low_occ	blue-grey-8	Low occupancy
empty	grey-7	Empty GCU ID/Channel (no CopyNo)

https://juno-dq.jinr.ru/

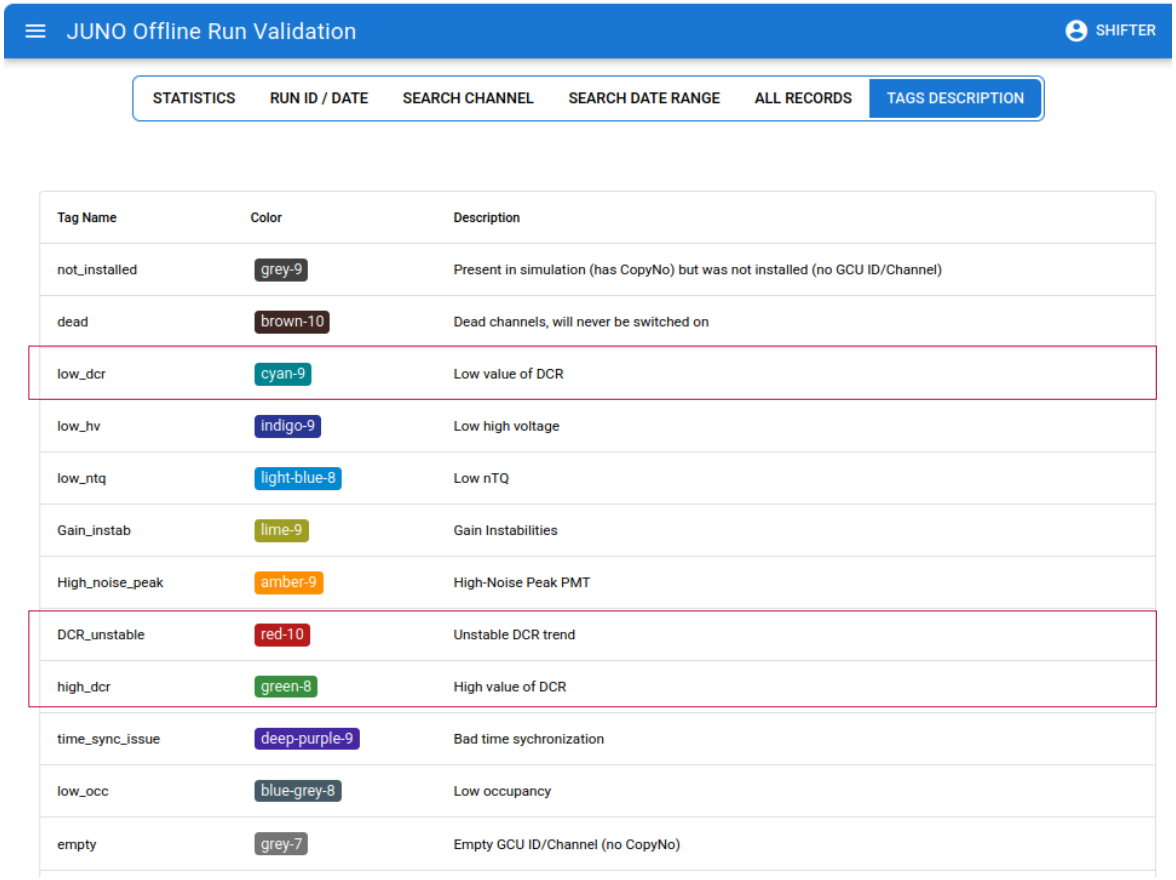
III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: CQ



Tag Name	Color	Description
not_installed	grey-9	Present in simulation (has CopyNo) but was not installed (no GCU ID/Channel)
dead	brown-10	Dead channels, will never be switched on
low_dcr	cyan-9	Low value of DCR
low_hv	indigo-9	Low high voltage
low_ntq	light-blue-8	Low nTQ
Gain_instab	lime-9	Gain Instabilities
High_noise_peak	amber-9	High-Noise Peak PMT
DCR_unstable	red-10	Unstable DCR trend
high_dcr	green-8	High value of DCR
time_sync_issue	deep-purple-9	Bad time sychronization
low_occ	blue-grey-8	Low occupancy
empty	grey-7	Empty GCU ID/Channel (no CopyNo)

not_installed: 16
empty: 43
Dead: 26 (< 0.2%)

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: CQ



Tag Name	Color	Description
not_installed	grey-9	Present in simulation (has CopyNo) but was not installed (no GCU ID/Channel)
dead	brown-10	Dead channels, will never be switched on
low_dcr	cyan-9	Low value of DCR
low_hv	indigo-9	Low high voltage
low_ntq	light-blue-8	Low nTQ
Gain_instab	lime-9	Gain Instabilities
High_noise_peak	amber-9	High-Noise Peak PMT
DCR_unstable	red-10	Unstable DCR trend
high_dcr	green-8	High value of DCR
time_sync_issue	deep-purple-9	Bad time sychronization
low_occ	blue-grey-8	Low occupancy
empty	grey-7	Empty GCU ID/Channel (no CopyNo)

low_dcr
high_dcr
DCR_unstable

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: CQ

JUNO Offline Run Validation — SHIFTER

STATISTICS | RUN ID / DATE | SEARCH CHANNEL | SEARCH DATE RANGE | ALL RECORDS | TAGS DESCRIPTION

Tag Name	Color	Description
not_installed	grey-9	Present in simulation (has CopyNo) but was not installed (no GCU ID/Channel)
dead	brown-10	Dead channels, will never be switched on
low_dcr	cyan-9	Low value of DCR
low_hv	indigo-9	Low high voltage
low_ntq	light-blue-8	Low nTQ
Gain_instab	lime-9	Gain Instabilities
High_noise_peak	amber-9	High-Noise Peak PMT
DCR_unstable	red-10	Unstable DCR trend
high_dcr	green-8	High value of DCR
time_sync_issue	deep-purple-9	Bad time sychronization
low_occ	blue-grey-8	Low occupancy
empty	grey-7	Empty GCU ID/Channel (no CopyNo)

low_hv:

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: CQ

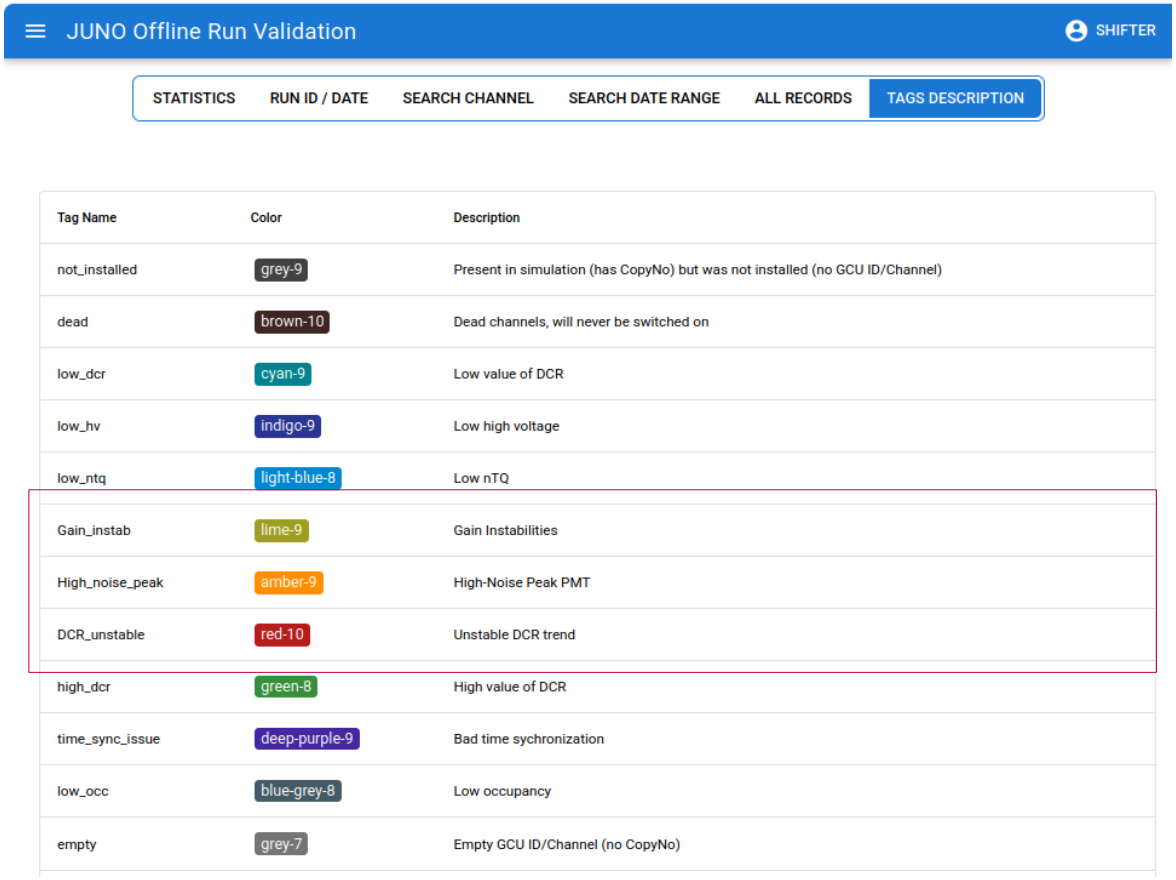
JUNO Offline Run Validation — SHIFTER

STATISTICS | RUN ID / DATE | SEARCH CHANNEL | SEARCH DATE RANGE | ALL RECORDS | TAGS DESCRIPTION

Tag Name	Color	Description
not_installed	grey-9	Present in simulation (has CopyNo) but was not installed (no GCU ID/Channel)
dead	brown-10	Dead channels, will never be switched on
low_dcr	cyan-9	Low value of DCR
low_hv	indigo-9	Low high voltage
low_ntq	light-blue-8	Low nTQ
Gain_instab	lime-9	Gain Instabilities
High_noise_peak	amber-9	High-Noise Peak PMT
DCR_unstable	red-10	Unstable DCR trend
high_dcr	green-8	High value of DCR
time_sync_issue	deep-purple-9	Bad time sychronization
low_occ	blue-grey-8	Low occupancy
empty	grey-7	Empty GCU ID/Channel (no CopyNo)

low_nTQ
low_occ

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: CQ



Tag Name	Color	Description
not_installed	grey-9	Present in simulation (has CopyNo) but was not installed (no GCU ID/Channel)
dead	brown-10	Dead channels, will never be switched on
low_dcr	cyan-9	Low value of DCR
low_hv	indigo-9	Low high voltage
low_ntq	light-blue-8	Low nTQ
Gain_instab	lime-9	Gain Instabilities
High_noise_peak	amber-9	High-Noise Peak PMT
DCR_unstable	red-10	Unstable DCR trend
high_dcr	green-8	High value of DCR
time_sync_issue	deep-purple-9	Bad time sychronization
low_occ	blue-grey-8	Low occupancy
empty	grey-7	Empty GCU ID/Channel (no CopyNo)

Gain_instab
High_noise_peak
DCR_unstable

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: CQ

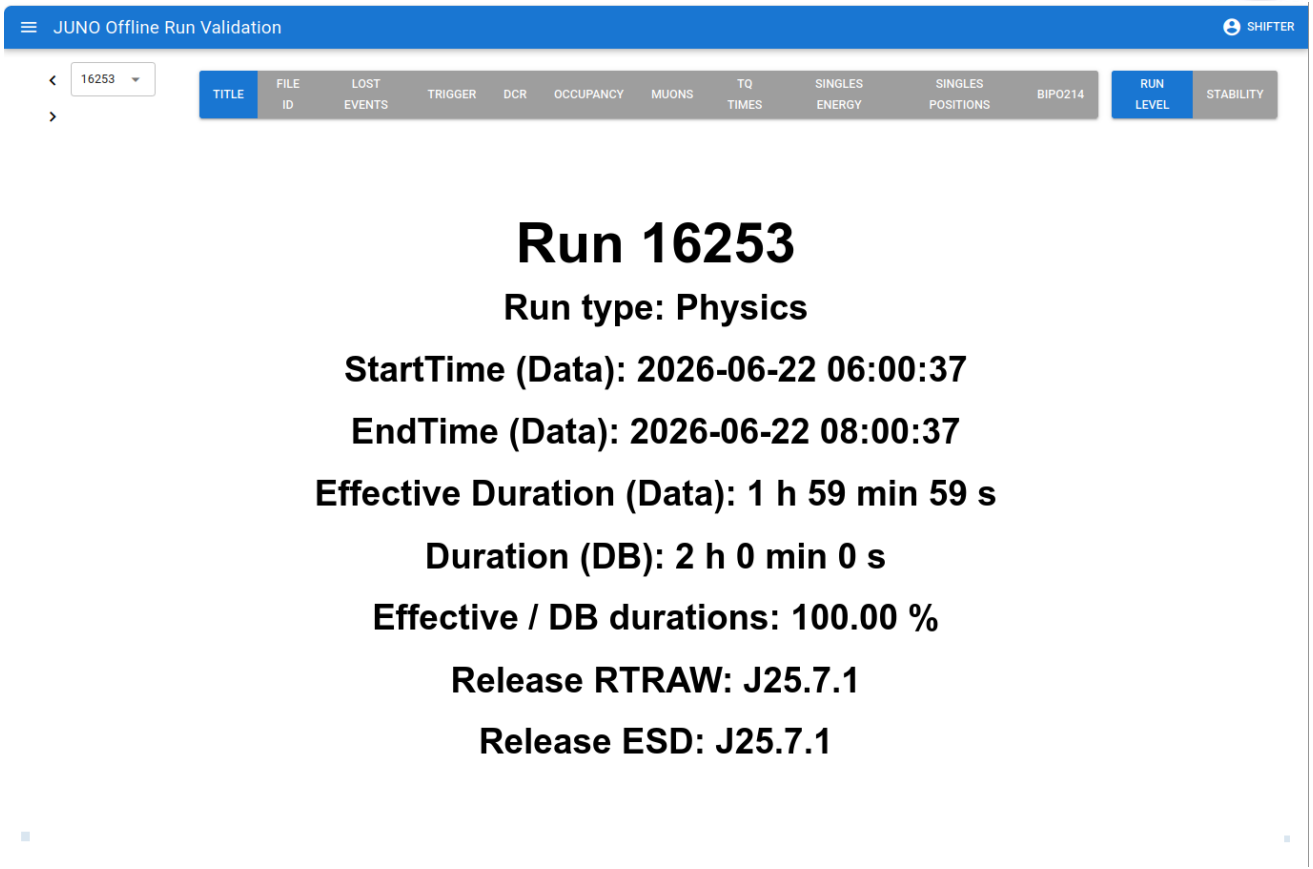
JUNO Offline Run Validation — SHIFTER

STATISTICS | RUN ID / DATE | SEARCH CHANNEL | SEARCH DATE RANGE | ALL RECORDS | TAGS DESCRIPTION

Tag Name	Color	Description
not_installed	grey-9	Present in simulation (has CopyNo) but was not installed (no GCU ID/Channel)
dead	brown-10	Dead channels, will never be switched on
low_dcr	cyan-9	Low value of DCR
low_hv	indigo-9	Low high voltage
low_ntq	light-blue-8	Low nTQ
Gain_instab	lime-9	Gain Instabilities
High_noise_peak	amber-9	High-Noise Peak PMT
DCR_unstable	red-10	Unstable DCR trend
high_dcr	green-8	High value of DCR
time_sync_issue	deep-purple-9	Bad time sychronization
low_occ	blue-grey-8	Low occupancy
empty	grey-7	Empty GCU ID/Channel (no CopyNo)

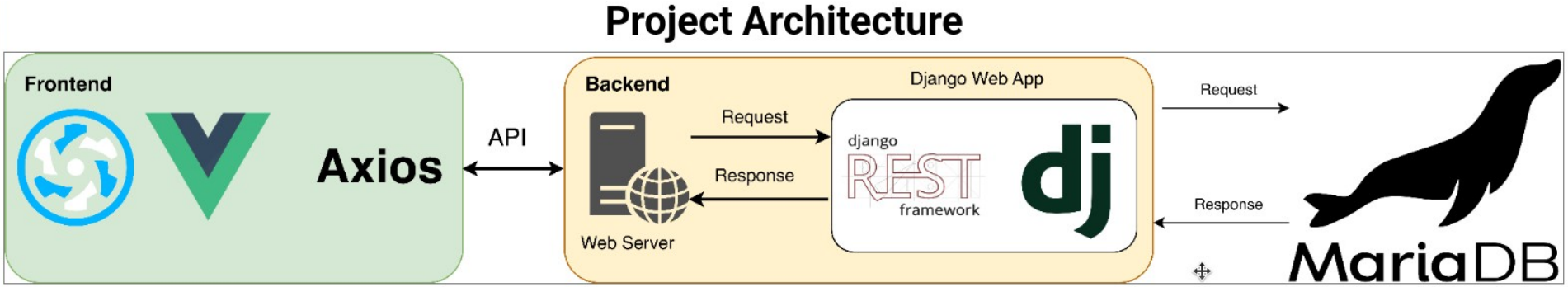
time_sync_issue

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: RV



https://juno-dq.jinr.ru/

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO



Project Architecture Diagram

Frontend:
Framework – Vue 3
UI-components – Quasar
API – Axios

Backend:
Web Server – NGINX
Backend – Django
API – Django Rest Framework

III Мониторинг и контроль качества данных в JUNO: 3 этап

Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова

Объединенный институт ядерных исследований

Offline Data Monitoring

NAVIGATION

- Run List
- Dashboards
- Channel Quality
  - Statistics
  - Channel History
  - PMT Info
  - Not Installed Channels
  - Tags Description
- File Quality
- Stability
- Log
- Profile
- Help
- About

Channel Quality Statistics

Total problem channels and per-tag counts by run.

Good Run List Version: Phase1 | Runs to Draw: Latest 1000 | Location: CD | Type: Dynode, MCP | Excluded Runs: 10001,10005-10008 | Apply



Run ID | Date & Time

Page 1 of 6 · 100 of 578 runs

Previous | Runs shown | 100 / page | Next

Run ID	Time Stamp	Total	DCR_unstable	Gain_instab	high_dcr	High_noise_peak	low_dcr	low_hv	low_ntq	time_sync_issue
11038	2025-11-02 20:00	586	7	5	0	29	545	545	545	6
11037	2025-11-02 18:00	586	7	5	0	29	546	544	541	6
11036	2025-11-02 16:00	582	7	5	0	29	542	540	536	6
11035	2025-11-02 14:00	577	7	5	0	29	537	535	534	6
11034	2025-11-02 12:02	575	7	5	0	29	535	533	534	6
11033	2025-11-02 10:00	574	7	5	1	29	532	533	531	6

Резюме

~ нейтринные эксперименты с использованием фотоумножителей проводятся уже более 70 лет;

~ Опыт использования и техническое улучшение переходят из эксперимента в эксперимент;

~ энергетическое разрешение эксперимента JUNO напрямую зависит от степени покрытия фотоумножителями и их технических характеристик;

~ изучение качества каналов фотоумножителей JUNO – это основа хорошего физического анализа и получения передовых результатов;

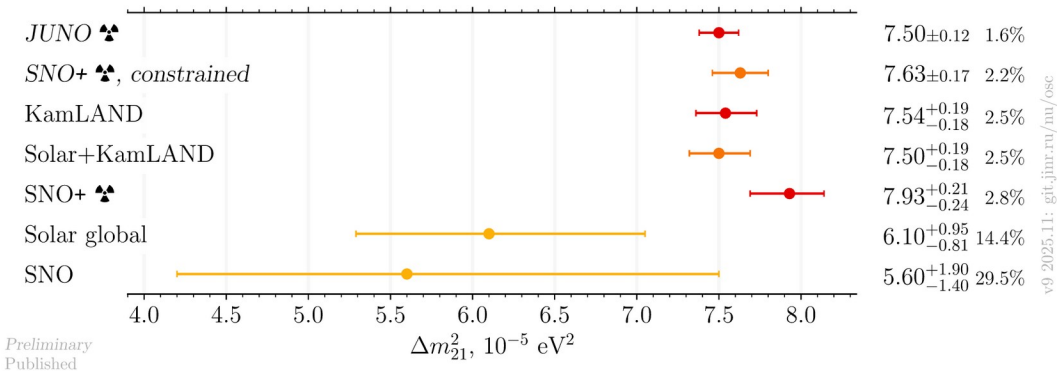
~ Data Quality Group прошла уже 2 этапа разработки инструментов наблюдения и коррекции качества данных и выходит на заключительный;

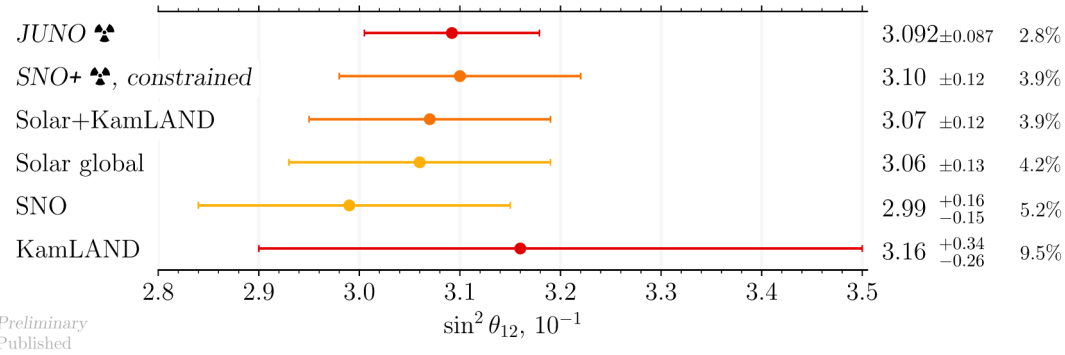
~ В планах: полный cross check качества каналов, добавление sPMT

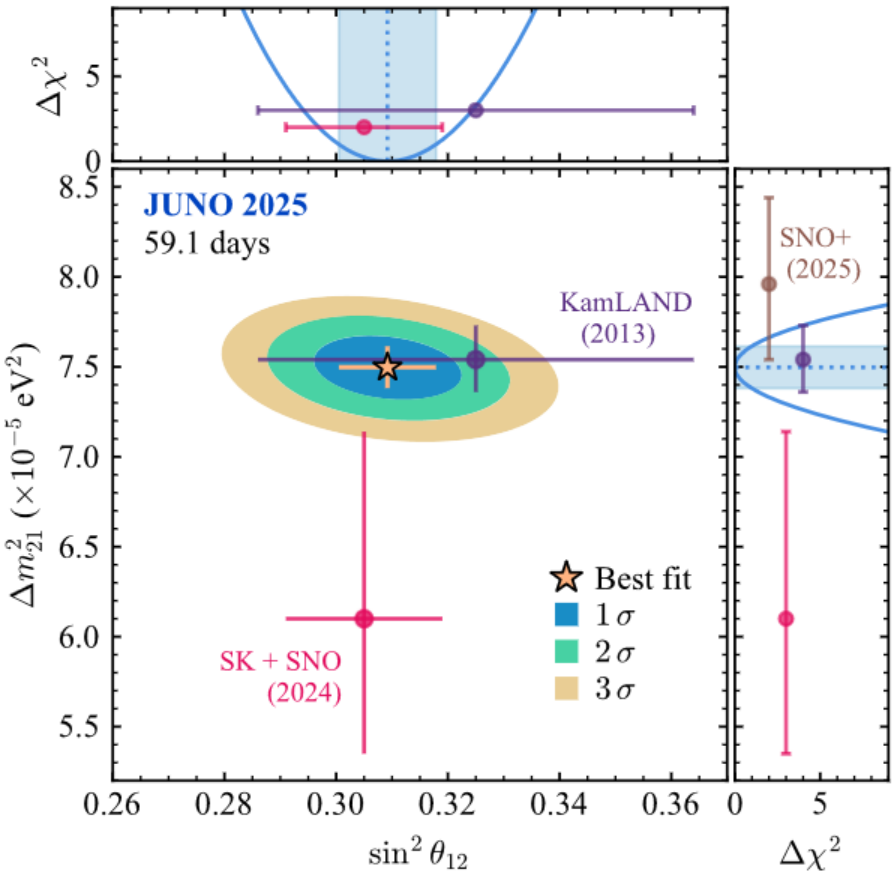
Backup

I Нейтринные эксперименты, использующие ФЭУ: JUNO








JUNO 2025
59.1 days
KamLAND
(2013)
SNO+
(2025)
SK + SNO
(2024)
Best fit
1 σ
2 σ
3 σ
Δχ²
Δm²₂₁ (×10⁻⁵ eV²)
sin² θ₁₂
8.5
8.0
7.5
7.0
6.5
6.0
5.5
0.26
0.28
0.30
0.32
0.34
0.36
0
5

Energy response: scintillator non-linearity

- Sources of non-linearity:
  - Quenching effects
  - Cherenkov radiation contribution
- Energy non-linearity control within ~1% level
  - Model agrees well with calibration data and cosmogenic ^{12}B and ^{11}C

Energy non-linearity at detector center

