Временна́я калибровка нейтринного телескопа Baikal-GVD с помощью атмосферных мюонов

BAIKAL-GVD

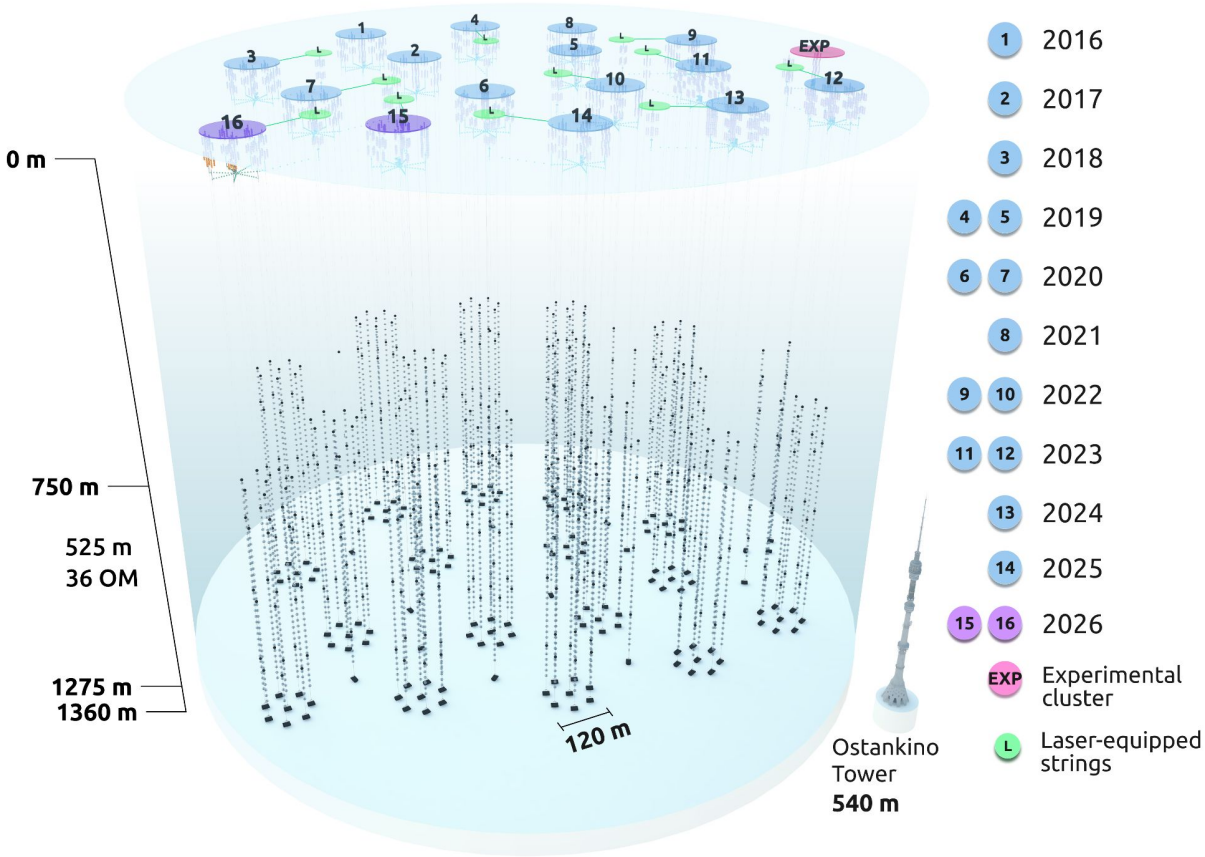
Сиренко Анна

от имени коллаборации Baikal-GVD

Дубна, 03.07.2026

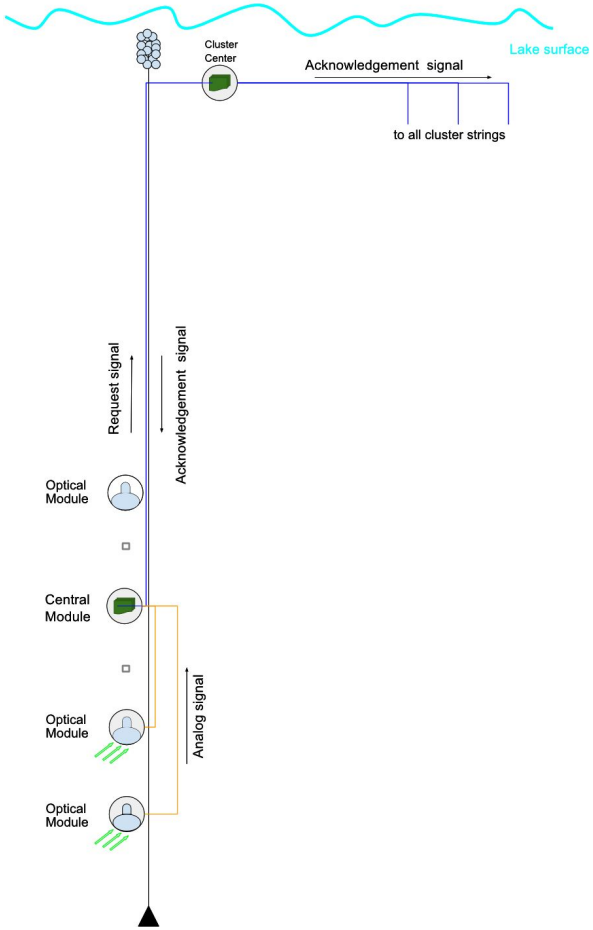
ВККЛ 2026

Нейтринный телескоп Baikal-GVD

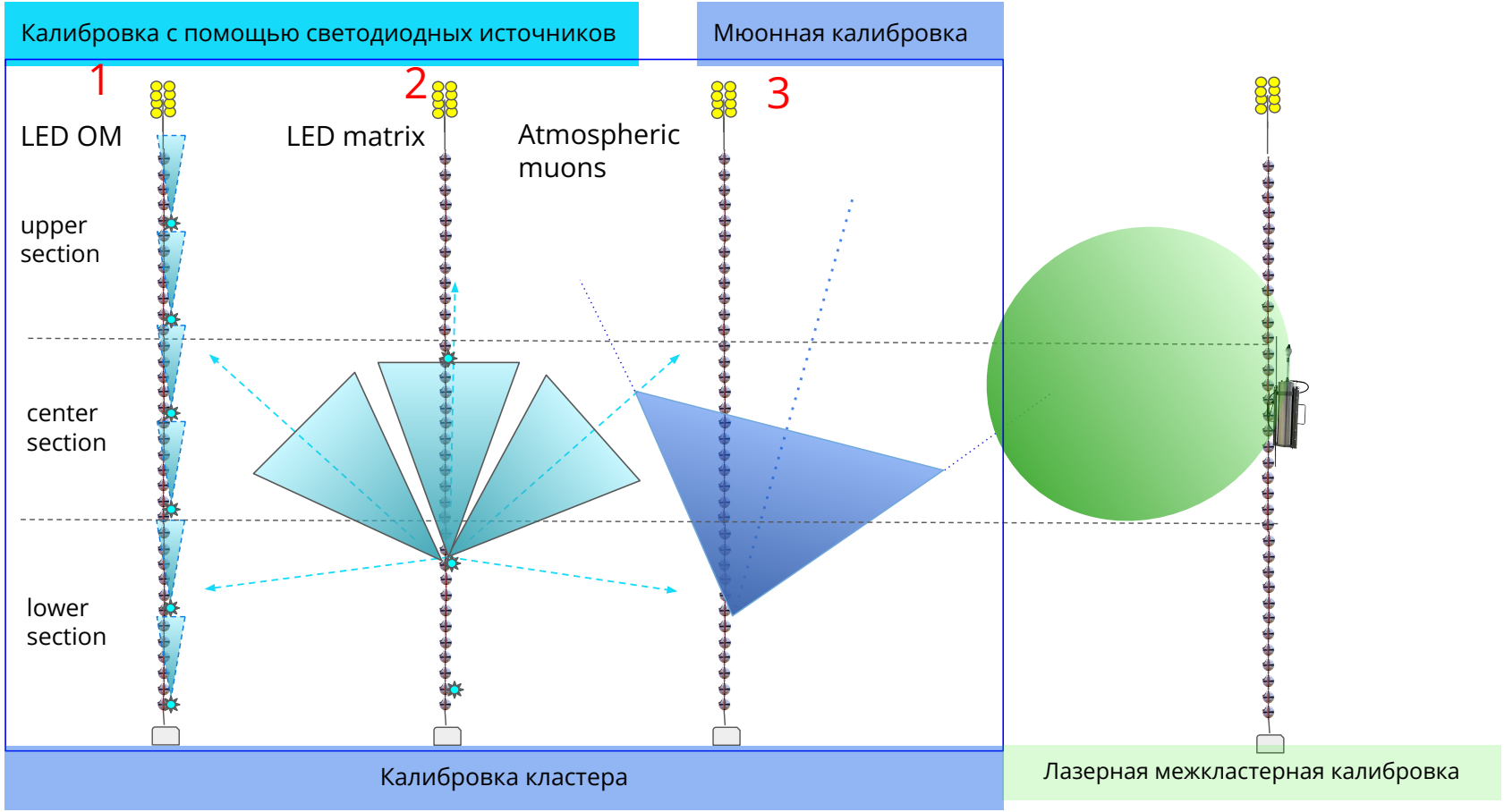


Временны́е смещения между каналами детектора

- Временны́е смещения между каналами одной секции обусловлены:
  - Задержками ФЭУ
  - Задержками кабеля между оптическим модулем и центральным модулем секции
- Временные смещения между каналами разных секций возникают преимущественно из-за различных длин кабелей между центральным модулем секции и центром кластера.
- Для синхронизации работы каналов детектора требуется процедура, называемая ***временно́й калибровкой***.



Временная калибровка Baikal-GVD



Процедура мюонной калибровки

Реконструкция мюонного трека:

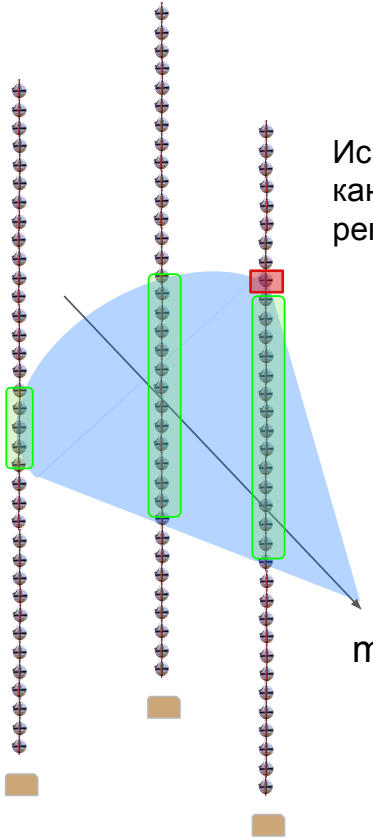
Allakhverdyan V. A. et al. Measuring muon tracks in Baikal-GVD using a fast reconstruction algorithm //The European Physical Journal C. – 2021. – Т. 81. – №. 11. – С. 1025. https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09825-y

Allakhverdyan V. A. et al. Muon Track Reconstruction Procedures at the Baikal-GVD Neutrino Telescope //Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Т. 88. – №. Suppl 4. – С. S401-S407. https://doi.org/10.48550/arXiv.2605.06428

$$Q(\mathbf{v},\mathbf{x},t)=\sum_i\left(\frac{(t_i-t_{\mathrm{th}}(\mathbf{v},\mathbf{x},t))^2}{\sigma^2}+w(N_{\mathrm{hits}},q_{\mathrm{sum}})f(q_i)g(r_i)\right)$$

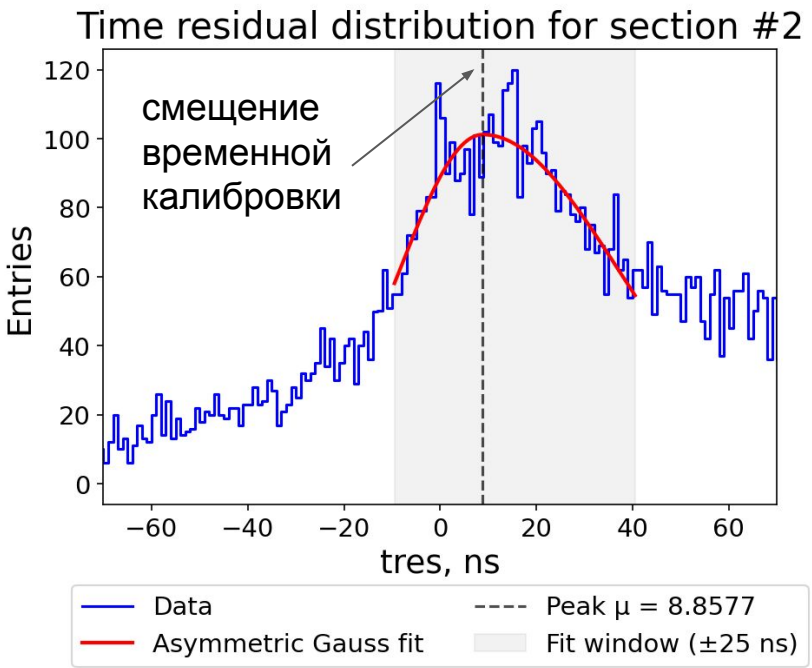
Критерии отбора:

1. Восстановление успешно (ковариационная матрица полная и достоверная)
2. Расстояние от канала до трека менее 40 м
3. Q/ndf < 50

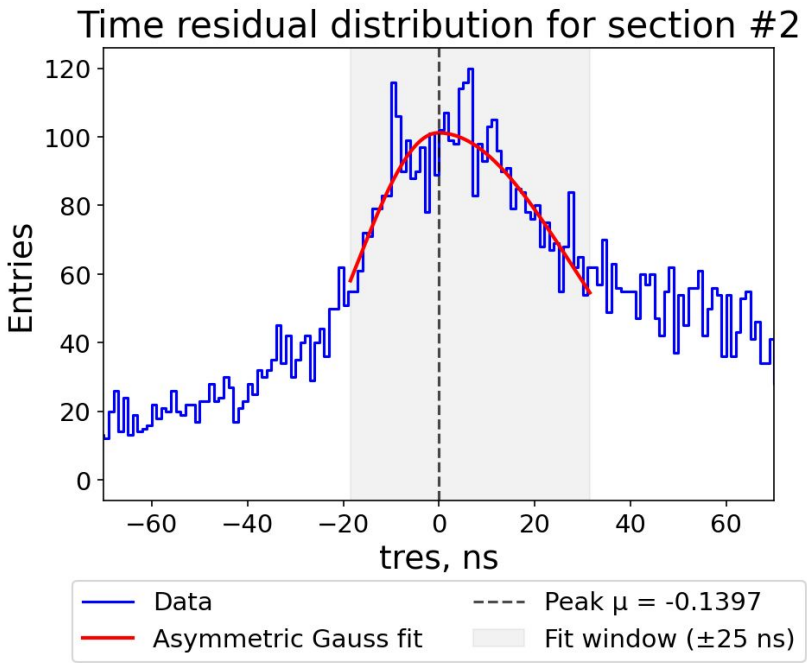


$t_{res} = t_{hit} - t_{light_from_track}$

Тест процедуры на модельных данных



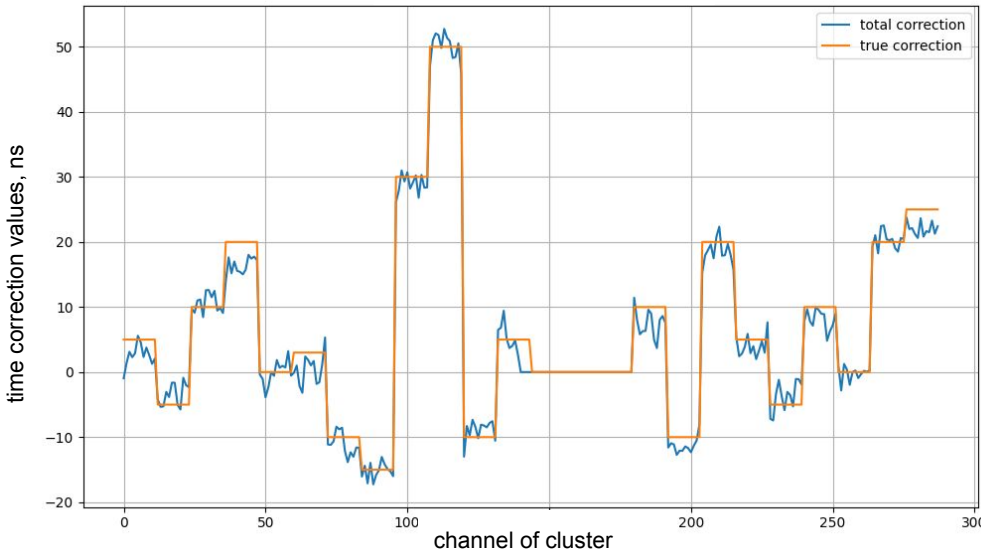
Распределение остаточных значений секции #2 с предварительно внесенным смещением 10 нс до мюонной калибровки



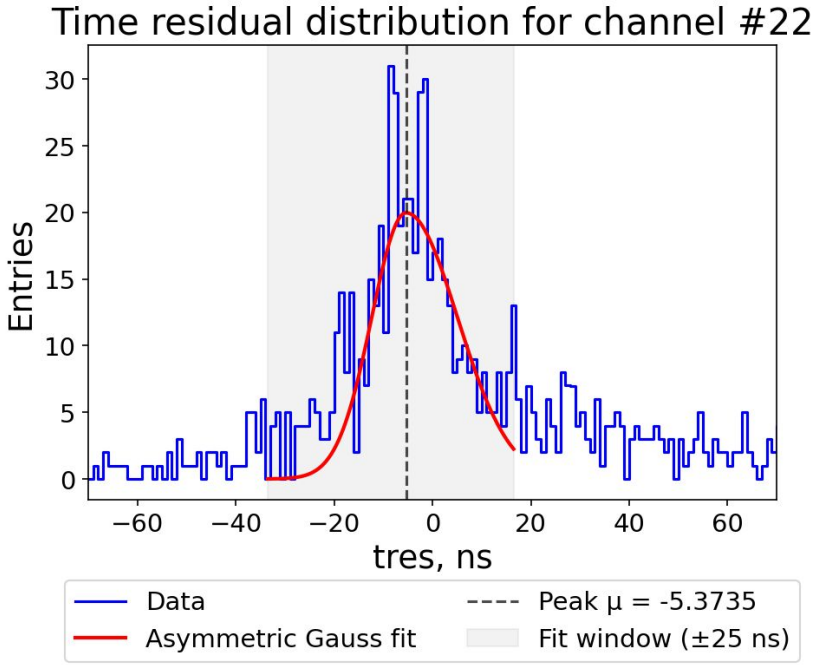
Распределение остаточных значений секции #2 с после 3-х итераций мюонной калибровки

Тест процедуры на модельных данных

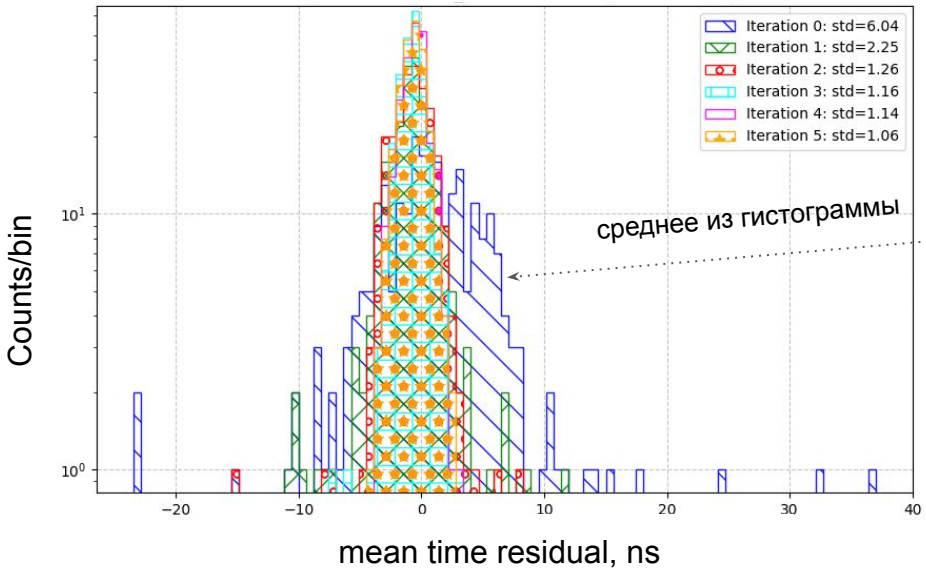
Значения временных поправок для каналов кластера после корректировок межсекционных временных задержек.

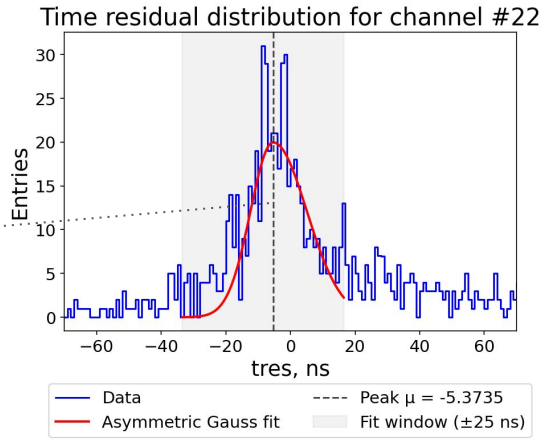


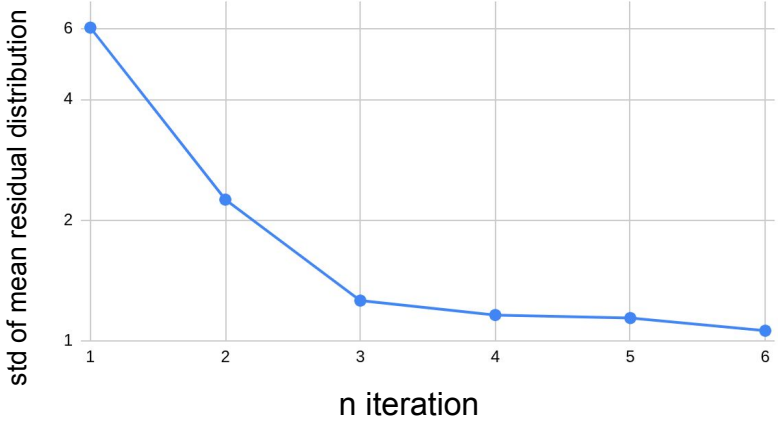
Оценивается временное смещение для каждого канала по отдельности.



Сходимость метода на модельных данных



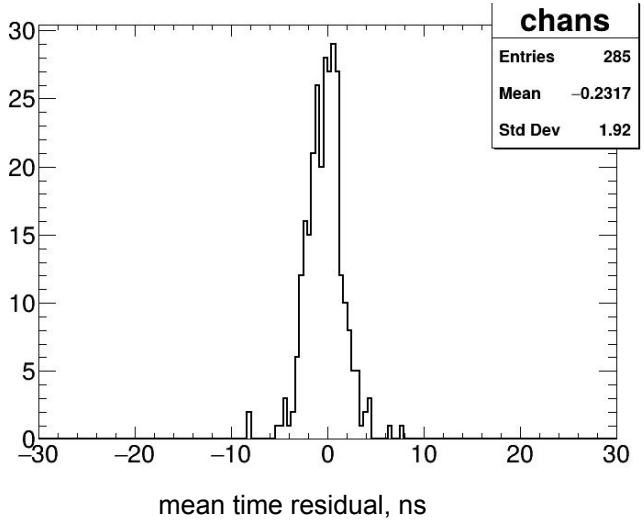




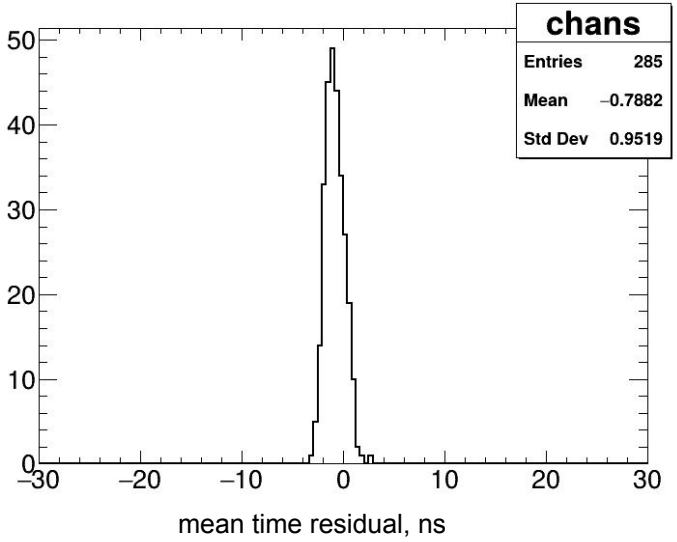
Калибровка считается успешной при ширине распределения 1 нс.

Результаты для экспериментальных данных

До

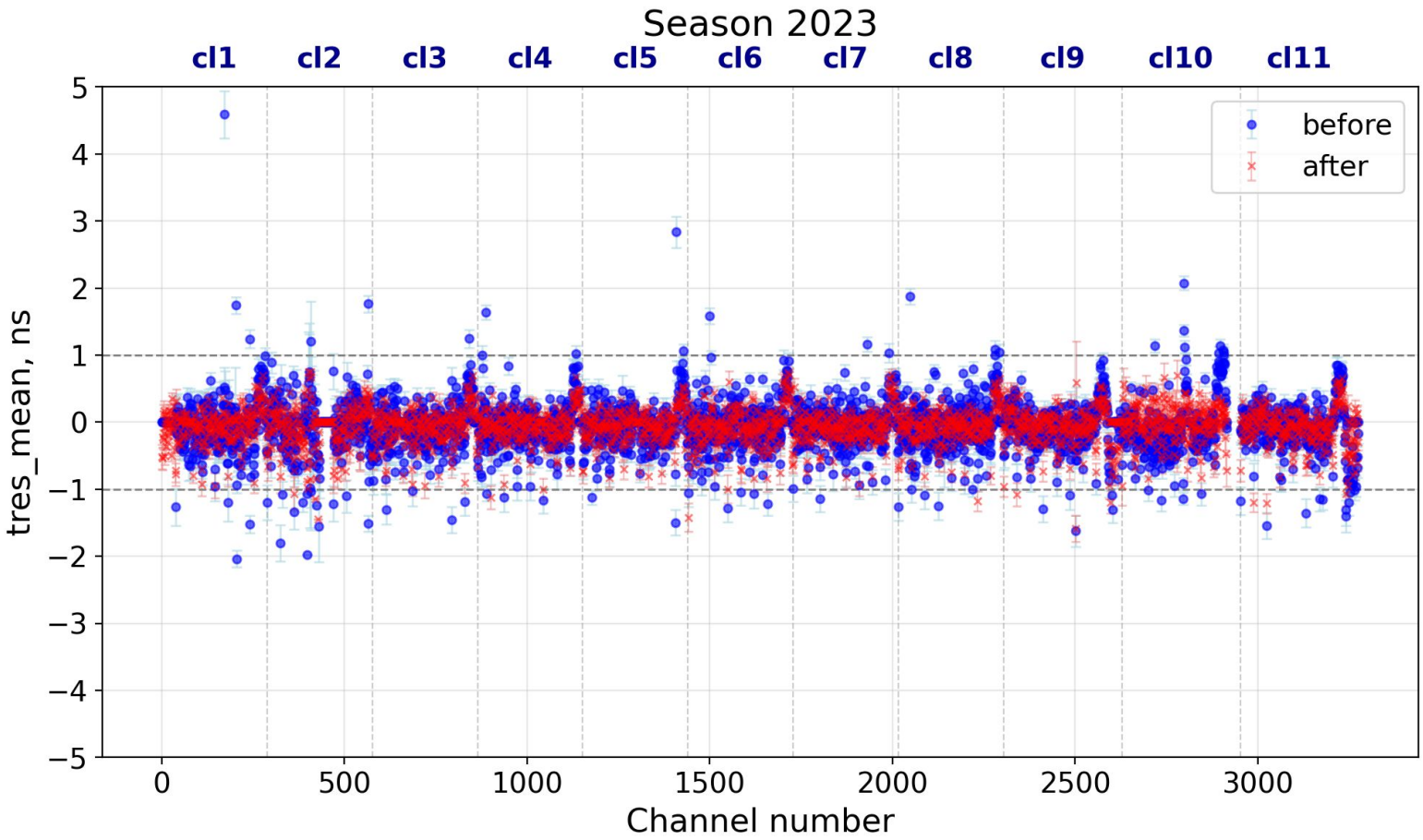


После



- Для отработки методики использовались данные сезонов 2020-2023, период измерений май-июнь - стабильная геометрия детектора и относительно низкий темп счета шумов.
- Проведена валидация координат каналов, достигнута требуемая точность позиционирования ~20 см.

Остаточные значения реконструкции мюонных треков до и после мюонной калибровки



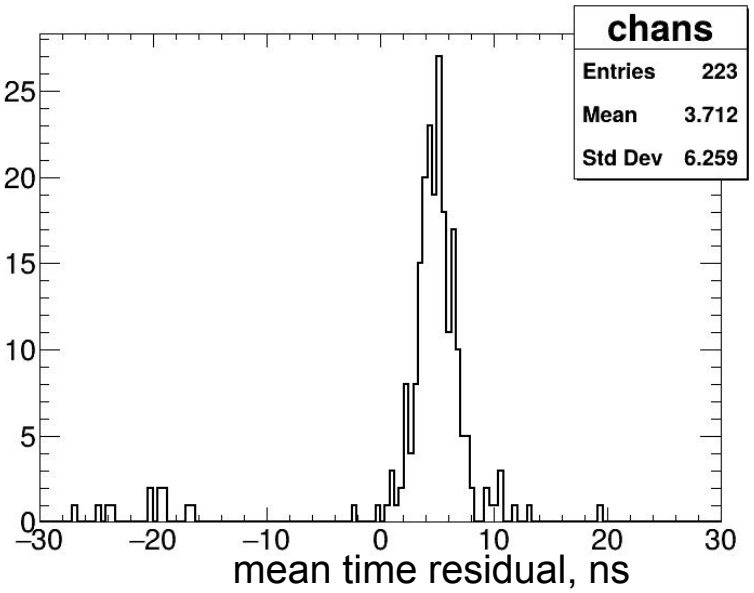
Заключение

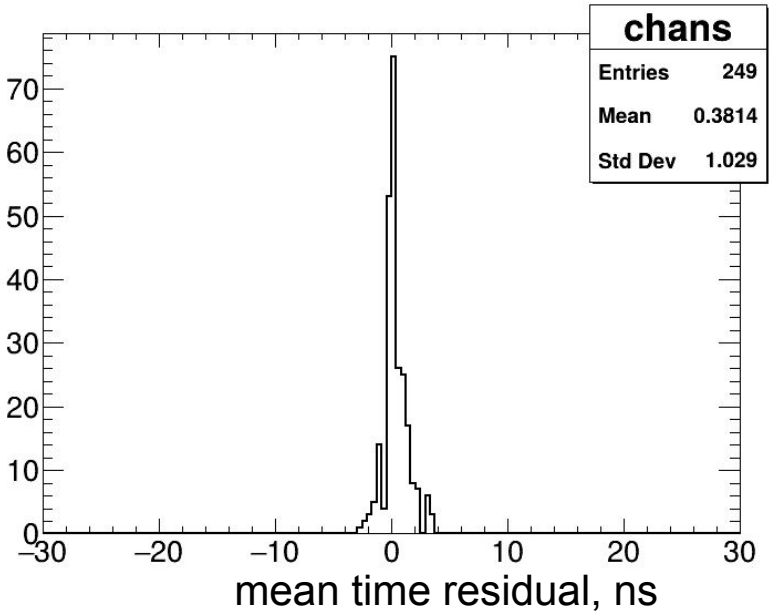
1. Разработана методика калибровки задержек измерительных каналов Baikal-GVD с помощью атмосферных мюонов.
2. Ширина распределений остаточных значений для данных, набранных с 2020 по 2023 год, сходится к ~1 нс, указывая на высокую достигнутую точность калибровки.
3. Полученные калибровочные таблицы подготовлены для использования в штатной обработке экспериментальных данных

Спасибо за внимание!

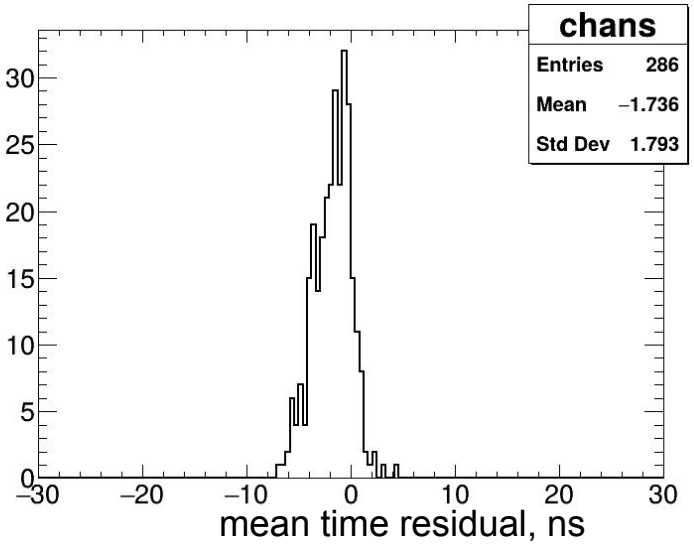
BACKUP

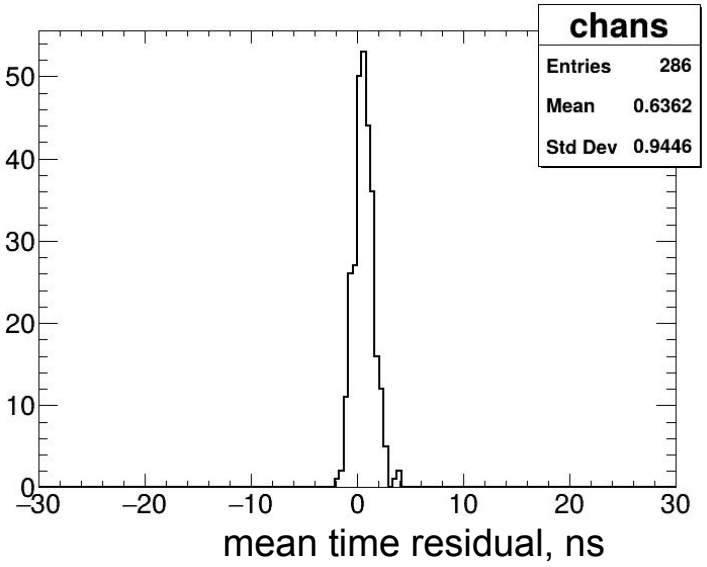
Exp 2020


chans
Entries 223
Mean 3.712
Std Dev 6.259
mean time residual, ns

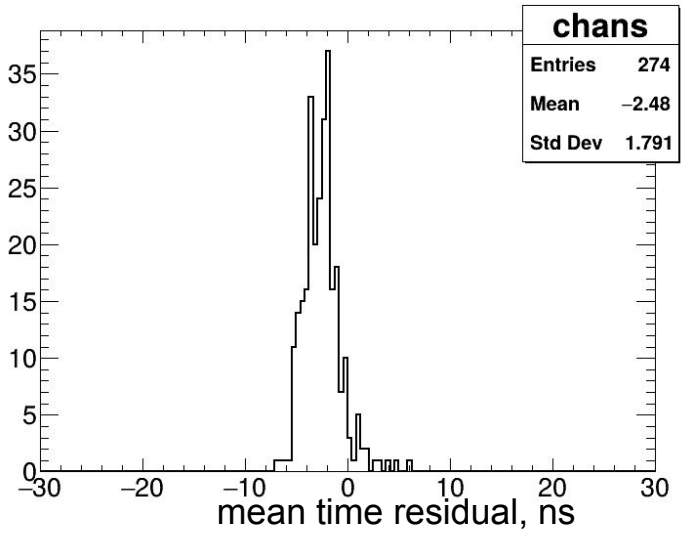

chans
Entries 249
Mean 0.3814
Std Dev 1.029
mean time residual, ns

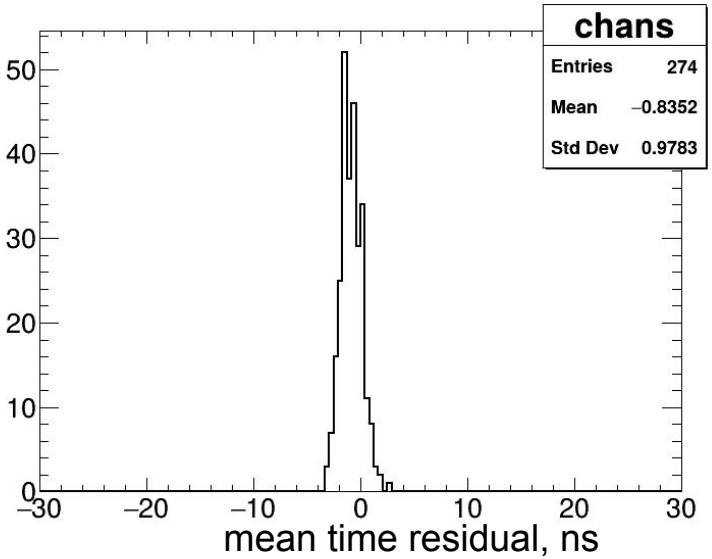
Exp 2022

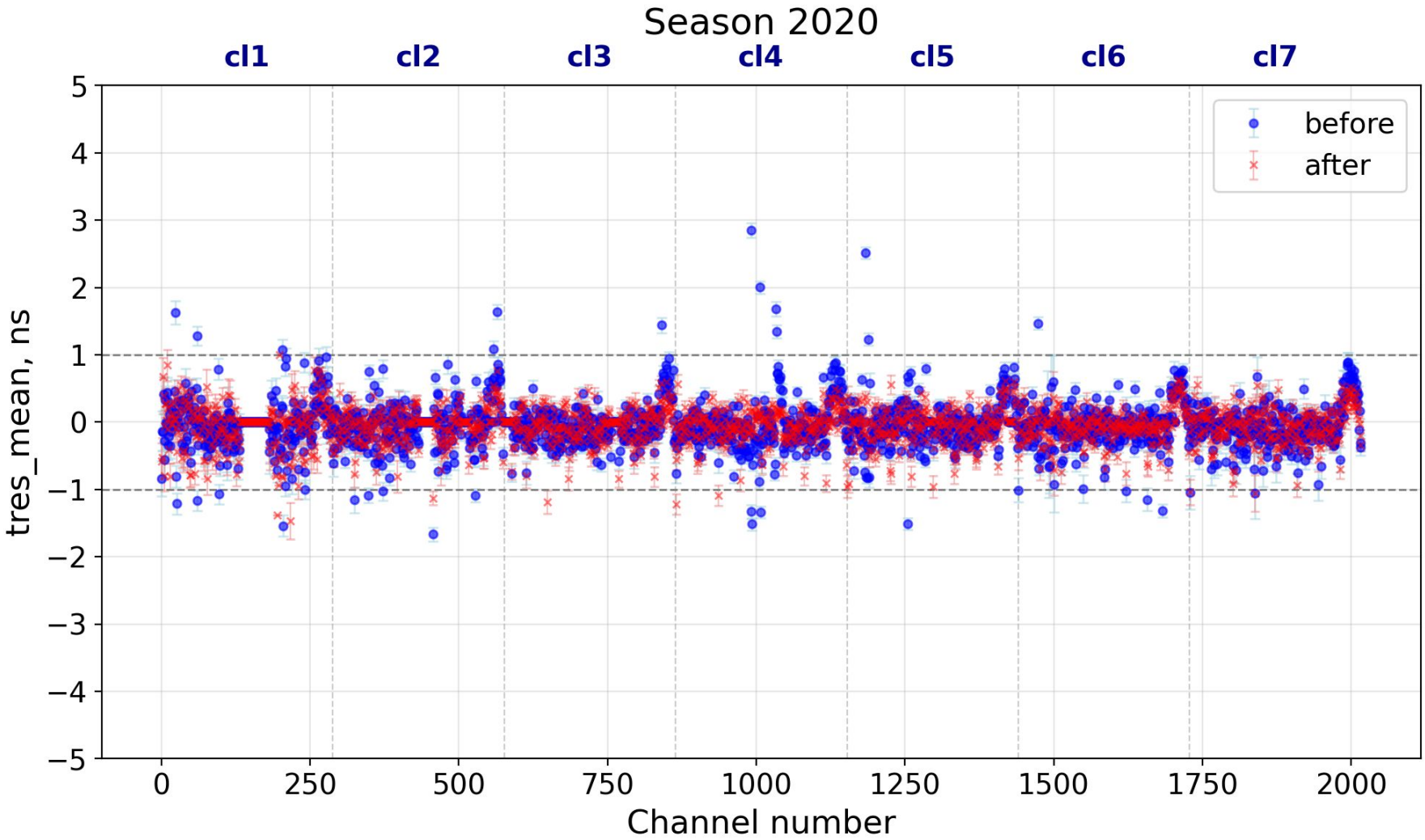

chans
Entries 286
Mean −1.736
Std Dev 1.793
mean time residual, ns

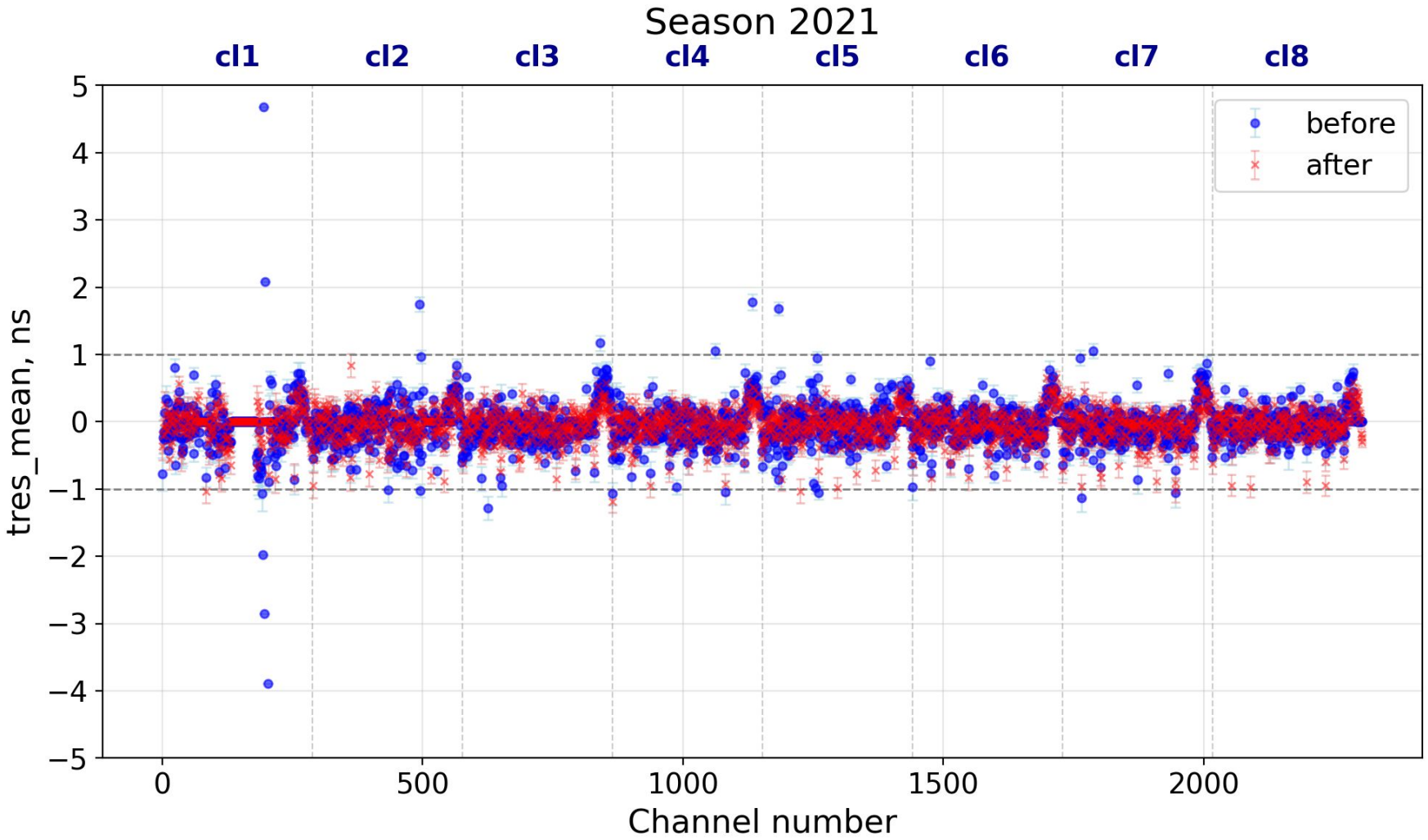

chans
Entries 286
Mean 0.6362
Std Dev 0.9446
mean time residual, ns

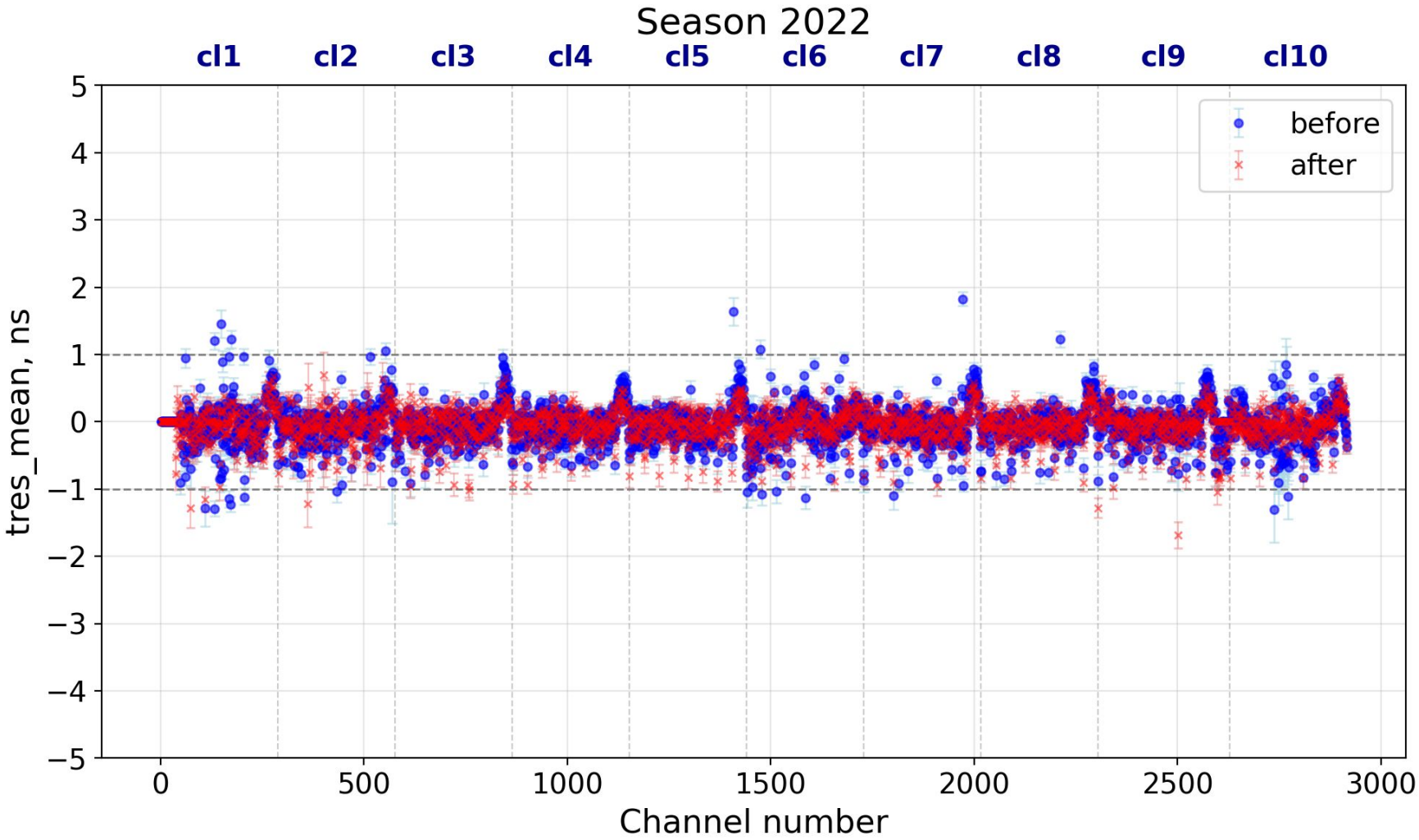
Exp 2023


chans
Entries 274
Mean −2.48
Std Dev 1.791
35
30
25
20
15
10
5
0
−30
−20
−10
0
10
20
30
mean time residual, ns


chans
Entries 274
Mean −0.8352
Std Dev 0.9783
50
40
30
20
10
0
−30
−20
−10
0
10
20
30
mean time residual, ns


Season 2020
cl1
cl2
cl3
cl4
cl5
cl6
cl7
before
after
tres_mean, ns
Channel number
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
0
250
500
750
1000
1250
1500
1750
2000


Season 2021
cl1
cl2
cl3
cl4
cl5
cl6
cl7
cl8
before
after
tres_mean, ns
Channel number
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
0
500
1000
1500
2000


Season 2022
cl1
cl2
cl3
cl4
cl5
cl6
cl7
cl8
cl9
cl10
before
after
tres_mean, ns
Channel number
5
4
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
0
500
1000
1500
2000
2500
3000