

Статус ускорителя

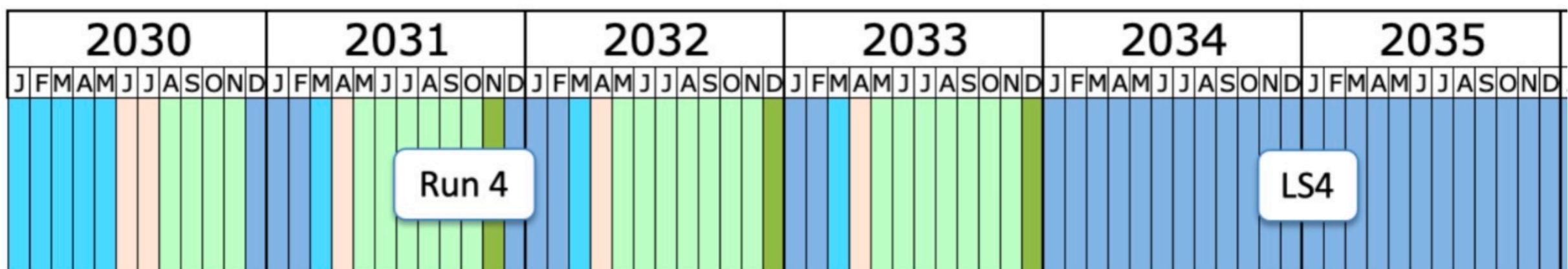
Анатолий Егоров

Научная Сессия ОФВЭ НИЦ "Курчатовский Институт" - ПИЯФ

24 декабря 2025

Введение

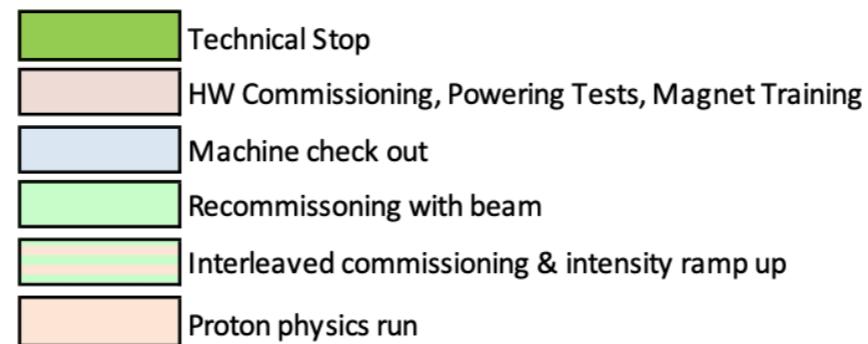
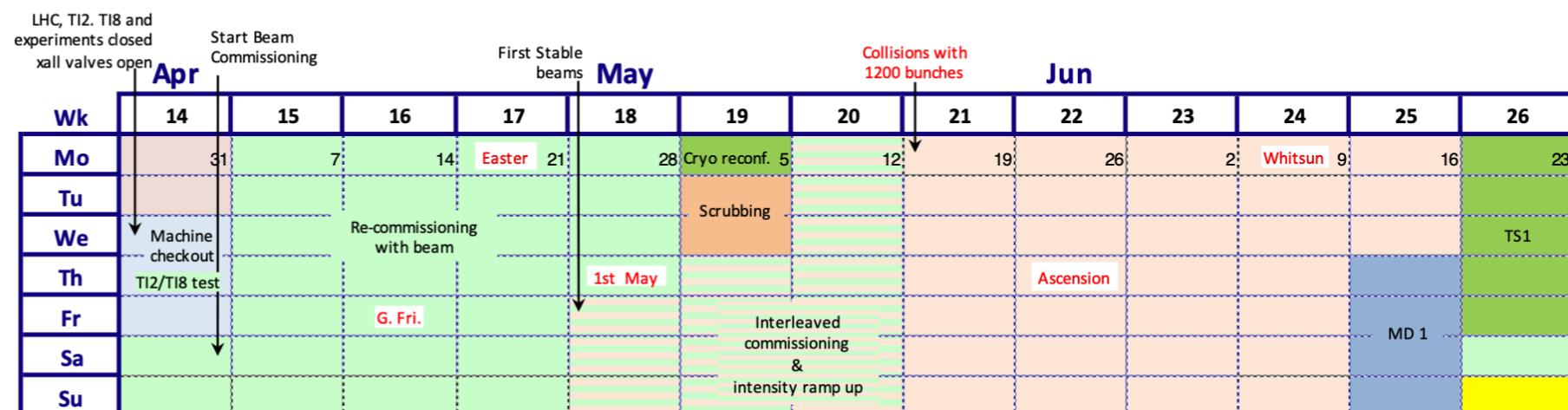
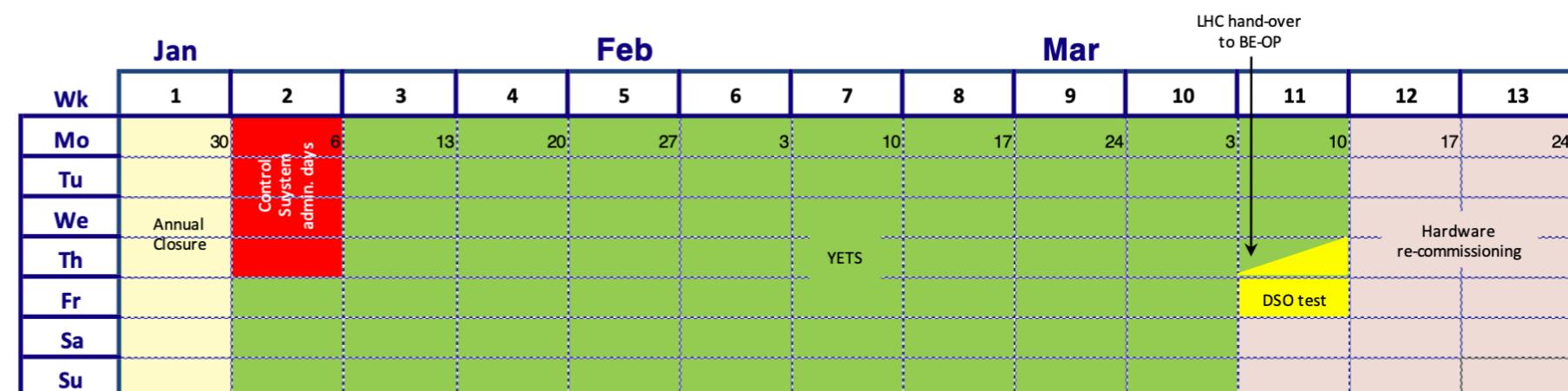
- 2025 Run III - предпоследний год и последний полный год набора данных
- 2026 Run III - набор данных закончится в Июне
- LHC "вернется" в 2030 в Run IV уже как HL-LHC (High Luminosity - LHC)
- Run 4 запланирован на 2030-2033 (4 года)
- В этом докладе дан краткий обзор работы LHC за 2025, план на 2026 и перспективы





Расписание LHC 2025 (1)

- Стабильный pp пучок (2 Мая)
- Протонный сеанс (19 Мая - 18 -Июня)



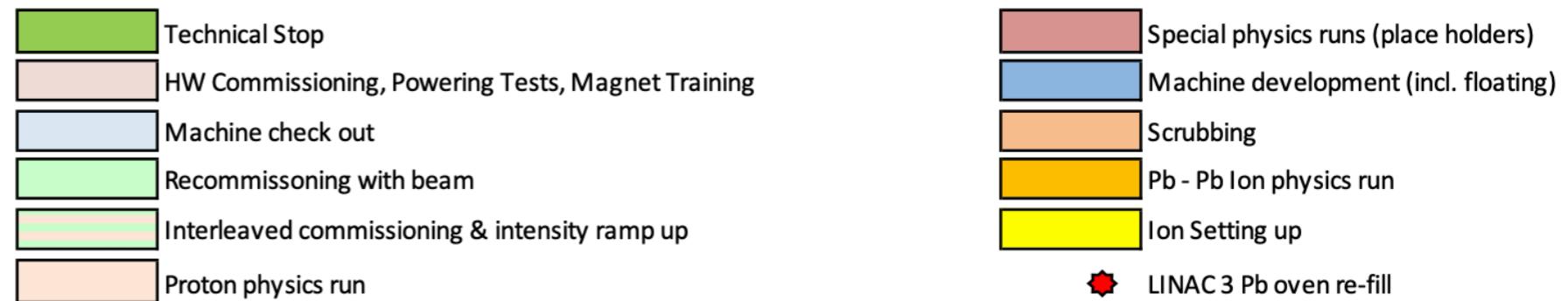


Расписание LHC 2025 (2)

- O-O, p-O (4 - 7 Июля)
- Ne-Ne (8 Июля)
- pp (13 Июля - 4 Ноября)
- PbPb (15 Ноября - 8 Декабря)

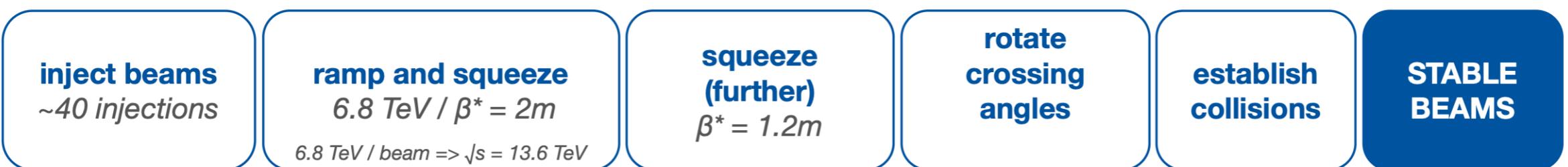
	Jul						Aug						Sep					
Wk	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39					
Mo	30	7	14	21	28	4	11	18	25	1	8	15	22					
Tu	O ion setting up	Ne-Ne run																
We		ZDCs out																
Th	MD 1b	VdM program												MD 2		Jeune G.		
Fr																		
Sa	O-O & p-O Ions run																	
Su																		

	Oct						Nov						Dec					
Wk	40	41	42	43	44	45		46	47	48	49		50	51	52			
Mo	29	6	13	20	27	3		10	17	24	1		8	15	22			
Tu		MD 3						TS2										
We													MD 5a			Annual Closure		
Th			◆				MD 4	Pb Ion setting up					Pb- Pb Ion run			Control System admin days	YETS	
Fr																Xmas		
Sa							Pb Ion setting up										Xmas	
Su													MD 5b					



2025 Протонный сеанс @ 13.6 TeV

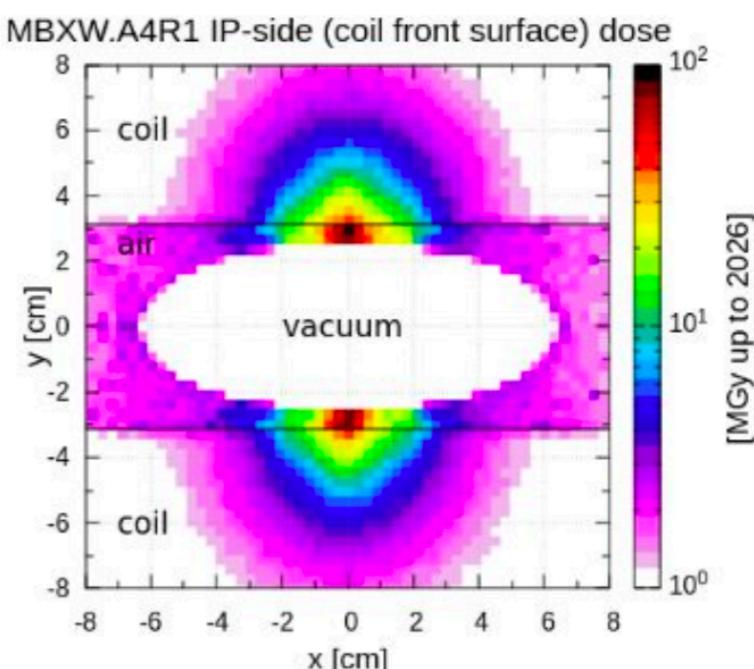
- Более 125 fb⁻¹ доставлено ATLAS/CMS; 12.5 fb⁻¹ - LHCb; и 53.5 pb⁻¹ - ALICE



Основное ограничение - время жизни внутренних трипленных магнитов (IP1 и IP5):

- внутренние триплетные магниты облучаются остатками столкновений
- полная доза приближается к ожидаемым пределам
- выход из строя приведет к большим простоям и деградации производительности

Перераспределить облучение путем изменения полярности и поворотом угла пересечения пучков



Проблемы, вызванные радиацией

Большое число сбоев из-за облучения электронных компонентов (R2E):

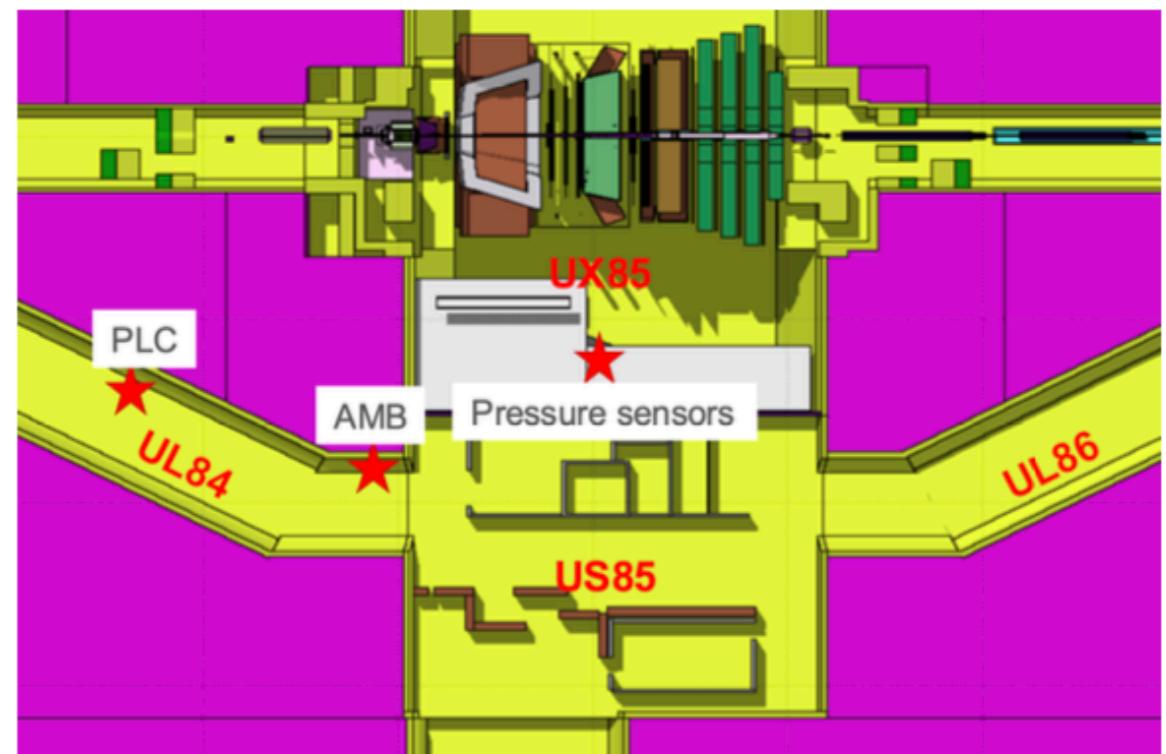
- в основном изолированные отказы (Single Event Upset)
- LHC работает на 2x от проектной светимости

Quench protection system (QPS):

- обычно подвержены магниты рядом с IP1, IP5, и IP8
- обычно быстрое восстановление (1-2 ч)

Криогенная система IP 8 (LHCb):

- Расположена близко к LHCb, в той же каверне.
- Подвержена воздействию остатков столкновений.
- Восстановление требует 24+ ч
- Решение найдено в виде установки дополнительной защиты и корректировки программного обеспечения.



Вакуумные соединительные модули

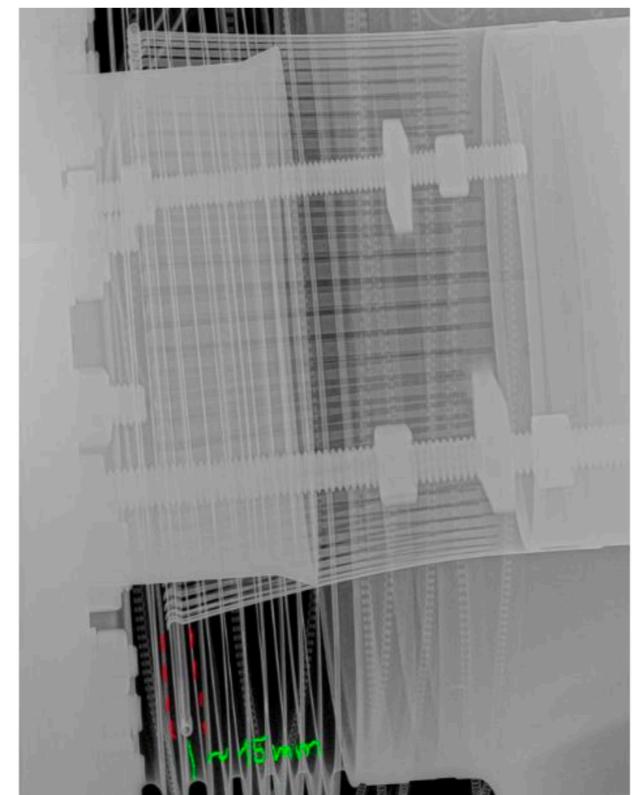
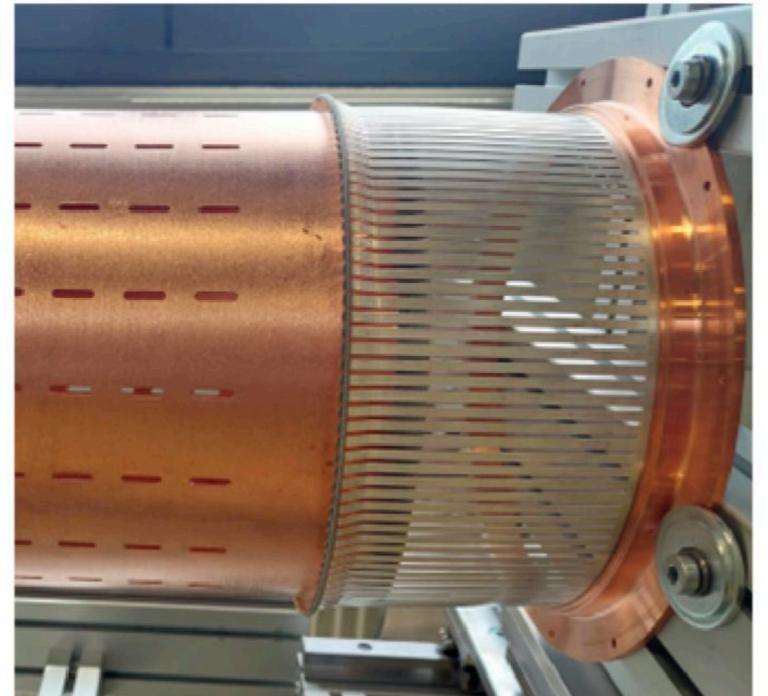
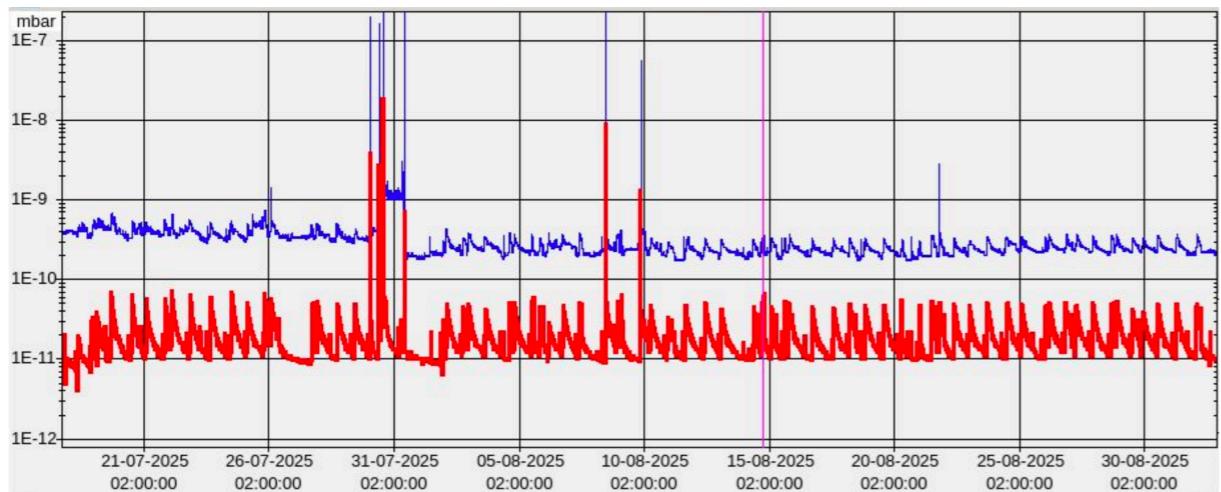
Модули соединяют сегменты трубы:

- должны быть гибкими, чтобы компенсировать тепловое расширение и движения
- должны быть хорошо проводящими, чтобы уменьшать импеданс

6L2 interconnection module:

- Сломана пружина
- Не оптимальный контакт приводит к "искрам"
- Ситуация ухудшилась при попытке увеличить интенсивность пучка до $1.7\text{e}11$ ppb. (~ 8 октября)
- Эффект остался при возвращении в номинальные $1.6\text{e}11$ ppb
- **Ограничена интенсивность пучка до $1.4\text{e}11$ ppb**

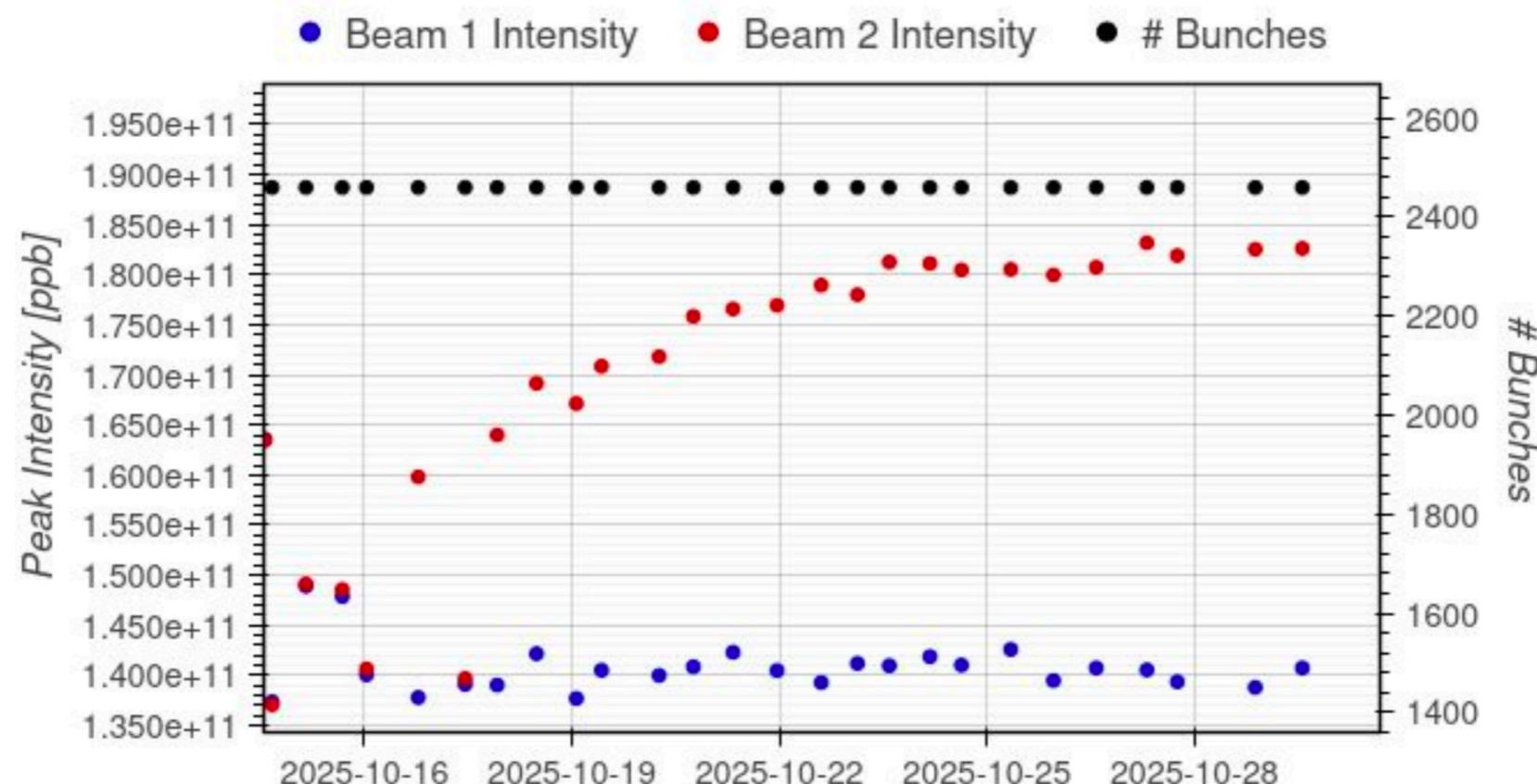
ppb - proton per bunch



Асимметричная интенсивность пучков

Увеличена интенсивность 2го пучка, чтобы восстановить производительность:

- 1.4e11 ppb в первом пучке
- 1.8e11 ppb во втором пучке
- производительность сравнима с 1.6e11 ppb

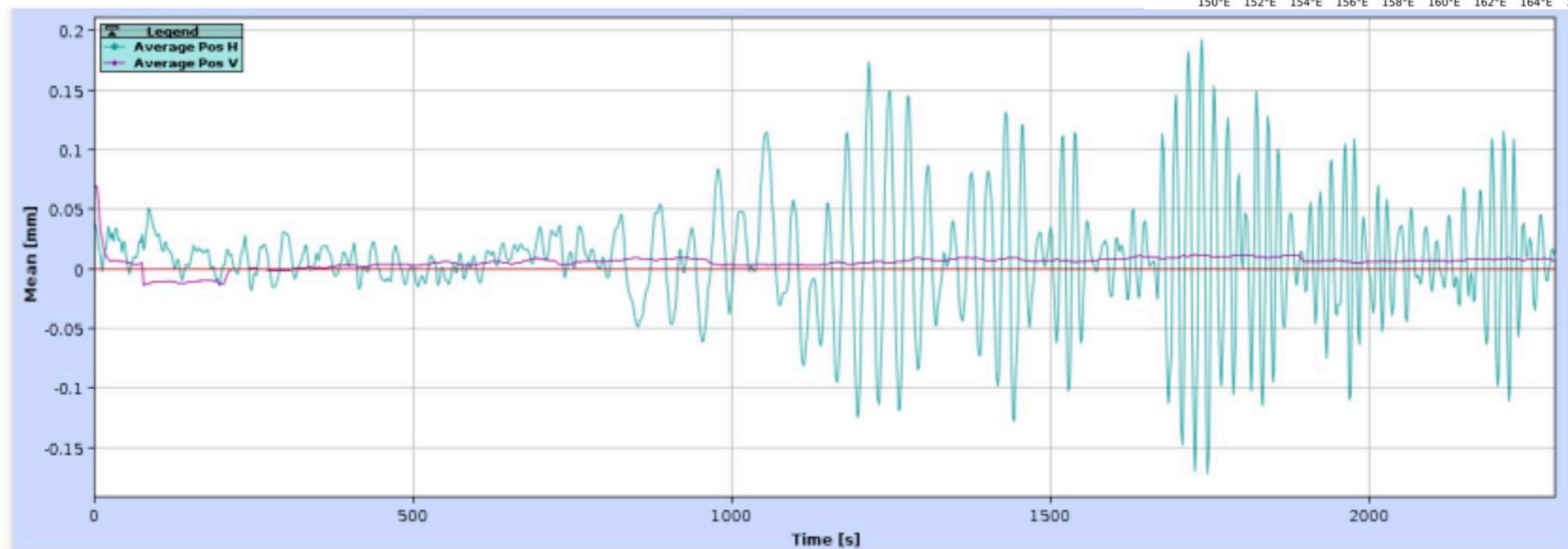
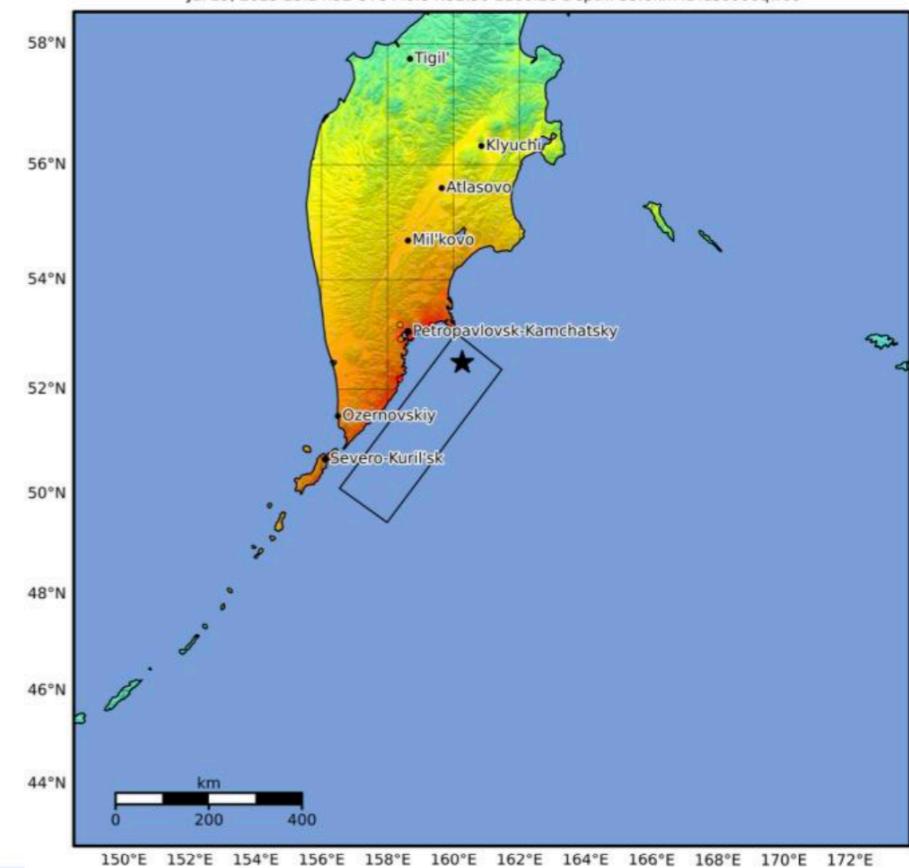


Землетрясение на Камчатке

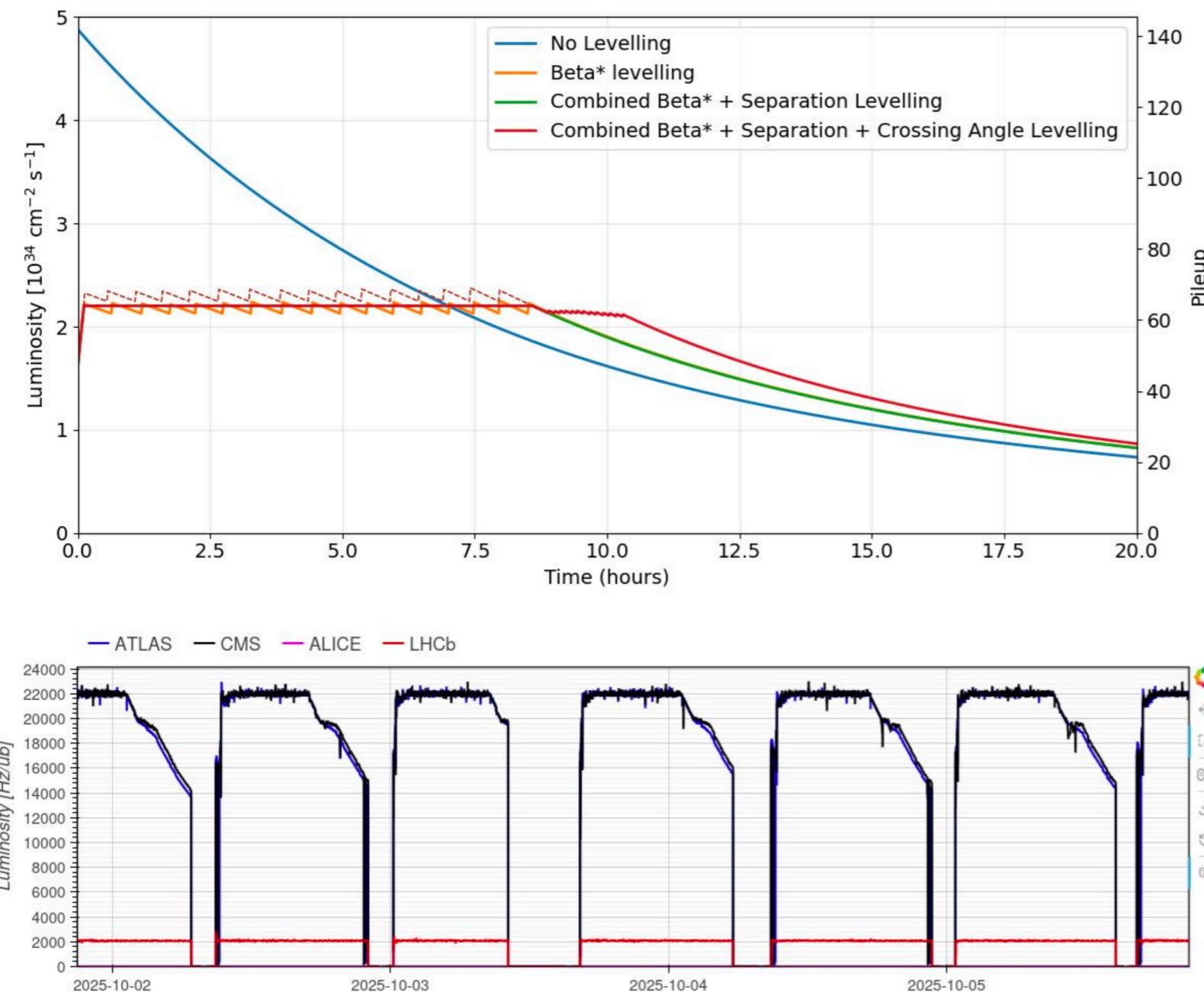
Землетрясение в fill #10888:

- 29 июля, магнитуда 8.8
- Задетектирована осцилляция орбиты до 250 мкм в LHC, продолжавшаяся ~25 минут
- Более слабые эффекты наблюдались в течении 4x часов

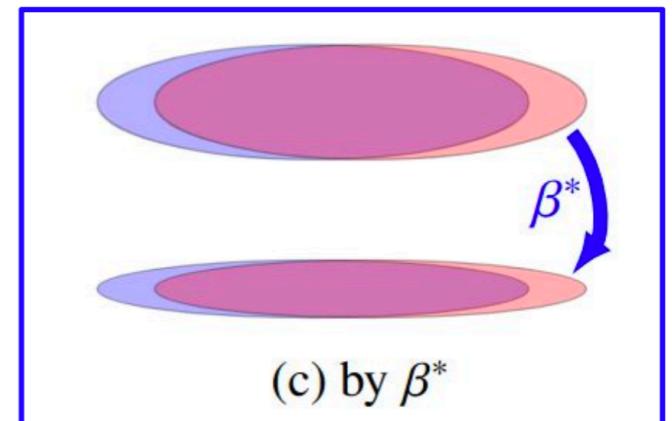
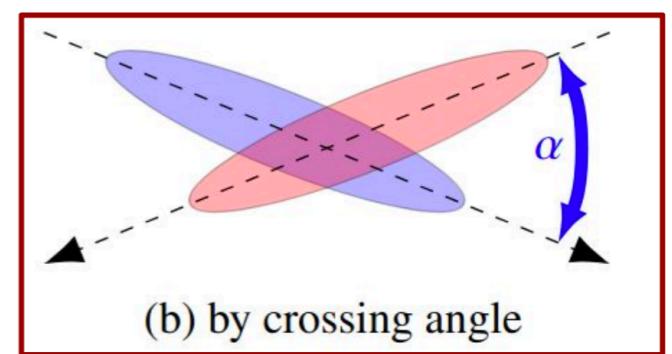
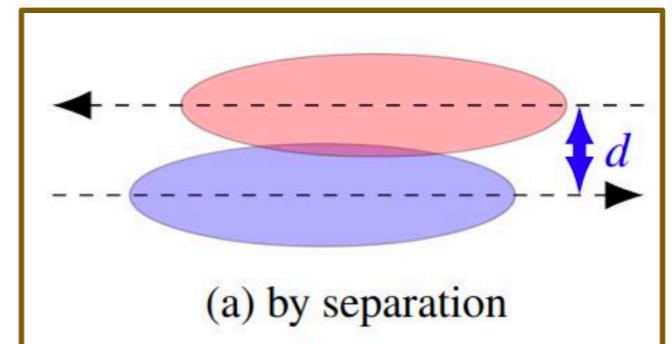
Macroseismic Intensity Map USGS
ShakeMap: 2025 Kamchatka Peninsula, Russia Earthquake
Jul 29, 2025 23:24:52 UTC M8.8 N52.50 E160.26 Depth: 35.0km ID:us6000qw60



Выравнивание светимости (luminosity leveling)

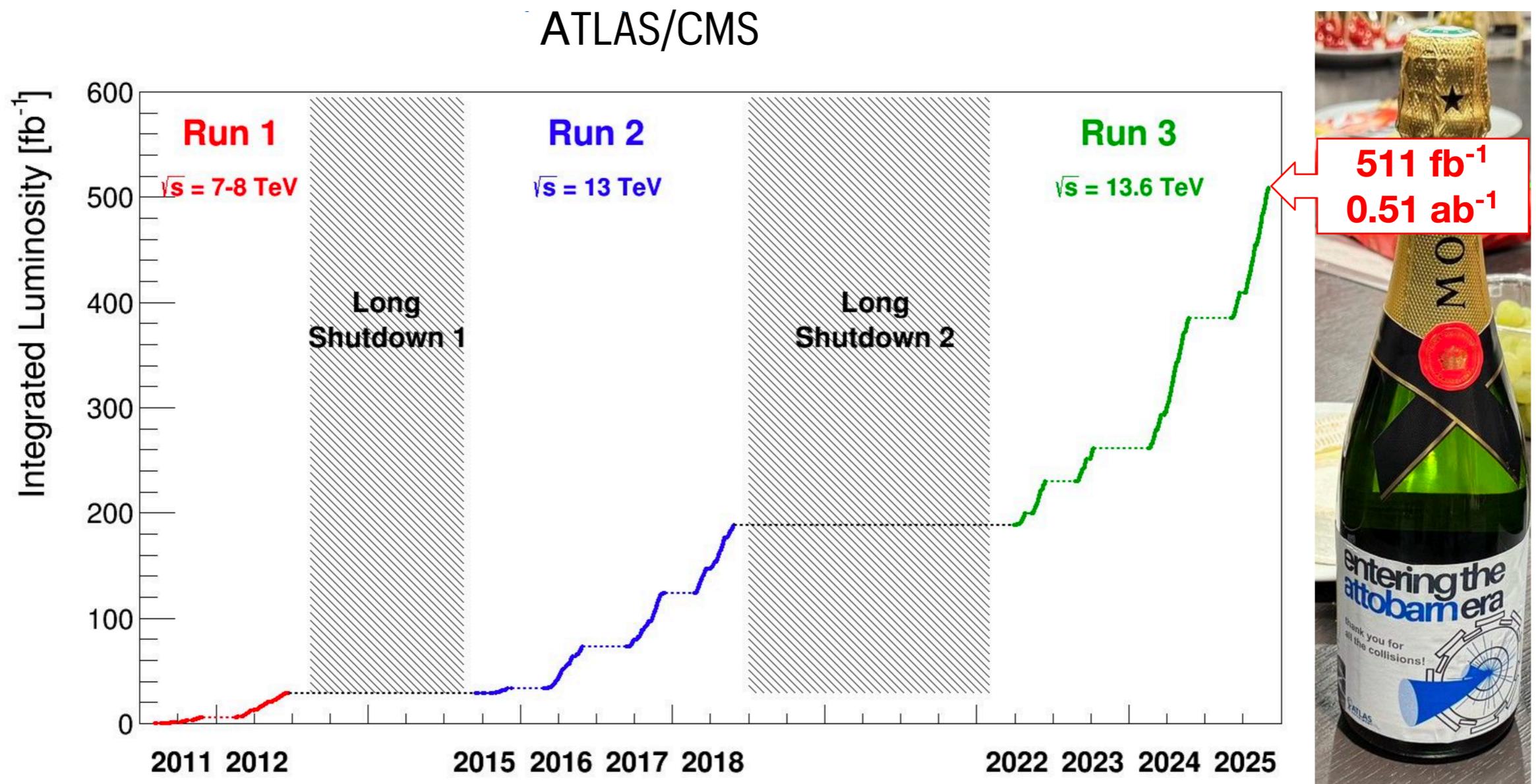


levelling options:



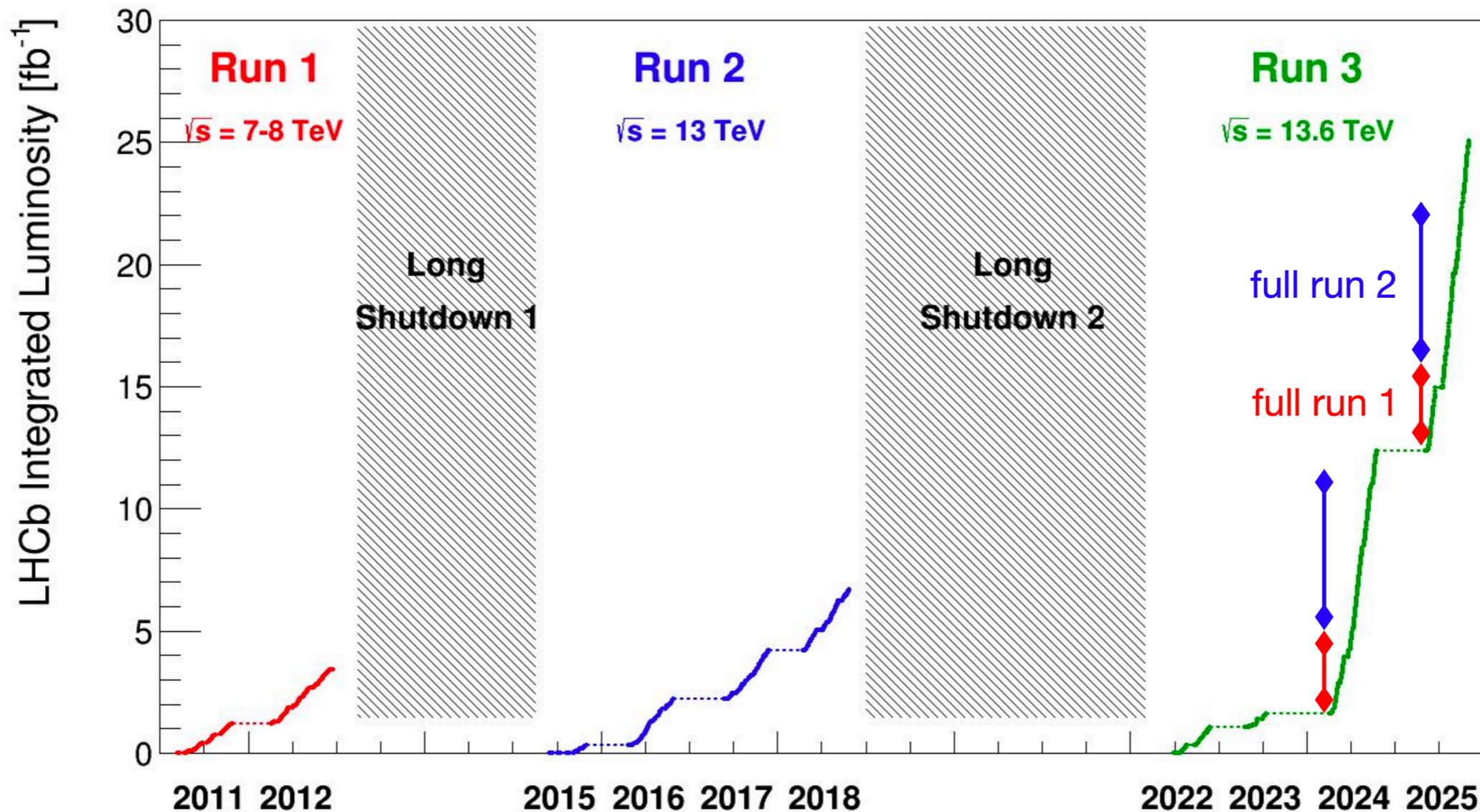
2025 - год рекордов (ATLAS/CMS)

- 1.7 fb^{-1} за 24 часа (30 Августа)
- $1.45 \text{ fb}^{-1}/\text{день}$, 4 дня подряд (2 - 5 Октября)
- $1.3 \text{ fb}^{-1}/\text{день}$, 7 дней подряд (24-30 Августа)
- 125 fb^{-1} за год (2025)



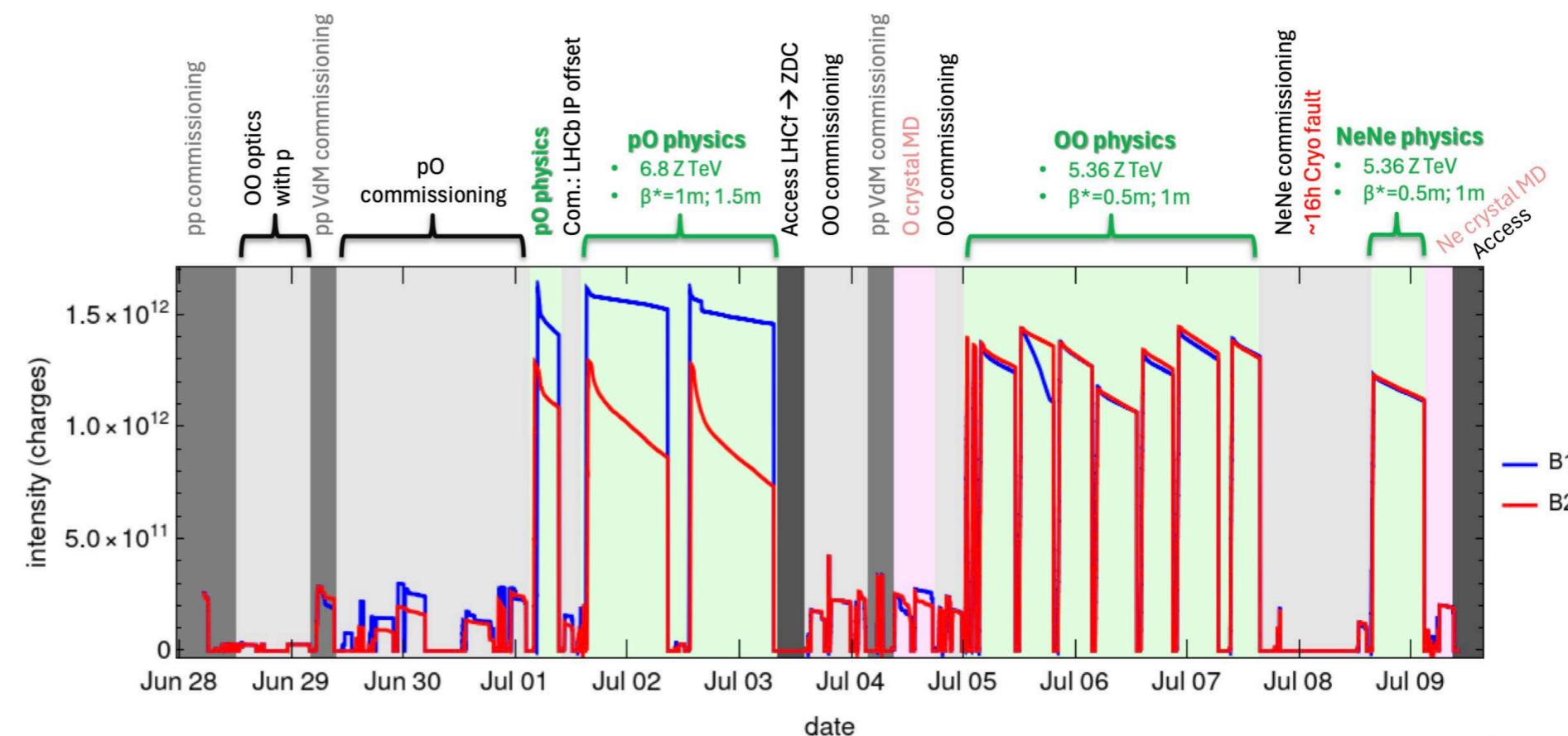
2025 - год рекордов (LHCb)

12.5 fb⁻¹ - LHCb



Легкие Ионы

Proton-oxygen (pO)
 Oxygen-oxygen (OO)
 Neon-neon (NeNe)



Proton - Oxygen

(nb ⁻¹)	target	delivered	Ratio
ATLAS/LHCf	1.5	1.8	1.2
ATLAS	--	6.9	--
ALICE	5	7.85	1.6
CMS	3	48.4	16
LHCb	2	33.1	16.6

Oxygen - Oxygen

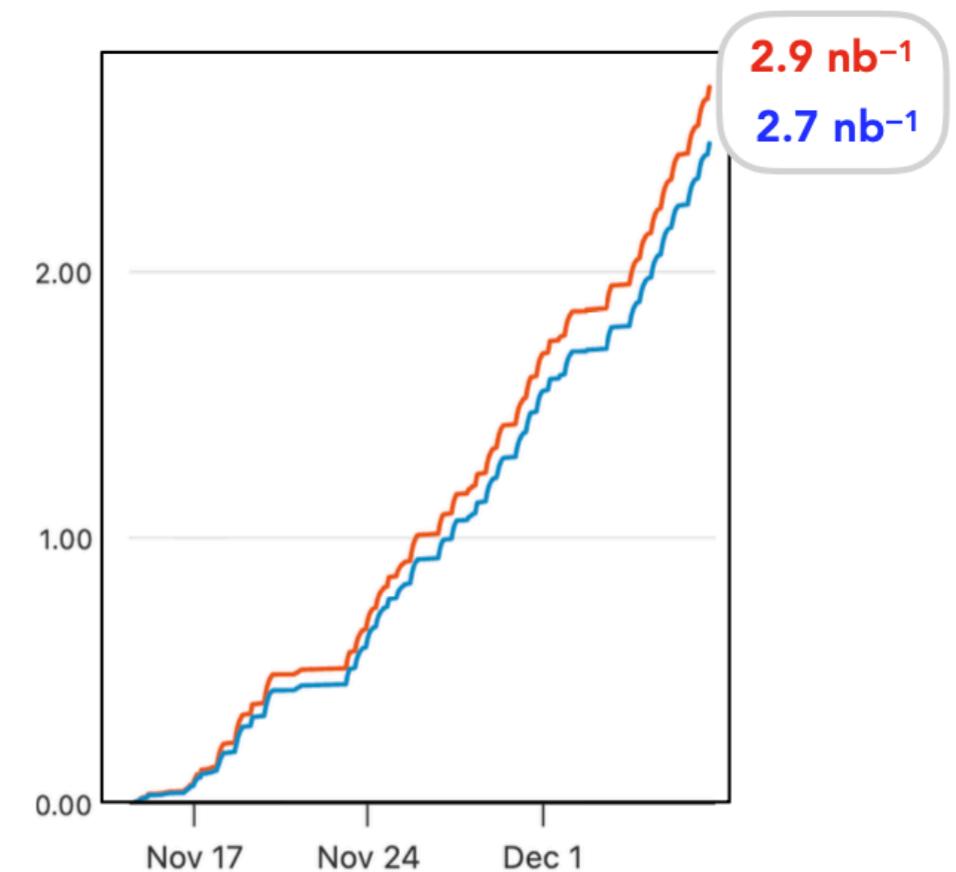
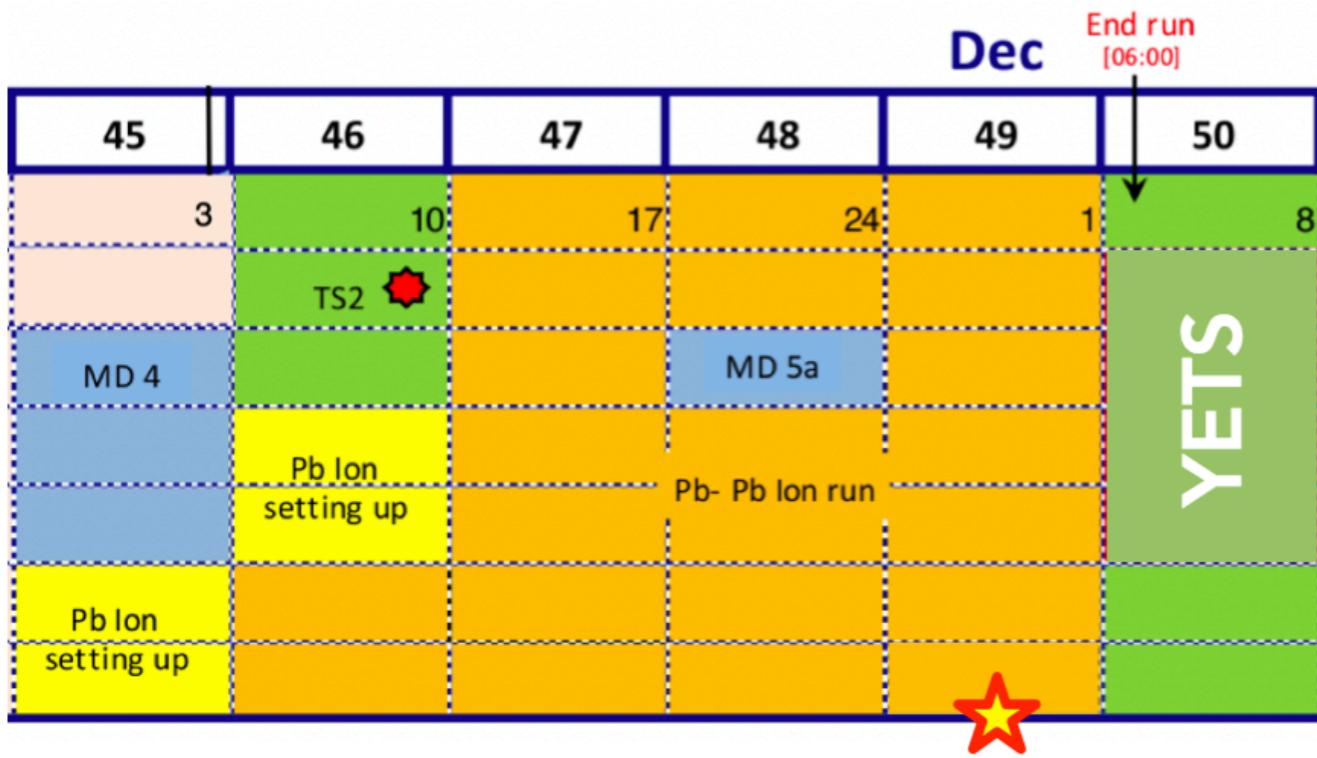
(nb ⁻¹)	target	delivered	ratio
ATLAS	0.8	8.2	10.3
ALICE	0.5	5.15	10.3
CMS	0.8	9.4	11.8
LHCb	0.5	5.75	11.5

Neon - Neon

(nb ⁻¹)	target	delivered	F
ATLAS		1.0	10
ALICE		0.91	9.1
CMS		0.91	9.1
LHCb		0.61	6.1

- Очень сложная задача (быстрый ввод в эксплуатацию; 3 разные конфигурации за 10 дней)
- Очень хороший результат (p-O ~x16; O-O ~x10; NeNe ~x6-10)

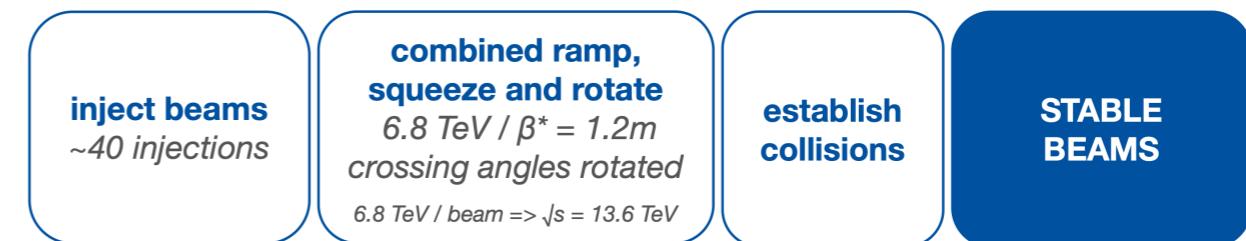
Тяжелые Ионы PbPb @ 5.36 TeV/n



- 3.9 nb⁻¹ (CMS 2023-2024)
- Запланированная светимость = 2.25 nb⁻¹ (ATLAS/CMS), 1.9 nb⁻¹ (ALICE), 0.75 nb⁻¹ (LHCb)
- План оставить конфигурацию близкую к удачной 2024 года.
- 40% стабильный пучок
- Доставленная светимость > 2.8 nb⁻¹

План 2026 (Предварительный)

- 57 дней pp (~ 60 fb⁻¹)
- объединить ramp/squeeze/rotate (10 min за цикл)
- beam commissioning 10 дней
- 18 дней - тяжелые ионы (pPb, PbPb)
- 14 дней тест высокой интенсивности пучков



	Jan					Feb		Mar					Collisions with 1200 bunches				
Wk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Mo	29		5	12	19	26	2	9	16	23	2	9	16	23			
Tu	Annual 'Closure'																
We																	
Th	New Year			YETS				DSO test			Machine checkout			Scrubbing			
Fr									Hardware re-commissioning			Re-commissioning with beam		Interleaved commissioning & Intensity ramp up			
Sa																	
Su																	

Специальные раны 2026:

- LHCb низкой энергии 1 TeV/beam
 - $\sqrt{s} = 43 \text{ GeV beam-gas}$,
 - 2 TeV beam-beam
 - (за счет pp времени)
- ATLAS/CMS low-pileup
 - $\sim 1\text{fb}^{-1}$ (2 недели pp)
- Легкие ионы
 - за счет части PbPb времени (обсуждается)

	Apr					May					Jun					
Wk	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	End of p+ physics run [06:00]	Start physics Pb ions	
Mo	30	Easter	6	13	20	VdM/Lumi 27	4	11	18	Whitsun 25	1	8	15			
Tu						MD 1			MD 2							
We																
Th								Ascension								High Intensity beam test
Fr	G. Fri.			1 TeV SMOG	1st May											
Sa	Easter															
Su																

	Jul					Aug					Sep					
Wk	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	End of run [06:00]		
Mo	29	6	13	20	27	3	10	17	24	31	7	14	21			

План 2026 (HL-LHC тест)

Оборудование может деградировать с большей интенсивностью пучков

- в основном за счет импеданса / RF нагрева
- проблемы с вакуумными соединителями
- новые проблемы за счет "спящих" несоответствий (dormant non-conformities) конструкции
- ожидание неожиданного

HL-LHC параметры пучков должны быть продемонстрированы

- интенсивность пучка до 2.3×10^{11} ppb
- 48 b trains, 8b4e beams, 72b trains
- 450 GeV: set up
- 3 TeV, heating test with 48 b, сначала один пучок, потом оба
- 6.8 TeV: test 8b4e beams
- Инжектировать пучки, и позволить им циркулировать несколько часов
- Без столкновений (почти) из-за радиационных ограничений
- если ограничения на интенсивность пучков будут обнаружены, они должны быть устранены в течение LS3

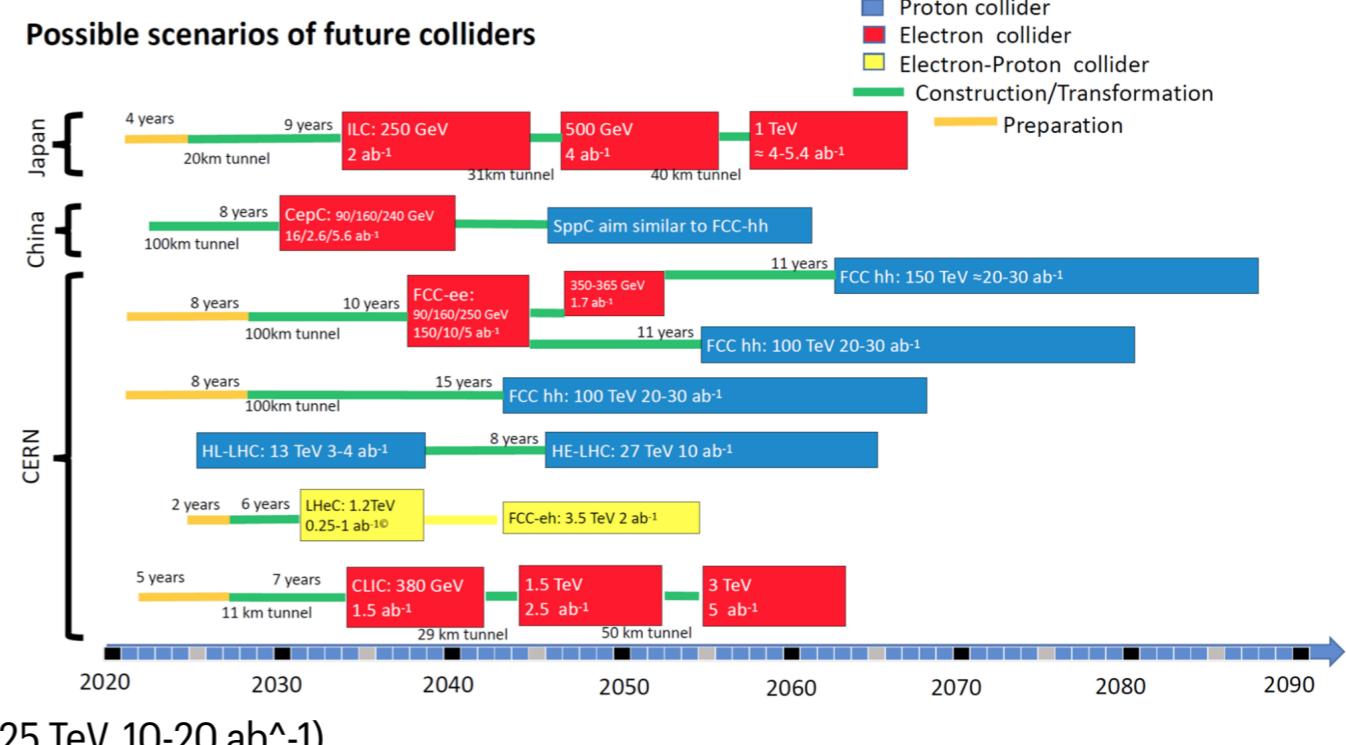


Дальние перспективы: FCC и CEPC

HL-LHC закончит свою миссию в 2040 (~14 TeV, 3 ab⁻¹)

FCC (Future Circular Collider):

- Изучение целесообразности FCC начато в 2020
- 2024 стартовало геологическое изучение пород во Франции, в 2025 в Швейцарии; (бурение и сейсмические исследования)
- 31 марта 2025 года выпущены 3 тома отчета:
 - [Future Circular Collider Feasibility Study Report Volume 1: Physics and Experiments](#)
 - [Future Circular Collider Feasibility Study Report Volume 2: Accelerators, technical infrastructure and safety](#)
 - [Future Circular Collider Feasibility Study Report Volume 3: Civil Engineering, Implementation and Sustainability](#)
- 2027 - 2028 Решение CERN Member States и международных партнеров
- 2030e: Начало строительства
- Середина 2040x: Начало эксплуатации FCC-ee
 - (примерно 15 лет, ~ 90 - 360 GeV)
- ~ 2070: FCC-hh, Начало эксплуатации
 - (примерно 25 лет, 100 TeV ~ 30 ab⁻¹)



CEPC (Circular Electron Positron Collider):

- 2023 CEPC TDR - Accelerator [[arXiv:2312.14363](#)]
- 2025 CEPC Reference Detector TDR [[arXiv:2510.05260](#)]
- 2027 CEPC EDR и начало строительства
- 2035 конец строительства
- 2035-2053 эксплуатация CEPC (ee+: 90 - 360 GeV, H, Z, W, ttBar)
- После 2040 CEPC-SppS (Super proton-proton Collider) (pp: 75 - 125 TeV, 10-20 ab⁻¹)



Заключение

2025 - еще один успешный год

- Впервые сталкивались легкие ионы (p -O, O-O, Ne-Ne)
- Запланированная pp светимость превышена: 125 fb^{-1} доставлено ATLAS/CMS; 12.5 fb^{-1} - LHCb; и 53.5 pb^{-1} - ALICE
- (half)attobarn era, 0.51 ab^{-1} (ATLAS/CMS) за все время работы LHC
- Тяжелые ионы: запланированная светимость превышена: доставлено 2.9 nb^{-1} (CMS)
- Проблемы, вызванные радиацией и соединительными модулями **пока** решены (могут повлиять выполнение планов)

2026 - последний год (не полный) перед LS3

- Запланировано использовать все успешные техники 2025 (возможно объединить *jump+squeeze+rotation* в один шаг)
- 57 дней pp физики ($\sim 60 \text{ fb}^{-1}$) и 18 дней тяжело-ионной физики; На рассмотрении специальные раны
- 2 недели HL-LHC тест

2026-2030 - LS 3

2030-2033 - HL-LHC Run IV

FCC и CEPC

- 2035-2053 CEPC ($e\bar{e}$: $90/160/240/360 \text{ GeV}$)
- ~mid 2040 FCC- $e\bar{e}$ ($e\bar{e}$: $90-360 \text{ GeV}$)
- > 2040 CEPC-SppS (pp: $75 - 125 \text{ TeV}$, $10-20 \text{ ab}^{-1}$)
- ~2070 FCC-pp (pp: $100 \text{ TeV} \sim 30 \text{ ab}^{-1}$)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!