

Статус ускорителя

Анатолий Егоров

Научная Сессия ОФВЭ НИЦ "Курчатовский Институт" - ПИЯФ

24 декабря 2025

Расписание LHC 2025 (1)

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

	Jan				Feb				Mar				LHC hand-over to BE-OP	
Wk	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Mo	30	6	13	20	27	3	10	17	24	3	10	17	24	
Tu		Control System admin. days												
We	Annual Closure													
Th								YETS					Hardware re-commissioning	
Fr														
Sa														
Su														

LHC hand-over to BE-OP

LHC, T12, T18 and experiments closed xall valves open														Start Beam Commissioning														First Stable beams														Collisions with 1200 bunches																											
Apr														May														Jun																																									
Wk		14				15				16				17				18				19				20				21				22				23				24				25				26																			
Mo		31				7				14				Easter 21				28				Cryo reconf. 5				12				19				26				2				Whitsun 9				16				23																			
Tu																						Scrubbing																																															
We		Machine checkout								Re-commissioning with beam																																								TS1																			
Th		T12/T18 test																1st May																Ascension																																			
Fr										G. Fri.																Interleaved commissioning & intensity ramp up																				MD 1																							
Sa																																																																					
Su																																																																					

LHC, T12, T18 and experiments closed
all valves open

Start Beam Commissioning

First Stable beams

Collisions with 1200 bunches

	Technical Stop		Special physics runs (place holders)
	HW Commissioning, Powering Tests, Magnet Training		Machine development (incl. floating)
	Machine check out		Scrubbing
	Recommissioning with beam		Pb - Pb Ion physics run
	Interleaved commissioning & intensity ramp up		Ion Setting up
	Proton physics run		LINAC 3 Pb oven re-fill



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)

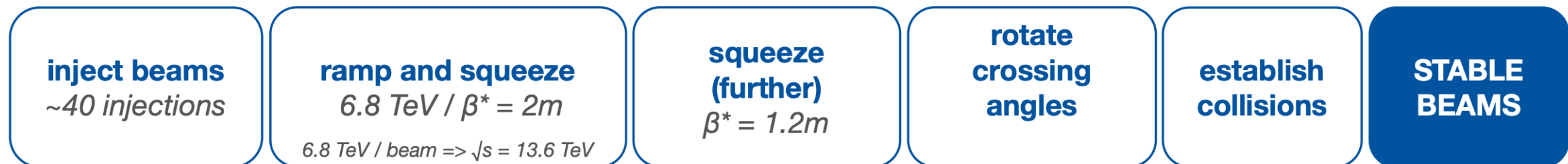
	Jul				Aug					Sep			
Wk	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Mo	30	7	14	21	28	4	11	18	25	1	8	15	22
Tu	O ion setting up	Ne-Ne run								MD 2			
We		ZDCs out											
Th	MD 1b	VdM program									Jeune G.		
Fr													
Sa	O-O & p-O ions run												
Su													

	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						Annual Closure
We									MD 5a				
Th						MD 4	Pb Ion setting up		Pb- Pb Ion run		Control System admin. days	YETS	Xmas
Fr													Xmas
Sa						Pb Ion setting up							
Su										MD 5b			

	Technical Stop		Special physics runs (place holders)
	HW Commissioning, Powering Tests, Magnet Training		Machine development (incl. floating)
	Machine check out		Scrubbing
	Recommissioning with beam		Pb - Pb Ion physics run
	Interleaved commissioning & intensity ramp up		Ion Setting up
	Proton physics run		LINAC 3 Pb oven re-fill

2025 Протонный сеанс @ 13.6 TeV

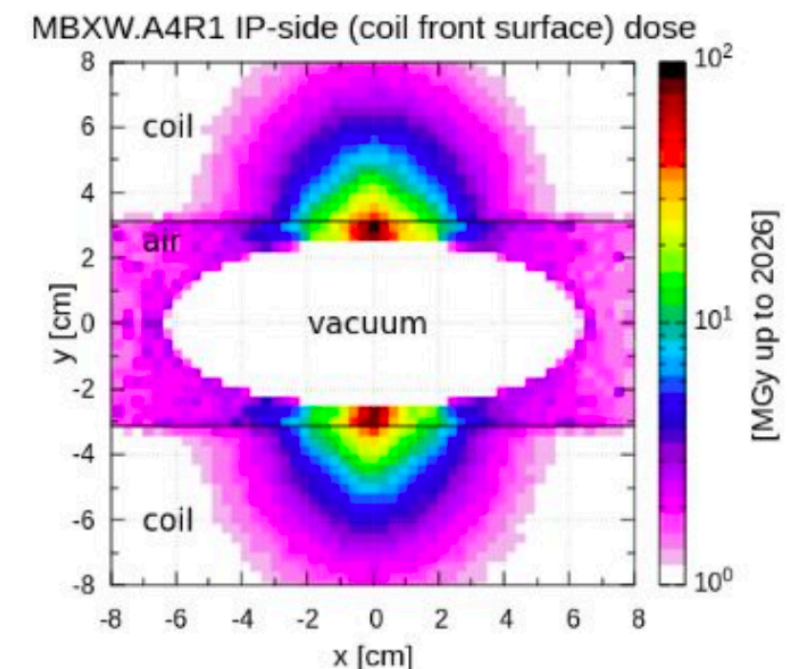
- Более 125 fb^{-1} доставлено ATLAS/CMS; 12.5 fb^{-1} - LHCb; и 53.5 pb^{-1} - ALICE



Основное ограничение - время жизни внутренних триплених магнитов (IP 1 и IP 5):

- 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):

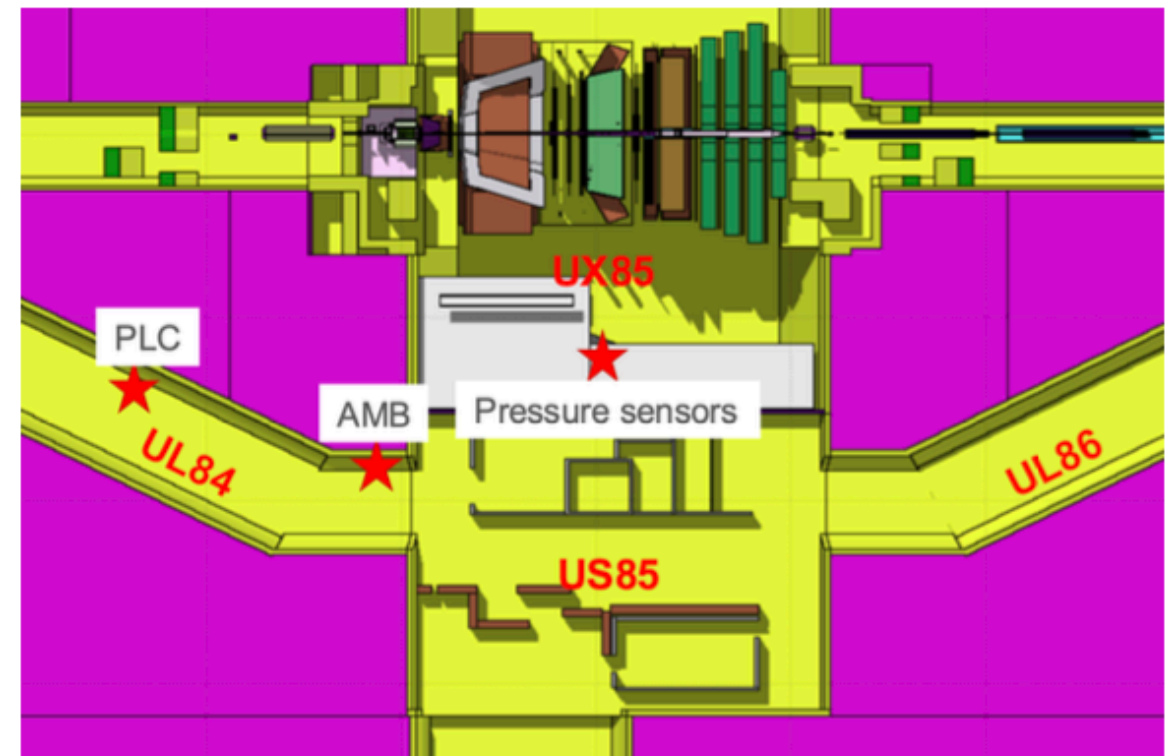
- в основном изолированные отказы (Single Event Upset)
- **LHC работает на 2х от проектной светимости**

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

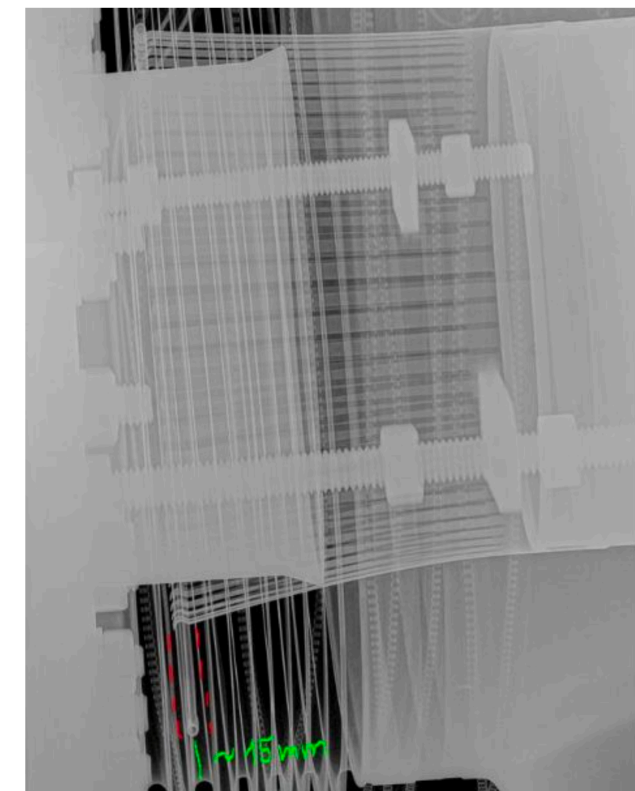
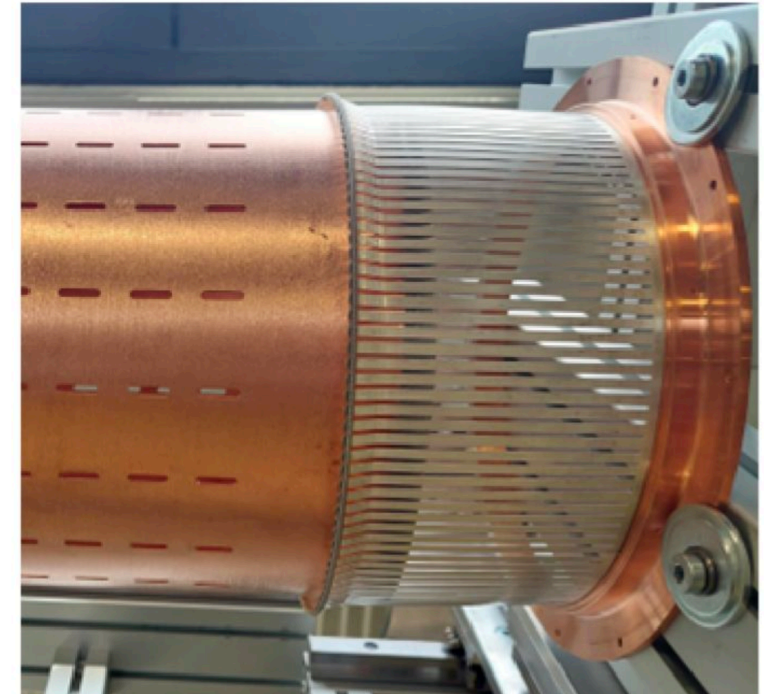
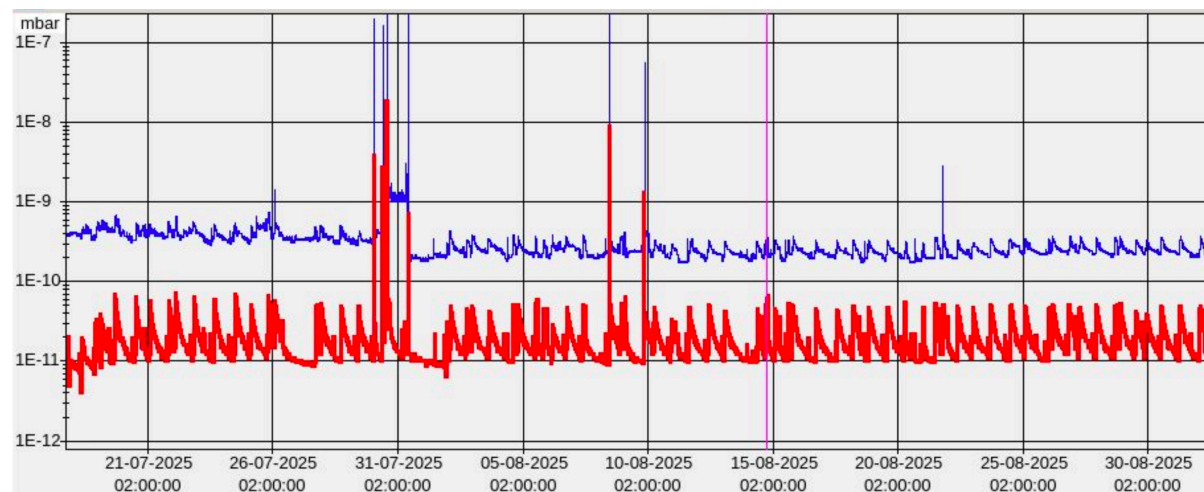
Модули соединяют сегменты трубы:

- 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 $1.7e11$ ppb. (~ 8 октября)
- Эффект остался при возвращении в номинальные $1.6e11$ ppb
- **Ограничена интенсивность пучка до $1.4e11$ ppb**

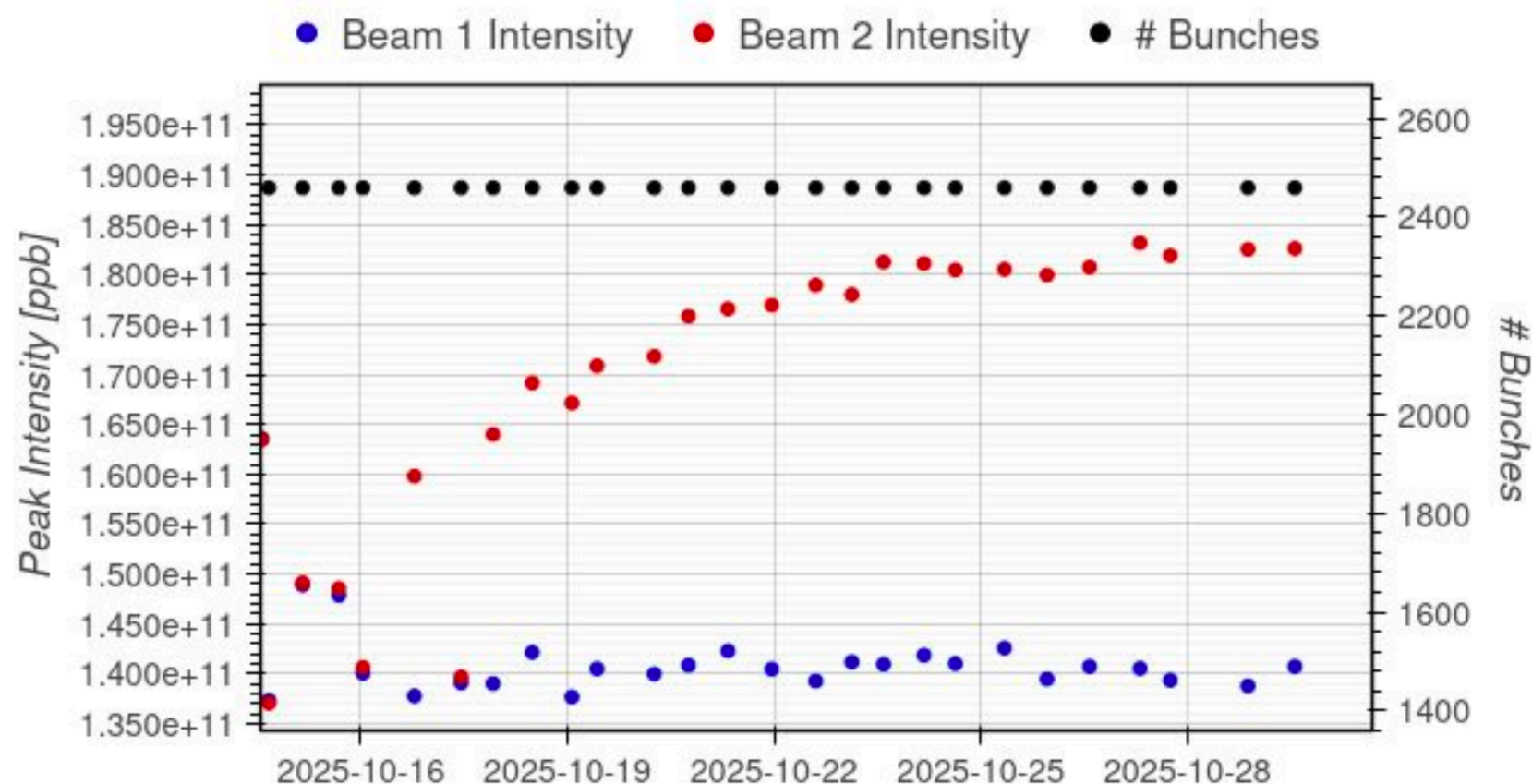
ppb - proton per bunch



Асимметричная интенсивность пучков

Увеличена интенсивность 2го пучка, чтобы восстановить производительность:

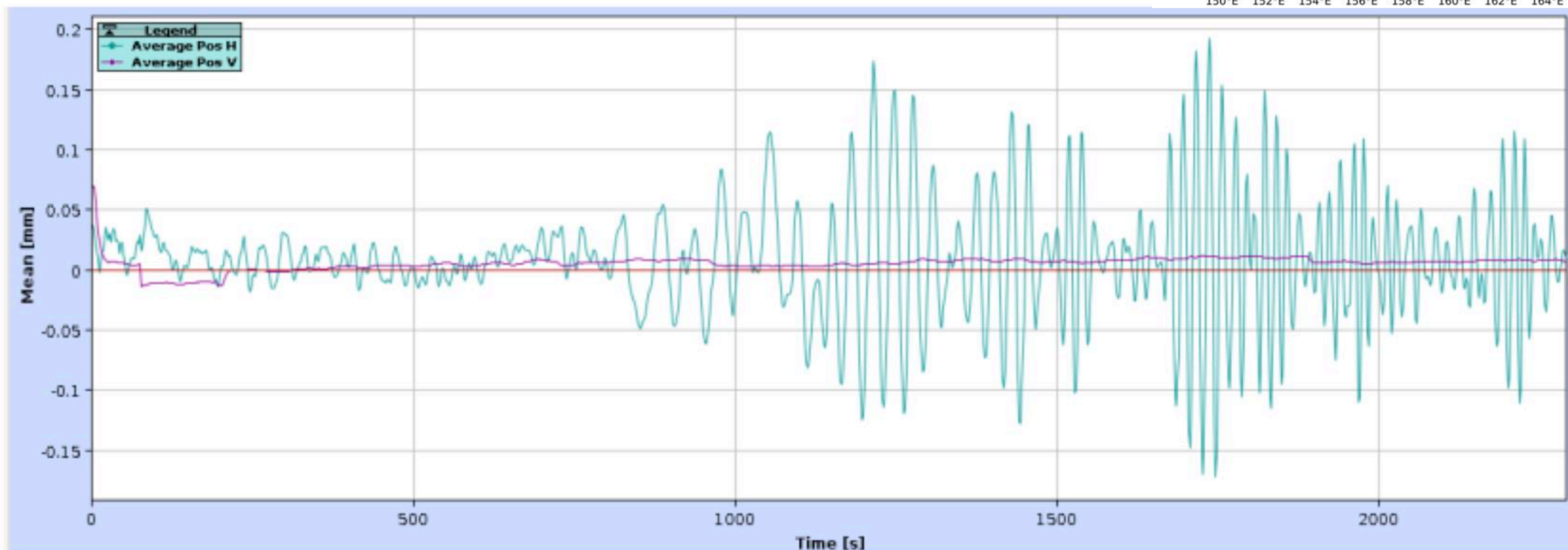
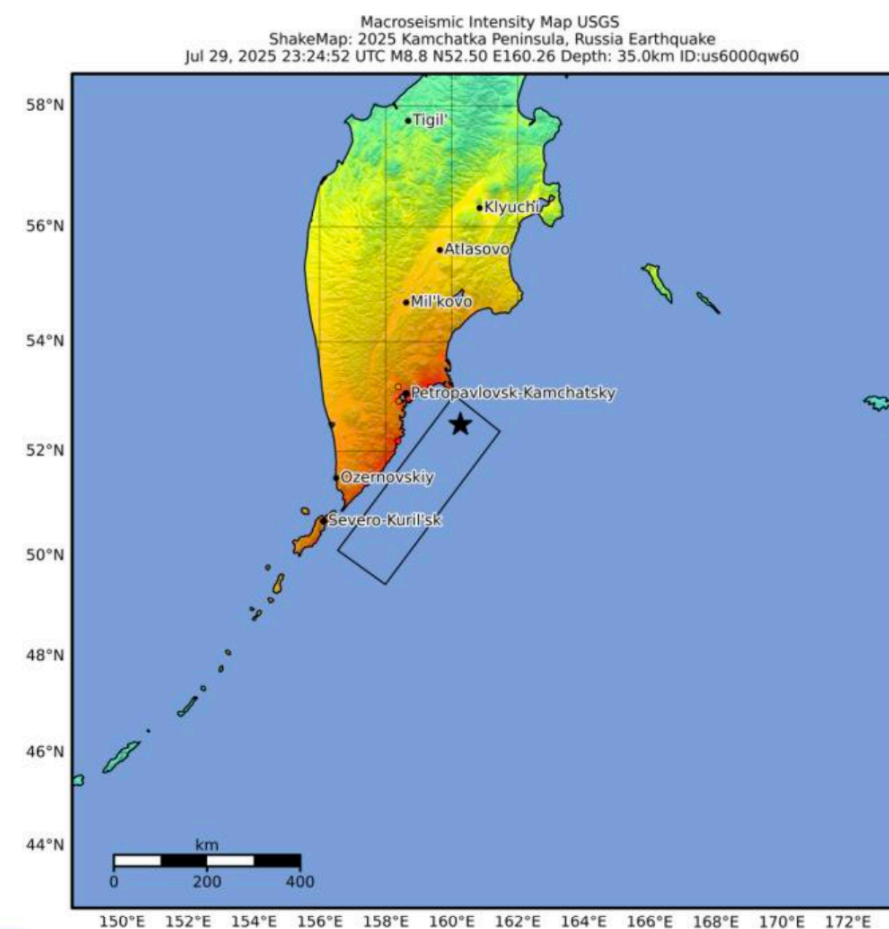
- 1.4e11 ppb в первом пучке
- 1.8e11 ppb во втором пучке
- производительность сравнима с 1.6e11 ppb



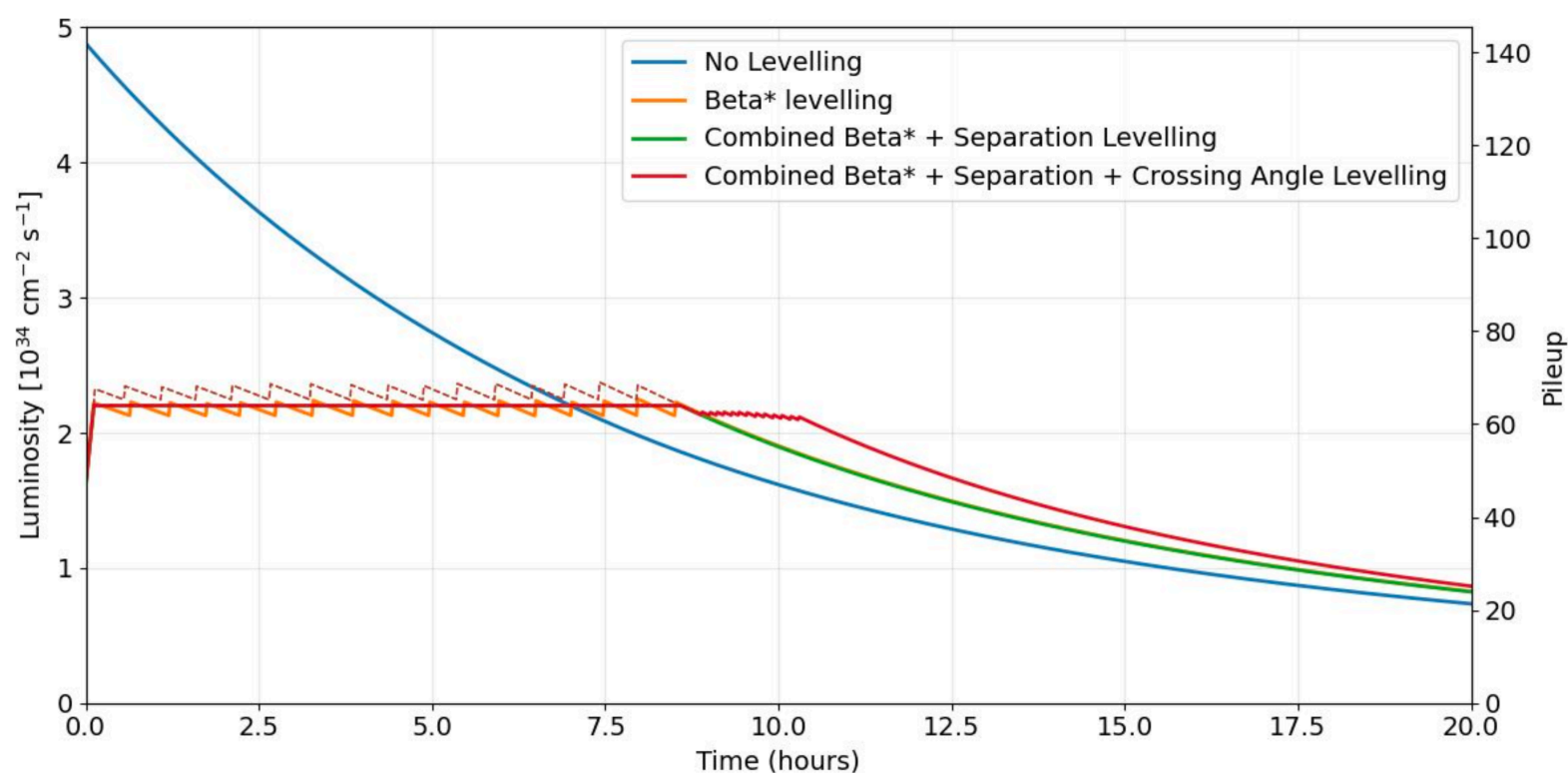
Землетрясение на Камчатке

Землетрясение в fill #10888:

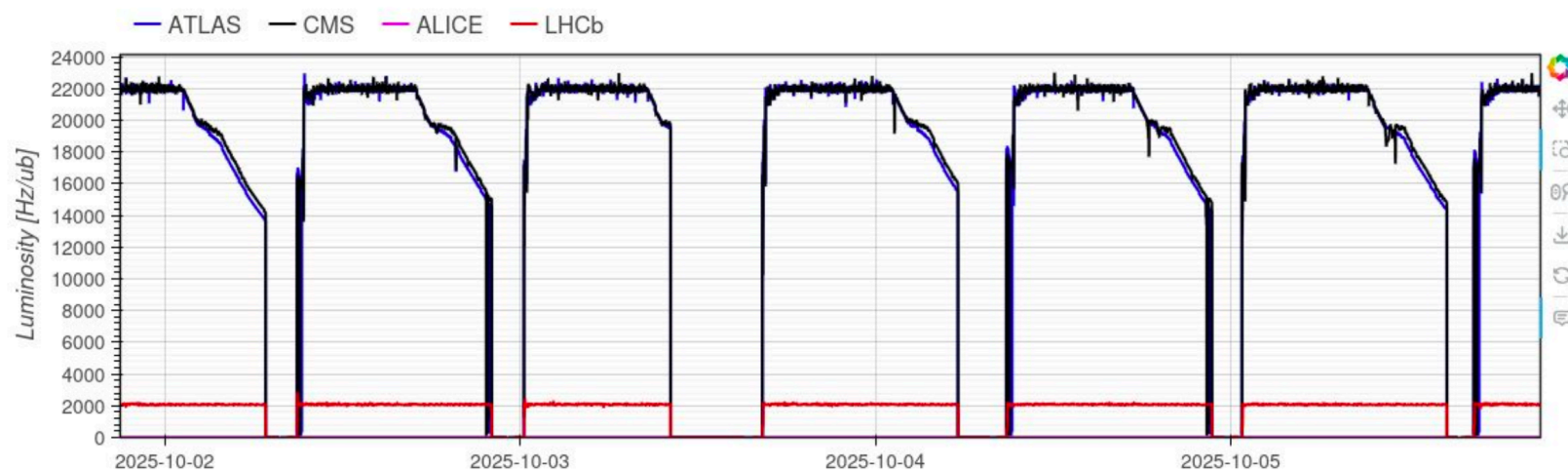
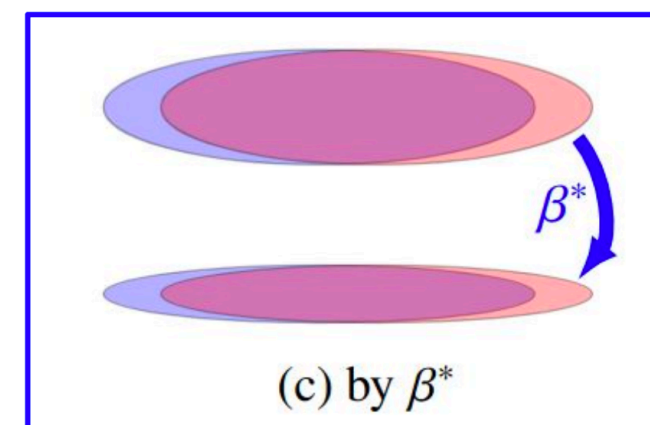
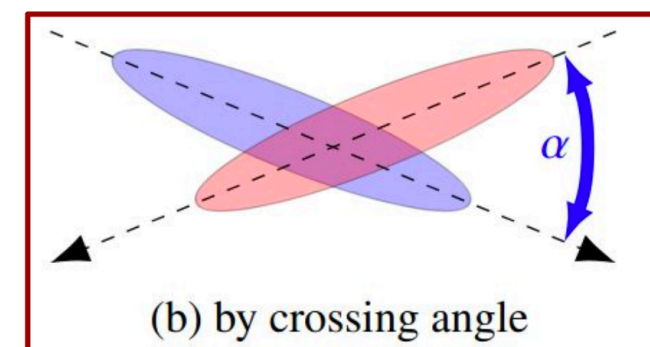
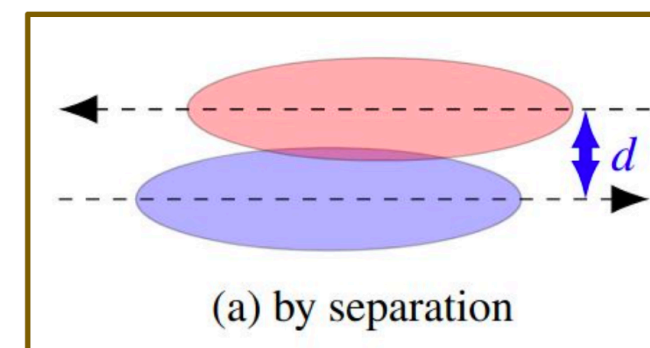
- 29 июля, магнитуда 8.8
- Задетектирована осцилляция орбиты до 250 мкм в ЛНС, продолжавшаяся ~25 минут
- Более слабые эффекты наблюдались в течении 4х часов



Выравнивание светимости (luminosity leveling)

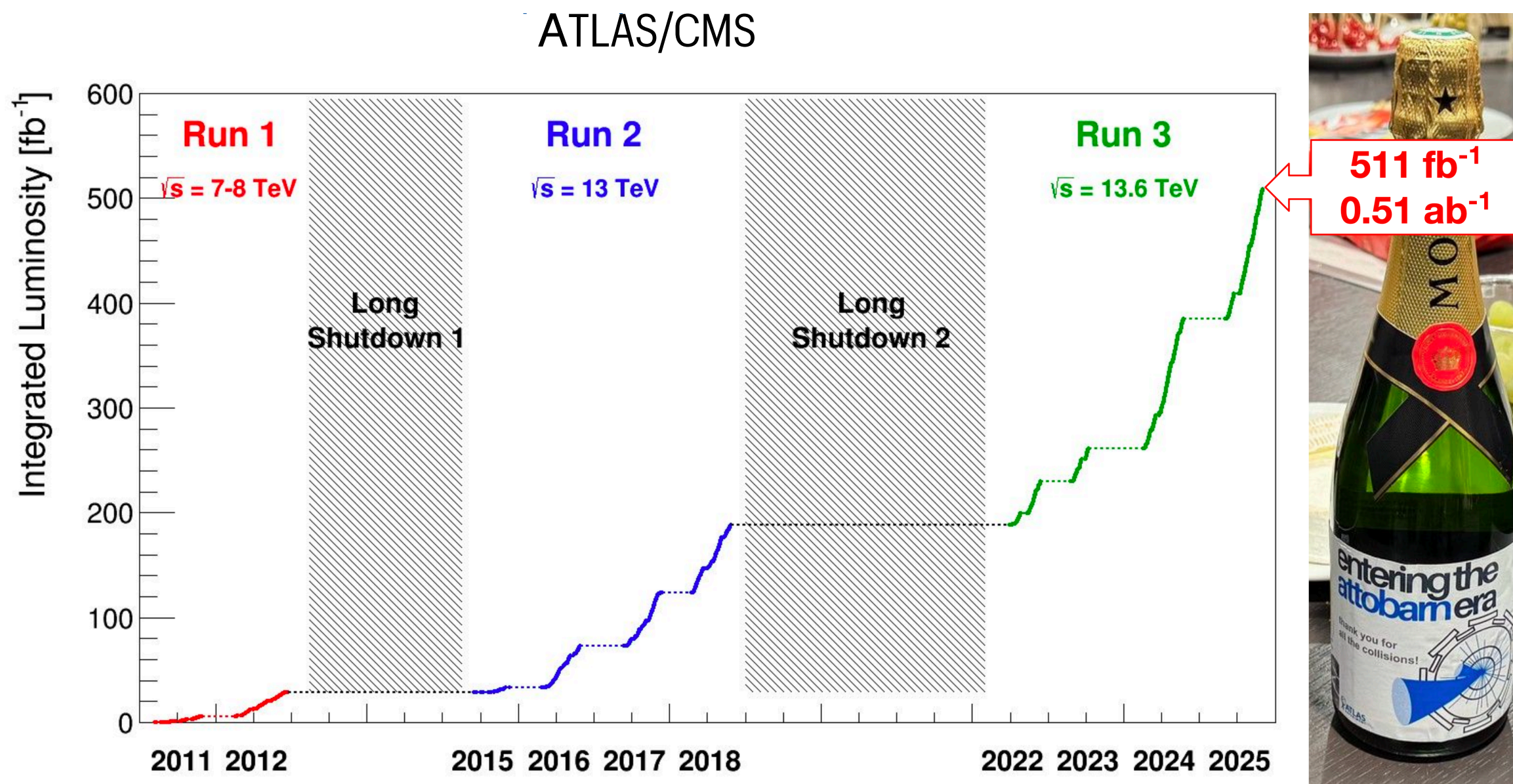


levelling options:



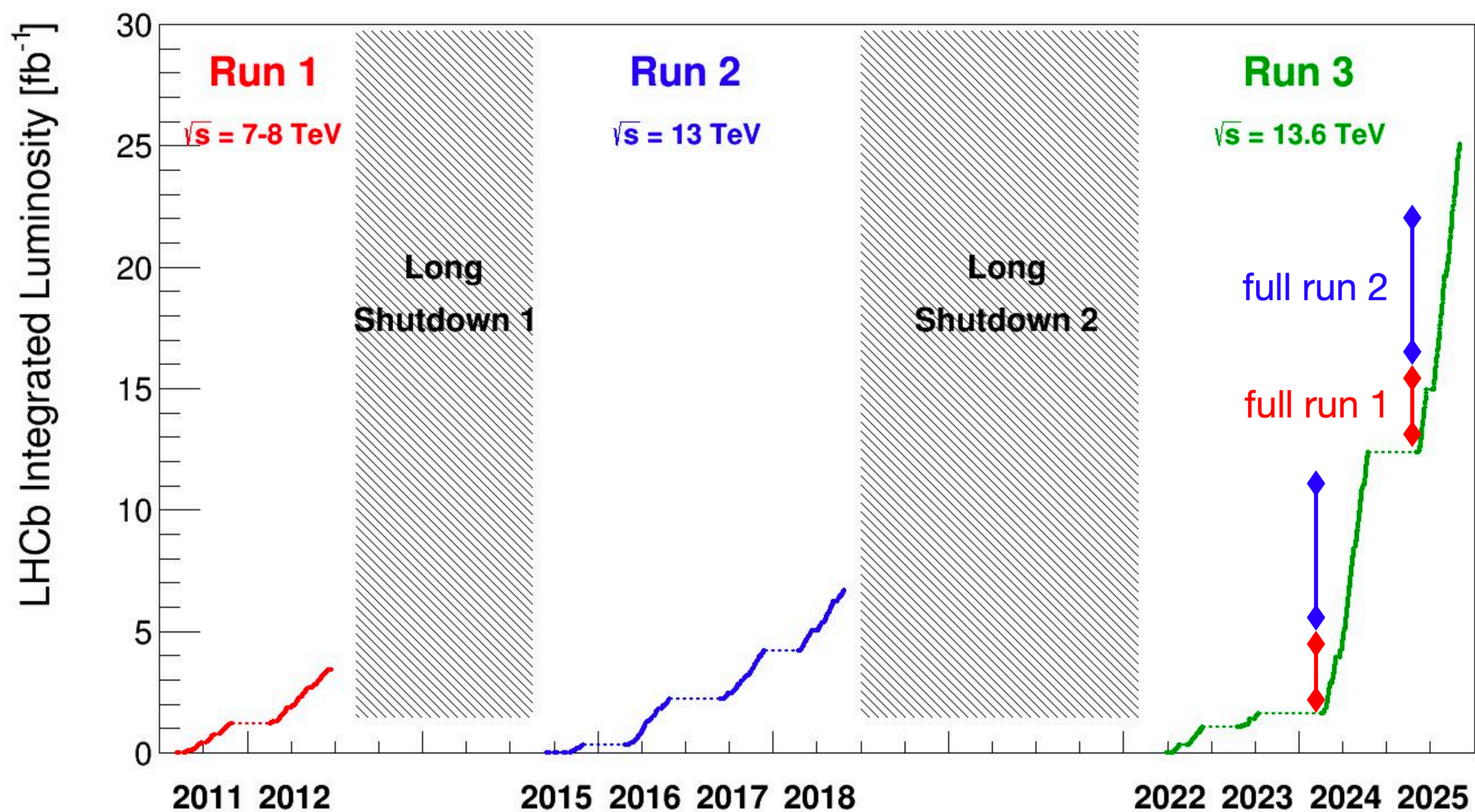
2025 - год рекордов (ATLAS/CMS)

- 1.7 fb⁻¹ за 24 часа (30 Августа)
- 1.45 fb⁻¹/день, 4 дня подряд (2 - 5 Октября)
- 1.3 fb⁻¹/ день, 7 дней подряд (24-30 Августа)
- 125 fb⁻¹ за год (2025)



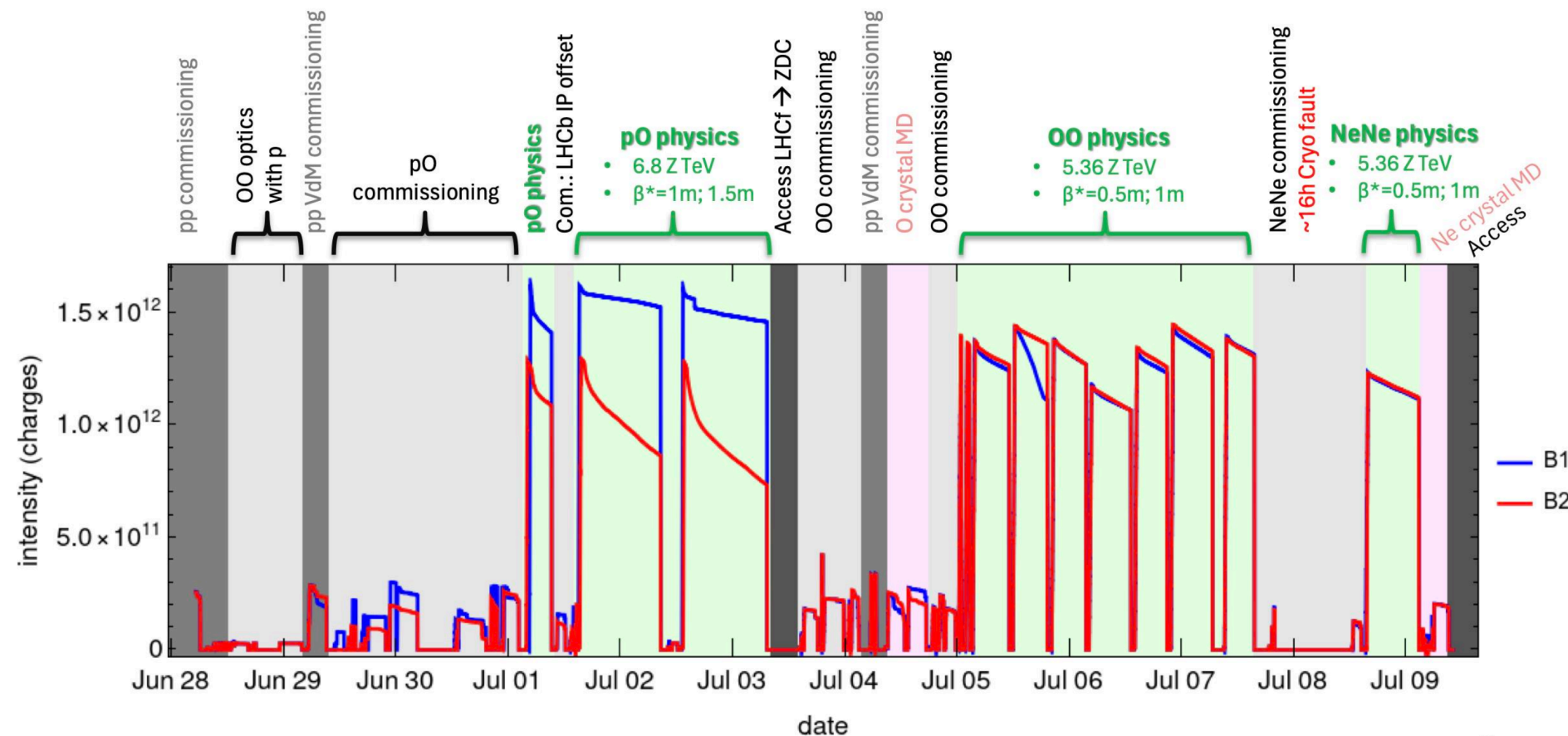
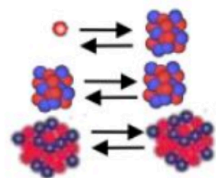
2025 - год рекордов (LHCb)

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

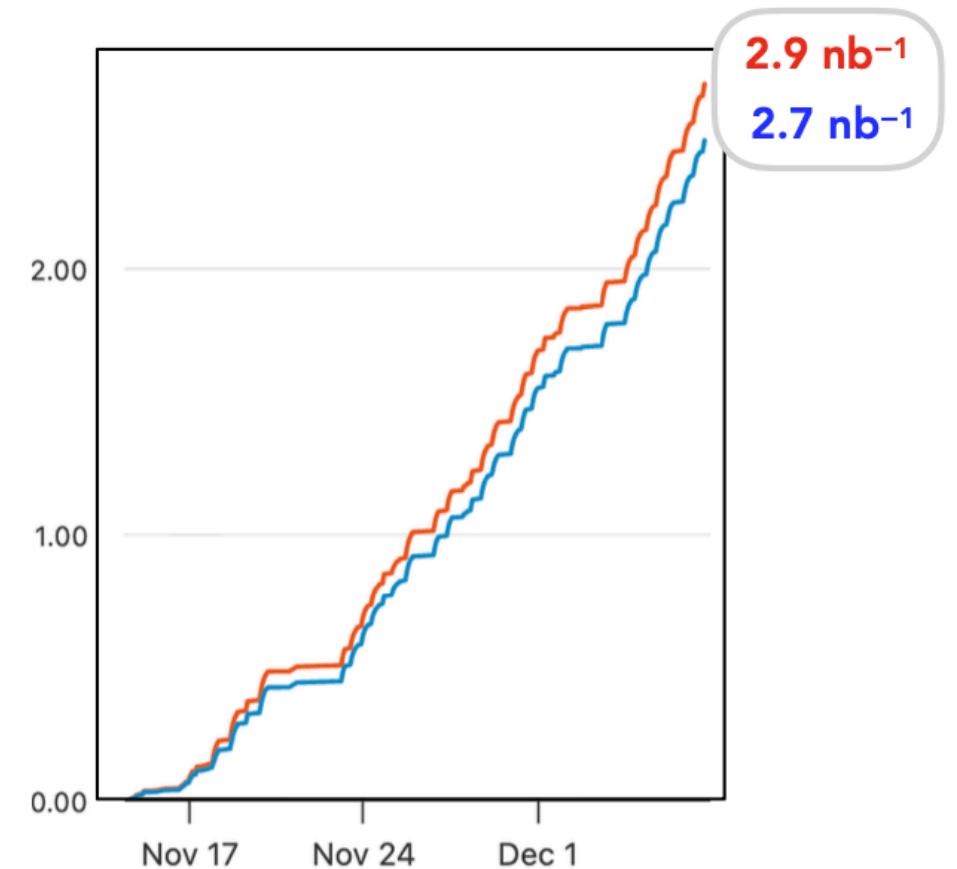
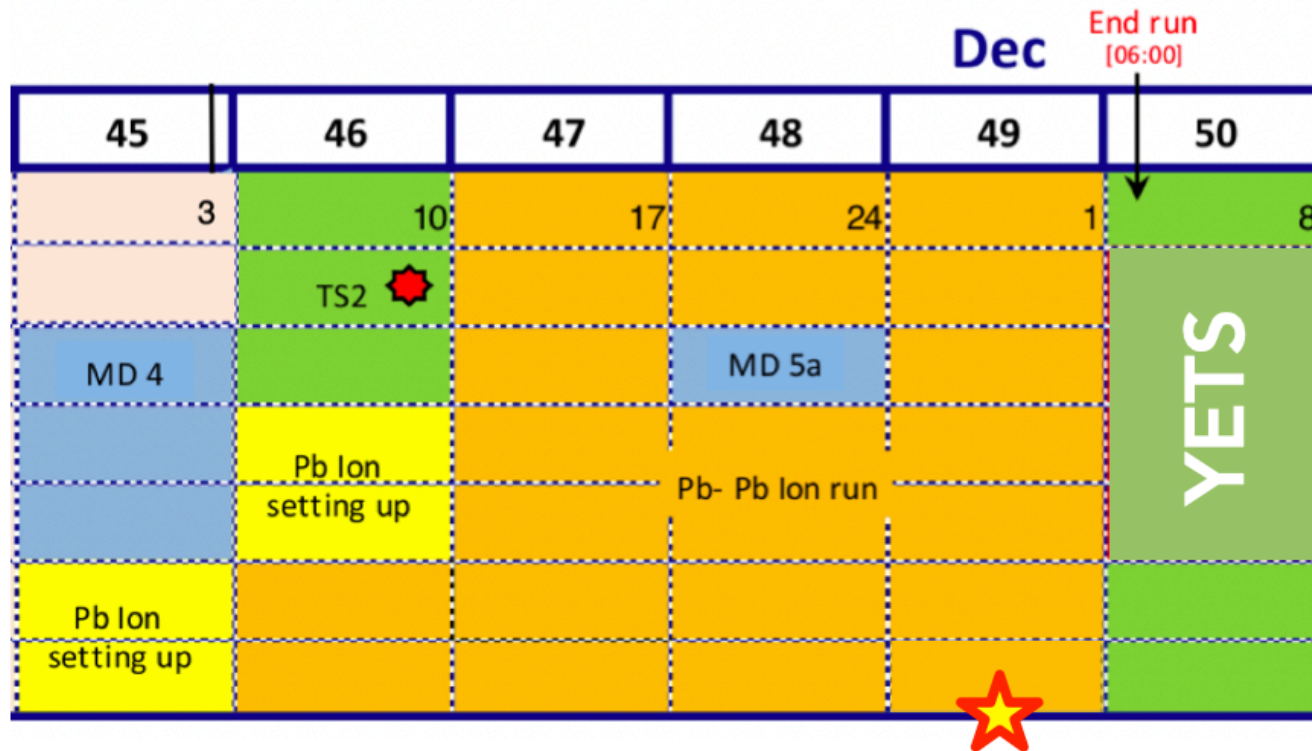
(nb ⁻¹)	target	delivered	ratio
ATLAS	0.8	8.2	10.3
ALICE	0.5	5.15	10.3
CMS	0.8	9.4	11.8
LHCb	0.5	5.75	11.5

Neon - Neon

(nb ⁻¹)	target	delivered	F
ATLAS	0.1	1.0	10
ALICE	0.1	0.91	9.1
CMS	0.1	0.91	9.1
LHCb	0.1	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

inject beams
~40 injections

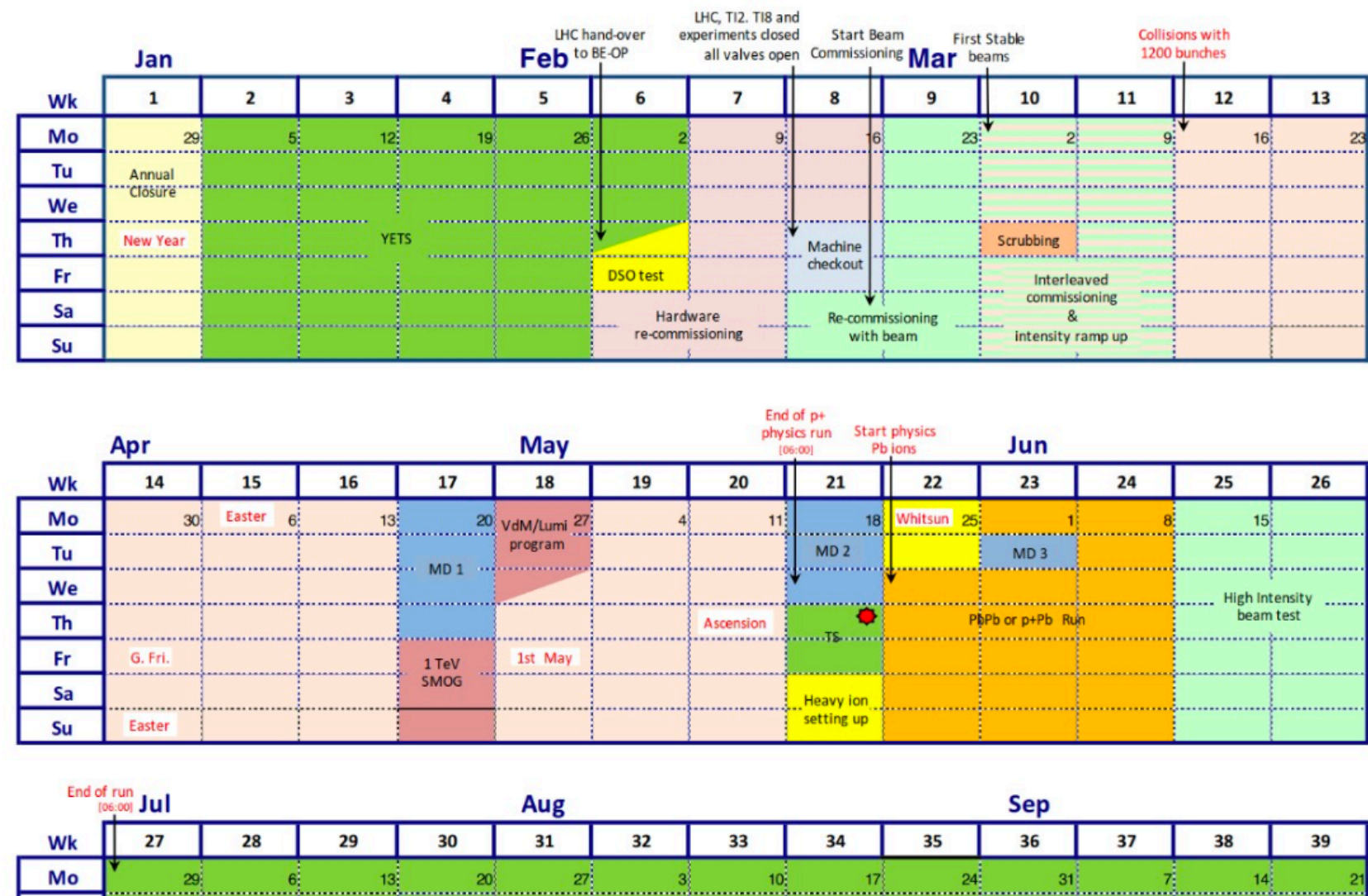
combined ramp,
squeeze and rotate
6.8 TeV / $\beta^* = 1.2m$
crossing angles rotated
6.8 TeV / beam $\Rightarrow \sqrt{s} = 13.6$ TeV

establish
collisions

STABLE
BEAMS

Специальные даты 2026:

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



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)

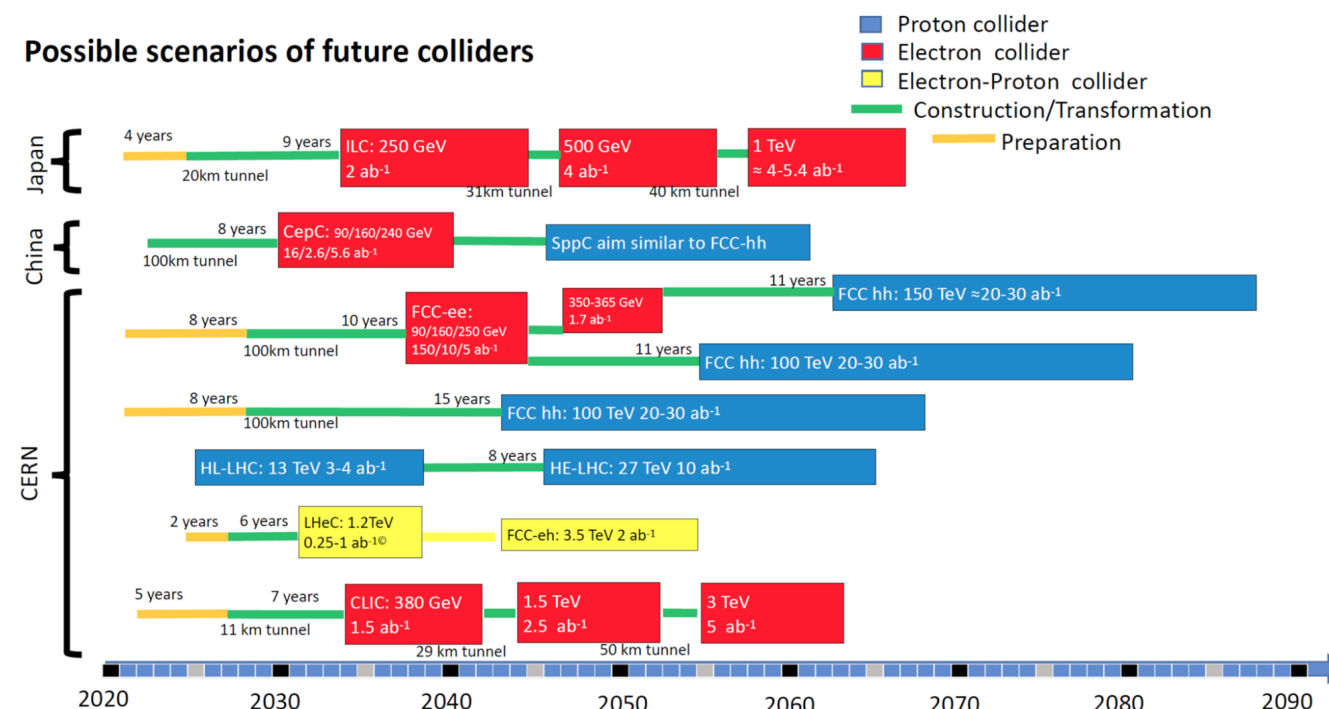
FCC (Future Circular Collider):

- 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:
 1. [Future Circular Collider Feasibility Study Report Volume 1: Physics and Experiments](#)
 2. [Future Circular Collider Feasibility Study Report Volume 2: Accelerators, technical infrastructure and safety](#)
 3. [Future Circular Collider Feasibility Study Report Volume 3: Civil Engineering, Implementation and Sustainability](#)
- 2027 - 2028 Решение CERN Member States и международных партнеров
- 2030е: Начало строительства
- Середина 2040х: Начало эксплуатации FCC-ee
 - A. (примерно 15 лет, ~ 90 - 360 GeV)
- ~ 2070: FCC-hh, Начало эксплуатации
 - B. (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)

Possible scenarios of future colliders



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 rump+squeeze+rotation в один шаг)
- 57 дней pp физики (~ 60 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 (ee+: 90/160/240/360 GeV)
- ~mid 2040 FCC-ee (ee+: 90-360 GeV)
- > 2040 CEPC-SppS (pp: 75 - 125 TeV, 10-20 ab⁻¹)
- ~2070 FCC-pp (pp: 100 TeV ~ 30 ab⁻¹)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!