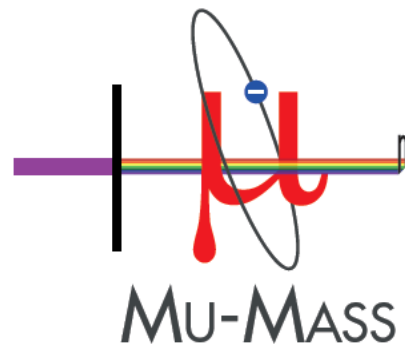


# М $\mu$ -MASS – эксперимент по лазерной спектроскопии мюония

Никита Жаднов, Артём Головизин, Irene Cortinovis, Gianluca  
Janka, Ben Ohayon, Paolo Crivelli

[nik.zhadnov@yandex.ru](mailto:nik.zhadnov@yandex.ru)

**ETH** zürich

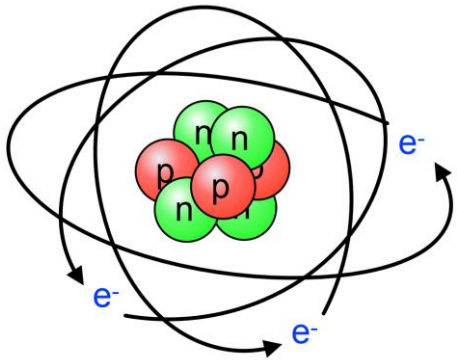


PAUL SCHERRER INSTITUT  
**PSI**

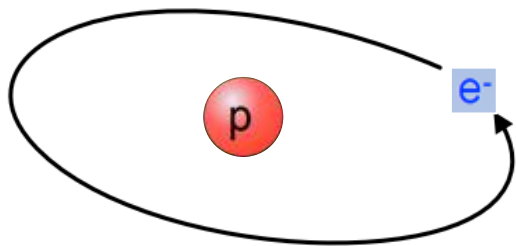
# Что такое экзотические атомы?

Обыкновенные атомы:

Состоят из положительного ядра и отрицательных электронов:

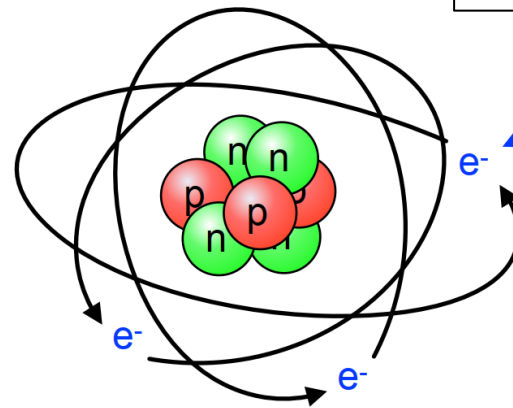


Водород



Экзотические атомы:

1) Электрон заменяют отрицательной частицей:

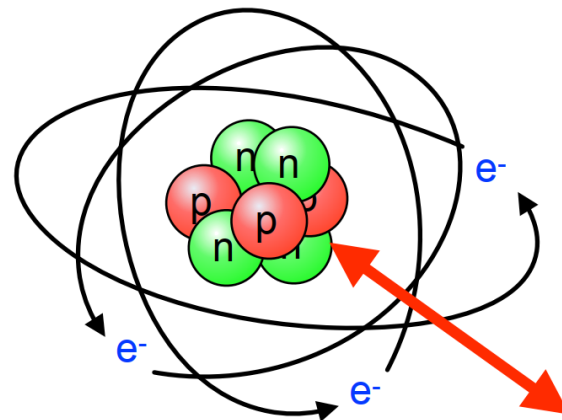


$\mu^-, \pi^-, K^-, \bar{p}$

Мюонный водород  
Пионный гелий  
Антипротонный гелий

...

2) Ядро заменяют положительной частицей:

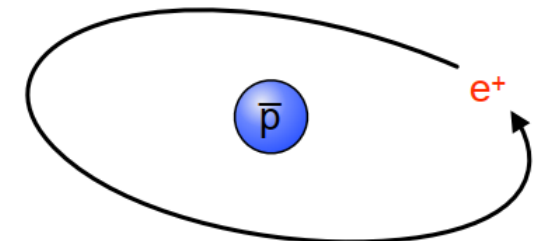


Позитроний  
Мюоний  
Пионий

...

$e^+, \mu^+$

3) Заменяют везде



Антиводород

# Зачем изучать мюоний?

- Полностью лептонная система

Отсутствуют эффекты, связанные с конечным размером частиц

Пренебрежимо малое влияние слабого взаимодействия

- Прецизионные измерения

Простейший атом

Время жизни 2.2 мкс  
Возможность спектроскопии

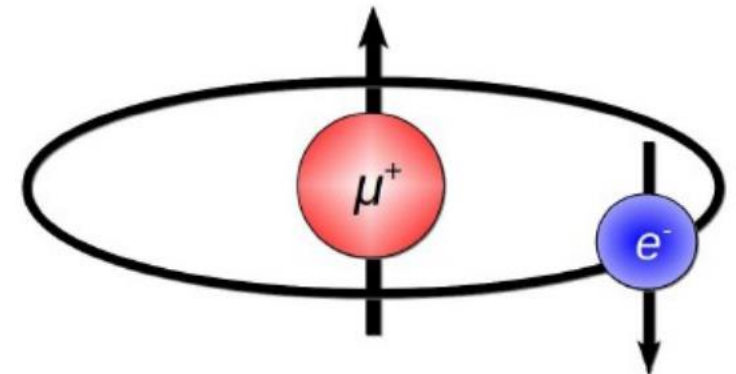
Прямое сравнение теории с экспериментом

Поиски “новой физики”

Уточнение фундаментальных констант:

$m_\mu$ ,  $R_\infty$ , ...

Muonium (Mu)

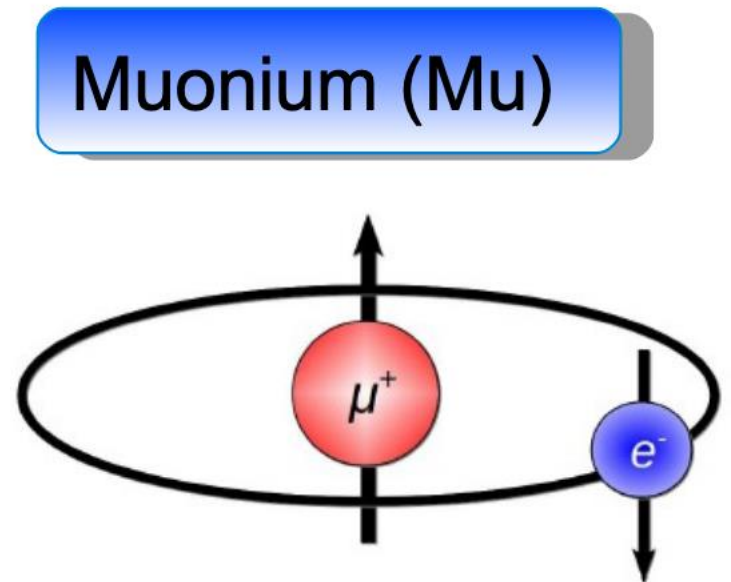
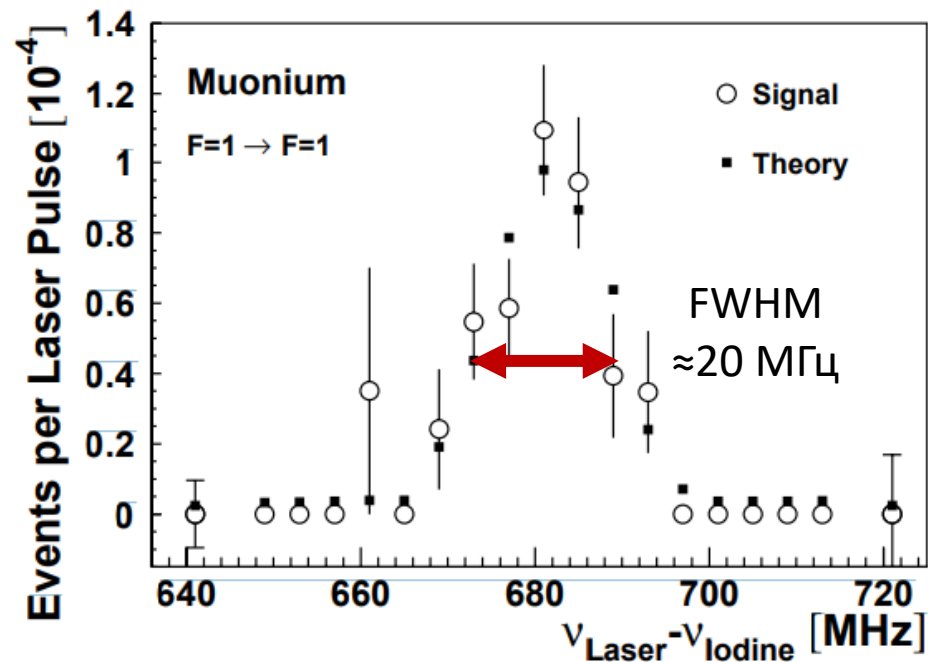


# Переход 1S-2S в мюонии

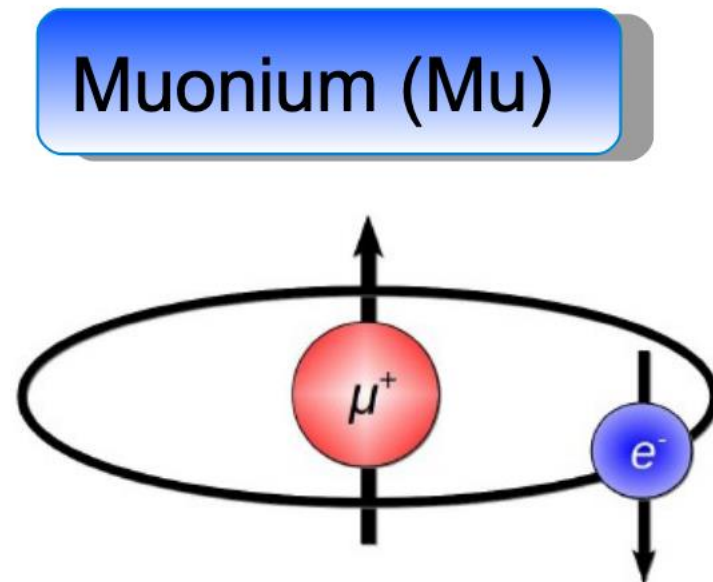
Спектроскопия импульсным лазером – лучшее на сегодняшний день измерение частоты 1S-2S:

Phys. Rev. Lett. **84**, 1136 (2000 г.)

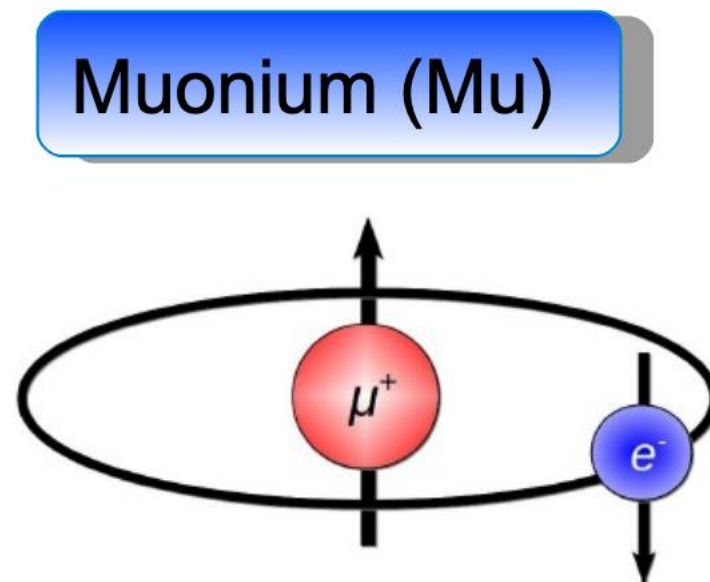
- 245528941.0(9.8) МГц (измерение)
- 245528935.4(1.4) МГц (теория)



# Цель проекта Mu-MASS: 1S-2S непрерывным лазером



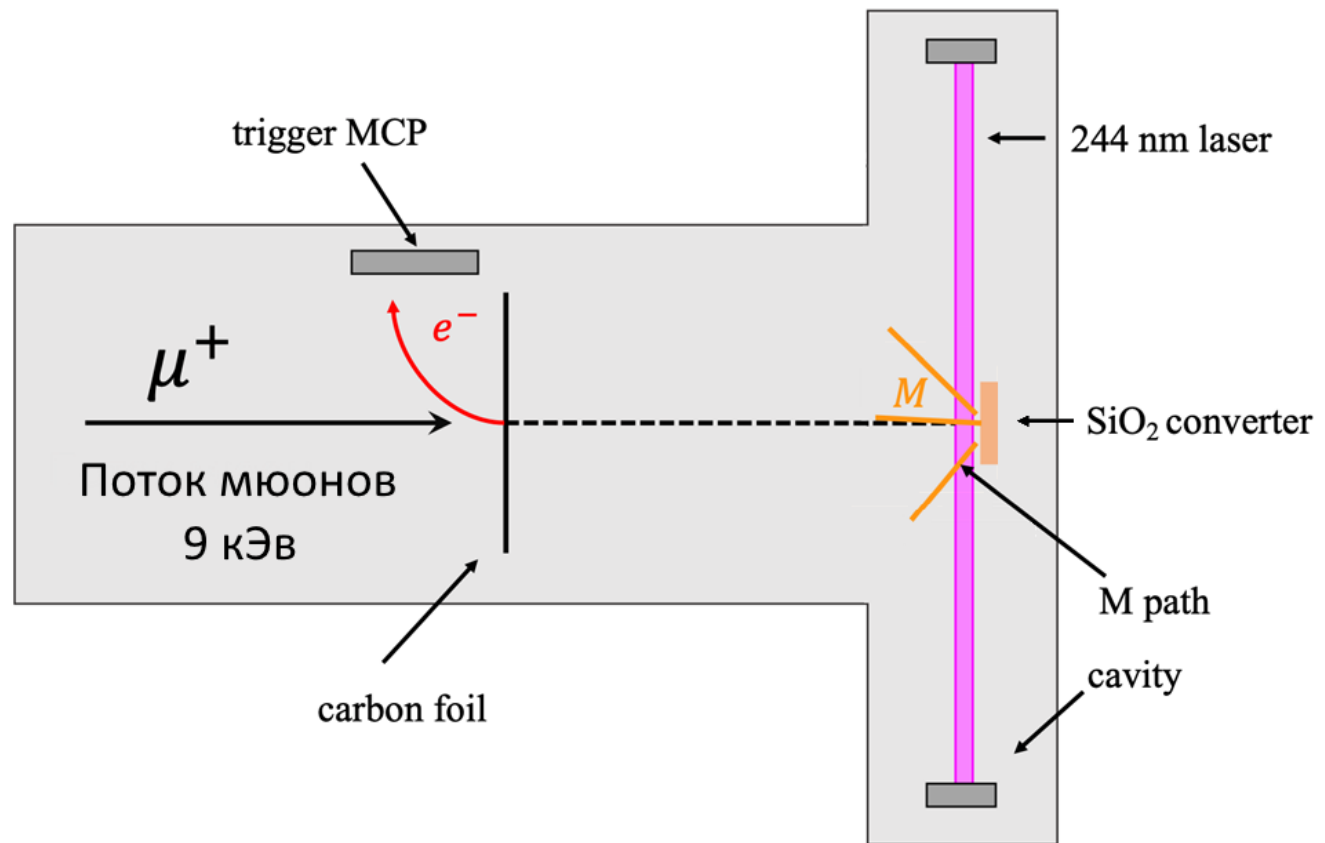
# Цель проекта Mu-MASS: 1S-2S непрерывным лазером



- Измерение 1S-2S с точностью 10 кГц
- Измерение массы мюона с точностью 1 ppb
- Измерение  $q_\mu/q_e$  с точностью 1 ppt
- Впервые спектроскопия непрерывным лазером

# Этапы эксперимента Mu-MASS

Мюоны низкой энергии

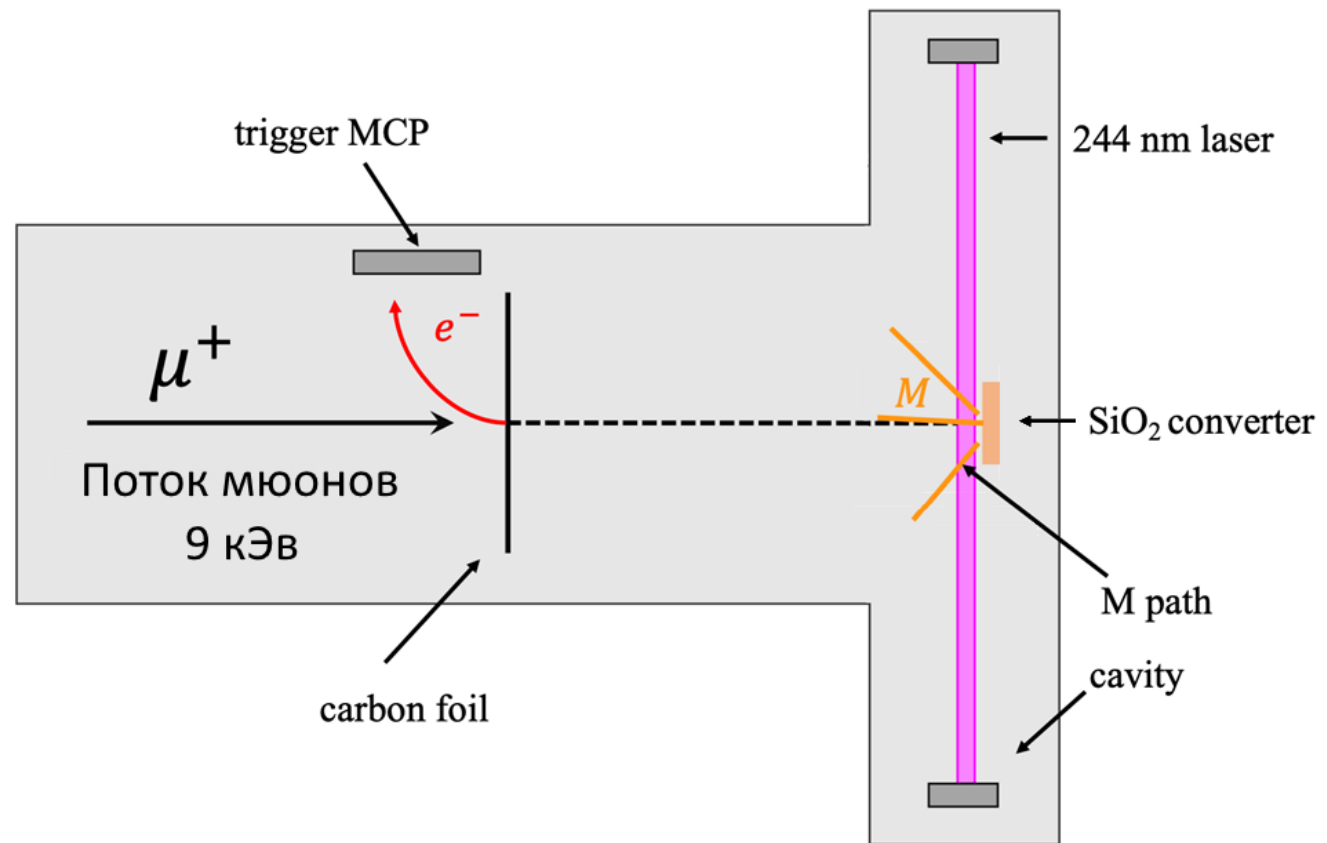
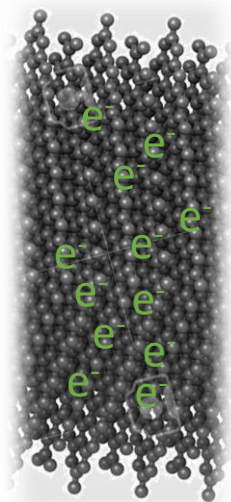


# Этапы эксперимента Mu-MASS

Мюоны низкой энергии

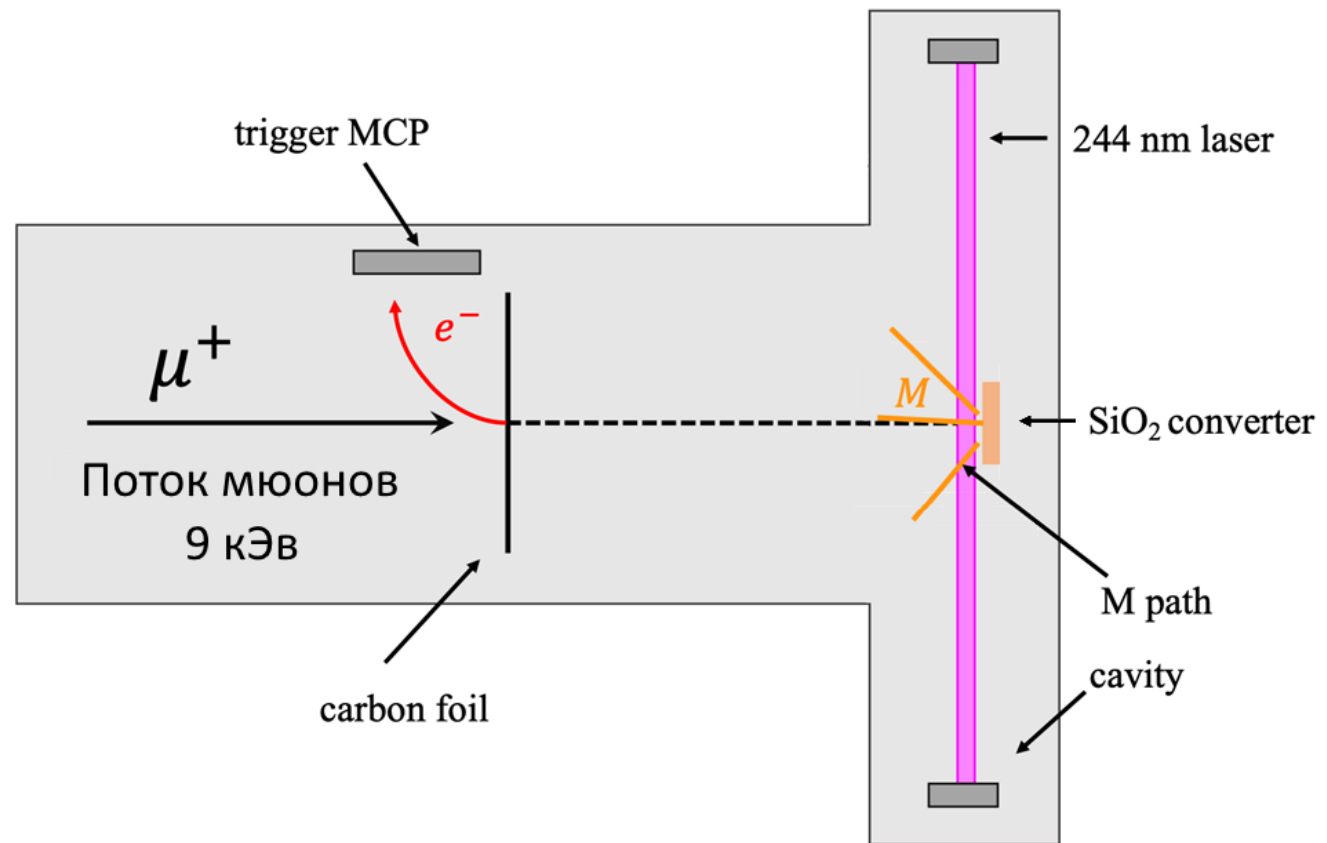
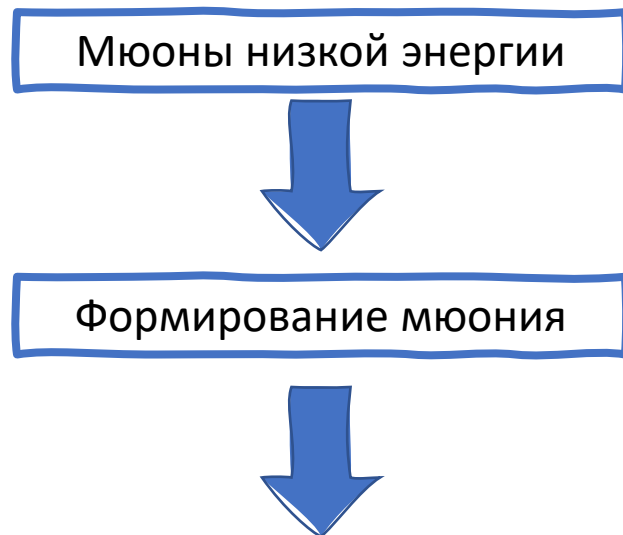


Ultrathin (10nm)  
Carbon Foil

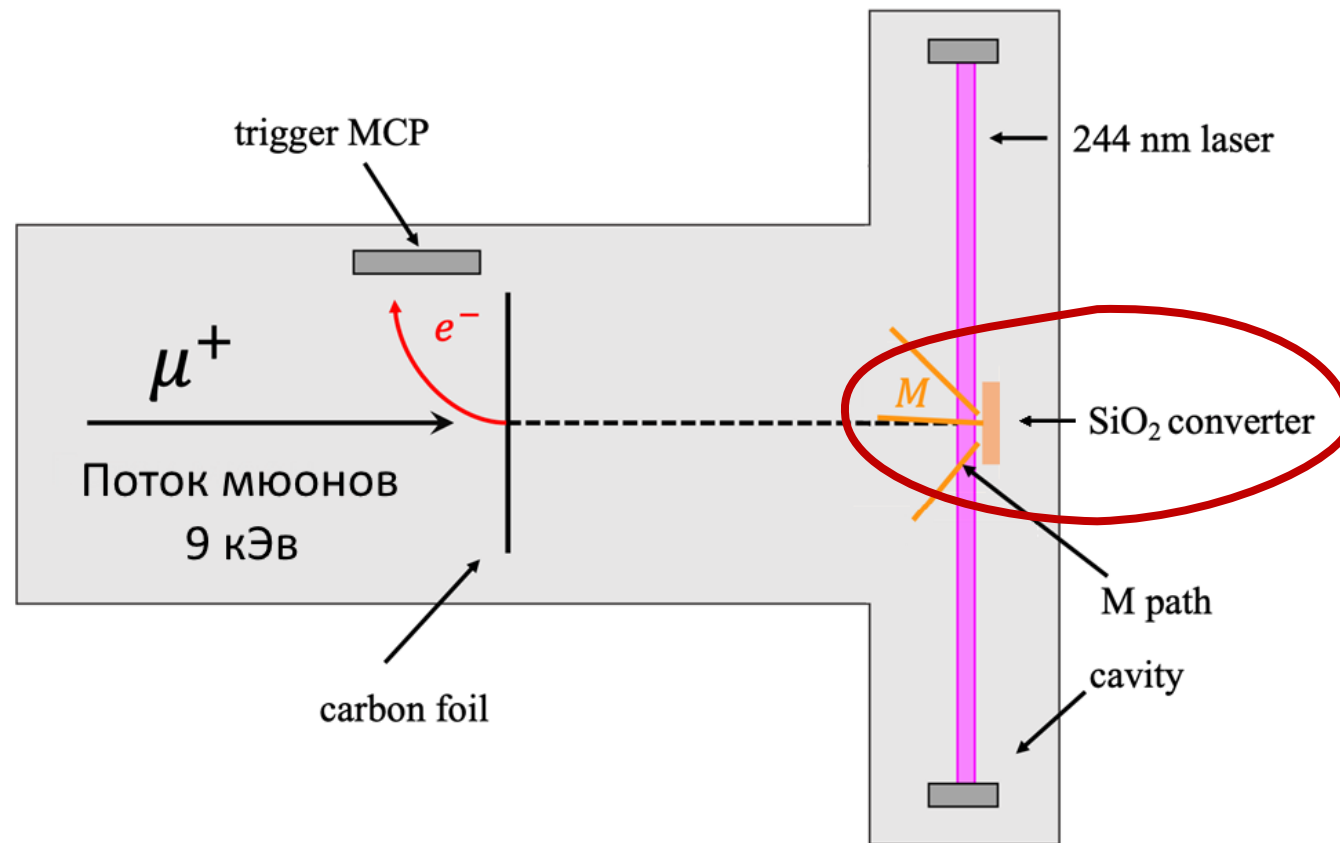




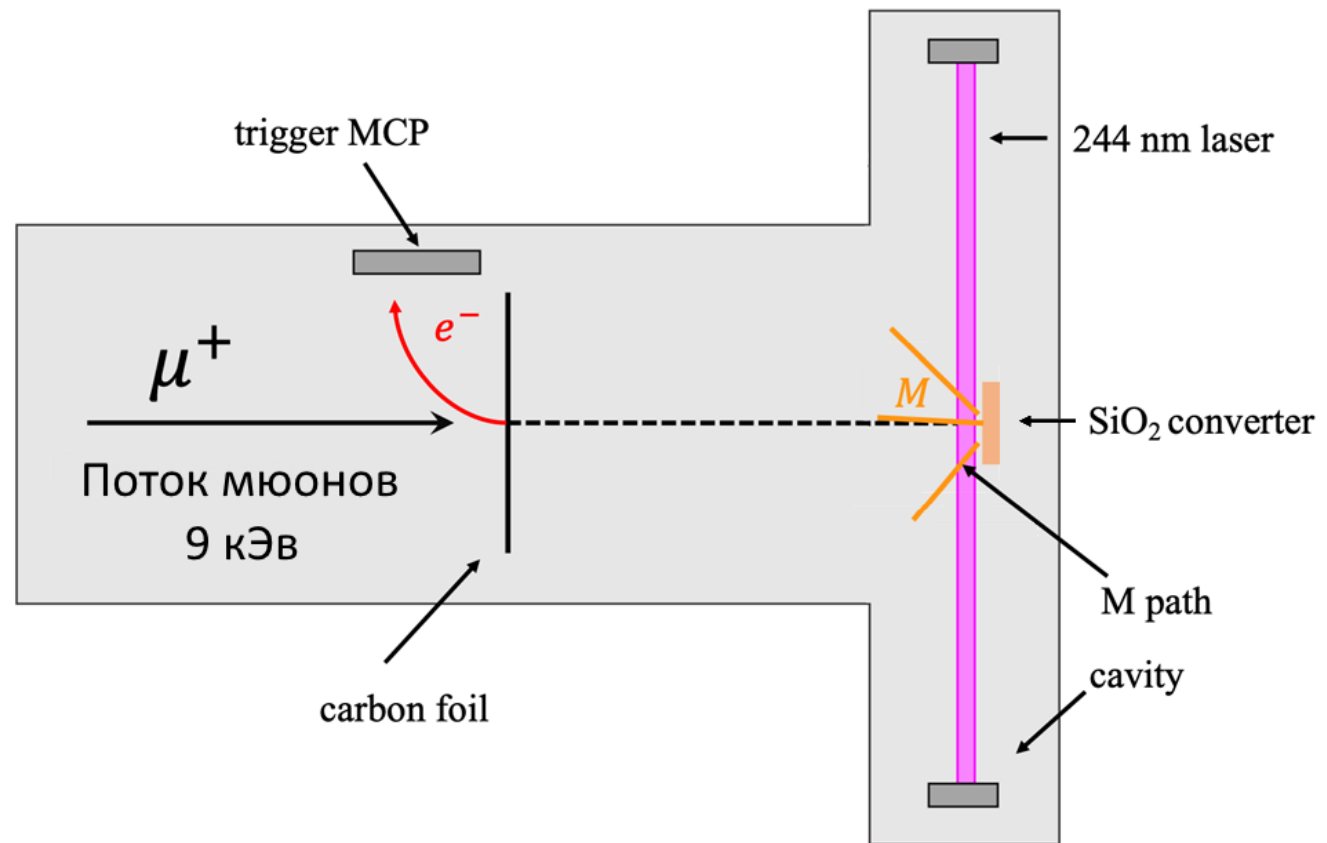
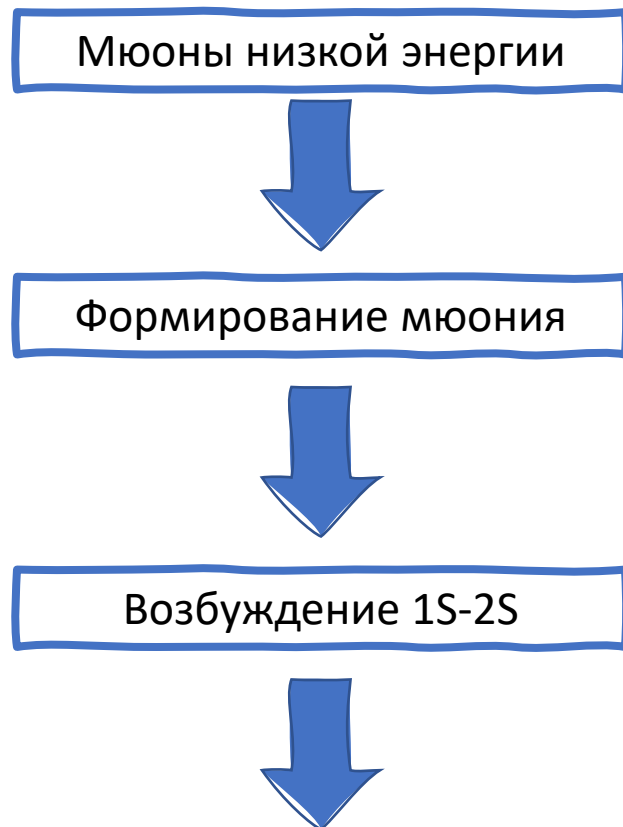
# Этапы эксперимента Mu-MASS



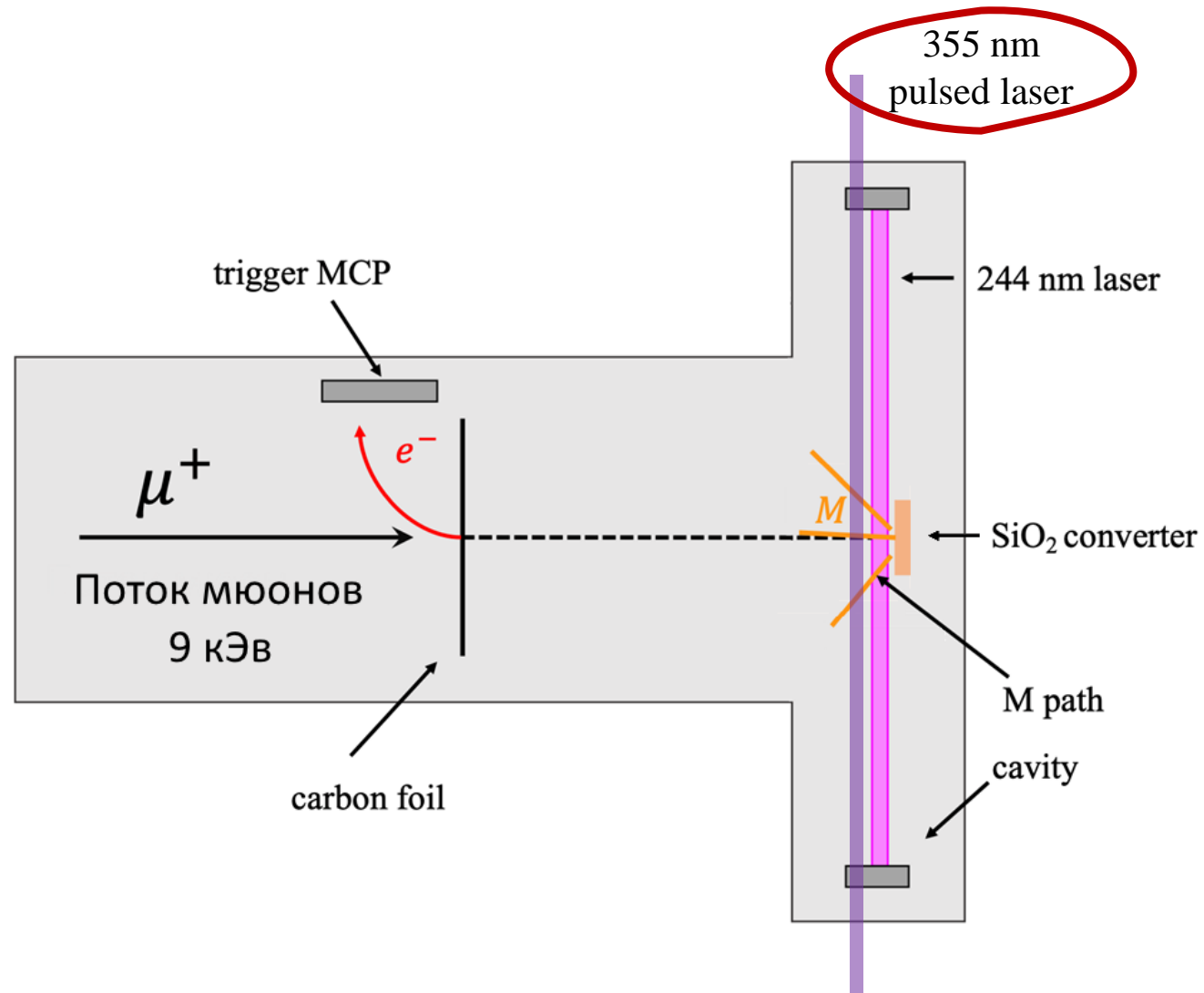
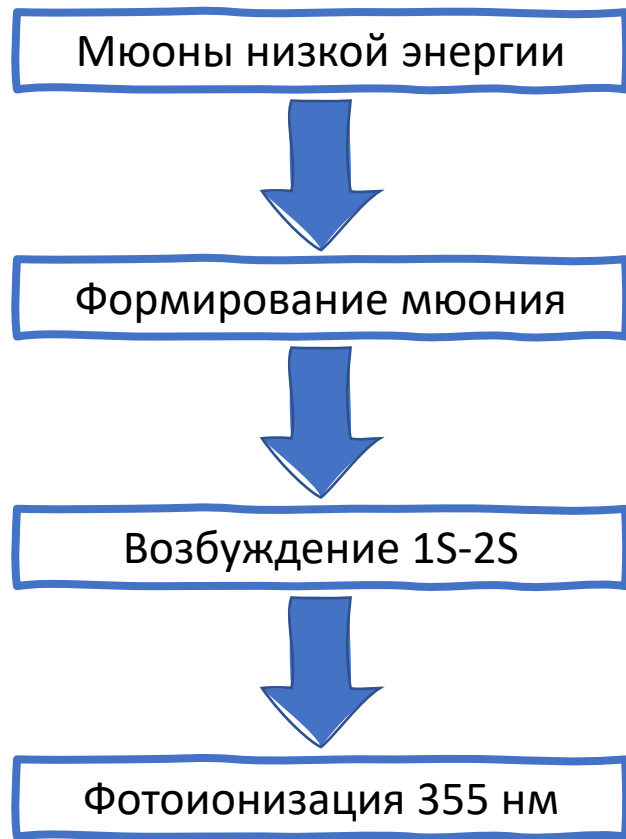
# Этапы эксперимента Mu-MASS



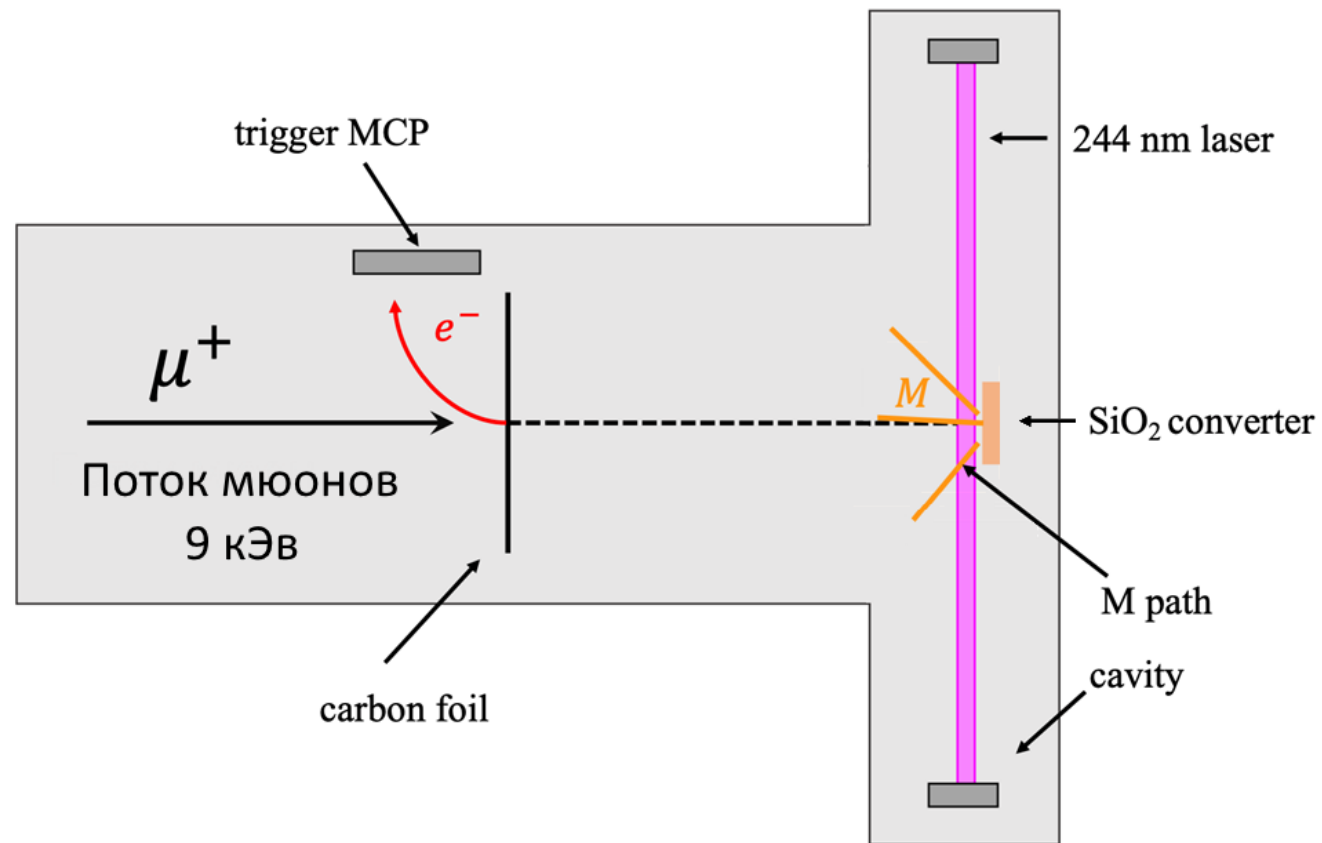
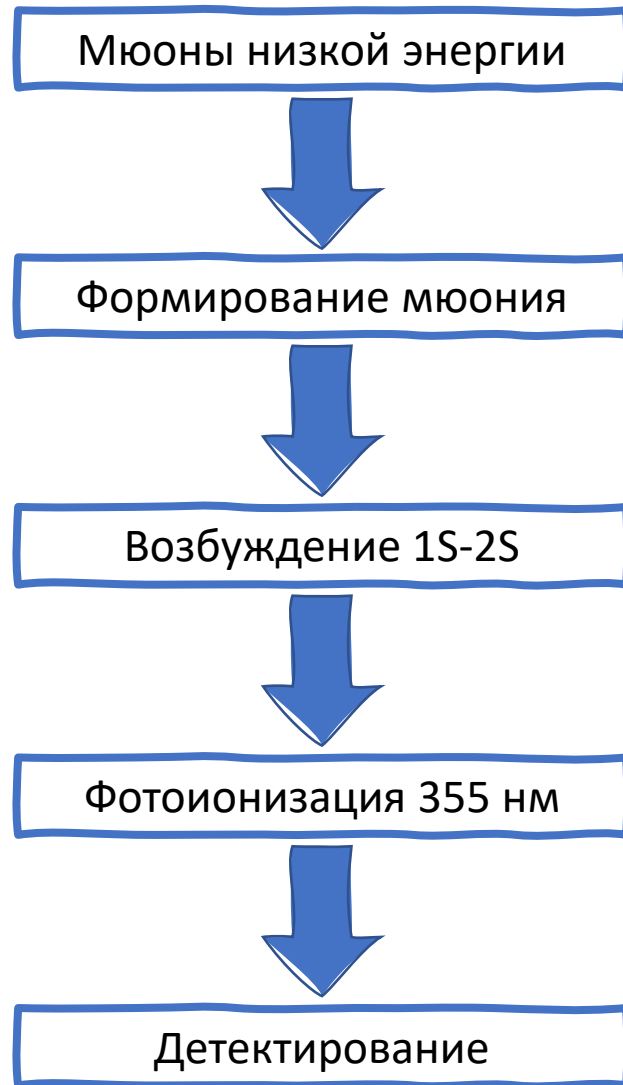
# Этапы эксперимента Mu-MASS



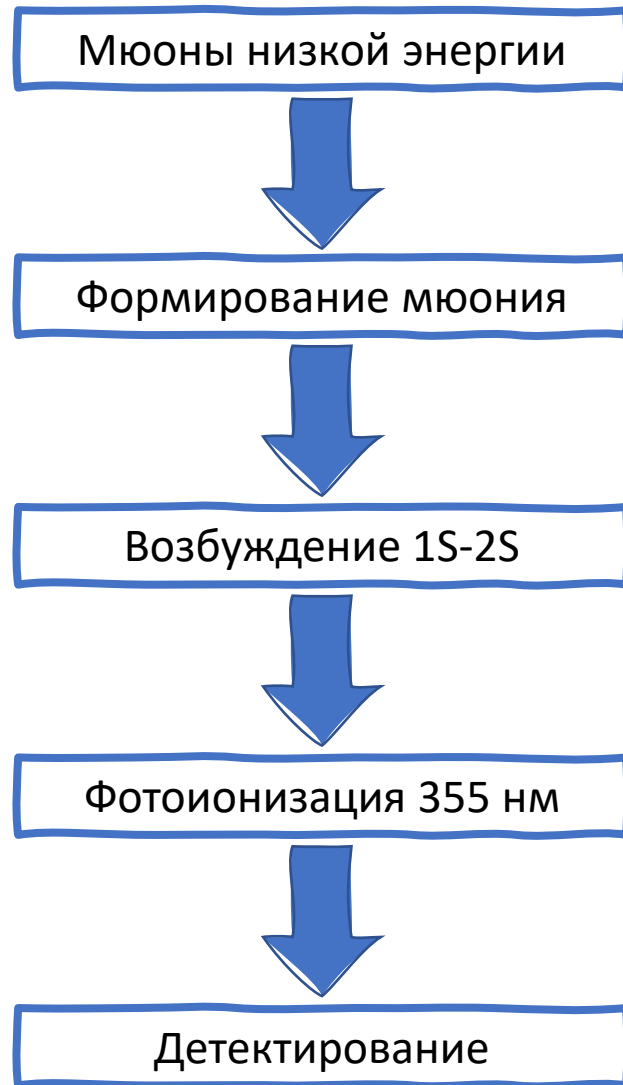
# Этапы эксперимента Mu-MASS



# Этапы эксперимента Mu-MASS

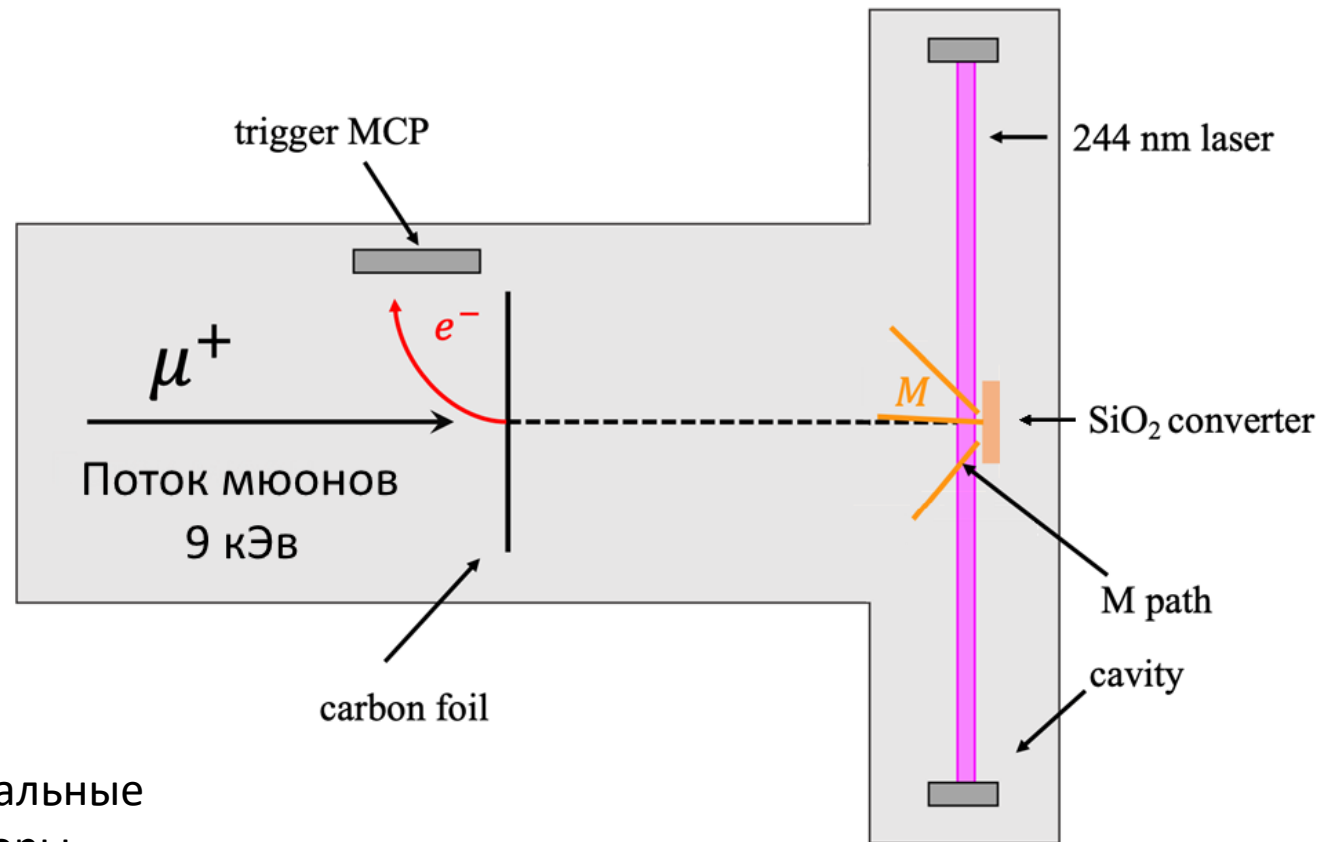


# Этапы эксперимента Mu-MASS

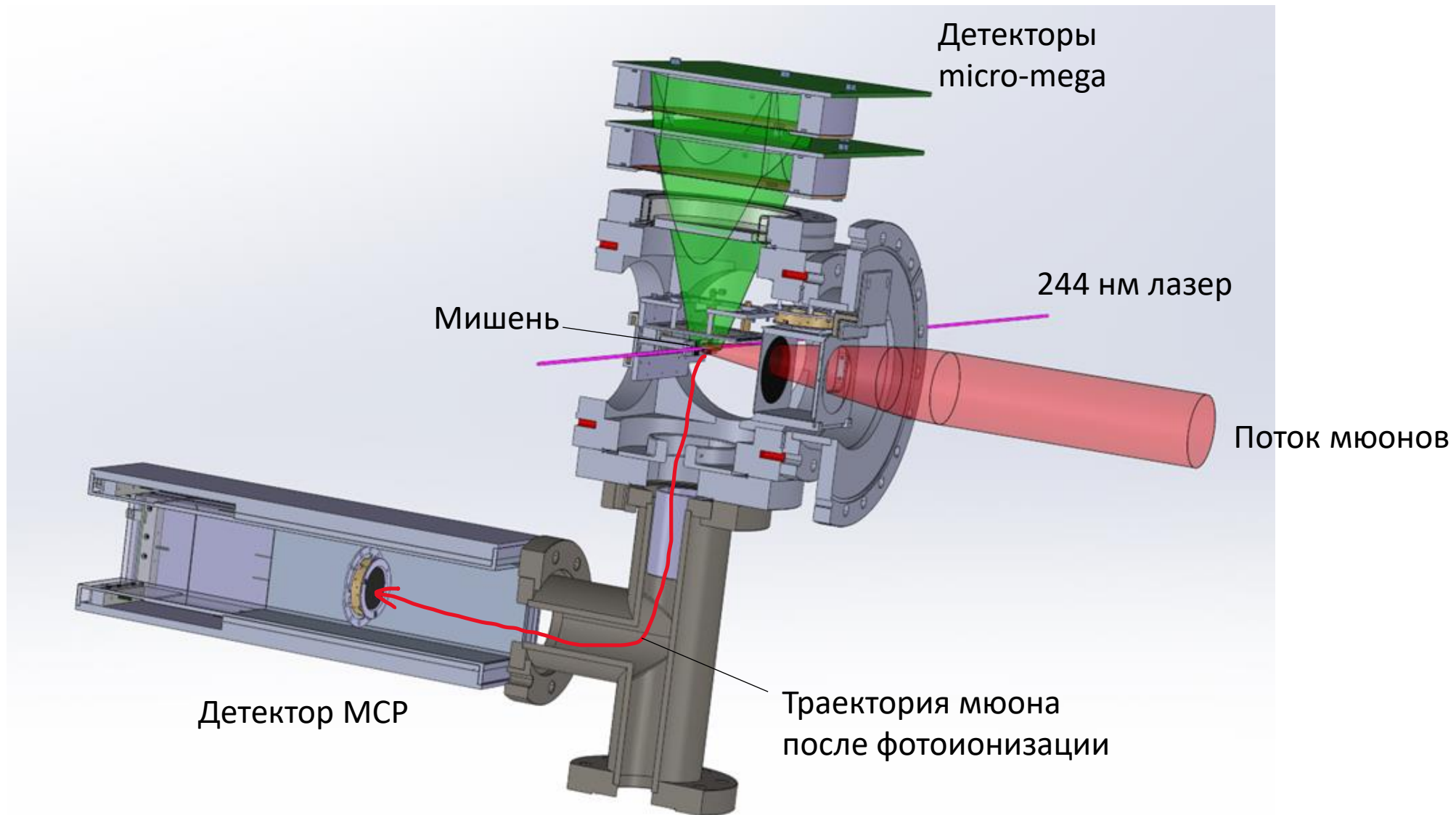


Микроканальные детекторы

Сцинтилляторы



# Этапы эксперимента Mu-MASS



# Основные сложности эксперимента Mu-MASS

1) Низкая вероятность возбуждения

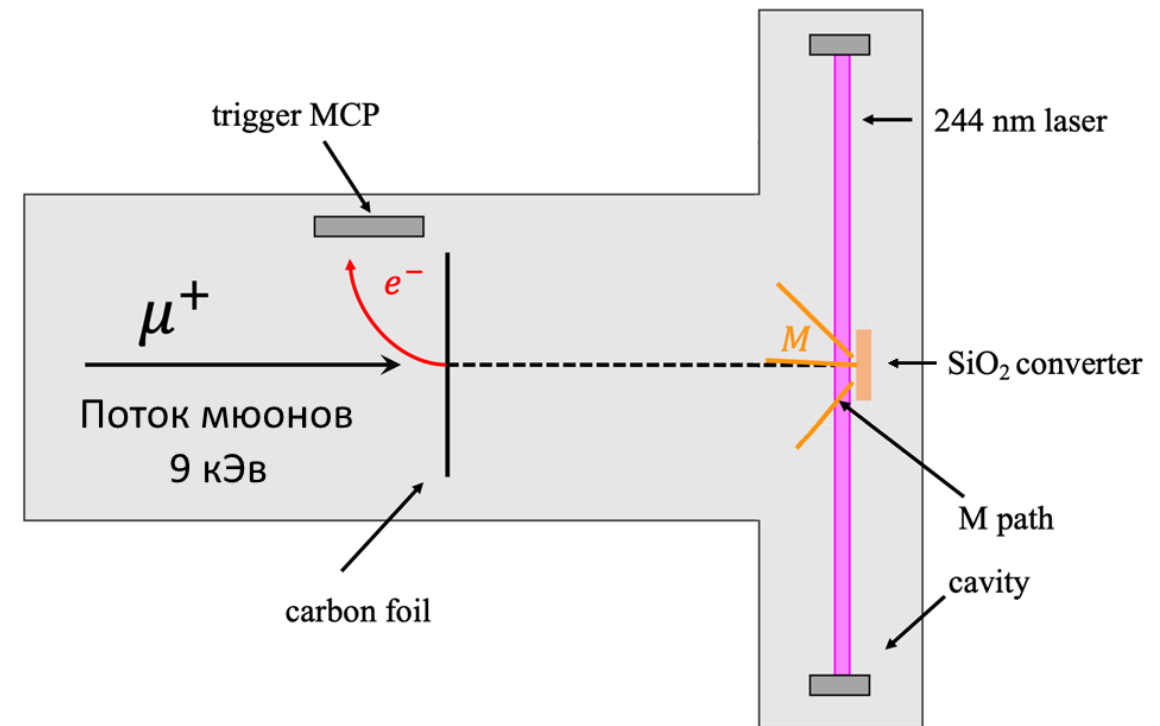


Нужно лазерное излучение высокой мощности в УФ

Необходим очень малый паразитный сигнал

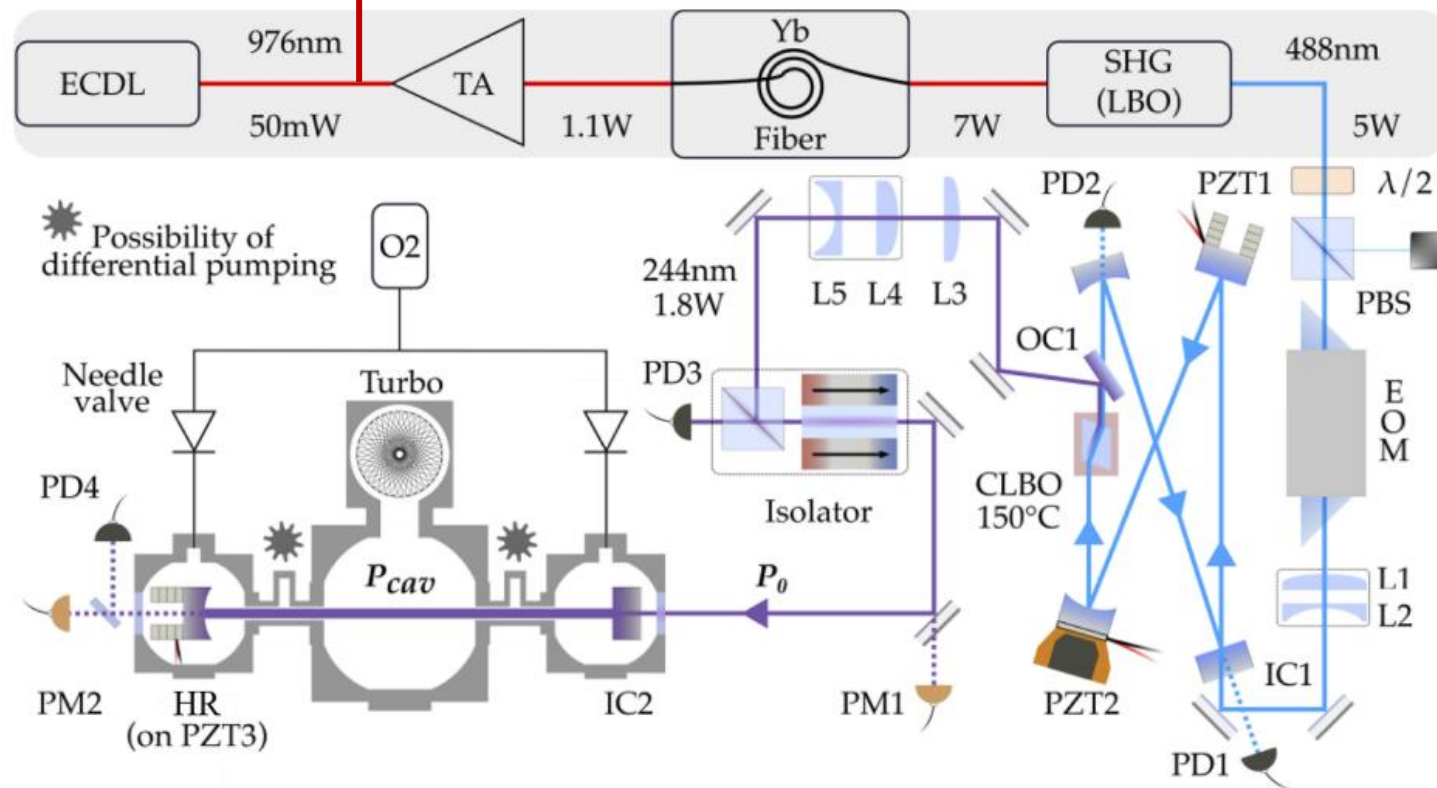
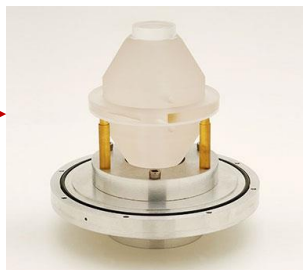
2) Большой размер пучка мюонов в сравнении с лазерным лучом

3) Высокая скорость мюония  $\approx 1$  мм/с

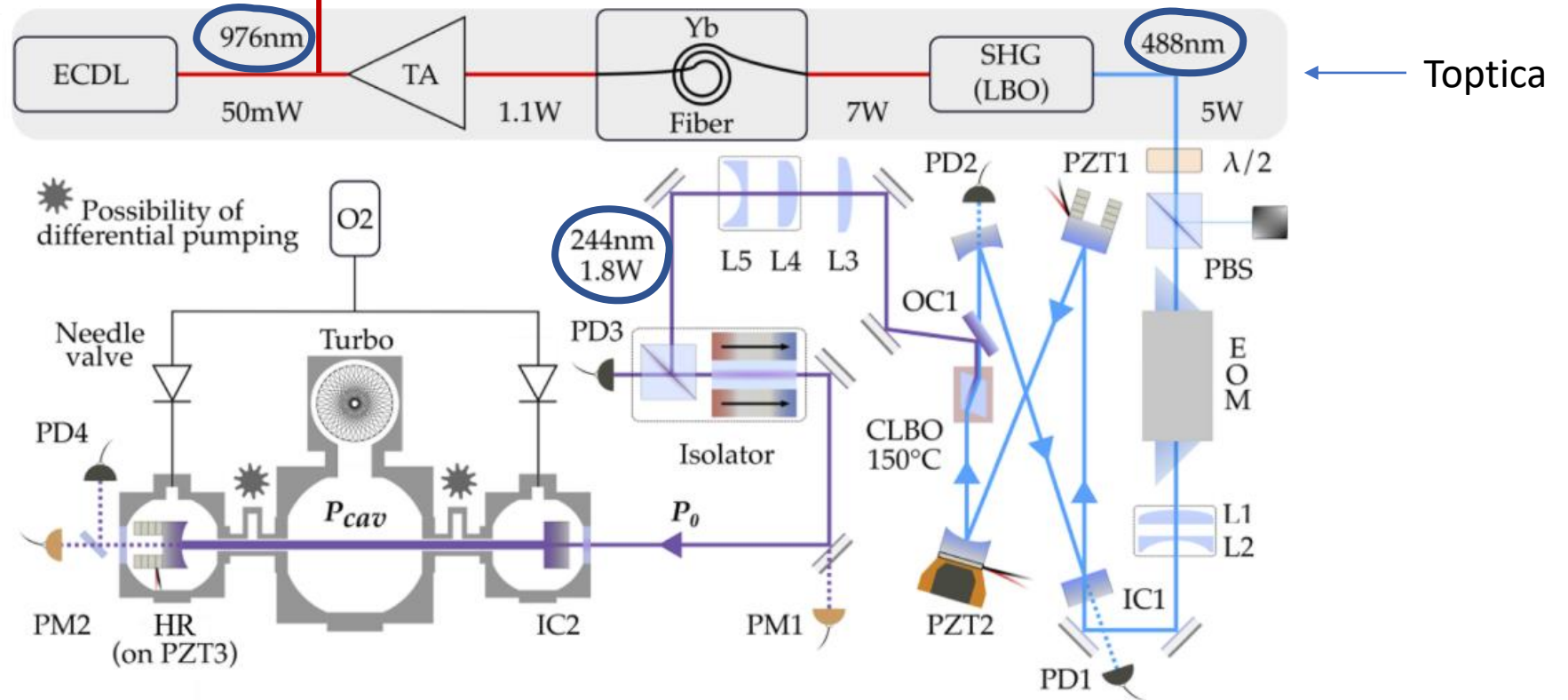
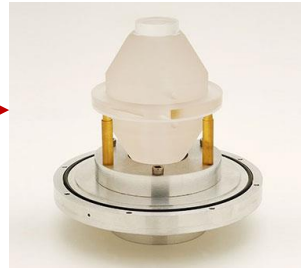




# Лазерная система 244 нм

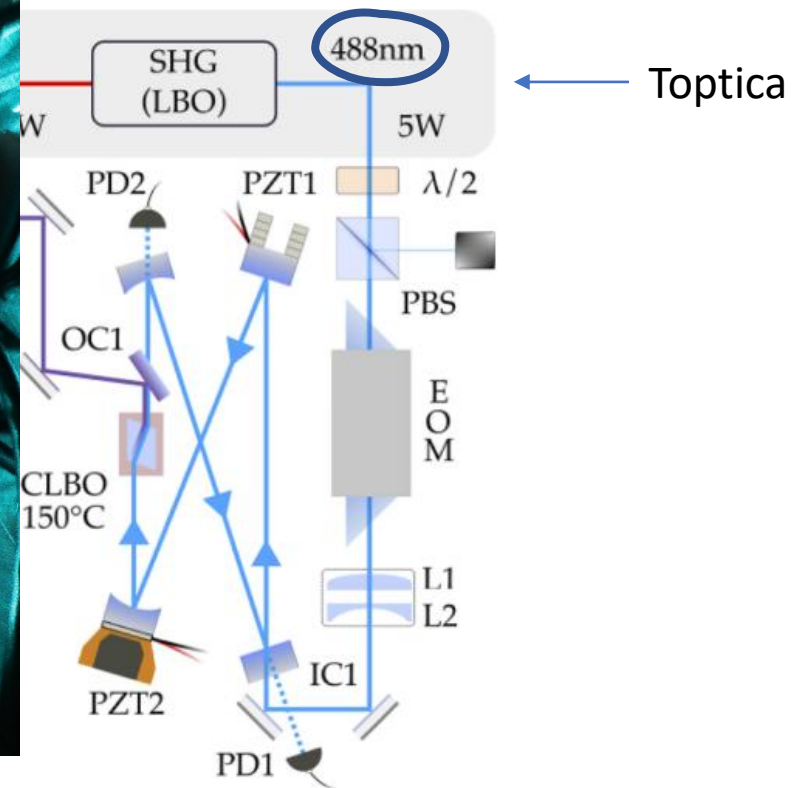
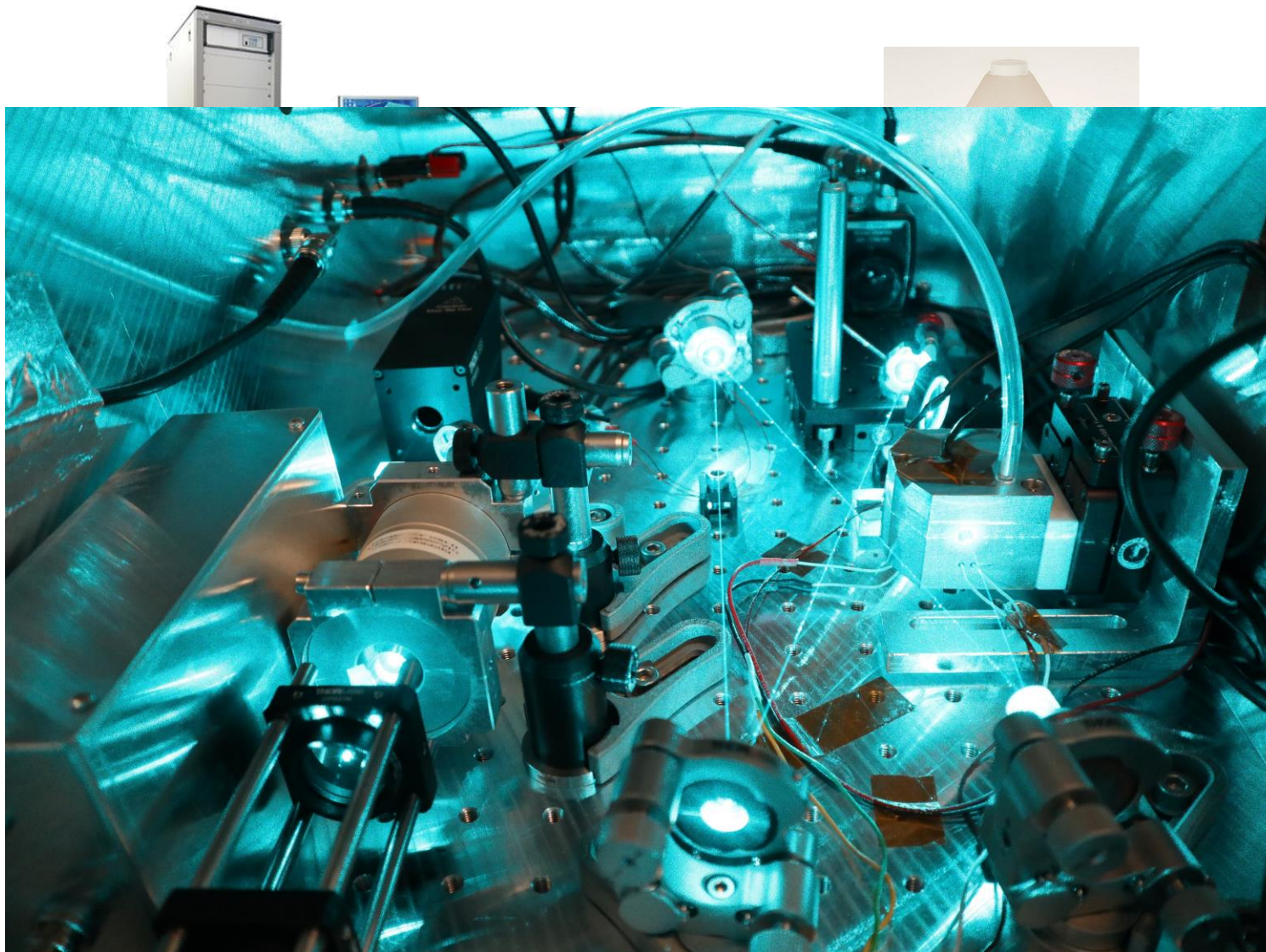


# Лазерная система 244 нм

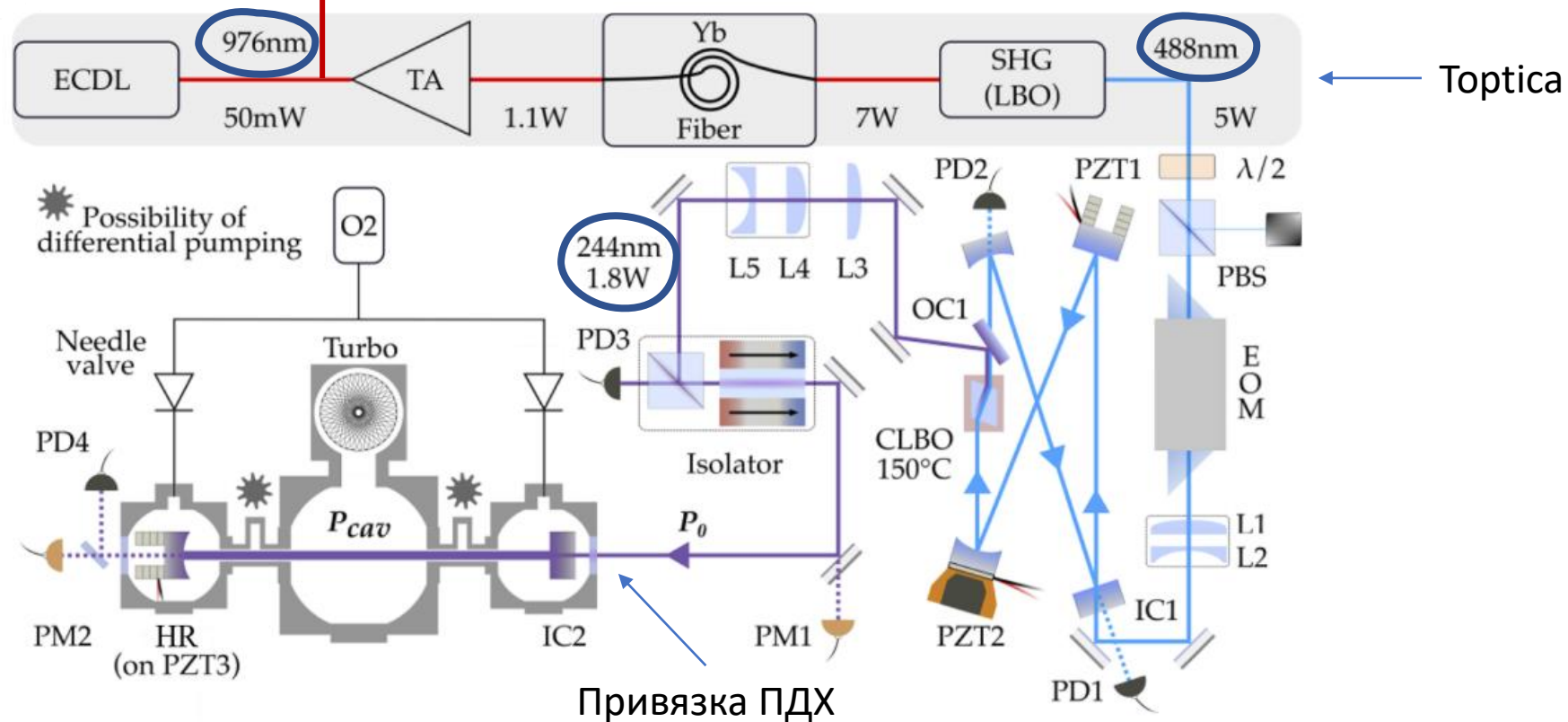
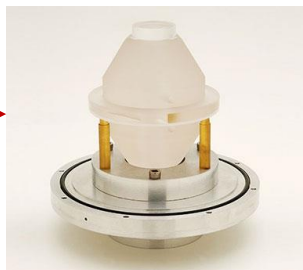




# Лазерная система 244 нм

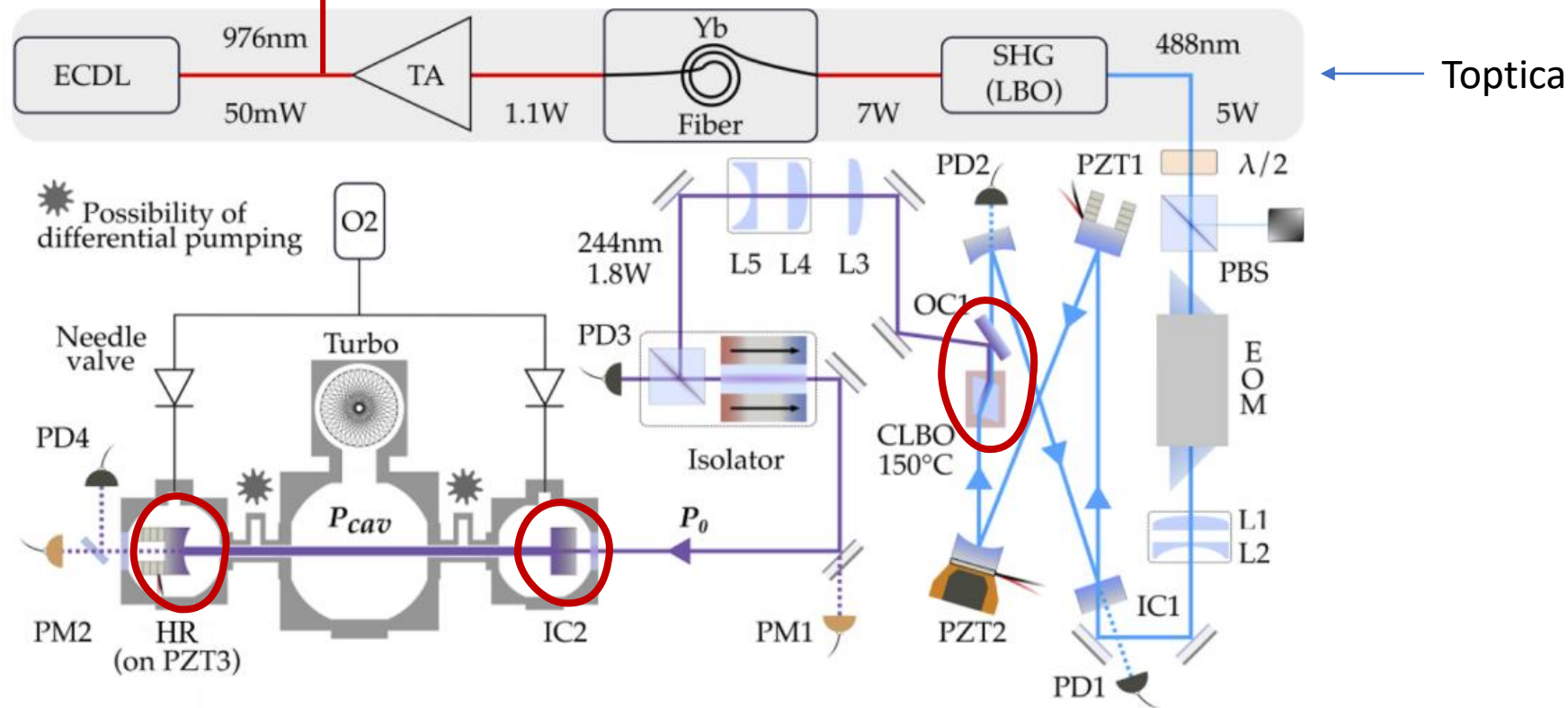
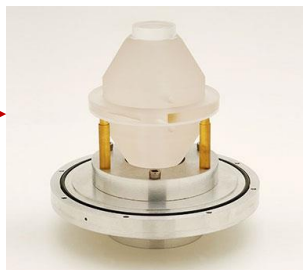


# Лазерная система 244 нм



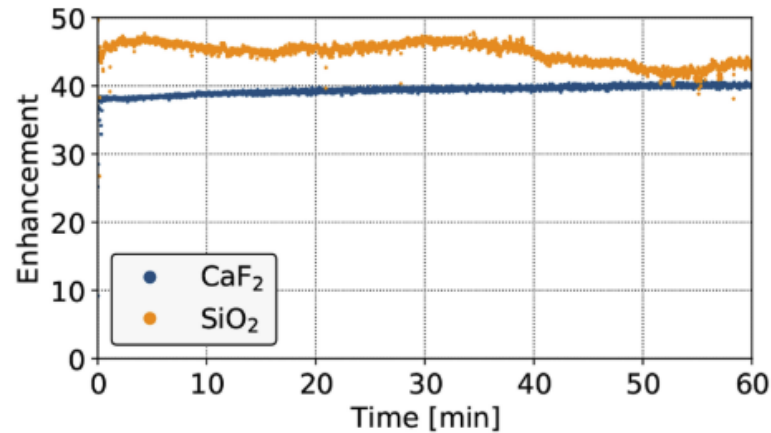


# Лазерная система – деградация зеркал в УФ

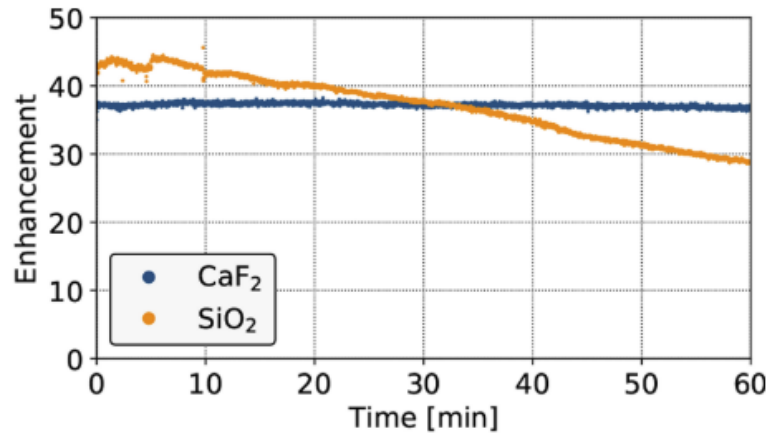


# Лазерная система – деградация зеркал в УФ

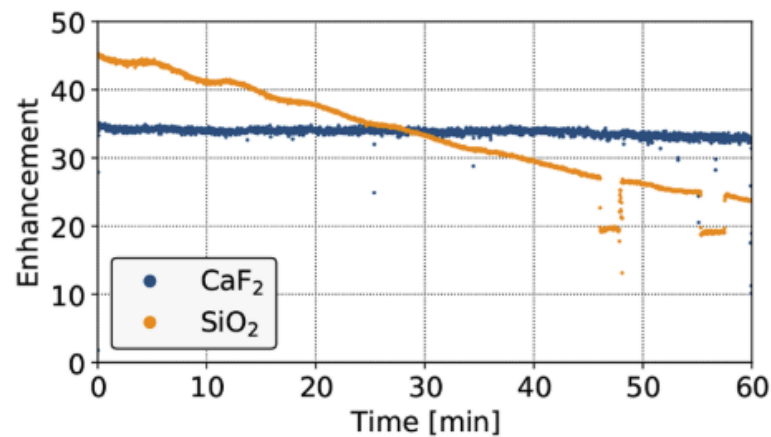
Решение:  
Зеркала на  
основе  $\text{CaF}_2$



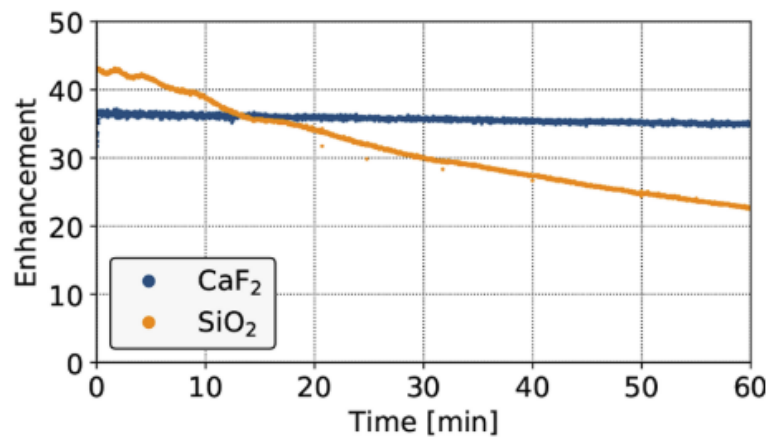
(a) 1.5 W intra-cavity power for both input couplers.



(b) 3 W intra-cavity power for both input couplers.

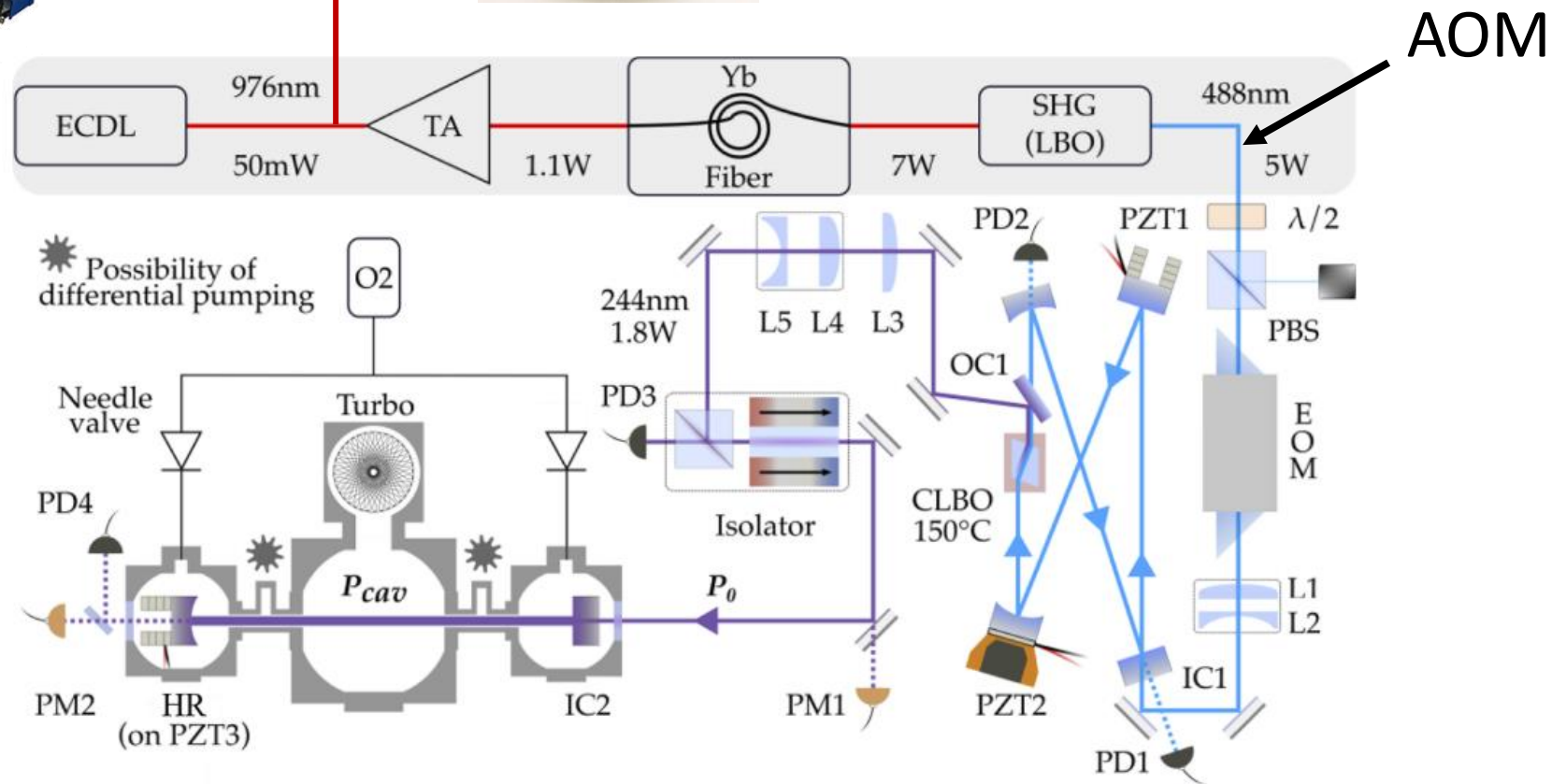
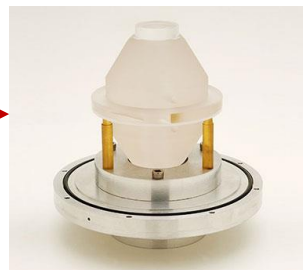


(c) 5 W intra-cavity power for fluoride-IC,  
5.5 W start power for oxide-IC.

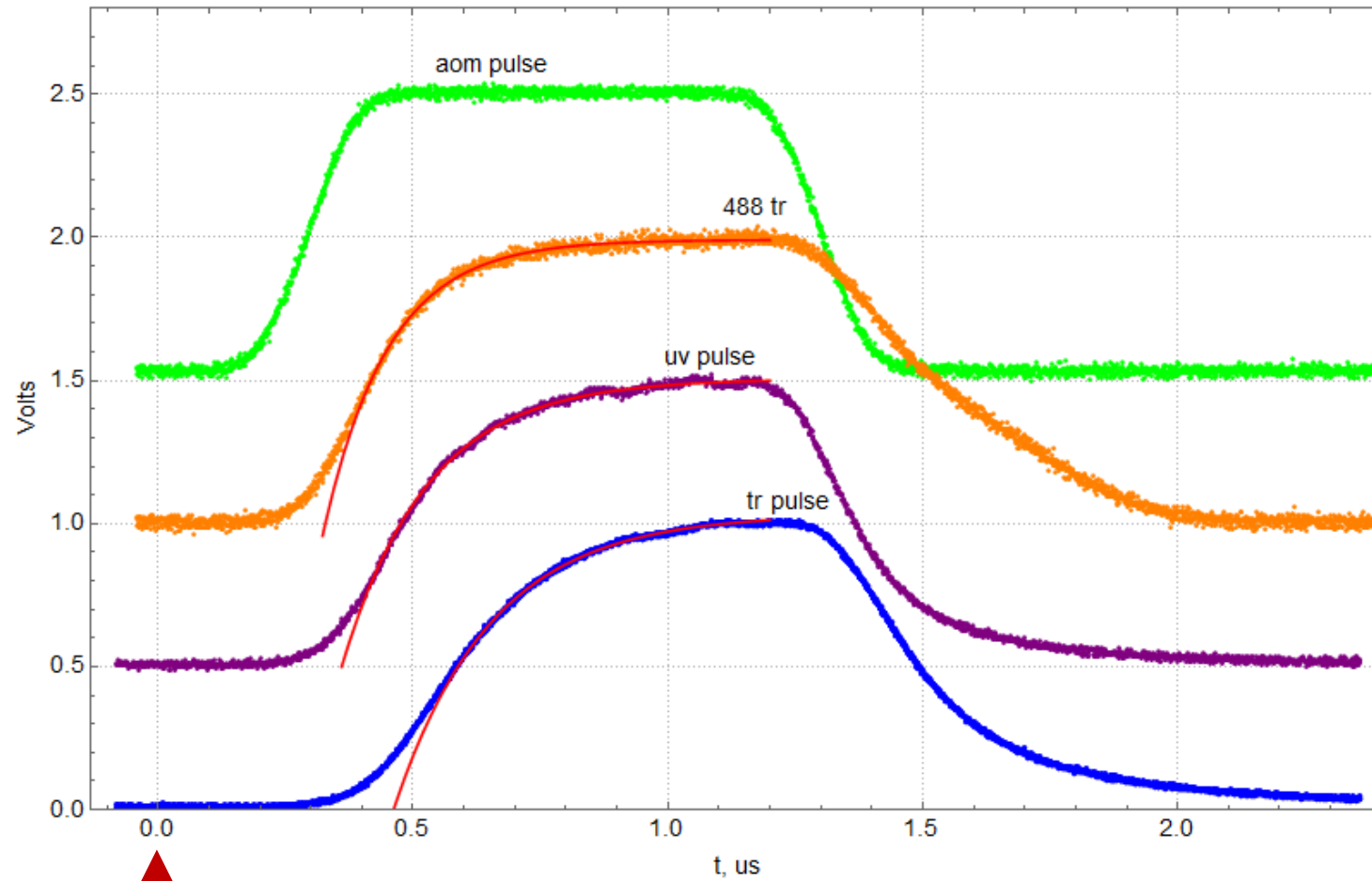


(d) 10 W intra-cavity power for fluoride-IC,  
9 W start power for oxide-IC.

# Импульсное повышение мощности 244 нм



# Импульсное повышение мощности 244 нм



330 ns delay, then exp  
rise  $t=128$  ns

360 ns delay, then exp  
rise  $t=169$  ns

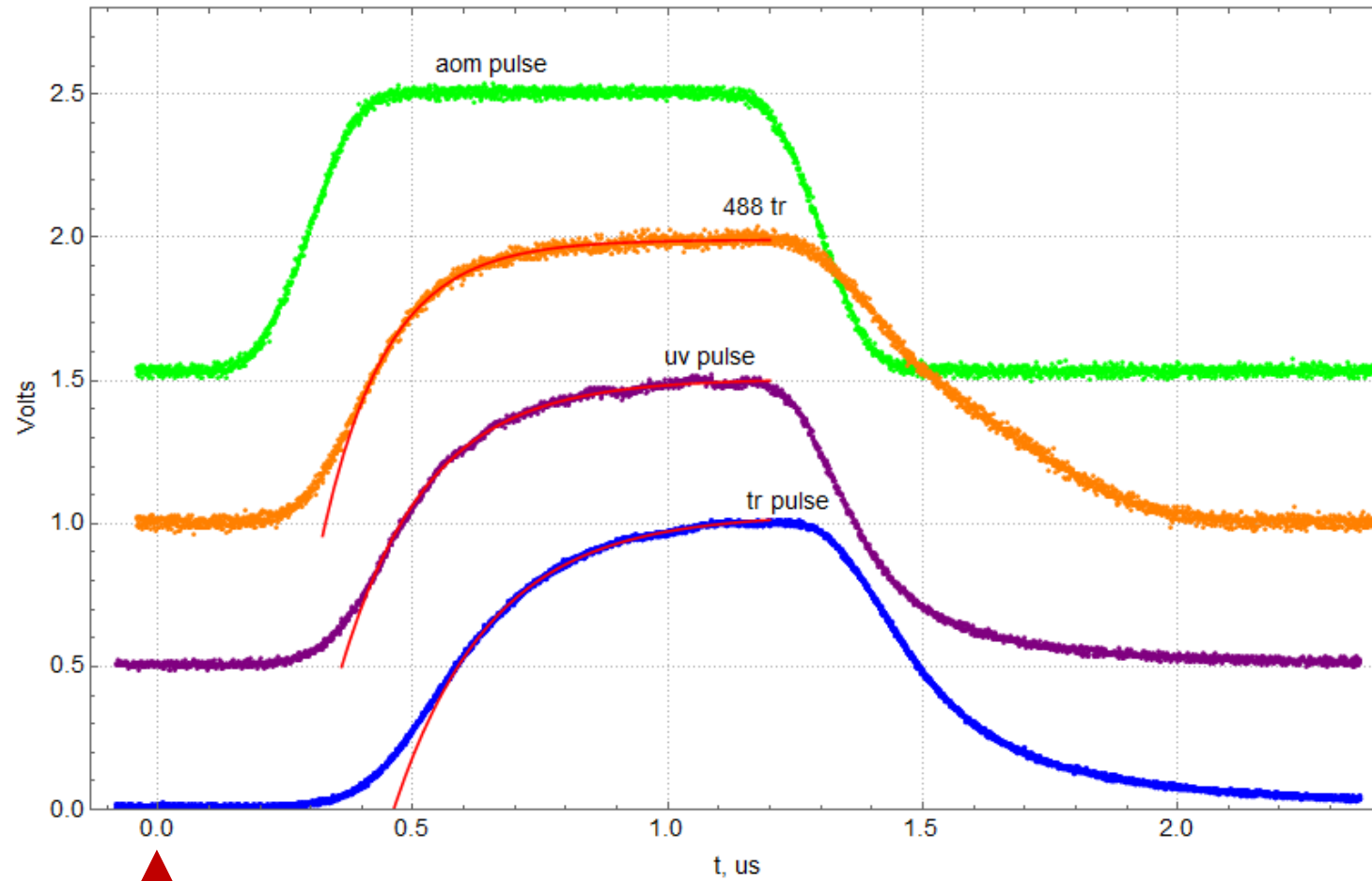
461 ns delay, then exp  
rise  $t=191$  ns

Exp fall  $t=210$  ns

Триггер – пролёт мюона



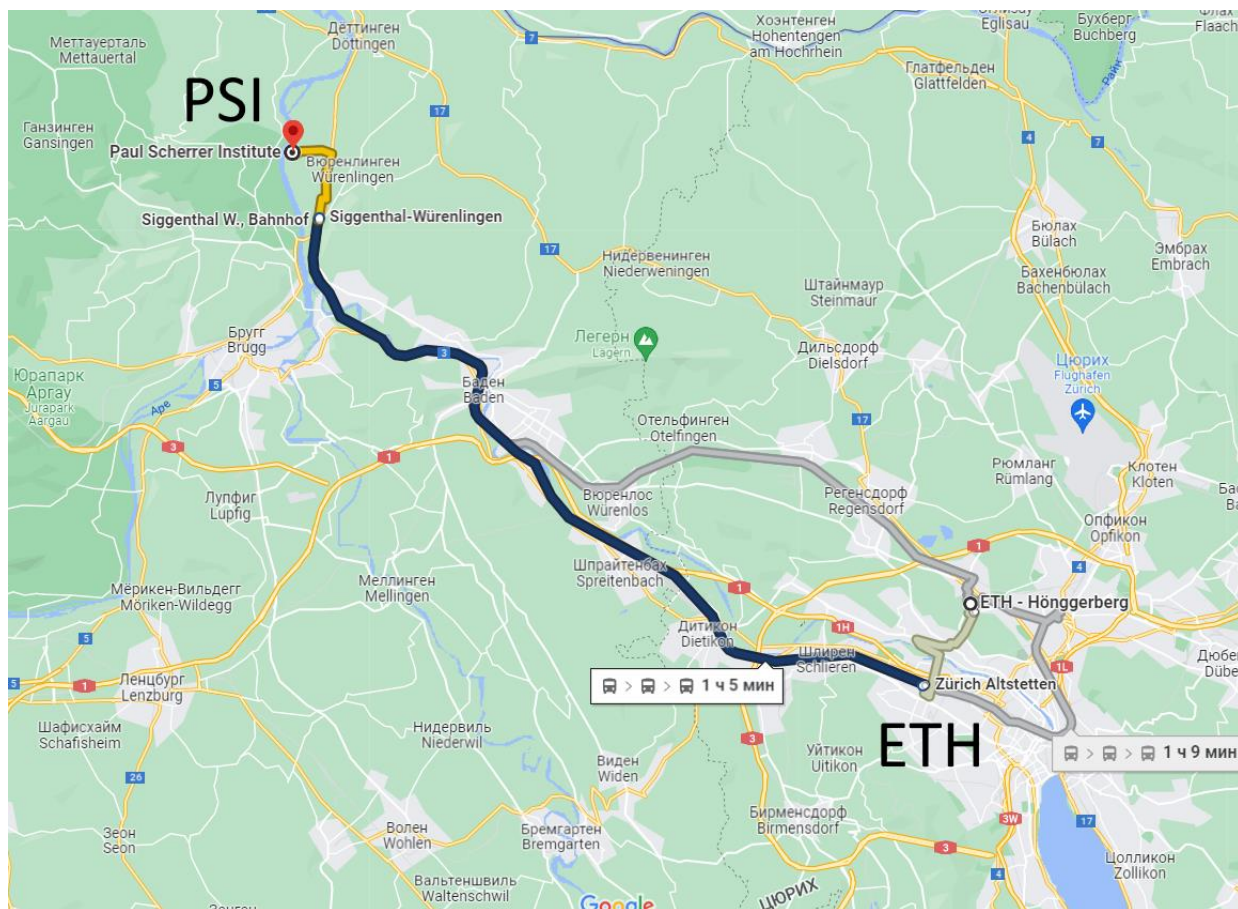
# Импульсное повышение мощности 244 нм



Триггер – пролёт мюона

Мощности 244 на входе в резонатор:  
Мощность до импульса – 5 мВт  
Мощность в импульсе – 1.2 Вт  
Мощность сразу после импульса  $\approx 0$  мВт

# Измерения в декабре 2022

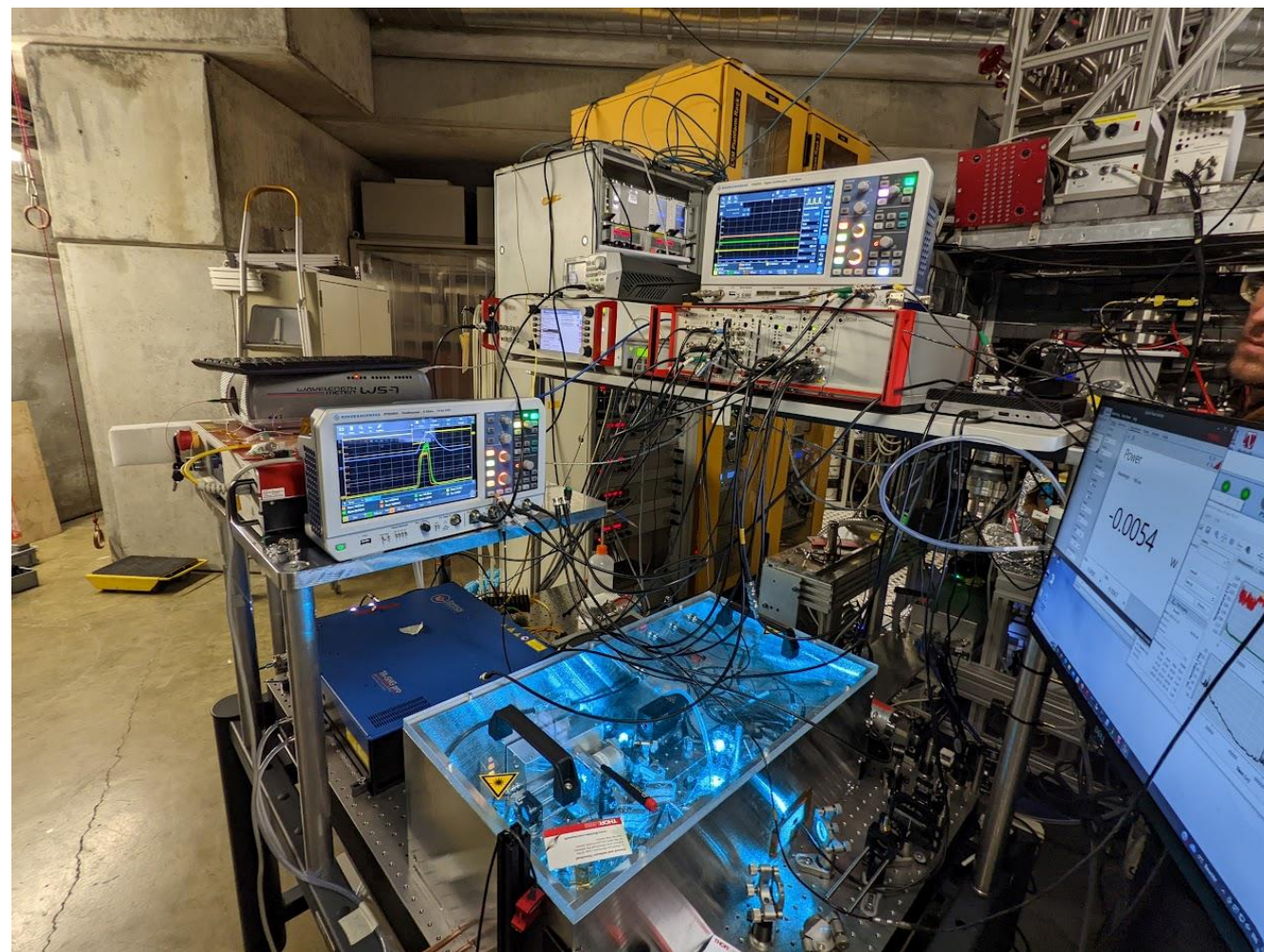


PAUL SCHERRER INSTITUT



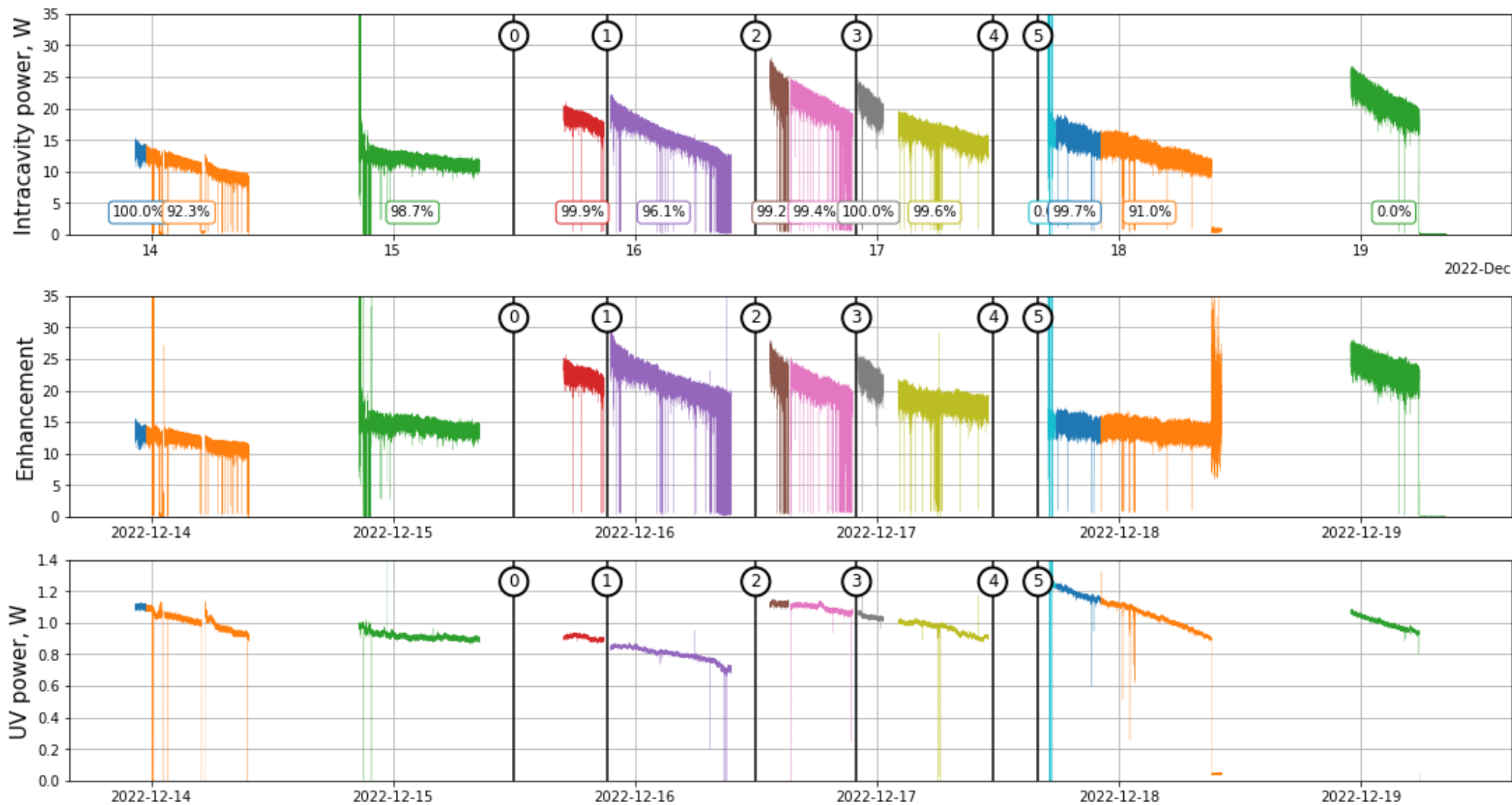


# Измерения в декабре 2022





# Поведение лазерной системы во время измерений



Спасибо за внимание!

