



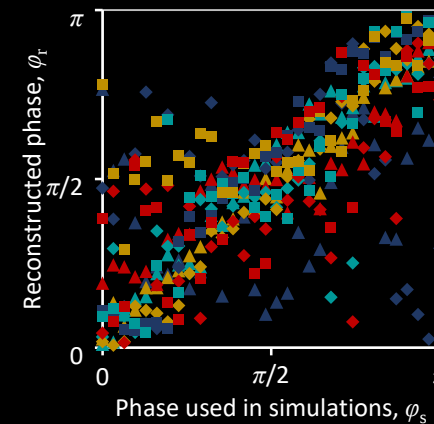
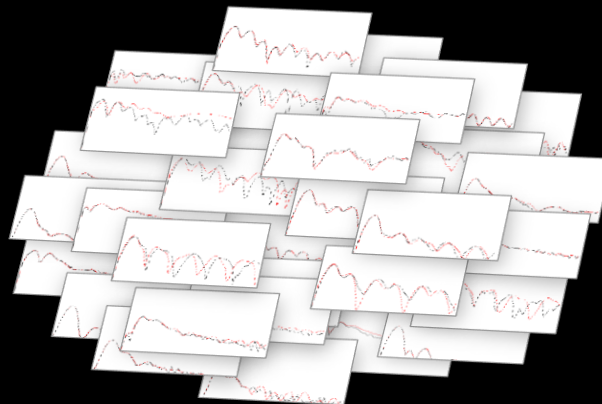
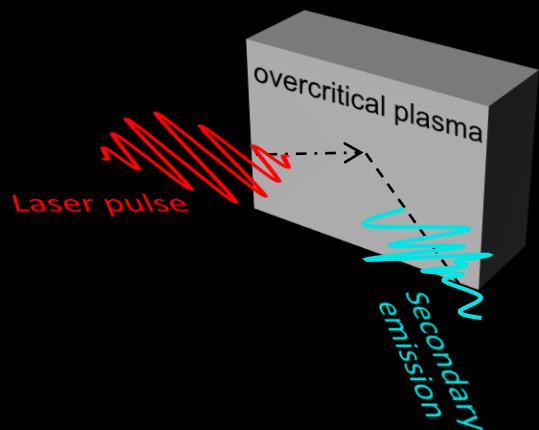
GÖTEBORGS
UNIVERSITET



Institute of Applied Physics
Russian Academy of Sciences



LOBACHEVSKY
UNIVERSITY



Перспективы применения методов машинного обучения в задачах лазерной физики

Аркадий Гоносков
University of Gothenburg, Sweden

Коллектив и предыстория

Shikha Bhadoria, Tom Blackburn, Arkady Gonoskov
University of Gothenburg, Sweden

Евгений Ефименко, Алексей Башинов, Александр Муравьев,
Артём Коржиманов, Аркадий Ким
Институт прикладной физики РАН

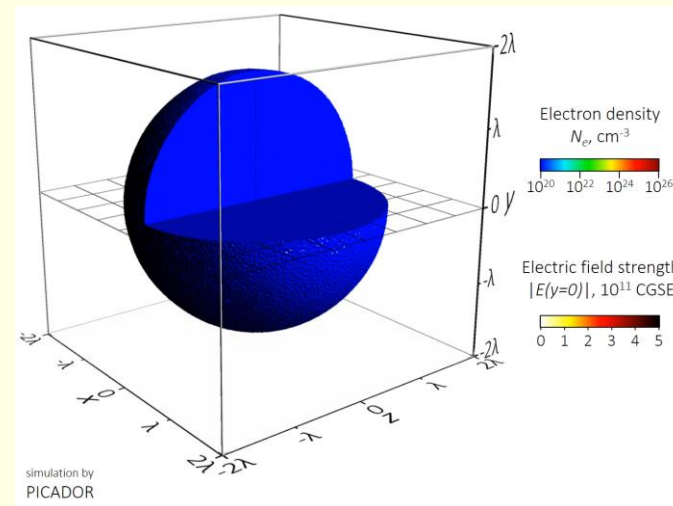
Алексей Половинкин
Adv Stat & Machine Learning, LTD, Intel, Chandler, Arizona, USA

Юрий Родимков, Валентин Волокитин, Елена Панова, Александр
Панов, Игорь Сурмин, Кирилл Тараканов, Анастасия Аризова,
Иосиф Мееров
*Нижегородский государственный университет имени Н. И.
Лобачевского*

Коллабораторы: Сергей Бастраков (HZDR, Germany), Felix Mackenroth
(MPI-PKS, Germany), László Veisz (Umeå, Sweden)

Основные разработки

PICADOR – многокомпонентный суперкомпьютерный код для моделирования взаимодействия вещества с сильными лазерными полями.



hi- χ – открытая платформа для кооперации в области моделирования процессов в сильных лазерных полях.

hi- χ

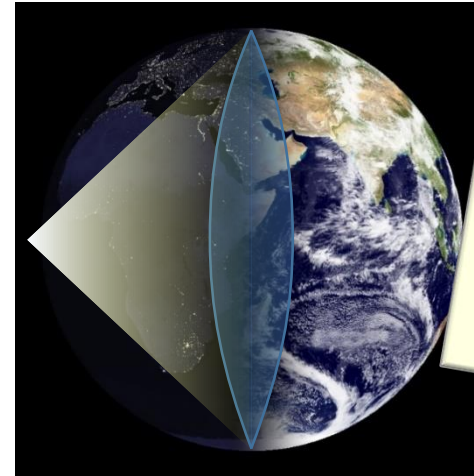
Laser-plasma physics: popular since view

One way to explore things is to put them into extreme conditions.



few joules

100 times more
than the power of
all power plants!
 $\sim 1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$



We can reach intensities equivalent to focusing all sunlight striking the Earth to a tip of a hair!

$$\text{Intensity} = \frac{\text{Energy}}{\text{Area} \cdot \text{Time}} \sim 10^{23} \text{ W/cm}^2$$

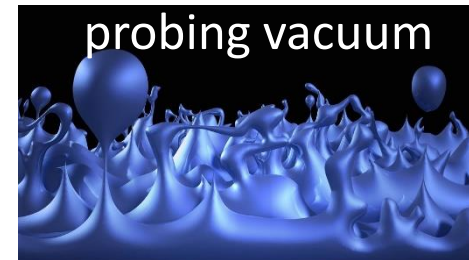
There are lasers and they can be bright, extremely bright.



Big Scary Laser
Do not look into beam
with remaining eye

$\sim \lambda^2$
 $\sim \mu\text{m}^2$

few cycles
 $\sim 10 \text{ fs} = 10^{-14} \text{ s}$

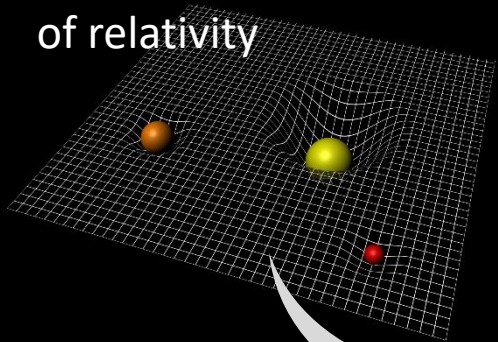


e.g. ELI-NP, 20 PW (Romania)

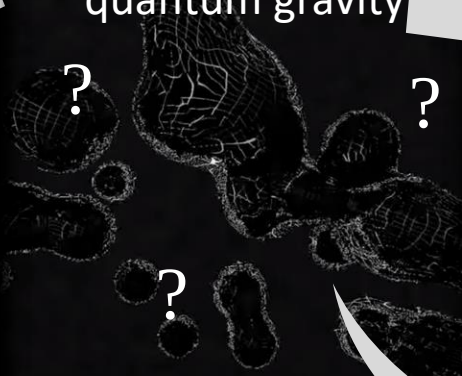


Big laser requires big problem

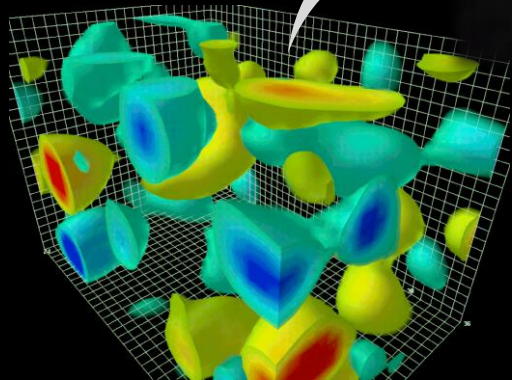
General theory of relativity



The problem of quantum gravity

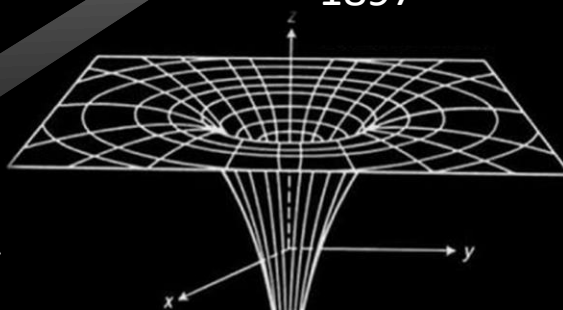


Quantum field theory



The electron is discovered

Thompson 1897

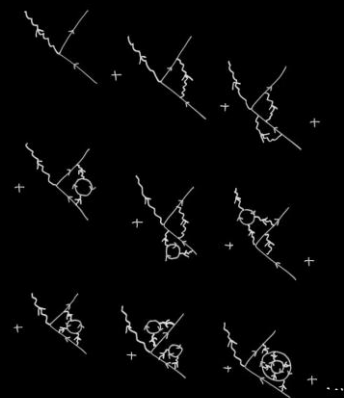


The problem of divergences

$$E \sim \int_R^\infty r^2 dr \left(\frac{1}{r^2} \right)^2 \xrightarrow{R \rightarrow 0} \infty$$

Classical renormalization
Dirac, 1938

Quantum renormalization



Breakdown of perturbative QED

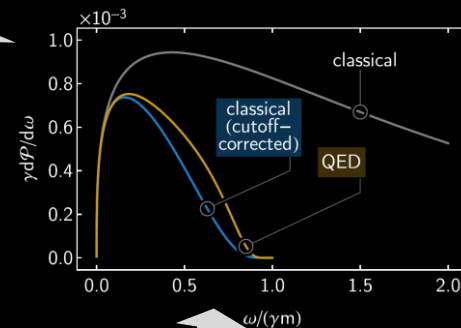
Quantum radiation reaction is observed with lasers

2018

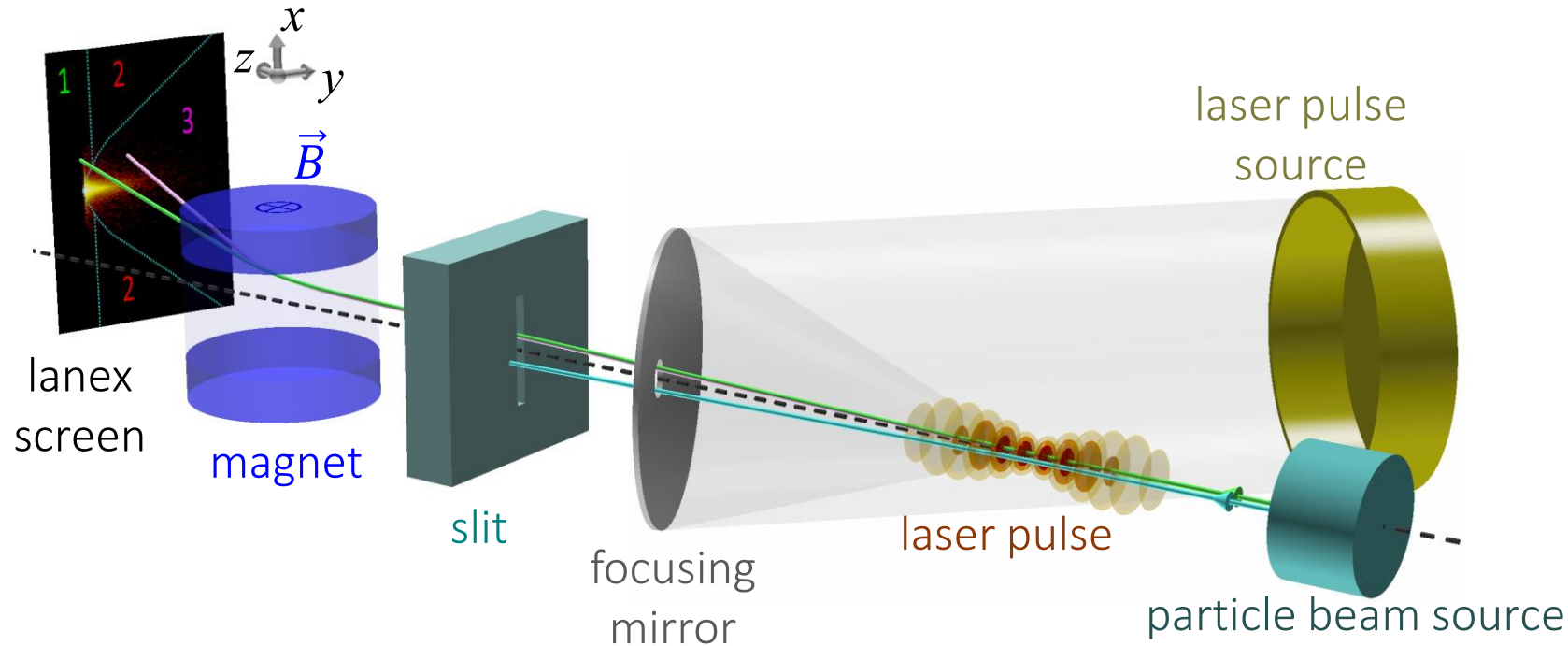
2020s,?



Radiation reaction



Детектирование отклонений от квантовой модели радиационного торможения



Проблема извлечения информации:

- процесс принципиально вероятностный
- структура электромагнитного поля лазерного импульса не известна с достаточной точностью
- эта структура может меняться от раза к разу

Использование ML:

- параметризовать отклонения от модели: $p \in \mathbb{R}$
- параметризовать экспериментальные неопределенности: $a_1, a_2, \dots \in \mathbb{R}$
- произвести множество численных моделирований для разных значений $p, a_1, a_2, \dots$ и получить данные, эквивалентные измеряемым
- обучить алгоритмы ML решать обратную задачу
- из экспериментальных данных получить p и определить доверительный интервал

Трудности:

- как добиться высокой достоверности и точности?
- что делать с ростом размерности пространства параметров?
- когда и в какой области параметров задача становится необратимой?
- как изменить эксперимент, чтобы процедура была устойчива к вероятностным отклонениям и локальной необратимости задачи?

Необходимость реконструкции лазерного поля в экспериментах

High-intensity lasers

Fundamental science

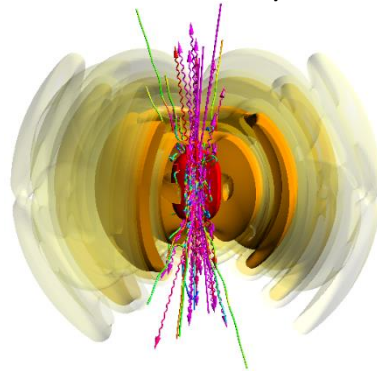
The idea is to learn from the uncommon behavior of basic systems placed in extreme conditions.

Applications

The idea is to trigger fortunate processes to convert the compressed energy into other forms in demand: new sources of particles and radiation.

High energy/density

Sources with capabilities beyond that of all current means in laboratory

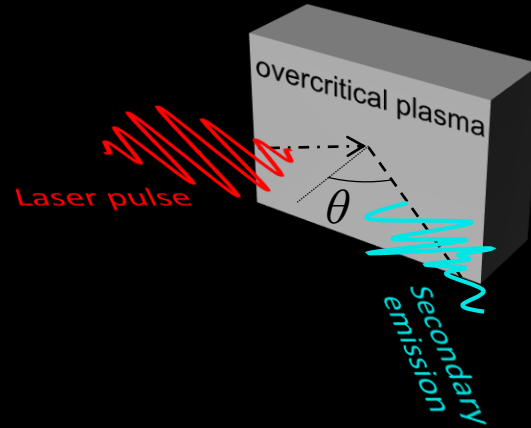


Cheap/compact sources

Laser-based sources can be by far smaller and cheaper than the once based on conventional accelerators.

- medical diagnostics
- cancer treatment
- inspection in industry
- utilization of nuclear waste
- ...

Example from the theory of laser-matter interaction



Relativistic Oscillating Mirror (ROM)

Gordienko *et al.* PRL **93**, 115002 (2004)

- Leontovich boundary conditions:

$$f_{\text{out}}^{\text{ROM}}(x_{\text{ARP}} + t) = -f_{\text{in}}(x_{\text{ARP}} - t)$$

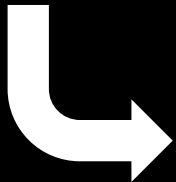
- relativistic motion of x_{ARP}

$$f_{\text{in}}(x_s - t) = \frac{S}{2 \cos^3 \theta} \left(\sin \theta - \frac{\beta_y}{(1 - \beta_x)^{\frac{p+1}{2}}} \right),$$

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 = 1,$$

$$\frac{dx_s}{dt} = \beta_x,$$

$$f_{\text{out}}^U(x_s + t) := -\frac{S}{2 \cos^3 \theta} \left(\sin \theta - \frac{\beta_y}{(1 - \beta_x)^{\frac{1-p}{2}} (1 + \beta_x)^p} \right).$$



$p = 0$

Relativistic Electronic Spring (RES):

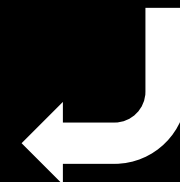
Gonoskov *et al.* PRE **84**, 046403 (2011)

$$f_{\text{in}}(x_s - t) = \frac{S}{2 \cos^3 \theta} \left(\sin \theta - \frac{\beta_y}{1 - \beta_x} \right),$$

$$\beta_x^2 + \beta_y^2 = 1,$$

$$\frac{dx_s}{dt} = \beta_x,$$

$$f_{\text{out}}^{\text{RES}}(x_s + t) := -\frac{S}{2 \cos^3 \theta} \left(\sin \theta - \frac{\beta_y}{1 + \beta_x} \right).$$



$p = 1$

Comparison of the ROM^c and the RES models

We consider the incident pulse in the form:

$$f_{\text{in}}(\eta = x - t) = \sin^3(\eta/4) \times (\cos(\eta/4) \sin(\eta + \phi) + \sin(\eta/4) \cos(\eta + \phi))$$

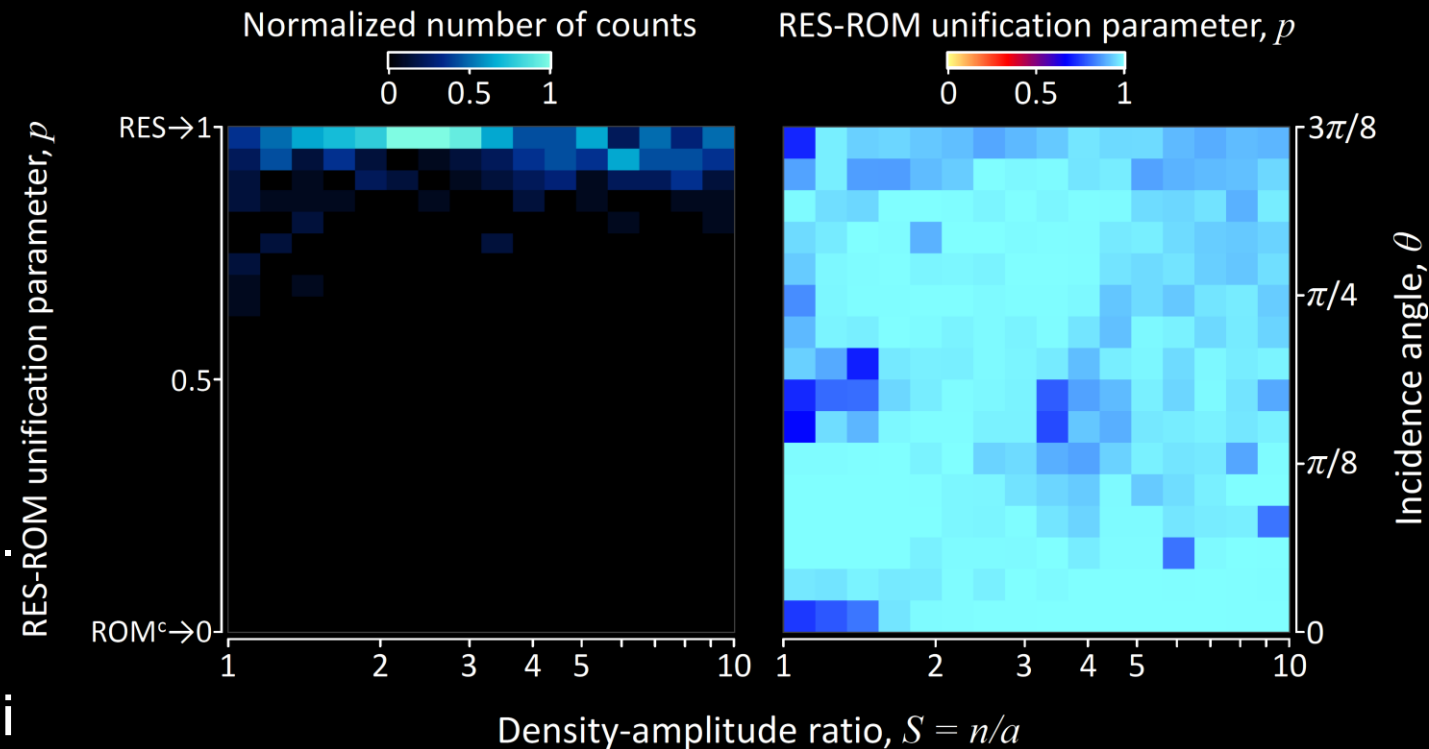
with $\phi = \pi/2$.

We train a 4-layer NN to reconstruct

- the incidence angle $\theta \in [0, 3\pi/8]$,
- the density-amplitude ratio $S \in [1, 10]$ and
- the unification parameter $p \in [0, 1]$

from the spectra of up to harmonic order 12.8.

We mimic the real experiment with ab-initi PIC simulations with the amplitude $a = 200$.



Reconstructing experimental conditions

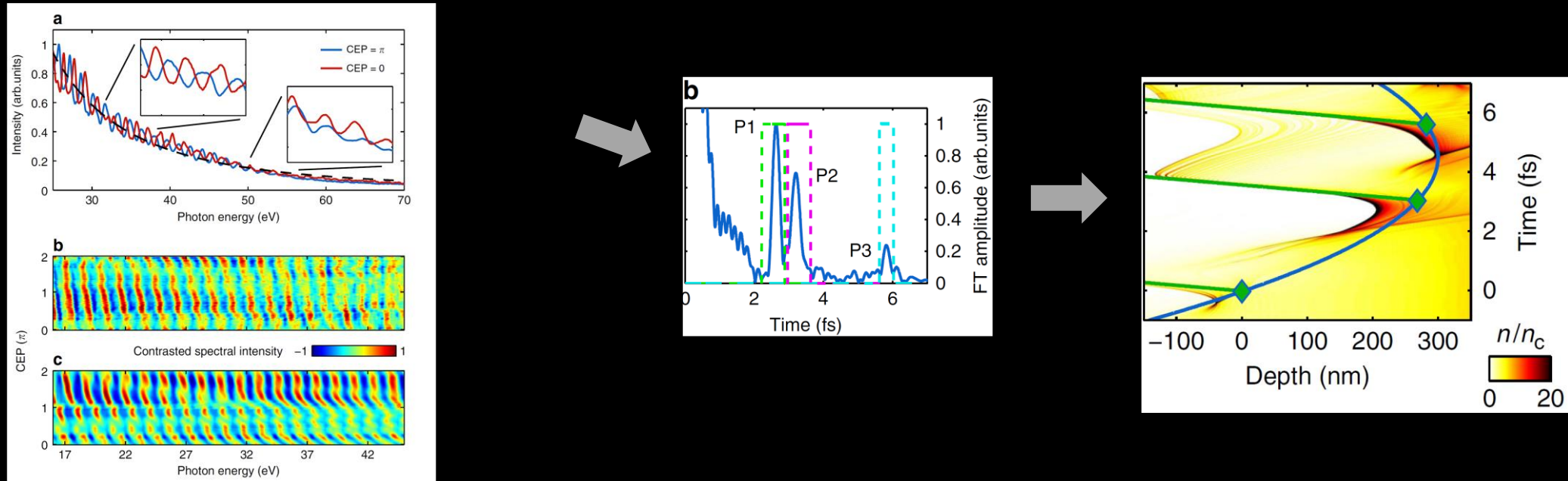
ARTICLE

DOI: [10.1038/s41467-018-07421-5](https://doi.org/10.1038/s41467-018-07421-5)

Article | OPEN | Published: 26 November 2018

Spectral interferometry with waveform-dependent relativistic high-order harmonics from plasma surfaces

Dmitrii Kormin^{1,2}, Antonin Borot¹, Guangjin Ma^{3,4}, William Dallari¹, Boris Bergues^{1,2}, Márk Aladi⁵, István B. Földes⁵ & Laszlo Veisz^{1,6}



Reconstructing experimental conditions with ML

Suppose we perform an experiment about high-harmonic generation through the interaction of a high-intensity laser pulse with a solid target.

We know:

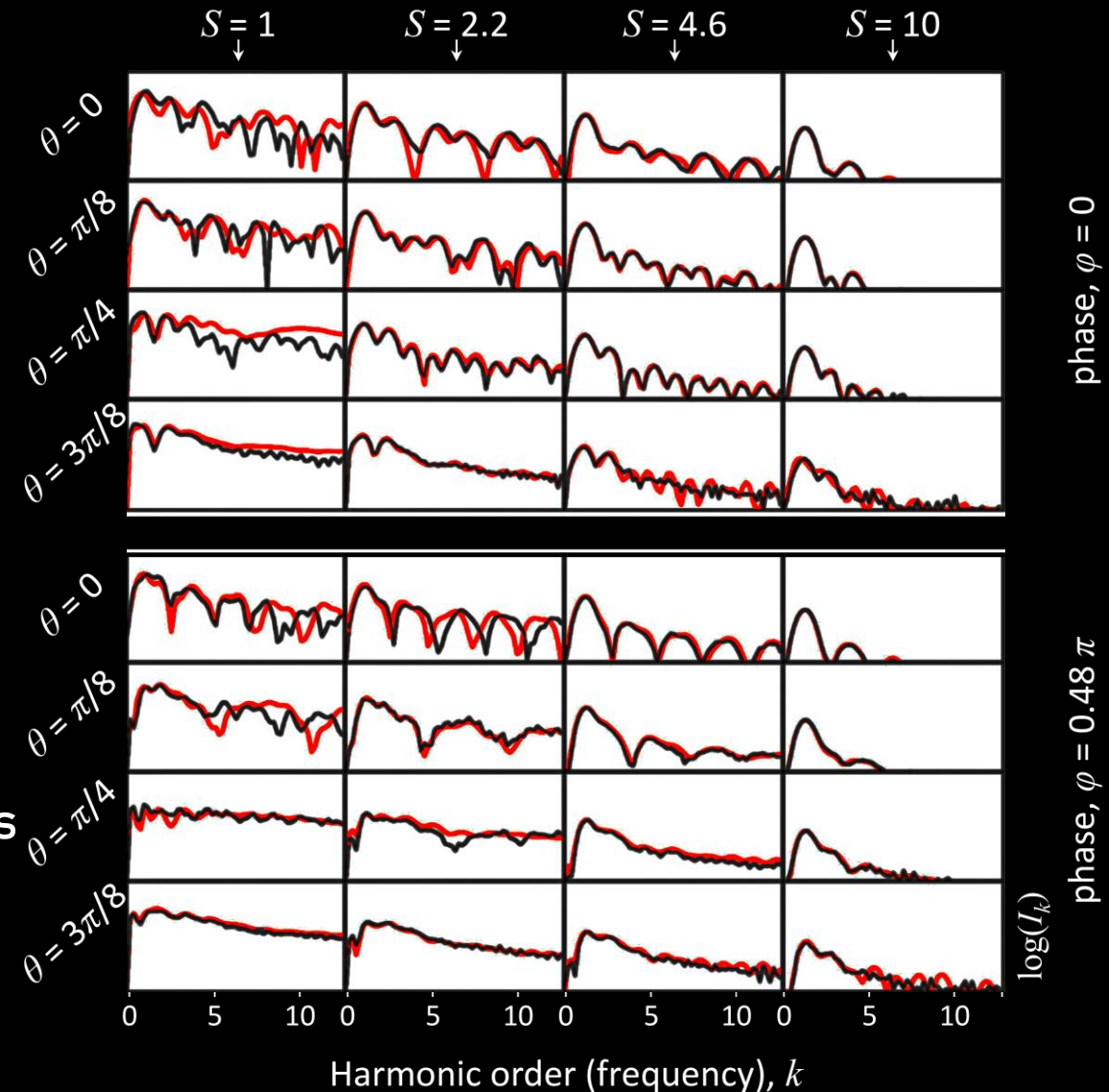
- the incidence angle θ (and can vary it)
- the laser pulse duration and amplitude

But we do not know:

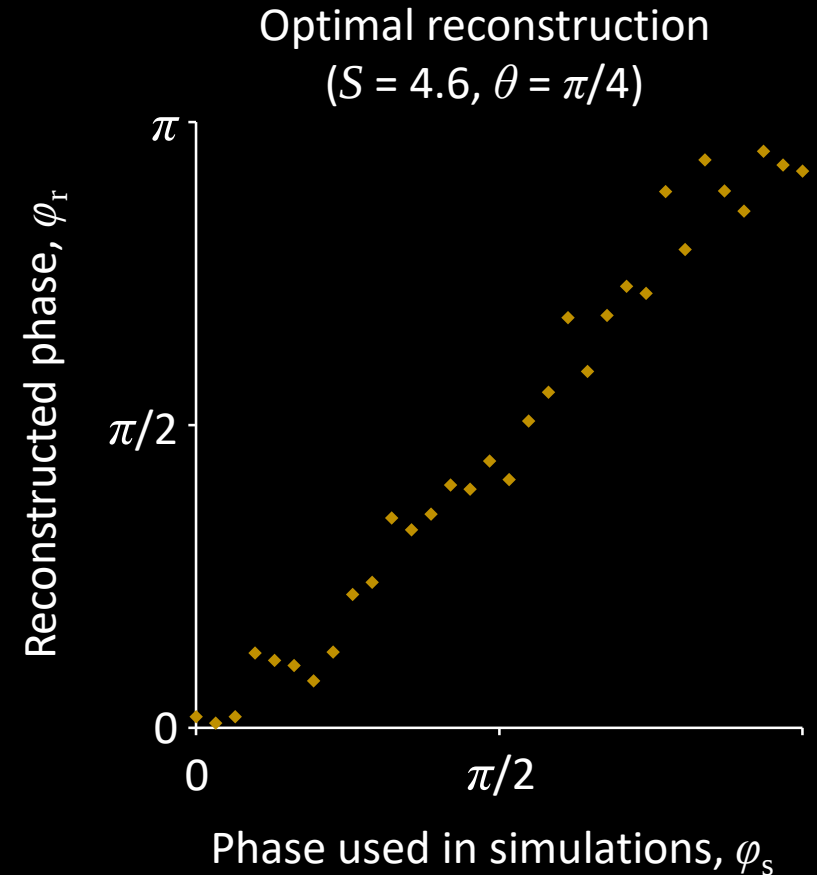
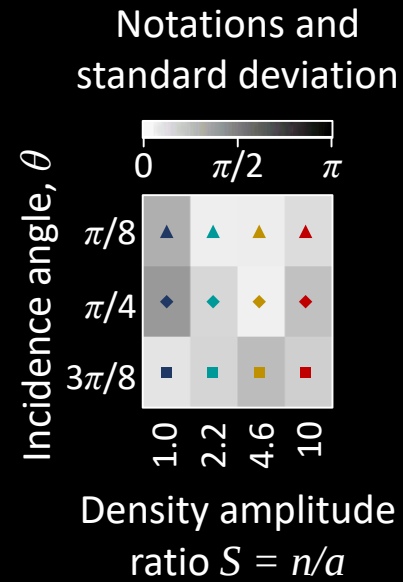
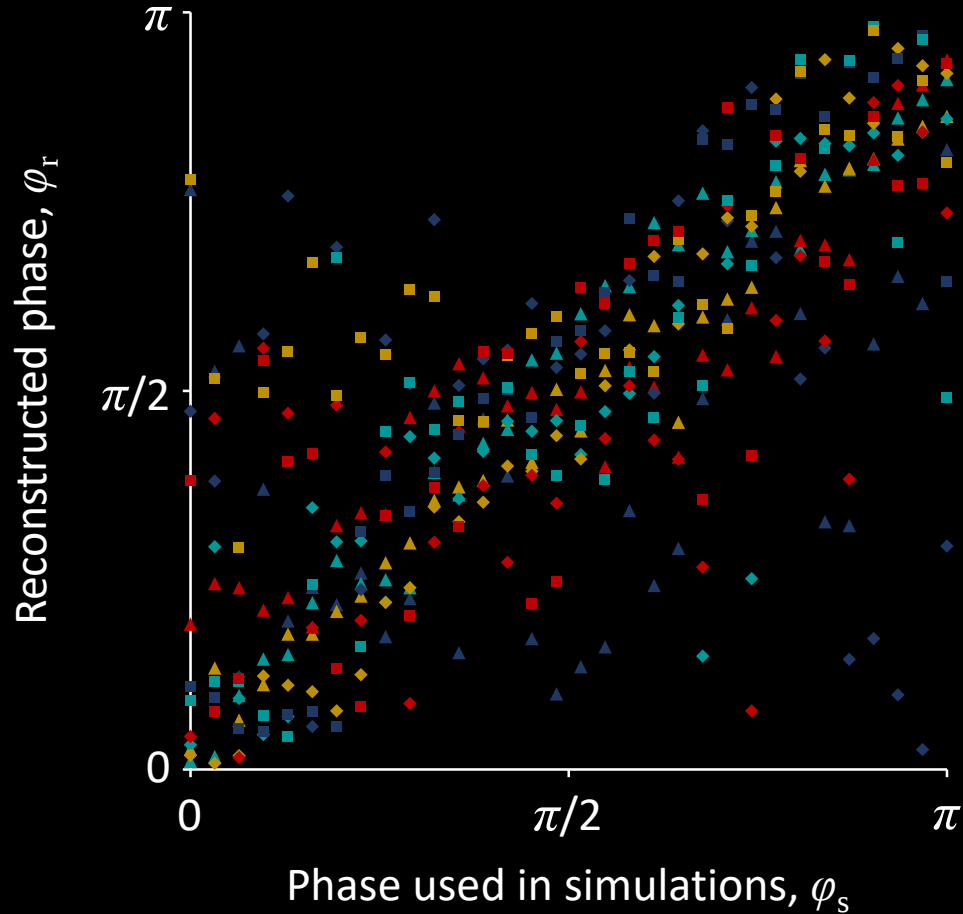
- the carrier envelope phase (CEP) ϕ
- the density profile (result of plasma spreading).

We use ab-initio simulations to mimic the experiments

Spectra obtained with ab-initio simulations (—) and with RES theory (—)



Reconstructing experimental conditions with ML



Текущие исследования

- Исследование возможностей детектирования отклонений от модели радиационного торможения на основе столкновения лазерных импульсов с пучком ускоренных электронов.
- Выявление трудноизмеряемых исходных параметров лазерного импульса по диагностируемым данным его взаимодействия с веществом мишеней.

Трудности и вопросы

Практические вопросы:

- Как добиваться высокой достоверности и точности решения обратной задачи нейронной сетью?
- Что делать, если задача становится локально или глобально необратимой? Как это можно диагностировать?
- Как бороться с проблемой роста размерности пространства параметров?

Побочные вопросы:

- Можно ли снижать сложность задачи с большим числом параметров с помощью разбиения на стадии?
- Как извлечь пользу из теоретических знаний (симметрии, самоподобия, предельные случаи, приближения, неполные и феноменологические модели)?
- Можно ли использовать необратимость как индикатор симметрий, самоподобий и пр.?