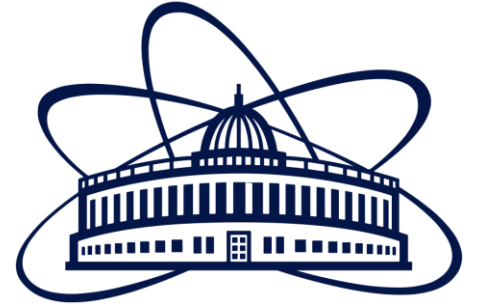


Joint Institute of Nuclear Research



ELASTIC SCATTERING IN THE REACTIONS $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$, $^{40}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$

Molotorenko K. D.^{1,2}, Maslov V.A.¹, Samarin V.V.^{1,3}, Penionzhkevich Yu.E.¹,

¹*Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, Dubna, Russia*

²*Voronezh State University, Voronezh, Russia*

³*Dubna State University, Dubna, Russia*

E-mail: molotorenkoksenia@gmail.com

TASKS OF THE EXPERIMENTS



1. Conducting experiments on reactions of $^{40}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$, $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ at energy 400 MeV.
2. Comparison of the influence of the structure of isotopes ^{40}Ca and ^{48}Ca on a heavy target under conditions of elastic scattering.
3. Analyzing experimental data in terms of the classical model for elastic scattering.
4. Conclusions about the structural differences of the ^{40}Ca and ^{48}Ca nuclei based on experimental data and interaction parameters.

EXPERIMENTAL STUDY OF REACTIONS $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$



Operating conditions for measuring elastic scattering:

- Angular resolution considering beam consumability at target $\pm 0.6^\circ$, recording of products in the range $\theta_{\text{lab}} = 19^\circ - 67^\circ$ ^{40}Ca , $\theta_{\text{lab}} = 13^\circ - 53^\circ$ for ^{48}Ca . This will allow to go down the section of elastic scattering in 5 orders
- The 1% energy resolution will provide an opportunity to separate elastic peak Ca from non-elastic ions;
- Intensity of the beam 50 nA.

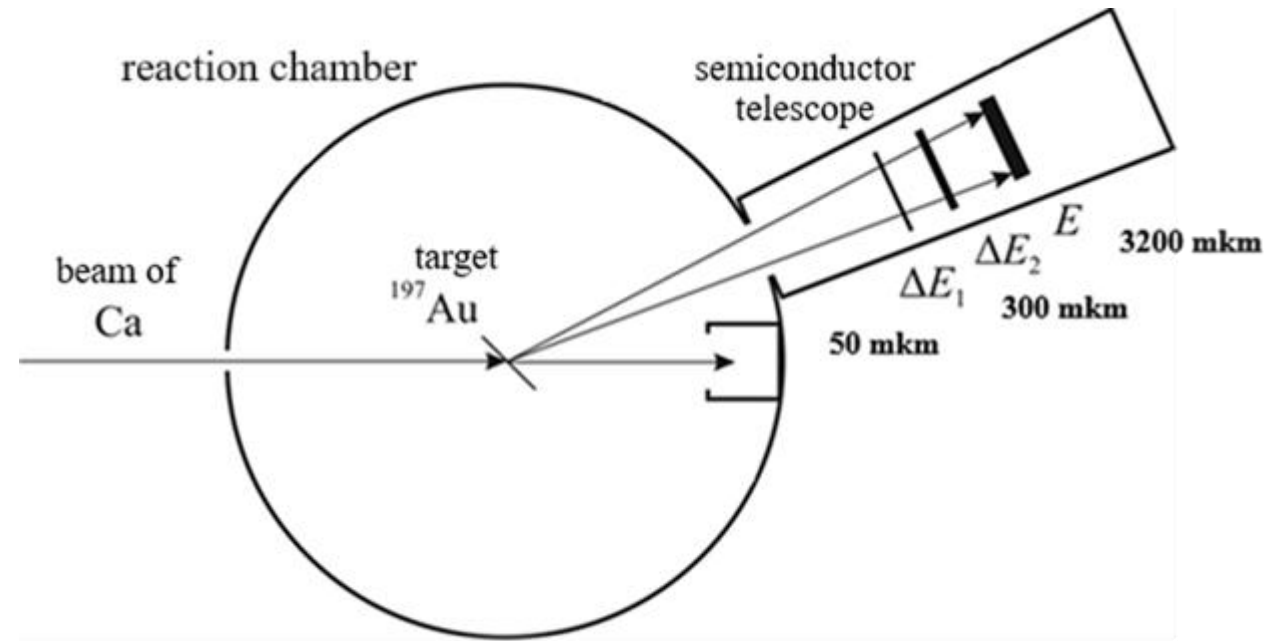
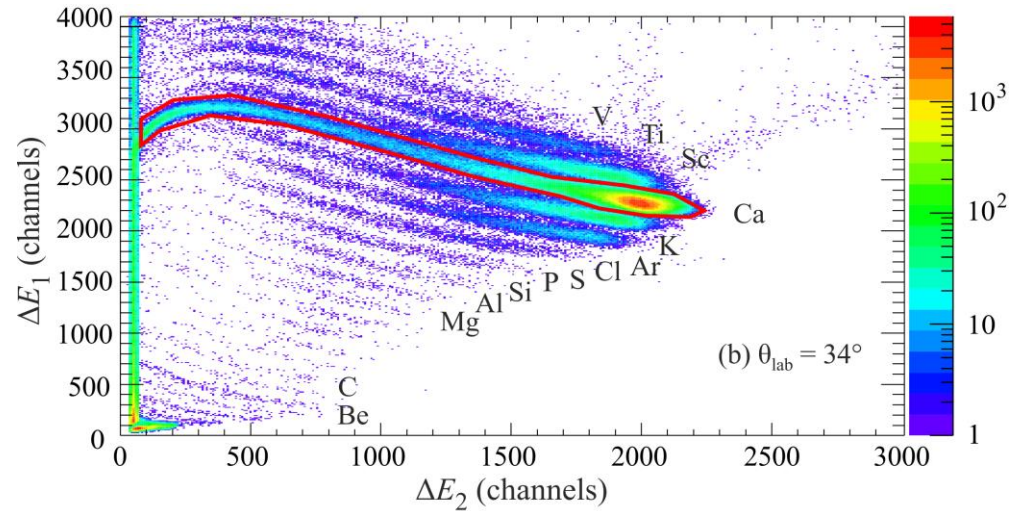
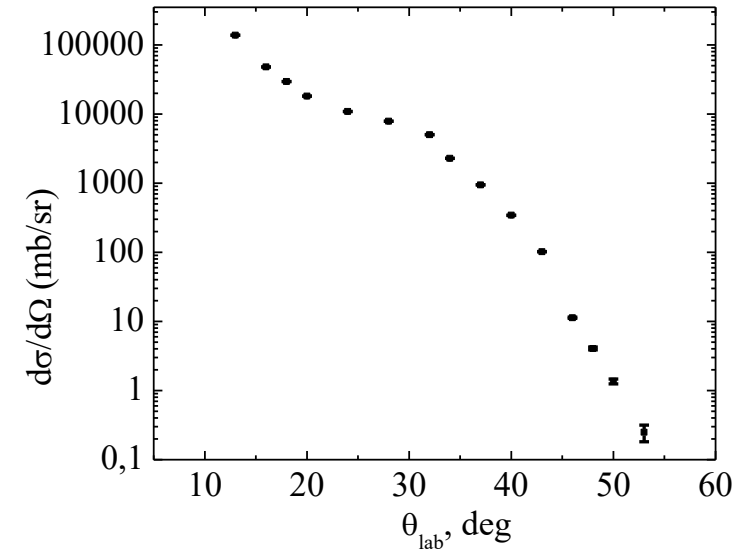


Fig.1. Schematic of the experimental setup
c ΔE -E semiconductor telescope

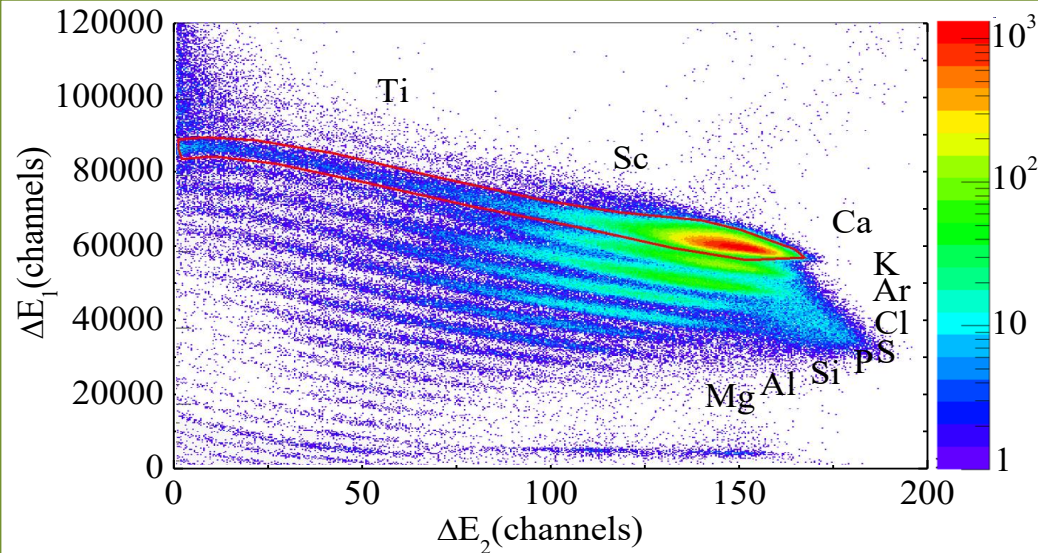
EXPERIMENTAL DATA



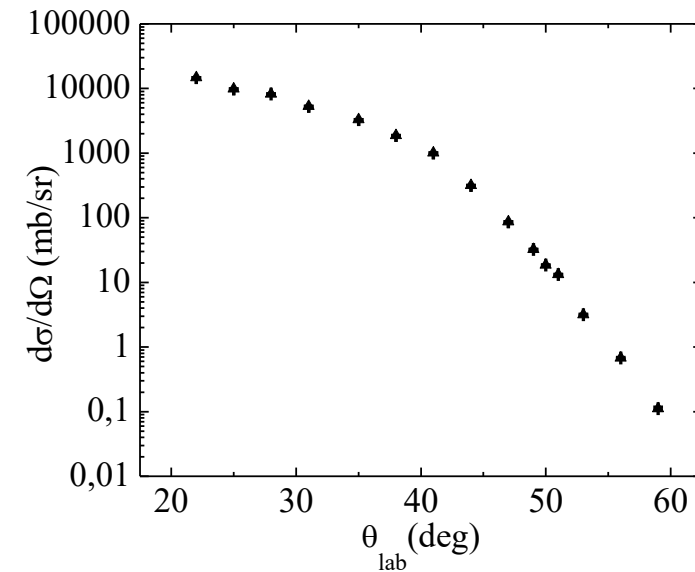
Identification matrix for $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$
on $\theta_{\text{grazing}} = 34^\circ$ in lab. system



Angular distribution of
elastic scattering nuclei
 ^{48}Ca on ^{197}Au in lab.
system



Identification matrix for $^{40}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$
on $\theta_{\text{grazing}} = 41^\circ$ in lab. system



Angular distribution of
elastic scattering nuclei
 ^{40}Ca on ^{197}Au in lab.
system

SEMICLASSICAL APPROACH



The criterion for classical approach is usually the dimensionless Sommerfeld parameter [1]:

$$\eta = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v}$$

where v – Initial relative velocity of nuclei (with their endless removal), e – electron charge.

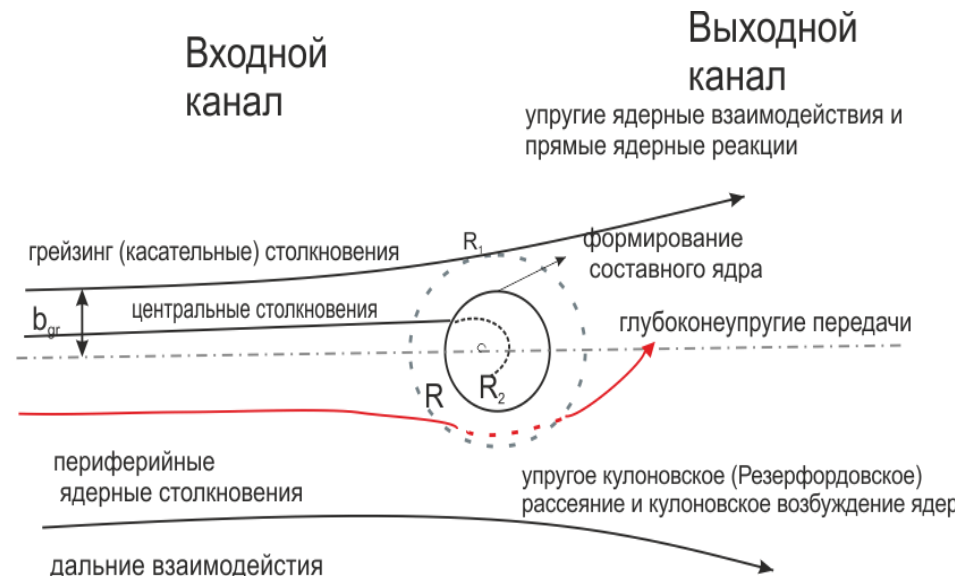
For ^{40}Ca : $\eta = 79$, for ^{48}Ca : $\eta = 87$

This corresponds to the condition of application semi-classics

$$\eta \gg 1$$

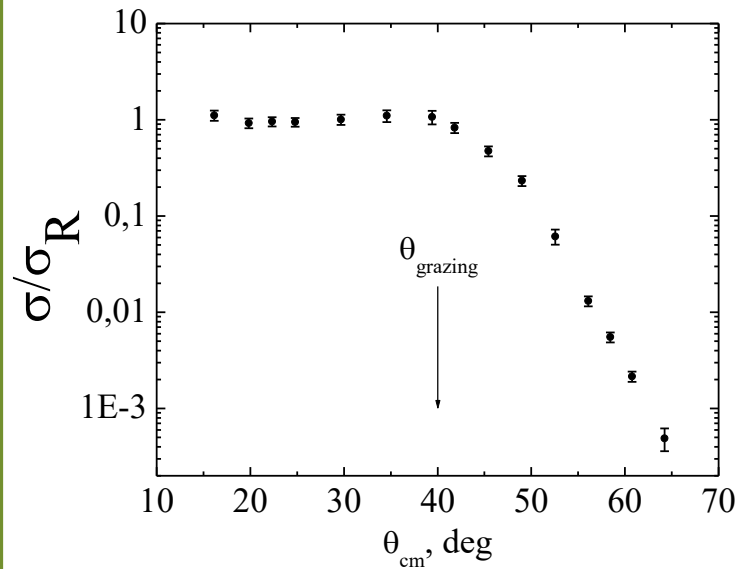
In this case the distance of closest approach in the Coulomb field is related to the scattering angle in the following way [2]:

$$D = \frac{a}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin(\theta_{\text{c.m.}}/2)} \right) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E_{\text{c.m.}}} \left(1 + \frac{1}{\sin(\theta_{\text{c.m.}}/2)} \right)$$



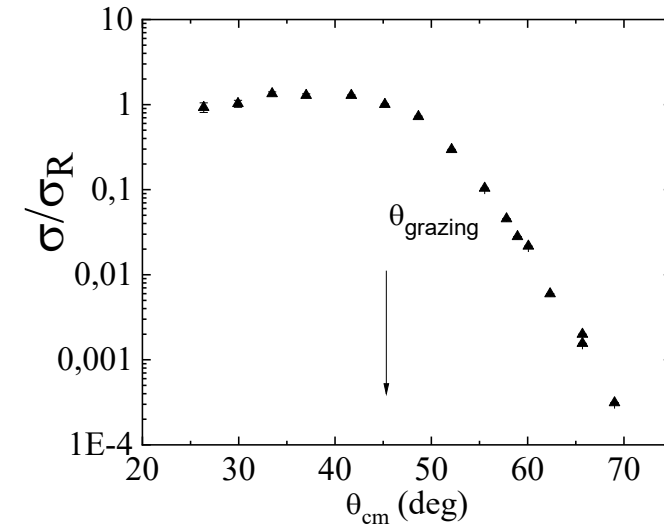
1. M.E. Brandan, G.R. Satchler Physics Reports 285 (1997) 143-243
2. P. R. Christensen, V. I. Manko, F. D. Becchetti and R. J. Nickl Nuclear Physics A207 (1973) 33--77

ANALYZING DATA FOR REACTIONS $^{40,48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$



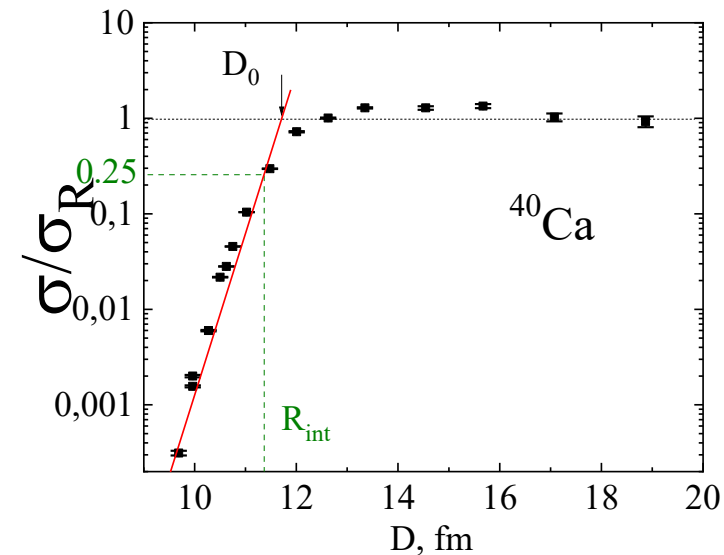
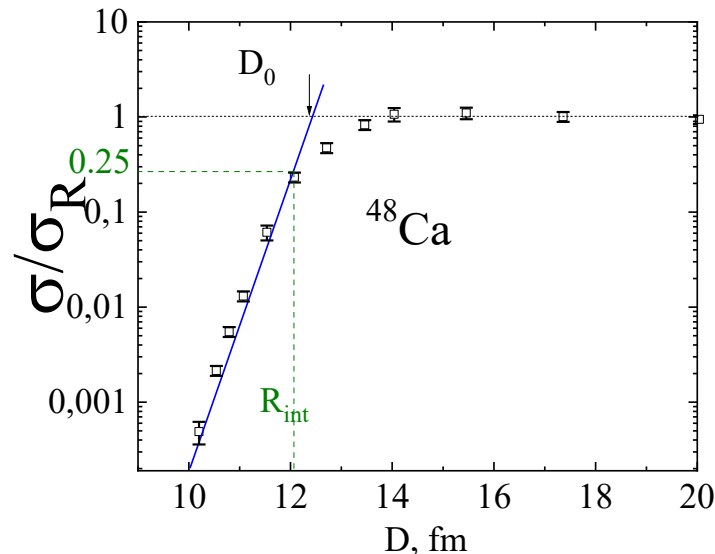
The ratio to the Rutherford's

For ^{48}Ca
 $\theta_{\text{grazing}} = 40^\circ$ in
 center of mass
 system



For ^{40}Ca
 $\theta_{\text{grazing}} = 45^\circ$ in
 center of mass
 system

The ratio σ/σ_R as a function of the distance of closest approach for Coulomb trajectories. R_{int} – interaction radius [3]



[3] Nuclear Physics A500 (1989)
 399-428

SEMICLASSICAL PARAMETERS OF THE $\text{Ca}^{40,48}$ NUCLEI



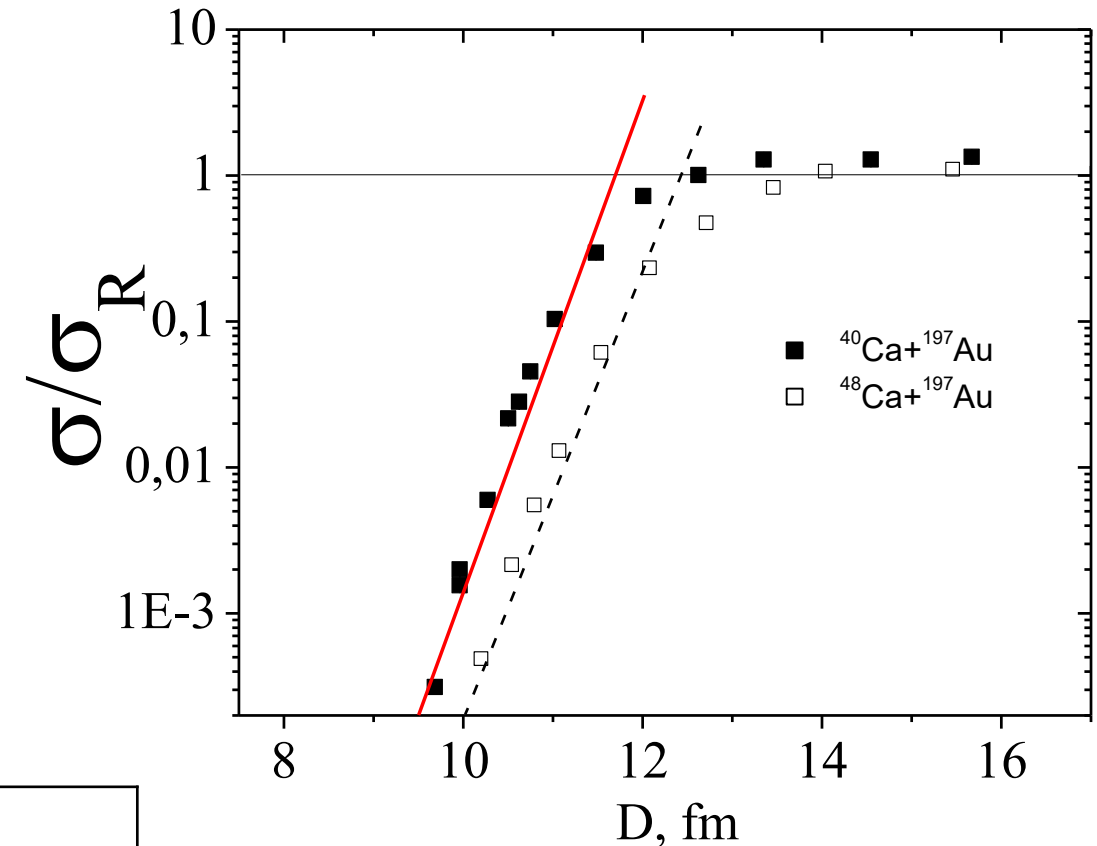
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{el} / \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R = 1 - P_{\text{absorp}}(D), [4]$$

where P_{absorp} – absorption probability (exit from the elastic channel due to reaction)

$$P_{\text{absorp}}(D) = \begin{cases} 0, & D > D_0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{D - D_0}{\Delta}\right), & D \leq D_0 \end{cases}$$

Calculated parameters:

Beam	Target	Lab energy (MeV)	D_0 (fm)	Δ (fm)	R_{int}
^{48}Ca	^{197}Au	400	12.46 ± 0.03	0.33 ± 0.09	12.12
^{40}Ca	^{197}Au	400	11.77 ± 0.02	0.27 ± 0.07	11.36



Comparison of σ/σ_R relations depending on the distances D for ^{48}Ca and Ca^{40} . Continuous lines are defined by the approximation of points below D_0

CONCLUSION



1. For the first time, two reactions were compared in experiments studying elastic scattering on ^{40}Ca , ^{48}Ca beams at an energy of 400 MeV on a ^{197}Au target under the same experimental conditions.
2. The angular distributions of elastic scattering were measured in the angle range for ^{40}Ca : $\theta = 19^\circ - 67^\circ$, for ^{48}Ca : $\theta = 13^\circ - 53^\circ$, and it was possible to descend by 5 orders of magnitude in cross section.
3. In the experiment studying the reactions $^{40}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$ and $^{48}\text{Ca} + ^{197}\text{Au}$, the experimental data were analyzed and the following **key semiclassical parameters** were obtained:

Distance of closest approach for Ca nuclei to Au:

- ^{40}Ca : $D_0 = 11.77$ fm,
- ^{48}Ca : $D_0 = 12.46$ fm

Diffuseness for Ca nuclei:

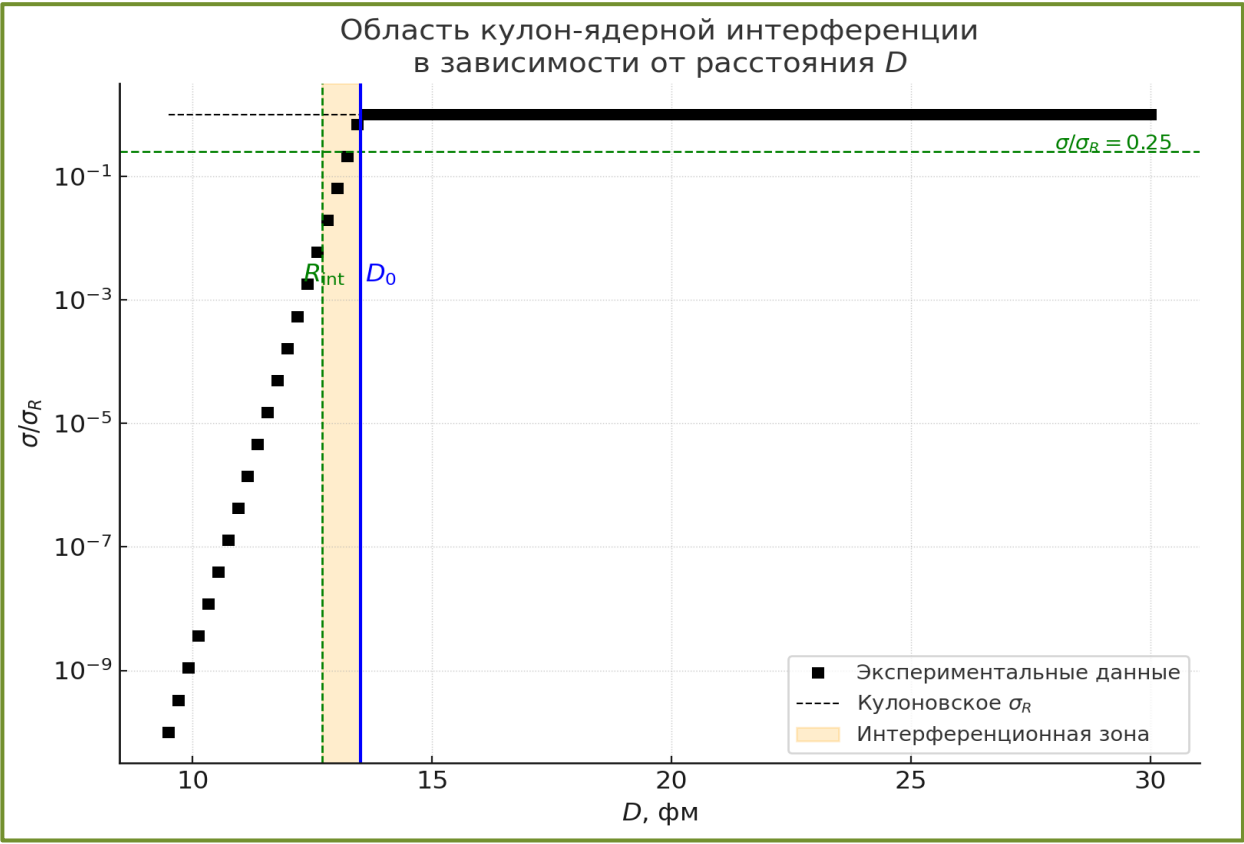
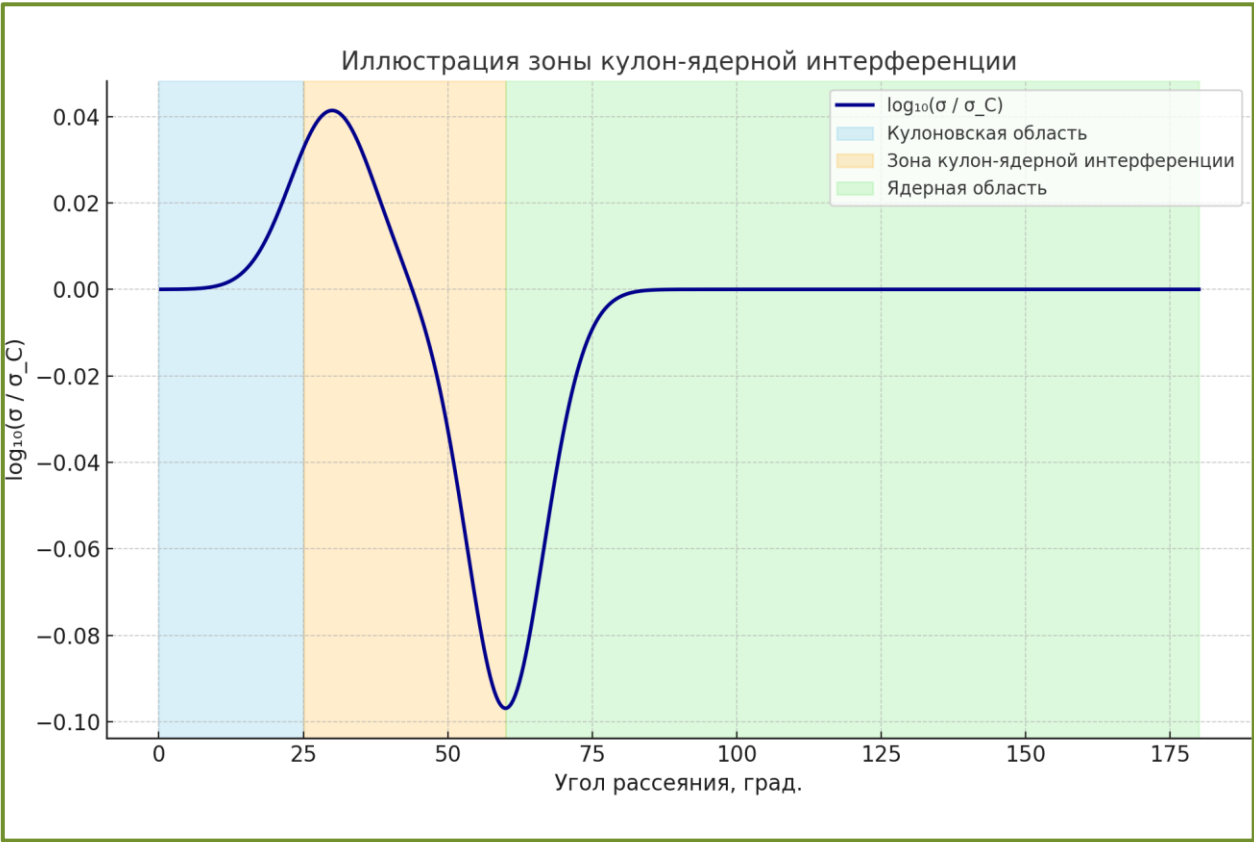
- Для ^{40}Ca : $\Delta = 0.27$ fm
- Для ^{48}Ca : $\Delta = 0.33$ fm

4. ^{48}Ca interacts with ^{197}Au **more softly and at larger distances** than ^{40}Ca , as shown by increased D_0 , surface **diffuseness** Δ , and earlier deviation from Rutherford scattering. This smoother interaction likely stems from the neutron-rich, diffuse structure of ^{48}Ca and is crucial for enhancing nucleon transfer and fusion, especially in reactions forming heavy and superheavy nuclei.



THANKS FOR YOUR ATTENTION!

Thanks to Lukyanov S.M. , Shakhov A.V, Mendybaev K., Issatayev T., Aznabayev D.
for their assistance in carrying out the measurements
and I thank the Y-400 accelerator setup team for obtaining excellent ^{40}Ca , ^{48}Ca beams.



Современные исследования, использующие квазиклассические методы

- **Systematic study of the surface diffuseness of nuclear potential with high precision large-angle quasi-elastic scattering**

Nuclear Physics A, 2010

В этом исследовании измерялись функции возбуждения квазиизупругого рассеяния при больших углах для систем $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$, ^{196}Pt , ^{184}W и $^{154,152}\text{Sm}$ при энергиях ниже кулоновского барьера. Параметры диффузности ядерных потенциалов были извлечены как из одноканальных, так и из многоканальных расчетов.

- **Nuclear surface diffuseness revealed in nucleon-nucleus diffraction**

arXiv preprint, 2018

Авторы обсуждают взаимосвязь между диффузностью ядерной поверхности и дифференциальным сечением упругого рассеяния при первом дифракционном пике в высокоэнергетическом рассеянии нуклон-ядро. Используется микроскопическая теория реакции, модель Глаубера, для описания высокоэнергетических реакций.

- **The role of surface energy coefficients and nuclear surface diffuseness in the fusion of heavy-ions**

arXiv preprint, 2010

В этой работе обсуждается влияние коэффициентов поверхностной энергии и диффузности ядерной поверхности на потенциал сближения и, в конечном итоге, на слияние тяжёлых ионов. Авторы используют различные версии коэффициентов поверхностной энергии и анализируют их влияние на барьеры слияния.

- **Elastic α transfer in the $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ scattering and its impact on the nuclear rainbow**

The European Physical Journal A, 2020

Исследуется упругое α -переносное рассеяние в системе $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ и его влияние на ядерную радугу. Используются полумикроскопические модели, включая потенциалы Вудса-Саксона, для анализа экспериментальных данных.

Перспективы применения результатов

- Полученные параметры D_0 , Δ , R_{int} и угол $1/4$ являются экспериментально определяемыми характеристиками **профиля взаимодействия** между тяжёлыми ядрами.
- Эти величины могут быть **использованы как входные данные** при:
 - построении **оптических потенциалов**,
 - моделировании **реакций передачи и слияния**,
 - оценке **эффективности пучков** (например, в синтезе сверхтяжёлых элементов).
- Особенно важны результаты по Ca-48, который остаётся одним из ключевых пучков в исследованиях экзотических и нейтронобогатых систем.
- Практическая польза результатов — в возможности **предварительной оценки "мягкости" бомбардирующего ядра** без необходимости проводить полный спектр реакций (передача, возбуждение, фрагментация).

Параметр	Что показывает
D_0	С какого расстояния начинается заметное взаимодействие
Δ	Насколько резким или плавным является спад сечения
R_{int}	Где впервые появляется вклад ядерных сил
Угол $1/4$	Граница между чисто кулоновским и смешанным рассеянием
η, λ, a	Энергетические и геометрические параметры взаимодействия

Сечение

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{N}{N_{beam} \cdot N_{tg} \cdot d\omega},$$

N — число частиц — продуктов реакции, N_{beam} — число частиц пучка, N_{tg} — число частиц мишени, $d\omega$ — телесный угол, зависящий от установки.