



Физически Факултет
Софийски университет
„Св. Климент Охридски“



*Катедра "Атомна физика"
на 80 години*

Изследване на силно взаимодействащи системи с ALICE



ALICE



Национална пътна карта за
научна инфраструктура



РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ
МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО
И НАУКАТА

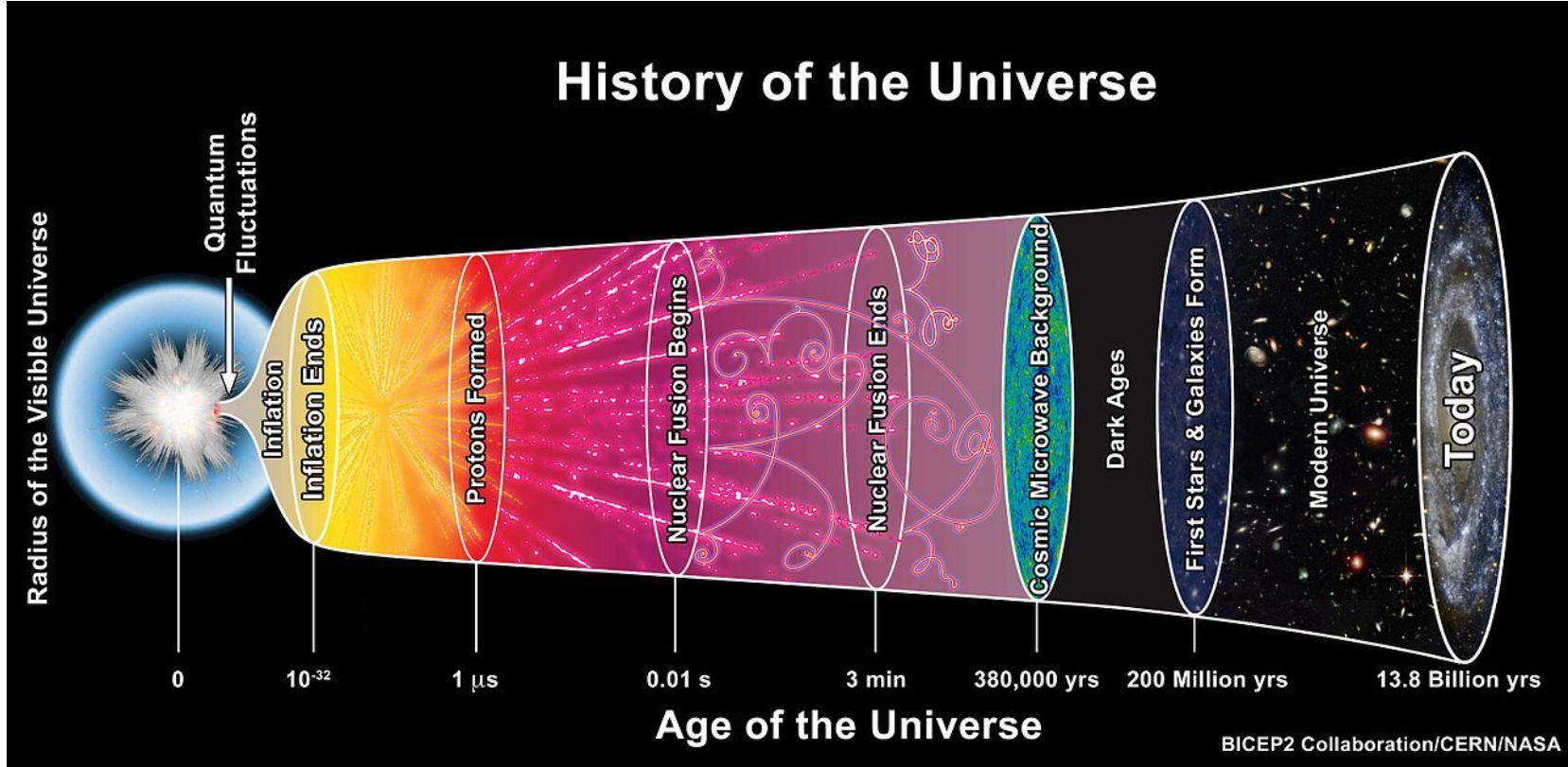
Димитър Михайлов
17 април 2026 г., София



Част от дейностите са подкрепени от ЕС
(NextGenerationEU) чрез Националния план
за възстановяване и устойчивост на
Република България – SUMMIT

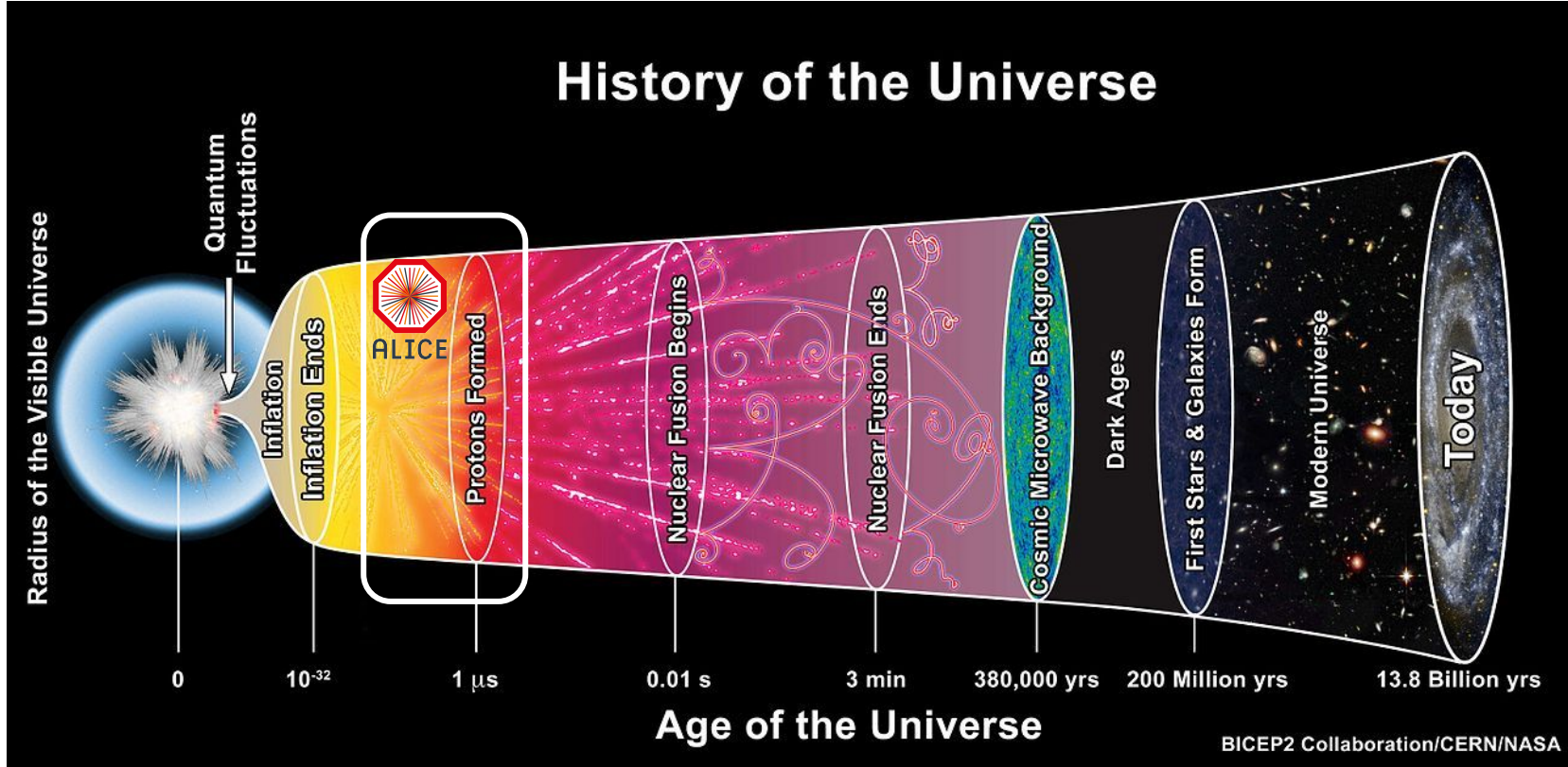
Quark gluon plasma

Μοτιβαציατα za ALICE



Quark gluon plasma

Μοτιβαציατα za ALICE

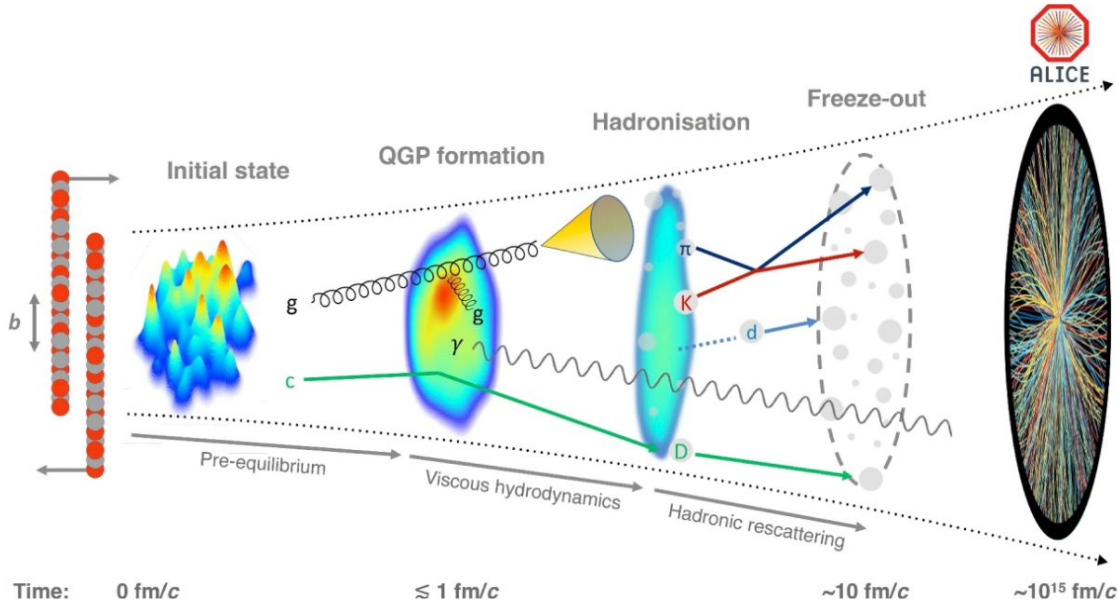


Quark gluon plasma

Мотивацията за ALICE

ALICE изследва QGP и етапите на сблъсъци между тежки йони (HI) чрез наблюдаеми величини във финалното състояние

- Адронизация, адронна химия и свойства на средата
- Взаимодействия на средата с “твърди” проби
- Спектрални форми на адроните и колективни ефекти

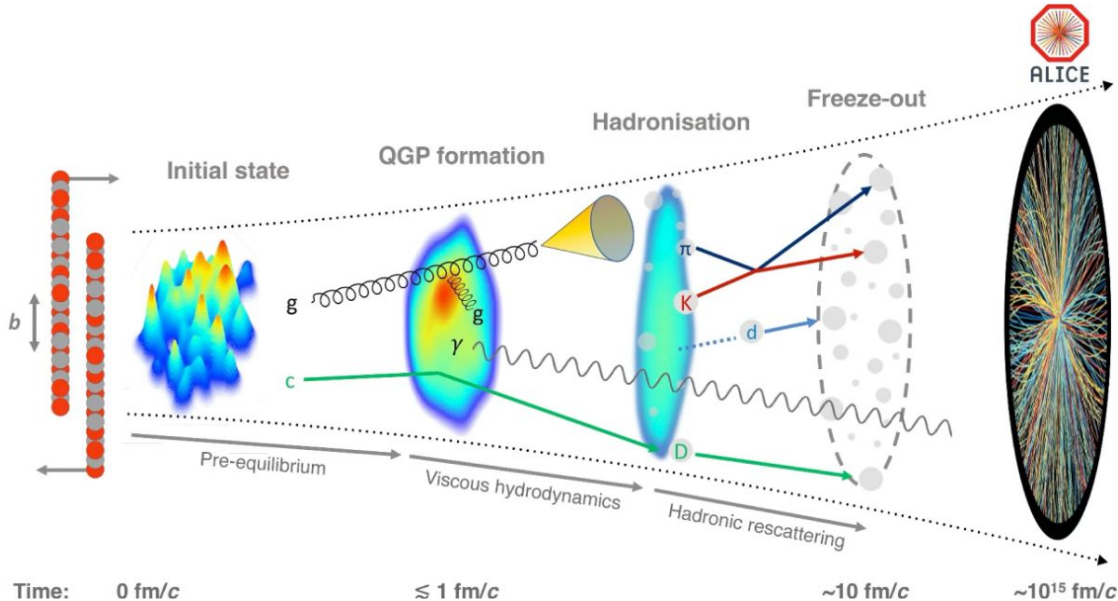


Quark gluon plasma

Мотивацията за ALICE

ALICE изследва QGP и етапите на сблъсъци между тежки йони (HI) чрез наблюдаеми величини във финалното състояние

- Адронизация, адронна химия и свойства на средата
- Взаимодействия на средата с “твърди” проби
- Спектрални форми на адроните и колективни ефекти



Интересните въпроси:

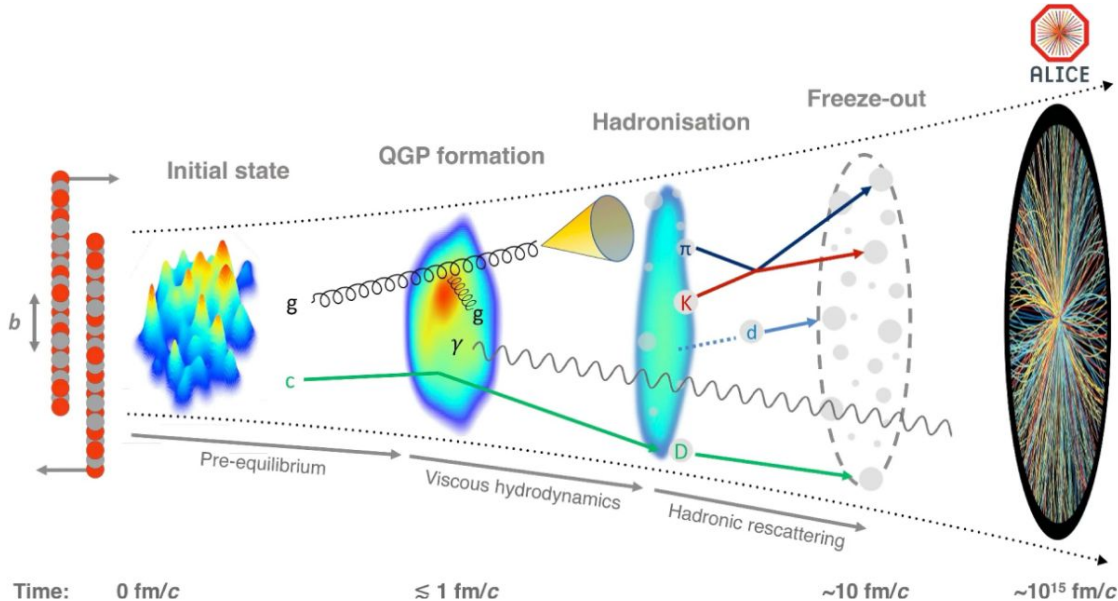
- Начални условия и геометрия
- QGP: транспортни свойства
- QGP: температура
- Кога настъпва адронизация?
- Остатъчно силно взаимодействие
- Как се образуват леките ядра?

Quark gluon plasma

Мотивацията за ALICE

ALICE изследва QGP и етапите на сблъсъци между тежки йони (HI) чрез наблюдаеми величини във финалното състояние

- Адронизация, адронна химия и свойства на средата
- Взаимодействия на средата с “твърди” проби
- Спектрални форми на адроните и колективни ефекти



Time: 0 fm/c

$\lesssim 1$ fm/c

~ 10 fm/c

$\sim 10^{15}$ fm/c

Интересните въпроси:

- Начални условия и геометрия
- QGP: транспортни свойства
- QGP: температура
- Кога настъпва адронизация?
- Остатъчно силно взаимодействие
- Как се образуват леките ядра?



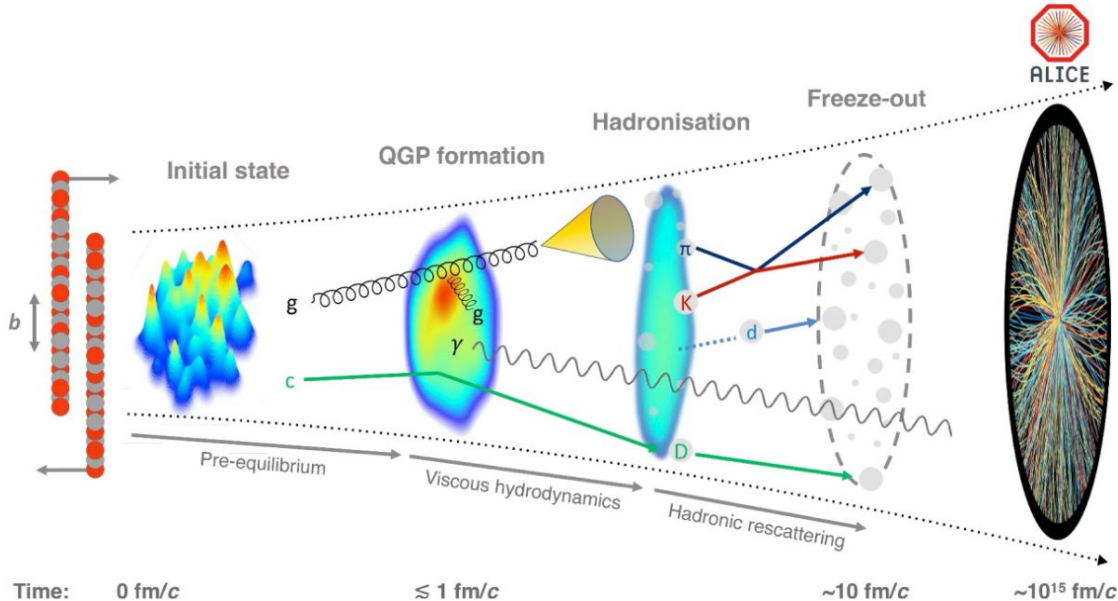
сега

Quark gluon plasma

Мотивацията за ALICE

ALICE изследва QGP и етапите на сблъсъци между тежки йони (HI) чрез наблюдаеми величини във финалното състояние

- Адронизация, адронна химия и свойства на средата
- Взаимодействия на средата с “твърди” проби
- Спектрални форми на адроните и колективни ефекти



Интересните въпроси:

- Начални условия и геометрия
- QGP: транспортни свойства
- QGP: температура
- Кога настъпва адронизация?
- Остатъчно силно взаимодействие
- Как се образуват леките ядра?

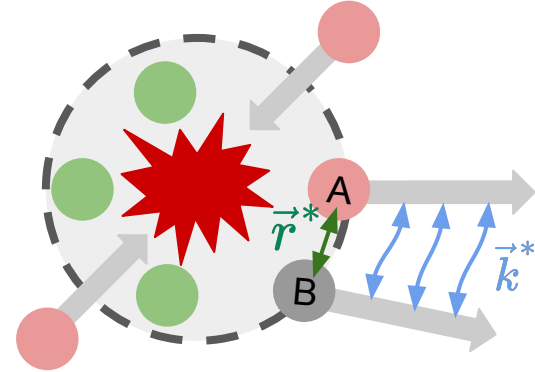


в бъдеще

Двучастични корелации

Фемтоскопия

- Корелационна функция се изгражда от **едночастичния импулс k^*** на двойка частици в тяхната система на покой.
- Експериментално тя се дефинира като отношението на разпределението от идентични събития $N(k^*)$ към разпределението от смесени събития $M(k^*)$.

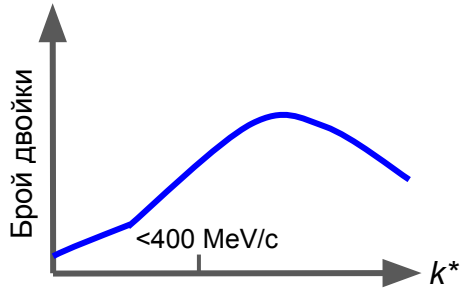


$$C(k^*) = \frac{N(k^*)}{M(k^*)}$$

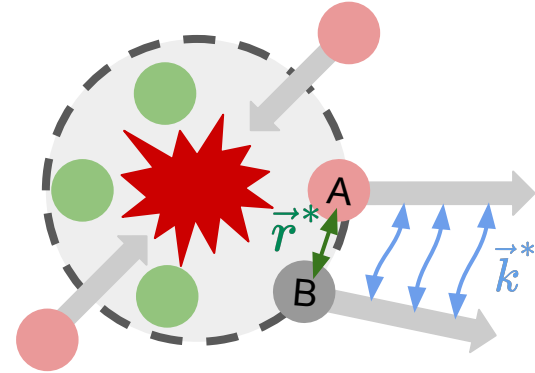
Двучастични корелации

Фемтоскопия

- Корелационна функция се изгражда от **едночастичния импулс k^*** на двойка частици в тяхната система на покой.
- Експериментално тя се дефинира като отношението на разпределението от **идентични събития $N(k^*)$** към разпределението от смесени събития $M(k^*)$.



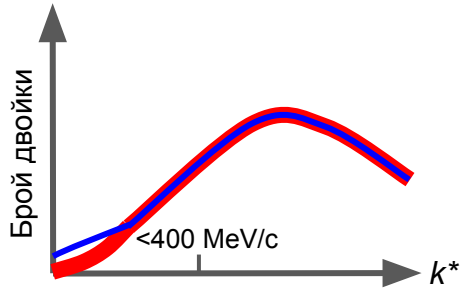
$$C(k^*) = \frac{N(k^*)}{M(k^*)}$$



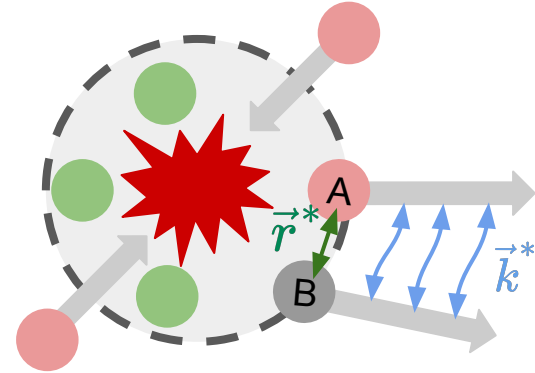
Двучастични корелации

Фемтоскопия

- Корелационна функция се изгражда от **едночастичния импулс k^*** на двойка частици в тяхната система на покой.
- Експериментално тя се дефинира като отношението на разпределението от **идентични събития $N(k^*)$** към разпределението от **смесени събития $M(k^*)$** .



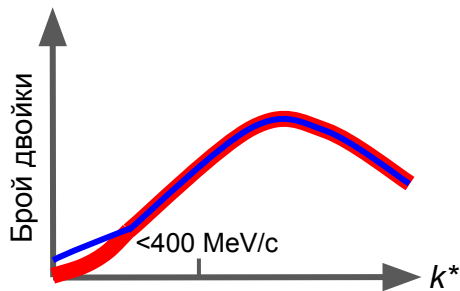
$$C(k^*) = \frac{N(k^*)}{M(k^*)}$$



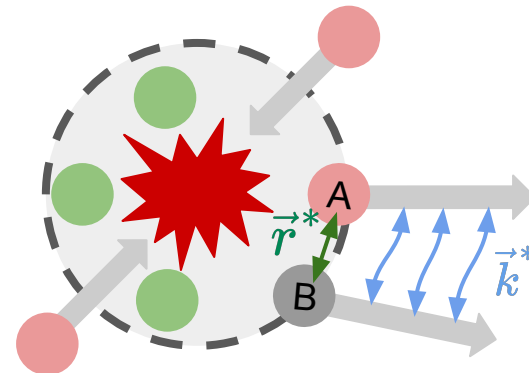
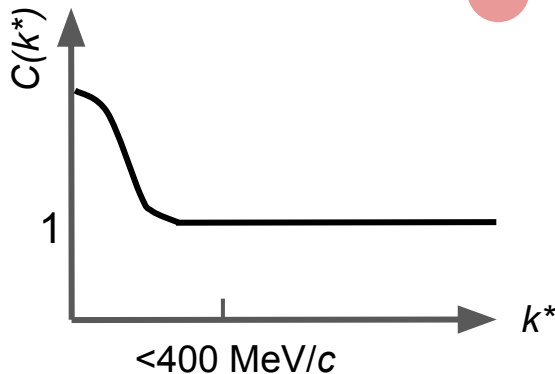
Двучастични корелации

Фемтоскопия

- Корелационна функция се изгражда от **едночастичния импулс k^*** на двойка частици в тяхната система на покой.
- Експериментално тя се дефинира като отношението на разпределението от **идентични събития $N(k^*)$** към разпределението от **смесени събития $M(k^*)$** .



$$C(k^*) = \frac{N(k^*)}{M(k^*)}$$



Правило на палеца:

$C(k^*) > 1$ привличане

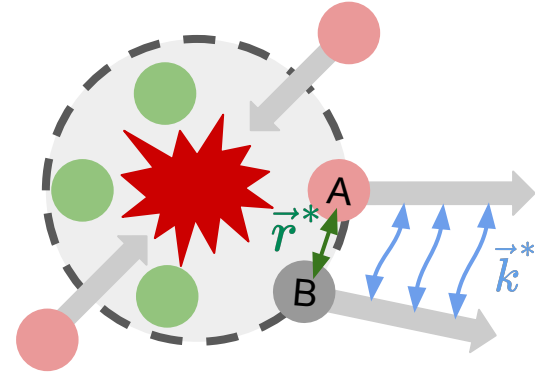
$C(k^*) < 1$ отблъскване

$C(k^*) = 1$ липса на корелации

Двучастични корелации

Фемтоскопия

- Корелационна функция се изгражда от **едночастичния импулс k^*** на двойка частици в тяхната система на покой.
- Експериментално тя се дефинира като **отношението** на разпределението от **идентични събития $N(k^*)$** към разпределението от **смесени събития $M(k^*)$** .
- Теоретичната интерпретация се дава от формализма на Куунин-Прат, който свързва $C(k^*)$ с двучастичната вълнова функция и размера на източника.
S. Pratt et al, [Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.55:357-402. 2005](#)



$$C(k^*) = \frac{N(k^*)}{M(k^*)} = \int S(r^*) \left| \Psi(\vec{r}^*, \vec{k}^*) \right|^2 dr^3$$

Разпределение на относителните разстояния между двойка частици. При Гаусов източник размера се параметризира с r_0 .

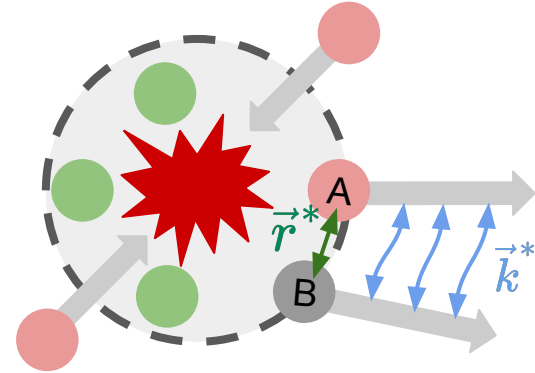
Включва взаимодействията в крайното състояние (силно и Кулоново), както и симетризацията на вълновата функция.

Двучастични корелации

Фемтоскопия

- Корелационна функция се изгражда от **едночастичния импулс k^*** на двойка частици в тяхната система на покой.
- Експериментално тя се дефинира като **отношението** на разпределението от **идентични събития $N(k^*)$** към разпределението от **смесени събития $M(k^*)$** .
- Теоретичната интерпретация се дава от формализма на Куунин-Прат, който свързва $C(k^*)$ с двучастичната вълнова функция и размера на източника.

S. Pratt et al, [Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.55:357-402. 2005](#)



$$C(k^*) = \frac{N(k^*)}{M(k^*)} = \int S(r^*) \left| \Psi(\vec{r}^*, \vec{k}^*) \right|^2 dr^3$$

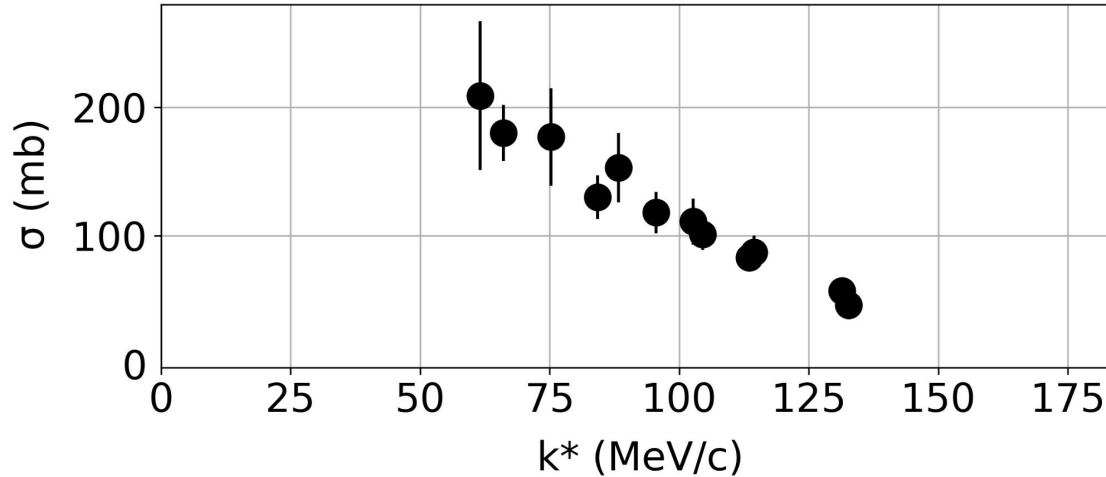
Източника е нещо което може да определим, поне при сблъсъци протон-протон.

Включва взаимодействията в крайното състояние (силно и Кулоново), както и симетризацията на вълновата функция.

Correlation Analysis Tool using the Schrödinger equation

Как работи - пример с рЛ

[Mihaylov et al. EPJC 78 \(2018\) 5. 394](#)



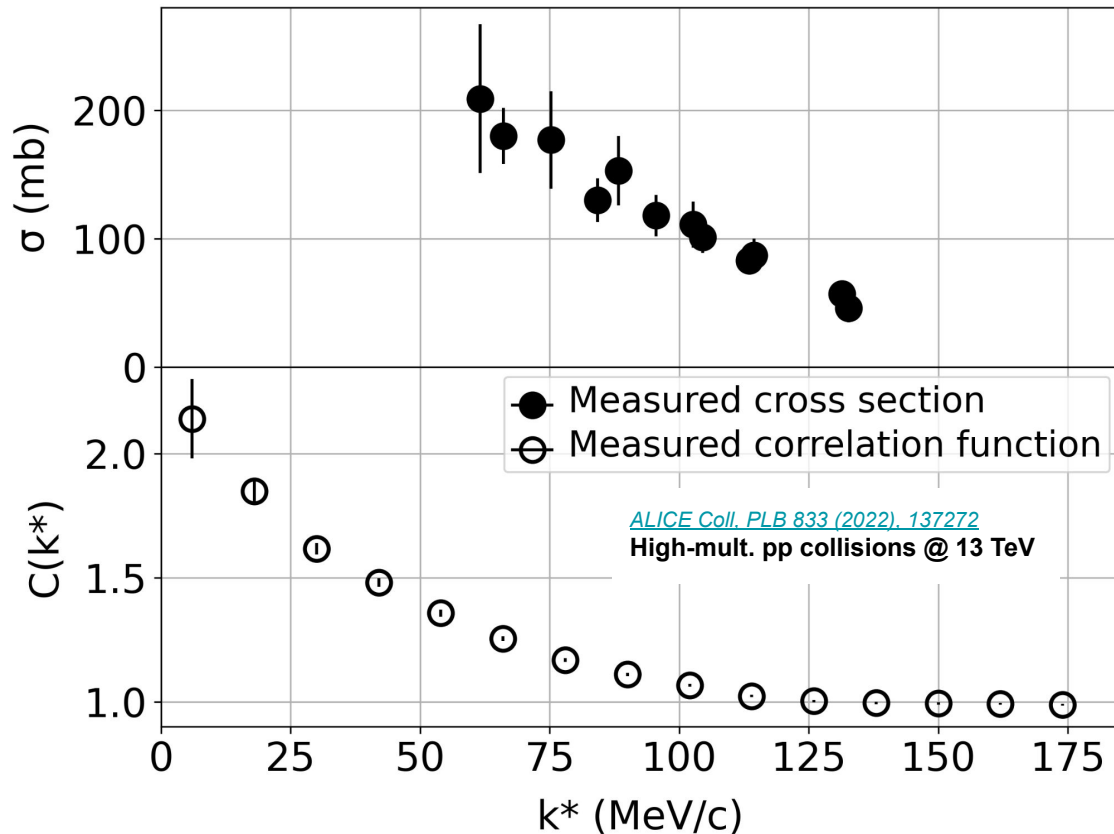
Всички налични данни
(сечение) от експерименти на
разсейване за рЛ.

Correlation Analysis Tool using the Schrödinger equation



Как работи - пример с $p\Lambda$

[Mihaylov et al. EPJC 78 \(2018\) 5. 394](#)



Всички налични данни (сечение) от експерименти на разсейване за $p\Lambda$.

Корелационната функция (ALICE) намалява драстично статистическите грешки!

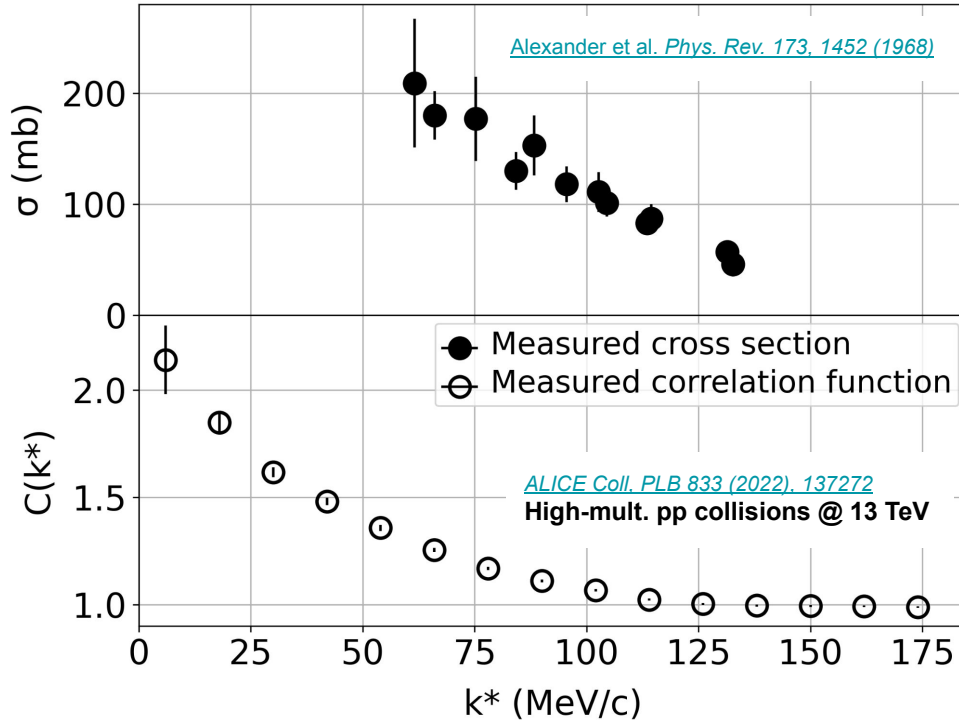
Н.В. Нямаме директна връзка между $C(k^*)$ и фазовото отместване / параметрите на разсейване.

Correlation Analysis Tool using the Schrödinger equation

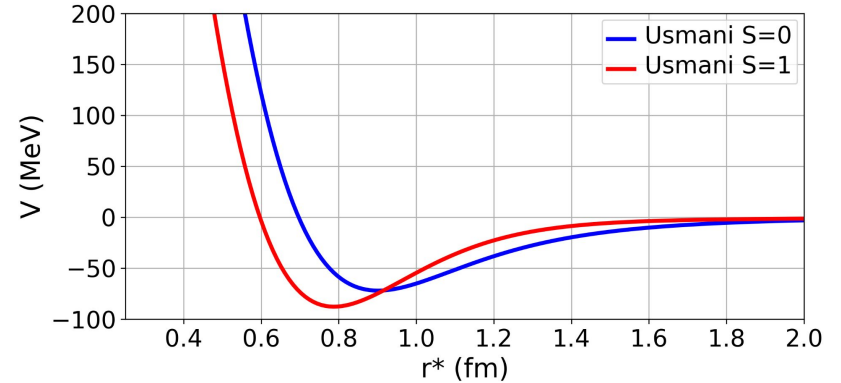


Как работи - пример с $p\Lambda$

[Mihaylov et al. EPJC 78 \(2018\) 5. 394](#)



Потенциал: [Usmani et al. PRC. 29:684–687, 1984](#)

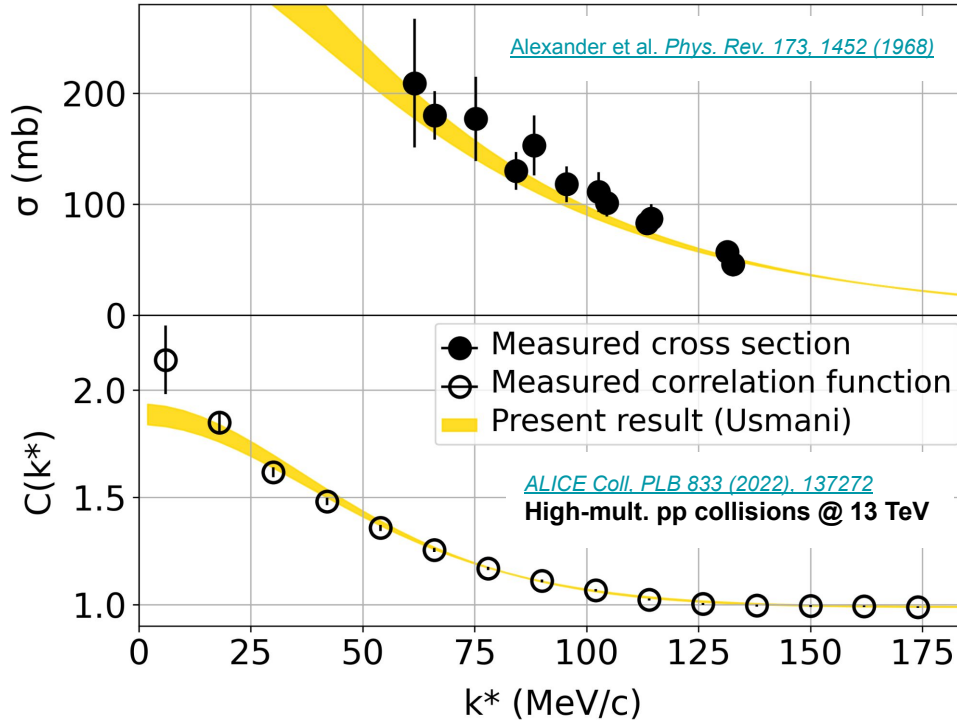


Correlation Analysis Tool using the Schrödinger equation

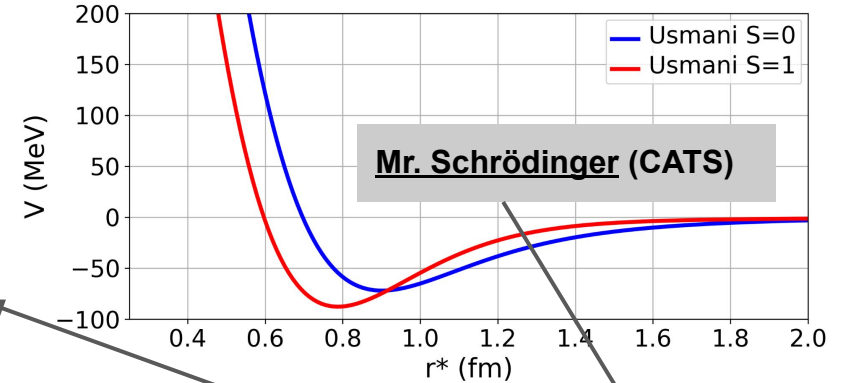


Как работи - пример с $p\Lambda$

[Mihaylov et al. EPJC 78 \(2018\) 5, 394](#)



Потенциал: [Usmani et al. PRC. 29:684–687, 1984](#)



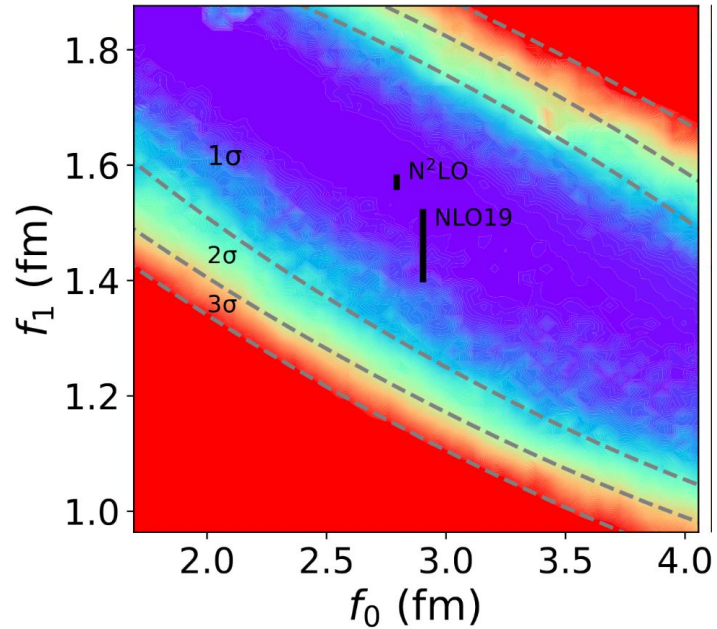
$|\Psi(k^*, r^*)|^2$

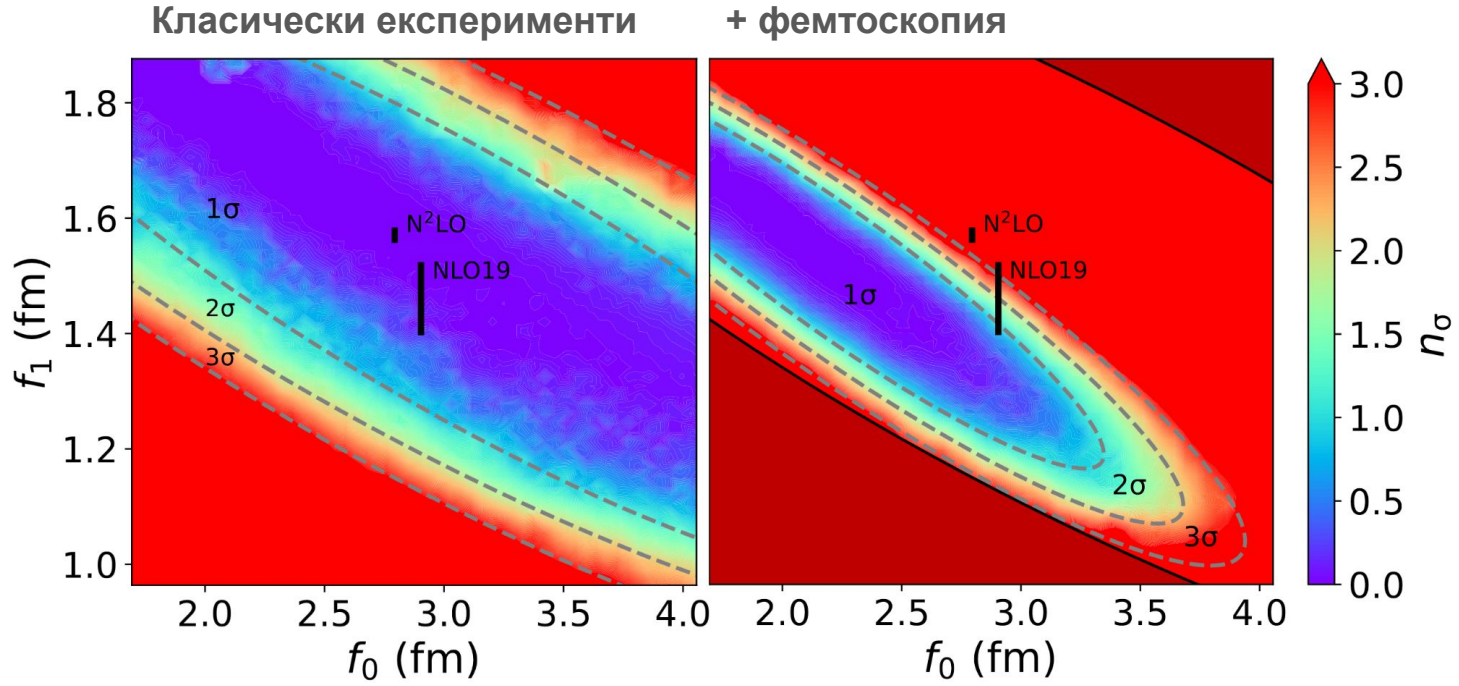
Koonin-Pratt

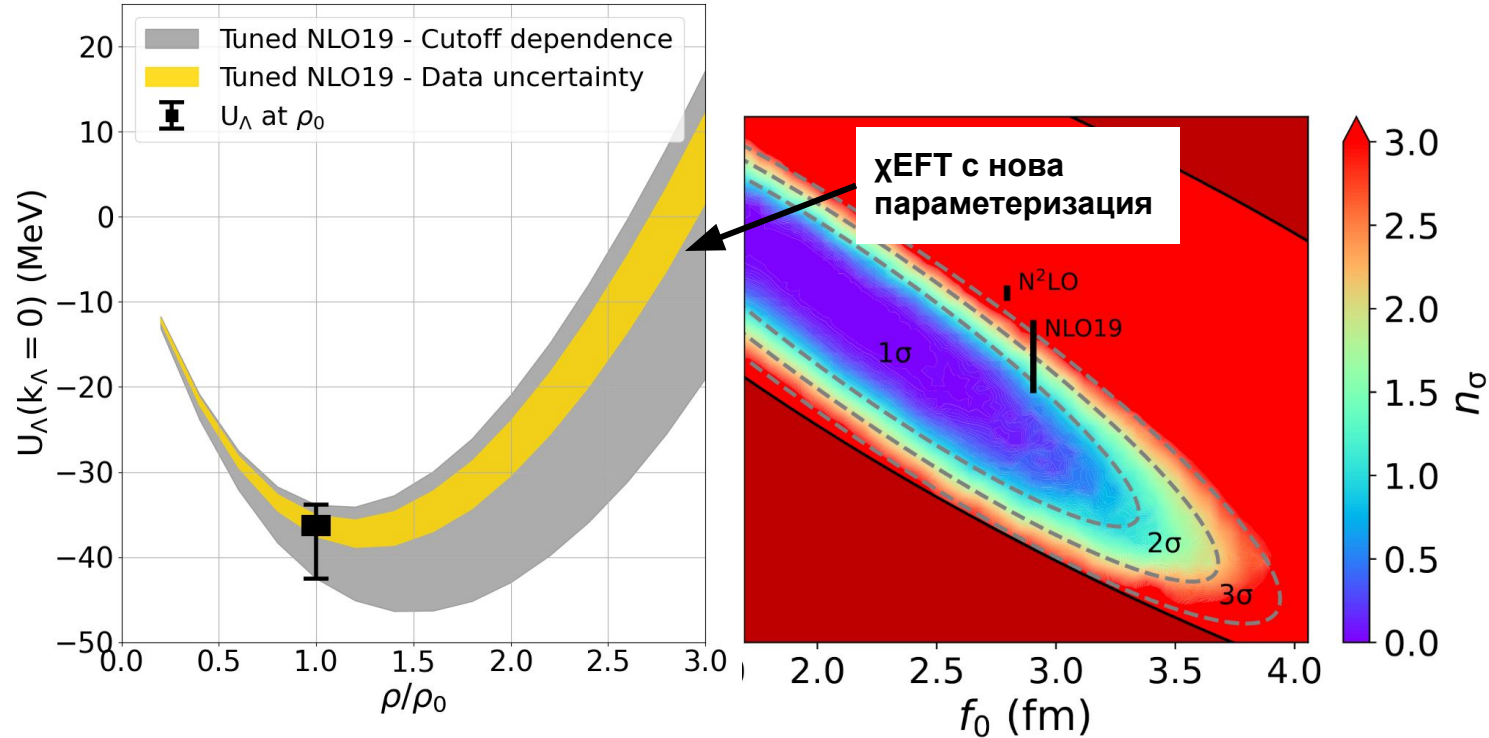
$$C(k^*) = \int S(r^*) |\Psi(\vec{r}^*, \vec{k}^*)|^2 dr^3$$

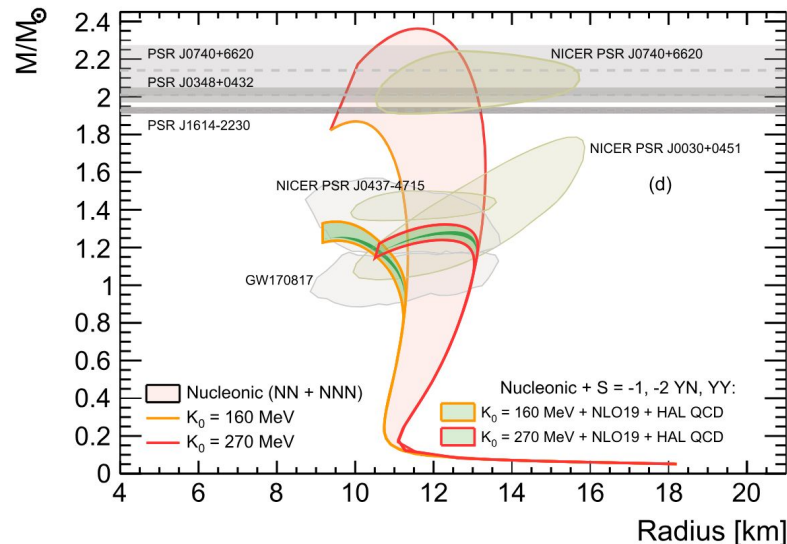
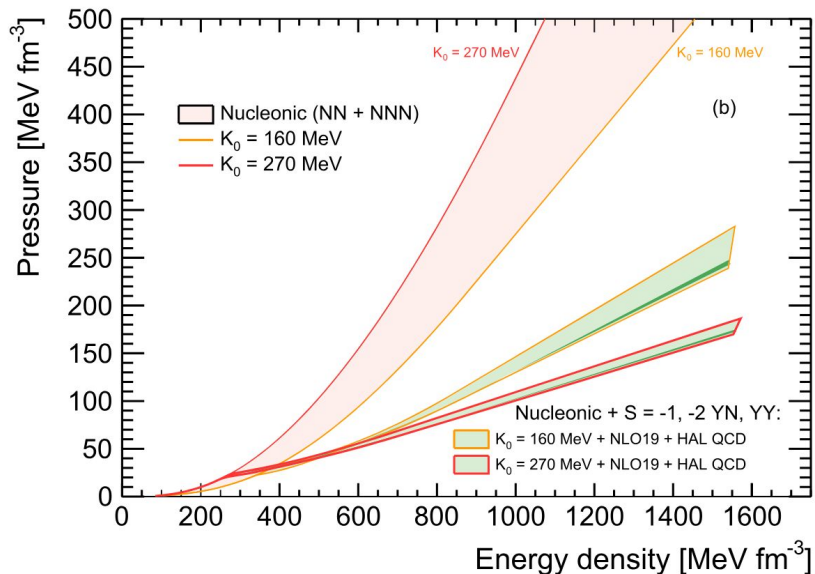


Класически експерименти









[I. Vidana, Mihaylov et al. EPJA 61 \(2025\), 3, 59](#)

- Съвременните експериментални данни и модели не могат да обяснят масивните неутронни звезди.
- Възможните решения включват допълнително отблъскване, напр. тричастични сили.
- По-екзотично решение е въвеждането на КХД аксиони в неутронните звезди.

Как се образуват леки (анти)ядра?

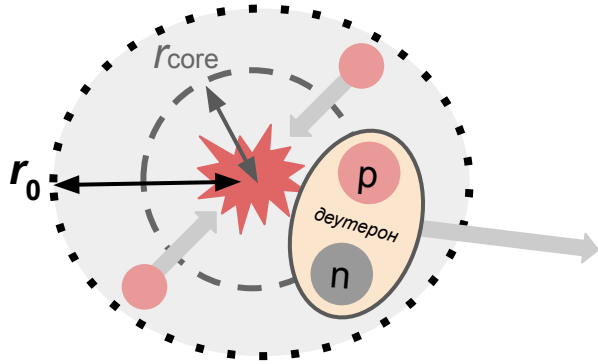
Директно, или от вече формирани се адрони?



Как се образуват леки (анти)ядра?

Директно, или от вече формирани се адрони?

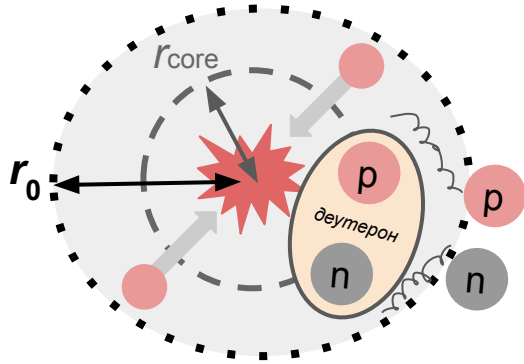
- Хипотеза: деутерона се сформира като първична частица



Как се образуват леки (анти)ядра?

Директно, или от вече формирани се адрони?

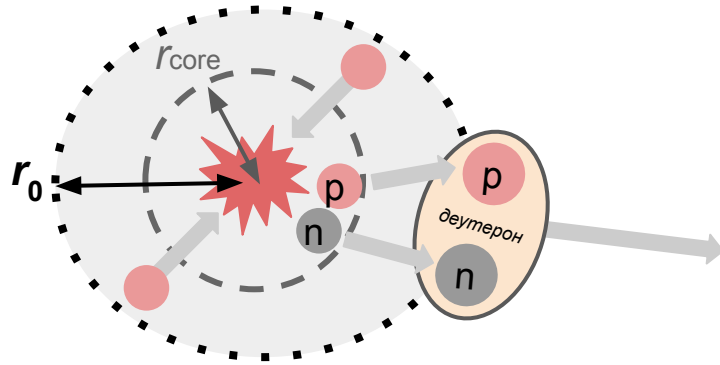
- Хипотеза: деутерона се сформира като първична частица
Ще бъде унищожен от горещата среда



Как се образуват леки (анти)ядра?

Директно, или от вече формирани се адрони?

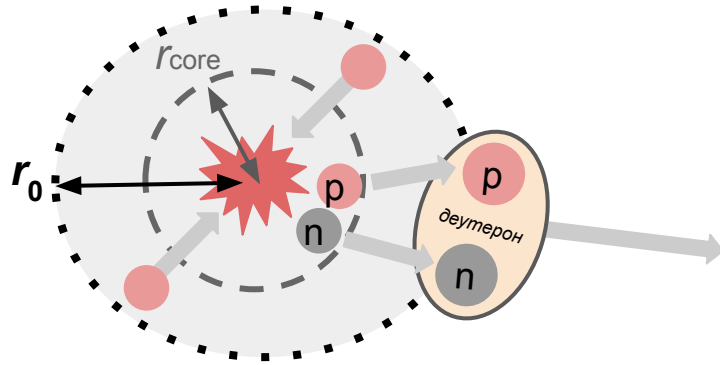
- Хипотеза: деутерона се сформира от нуклони



Как се образуват леки (анти)ядра?

Директно, или от вече формирани се адрони?

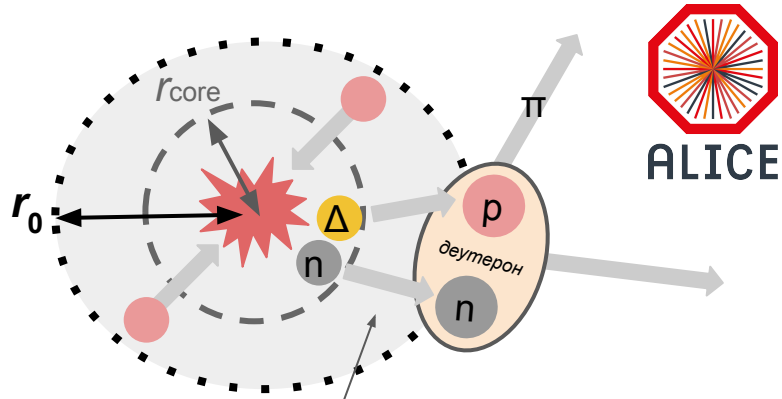
- Хипотеза: деутерона се сформира от нуклони
Проблем със запазване на енергията



Как се образуват леки (анти)ядра?

Директно, или от вече формирани се адрони?

- Хипотеза: деутерона се сформира от нуклони, образувани при разпад на резонанси

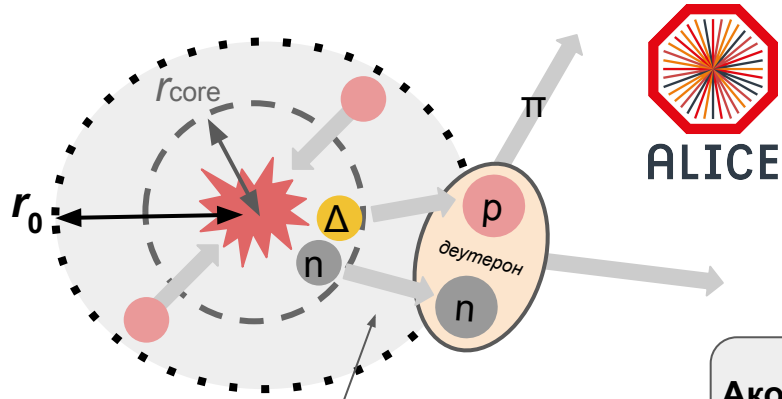


Коалесцентните модели използват **източника**, за да изчислят вероятността такъв процес да се случи

Как се образуват леки (анти)ядра?

Директно, или от вече формирани се адрони?

- Хипотеза: деутерона се сформира от нуклони, образувани при разпад на резонанси



Ако това е вярно, d-π корелацията трябва да наследява всички корелации от p-π, включително тази на Δ-резонанса

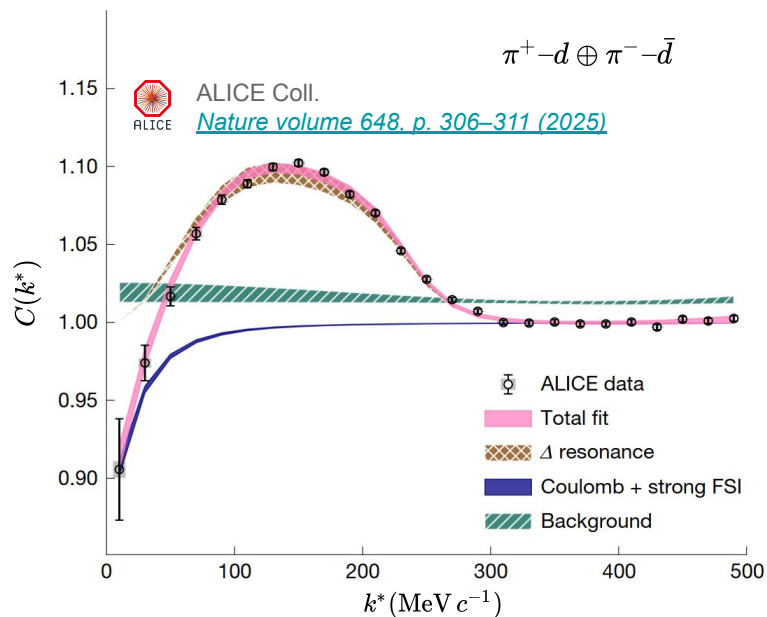
Коалесцентните модели използват **източника**, за да изчислят вероятността такъв процес да се случи

Как се образуват леки (анти)ядра?

От нуклони с помощта на резонанси



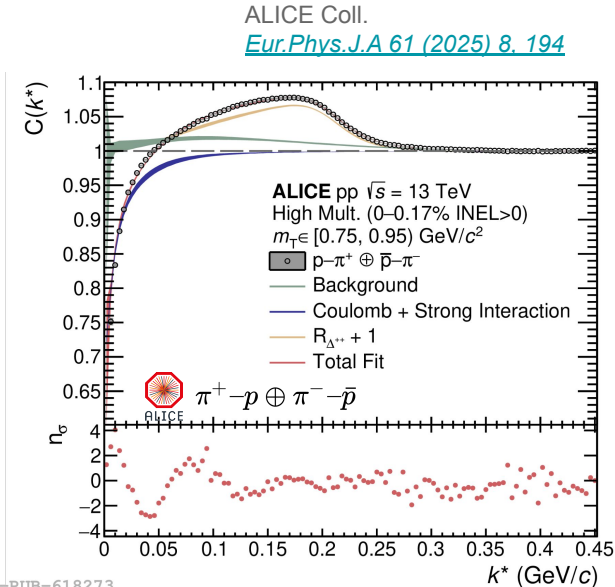
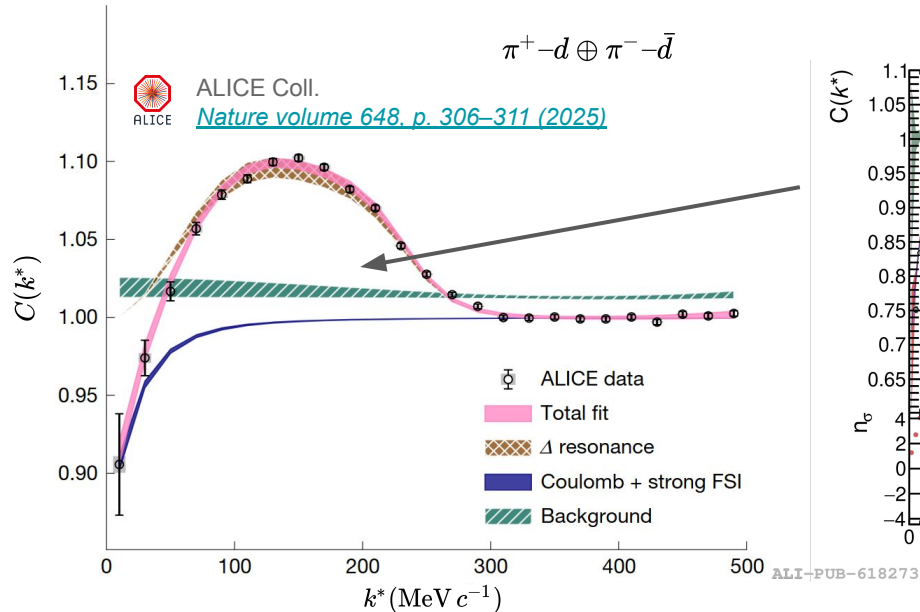
- Това същият Δ -пик от p - π ли е?



Как се образуват леки (анти)ядра?

От нуклони с помощта на резонанси

- Това същият Δ -пик от $p-\pi$ ли е?
 -> Да! Спектралната форма на пика е извлечена от експерименталната $p-\pi$ корелация и кинематично трансформирана към $d-\pi$.

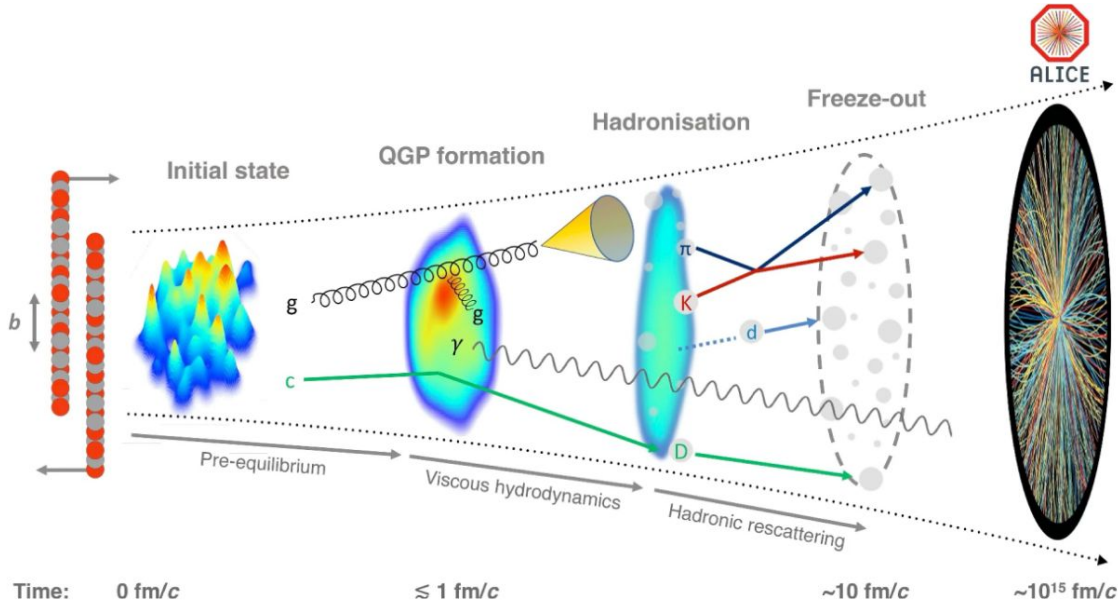


Quark gluon plasma

Мотивацията за ALICE

ALICE изследва QGP и етапите на сблъсъци между тежки йони (HI) чрез наблюдаеми величини във финалното състояние

- Адронизация, адронна химия и свойства на средата
- Взаимодействия на средата с “твърди” проби
- Спектрални форми на адроните и колективни ефекти



Интересните въпроси:

- Начални условия и геометрия
- QGP: транспортни свойства
- QGP: температура
- Кога настъпва адронизация?
- Остатъчно силно взаимодействие
- Как се образуват леките ядра?



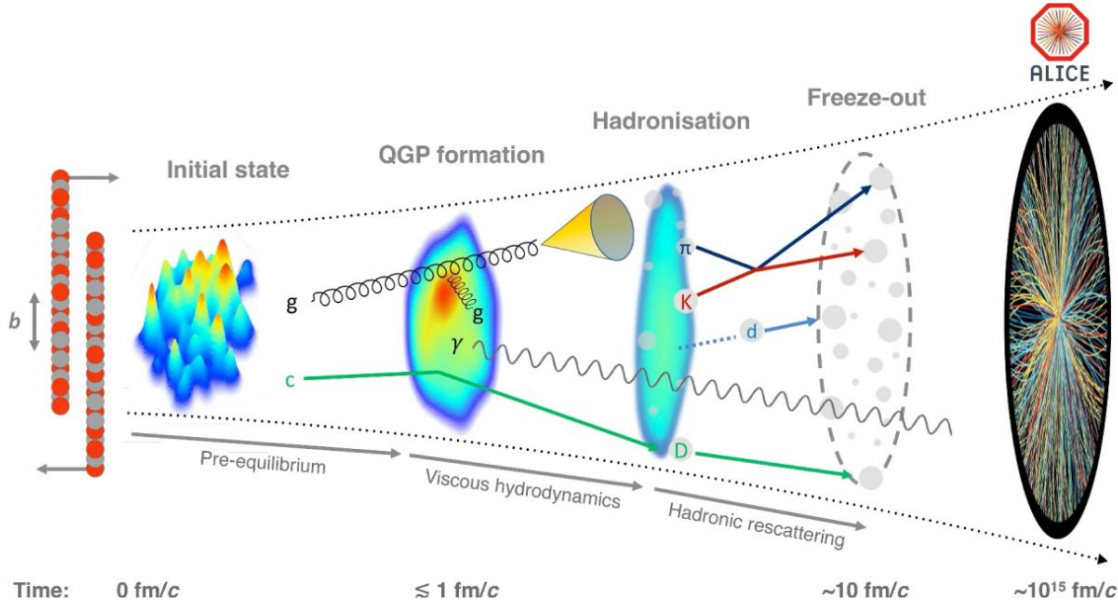
сега

Quark gluon plasma

Мотивацията за ALICE

ALICE изследва QGP и етапите на сблъсъци между тежки йони (HI) чрез наблюдаеми величини във финалното състояние

- Адронизация, адронна химия и свойства на средата
- Взаимодействия на средата с “твърди” проби
- Спектрални форми на адроните и колективни ефекти



Интересните въпроси:

- Начални условия и геометрия
- QGP: транспортни свойства
- QGP: температура
- Кога настъпва адронизация?
- Остатъчно силно взаимодействие
- Как се образуват леките ядра?



в бъдеще

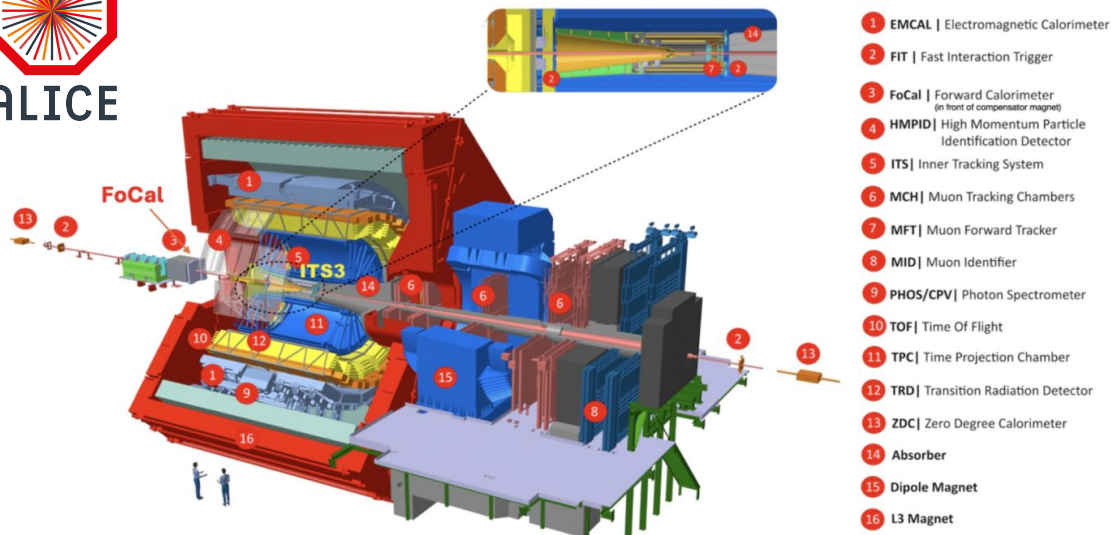


FoCal

Калориметър за RUN4 (след 2029 г.)



ALICE



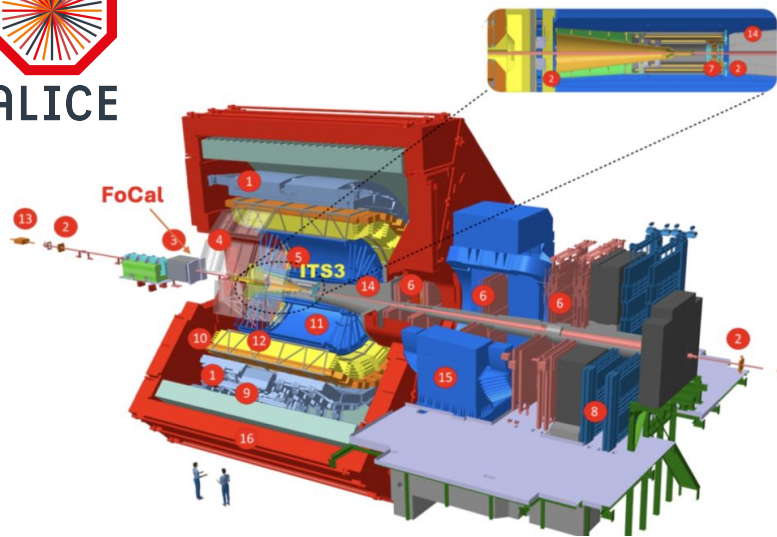
- При следващия ъпгрейд на ALICE, ще се добави калориметър
- Ще се покрие псевдобързината $3.4 < \eta < 5.8$
- Ще се намира на 7 м. от точката на сблъсък

FoCal

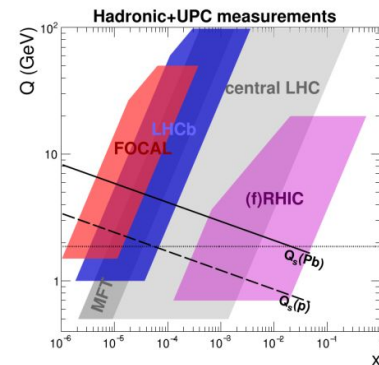
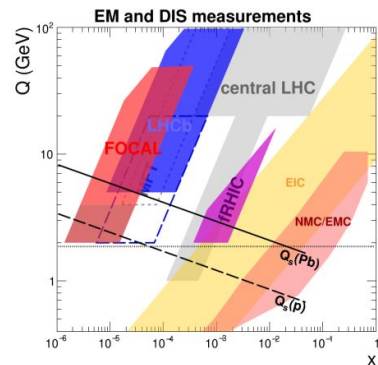
Калориметър за RUN4 (след 2029 г.)



ALICE



- При следващия ъпгрейд на ALICE, ще се добави калориметър
- Ще се покрие псевдобързината $3.4 < \eta < 5.8$
- Ще се намира на 7 м. от точката на сблъсък

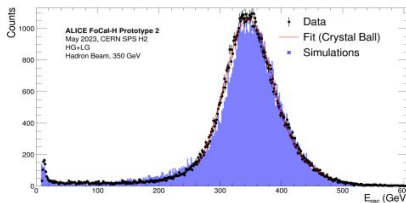
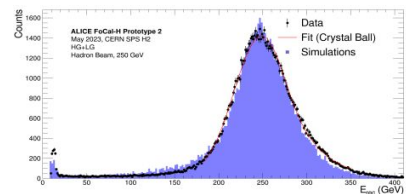
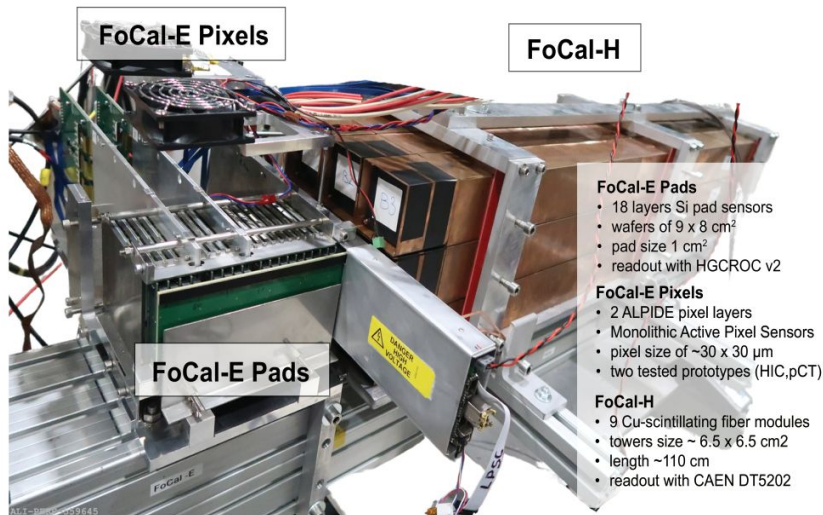


Цел: изследване на глюонното насищане

- FoCal-E: финосегментиран електромагнитен калориметър
- FoCal-H: адронен калориметър (метален сцинтилатор) позволяващ изолирането на фотони и засичане на джетове

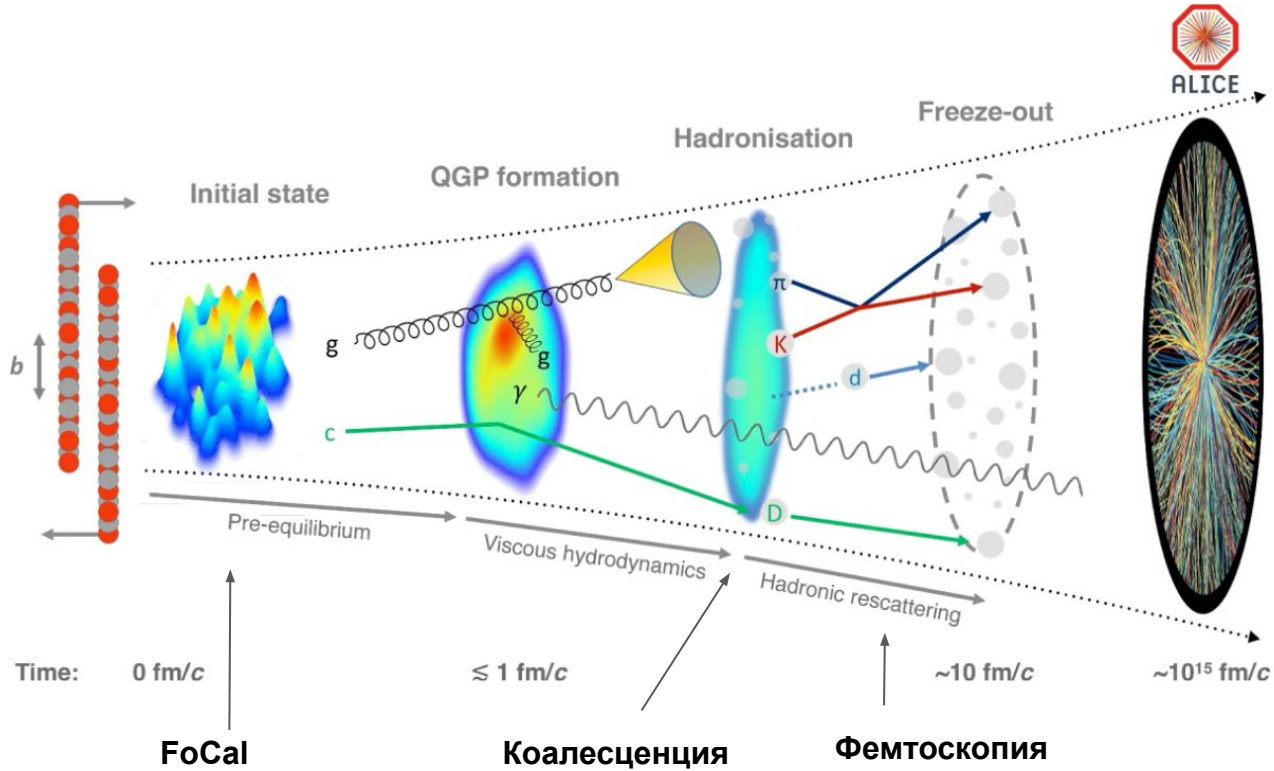


- Участие във FoCal-H от 2021 г.
- Разработка на детектора, оптимизация на дизайна, анализ и т.н.
- Сглобени и тествани успешно са 2 прототипа на адронен калориметър FoCal-H с дизайн от медни тръбички и сцинтилационно влакно
- Завършена докторантура
- Получените резултати валидират технологията на детектора
- Stay tuned



Обобщение

Приноса на катедра Атомна Физика към ALICE

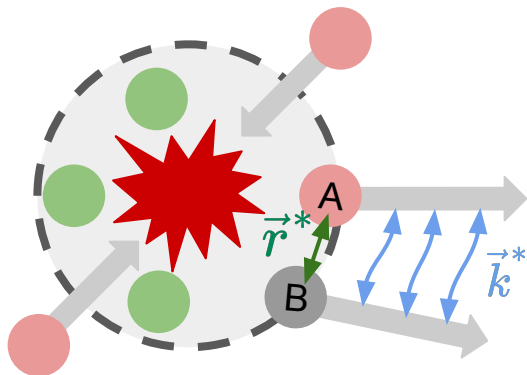
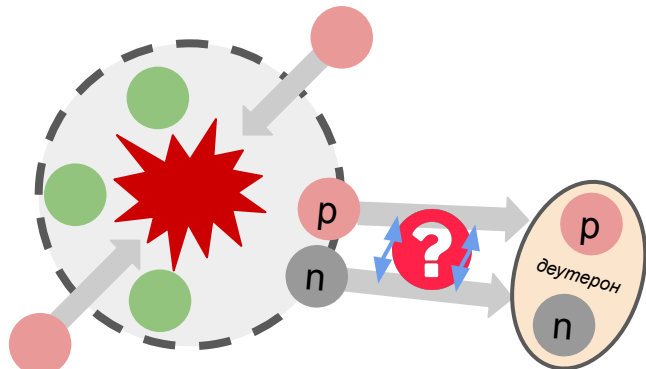


Backup



Коалесценция и фемтоскопия

Общият източник



Импулсни разпределения (p,n)

$$\frac{d^3 N}{dP^3} = \frac{S_d}{(2\pi)^6} \int d^3 k \int d^3 r_n \int d^3 r_p \mathcal{D}(\vec{k}, \vec{r}) H_{np}(\vec{r}_n, \vec{r}_p) G_{np}(\vec{P}/2 + \vec{k}, \vec{P}/2 - \vec{k})$$

Вигнерова плътност на деутерона

$$\int d^3 \xi e^{i\vec{k} \cdot \vec{\xi}} \varphi_d\left(\vec{r} + \frac{\vec{\xi}}{2}\right) \varphi_d^*\left(\vec{r} - \frac{\vec{\xi}}{2}\right)$$

Гаусов източник с размер r_0

$$\frac{1}{(2\pi r_0)^3} \exp\left(-\frac{r^2 + r_d^2}{4r_0^2}\right)$$



Единственият източник да ги управлява всички,
единственият да ги обедини –
всички адрони и резонанси,
както фемтоскопията, така и коалесценцията!

$$C(k^*) = \frac{N(k^*)}{M(k^*)} = \int S(r^*) \left| \Psi(\vec{r}^*, \vec{k}^*) \right|^2 dr^3$$

Същият източник релевантен за
коалесценцията.
При Гаусов източник размера се
параметризира с r_0 .

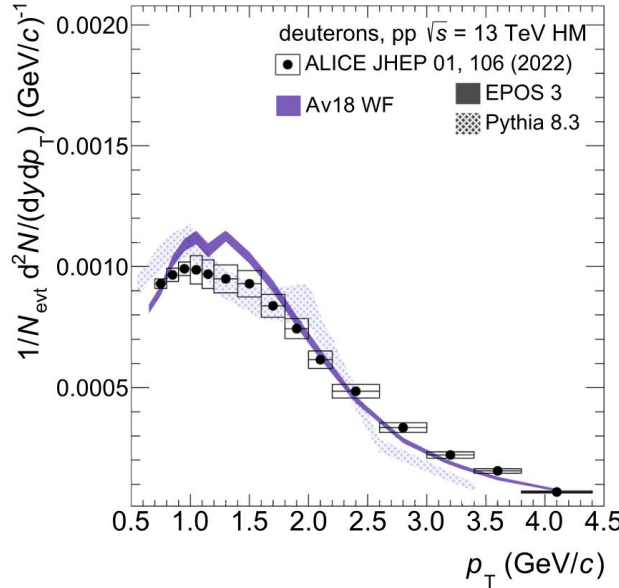
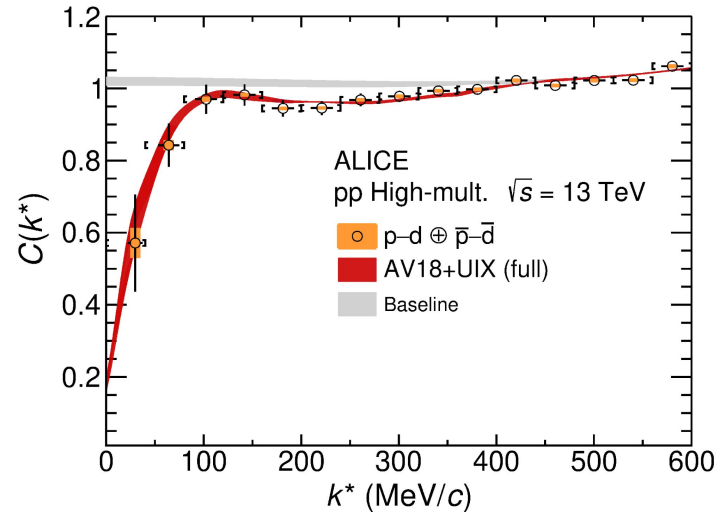
Включва взаимодействия в крайното
състояние (силно и Кулоново), както и
симетризацията на вълновата функция.

Деутеронът

Как знаем, че всичко работи последователно?



Въз основа на
ALICE Coll. [Phys.Rev.X 14 \(2024\) 3. 031051](#)



- Съвременен коалесцентен модел, използващ **общ източник** и деутеронна вълнова функция, базирана на същия потенциал AV18, успешно описва измерените деутеронни спектри!
Въз основа на M. Mahlein et al. [Eur.Phys.J.C 83 \(2023\) 9. 804](#)

- Корелационната функция d-p е измерена и моделирана:
 - като три-частична система (pn)p със съвременни модели на взаимодействие.
 - използвайки хипотезата за **общ източник** за трите нуклона.

Приложена е корекция за образуване чрез резонанси!

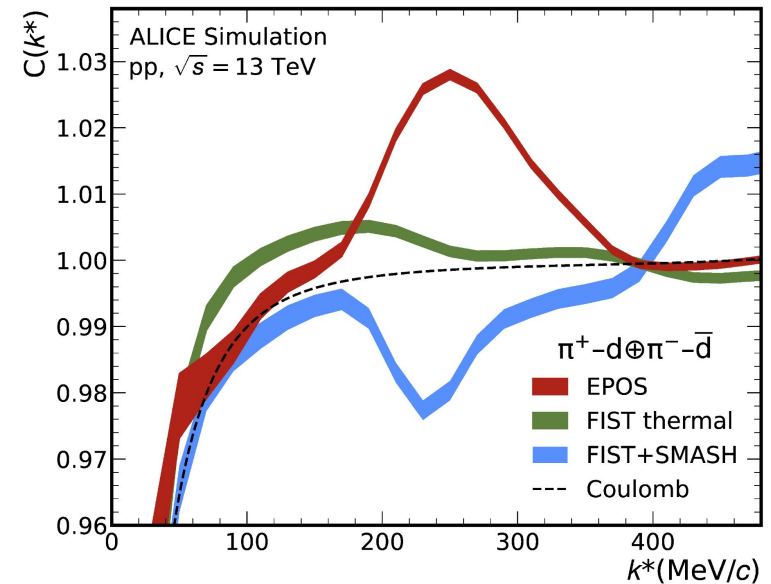
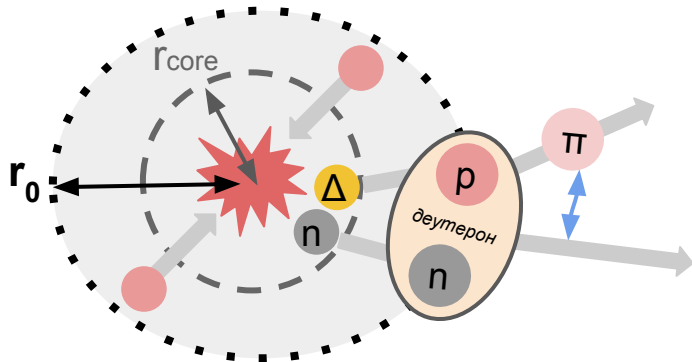
Алтернативни обяснения?

Монте Карло симулации

- [1] V. Vovchenko et al. [Comput.Phys.Commun. 244 \(2019\) 295-310](#)
[2] J. Weil et al. [Phys.Rev.C 94 \(2016\) 5. 054905](#)
[3] K. Werner et al. [Phys.Rev.C 82 \(2010\) 044904](#)
[4] M. Mahlein et al. [Eur.Phys.J.C 83 \(2023\) 9. 804](#)



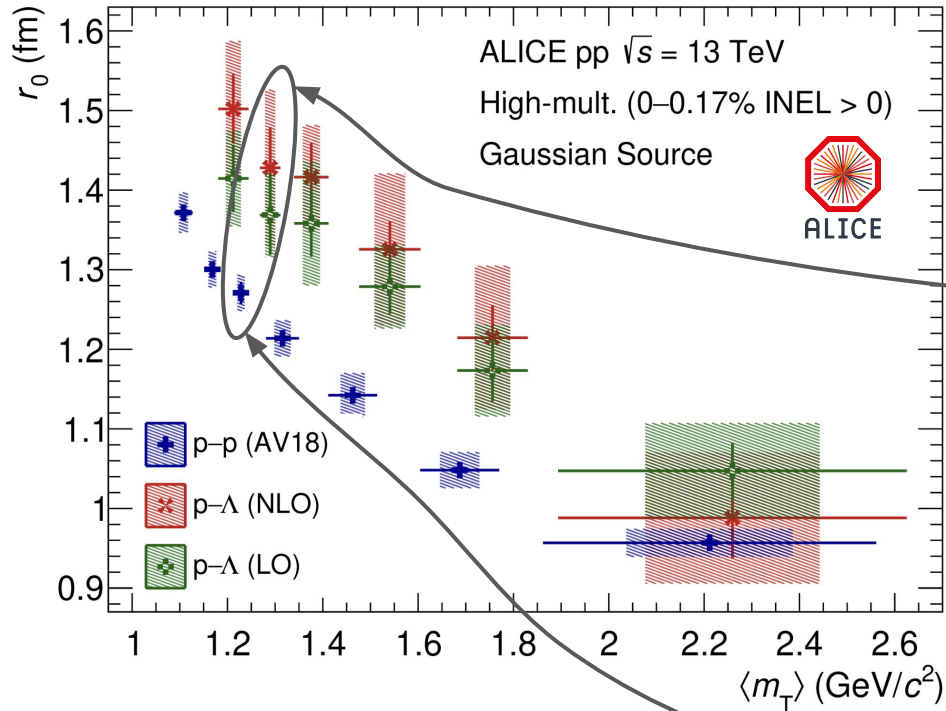
- **Чисто „термично“ образуване**
Вземаме добивите от *Thermal FIST* [1], без да въвеждаме допълнителни реакции
- **Симулация на последващи процеси на разсейване**
Използва се *SMASH* [2] и наличните данни за сеченията
- **Транспортен модел за образуване на нуклони/резонанси, и коалесцентен модел за образуване на деутерони**
Транспортният модел *EPOS* [3] е настроен да възпроизвежда резонансните дялове от *Thermal FIST* [1]. Коалесценцията е базирана на [4].



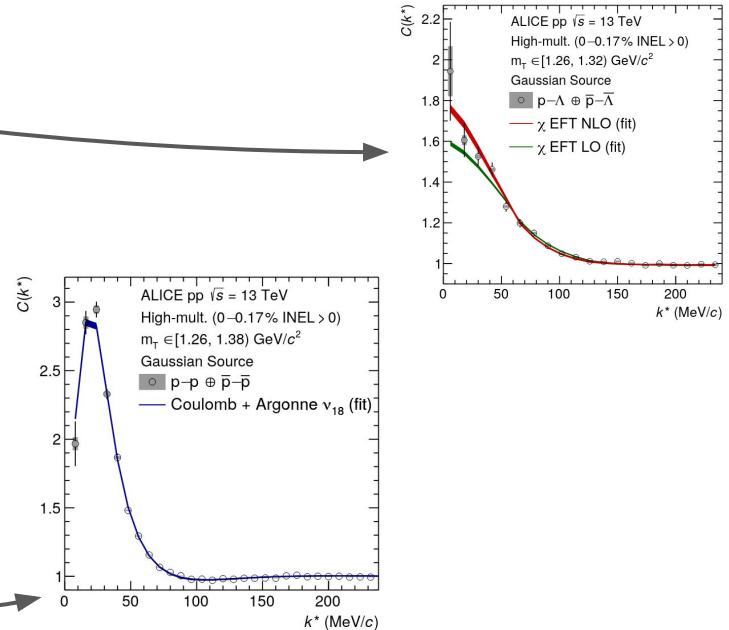
ALI-SIMUL-601130

Femtoscscopy @ ALICE

In small collision systems (pp)



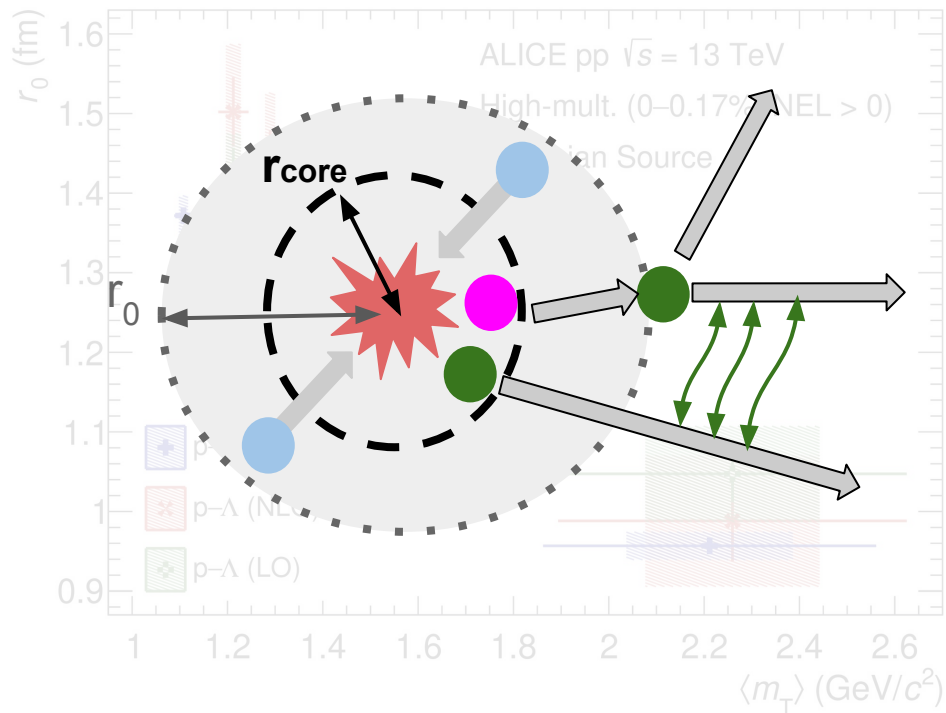
- Study of the pp and pΛ, using a Gaussian source, revealed mT scaling. The source size is different for different species.



Femtoscscopy @ ALICE

Resonances source model (RSM)

Details later in the presentation



- Study of the pp and p Λ , using a Gaussian source, revealed mT scaling. The source size is different for different species.
- **A hypothesis:**

Gaussian “primordial core” **common for all species** modified by decays of short lived resonances.

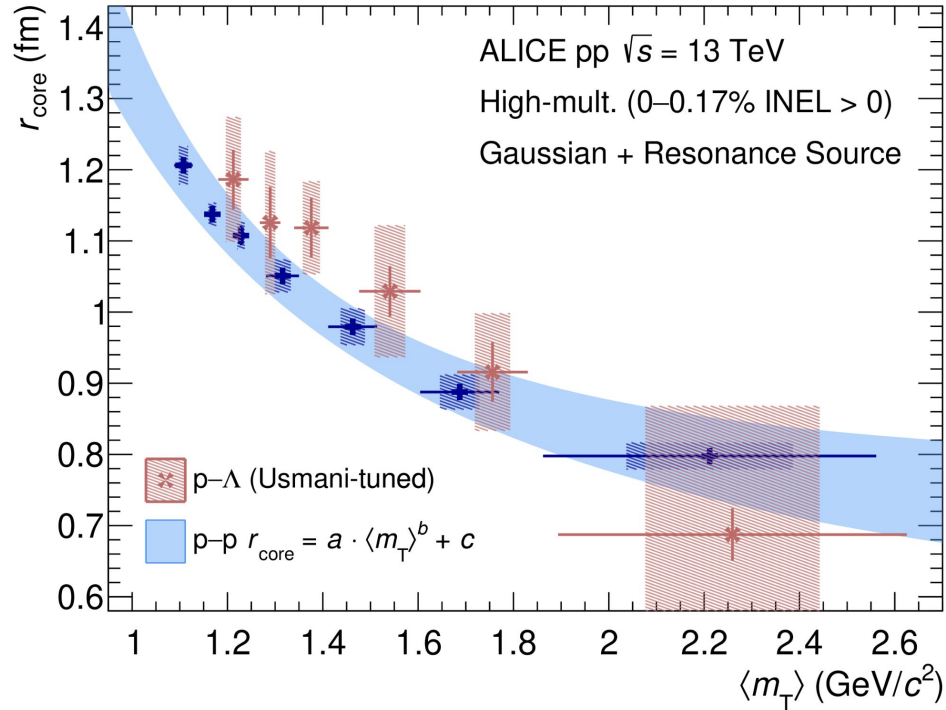
Based on statistical hadronization model $\frac{2}{3}$ of all protons and Λ s are produced like that. Resonances decaying into Λ s, on average, live longer.

$\langle \tau \rangle$ for protons c.a. 1.7 fm/c

$\langle \tau \rangle$ for Λ s c.a. 4.7 fm/c

Femtoscscopy @ ALICE

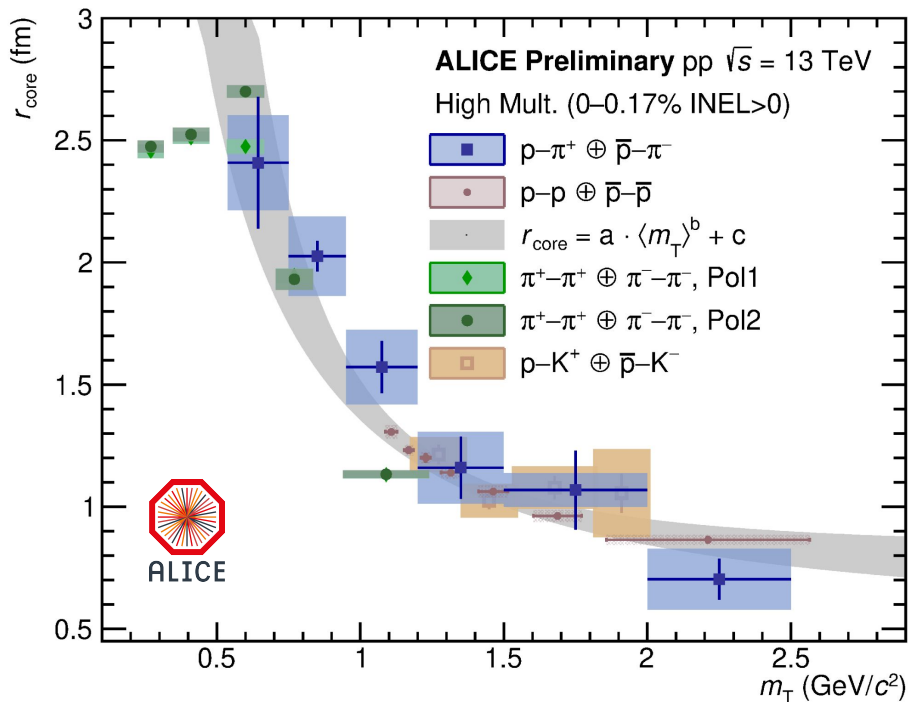
Resonances source model (RSM)



- Study of the pp and p Λ , using a Gaussian source, revealed mT scaling. The source size is different for different species.
- The **breakthrough** of the Resonance Source Model (RSM)
A “primordial core” **common for all species** modified by decays of short lived resonances.
- Any baryon-baryon pair will follow this scaling, and the source size can be extracted based on the $\langle m_T \rangle$ of the measured pairs!
- This allows for **precision studies of the strong interaction.**

Femtoscscopy @ ALICE

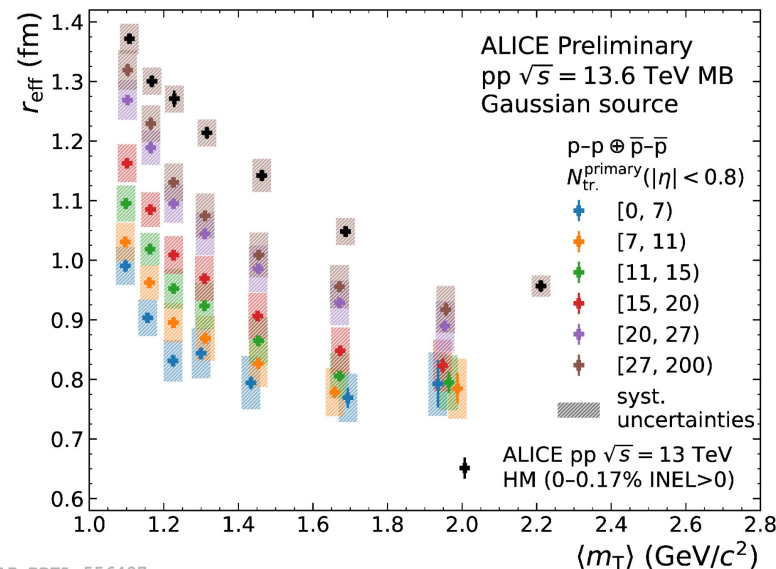
Resonances source model (RSM)



ALI-PREL-576328

The scaling (in pp) was everywhere in RUN2

The studies are now commencing in RUN3



ALI-PREL-556487