

Евгений Андронов

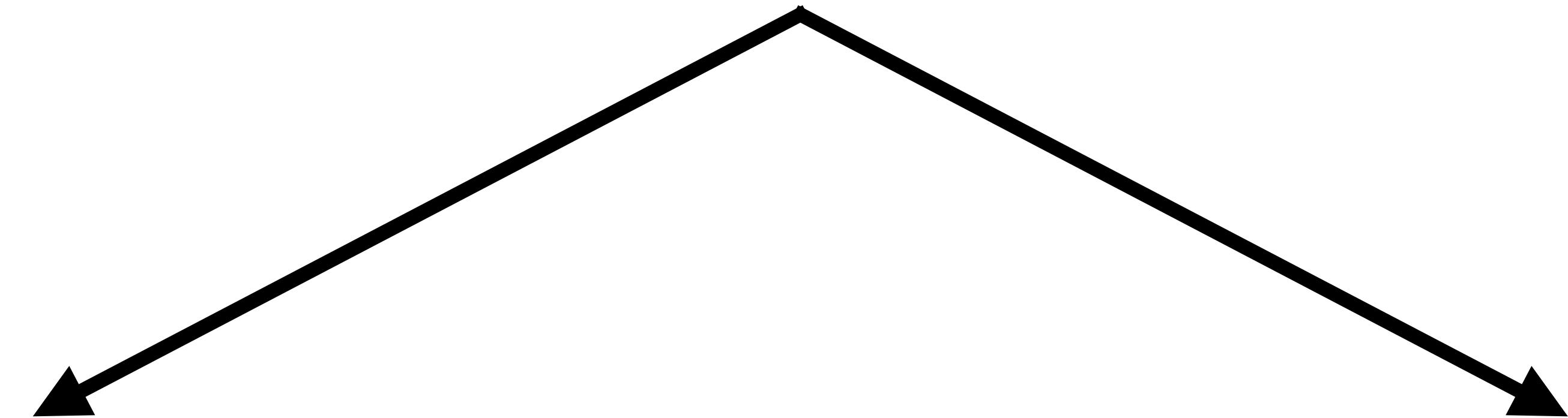


**Hadron Emission and Stopping in Heavy-Ion Collisions:
Baryon-Rich Matter to Meson-Dominated Matter
arXiv:2512.09630 [nucl-ex] M.Lorenz,C.Blume**

24 ДЕКАБРЯ, ЖУРНАЛЬНЫЙ КЛУБ

Что такое барионный стоппинг и почему это интересно?

Адроны - частицы, участвующие в сильном взаимодействии



Мезоны - частицы, состоящие из кварка и антакварка

Имеют барионное число **B=0**

Барионы - частицы, состоящие из трех кварков

Имеют барионное число **B=1**
(**B=-1** для антибарионов)

Закон сохранения барионного числа - в Стандартной модели ФЭЧ для замкнутых систем при любых превращениях элементарных частиц барионное число сохраняется

Мезоны - частицы, состоящие из кварка и антiquарка

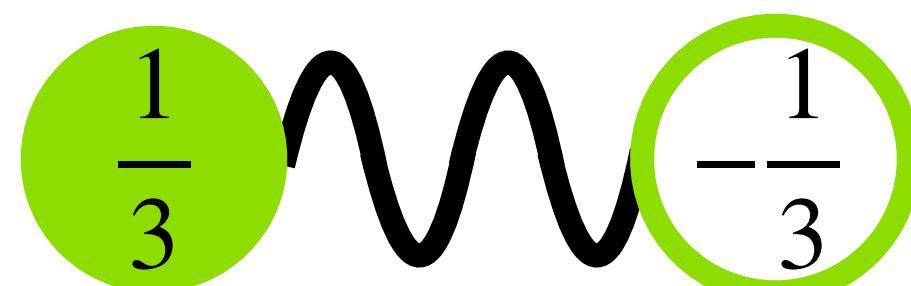
Имеют барионное число **B=0**

Барионы - частицы, состоящие из трех кварков

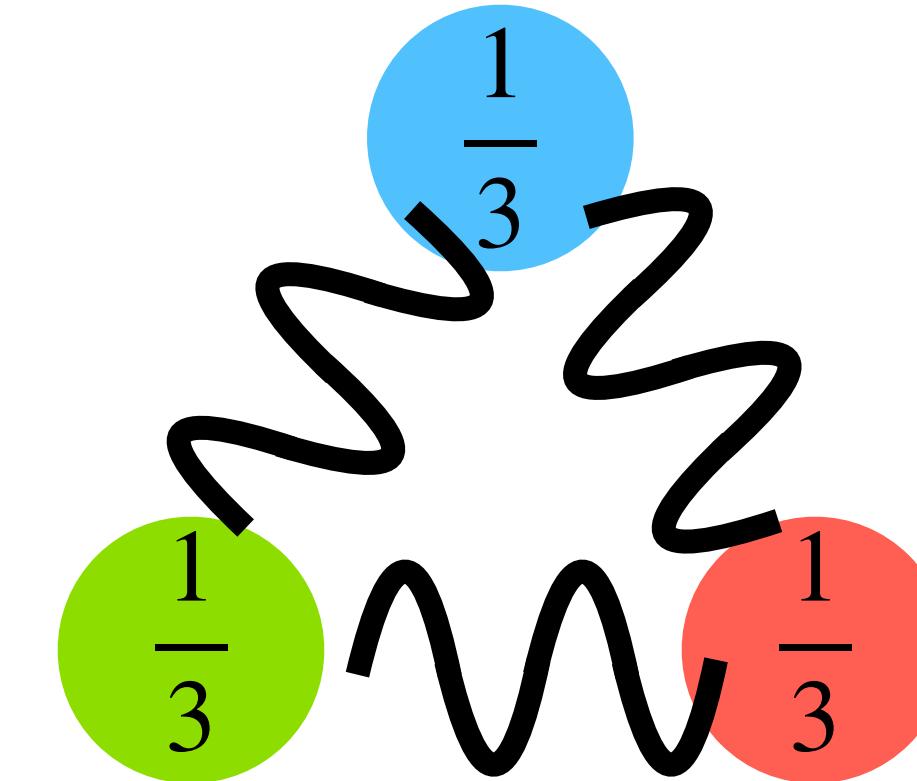
Имеют барионное число **B=1**
(**B=-1** для антибарионов)

Традиционное предположение:

$$B = \frac{1}{3} (n_q - n_{\bar{q}})$$

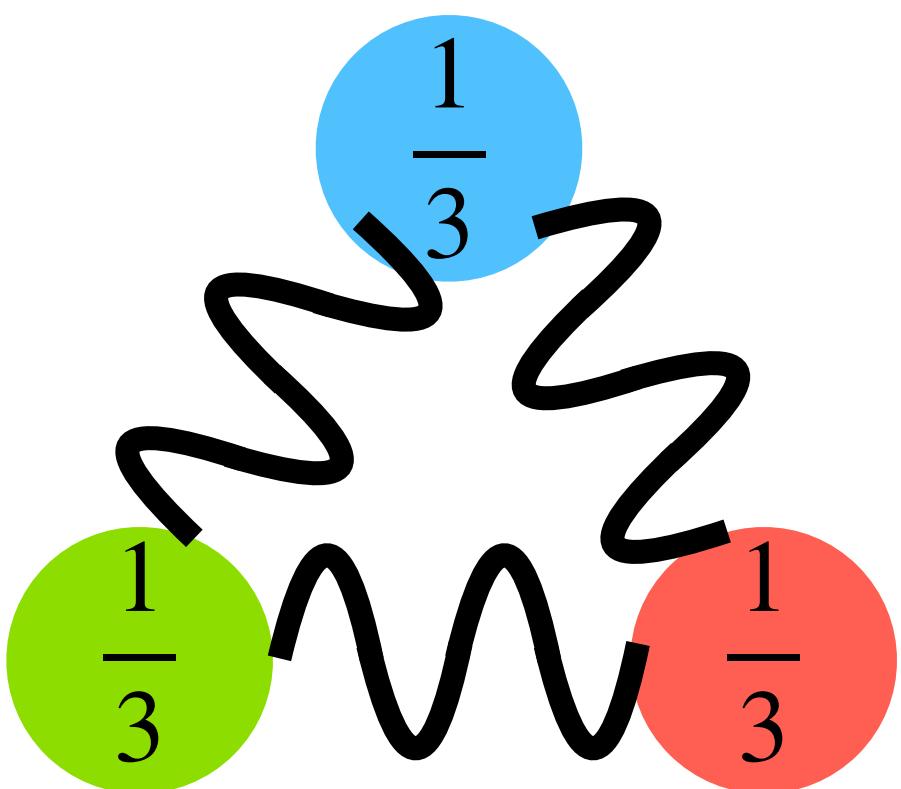


Припишем каждому кварку по барионному
числу $1/3$

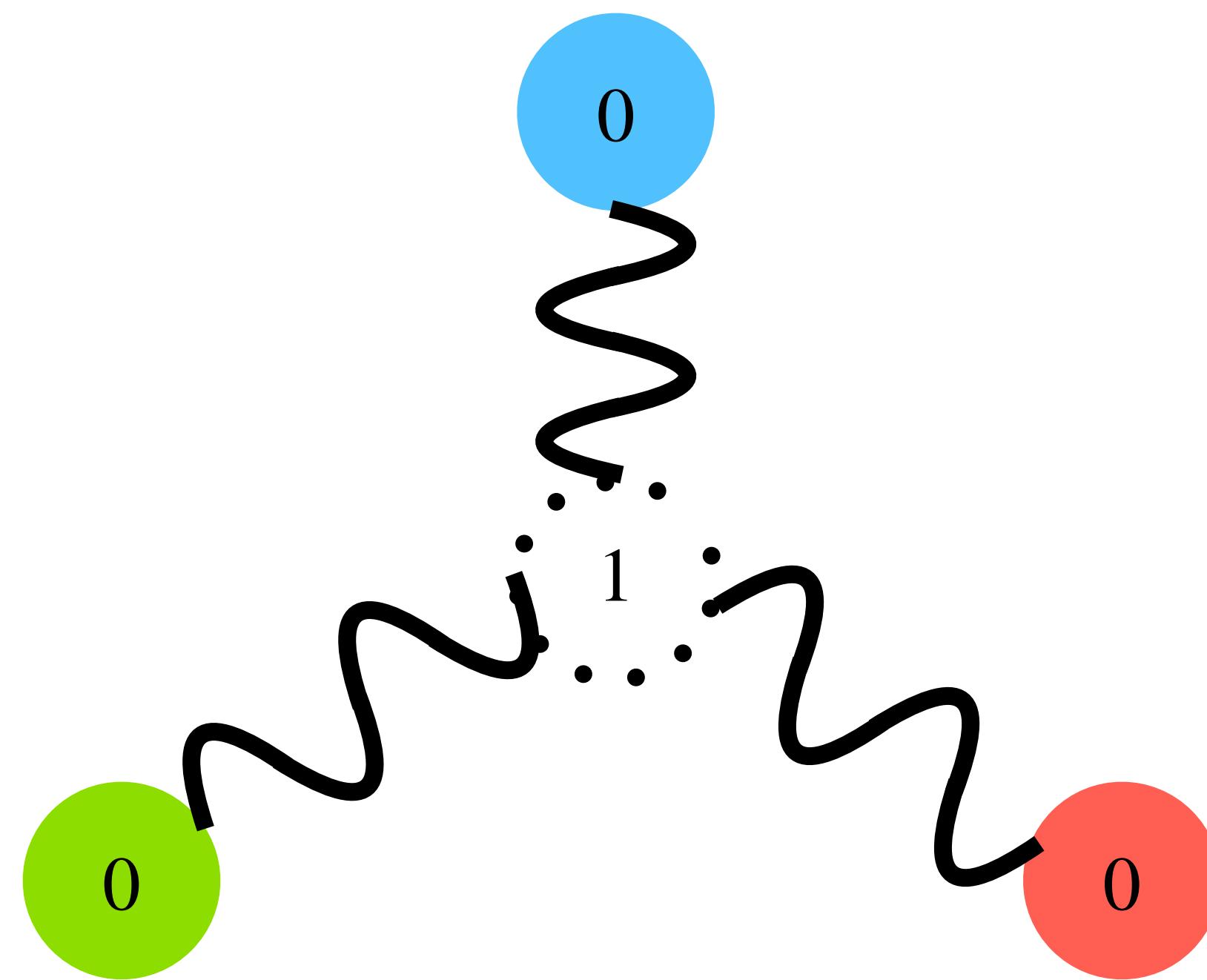


Это не следует напрямую из КХД!

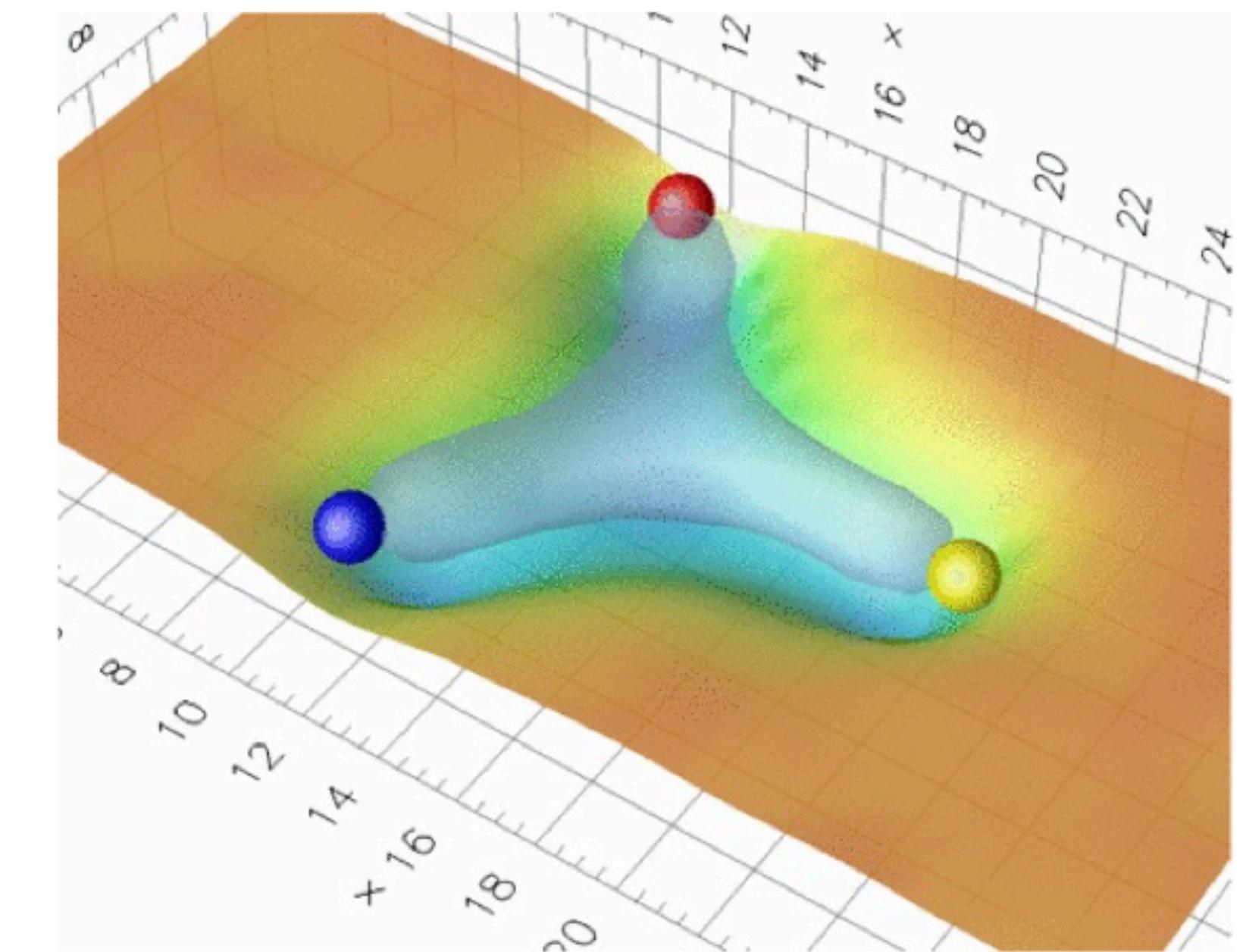
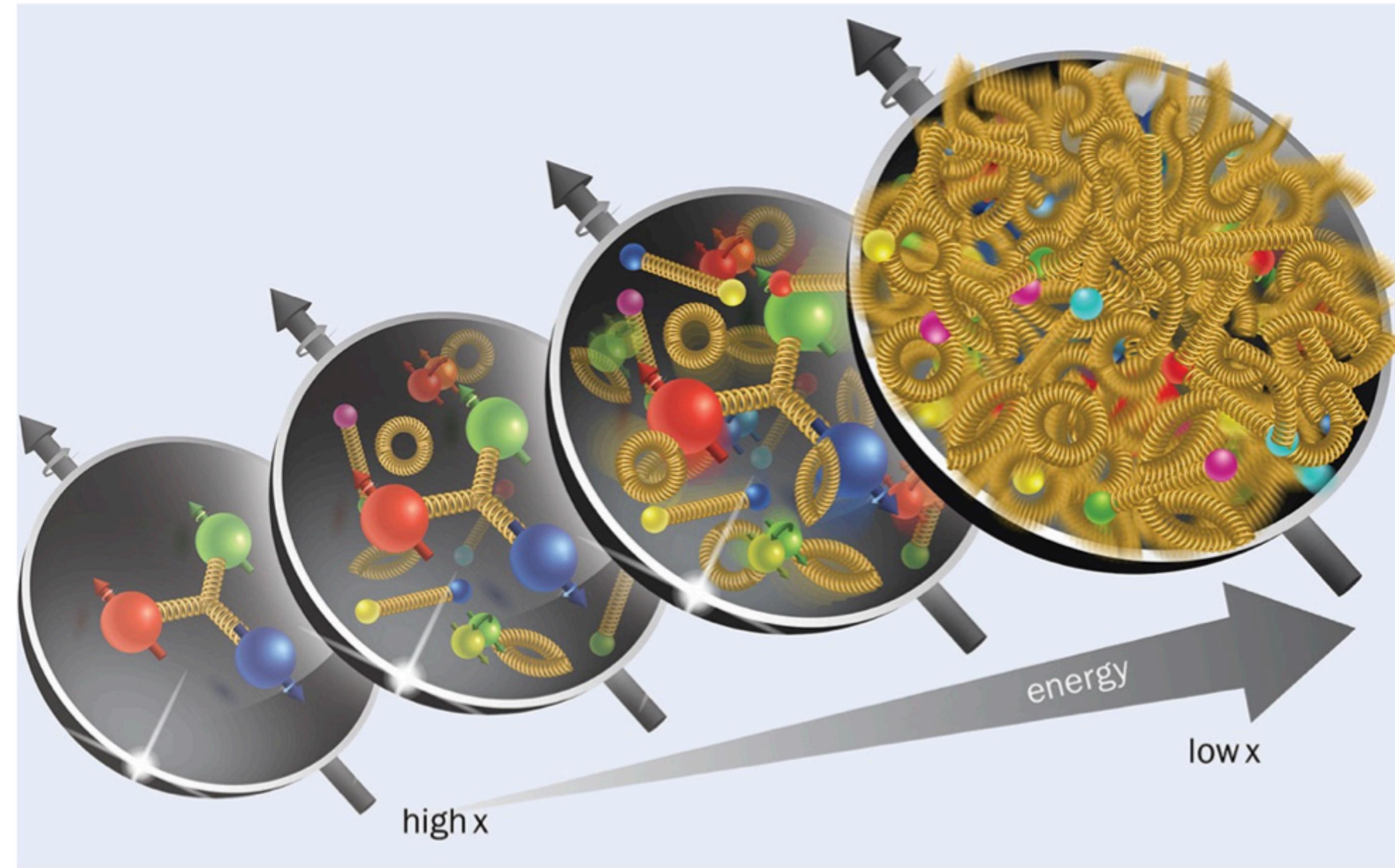
Припишем каждому кварку по барионному
числу $1/3$



Альтернатива - глюонный junction



The Simplest QCD Topology



D. F. Bissey, F. Cao, A. Kitson et al.,
Phys. Rev. D 76, 114512 (2007)

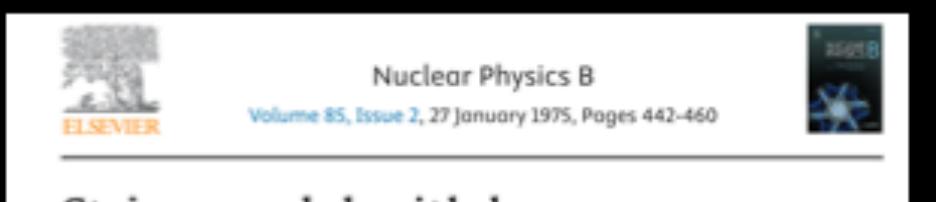
T. T. Takahashi, et al Phys. Rev.
Lett. 86, 18 (2001).
T. Takahashi, et al, Phys. Rev. D
65, 114509 (2002)

50 years of puzzles with baryon production in high energy collisions

1970s

1990s

2022-

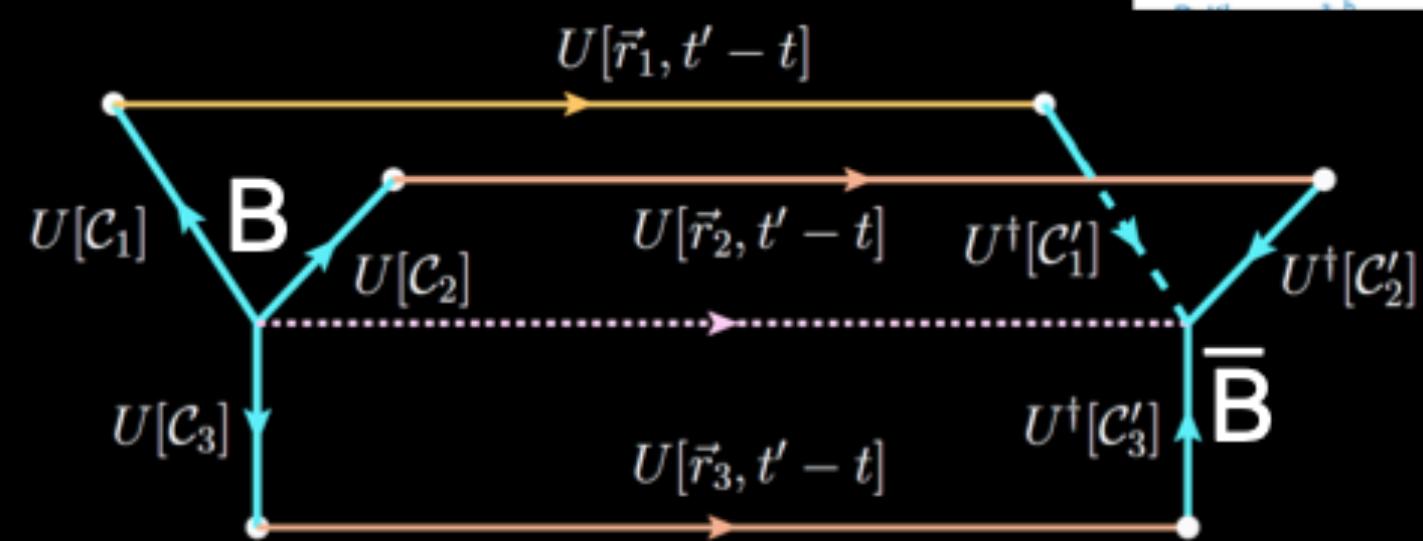
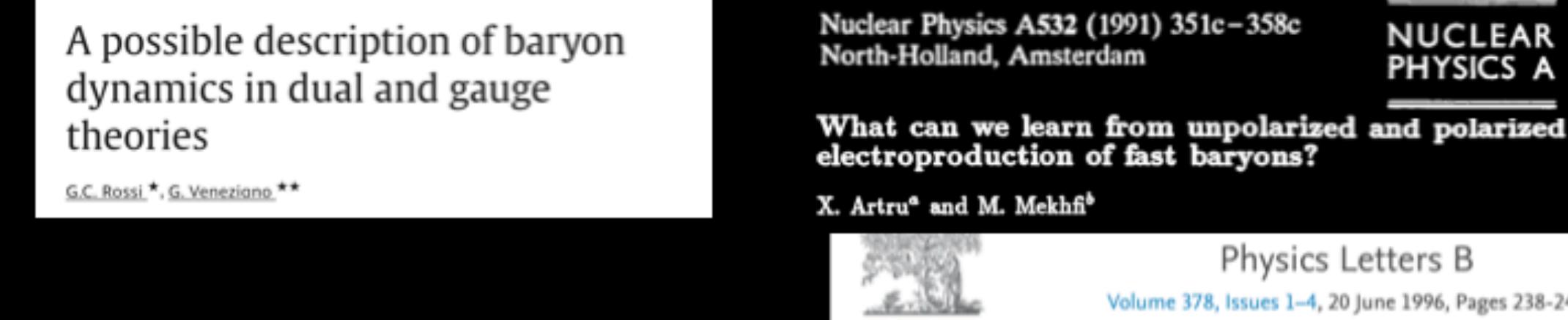


String model with baryons:
Topology; classical motion

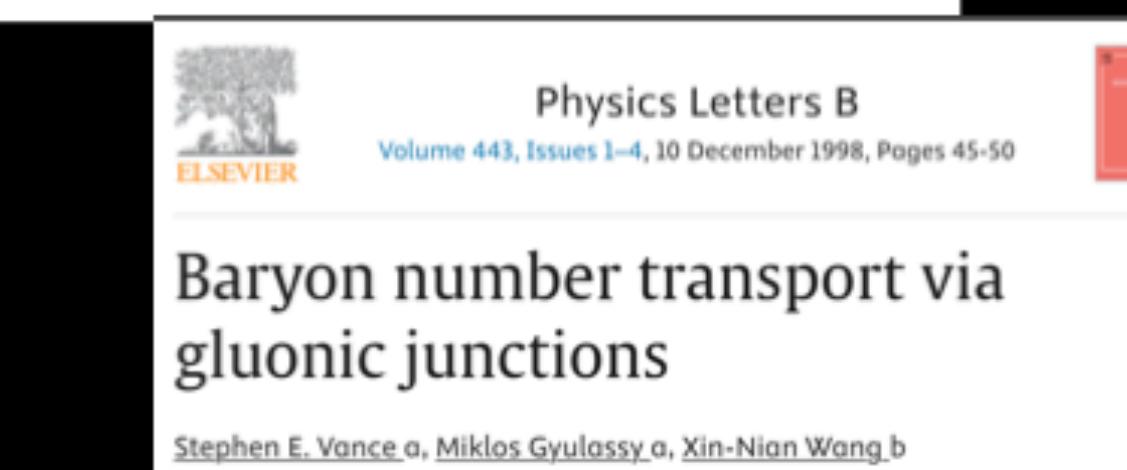


A possible description of baryon
dynamics in dual and gauge
theories

G.C. Rossi*, G. Veneziano**



G. Veneziano, 1st workshop on
baryon dynamics, SBU, 2024



Antihyperon Enhancement through Baryon Junction Loops

Stephen E. Vance and Miklos Gyulassy
Phys. Rev. I

Baryon junction loops and the baryon-meson anomaly at high
energies

V. Topor Pop, M. Gyulassy, J. Barrette, C. Gale, X. N. Wang, and N. Xu
Phys. Rev. C 70, 064906 – Published 21 December 2004

And many more...

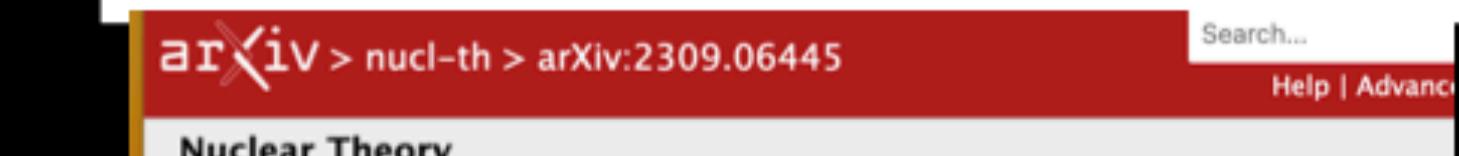
Backward-angle (u -channel) production at an electron-ion collider

Daniel Cebra, Zachary Sweger, Xin Dong, Yuanjing Ji, and Spencer R. Klein
Phys. Rev. C 106, 015204 – Published 15 July 2022



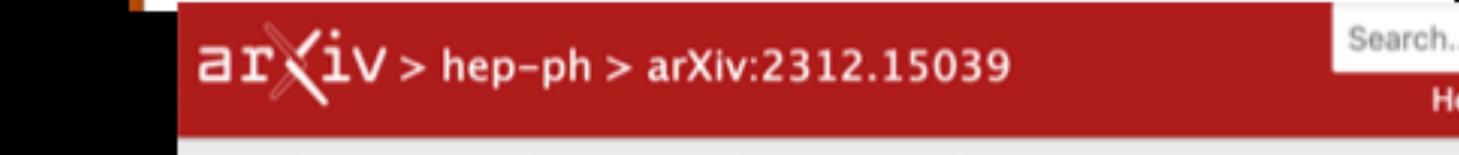
Search for baryon junctions in photonuclear
processes and isobar collisions at RHIC

Nicole Lewis, Wendi Lv, Mason Alexander Ross, Chun Yuen Tsang, James
Daniel Brandenburg, Zi-Wei Lin, Rongrong Ma, Zebo Tang, Prithwish
Tribedy, Zhangbu Xu



Correlations of Baryon and Charge Stopping in
Heavy Ion Collisions

Wendi Lv, Yang Li, Ziyang Li, Rongrong Ma, Zebo Tang, Prithwish Tribedy,
Chun Yuen Tsang, Zhangbu Xu, Wangmei Zha



Signatures of baryon junctions in semi-
inclusive deep inelastic scattering

David Frenklakh, Dmitri E. Kharzeev, Wenliang Li



Tracing baryon and electric charge
transport in isobar collisions

Gregoire Pihan, Akihiko Monnai, Björn Schenke, Chun Shen

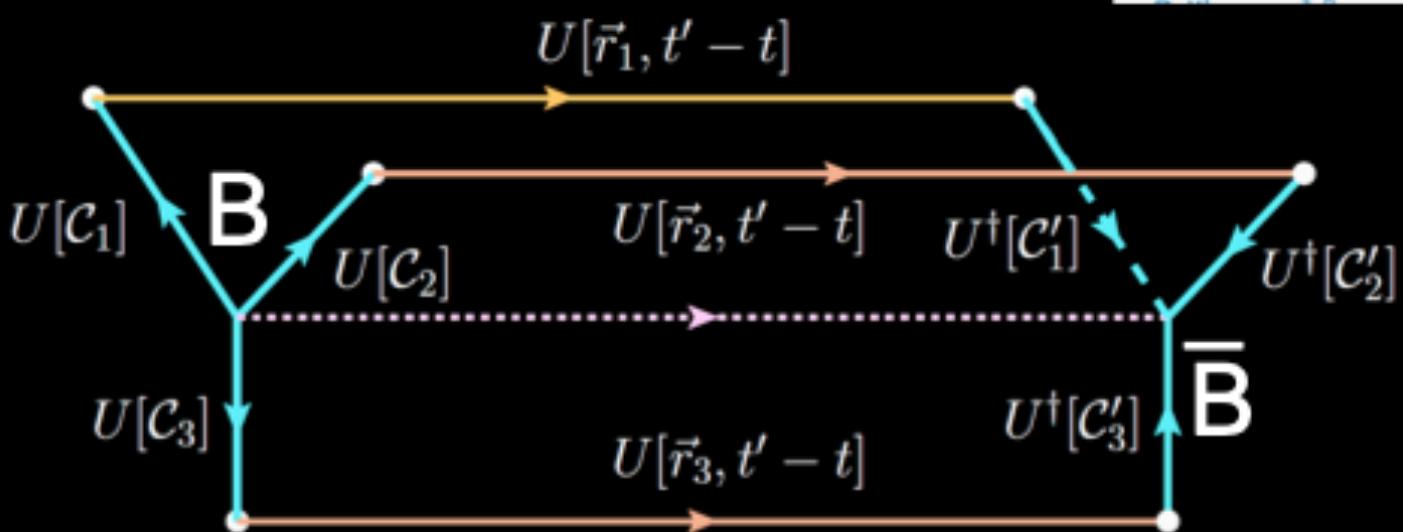
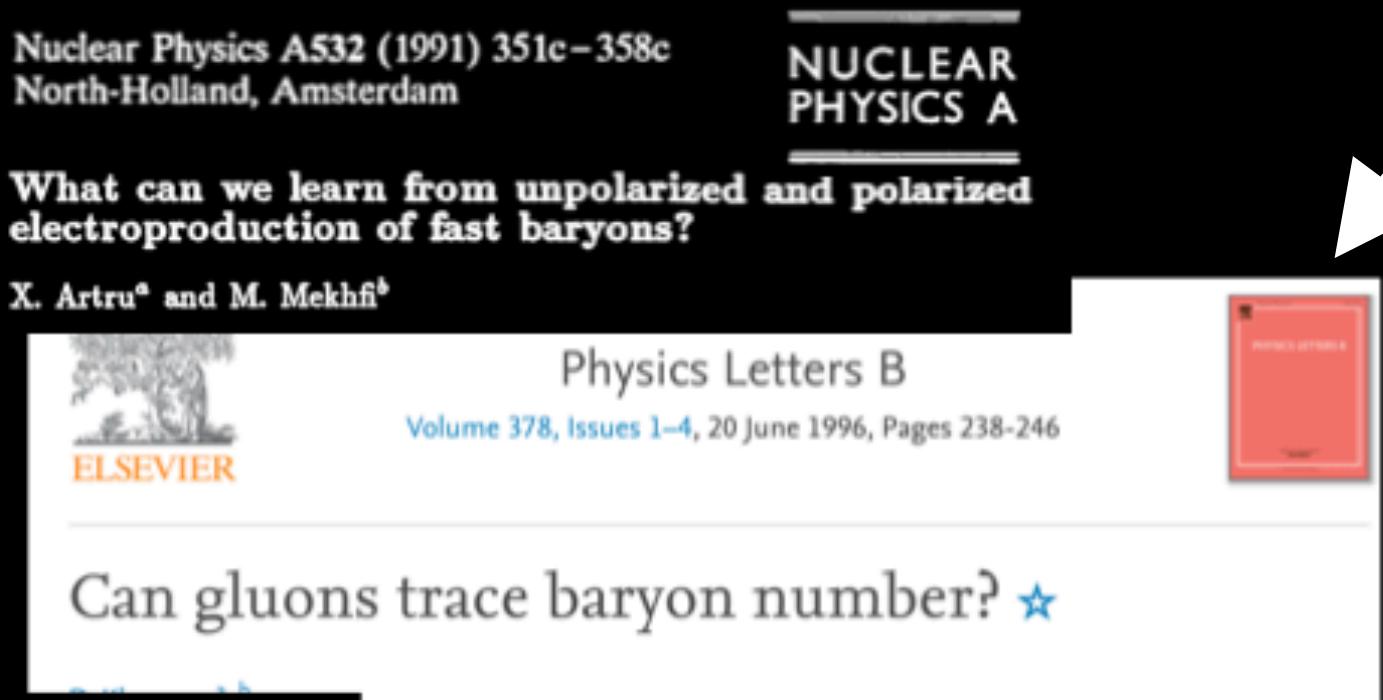
50 years of puzzles with baryon production in high energy collisions

1970s



1990s

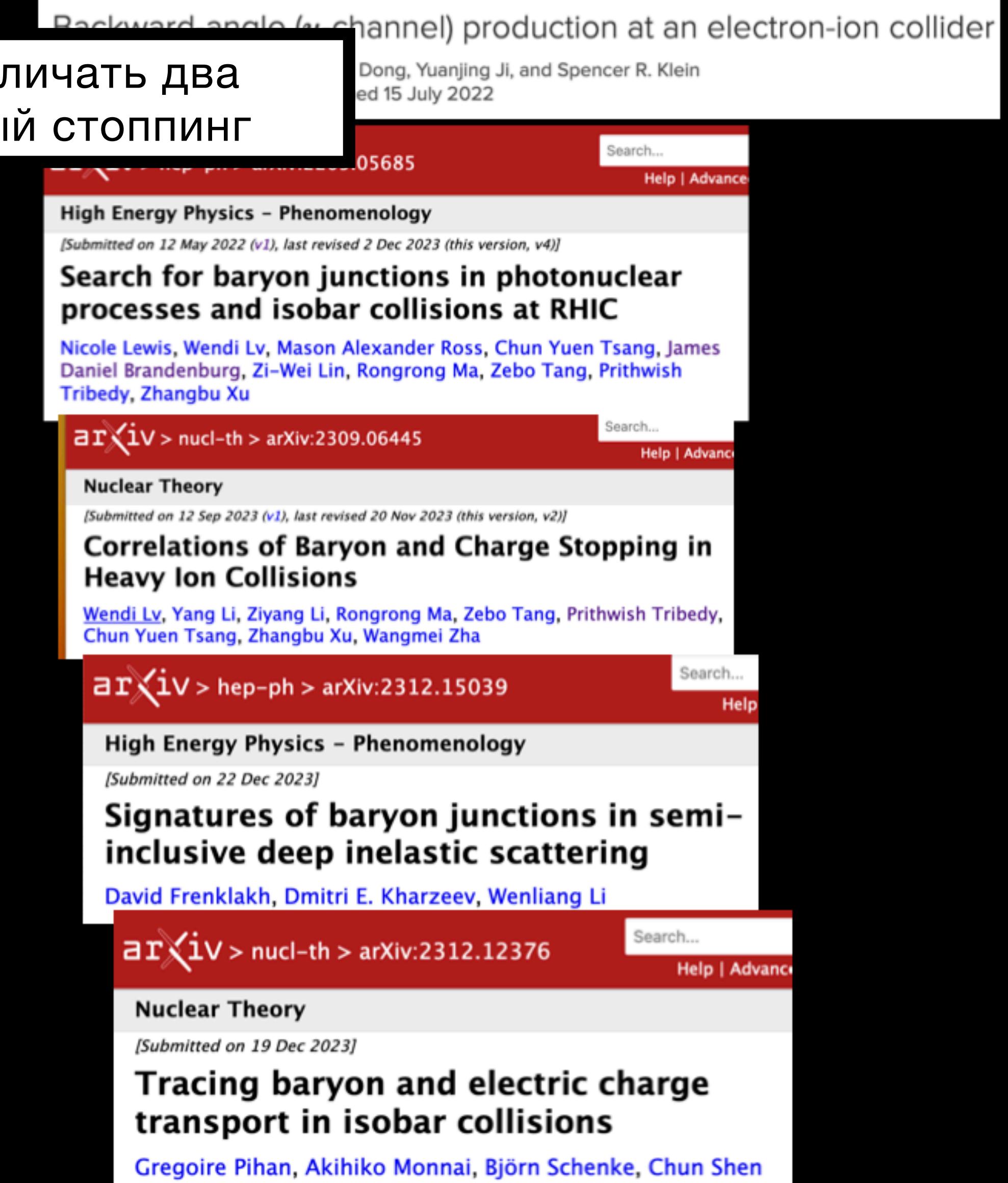
Идея Харзеева о том, как отличать два сценария - изучать барионный стоппинг



G. Veneziano, 1st workshop on baryon dynamics, SBU, 2024

And many more...

2022-

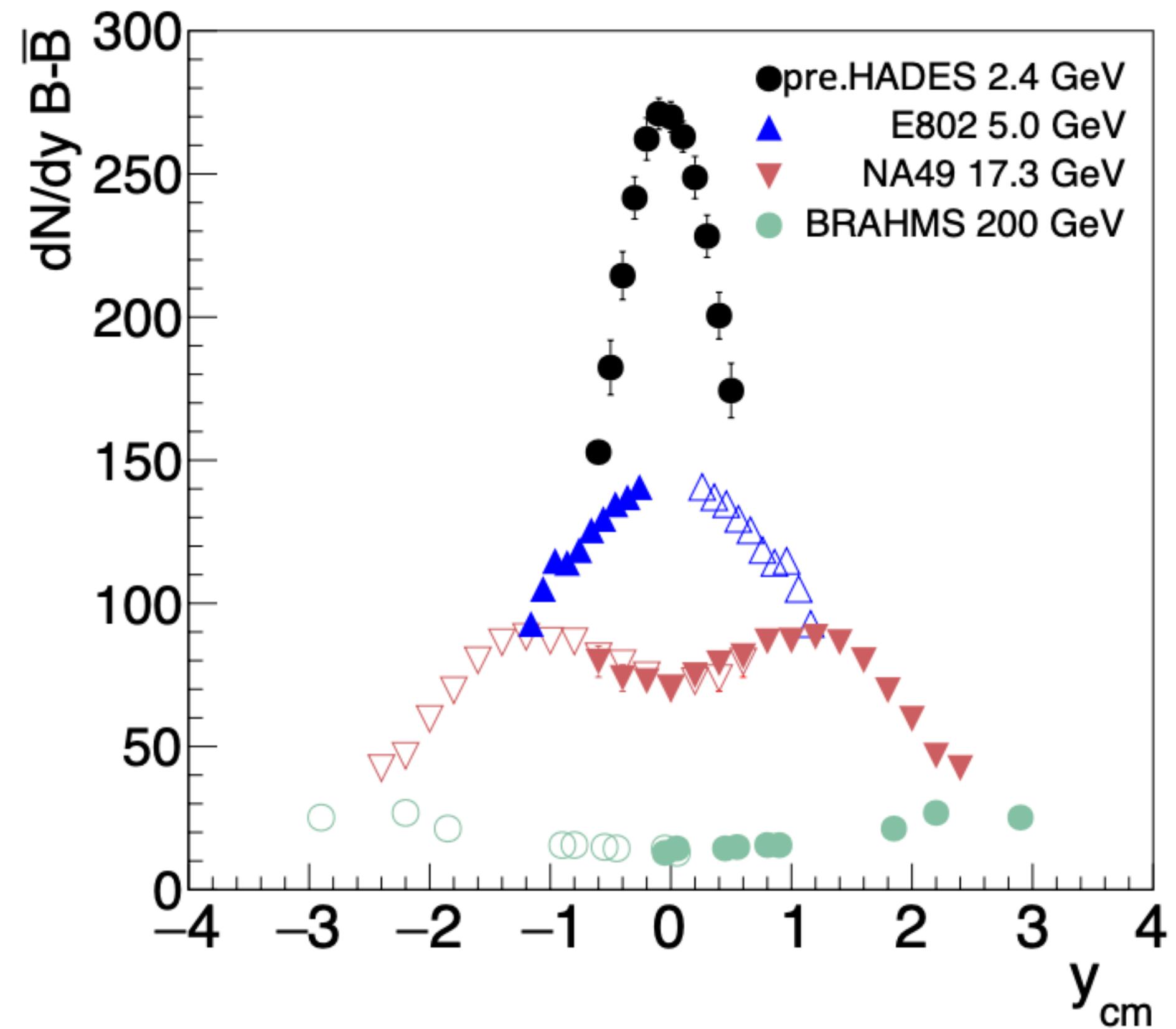


Стоппинг барионов

Сталкиваем ядра

- два ядра = два набора нуклонов (протонов и нейtronов) = система с положительным барионным числом
- полное барионное число во всем аксептансе должно сохраняться
- как это начальное барионное число распределяется кинематически? = как происходит *baryon transport*?
- если начальные барионы «пролетают» и почти не участвуют в взаимодействии, получается, что они не затормозились
- если есть недостаток таких барионов в области фрагментации пучков, то значит, что произошел «*transport*» барионов, барионы затормозились средой

Экспериментальный факт - стоппинг барионов **есть** при низких энергиях столкновения



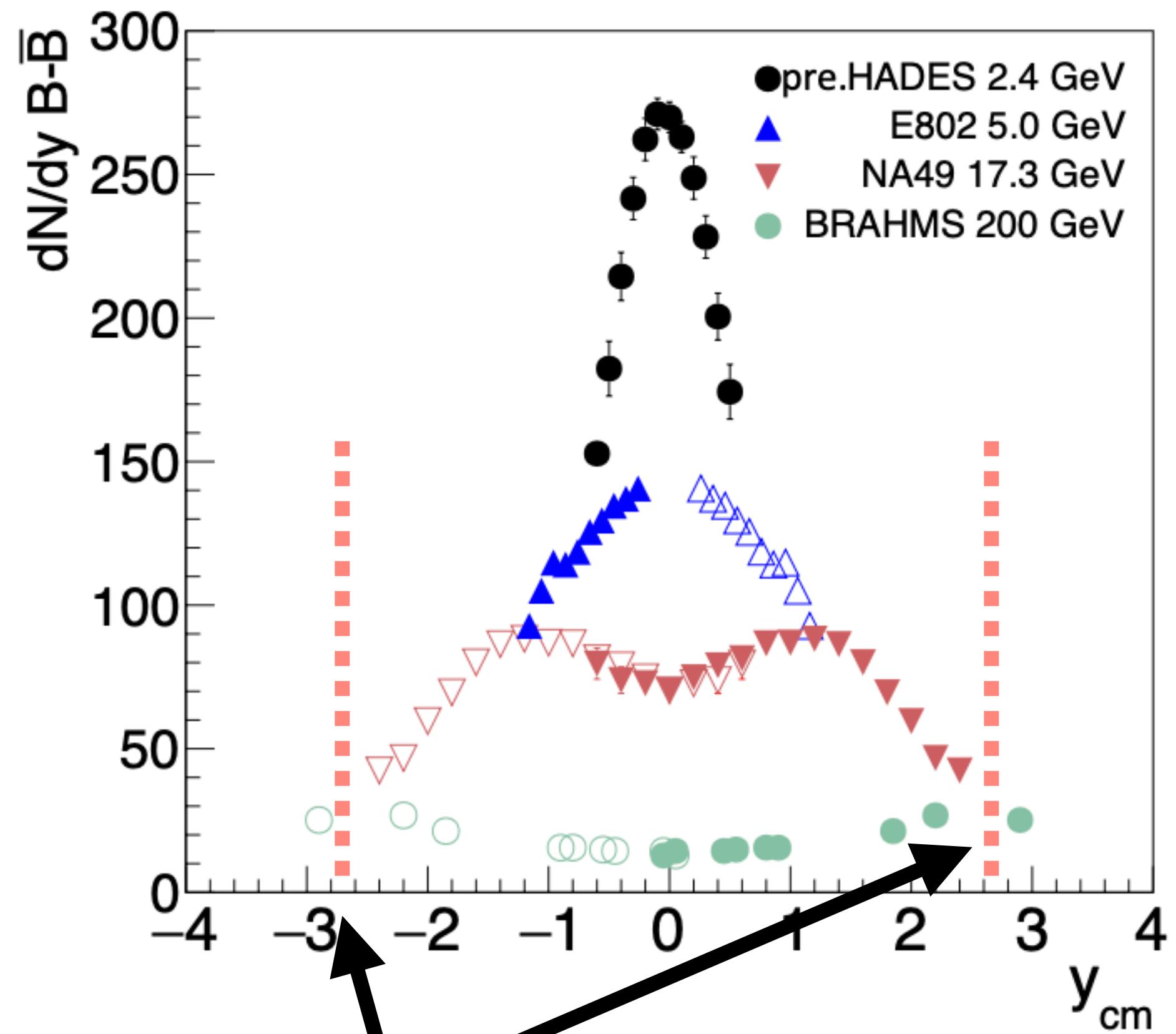
$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

Стоппинг барионов

Сталкиваем ядра

- два ядра = два набора нуклонов (протонов и нейtronов) = система с положительным барионным числом
- полное барионное число во всем аксептансе должно сохраняться
- как это начальное барионное число распределяется кинематически? = как происходит *baryon transport*?
- если начальные барионы «пролетают» и почти не участвуют в взаимодействии, получается, что они не затормозились
- если есть недостаток таких барионов в области фрагментации пучков, то значит, что произошел «*transport*» барионов, барионы затормозились средой

Экспериментальный факт - стоппинг барионов **есть** при низких энергиях столкновения



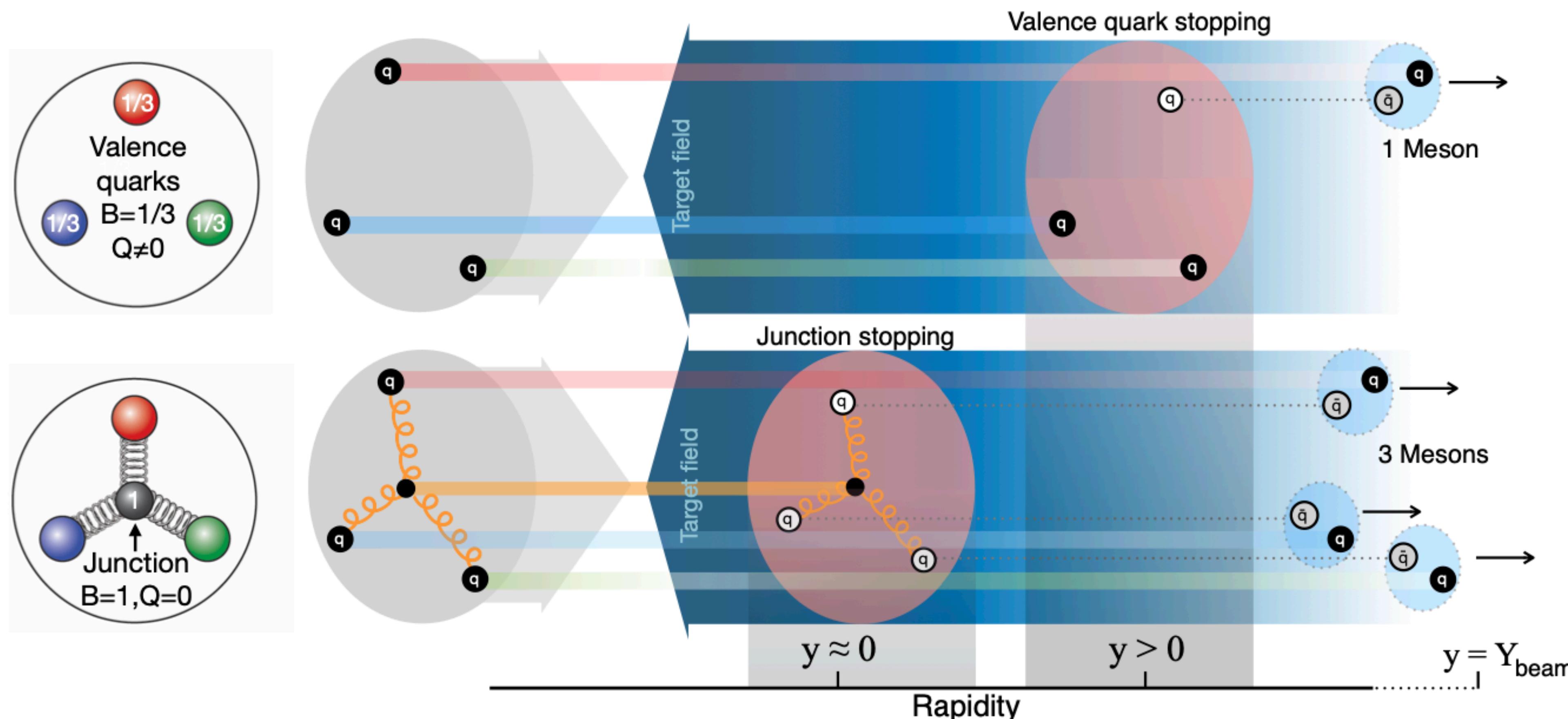
Быстрые пучки для NA49

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

Стоппинг барионов и junction

- Tracking the baryon number with nuclear collisions [STAR]
<https://arxiv.org/pdf/2408.15441>

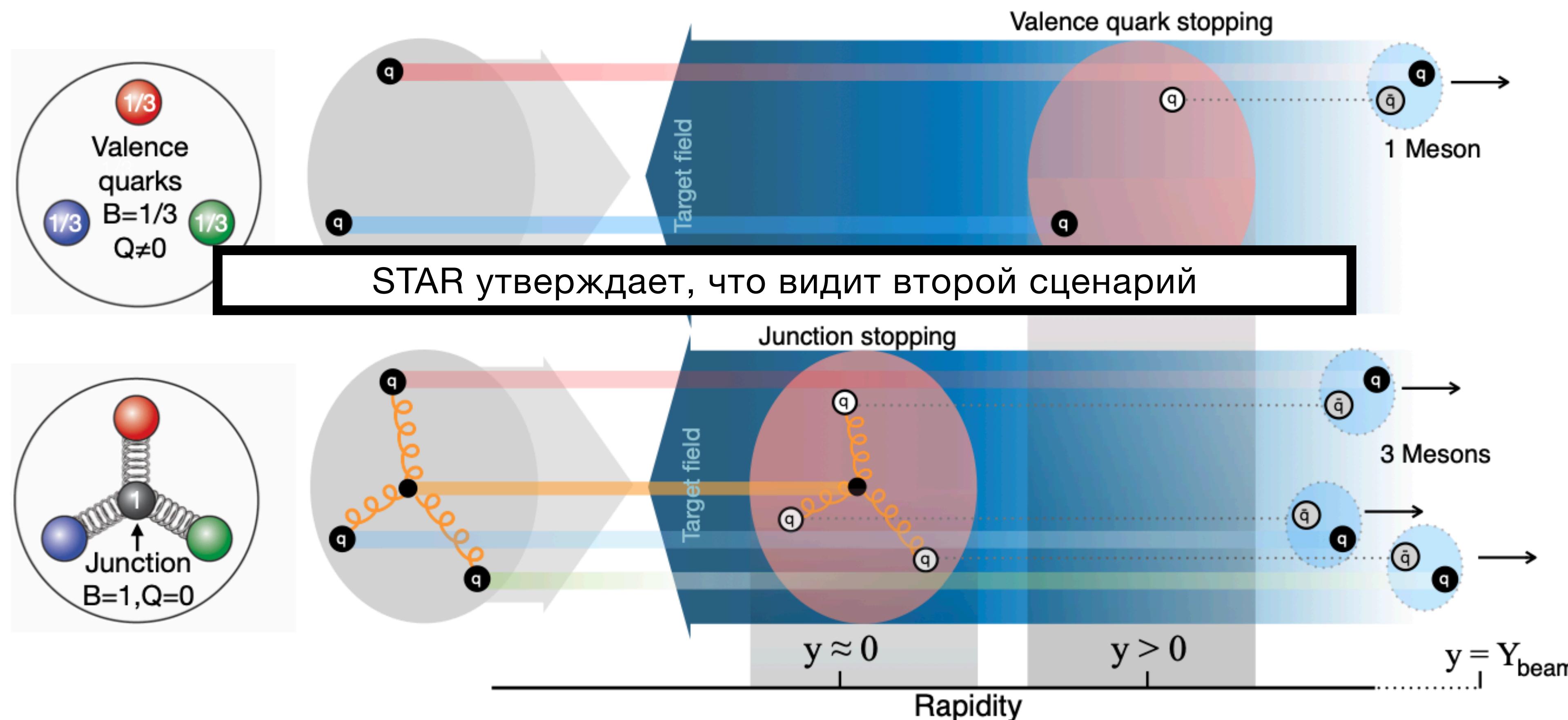
Пусть B и Q - затормозившие барионный и электрический заряды



Стоппинг барионов и junction

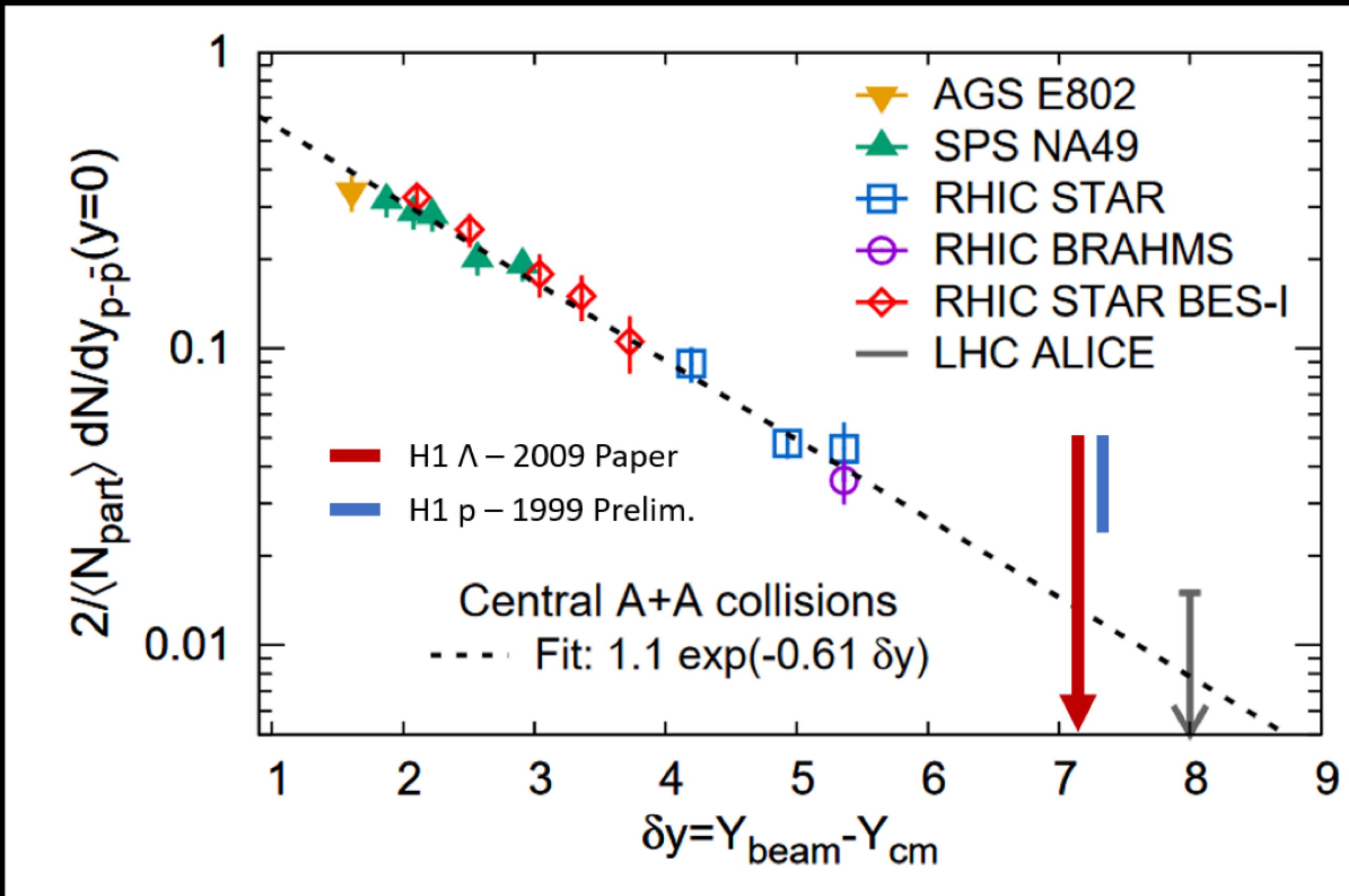
- Tracking the baryon number with nuclear collisions [STAR]
<https://arxiv.org/pdf/2408.15441>

Пусть B и Q - затормозившие барионный и электрический заряды



Rapidity distribution of baryon production:

Lewis et al., arXiv:2205.05685 Henry Klest (SBU) HERA data



Fit to global data on central A+A:

$$\frac{2}{N_{\text{part}}} \left. \frac{dN_{p-\bar{p}}}{dy} \right|_{A+A} = N_B e^{-\alpha_B (Y_{\text{beam}} - Y_{\text{cm}})}$$

$$\alpha_B = 0.61 \pm 0.03$$

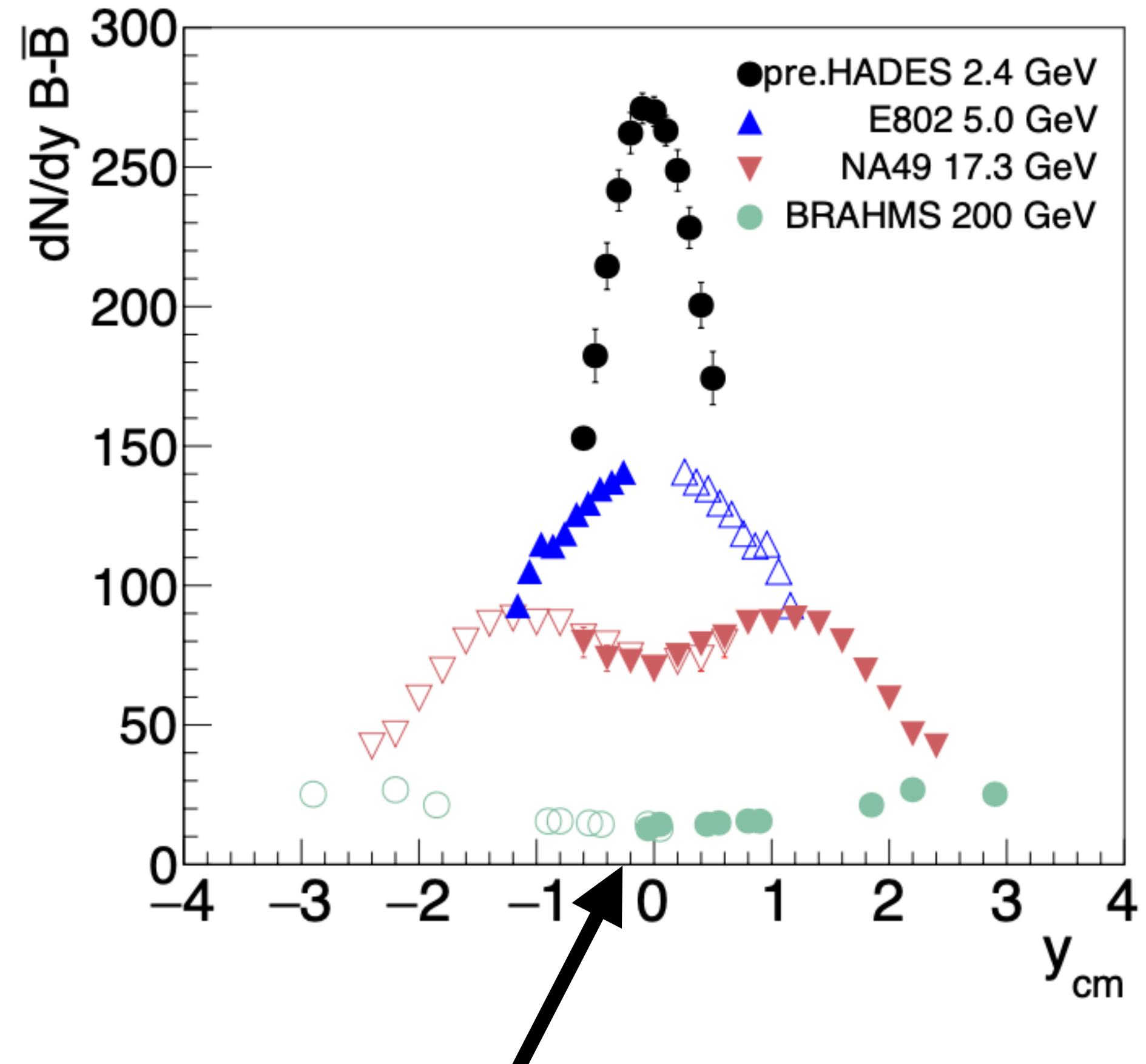
Predictions from Regge theory & baryon junction picture:

$$0.42 \leq \alpha_B \leq 1$$

Midrapidity baryon density slope is consistent with baryon junction prediction

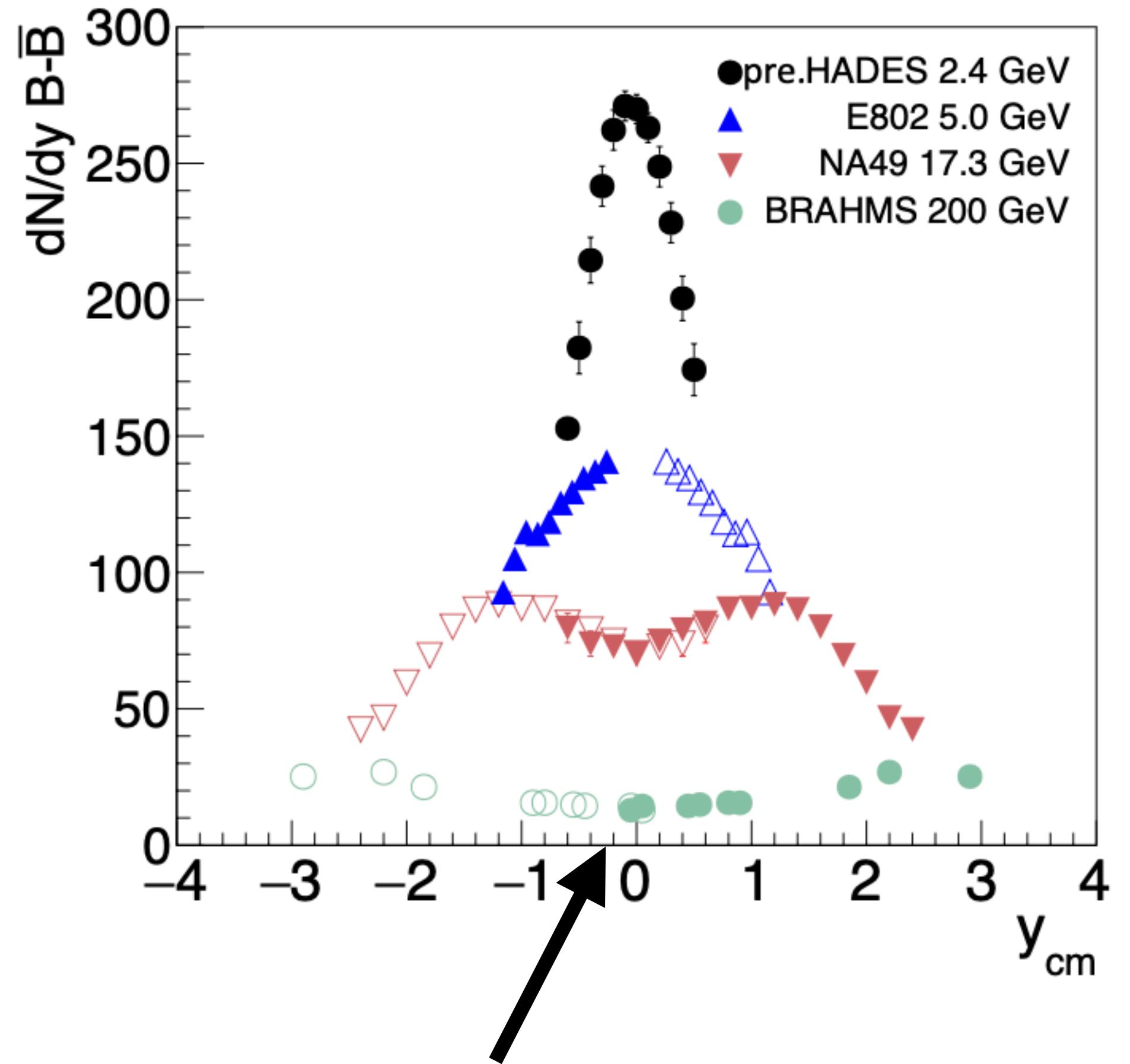
Возвращаемся к обзорной статье

Что меняется с ростом энергии столкновения?

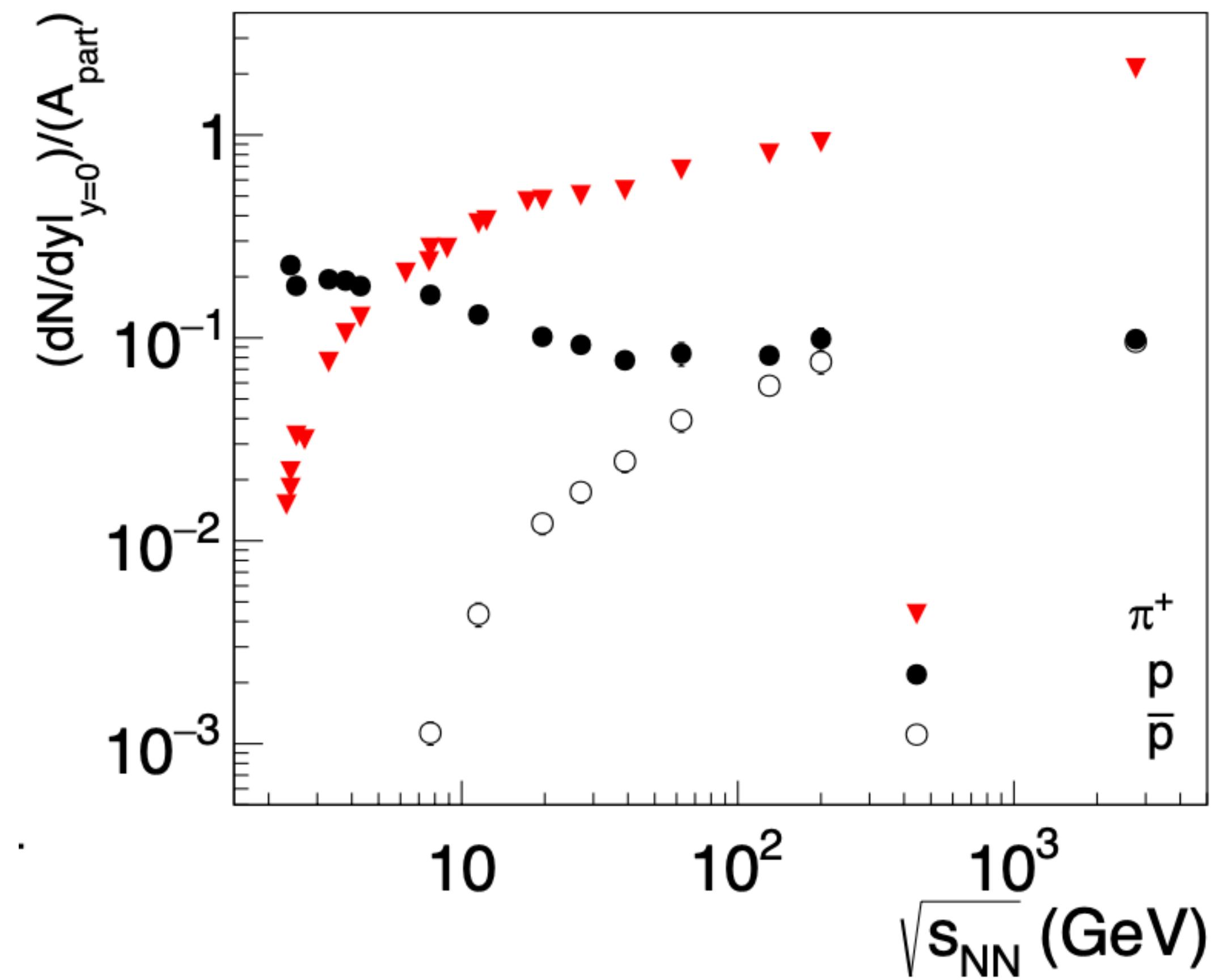


на энергиях LHC = 0

Что меняется с ростом энергии столкновения?

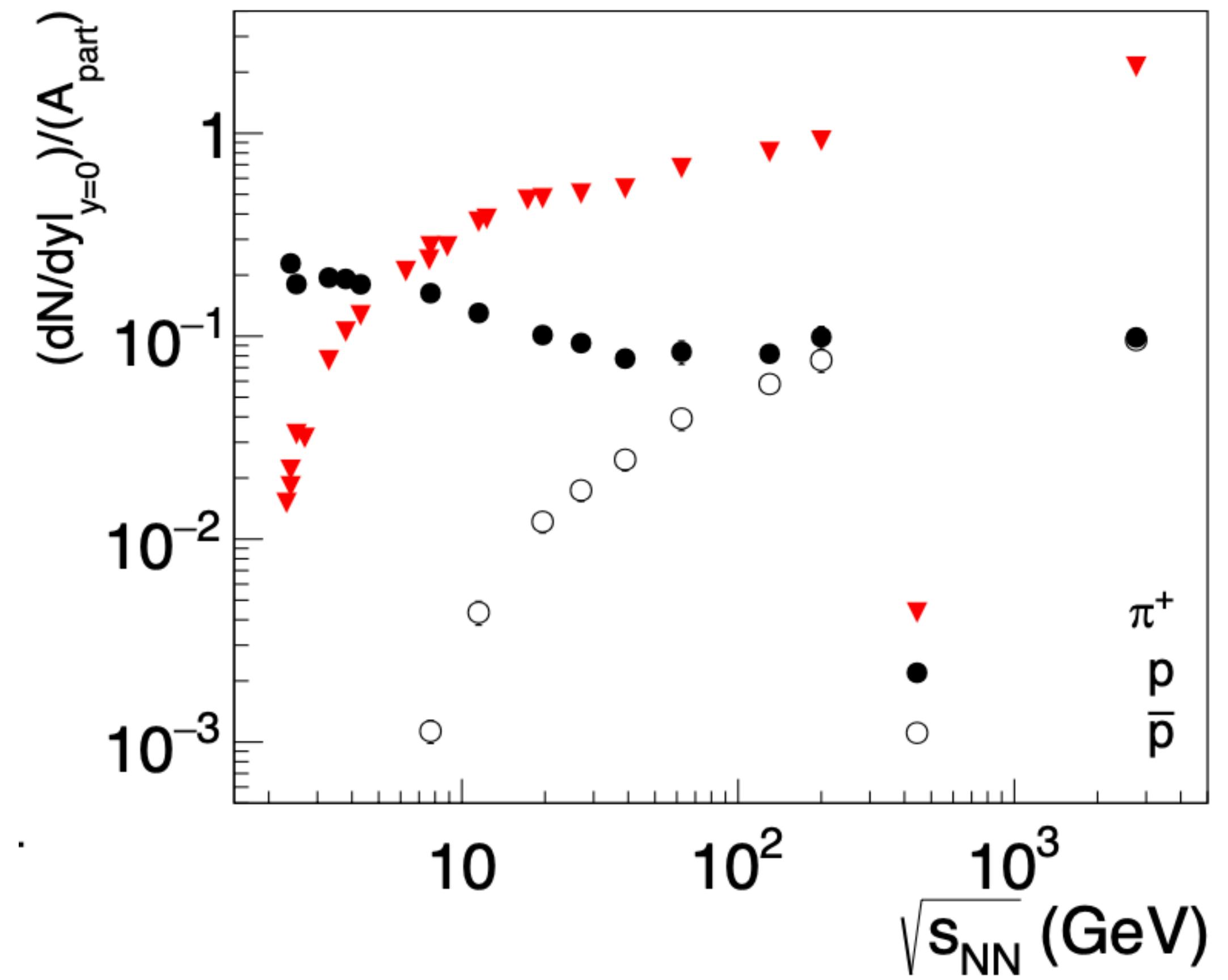


на энергиях $LHC = 0$



Что меняется с ростом энергии столкновения?

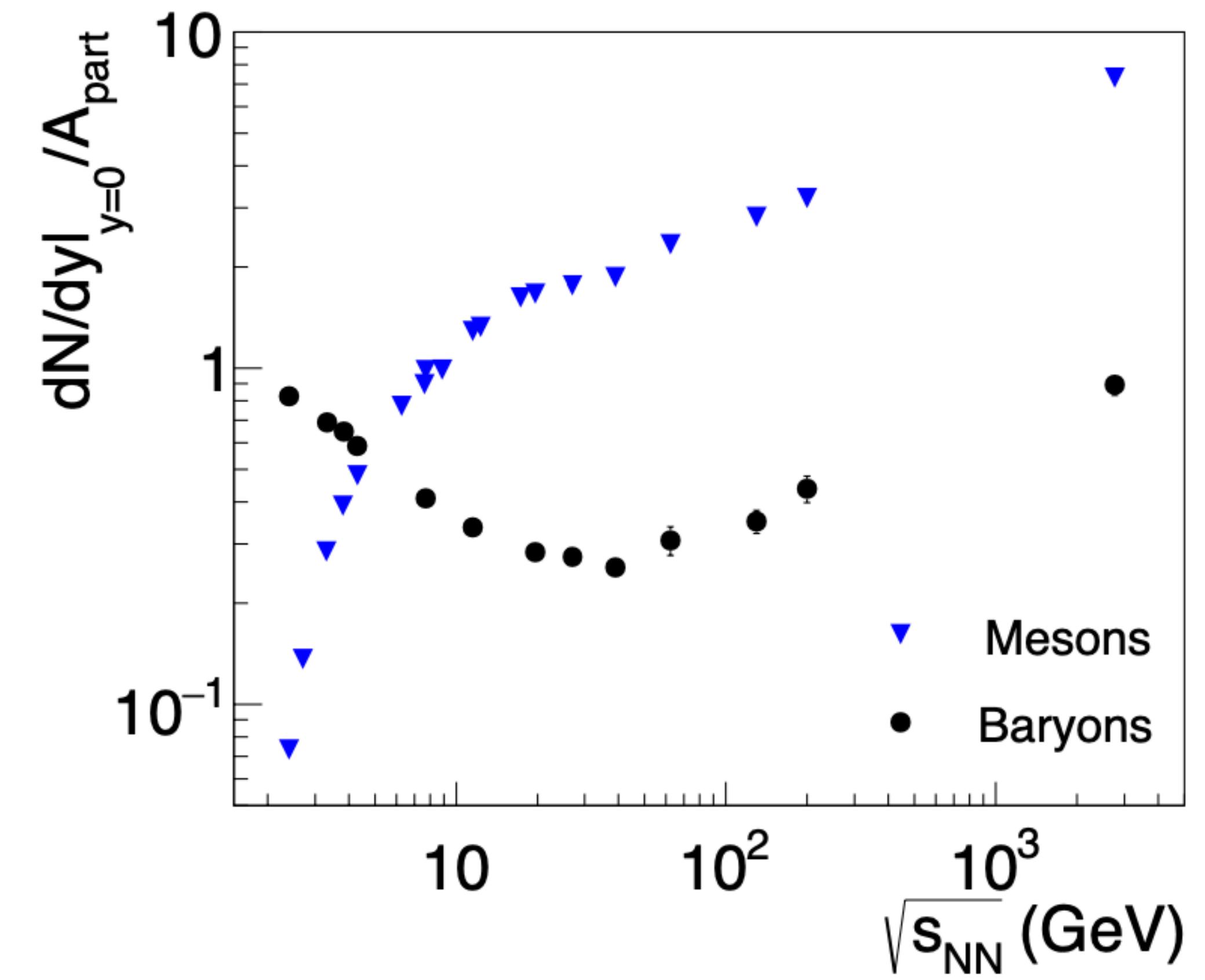
- монотонный рост выхода пи-мезонов
- выход антибарионов по сравнению с пи-мезонами значительно подавлен (они тяжелее и нужно родить в столкновении три антикварка, которых изначально не было)
- в выходе протонов interplay двух эффектов - стоппинг барионного числа из начальных ядер и рождения «новых» протонов
- при энергиях LHC стоппинг отсутствует, в центральных быстротах одинаково «легко» родить протон и антiproton (если изначальное барионное число целиком улетело в дальние быстроты, то в мидрапидити должно рождаться одинаково барионов и антибарионов из закона сохранения барионного числа)



Что меняется с ростом энергии столкновения?

авторы сделали несколько модельных предположений о выходах нейтральных мезонов и барионов

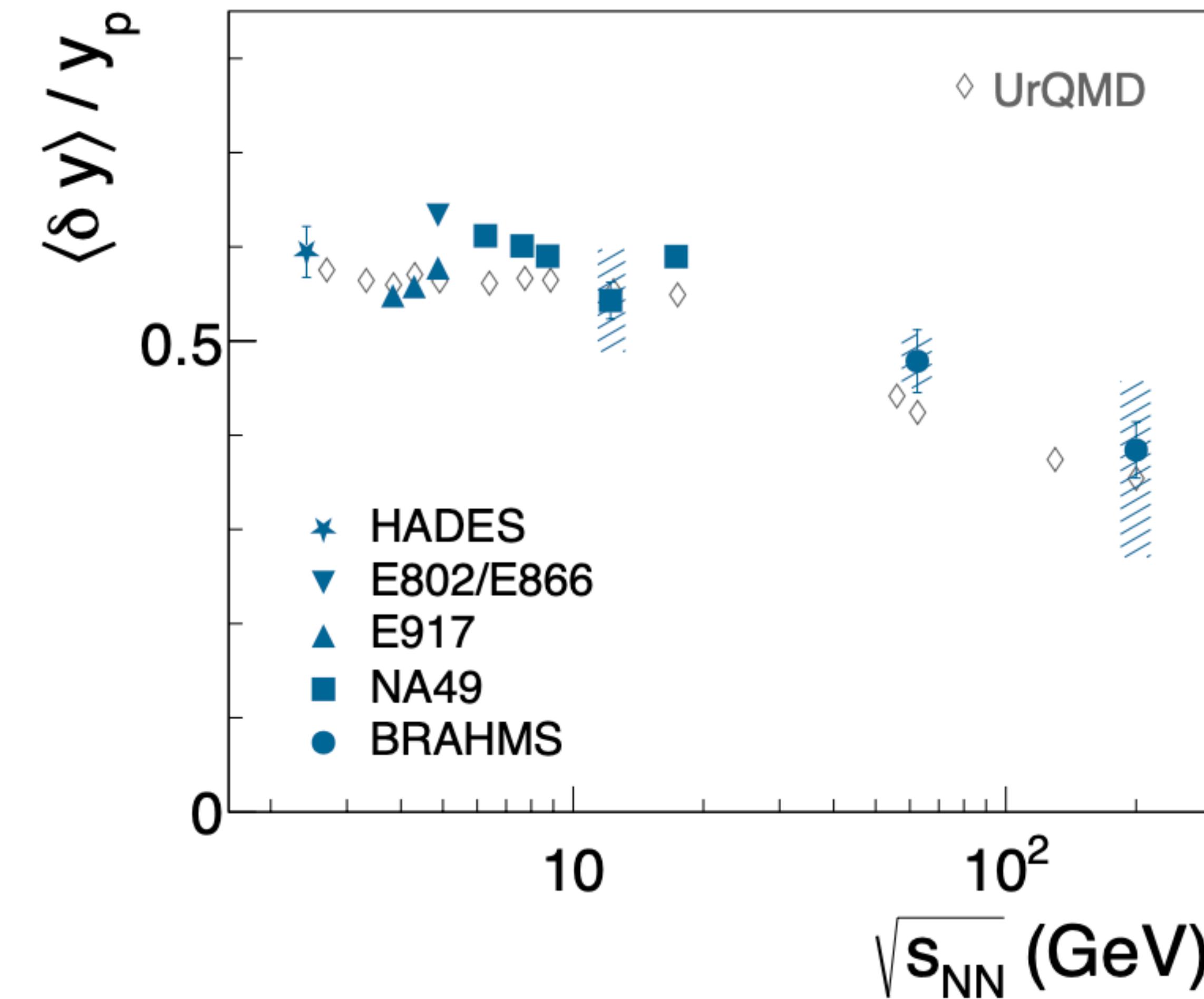
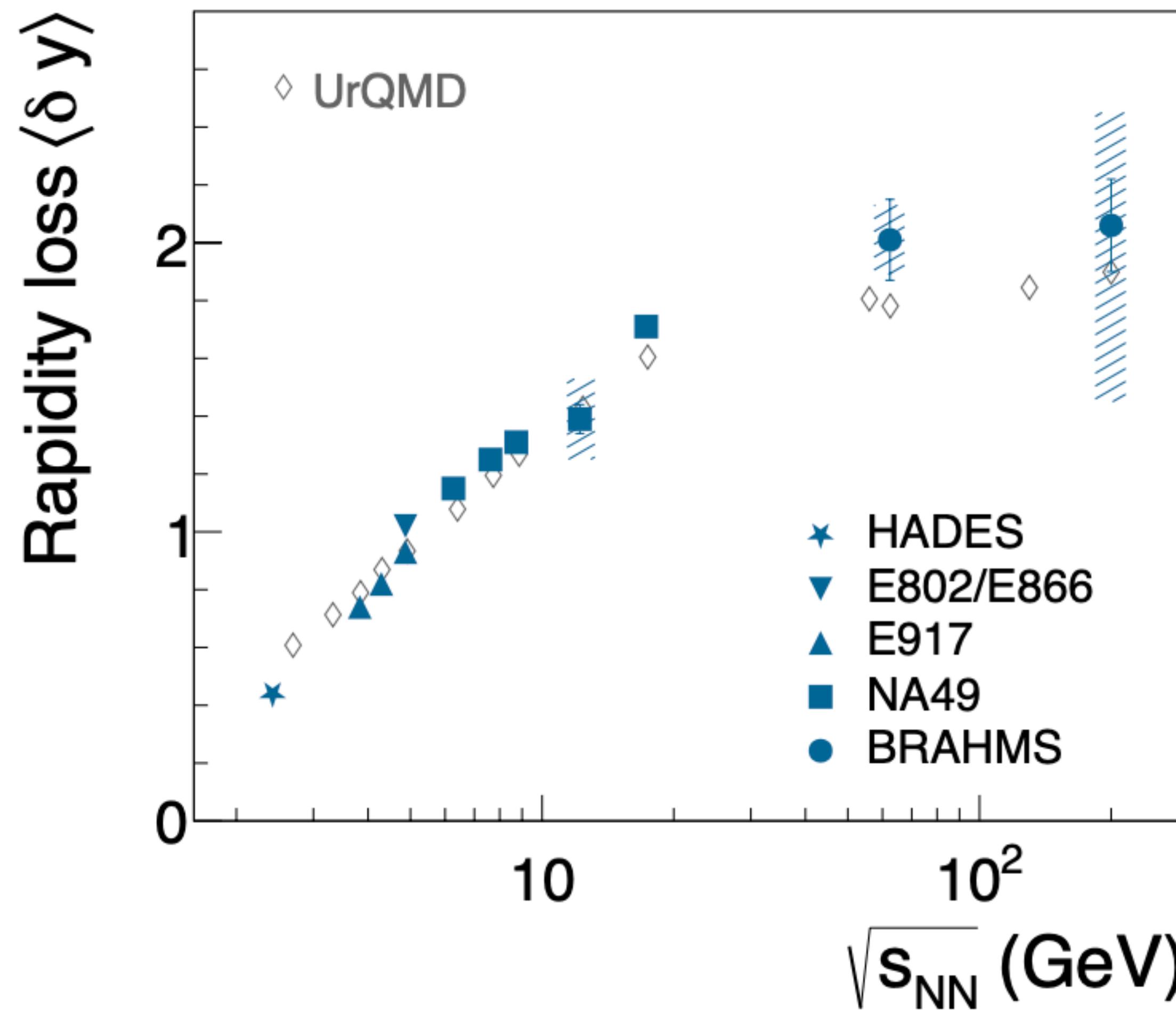
этот график символизирует название статьи - переход от baryon-rich matter к meson-dominated matter



Что меняется с ростом энергии столкновения?

$$\langle \delta y \rangle = y_p - \frac{2}{N_{part}} \int_0^{y_p} y \frac{dN_{(B-\bar{B})}}{dy} dy$$

После 40 ГэВ уBeam начинает расти быстрее, чем средние потери на стоппинг



Что меняется с ростом энергии столкновения?

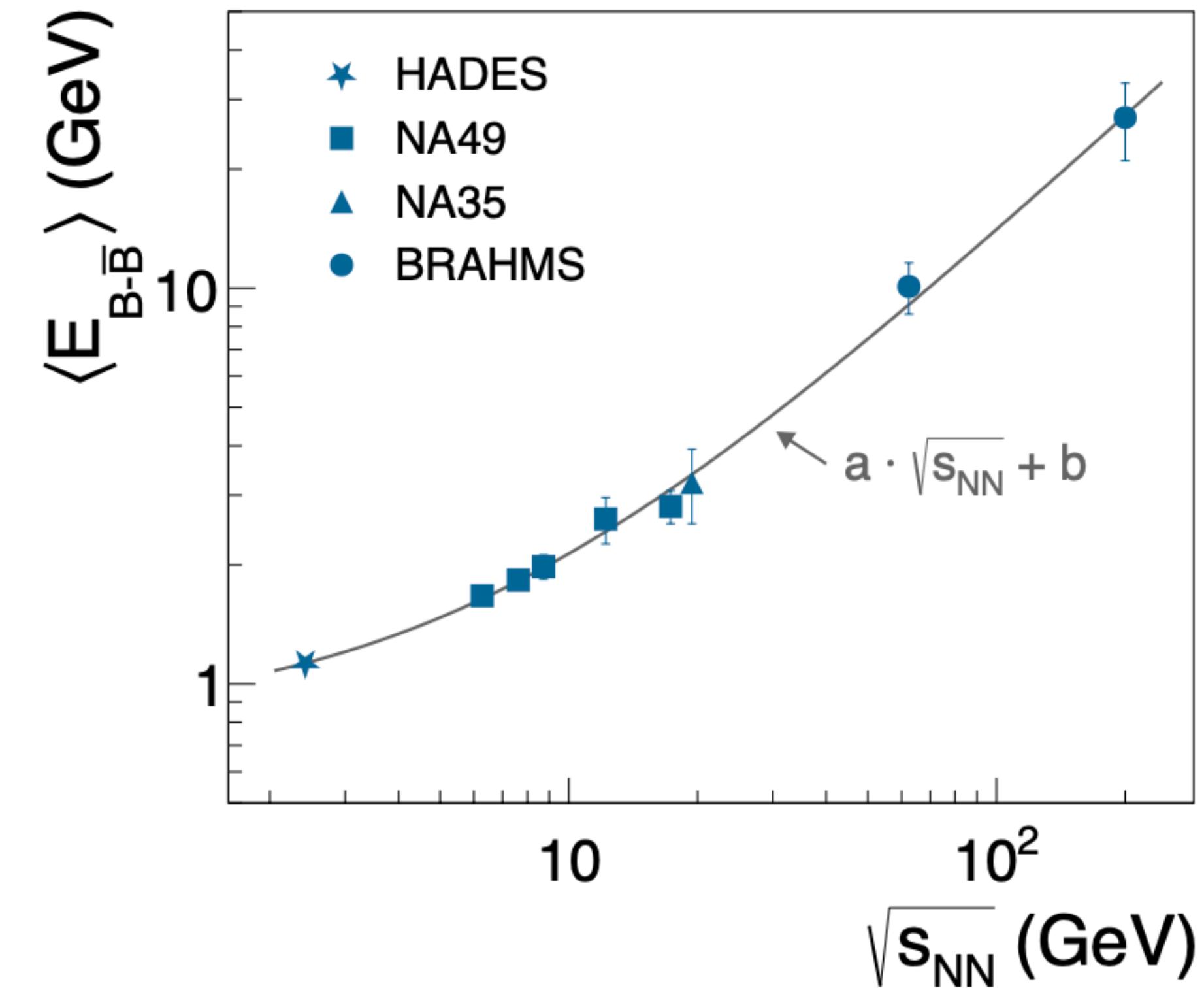
$$m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$$

$$E = m_T \cosh(y)$$

авторы сделали модельное предположение о зависимости средней поперечной массы протонов от быстроты и по ней оценили среднюю энергию протона от быстроты $\langle E \rangle(y)$

эта величина усреднилась с распределением по остаточному барионному числу:

$$\langle E_{B-\bar{B}} \rangle = \frac{1}{N_{(B-\bar{B})}} \int_{-y_p}^{y_p} \langle m_t \rangle \frac{dN_{(B-\bar{B})}}{dy} \cosh y dy$$

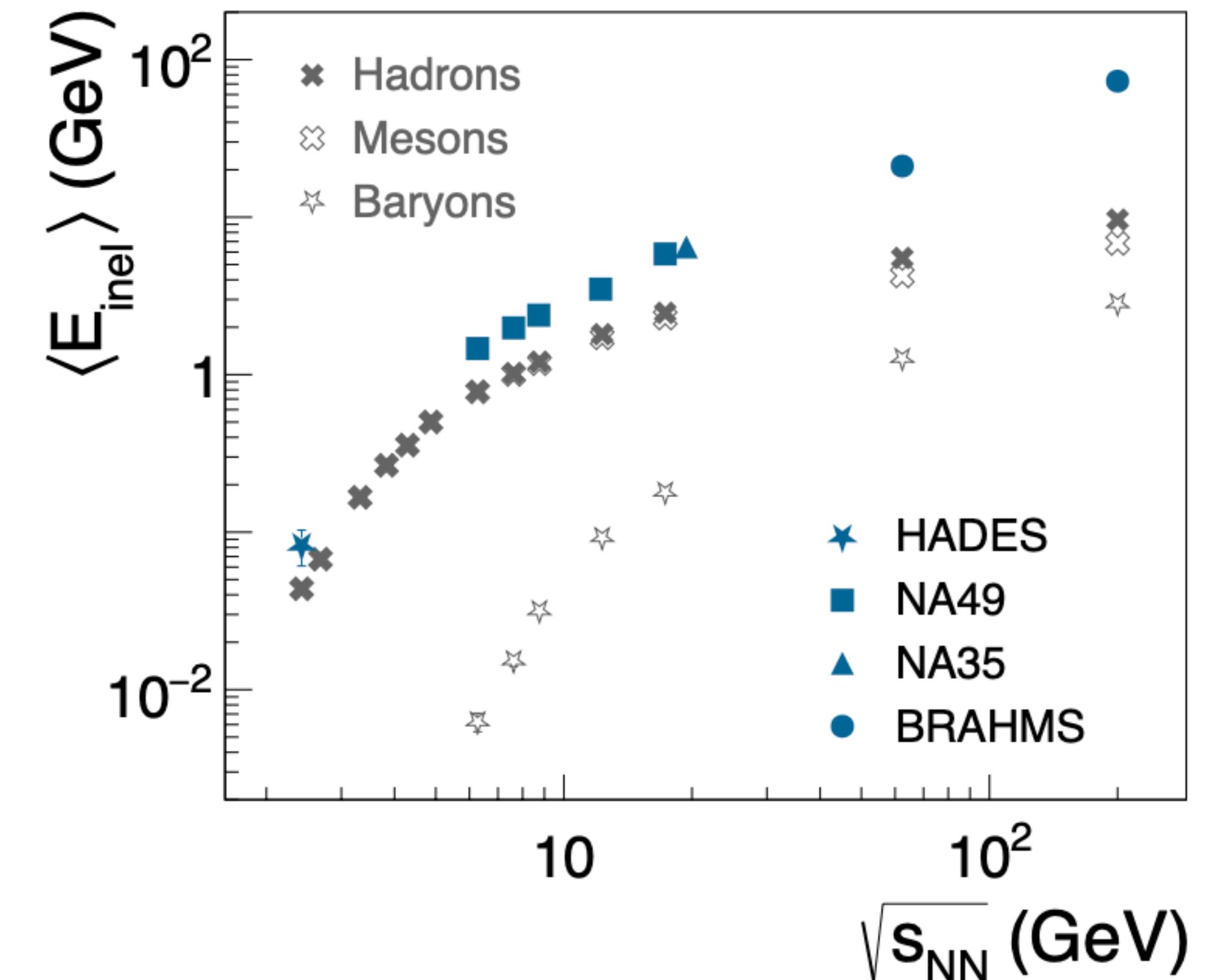


Что меняется с ростом энергии столкновения?

$$\langle E_{inel} \rangle = \frac{\sqrt{s_{NN}}}{2} - \langle E_{B-\bar{B}} \rangle$$

такая средняя энергия характеризует то, сколько из полной изначальной энергии ушло на рождение «новых» частиц

здесь точки Mesons и Baryons - это выходы мезонов и барионов, помноженные на их соответствующие массы - условно это энергии покоя частиц, точки Hadrons - сумма этих вкладов



очевидно, точки Hadrons ниже экспериментальных, тк рождающиеся частицы имеют ненулевую кинетическую энергию

Что меняется с ростом энергии столкновения?

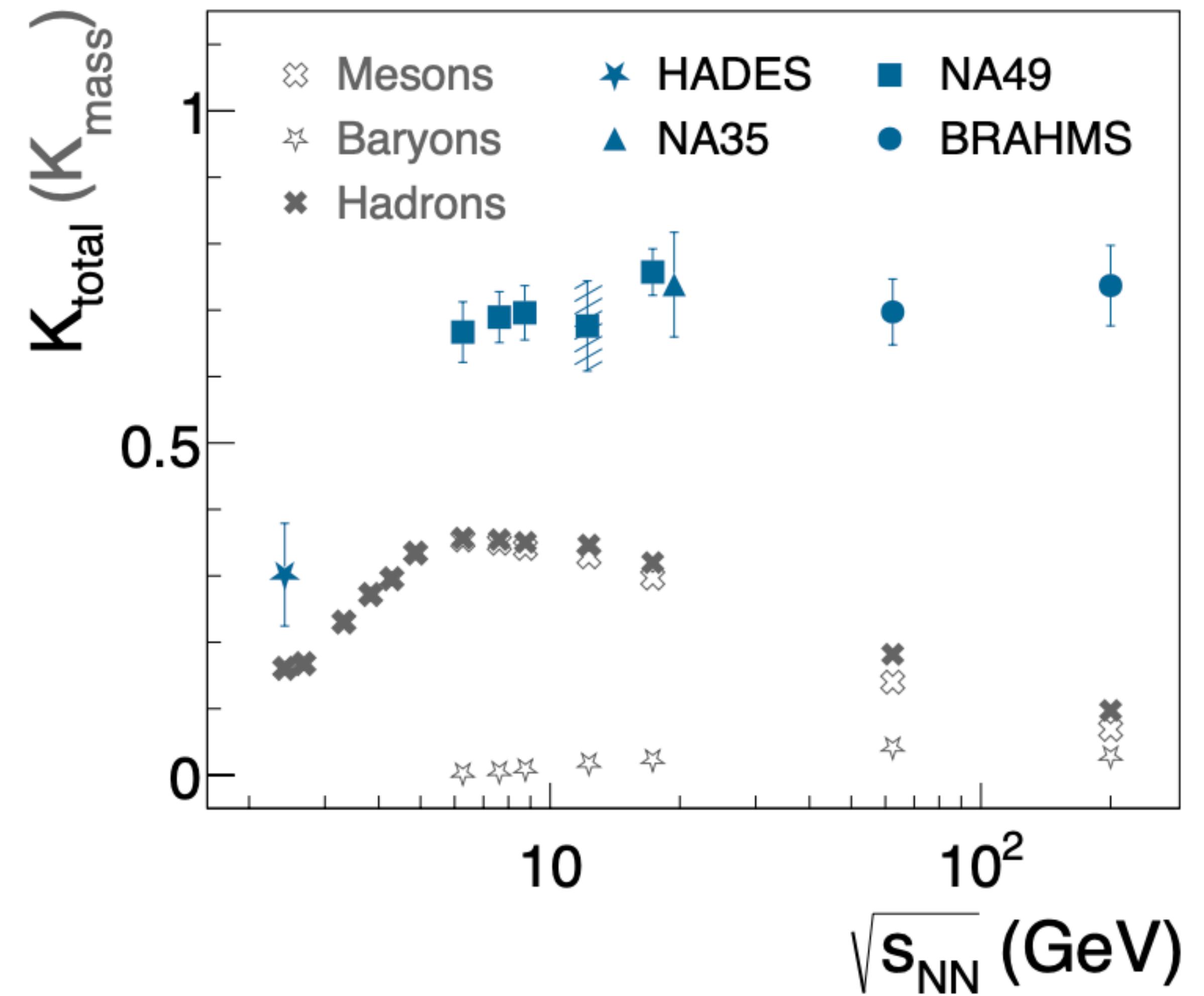
$$K_{total} = 2 \langle E_{inel} \rangle / (\sqrt{s_{NN}} - 2 m_p)$$

доля изначальной кинетической энергии,
которая пошла на рождение «новых» частиц

сначала быстро растет, потом насыщение

$$K_{mass} = \left(\sum_i \frac{2}{N_{part}} N_i m_i \right) / (\sqrt{s_{NN}} - 2 m_p)$$

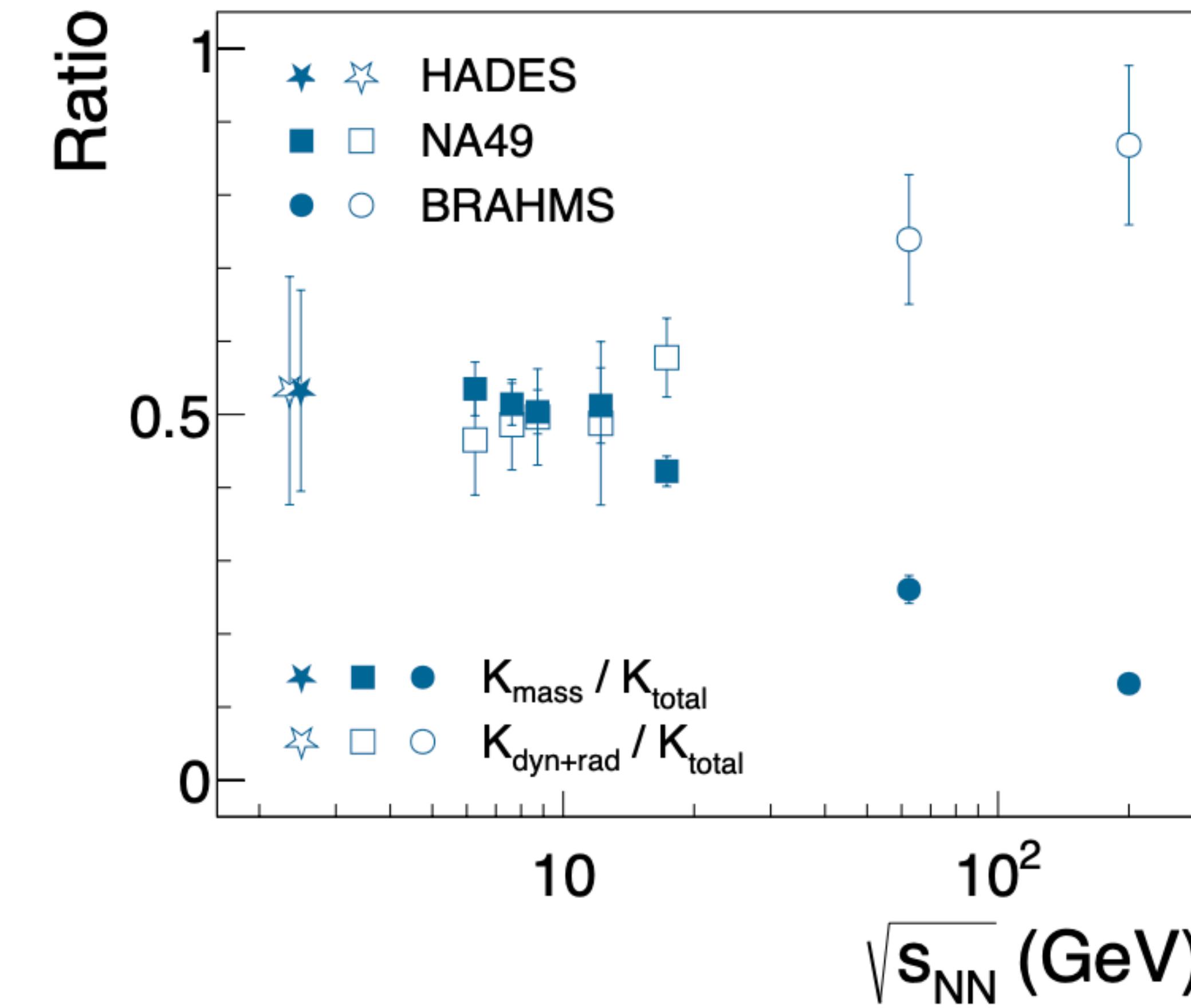
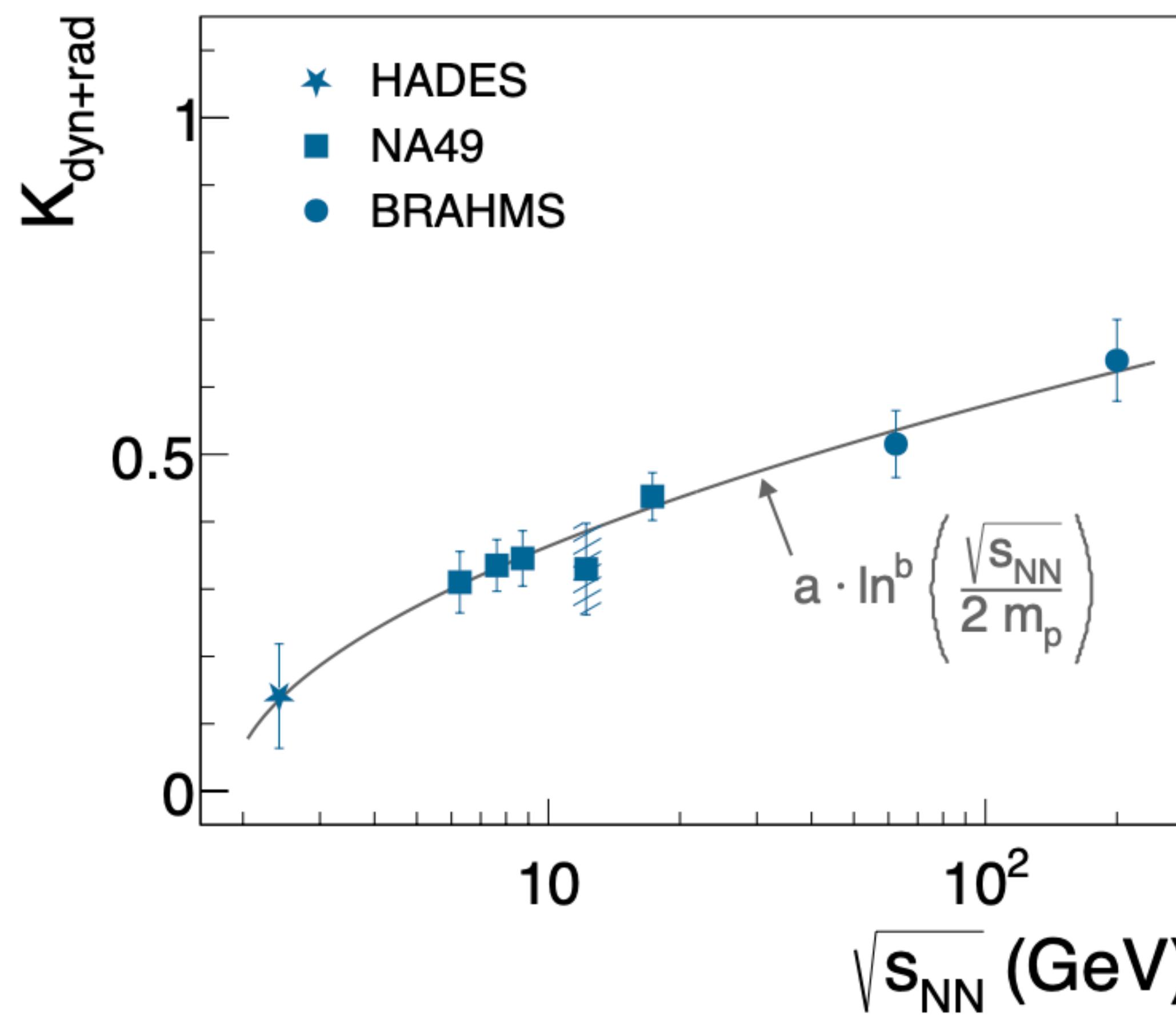
доля, которая идет чисто на генережку масс



Что меняется с ростом энергии столкновения?

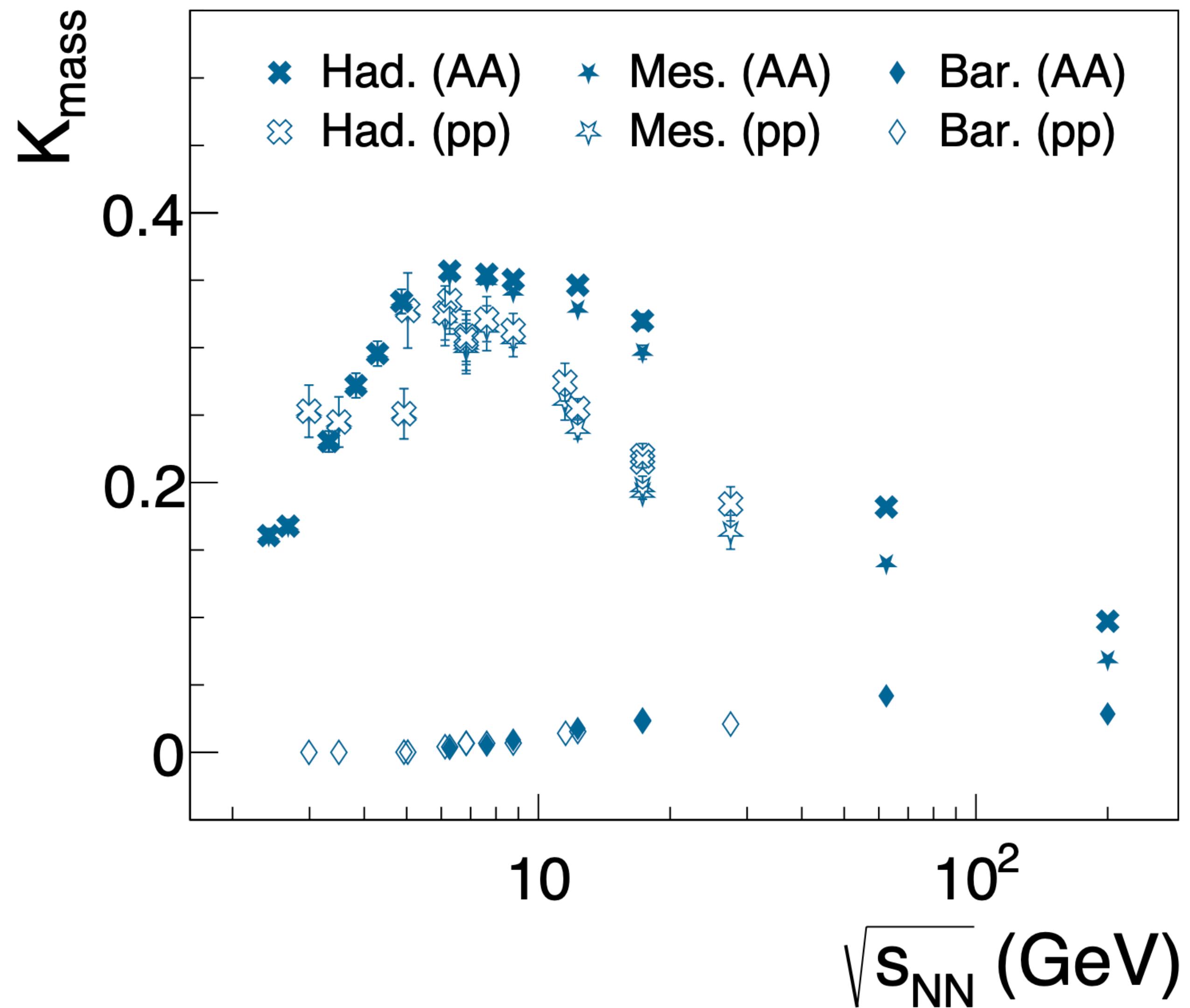
$$K_{total} - K_{mass}$$

доля изначальной кинетической энергии,
которая пошла на кинетическую энергию
«новых» частиц



Сравнение с p+p

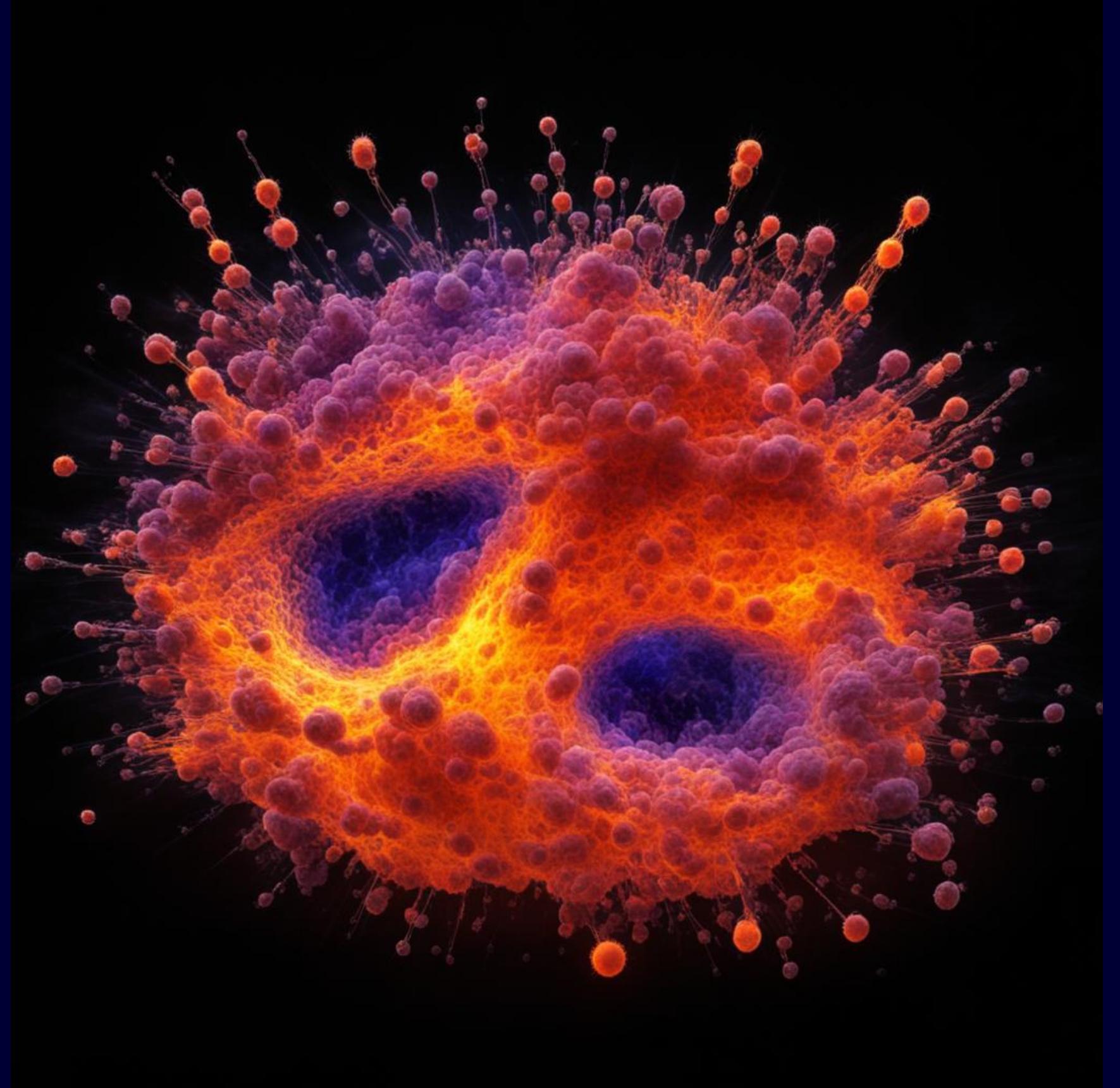
большое отличие в доле энергии, идущей на генерацию массы мезонов для p+p и A+A столкновений



Предложение к разбору

- Tracking the baryon number with nuclear collisions [STAR]
<https://arxiv.org/pdf/2408.15441>
- Baryon transport in color flux tubes <https://arxiv.org/pdf/2311.17906>
- Initial Baryon Stopping and Angular Momentum in Heavy-Ion Collisions <https://arxiv.org/pdf/2504.02192>

Спасибо за внимание



Kandinsky bot: «Quark-gluon plasma»