

# 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

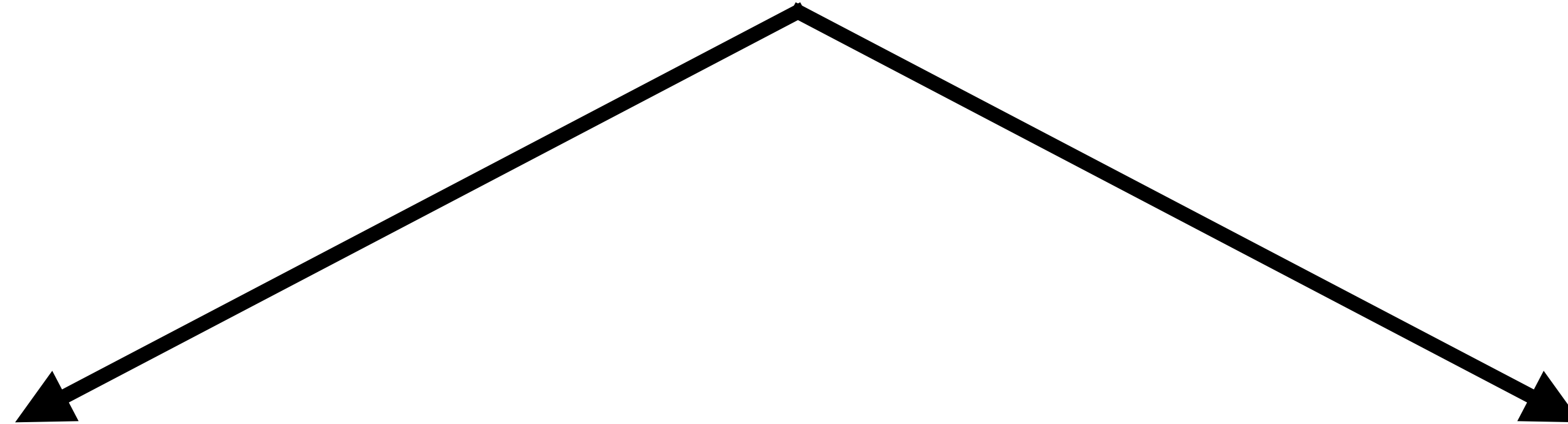
---

Что такое барионный стоппинг и  
почему это интересно?

---

---

**Адроны** - частицы, участвующие в сильном взаимодействии



**Мезоны** - частицы, состоящие из кварка и антикварка

Имеют барионное число  **$B=0$**

**Барионы** - частицы, состоящие из трех кварков

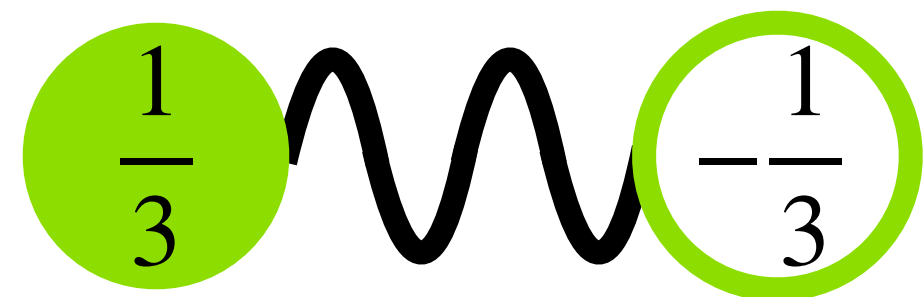
Имеют барионное число  **$B=1$**

( **$B=-1$**  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 антикварка

Имеют барионное число **B=0**



**Барионы** - частицы, состоящие из трех кварков

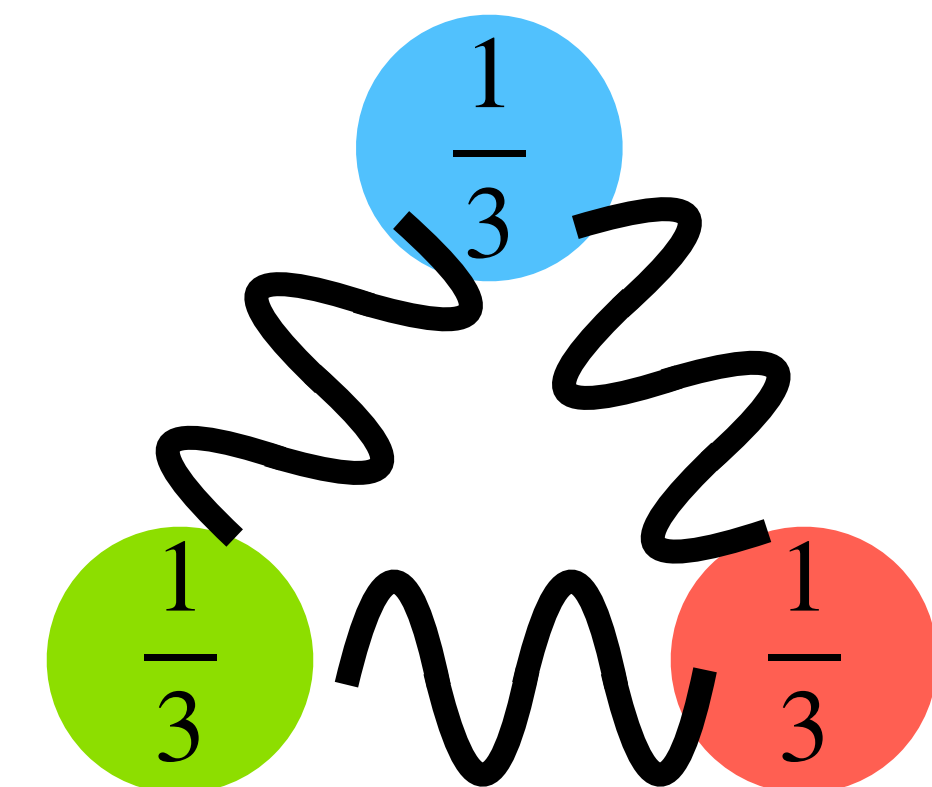
Имеют барионное число **B=1**

(**B=-1** для антибарионов)

Традиционное предположение:

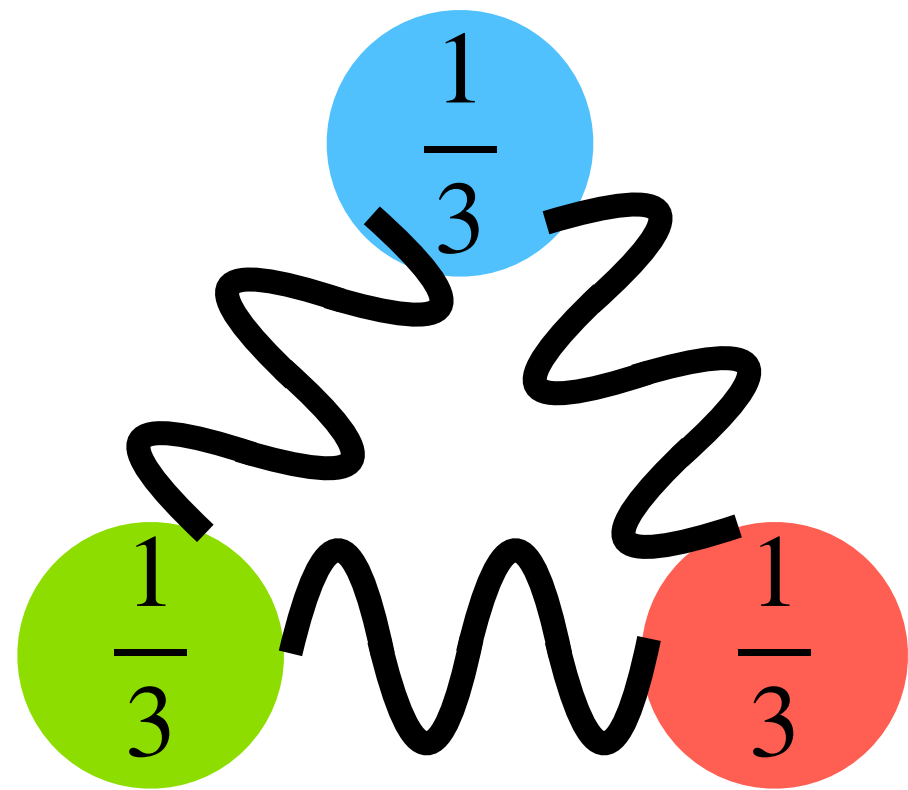
$$B = \frac{1}{3} (n_q - n_{\bar{q}})$$

Припишем каждому кварку по барионному числу 1/3

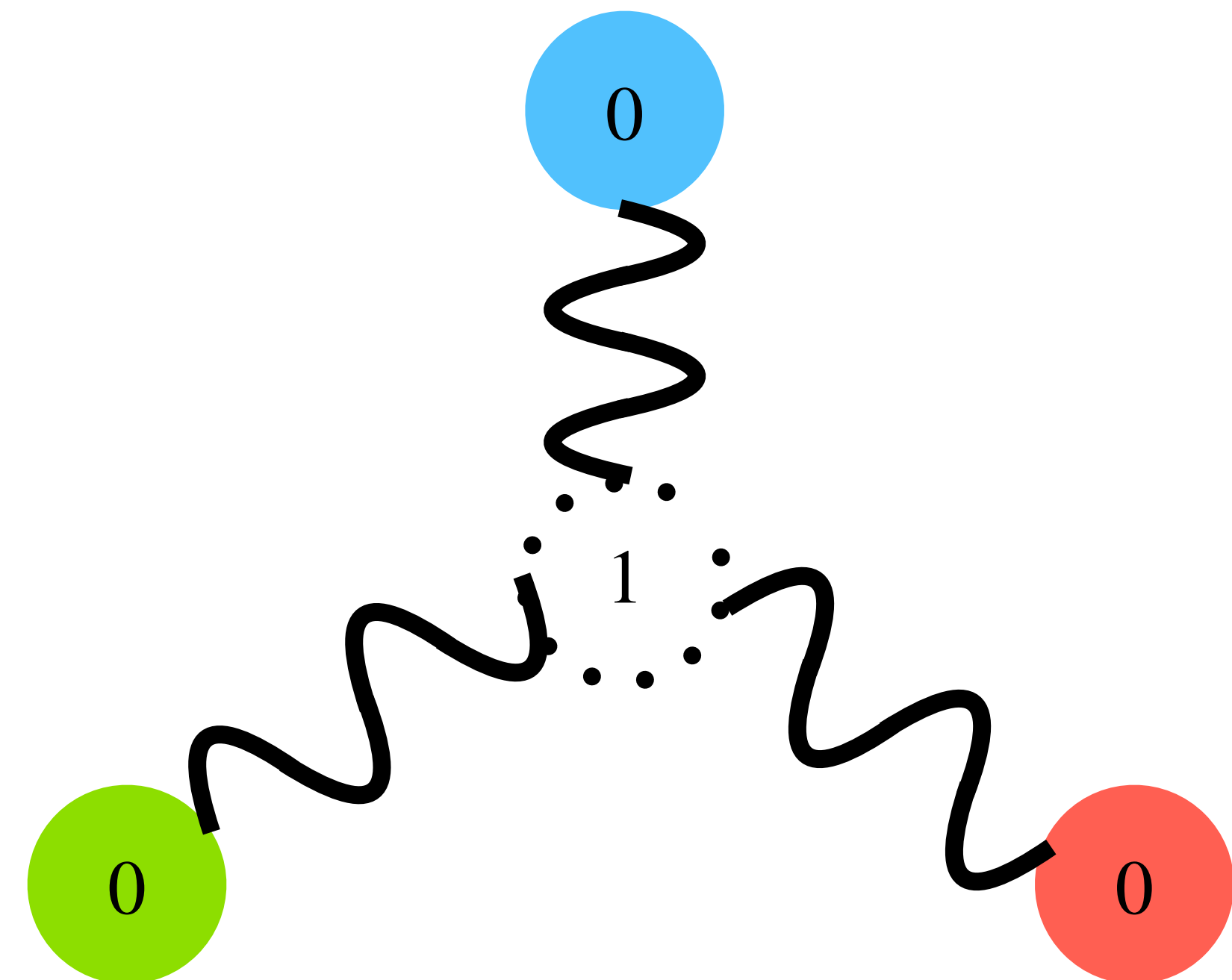


Это не следует напрямую из КХД!

Припишем каждому кварку по барионному числу  $\frac{1}{3}$

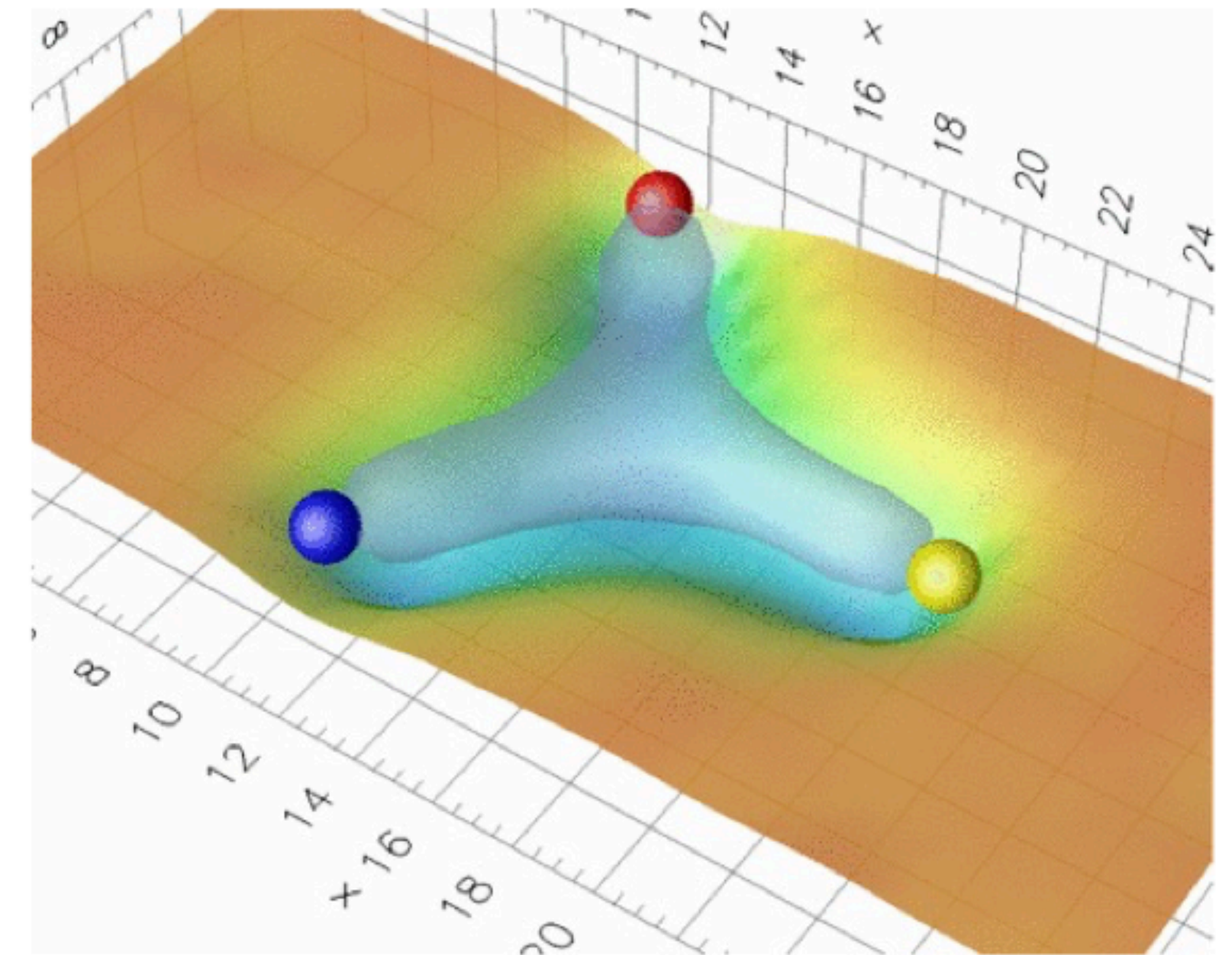
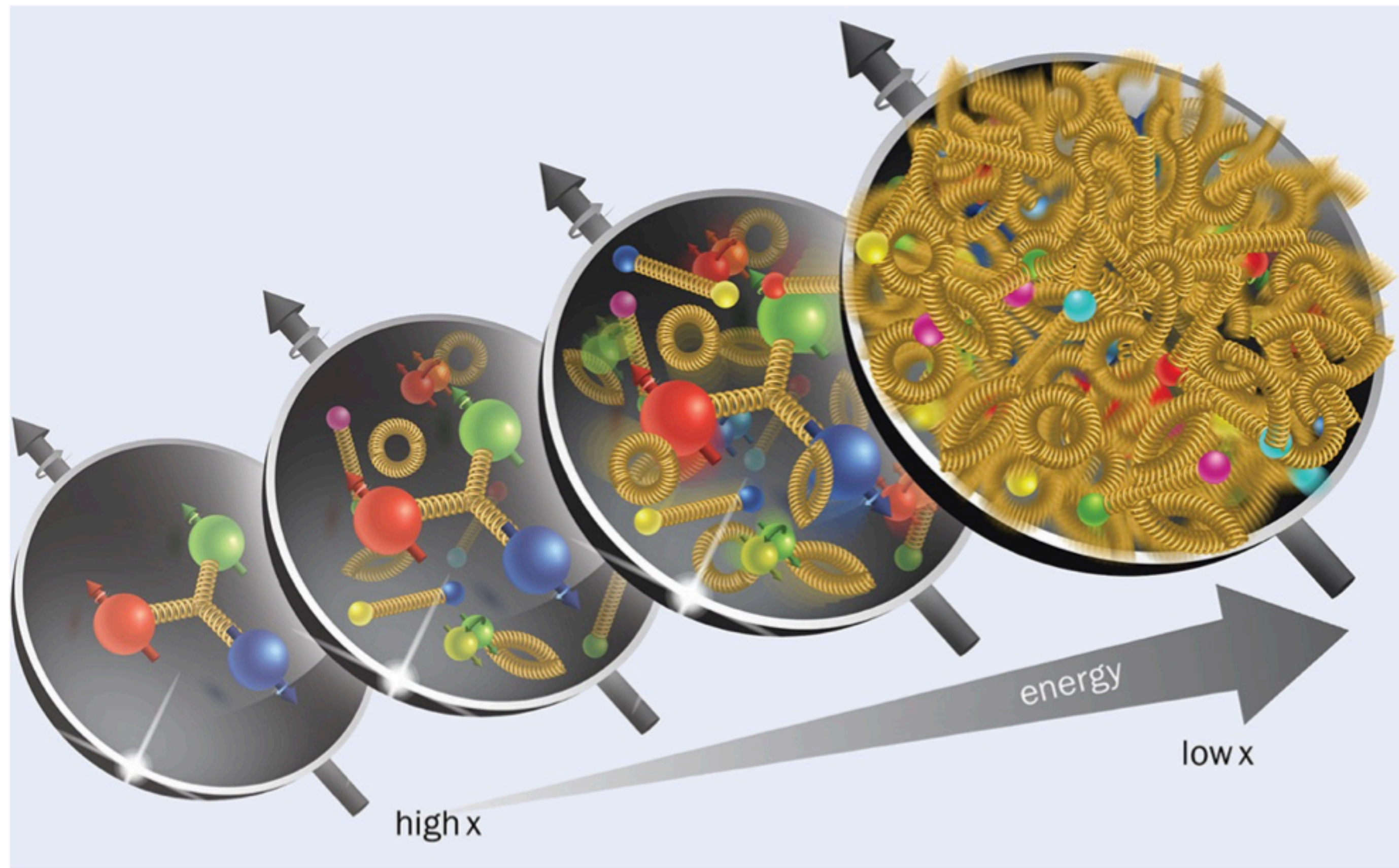


Альтернатива - глюонный junction





# 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)

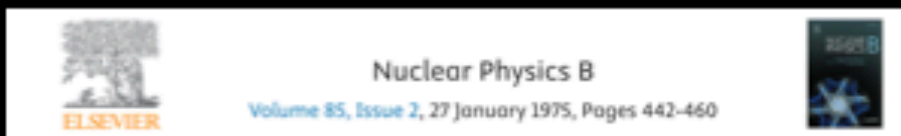


# 50 years of puzzles with baryon production in high energy collisions

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\*\*

Nuclear Physics A532 (1991) 351c–358c  
North-Holland, Amsterdam

NUCLEAR  
PHYSICS A

What can we learn from unpolarized and polarized  
electroproduction of fast baryons?

X. Artru<sup>a</sup> and M. Mekhfi<sup>b</sup>



Physics Letters B

Volume 378, Issues 1–4, 20 June 1996, Pages 238-246

Can gluons trace baryon number? ☆



Physics Letters B

Volume 443, Issues 1–4, 10 December 1998, Pages 45-50

Baryon number transport via  
gluonic junctions

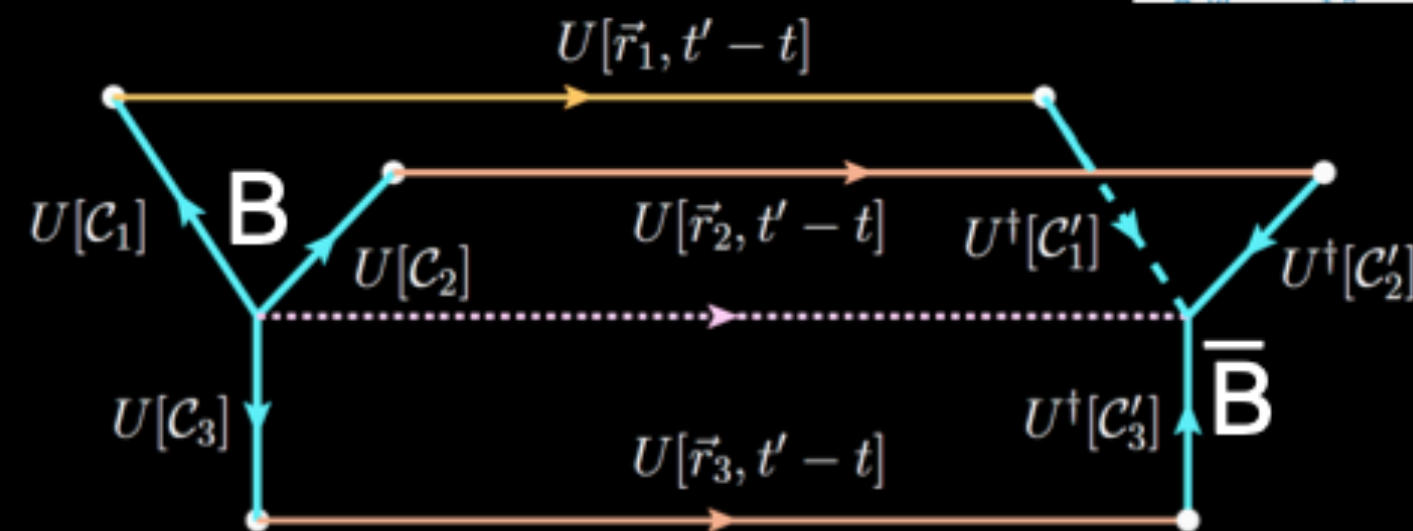
Stephen E. Vance<sup>a</sup>, Miklos Gyulassy<sup>a</sup>, Xin-Nian Wang<sup>b</sup>

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



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

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

arXiv > hep-ph > arXiv:2205.05685

Search...

Help | Advance

High Energy Physics – Phenomenology

[Submitted on 12 May 2022 (v1), last revised 2 Dec 2023 (this version, v4)]

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

arXiv > nucl-th > arXiv:2309.06445

Search...

Help | Advance

Nuclear Theory

[Submitted on 12 Sep 2023 (v1), last revised 20 Nov 2023 (this version, v2)]

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

arXiv > hep-ph > arXiv:2312.15039

Search...

Help

High Energy Physics – Phenomenology

[Submitted on 22 Dec 2023]

Signatures of baryon junctions in semi-  
inclusive deep inelastic scattering

David Frenklakh, Dmitri E. Kharzeev, Wenliang Li

arXiv > nucl-th > arXiv:2312.12376

Search...

Help | Advance

Nuclear Theory

[Submitted on 19 Dec 2023]

Tracing baryon and electric charge  
transport in isobar collisions

Gregoire Pihan, Akihiko Monnai, Björn Schenke, Chun Shen

And many more...



# 50 years of puzzles with baryon production in high energy collisions

1970s

Nuclear Physics B  
Volume 85, Issue 2, 27 January 1975, Pages 442-460

String model with baryons:  
Topology; classical motion

X. Artru<sup>a</sup>

Nuclear Physics B  
Volume 123, Issue 3, 30 May 1977, Pages 507-545

A possible description of baryon  
dynamics in dual and gauge  
theories

G.C. Rossi<sup>\*</sup>, G. Veneziano<sup>\*\*</sup>

1990s

Nuclear Physics A532 (1991) 351c-358c  
North-Holland, Amsterdam

What can we learn from unpolarized and polarized  
electroproduction of fast baryons?

X. Artru<sup>a</sup> and M. Mekhfi<sup>b</sup>

Physics Letters B  
Volume 378, Issues 1-4, 20 June 1996, Pages 238-246

Can gluons trace baryon number? ☆

Physics Letters B  
Volume 443, Issues 1-4, 10 December 1998, Pages 45-50

Baryon number transport via  
gluonic junctions

Stephen E. Vance<sup>a</sup>, Miklos Gyulassy<sup>a</sup>, Xin-Nian Wang<sup>b</sup>

Antihyperon Enhancement through Baryon Junction Loops

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

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

2022-

Backward angle ( $\pi$  channel) production at an electron-ion collider

Dong, Yuanjing Ji, and Spencer R. Klein  
ed 15 July 2022

High Energy Physics – Phenomenology

[Submitted on 12 May 2022 (v1), last revised 2 Dec 2023 (this version, v4)]

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

arXiv > nucl-th > arXiv:2309.06445

Nuclear Theory

[Submitted on 12 Sep 2023 (v1), last revised 20 Nov 2023 (this version, v2)]

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

arXiv > hep-ph > arXiv:2312.15039

High Energy Physics – Phenomenology

[Submitted on 22 Dec 2023]

Signatures of baryon junctions in semi-  
inclusive deep inelastic scattering

David Frenklakh, Dmitri E. Kharzeev, Wenliang Li

arXiv > nucl-th > arXiv:2312.12376

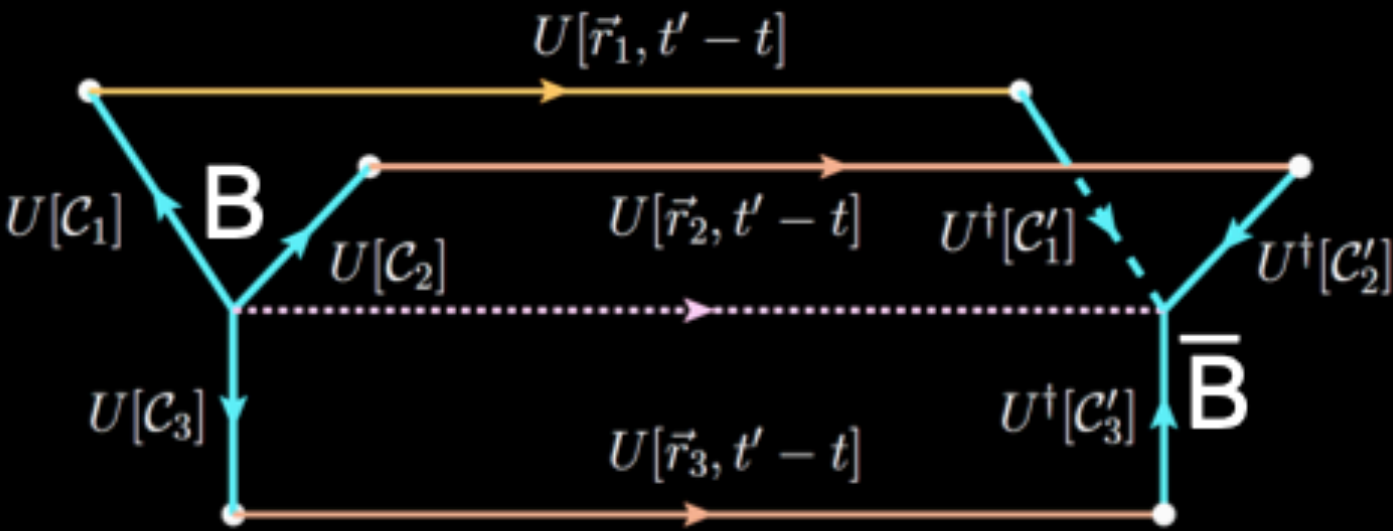
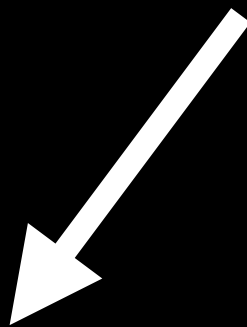
Nuclear Theory

[Submitted on 19 Dec 2023]

Tracing baryon and electric charge  
transport in isobar collisions

Gregoire Pihan, Akihiko Monnai, Björn Schenke, Chun Shen

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



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

And many more...

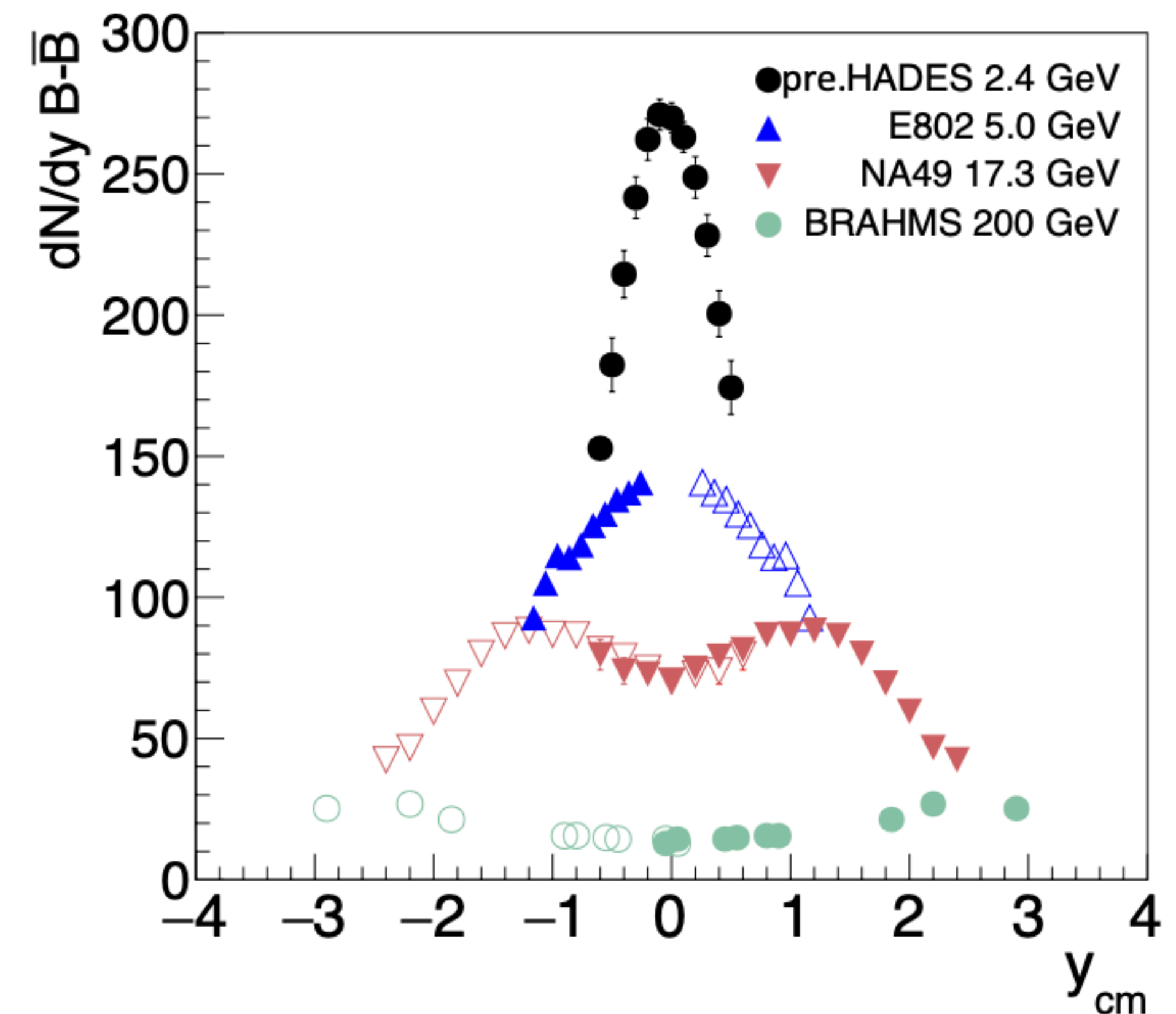


# Стоппинг барионов

## Сталкиваем ядра

- два ядра = два набора нуклонов (протонов и нейтронов) = система с положительным барионным числом
- полное барионное число во всем аксептансе должно сохраниться
- 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



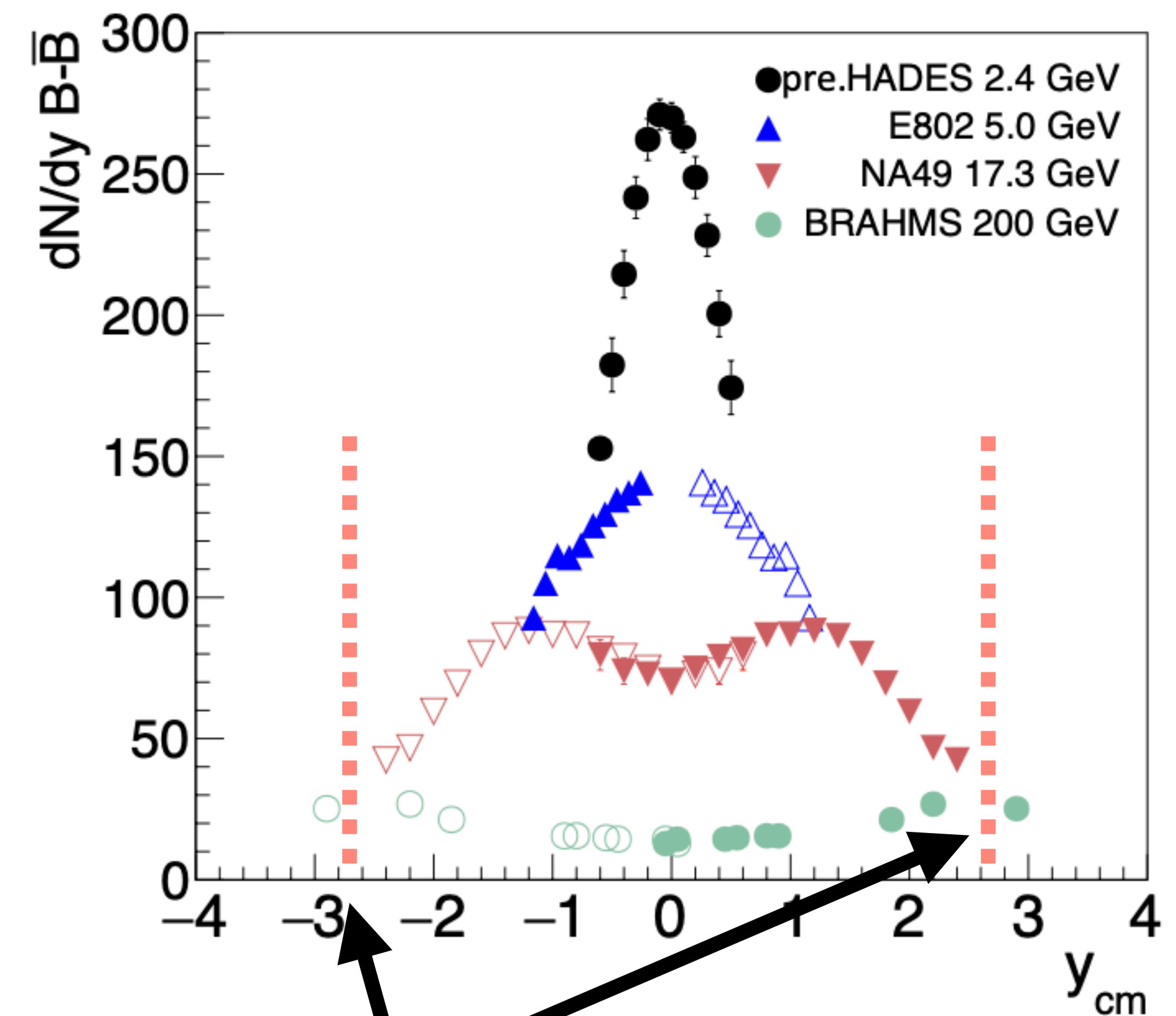
$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$

# Стоппинг барионов

## Сталкиваем ядра

- два ядра = два набора нуклонов (протонов и нейтронов) = система с положительным барионным числом
- полное барионное число во всем аксептансе должно сохраниться
- 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



Быстроты пучков для NA49

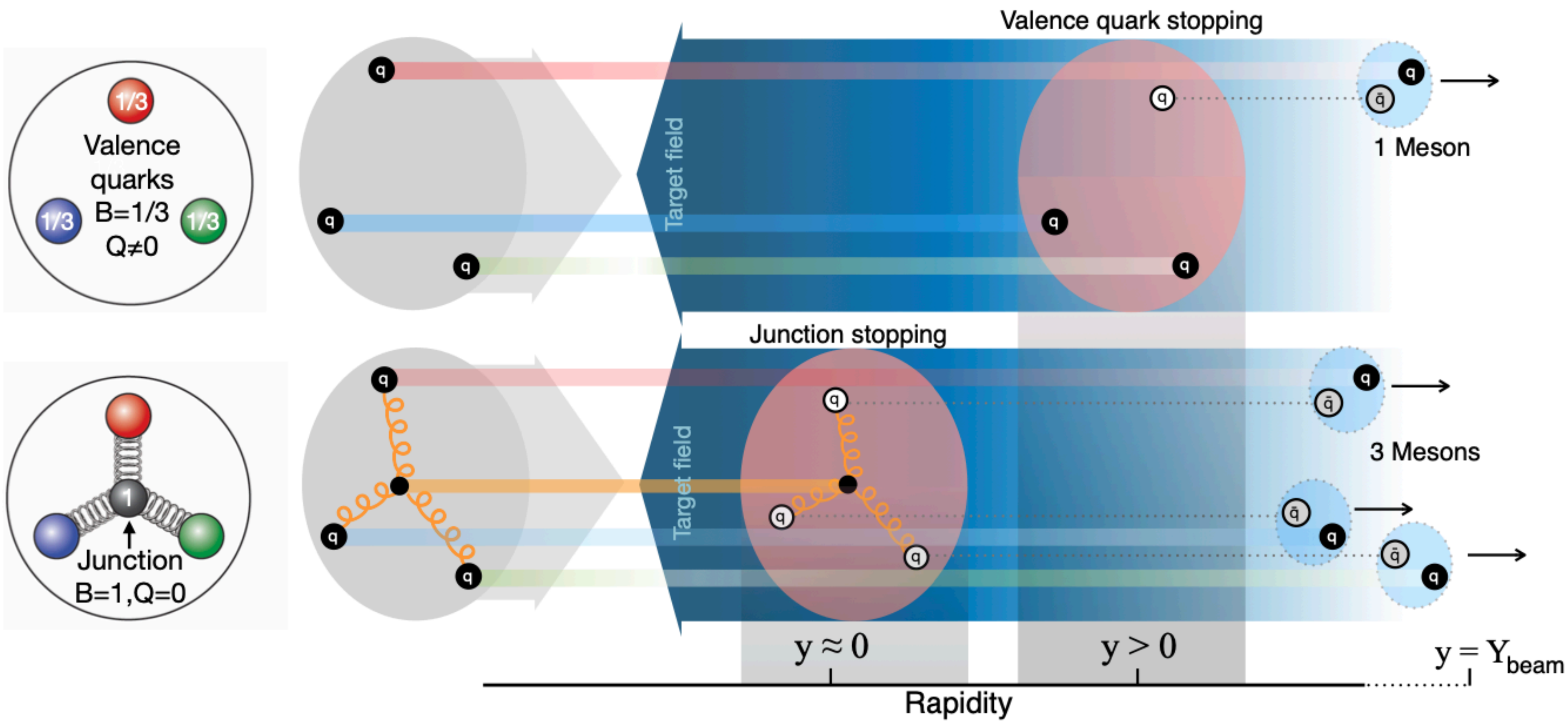
$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z}$$



# Стоппинг барионов и junction

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

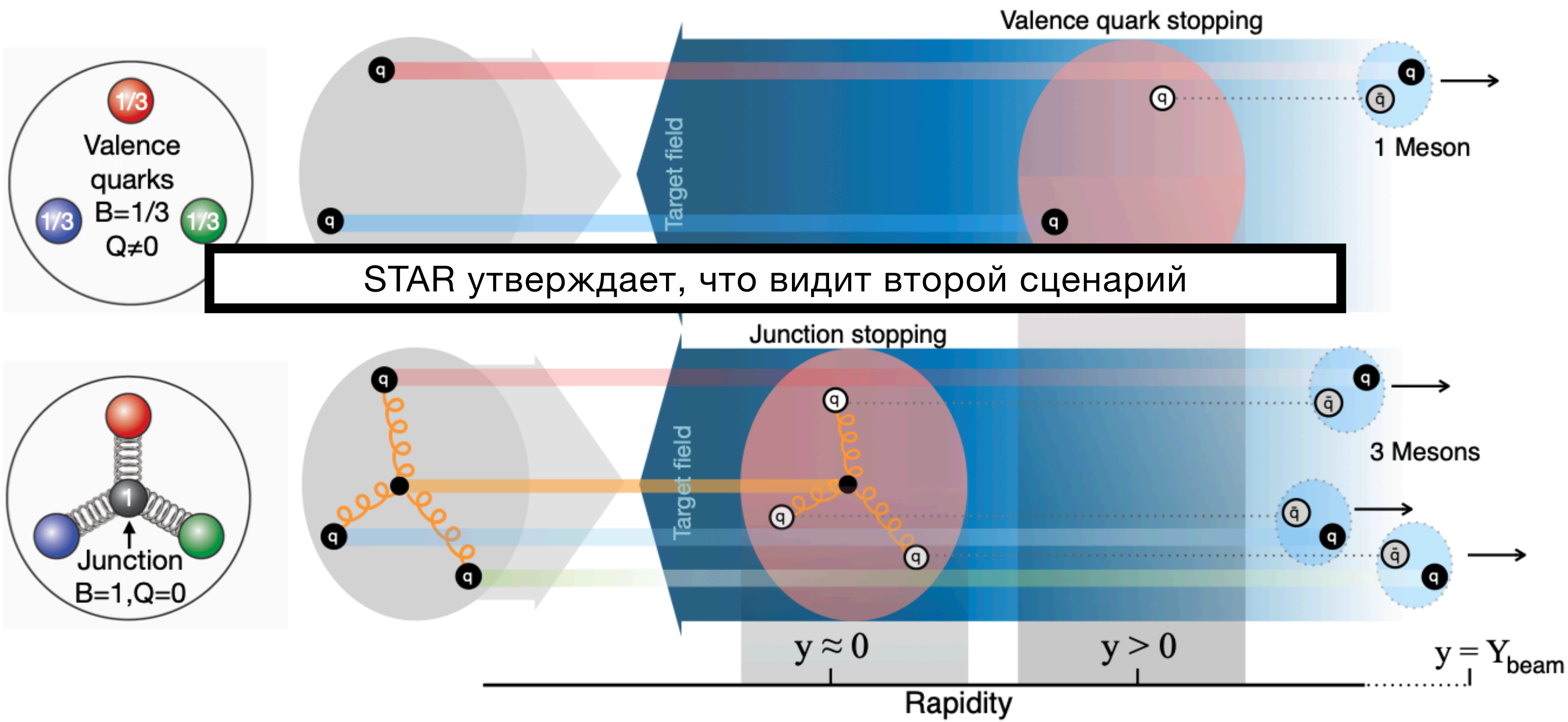
Пусть  $B$  и  $Q$  - затормозившие барионный и электрический заряды



# 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



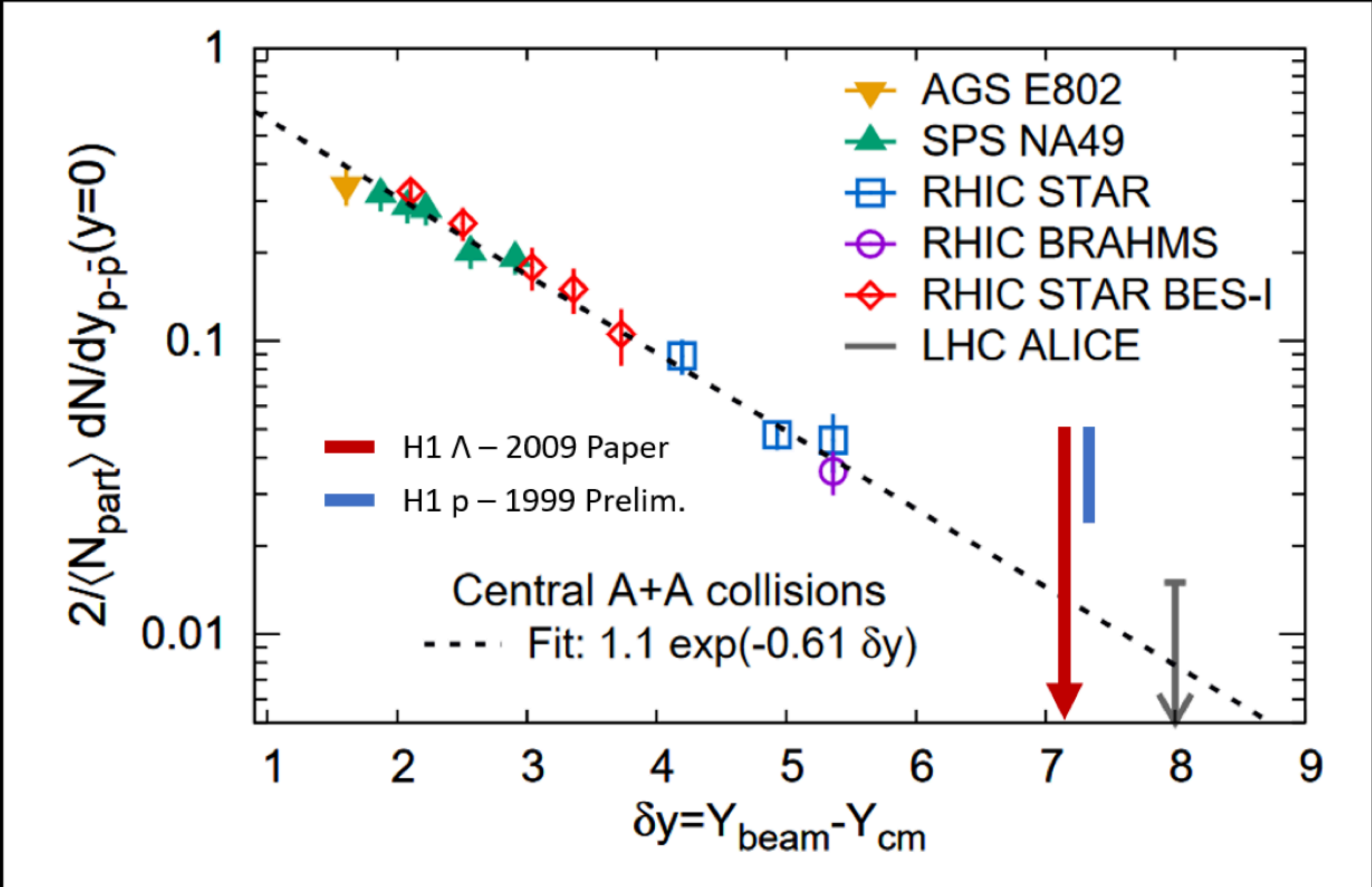
$$\frac{B}{Q} \approx \frac{A}{Z}$$

$$\frac{B}{Q} > \frac{A}{Z}$$



# 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

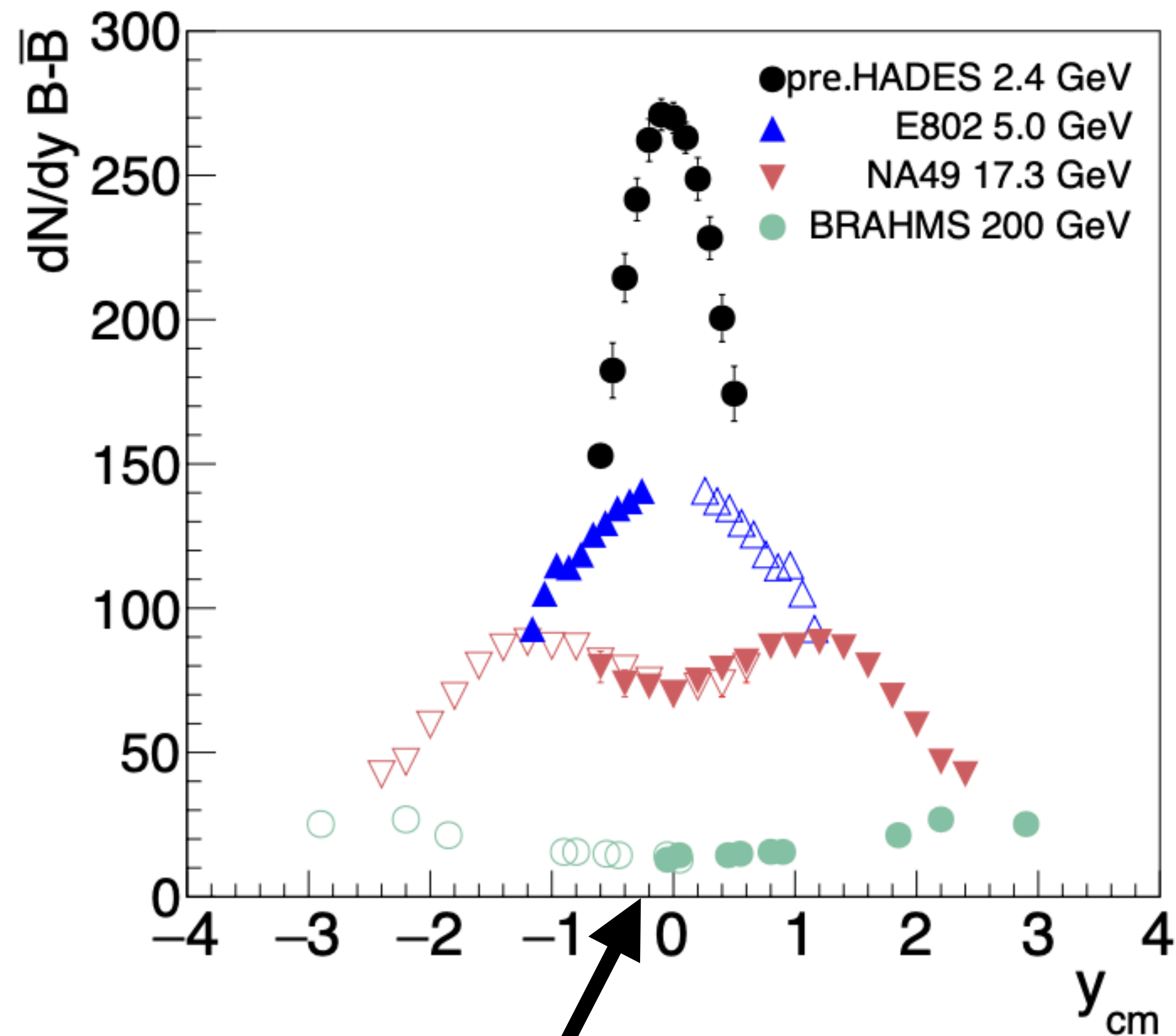
---

# Возвращаемся к обзорной статье

---

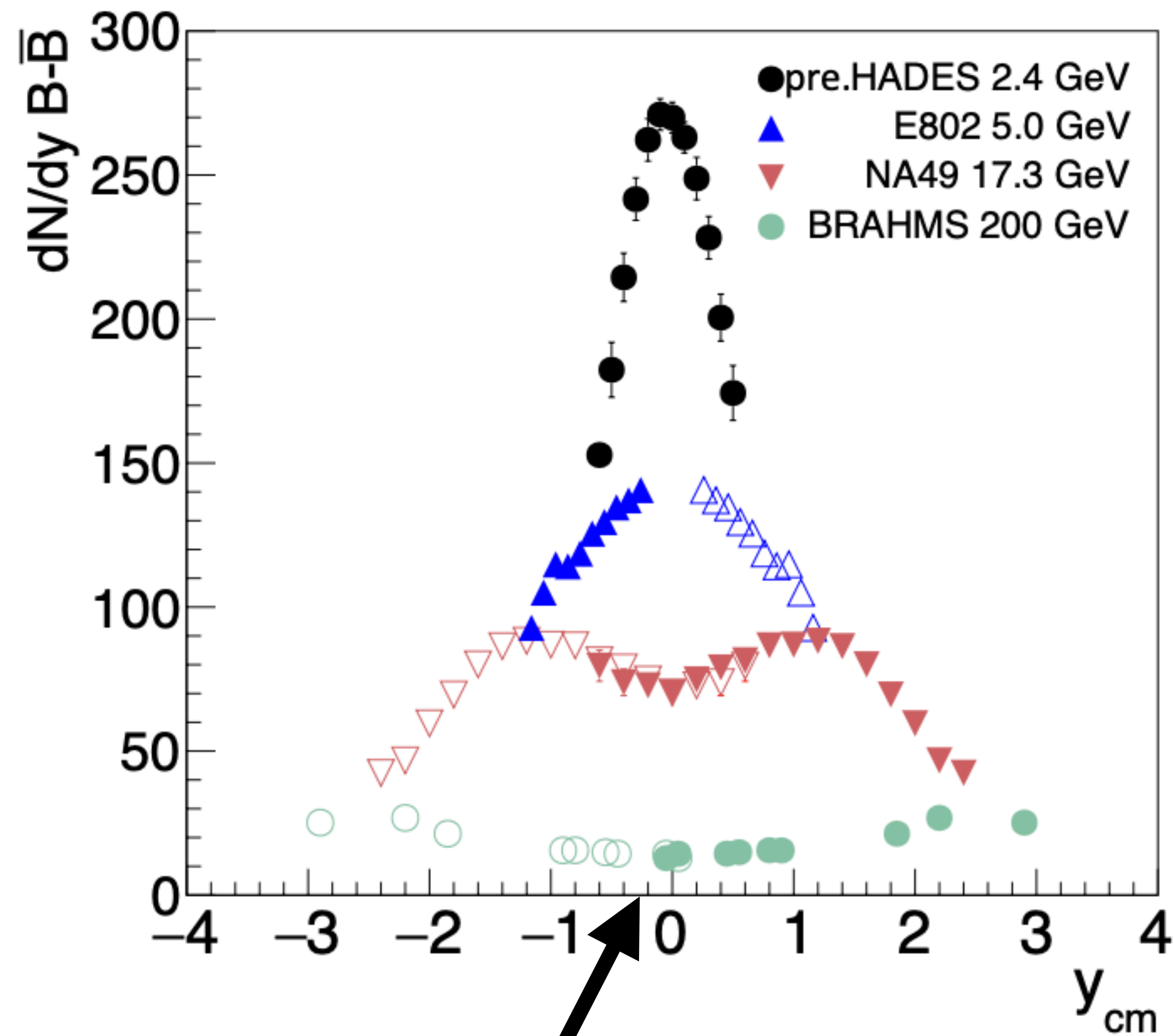


# Что меняется с ростом энергии столкновения?

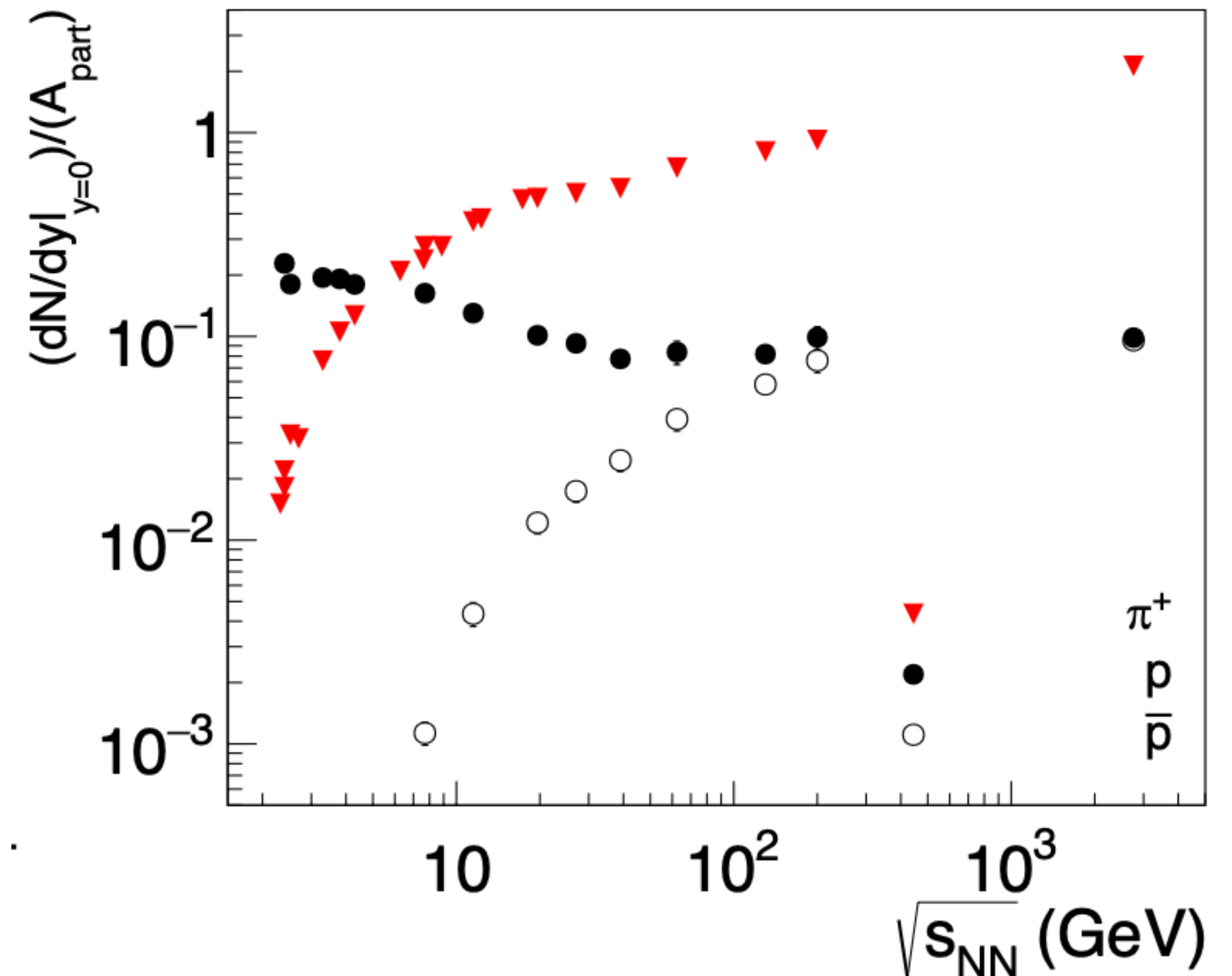


на энергиях LHC = 0

# Что меняется с ростом энергии столкновения?



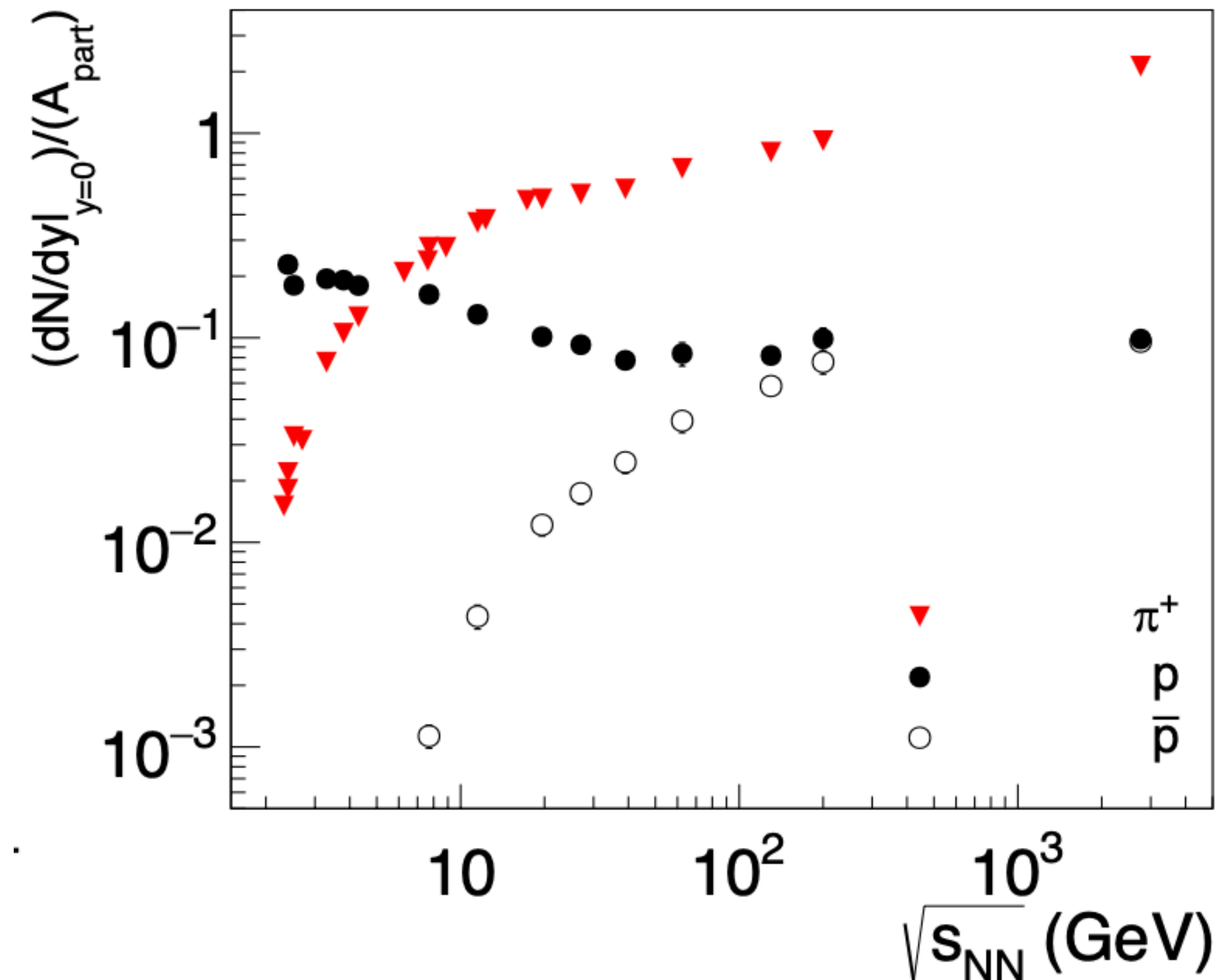
на энергиях LHC = 0





# Что меняется с ростом энергии столкновения?

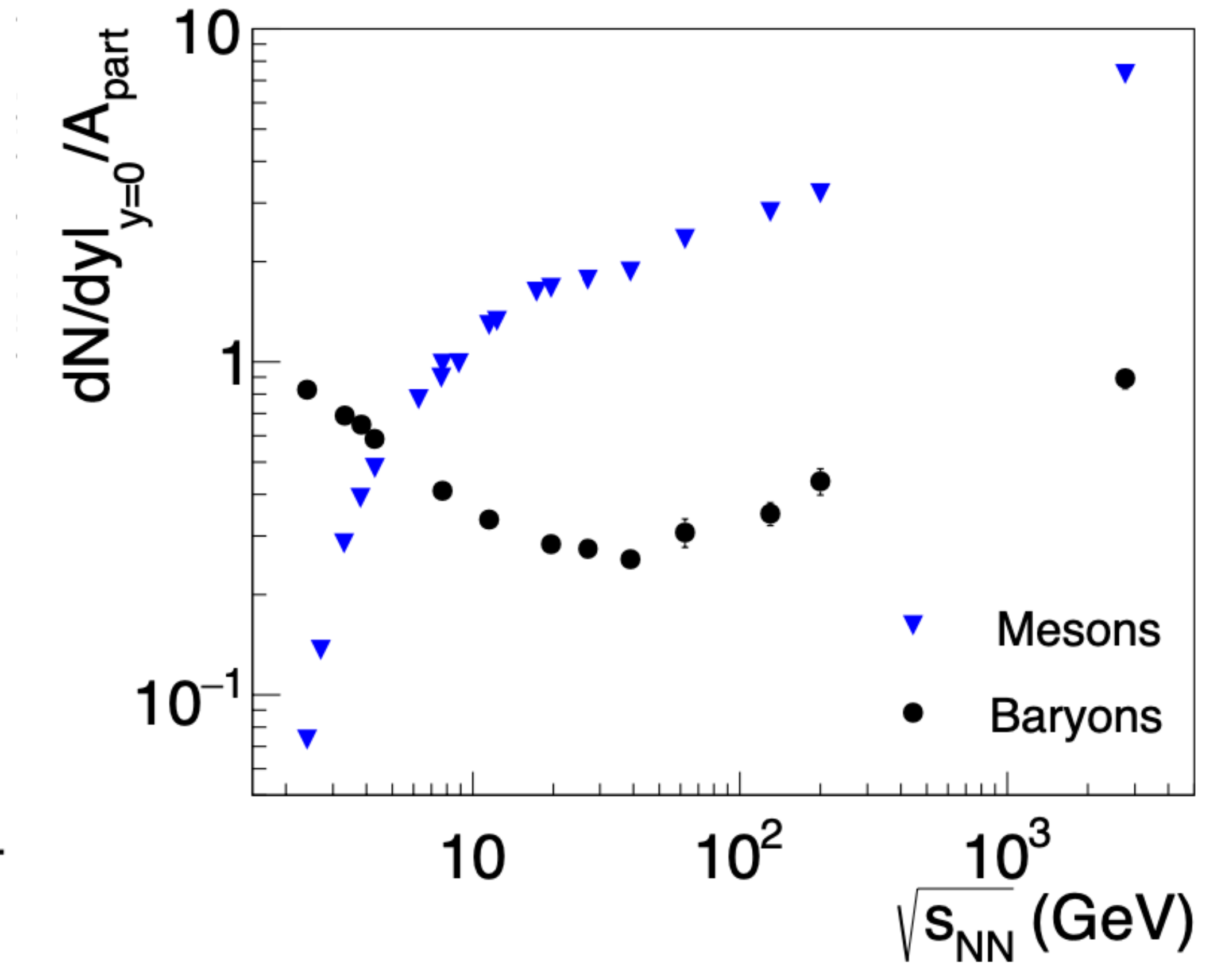
- монотонный рост выхода пи-мезонов
- выход антибарионов по сравнению с пи-мезонами значительно подавлен (они тяжелее и нужно родить в столкновении три антикварка, которых изначально не было)
- в выходе протонов interplay двух эффектов - стоппинга барионного числа из начальных ядер и рождения «новых»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

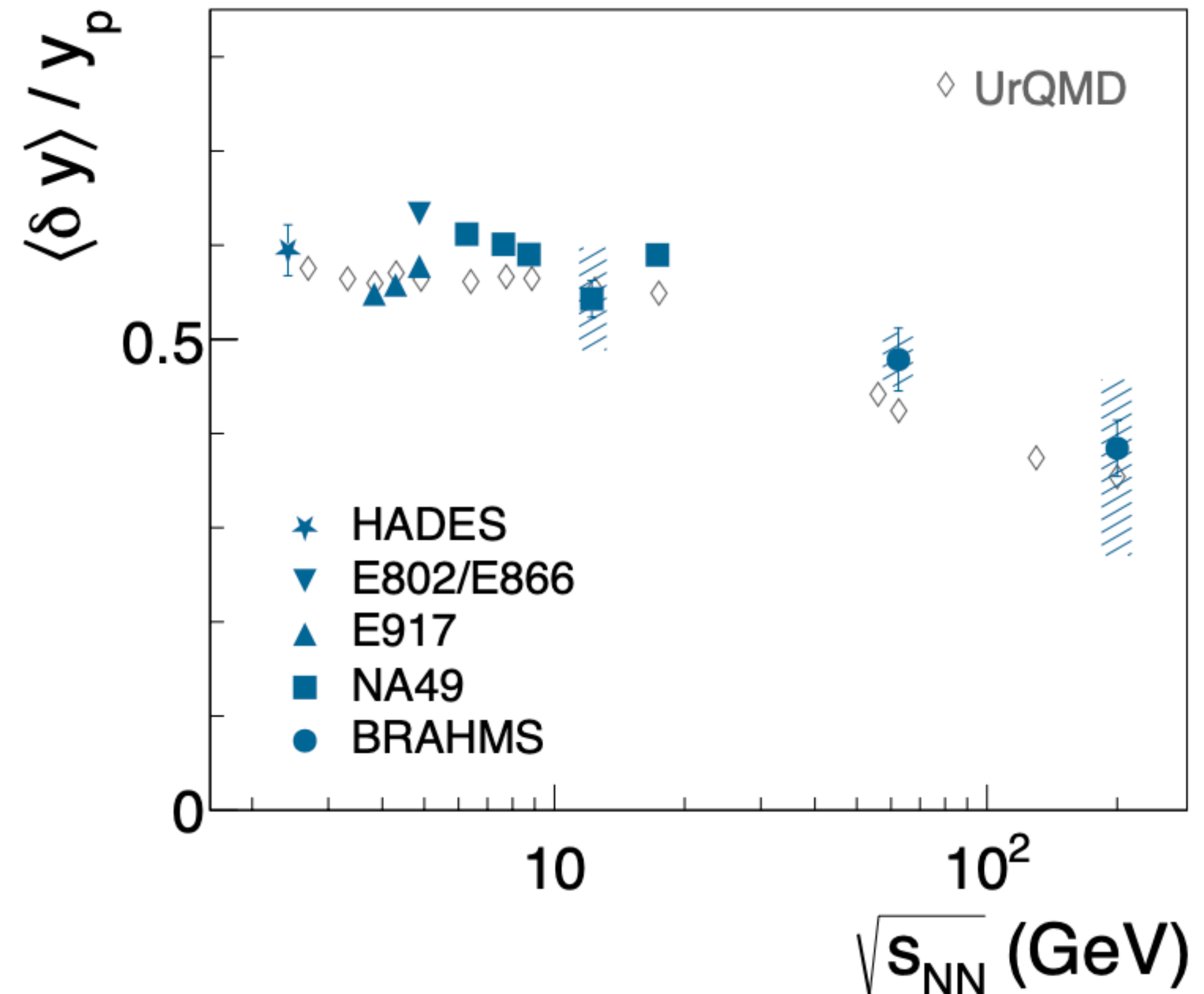
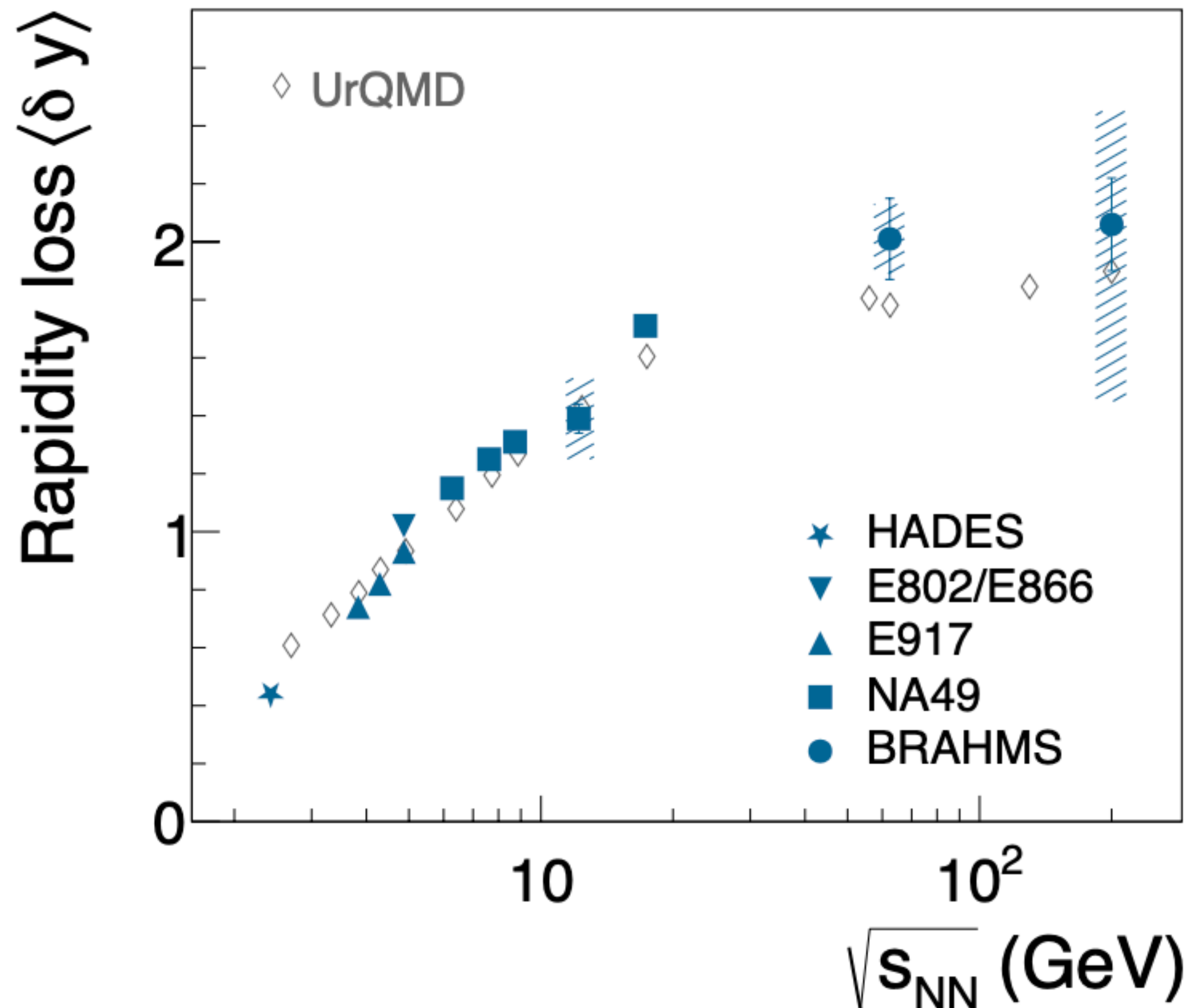
этот график и символизирует название статьи - переход от baryon-rich matter к meson-dominated matter



# 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 уВеат начинает расти быстрее, чем средние потери на стоппинг





# Что меняется с ростом энергии столкновения?

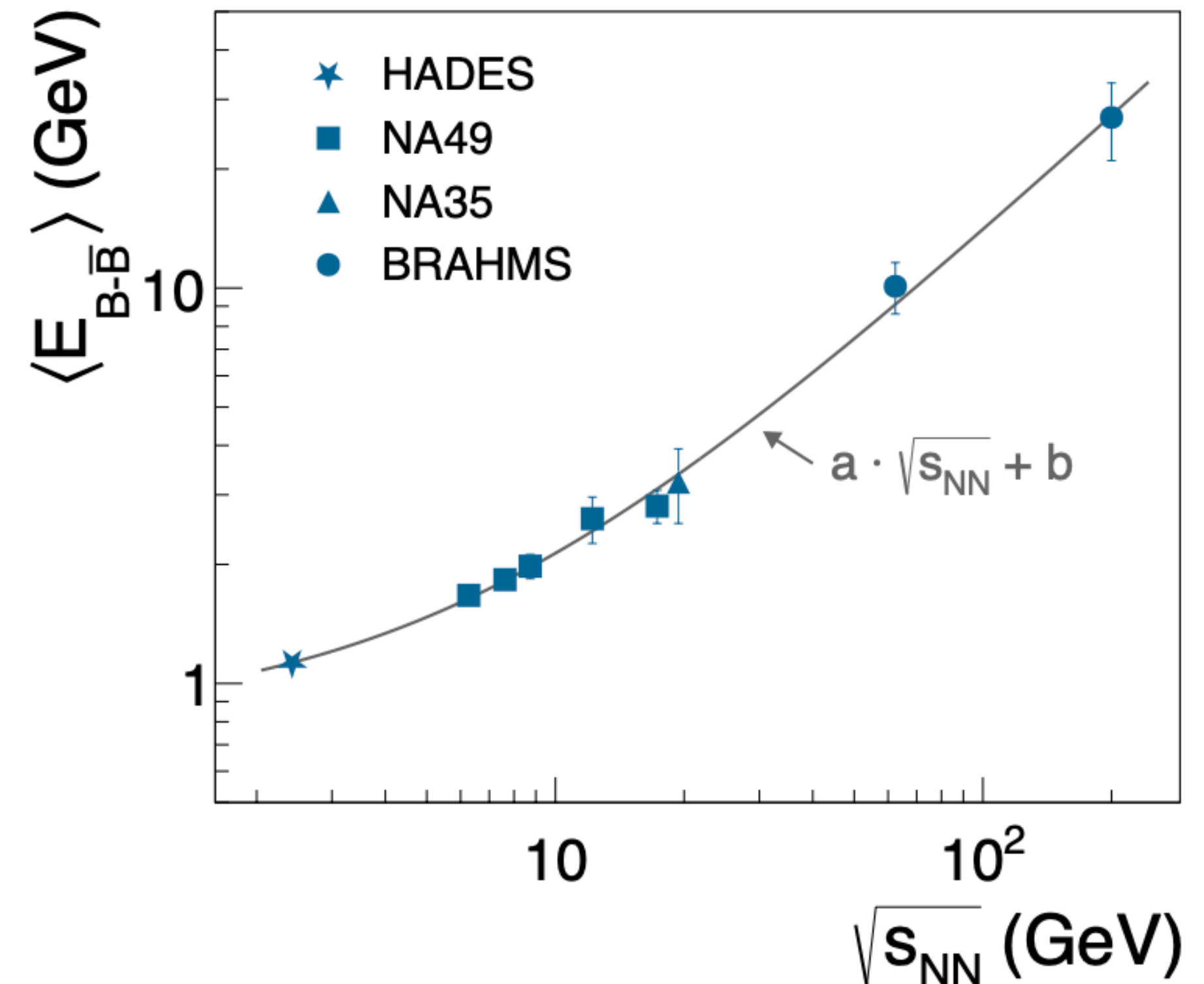
$$m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$$

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

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:

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



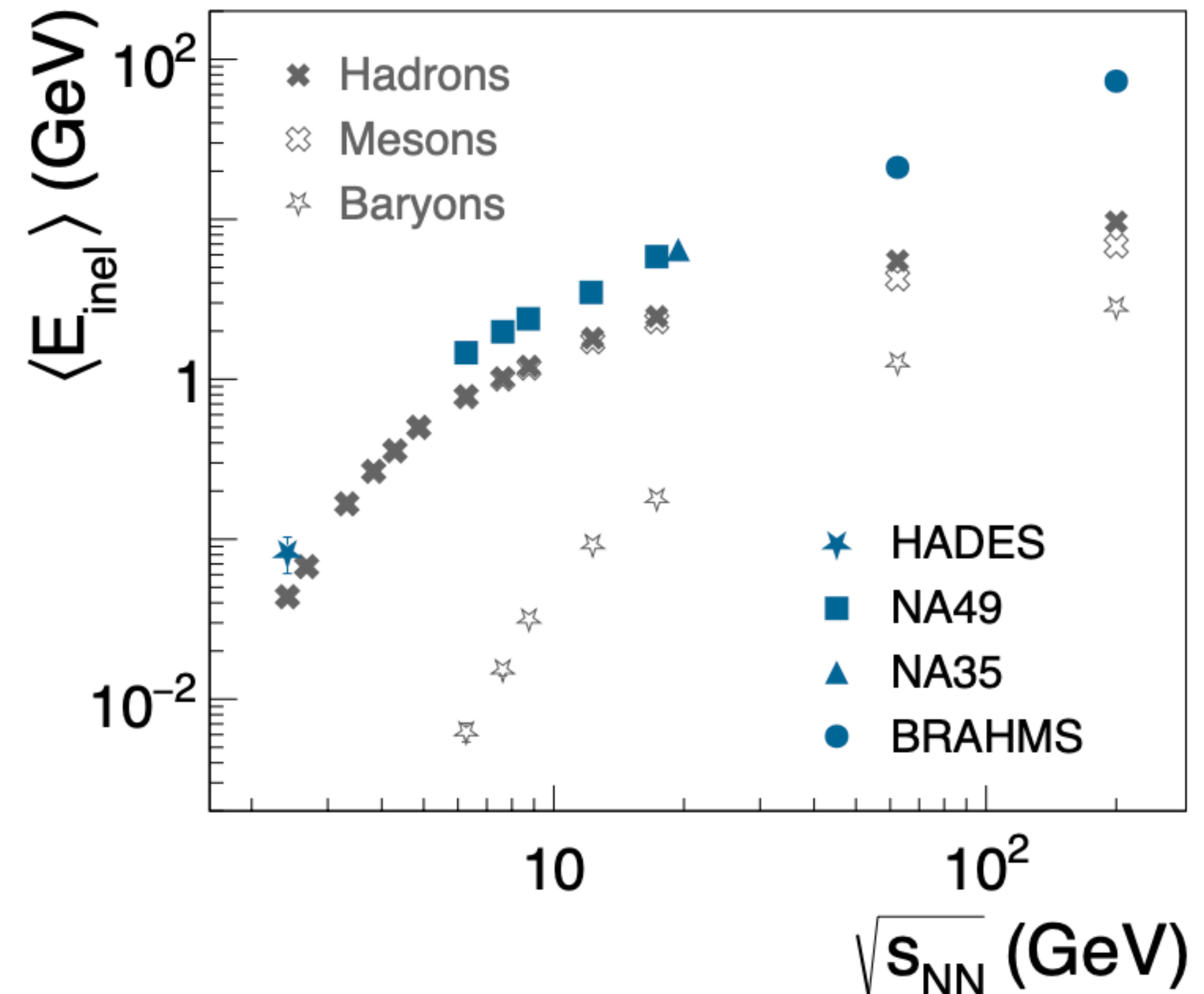
# Что меняется с ростом энергии столкновения?

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

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?

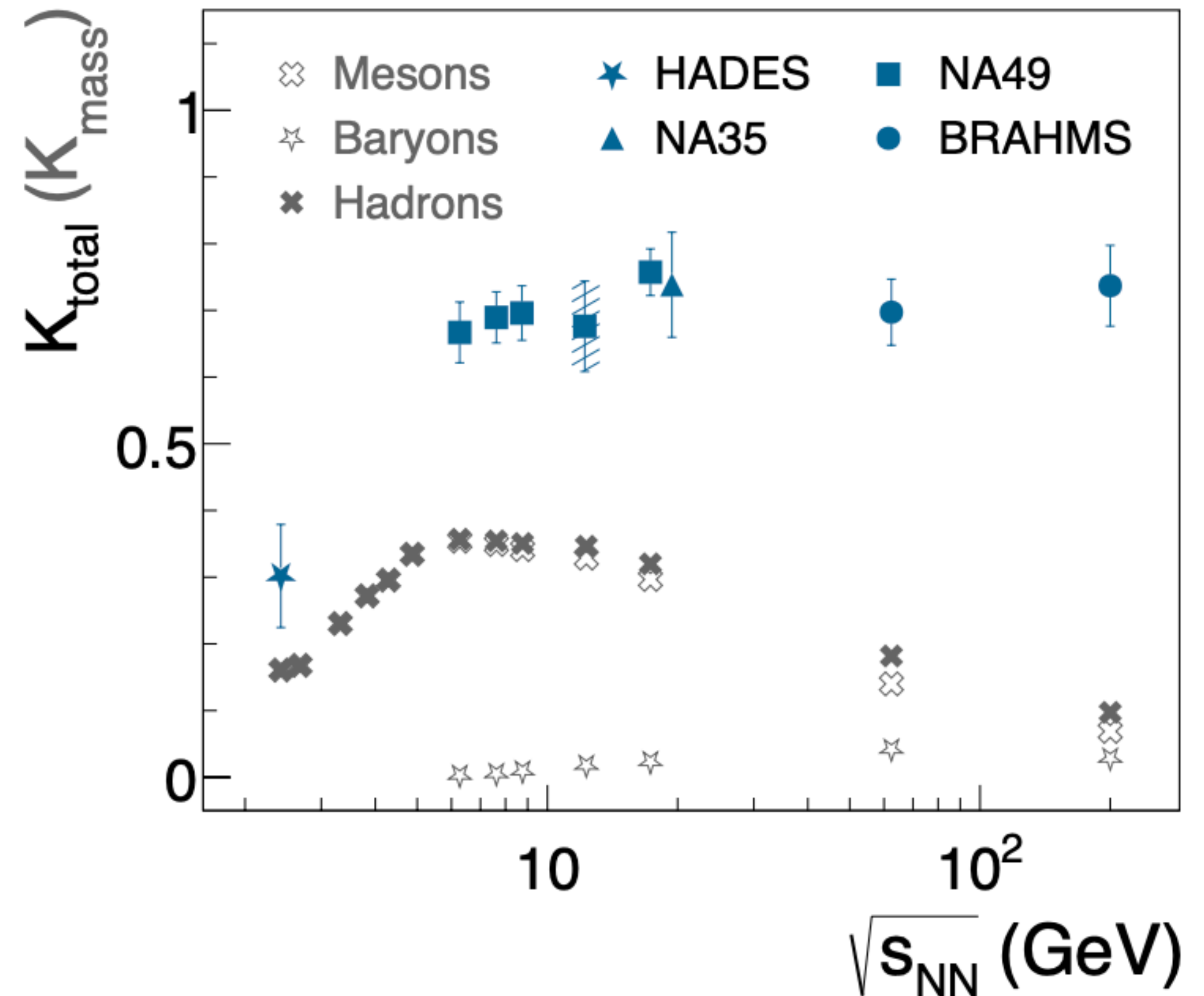
$$K_{total} = 2 \langle E_{inel} \rangle / (\sqrt{s_{NN}} - 2 m_p)$$

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

сначала быстро растет, потом насыщение

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

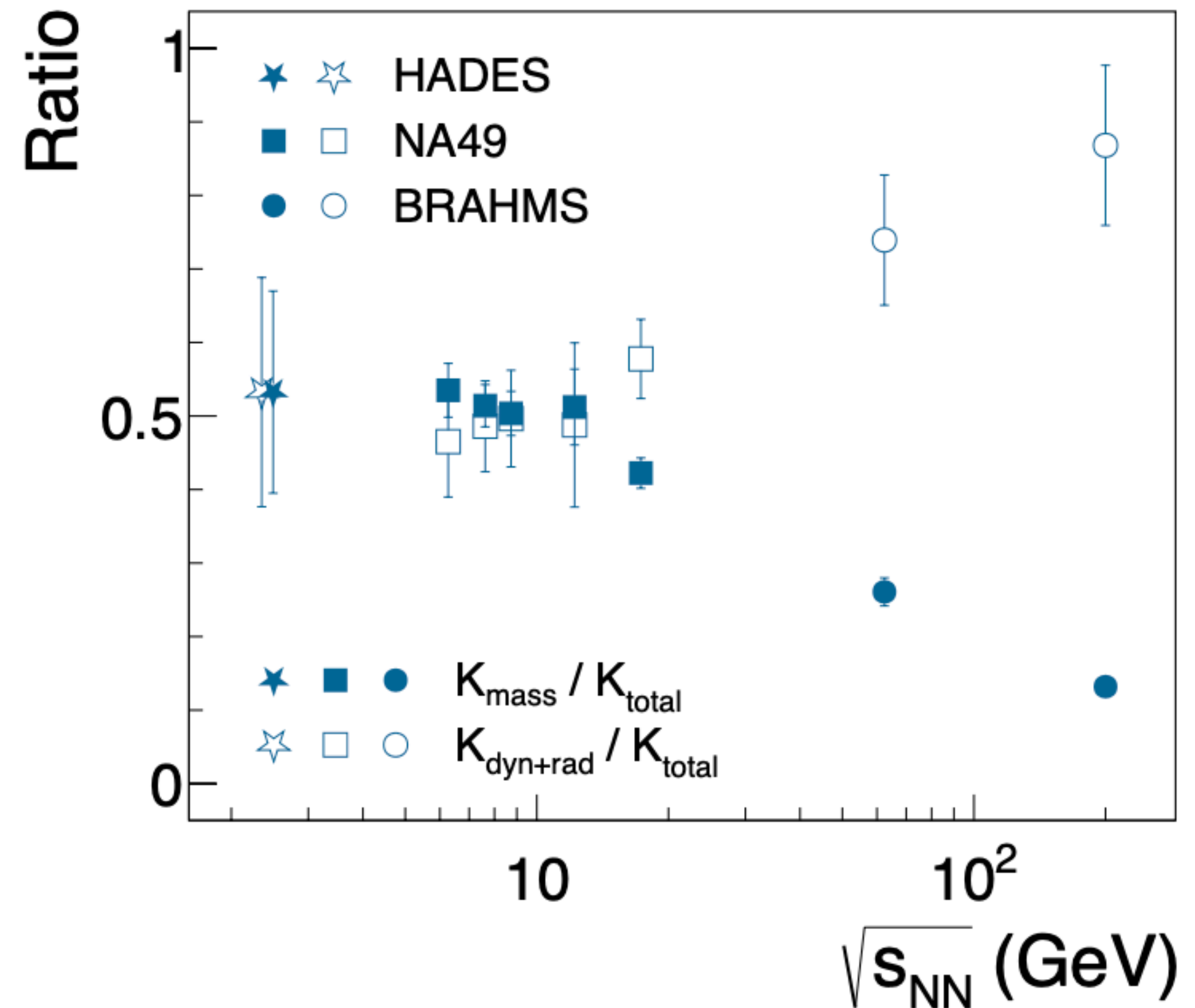
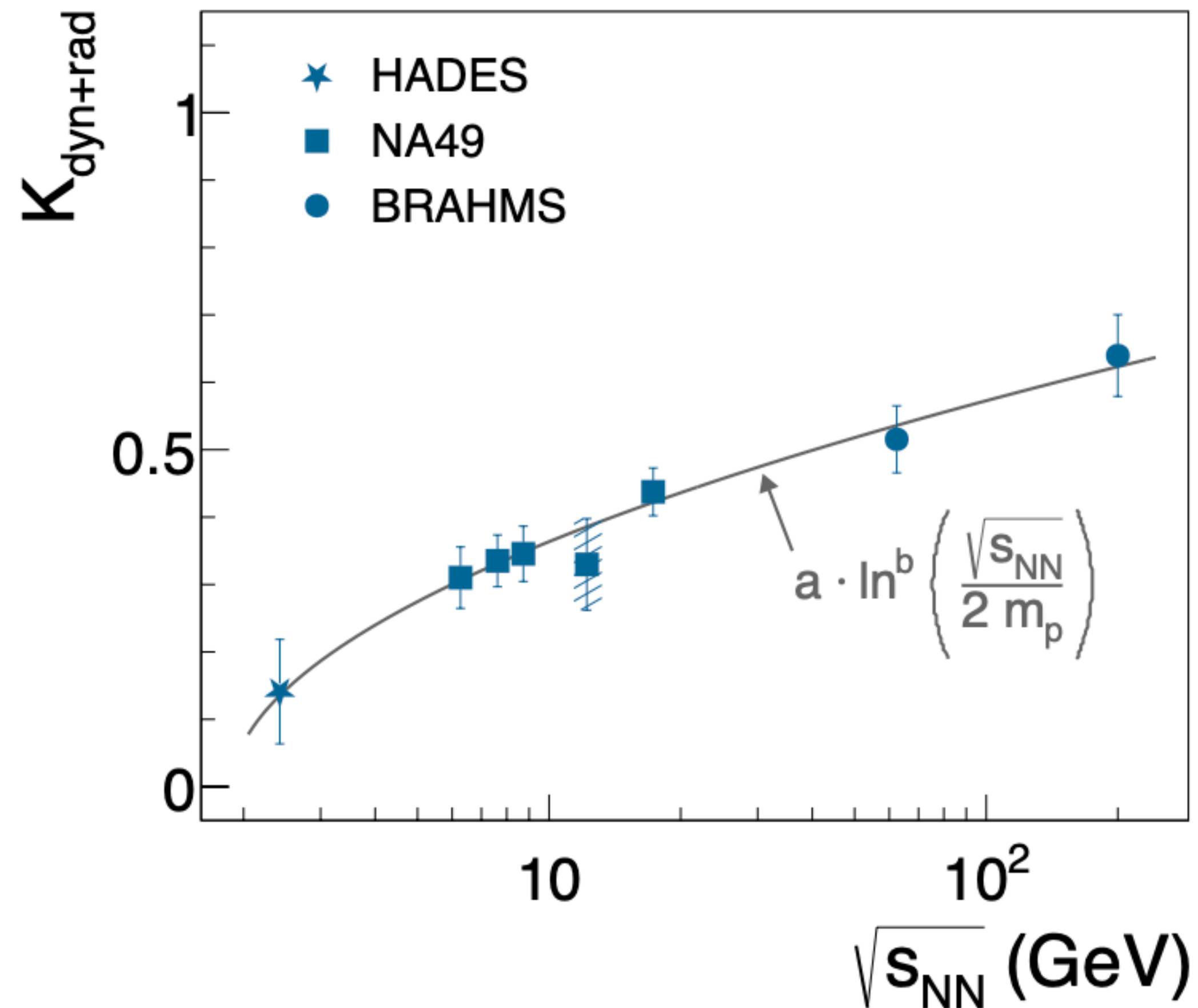
доля, которая идет чисто на генерацию масс





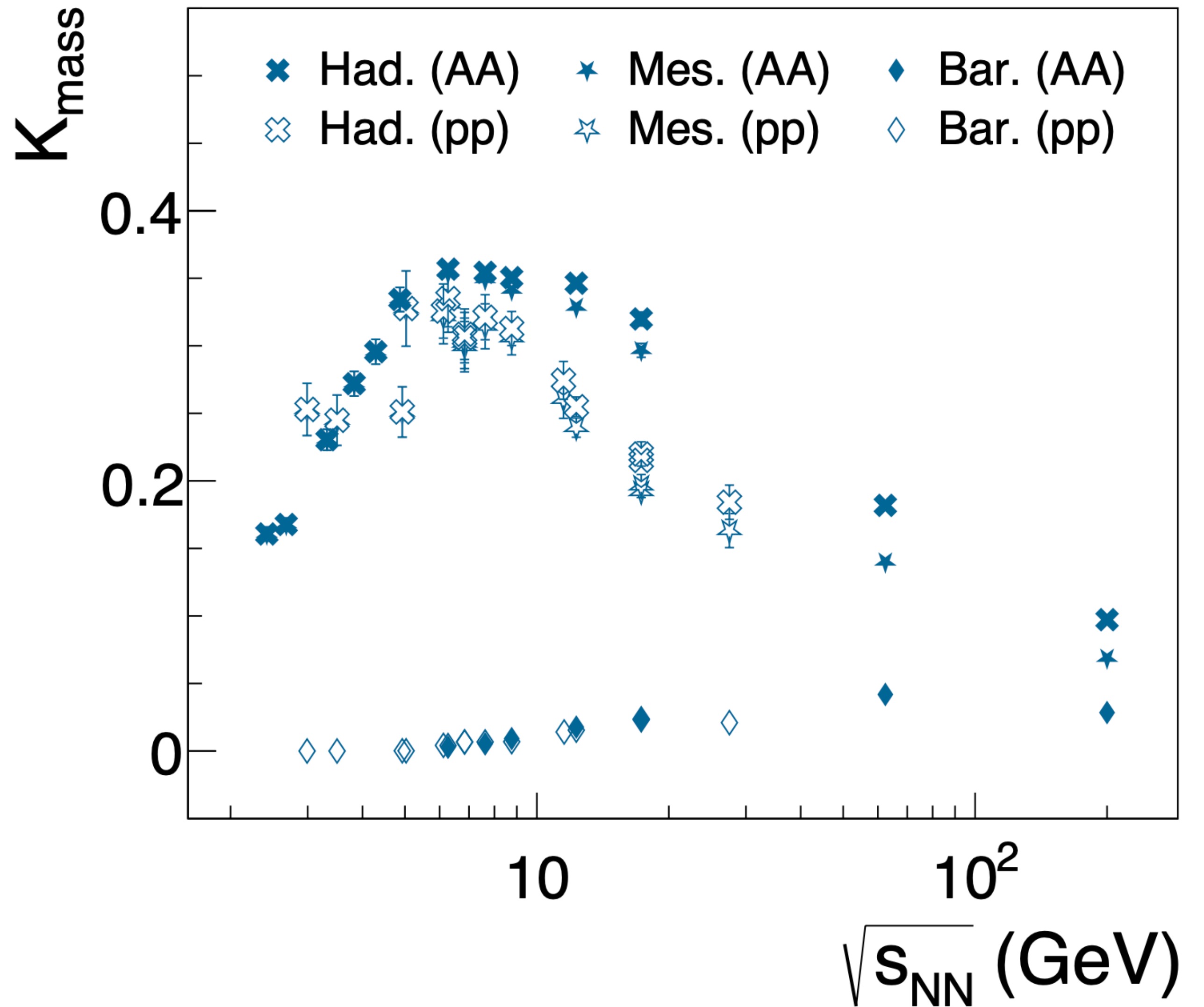
# Что меняется с ростом энергии столкновения?

$K_{total} - K_{mass}$     доля изначальной кинетической энергии,  
которая пошла на кинетическую энергию  
«НОВЫХ» частиц



# Сравнение с $p+r$

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

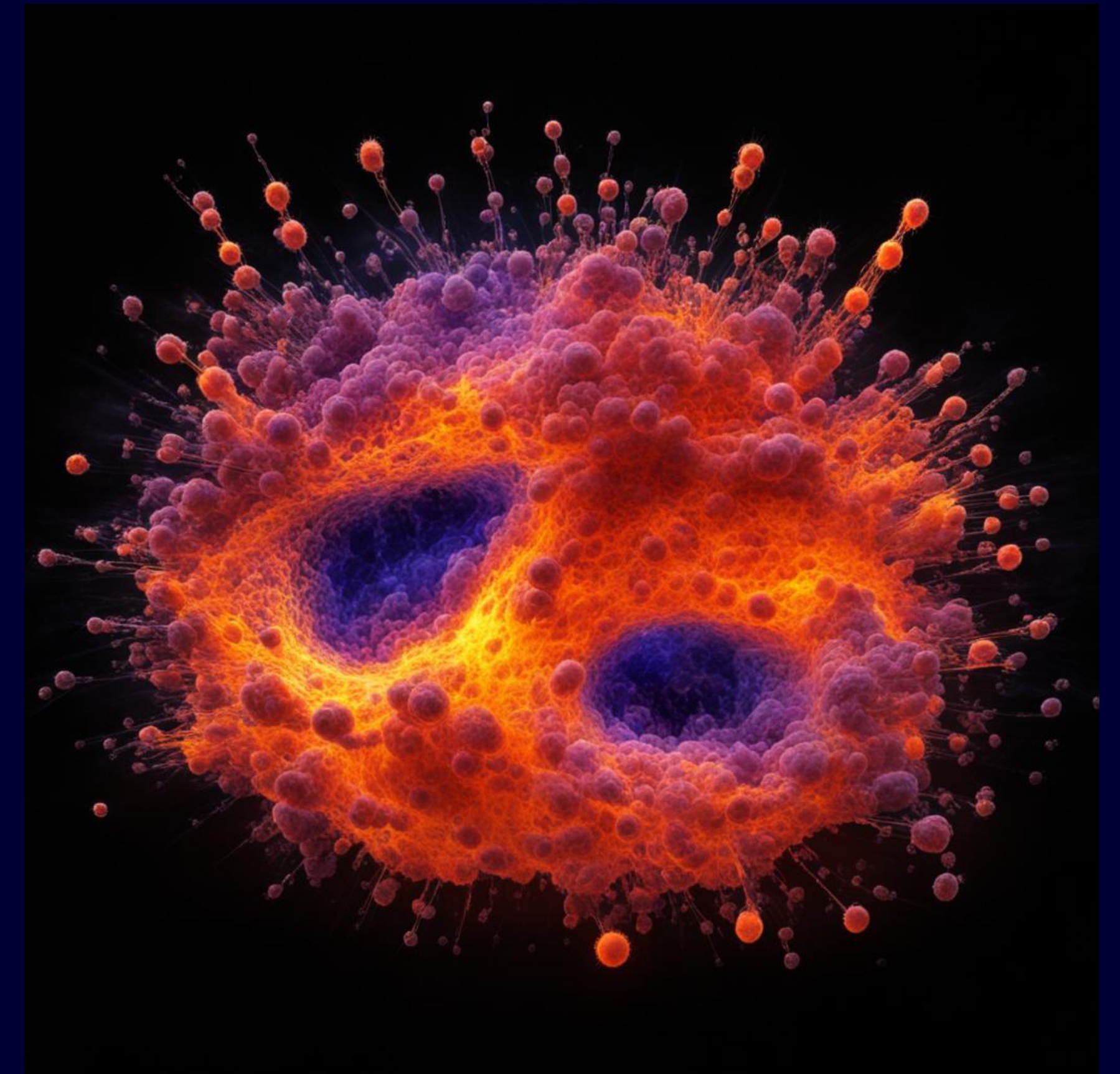


# Предложение к разбору

- 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»