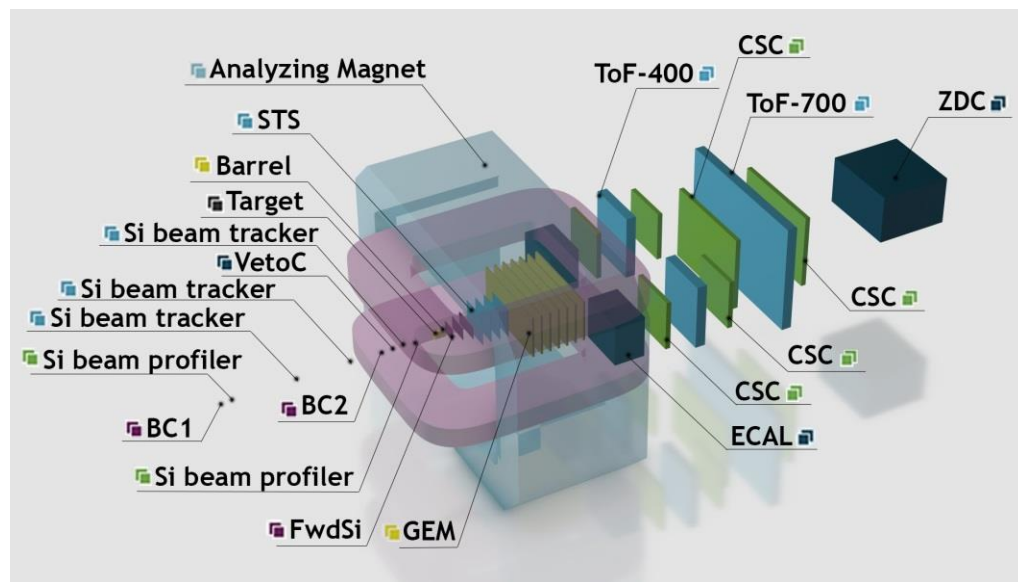
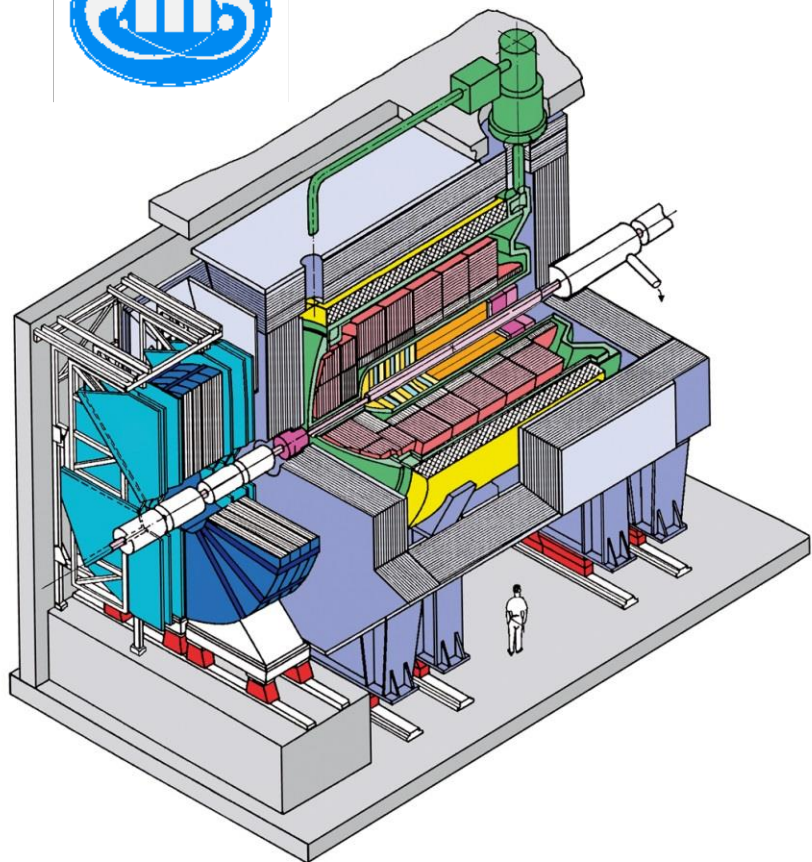
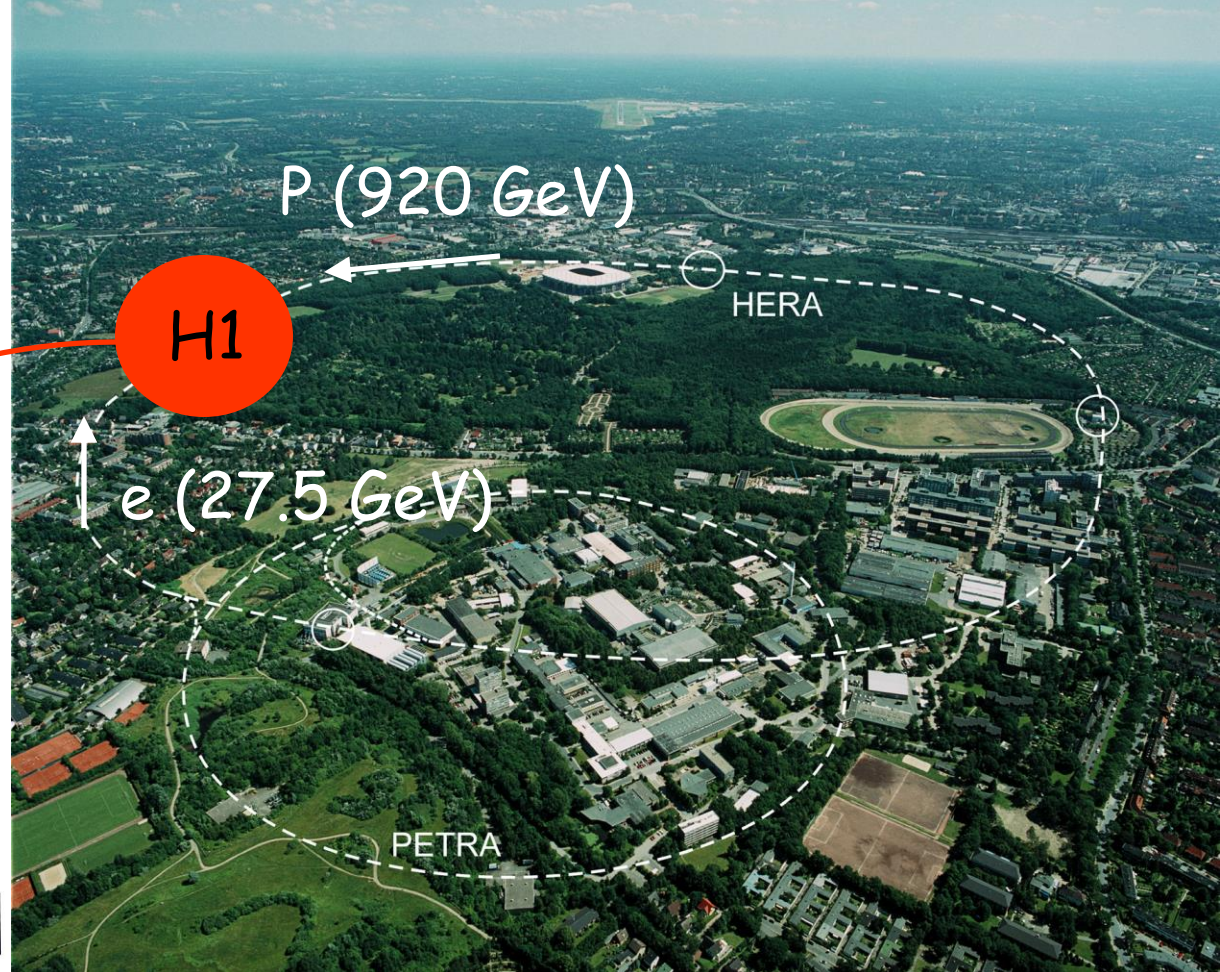
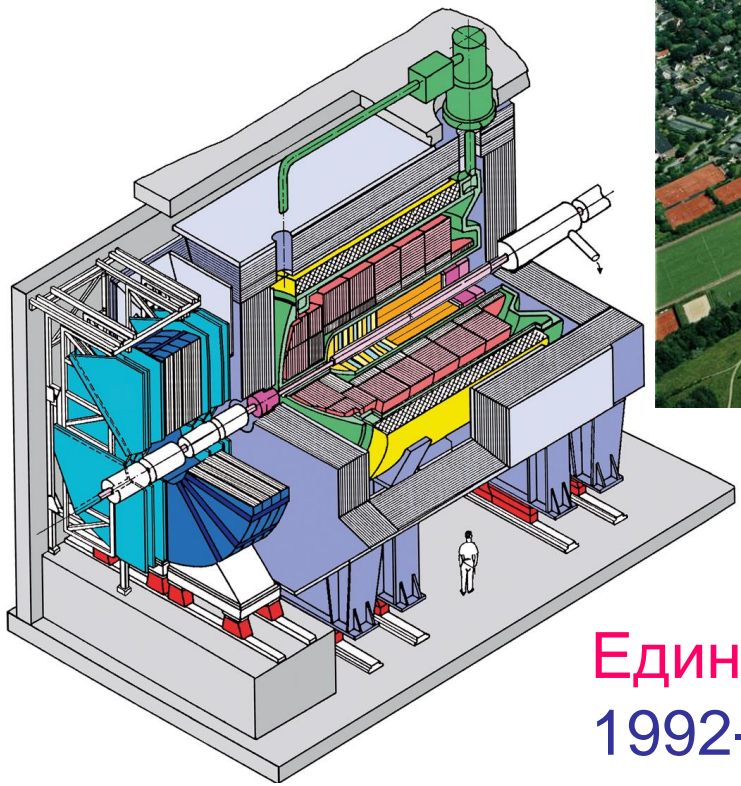


От физики на HERA к физике на BM@N

М.Капшин (ЛФВЭ)



Эксперимент H1



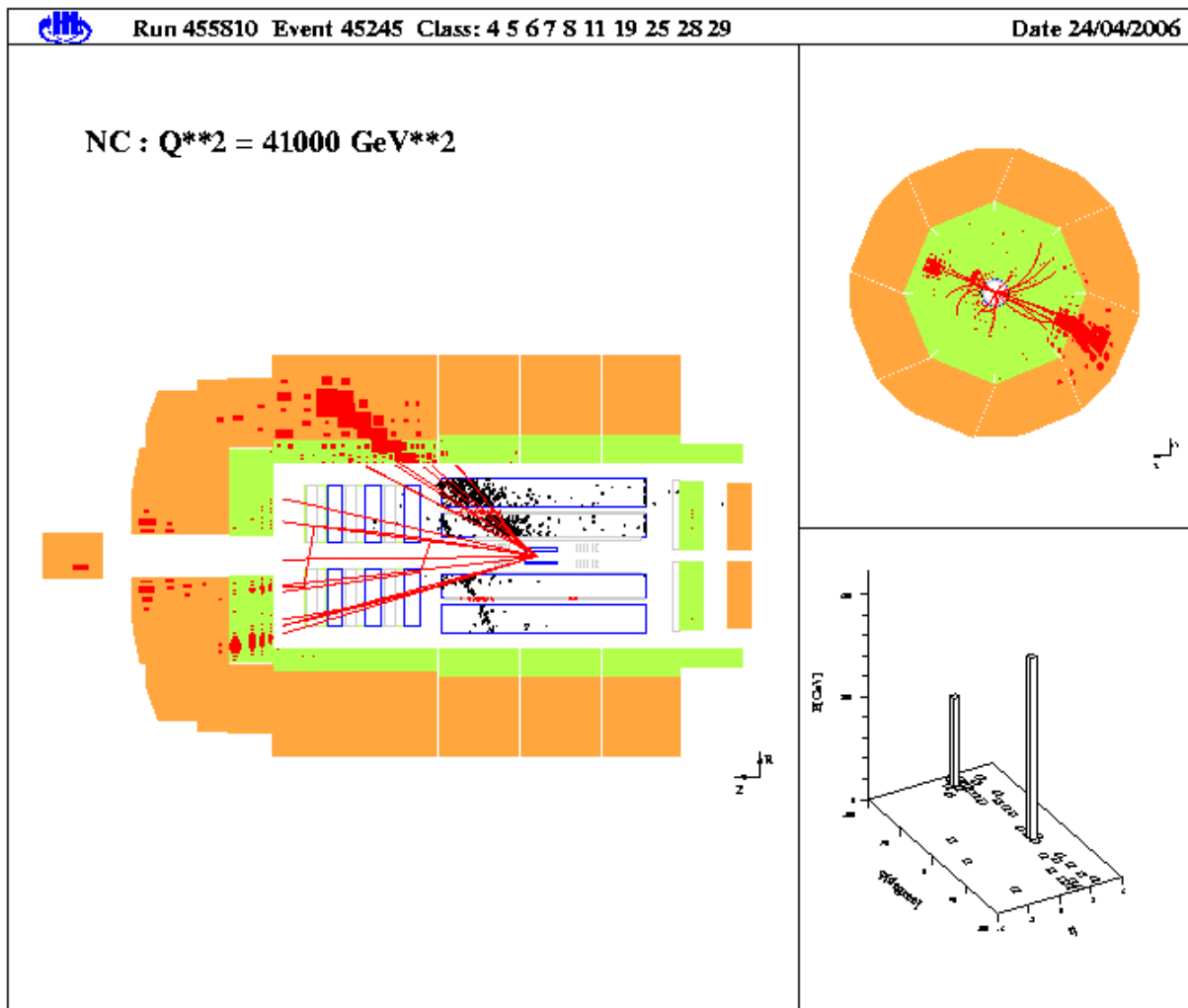
Коллайдер HERA: p (920 ГэВ) x e[±] (27.6 ГэВ), $\sqrt{s} = 320$ ГэВ

Единственный в мире ep коллайдер:
1992-2000 (HERA I), 2004-2007 (HERA II)

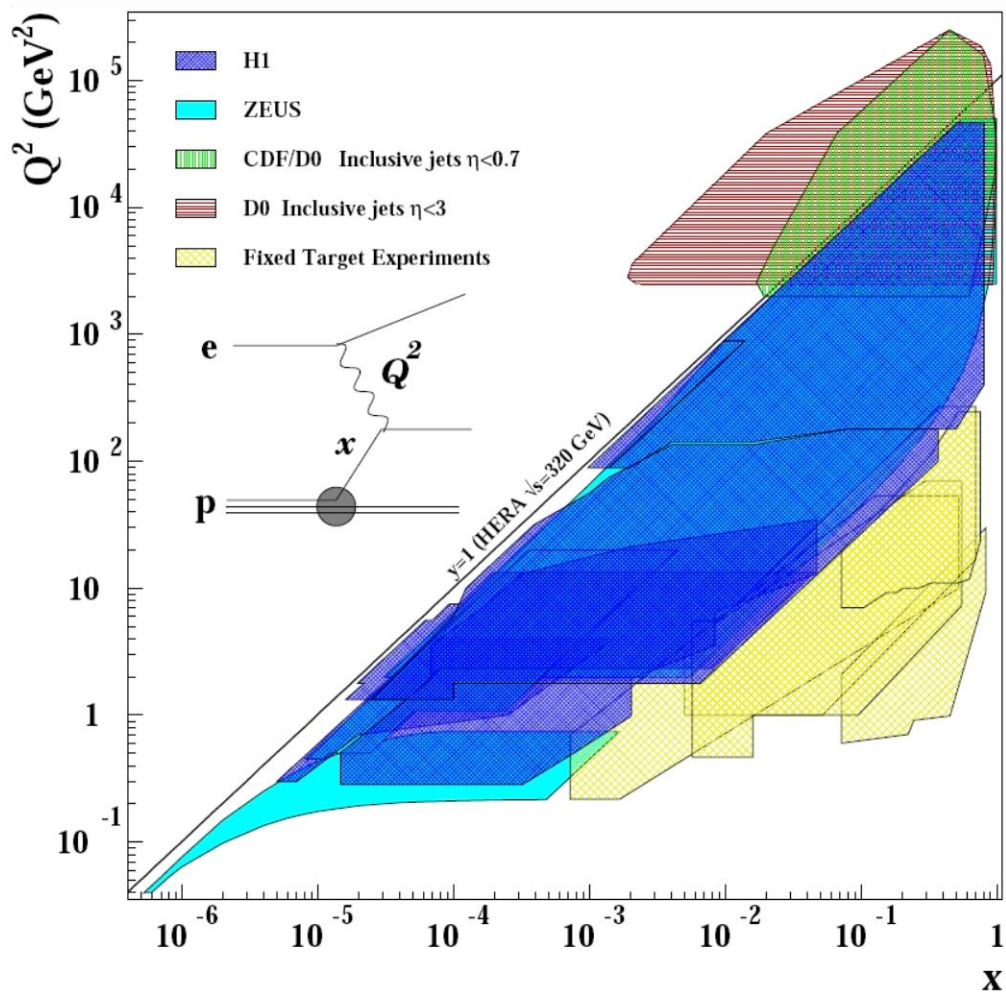


Эксперимент N1

Цель эксперимента: изучение структуры протона в процессах глубоко-неупругого ер рассеяния



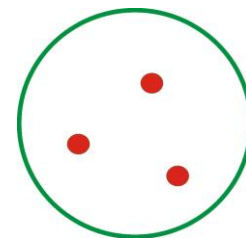
Кинематическая область HERA: x - Q^2



$$0 < Q^2 < 3 \cdot 10^4 \text{ ГэВ}^2$$

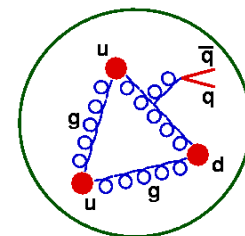
$$10^{-5} < x < 0.65$$

Большие $x > 10^{-2}$

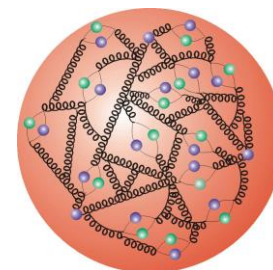


Промежуточные

$$10^{-3} < x < 10^{-2}$$

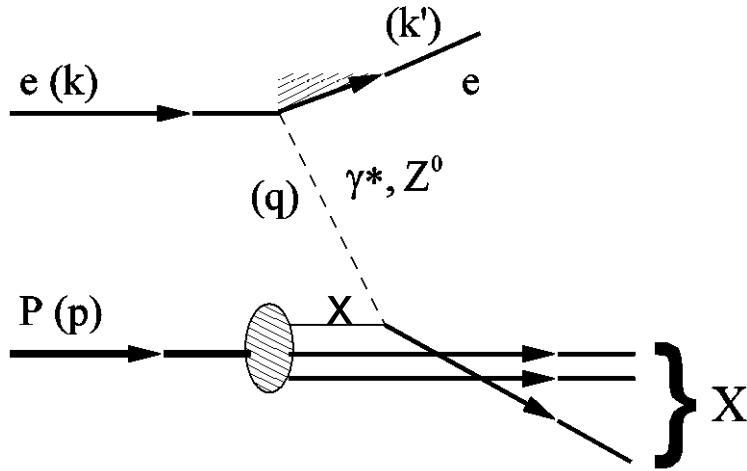


Малые $x < 10^{-3}$



Глубоко-неупругое ер рассеяние

$$e^\pm p \rightarrow e^\pm X$$



$Q^2 = -q^2$ – отрицательная величина от квадрата 4-х импульса виртуального фотона ($q^2 < 0$), ‘виртуальность’ фотона $Q^2 \sim 1/R^2$

обмен Z_0 бозоном подавлен $\sim 1/(Q^2 + M_Z^2)$
 \rightarrow дает вклад при $Q^2 \sim M_Z^2 \sim 10^4 \text{ ГэВ}^2$

$x = Q^2/(2p \cdot q)$ – масштабная переменная Бьеркена, доля продольного импульса протона, переданная рассеянному кварку $0 < x < 1$

$y = (p \cdot q)/(p \cdot k)$ – ‘неупругость’ реакции, доля энергии e^\pm , переданная виртуальному фотону $0 < y < 1$

$W^2 = (q+p)^2$ – квадрат энергии в системе центра масс реакции $\gamma^* p$

$s = (k+p)^2$ – квадрат энергии в системе центра масс $e^\pm p$

$$Q^2 \approx s \cdot x \cdot y$$

$$x \approx Q^2 / (Q^2 + W^2)$$

Structure functions in NC and CC processes

$$\frac{d\sigma_{NC}^{\pm}}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{x} \left[\frac{1}{Q^2} \right]^2 [Y_+ \tilde{F}_2 \mp Y_- x \tilde{F}_3 - y^2 \tilde{F}_L]$$

$$\frac{d\sigma_{CC}^{\pm}}{dx dQ^2} = \frac{G_F^2}{4\pi x} \left[\frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right]^2 [Y_+ \tilde{W}_2^{\pm} \mp Y_- x \tilde{W}_3^{\pm} - y^2 \tilde{W}_L^{\pm}]$$

$$Y_{\pm} = 1 \pm (1-y)^2$$

$$\tilde{F}_2 \propto \sum (xq_i + x\bar{q}_i)$$

Dominant contribution

$$x\tilde{F}_3 \propto \sum (xq_i - x\bar{q}_i)$$

Only sensitive at high $Q^2 \sim M_Z^2$

$$\tilde{F}_L \propto \alpha_s \cdot xg(x, Q^2)$$

Only sensitive at low Q^2 and high y

The NC reduced cross section defined as:

$$\tilde{\sigma}_{NC}^{\pm} = \frac{Q^2 x}{2\alpha\pi^2} \frac{1}{Y_+} \frac{d^2\sigma^{\pm}}{dx dQ^2}$$

$$\tilde{\sigma}_{NC}^{\pm} \sim \tilde{F}_2 \mp \frac{Y_-}{Y_+} x\tilde{F}_3$$

The CC reduced cross section defined as:

$$\sigma_{CC}^{\pm} = \frac{2\pi x}{G_F^2} \left[\frac{M_W^2 + Q^2}{M_W^2} \right]^2 \frac{d\sigma_{CC}^{\pm}}{dx dQ^2}$$

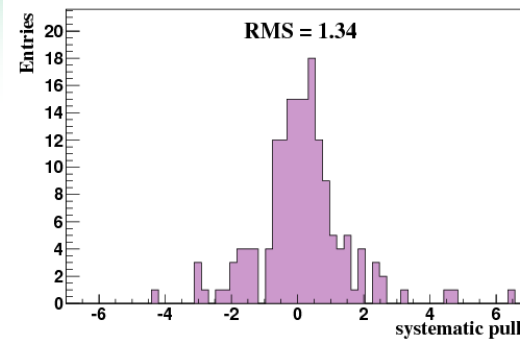
$$\frac{d\sigma_{CC}^{\pm}}{dx dQ^2} = \frac{1}{2} [Y_+ W_2^{\pm} \mp Y_- x W_3^{\pm} - y^2 W_L^{\pm}]$$

similarly for pure weak CC analogues:

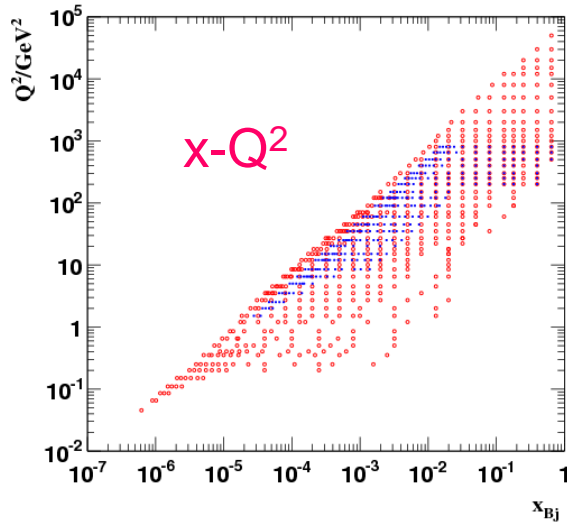
$$W_2^{\pm}, xW_3^{\pm} \text{ and } W_L^{\pm}$$

NC measurements at HERA

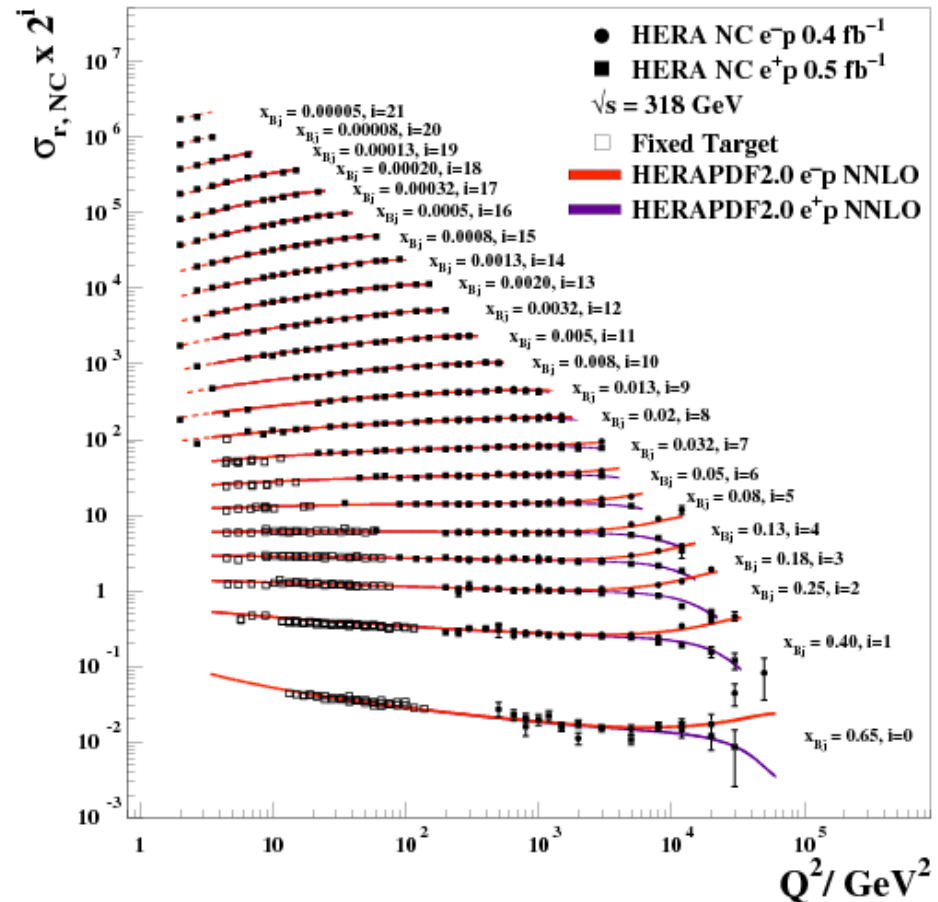
H1 and ZEUS



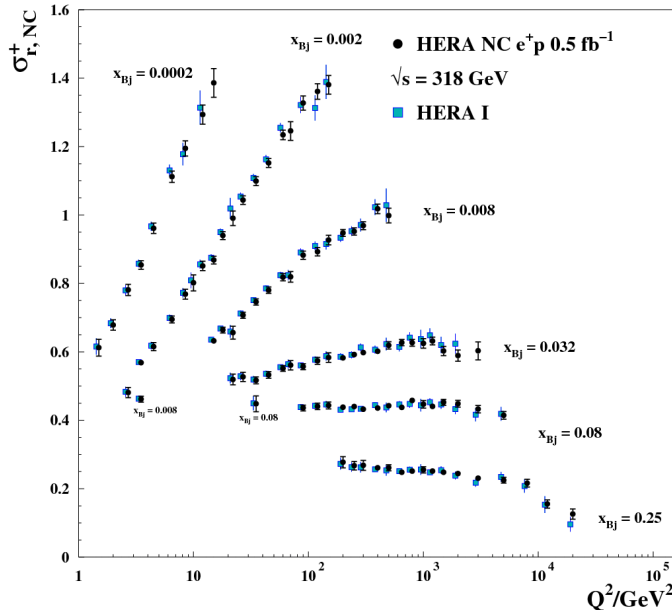
H1 and ZEUS



H1 and ZEUS

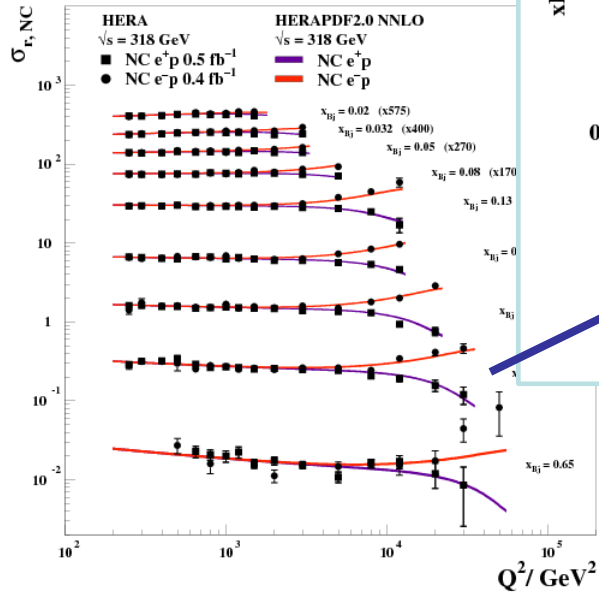


H1 and ZEUS

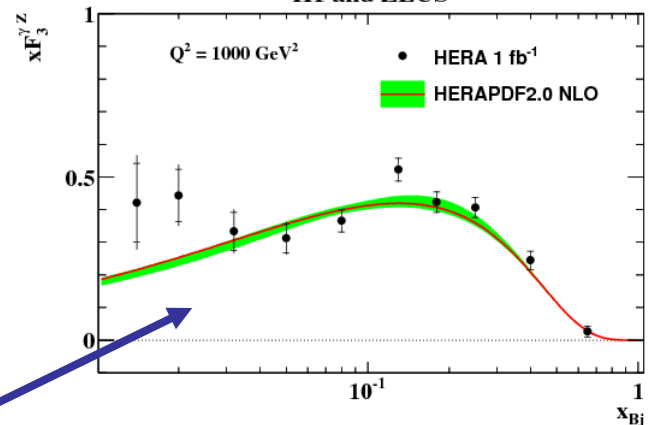


xF_3 , F_L and CC measurements and HERA PDF

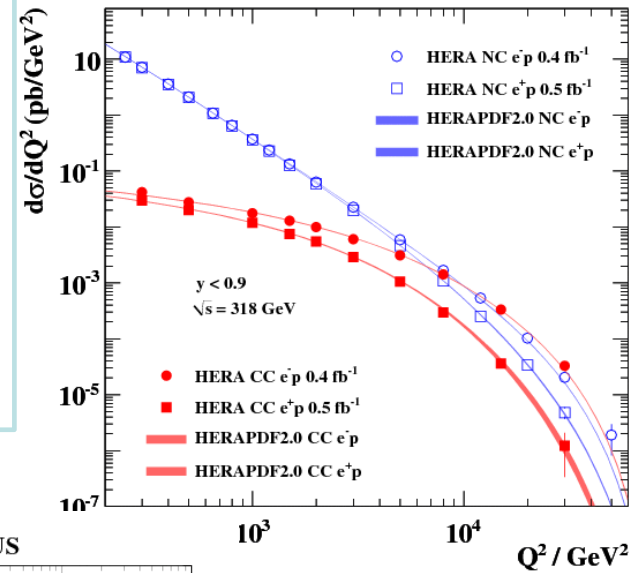
H1 and ZEUS



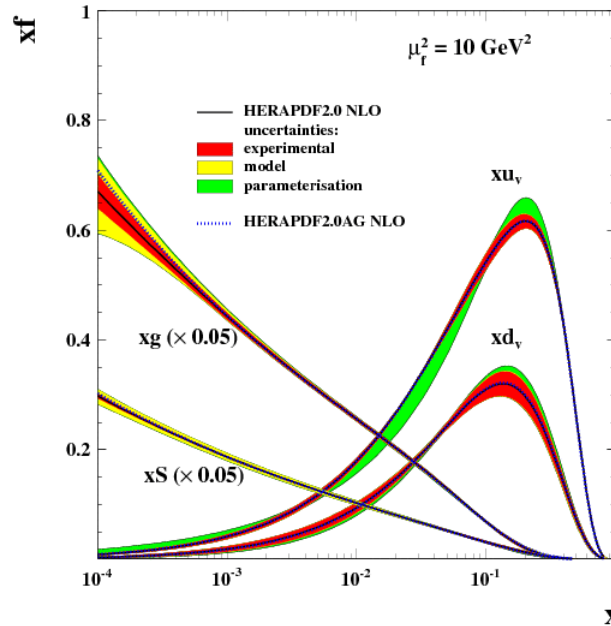
H1 and ZEUS



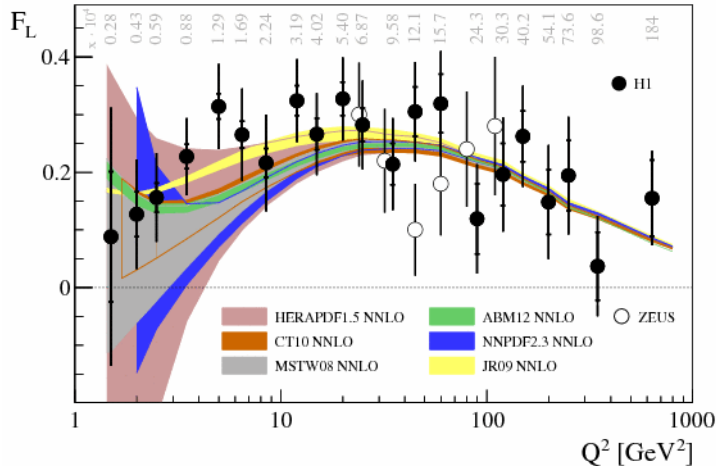
H1 and ZEUS



H1 and ZEUS



H1 Collaboration



HERA PDF2.0 NLO

Вклад группы ОИЯИ в Н1

ЛФЧ: организация совещания коллаборации Н1 в Дубне в 1997

Спектрометр лидирующих протонов FPS, Plug детектор, анализ экспериментальных данных:

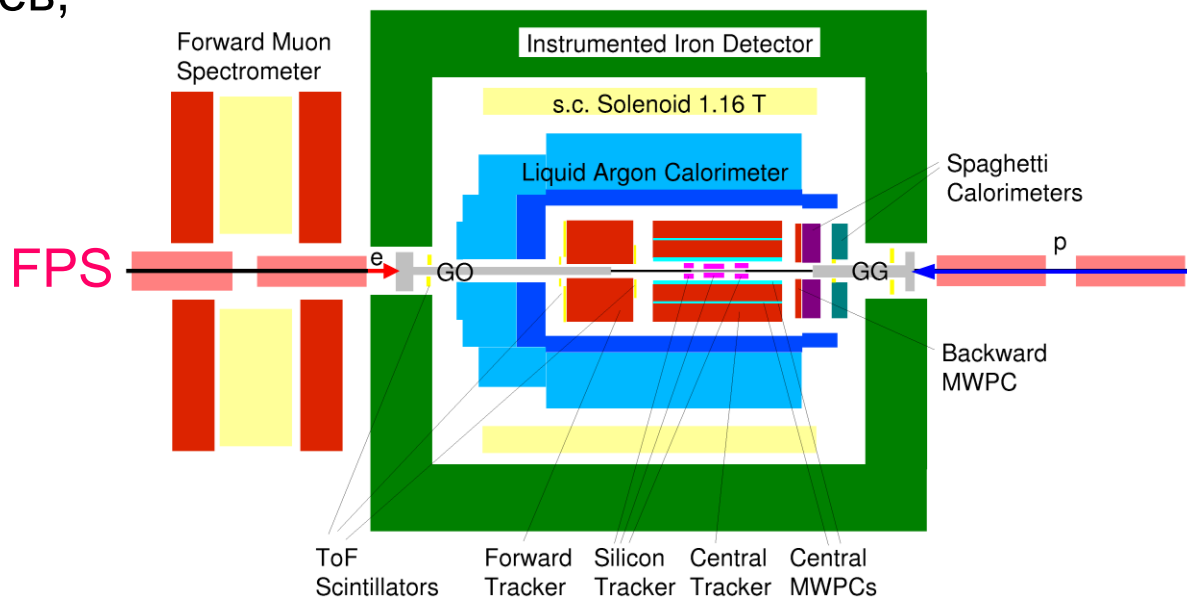
М.Капишин, В.Спасков, Ан.Морозов, Д.Никитин, В.Пальчик (ЛИТ)

Также принимали участие: Ю.К.Потребеников, О.Гаврищук, Ан.Аствацатуров, А.Кутов, В.Панасик

Разработка и создание задней пропорциональной камеры ВРС:

А.Вишневский, С.Васильев,
Ал.Маканькин

По физике на FPS
защитили диссертации:
1 докторскую,
1 кандидатскую, 2 PhD



Кто нас поддерживал в H1

Prof. John Dainton: H1
Spokesperson in 1997-1999



Prof. Wulfrin Bartel:
leader of FPS project
in 1995-2000



Prof. Paul Newman:
convener of H1
Diffractive group



Dr Karl-Heinz Hiller,
FPS expert, DESY IfH
Zeuthen

H1 и HERA - уже история

H1 Control room во время
набора данных 08.06.2005



В.Спасков около FPS в кольце HERA



Последнее
оперативное
совещание в H1
North Hall, июнь
2007

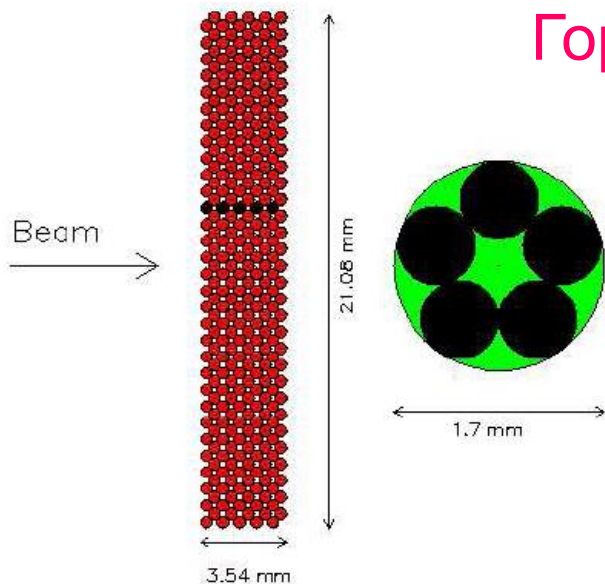
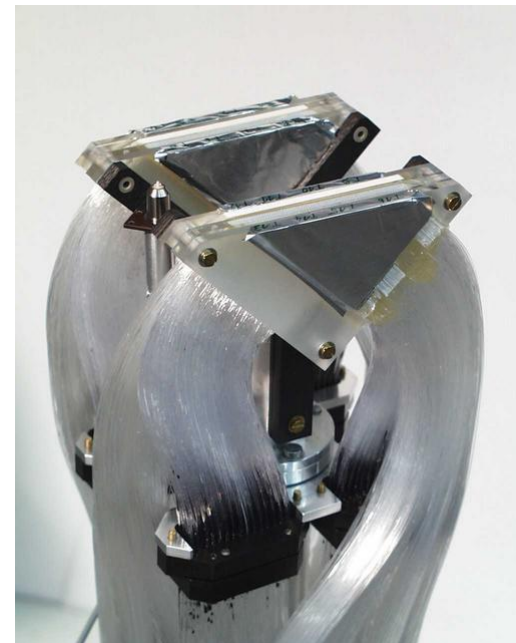




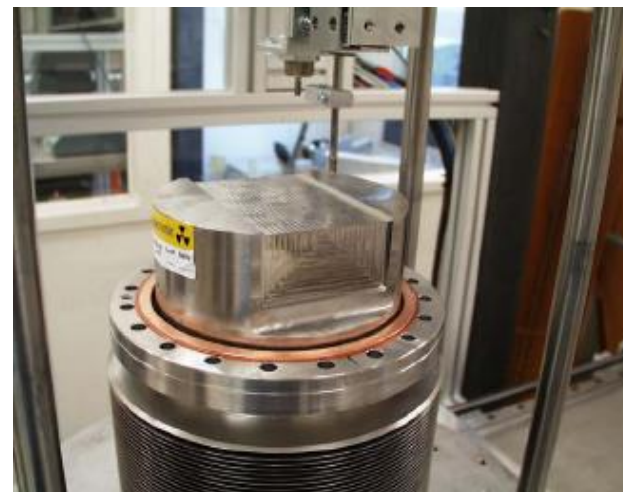
Спектрометр лидирующих протонов FPS

Горизонтальная станция

- 2 плоскости U/V
- 4 тригг. пластины
- фибры $d = 0.48\text{mm}$
- 5 фиб. слоев \rightarrow 1 канал ПЧФУ
- четыре 64-кан. ПЧФУ на станцию

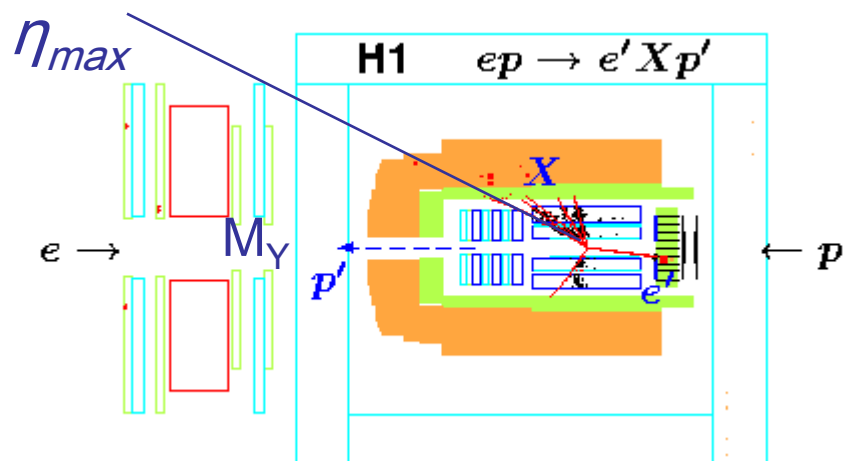


Входное окно Roman Pot \rightarrow
толщина 300 мкм



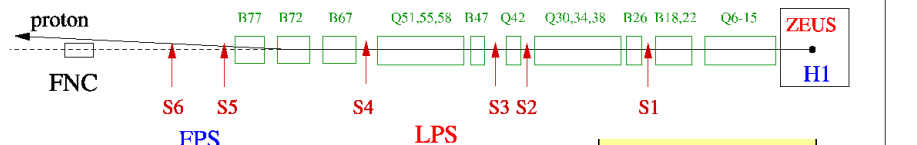
Дифракция в экспериментах HERA

Большой интервал по быстрой (Large rapidity gap, LRG) между лидирующим p' и системой X



- ❑ большая статистика, данные интегрированы по $|t| < 1 \text{ ГэВ}^2$
- ❑ вклад процессов диссоциации протона $\sim 20\%$
- ❑ систематические погрешности, так как протон не измеряется

Спектрометр лидирующих протонов (Forward Proton Spectrometer FPS)



$$x_{IP} = 1 - \frac{E'_p}{E_p}$$

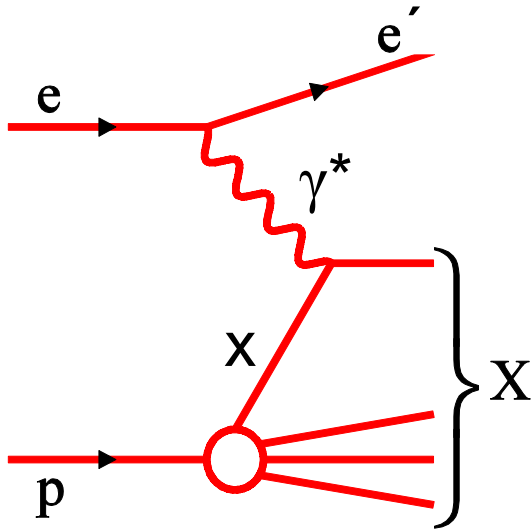
- ❑ измерение x_{IP} и t
- ❑ выделение процессов без диссоциации протона
- ❑ более широкая область по x_{IP} ($IP+IR$)
- ❑ малый аксептанс детекторов
- ❑ систематические погрешности из-за магнитной оптики HERA

➔ Методы LRG и FPS имеют разные систематические погрешности

Дифракция в глубоконеупругом ер рассеянии

HERA: ~10% процессов ГНР при малых x являются дифракционными
 → Исследование структуры дифракционного вакуумного обмена посредством виртуального фотона в рамках КХД

глубоконеупругое
 рассеяние



→ структура протона

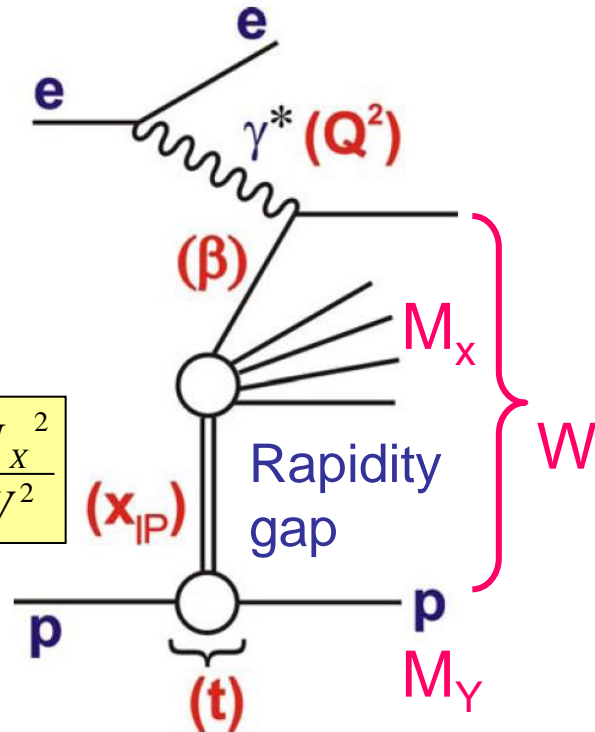
Дифракция в глубоконеупругом рассеянии

Доля импульса IP
 переданная
 рассеянному кварку

$$\beta = \frac{x}{x_{IP}} \approx \frac{Q^2}{Q^2 + M_X^2}$$

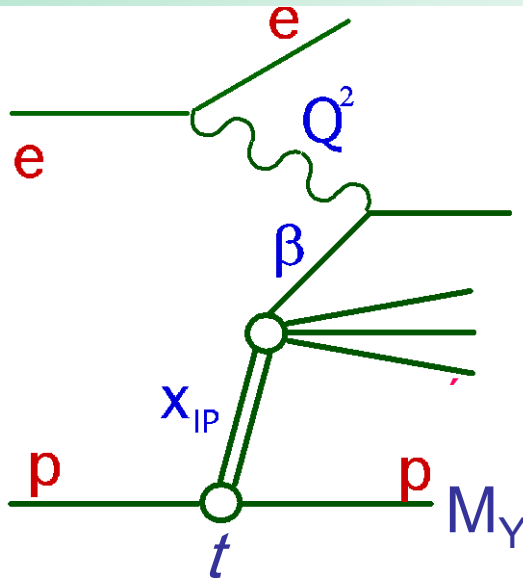
$$x_{IP} = \frac{q \cdot (p - p')}{q \cdot p} \approx \frac{Q^2 + M_X^2}{Q^2 + W^2}$$

Доля импульса протона
 переданная IP



Квадрат переданного 4-х
 импульса $t = (p-p')^2$

Анализ экспериментальных данных и измерение сечения дифракционного глубоконеупругого ep рассеяния



$$\frac{d^4\sigma}{d\beta dQ^2 dx_{IP} dt} = \frac{4\pi\alpha^2}{\beta Q^4} \left(1 - y + \frac{y^2}{2}\right) \sigma_r^{D(4)}(\beta, Q^2, x_{IP}, t)$$

Соотношение между F_2^D и F_L^D :

$$\sigma_r^{D(4)} = F_2^{D(4)} - \frac{y^2}{2(1 - y + y^2/2)} F_L^{D(4)}$$

$$\sigma_r^D \approx F_2^D \text{ при малых } y$$

$$\sigma_r^{D(3)} = \int \sigma_r^{D(4)} dt$$

→ интегрирование по $|t| < 1 \text{ ГэВ}^2$ для сравнения результатов FPS с LRG и предсказаниями DPDF

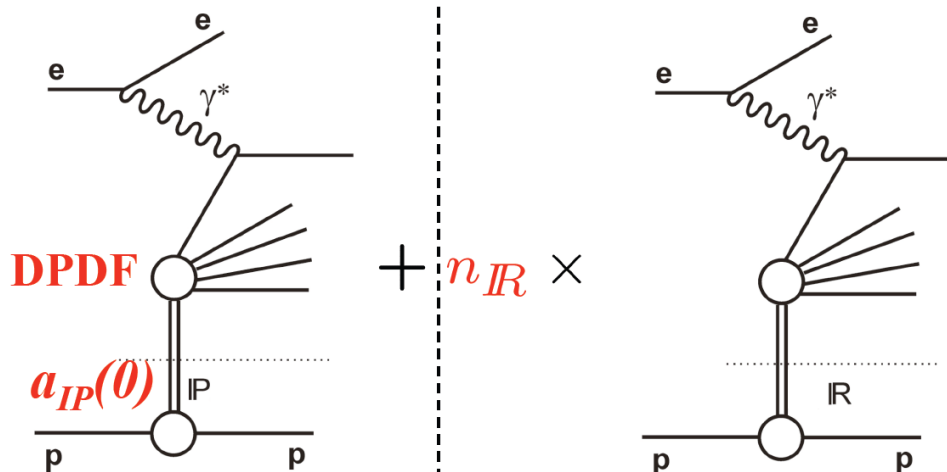
- $F_2 \rightarrow$ распределение кварков в протоне
- $dF_2/d\ln Q^2$ (нарушение масштабной инвариантности) \rightarrow распределение глюонов в протоне

- $F_L \rightarrow$ распределение глюонов в протоне



NLO DGLAP фит данных $F_2^{D(3)}$ (LRG)

$$F_2^{D(3)}(\beta, Q^2, x_{IP}) = f_{IP}(x_{IP}) \cdot F_2^{IP}(\beta, Q^2) + n_{IR} \cdot f_{IR}(x_{IP}) \cdot F_2^{IR}(\beta, Q^2)$$



IP component:

- Fit $\alpha_{IP}(0)$ (x_{IP} dependence).
- Simultaneously, fit 5 parameters of DPDFs (β and Q^2 dependences) using NLO QCD.

IR component:

- Fit n_{IR} one parameter for normalisation.
- All flux parameters taken from previous H1 data. PDFs taken from Owens-pion

➔ Параметризация партонных распределений на начальной шкале $Q_0^2 \sim 2$ ГэВ² и NLO DGLAP эволюция для описания данных по $F_2^{IP}(\beta, Q^2)$

DPDF синглет кварков

$$z\Sigma(z, Q_0^2) = A_q z^{B_q} (1-z)^{C_q}$$

DPDF глюона: Fit A

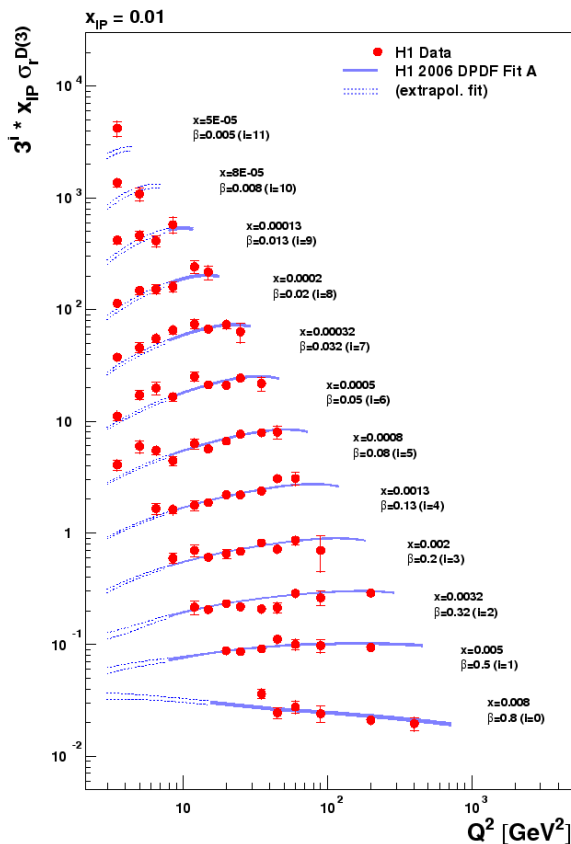
$$zg(z, Q_0^2) = A_g (1-z)^{C_g}$$

Fit B

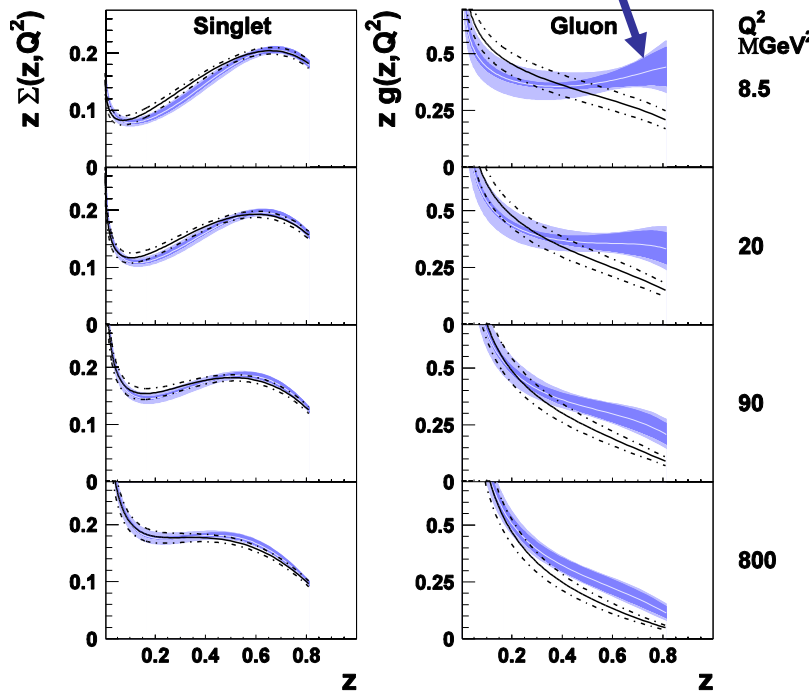
$$zg(z, Q_0^2) = A_g$$



F_2^D и дифракционные партонные распределения



- данные по F_2^D не чувствительны к распределению **глюонов** при больших долях импульса IP



H1 2006 DPDF Fit A (exp. error) (shaded blue)
 H1 2006 DPDF Fit B (exp.+theor. error) (solid and dotted lines)

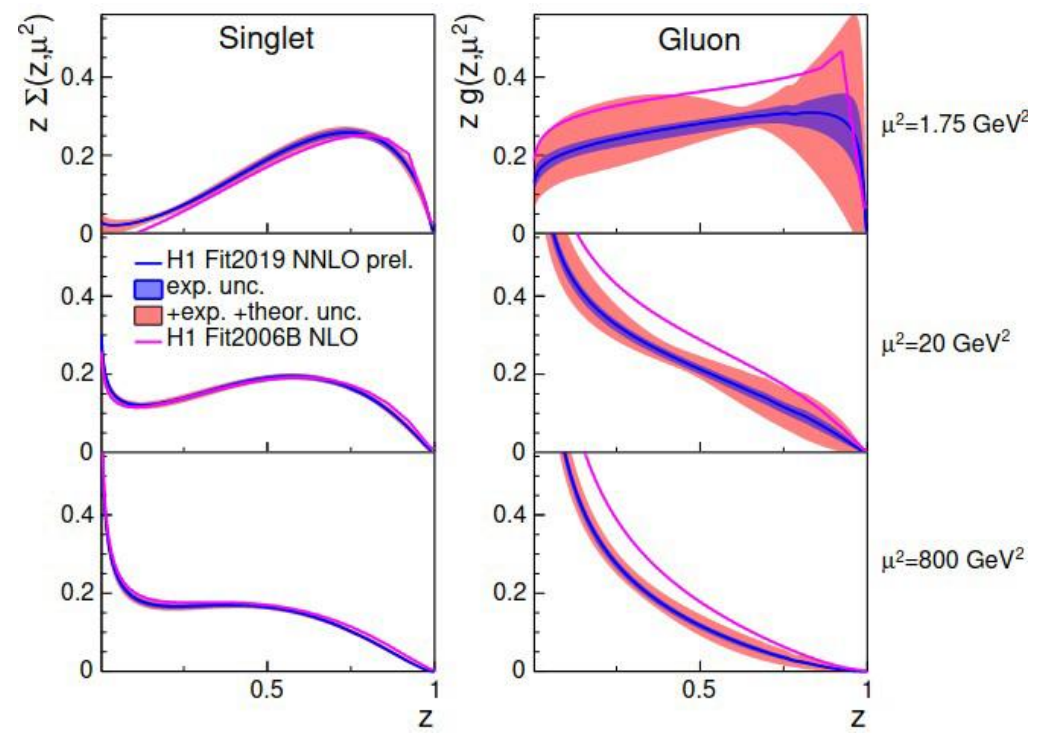
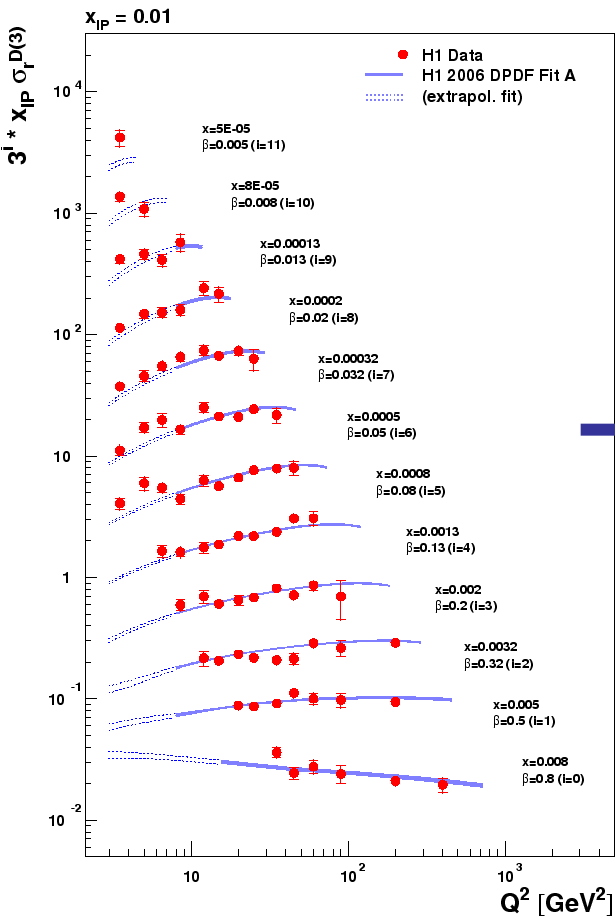
➤ вклад глюонов в дифракционный обмен составляет ~70%

- NLO DGLAP фит данных по F_2^D определяет дифракционные распределения **синглета кварков**, а также **глюонов** при малых долях импульса IP



σ_r^D и σ_{jj}^D : дифракционные функции распределения партонов

- Дифракционные функции распределения синглета **кварков** и **глюона** из комбинированного DGLAP фита данных по F_2^D и сечениям дифракционного образования струй адронов



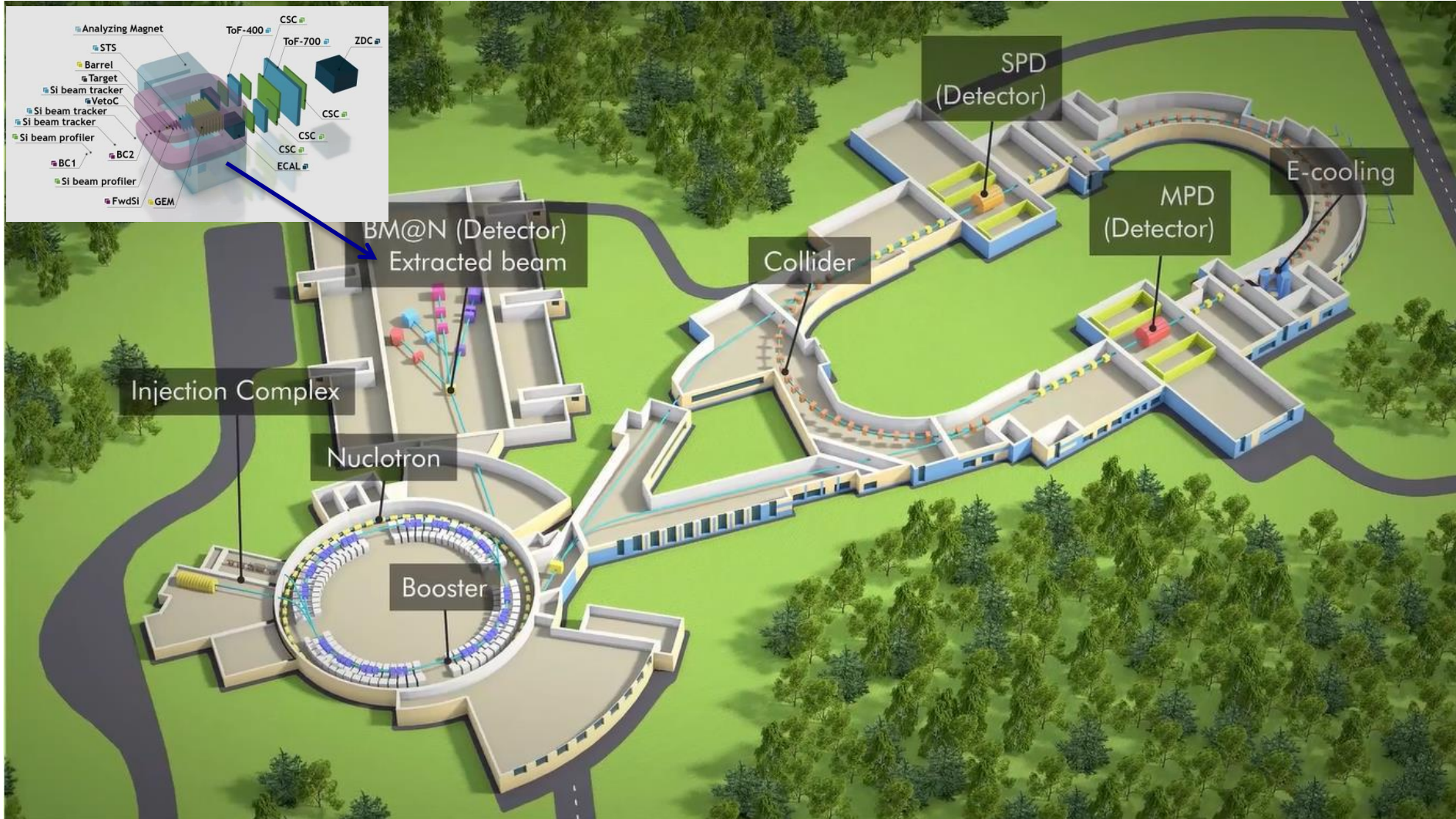
Diffractive jet data constrain the diffractive gluon PDF @NNLO 2019



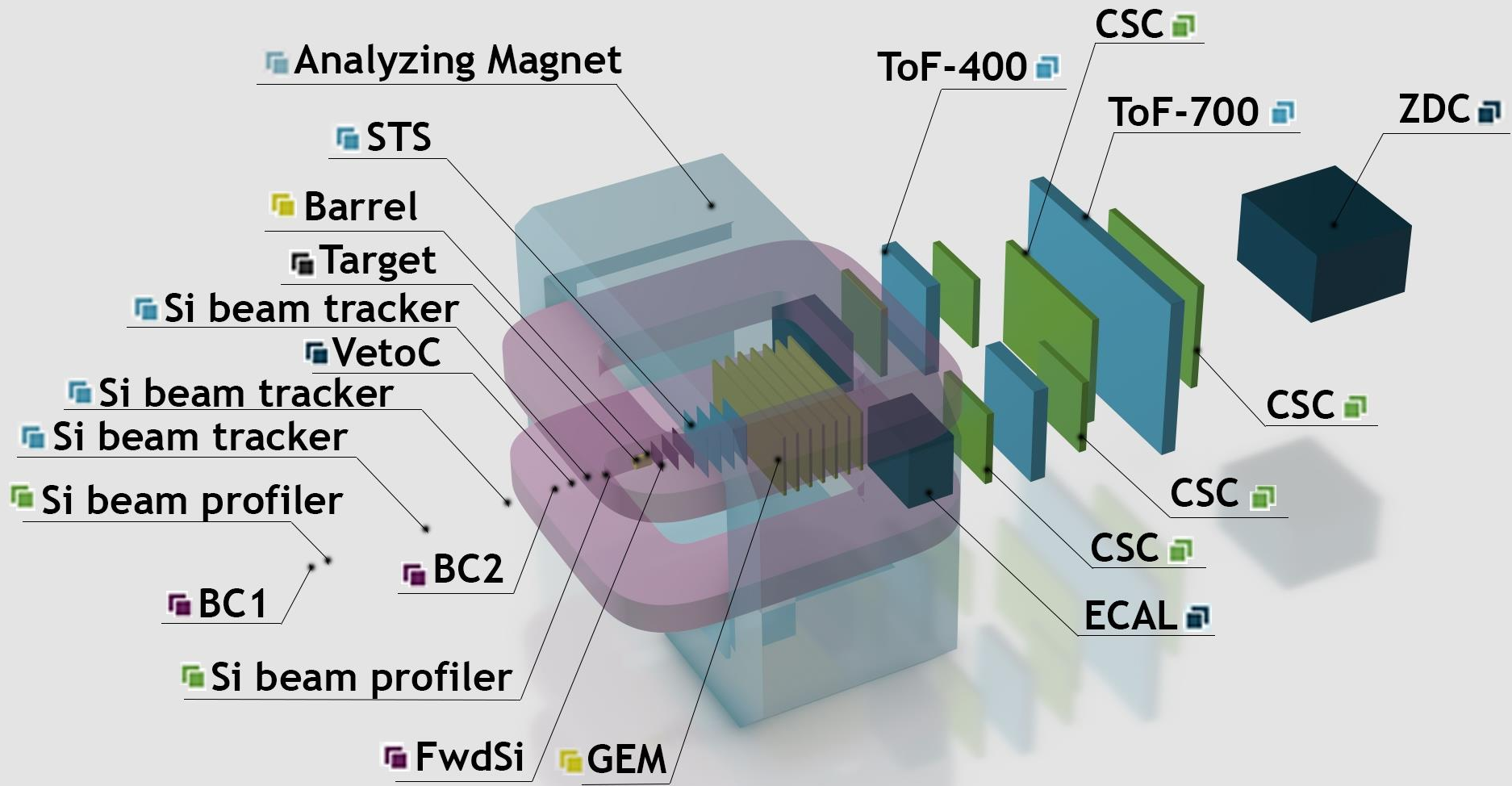
NICA Heavy Ion Complex



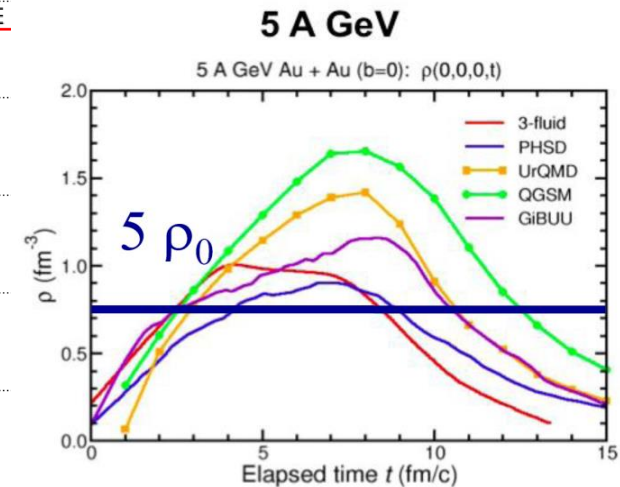
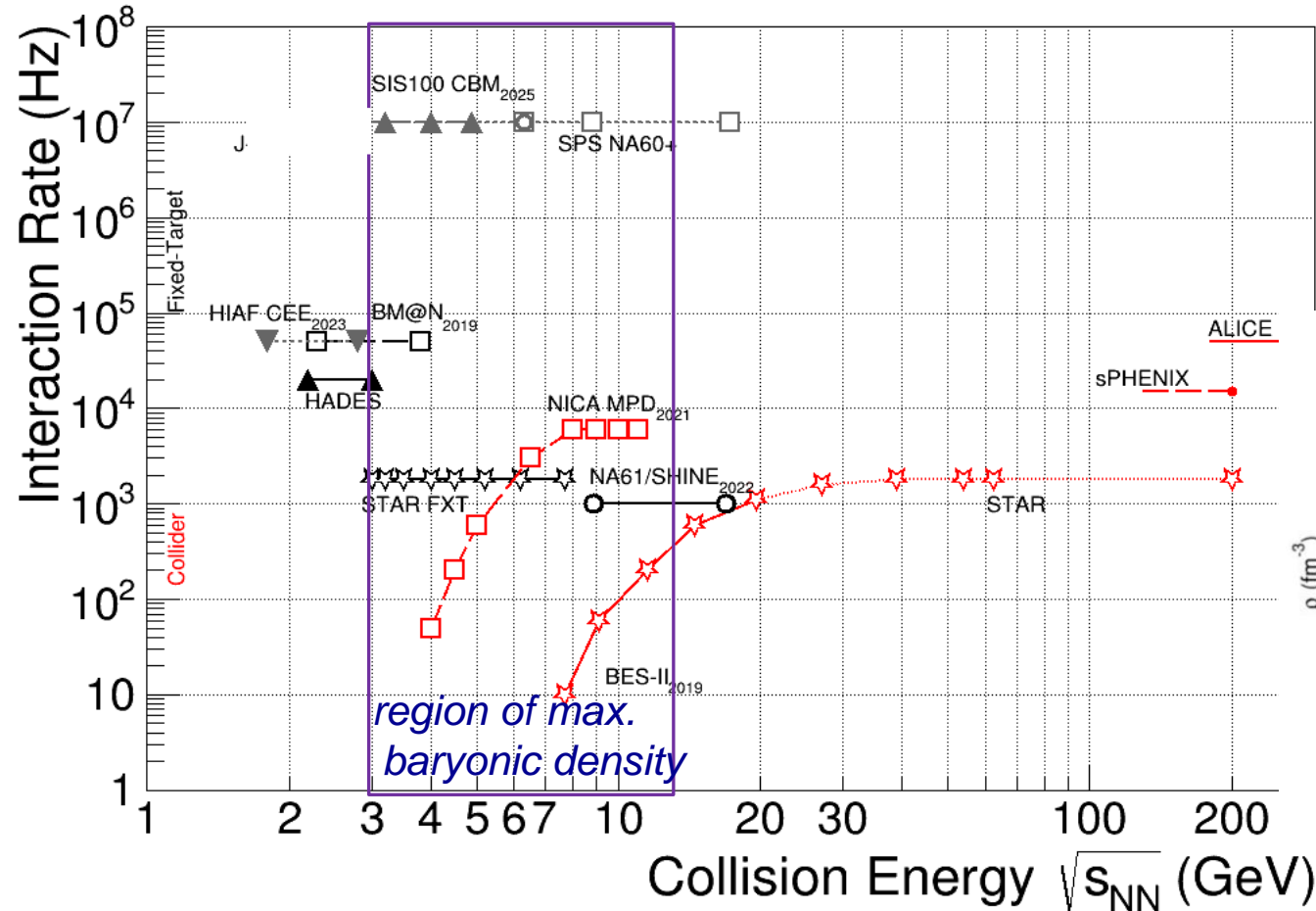
BM@N: heavy ion energy 1-4.5 GeV/n, beams: p to Au, Intensity \sim few 10^6 /s



BM@N detector for heavy ion program (without beampipe)



Heavy Ion Collision Experiments



BM@N: $\sqrt{s_{NN}} = 2.3 - 3.3$ GeV
MPD: $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ GeV

BM@N competitors:
 HADES BES (SIS): Au+Au at $\sqrt{s_{NN}} = 2.42$ GeV,
 Ag+Ag at $\sqrt{s_{NN}} = 2.42$ GeV, 2.55 GeV.

STAR BES (RHIC): Au+Au at $\sqrt{s_{NN}} = 3-200$ GeV

Future CBM experiment: Au+Au at $\sqrt{s_{NN}} \sim 2.7 - 4.9$ GeV 21

EOS of symmetric and asymmetric nuclear matter

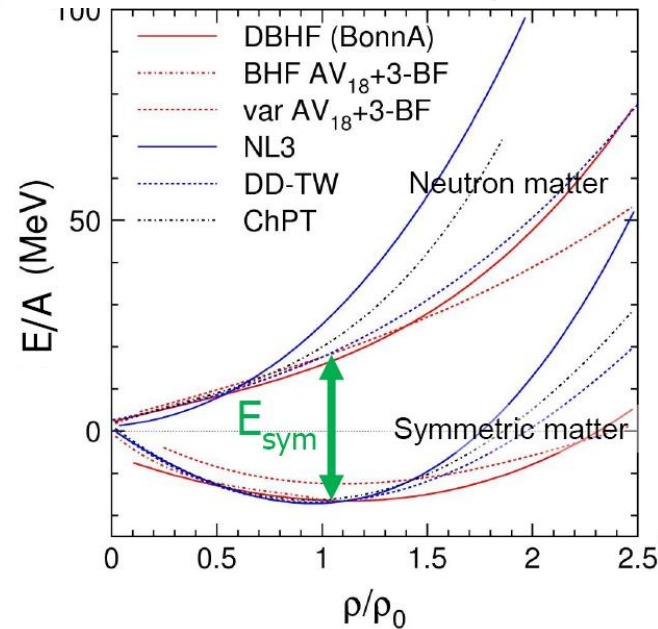
Ch. Fuchs and H.H. Wolter, EPJA 30 (2006) 5

EOS: relation between density, pressure, temperature, energy and isospin asymmetry

$$E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{\text{sym}}(\rho) \cdot \delta^2$$

with $\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$ $E/A(\rho_0) = -16 \text{ MeV}$

Curvature defined by nuclear incompressibility: $K = 9\rho^2 \delta^2(E/A) / \delta\rho^2$

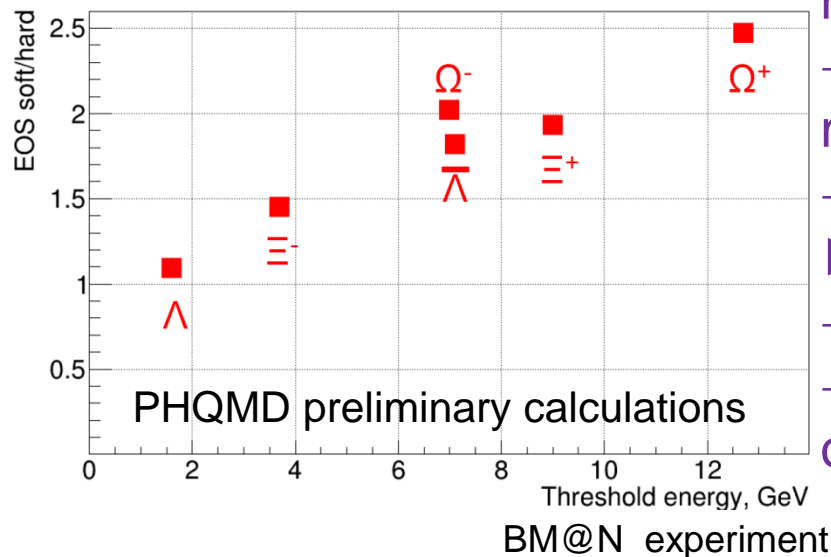


► Study symmetric matter EOS at $\rho = 3-5 \rho_0$
 → elliptic flow of protons, mesons and hyperons

→ sub-threshold production of strange mesons and hyperons
 → extract K from data to model predictions

► Constrain symmetry energy E_{sym}
 → elliptic flow of neutrons vs protons
 → sub-threshold production of particles with opposite isospin

Hyperon yield in 4A GeV Au+Au:
 soft EOS (K=240 MeV) / hard EOS (K=350) MeV

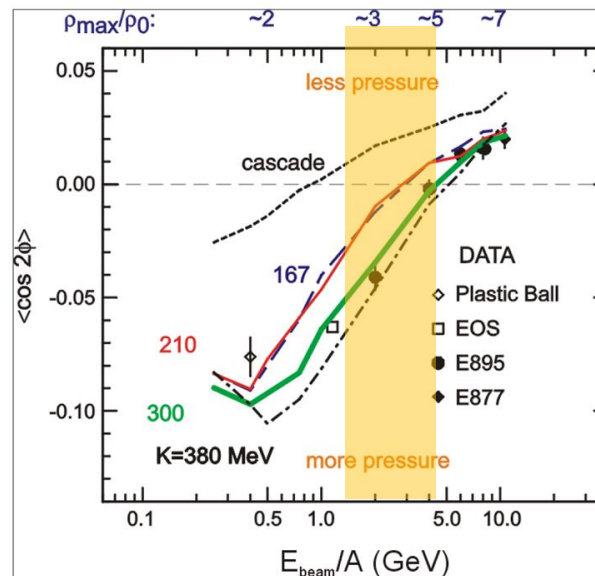
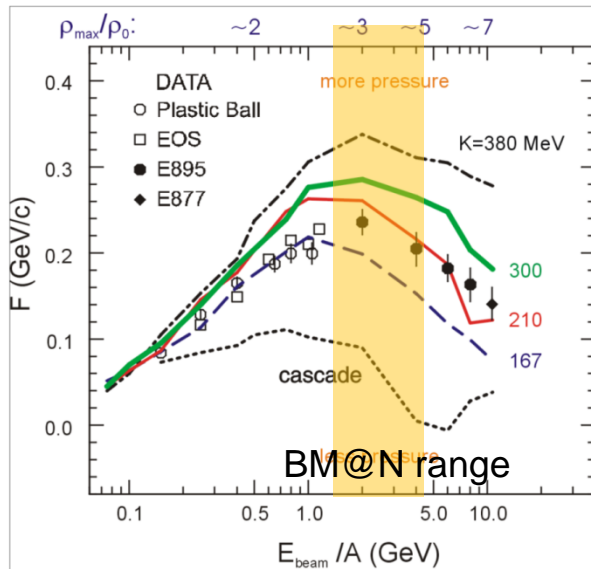
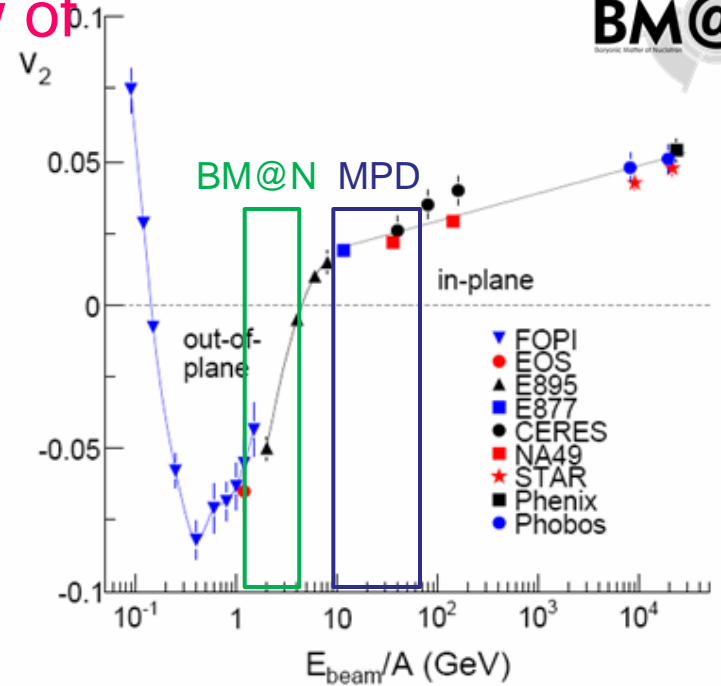


Study of EoS: Collective flow of identified particles

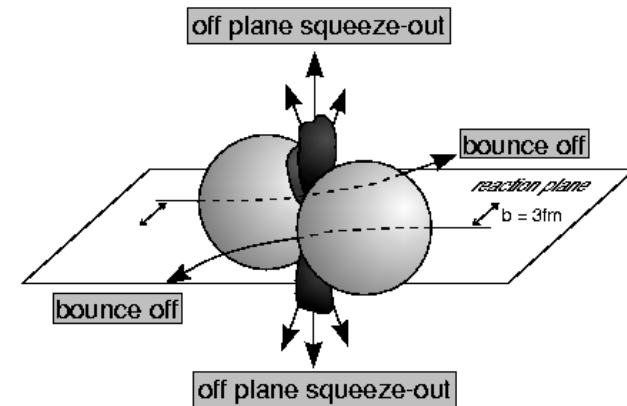
➤ collective flow of identified particles ($n, K, p, \Lambda, \Xi, \Omega, \dots$) driven by the pressure gradient in the early fireball

Azimuthal angle distribution:
 $dN/d\phi \propto (1 + 2v_1 \cos\phi + 2v_2 \cos 2\phi)$

Proton flow in Au+Au collisions
 in-plane flow $\sim v_1$ out-of-plane flow v_2



P. Danielewicz, R. Lacey, W.G. Lynch, Science 298 (2002) 1592



Plan for BM@N Experimental physics run in Xe beam with CsI target for 800 hours (33 days) in October-December 2022

BM@N: Estimated hyperon yields in Xe + Cs collisions

4 A GeV Xe+Cs collisions, multiplicities from PHSD model,
 Beam intensity $2.5 \cdot 10^5/s$, DAQ rate $2.5 \cdot 10^3/s$, accelerator duty factor 0.25

$1.8 \cdot 10^9$ interactions
 $1.8 \cdot 10^{11}$ beam ions

Particle	E_{thr} NN GeV	M b<10 fm	ϵ %	Yield/s b<10fm	Yield / 800 hours b<10 fm
Λ	1.6	1.5	2	150	$5 \cdot 10^7$
Ξ^-	3.7	$2.3 \cdot 10^{-2}$	0.5	0.55	$2 \cdot 10^5$
Ω^-	6.9	$2.6 \cdot 10^{-5}$	0.25	$3.2 \cdot 10^{-4}$	110
Anti- Λ	7.1	$1.5 \cdot 10^{-5}$	0.5	$3.7 \cdot 10^{-4}$	130

DCM-SMM
 x 0.75
 x 0.5

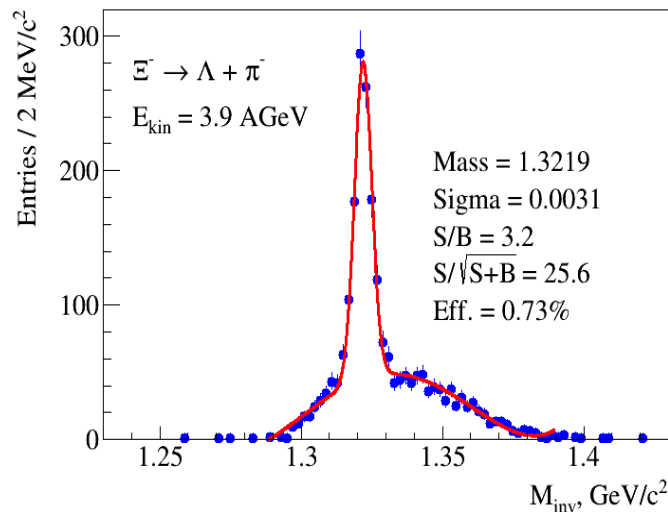
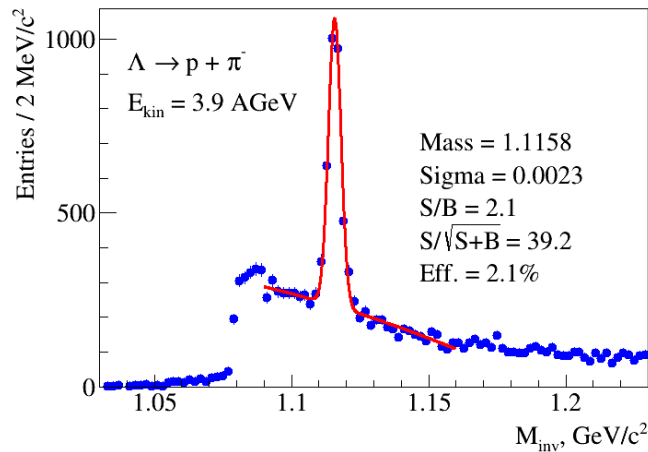
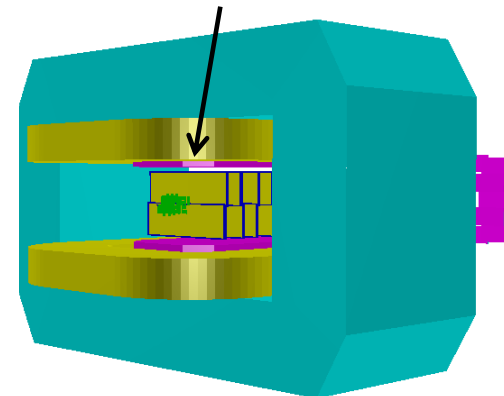
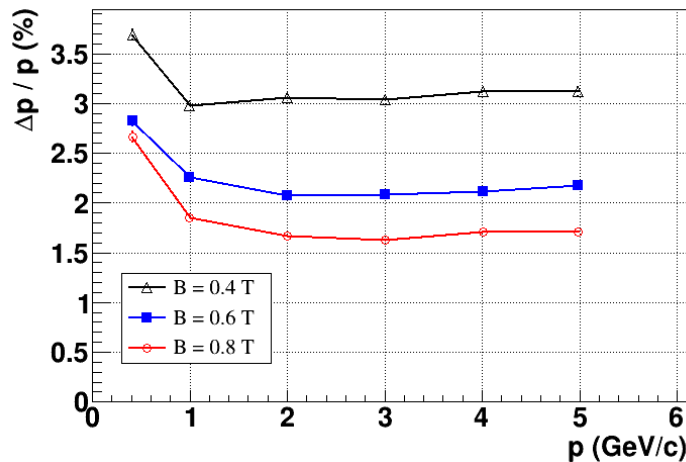
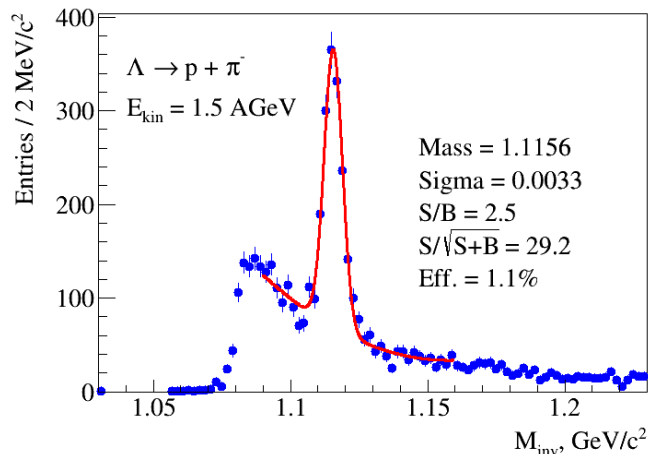
Xe + CsI run configuration of hybrid central tracker:

3 Forward Si + 7 GEM stations

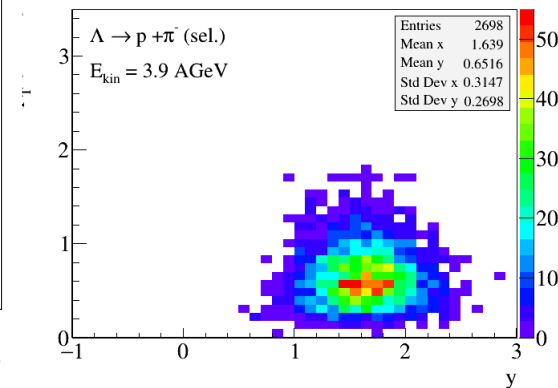
Al.Zinchenko, V.Vasendina

DCM-SMM model: Xe + Sn, $T_0 = 1.5 - 3.9$ AGeV

3 Forward Si + 7 GEM

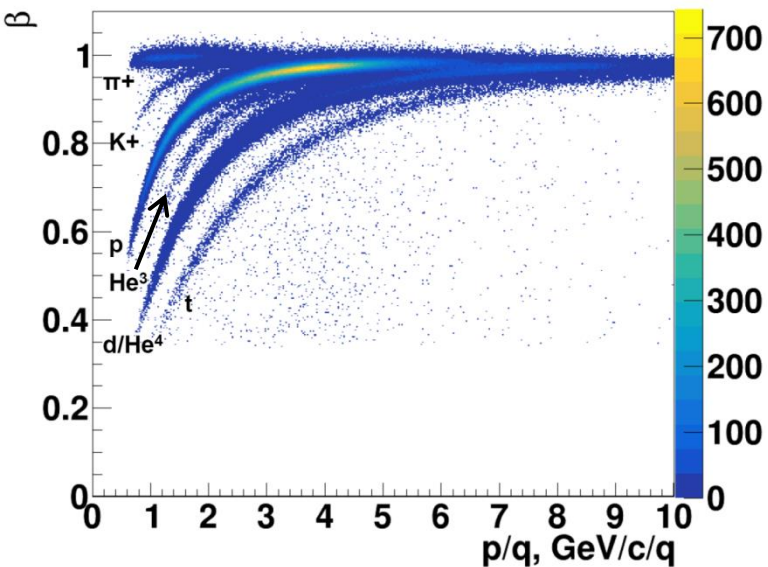


Phase space of reconstructed Λ

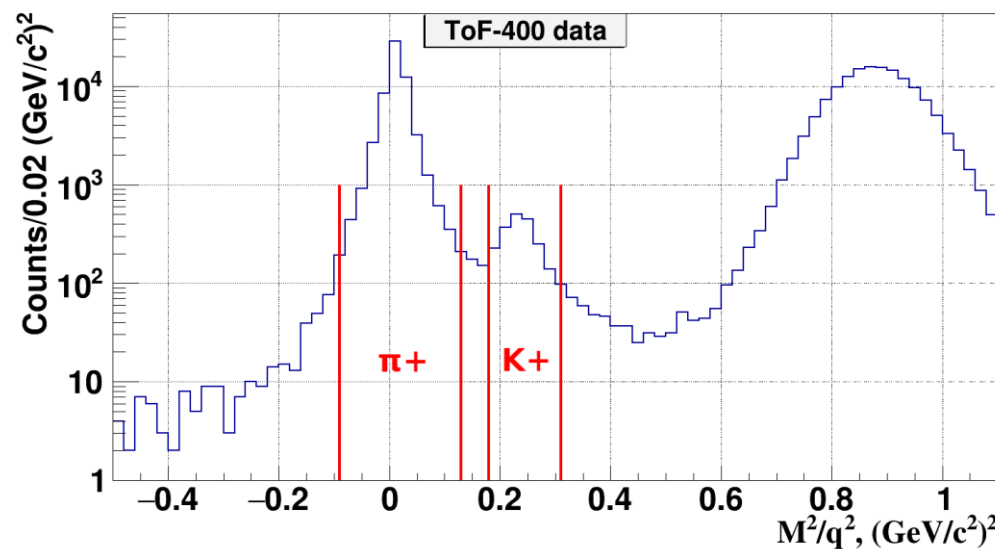




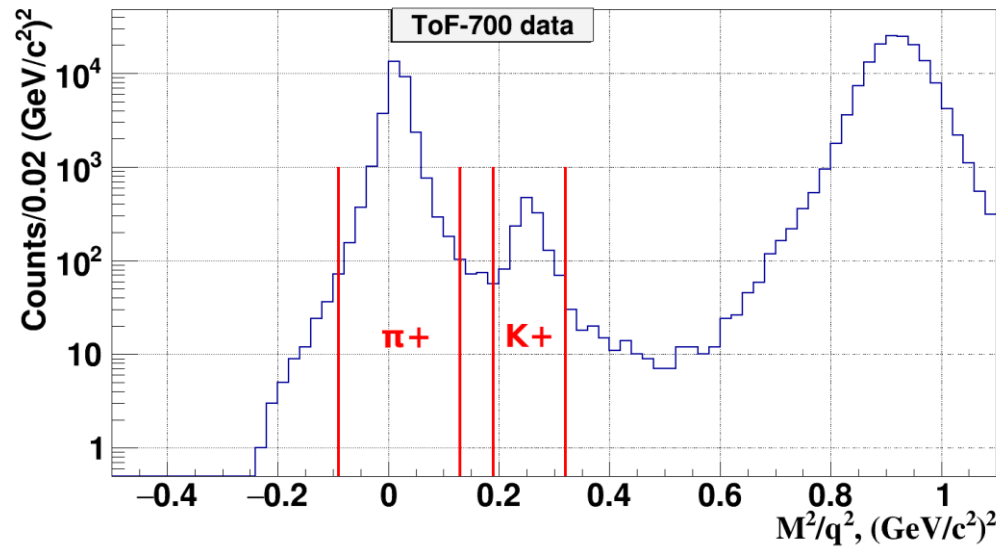
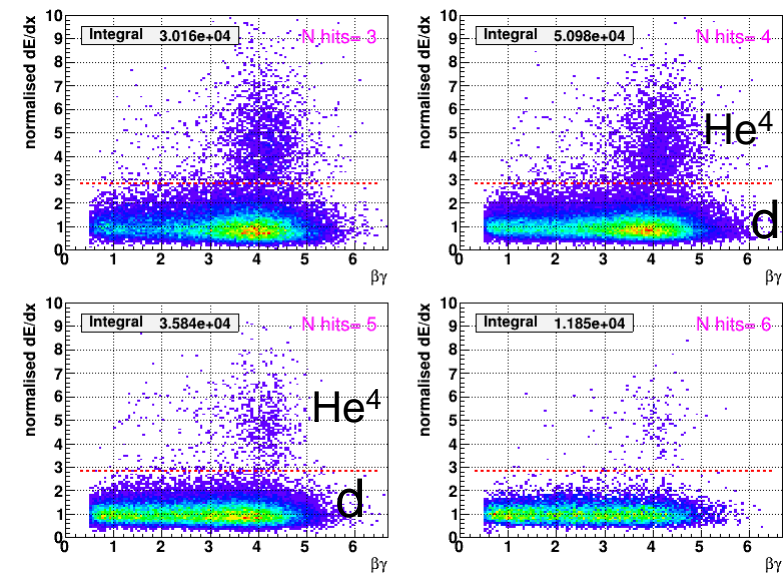
Identification of π^+ , K^+ , p , t , He^3 , d/He^4



Ar beam , 3.2 AGeV , Ar + Al,Cu,Sn \rightarrow X



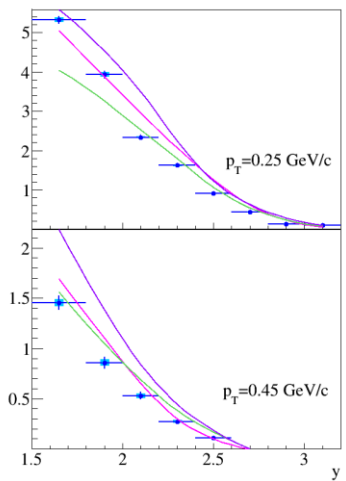
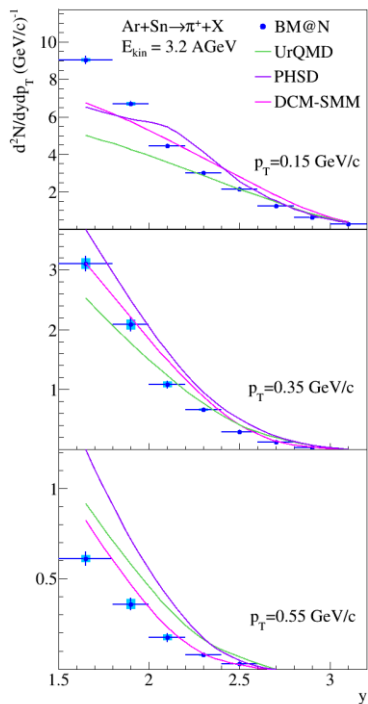
He^4 / d separation by dE/dx in GEM detectors



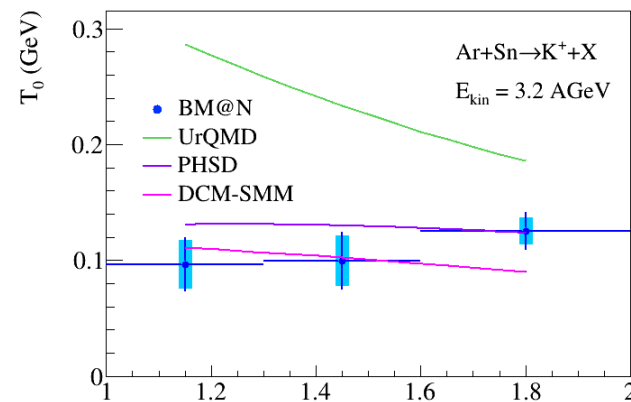
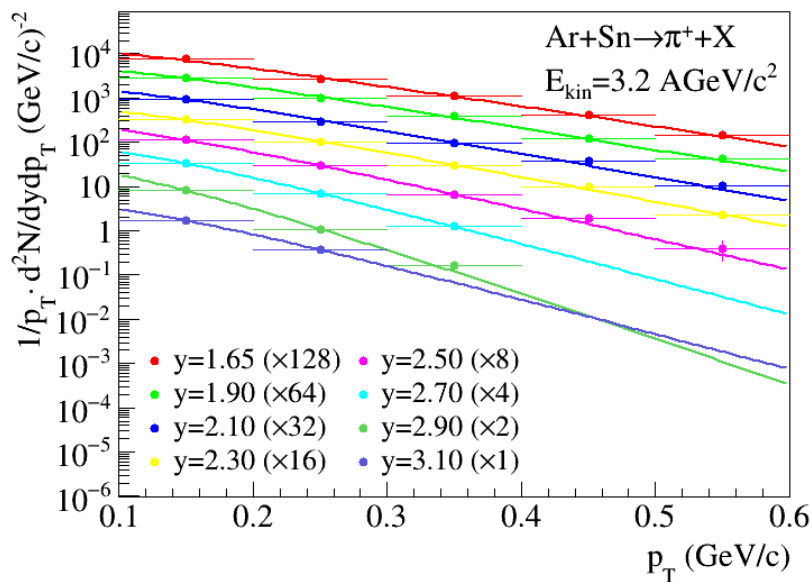
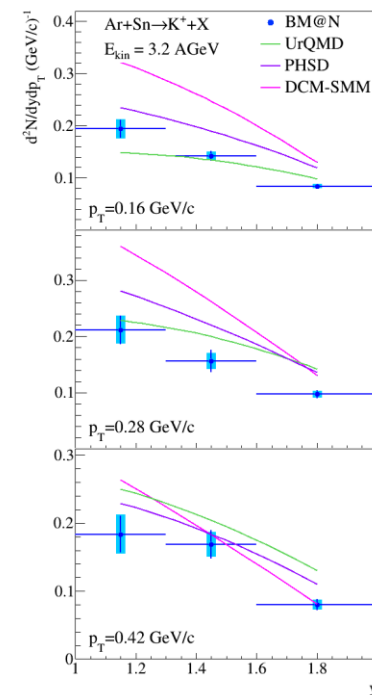
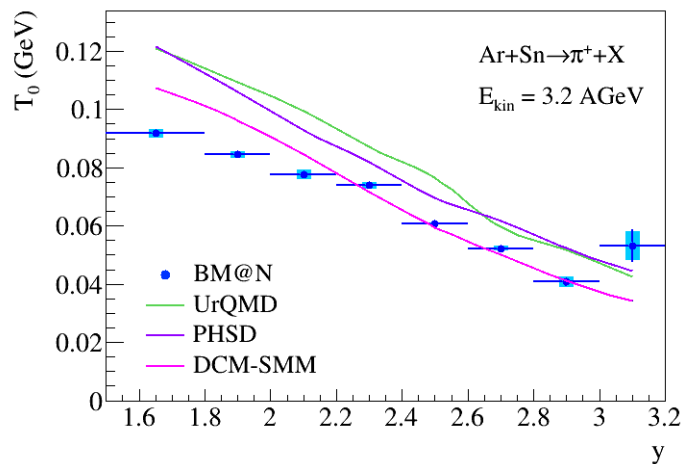
$\beta\gamma$



Production of π^+ and K^+ mesons in 3.2 AGeV argon-nucleus interactions at the Nuclotron



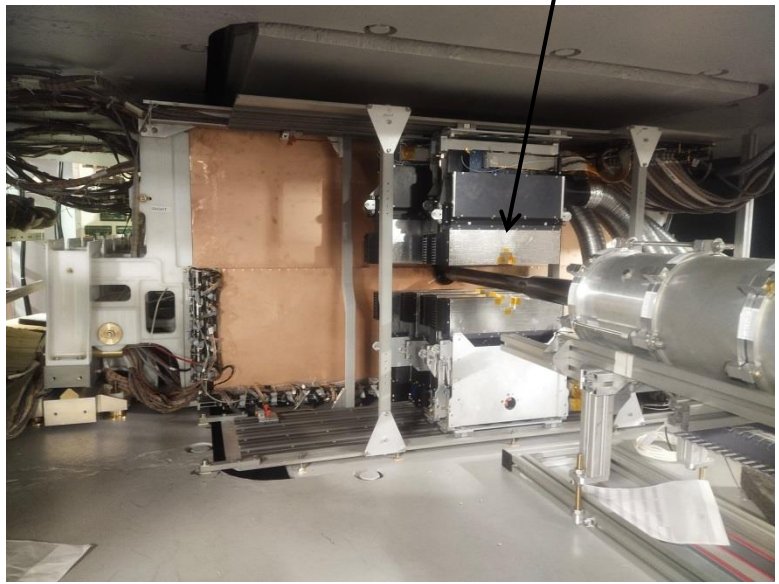
Nuclotron



BM@N tracking detector installation for heavy ion run



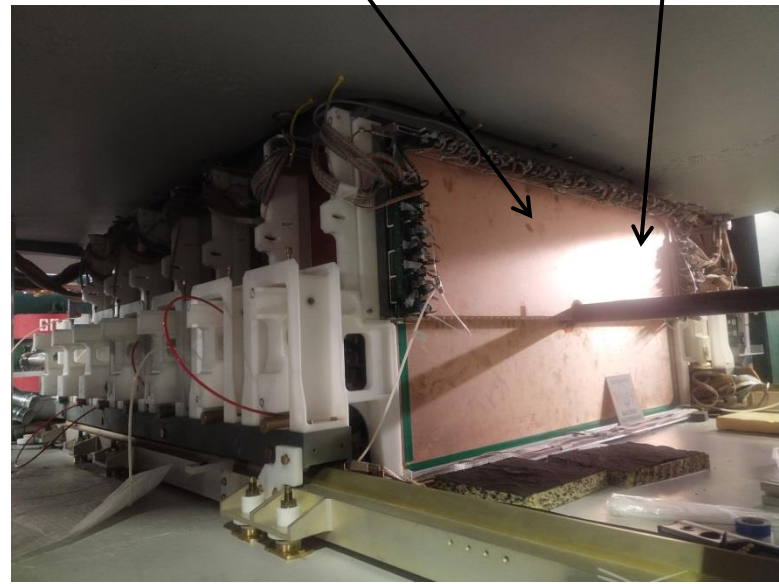
Forward Si tracker detectors in front of GEM detectors



GEM group + engineer group of S.Piyadin

GEM detectors on positioning mechanics in magnet

Carbon vacuum beam pipe



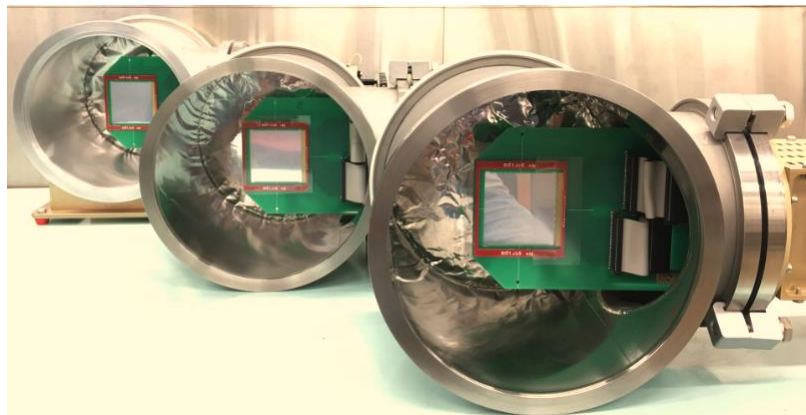
Vacuum boxes for beam detectors



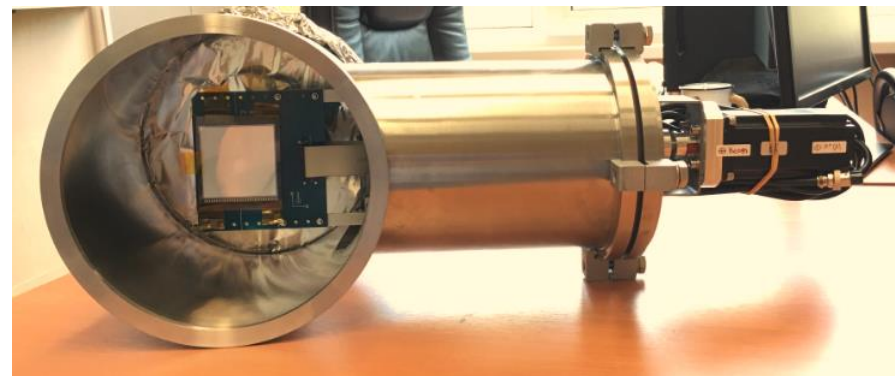
BM@N detector preparation for heavy ion run

FST group of N.Zamiatin

3 Silicon beam tracking detectors



Beam profile meter with Si detector and positioning mechanics



Outer tracker: Cathode Strip Chambers → 4 CSC of 106x106



Outer tracker group

Big CSC 220x145 cm²



Silicon beam tracking detector in SRC setup

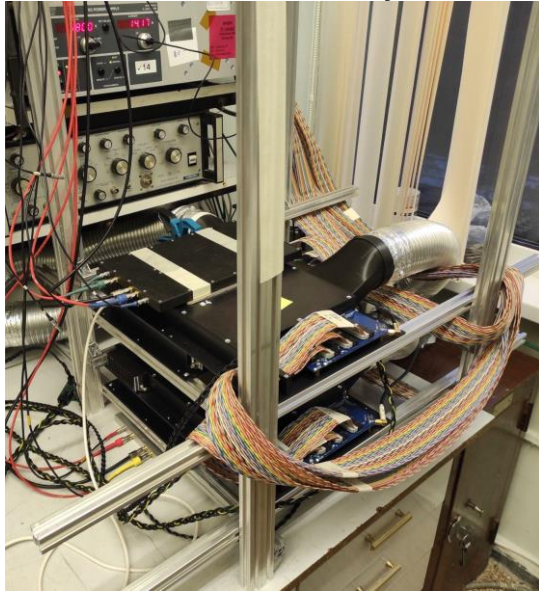
INR RAS group



Forward hodoscope in front of FHCAL

Forward Silicon Tracker for heavy ion run

Setup for FST tests with cosmic rays



FST support mechanics

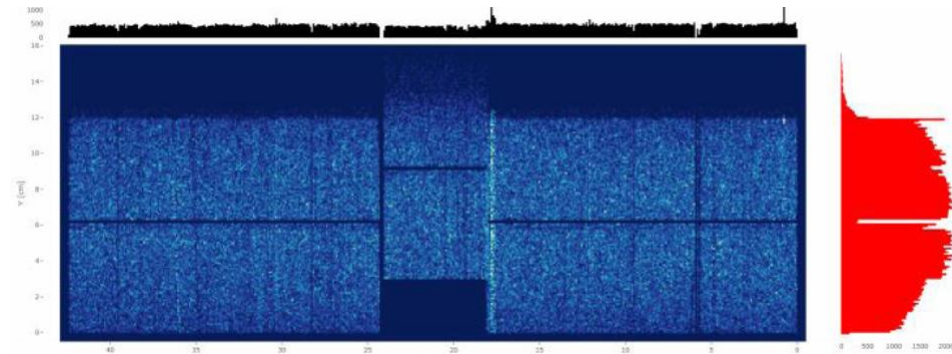


FST group of N.Zamiatin

Assembled FST half station of 7 detectors



Cosmic ray X/Y profile of FST half station



FST modules in SRC setup



► All 48 modules and 4 FST stations with 6, 10, 14, 18 modules are assembled, tested and installed

Так было

BM@N: 2012 - 2022

Так стало



BM@N Collaboration: 182 participants from 10 institutions



9th BM@N Collaboration Meeting 13-16 September 2022:
128 participants (in person and remotely)

9th BM@N Collaboration Meeting , 15 September 2022: preparation for the Xe run at Lipnya Island



Спасибо за внимание!