

Физика столкновений релятивистских ядер

В.Л. Коротких

**Кварк- глюонная плазма, кинематика и детекторы
коллайдеров
(основные представления)**

Лекция 1

2012 г.

Квантовая хромодинамика (КХД)

КХД – теория сильного взаимодействия цветных глюонных и кварковых полей. Начало ее создания – 70 годы (Fritzsh, Gell-Mann, Leutwylec).

В квантовой электродинамике (КЭД) электрический заряд порождает электромагнитное поле.

В КХД цветные кварки (q) порождают 8 цветных глюонных (g) полей (неабелевы калибровочные поля Янга-Милса).

Уравнения КХД, в отличие от уравнений КЭД, нелинейны. Сумма решений не является решением.

В отличие от КЭД в КХД глюонные поля сами порождают глюонные поля и взаимодействуют друг с другом – **самодействие** глюонов. При этом одна и та же константа α описывает взаимодействие q - g и g - g .

Наиболее важные результаты теории КХД для ядро-ядерных столкновений:
 - это предсказание кварк-глюонной плазмы (идеального партонного газа)

Свойства фазового перехода в «решётчатой» КХД

КХД предсказывает, что при высоких температурах адроны «растворяются», освобождая кварки и глюоны, происходит быстрый рост плотности энтропии и, следовательно, давления. Кварки становятся безмассовыми, химический потенциал равен нулю (чисто нулевая плотность кварков). Стефан-Больцмановское давление P_{ST} такого предельного партонного состояния (идеального газа) при заданной температуре T определяется числом степеней свободы

$$\frac{P_{ST}}{T^4} = \left[2(N_C^2 - 1) + \frac{7}{2} N_C N_f \right] \frac{\pi^2}{90}$$

где N_C - число цветов, N_f - число кварковых ароматов, температура измеряется в единицах энергии, 2 слагаемых – глюонный и кварковый вклады.

$$\epsilon = n_f \frac{\pi^2}{30} \frac{T^4}{(\hbar c)^3} + B \quad \text{— energy density}$$

$$p = n_f \frac{\pi^2}{90} \frac{T^4}{(\hbar c)^3} - B \quad \text{— pressure}$$

$$s = \frac{\epsilon + p}{T} = \frac{4}{3} k \frac{\pi^2}{30} T^3 \quad \text{— entropy}$$

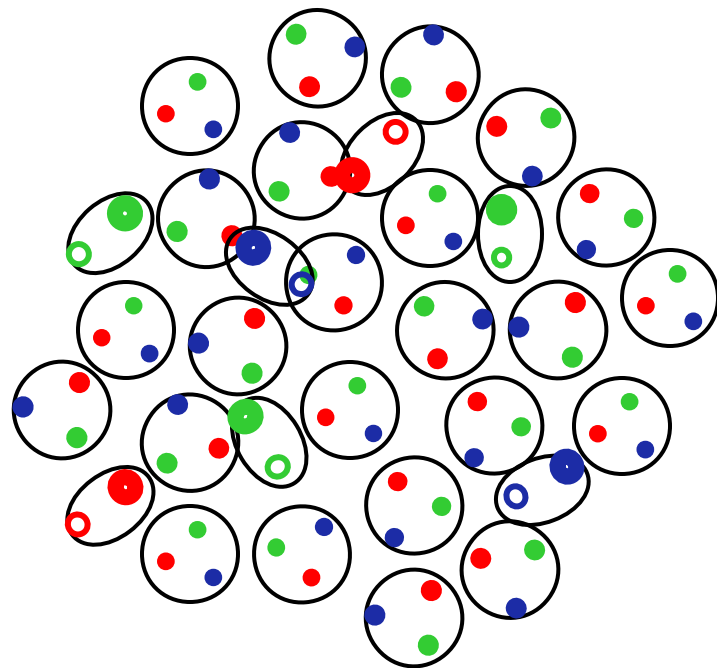
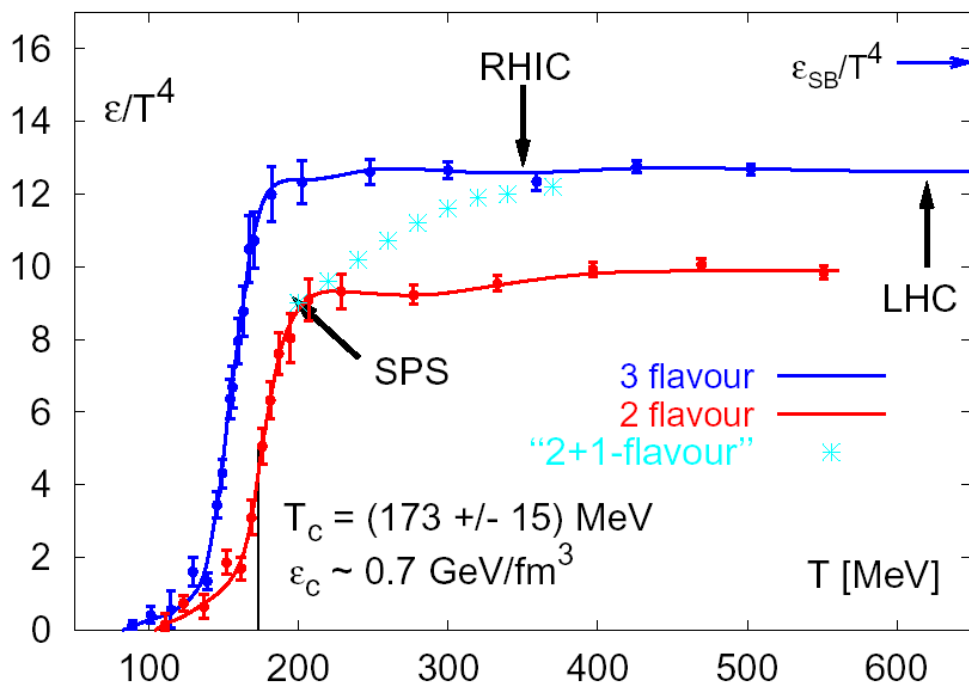
Иллюстрация достижения деконфайнмента

КХД-материя

• нагревание

• сжатие

→ деконфайнмент и
формирование КГП!



Кварк-глюонная плазма
(деконфайнмент) !

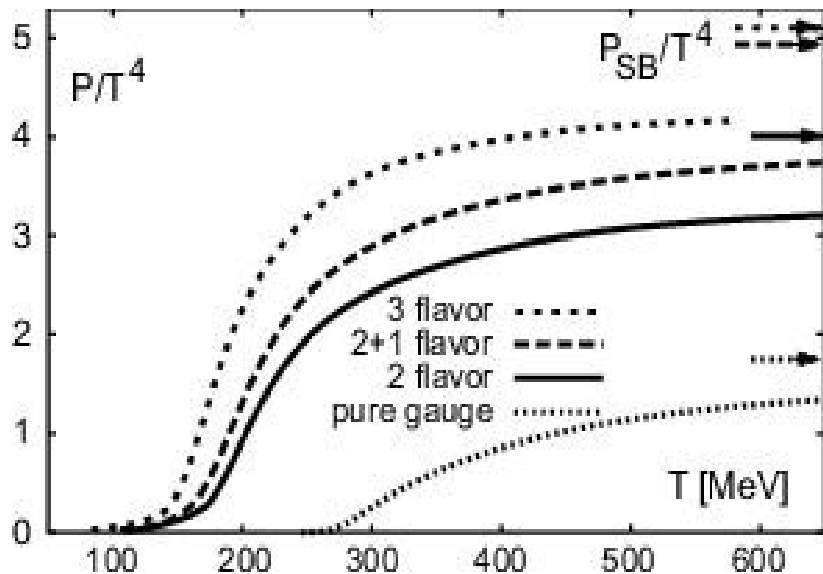
Ядерная материя
(конфайнмент)

Адронная материя
(конфайнмент)

Расчеты на пространственно-временных решетках КХД (LQCD) предсказывают:

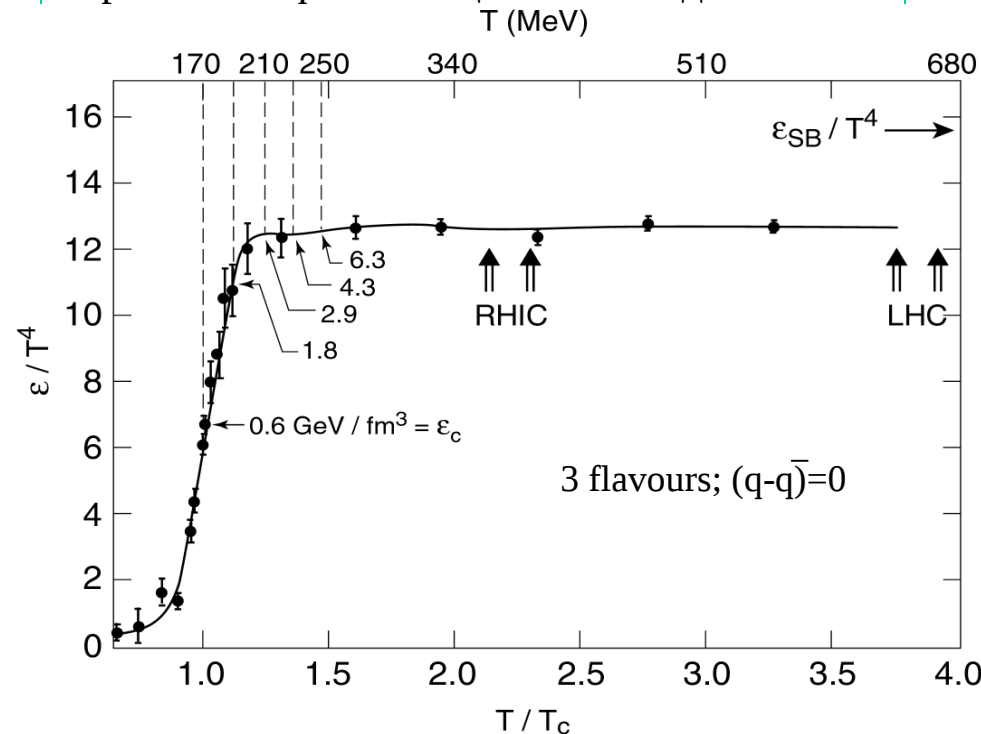
- Переход в состояние партонного газа с изменением температуры.
Изменение давления P с ростом температуры T (см. рис.1)

• Давление и плотность энергии, деленное на T^4 , быстро растет за критической точкой $T_c \cong 160$ МэВ и затем при $T > 2T_c$ насыщается, но не достигает Стефан-Больцмановского давления P_{SB} . Это свидетельствует об остающихся взаимодействиях среди кварков и глюонов в **sQGP**.



Прогресс в вычислениях КХД на решетке:
Z. Fodor et al., arXiv:0712.2930 hep-lat;
F. Karsch et al., arXiv:0711.0661 hep-lat.

Рис.1. Расчеты LQCD для различного числа ароматов динамических кварков. Стрелочки справа – Стефан-Больцмановское давление.



Посмотрите работы, посвященные КХД

1. И.М. Дремин и А.Б.Кайдалов, «Квантовая хромодинамика и феноменология сильных взаимодействий», УФН, т.176, № 3, с. 275, 2006 г.

[r063b_Dremin_Kaidalov.pdf](#)

2. D.J. Gross, Asymptotic Freedom and QCD – a Historical Perspective *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 135 (2004) 193–211

[sdarticle_Gross.pdf](#)

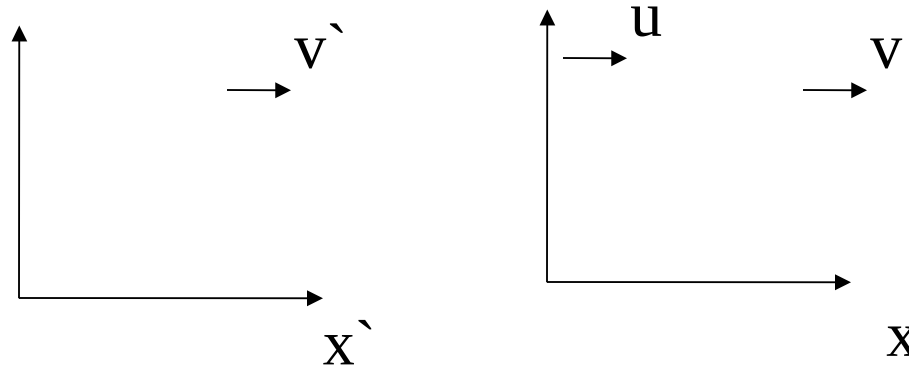
3. F. Celis, High Energy scattering in QCD, *Int.J.M.Phys. E*, arXiv:hep-ph/0708.0047

[0708.0047_lect_Celis.pdf](#)

Быстрота (rapidity) y

Быстрота частицы определяется через скорость частицы β как:

$$y = \operatorname{arcth}(\beta) = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} \quad \rightarrow \quad \operatorname{th} y = \beta = \frac{p}{E} \quad (\text{1.доказать})$$



Преобразования Лоренца (Пусть y_u – быстрота движущейся системы)

$$v = \frac{v'+u}{1+v'u} \quad \longrightarrow \quad \operatorname{th} y = \frac{\operatorname{th} y' + \operatorname{th} y_u}{1 + \operatorname{th} y' \operatorname{th} y_u} \quad \text{Далее, т.к.} \quad \operatorname{th}(x_1 + x_2) = \frac{\operatorname{th} x_1 + \operatorname{th} x_2}{1 + \operatorname{th} x_1 \operatorname{th} x_2}$$

$$\operatorname{th} y = \operatorname{th}(y' + y_u)$$

$$y = y' + y_u$$

→ Главное свойство быстроты:
 Быстрота – аддитивна
 при Лоренцевских преобразованиях

Продольный импульс рожденной частицы c и её быстрота вдоль оси z

Удобно ввести понятие поперечной массы m_T :

$$E^2 = p_L^2 + (p_T^2 + m_c^2) = p_L^2 + m_T^2$$

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

$$E = m_T \operatorname{ch}(y)$$

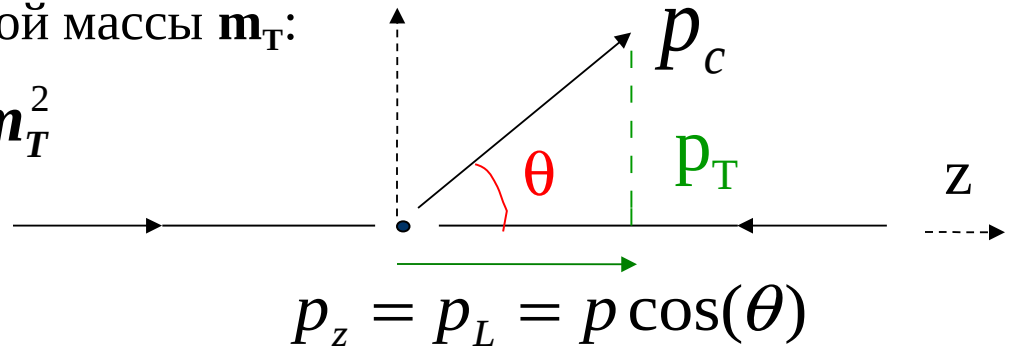
$$p_L = m_T \operatorname{sh}(y)$$

(2.доказать)

При релятивистских скоростях

$$y \rightarrow \ln \frac{2p_L}{m_T}, \quad p_L \gg m_T$$

(4.доказать)

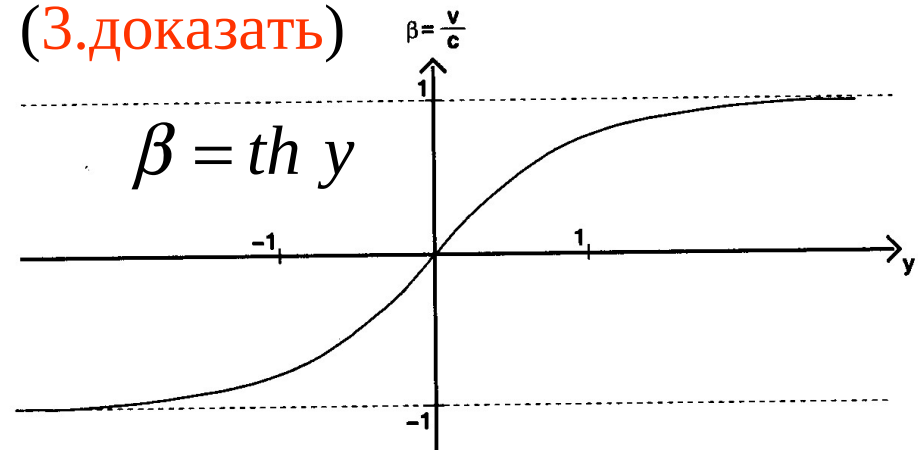


При малых (нерелятивистских) скоростях:

быстрота равна скорости частицы

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \Big|_{\beta < 1} \approx \beta, \quad \beta = \frac{p}{E} \approx \frac{p_z}{E}$$

(3.доказать)



Максимальная область быстрот частицы

$$A + B \rightarrow c$$

Пусть частица B покоится, тогда для частицы A быстрота будет иметь максимальное значение y_{\max}

$$s = (m_A^2 + m_B^2 + 2m_B E_A) \approx 2m_B p_A,$$

$$E_A \approx p_A = (p_A)_L \text{ при } E_A \gg m_A, m_B$$

$$y_{\max} = \frac{1}{2} \ln \frac{(E_A + m_B) + p_A}{(E_A + m_B) - p_A} \approx \frac{1}{2} \ln \frac{s}{m_B^2} \quad (5. \text{ доказать})$$

$$y_{\min} = -y_{\max}$$

Пусть частица A покоится, тогда для частицы B быстрота будет иметь максимальное значение y_{\min}

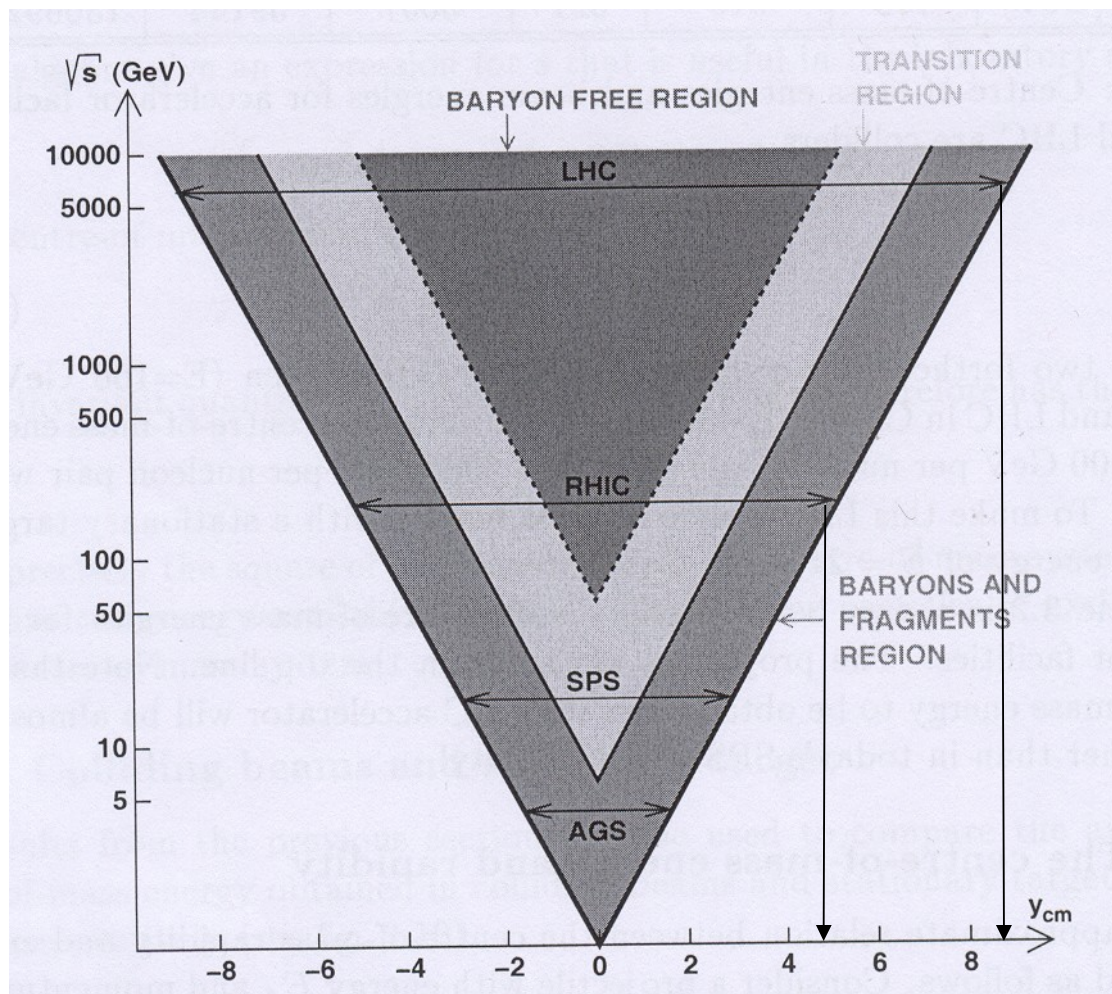
$$Y = y_{\max} - y_{\min} = \ln \frac{s}{m_B^2} \approx \ln \frac{2p_A}{m_B}$$

Для частицы c $p_c < p_A$

В системе центра масс

$$y_{c, \max} \approx \frac{1}{2} \ln \frac{2p_c}{m_B} \Rightarrow Y / 2 \quad -Y / 2 \leq y_c^* \leq Y / 2$$

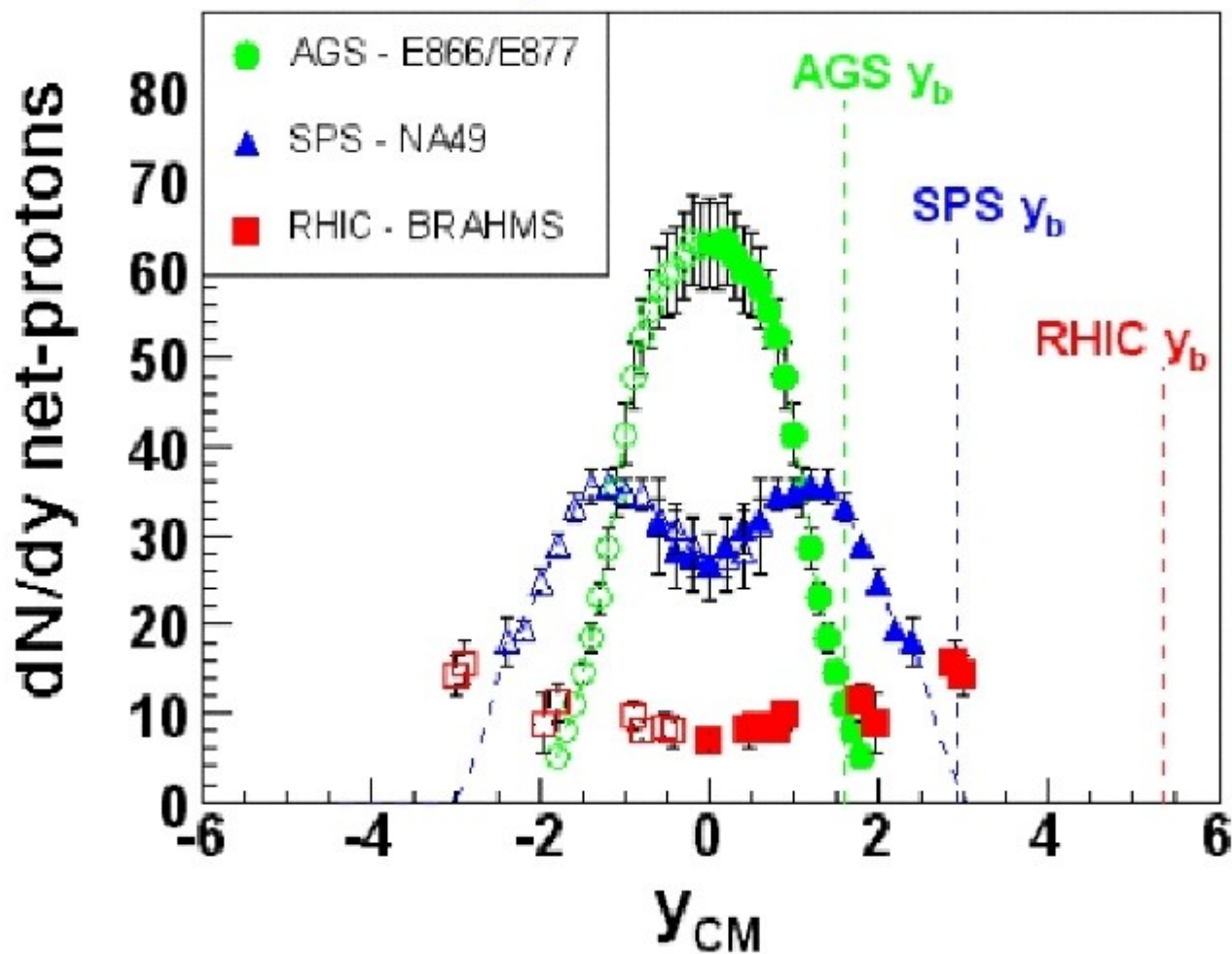
Максимальные доступные быстроты на коллайдерах



(Задача 5: вычислить y_{max} в p-p столкновениях для RHIC и LHC)

Пример зависимости от быстроты

Evolution of net-protons from $\sqrt{S}=5-200\text{GeV}$



Разница числа протонов и антипротонов (net-proton)
в p-p столкновениях

Псевдобыстрота

- **Псевдобыстрота частицы :**

- Иногда энергия и импульс частицы неизвестны, а измеряется только угол θ относительно оси пучка (z)
- При высоких энергиях возможно аппроксимировать быстроту y величиной η , которую называют псевдобыстротой:

определение

$$\eta = -\ln \operatorname{tg}(\theta / 2) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p + p_z}{p - p_z} \right), \quad \frac{p_z}{p} = \cos \theta$$

(6. **доказать**)

В ультра-релятивистском пределе: $E \sim p$ and $\eta \sim y$

1. $y \cong \eta$ при $m / p \leq \vartheta \leq 1 \quad \rightarrow$ большие импульсы $p > m$ ($E \cong p$)

(7. **доказать**)

1. $y \cong \eta - \ln(m_T / p_T)$ (при $y \gg 1$) \rightarrow малые значения p_T , малые θ
(см. далее)

(8. **доказать**)

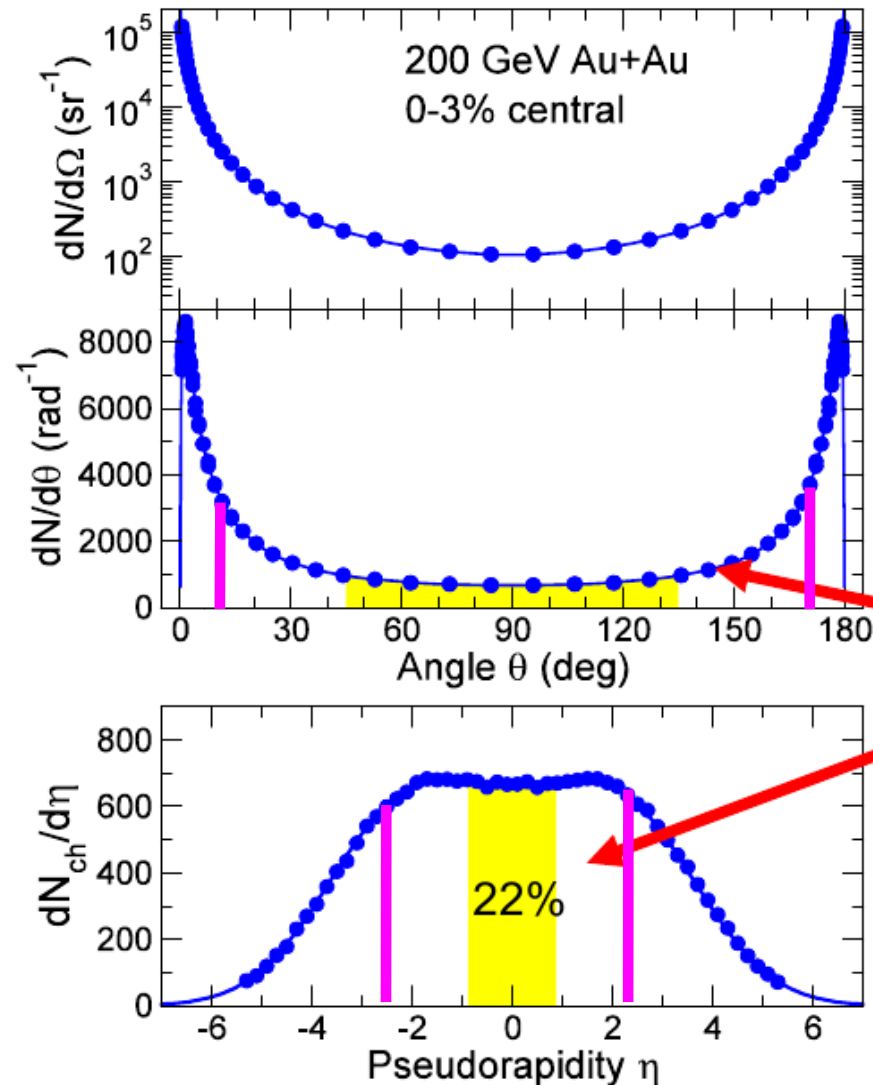
(Для доказательства использовать релятивистский предел y и η)

Кинематика, θ и η

$$\eta = -\ln \left(\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)$$

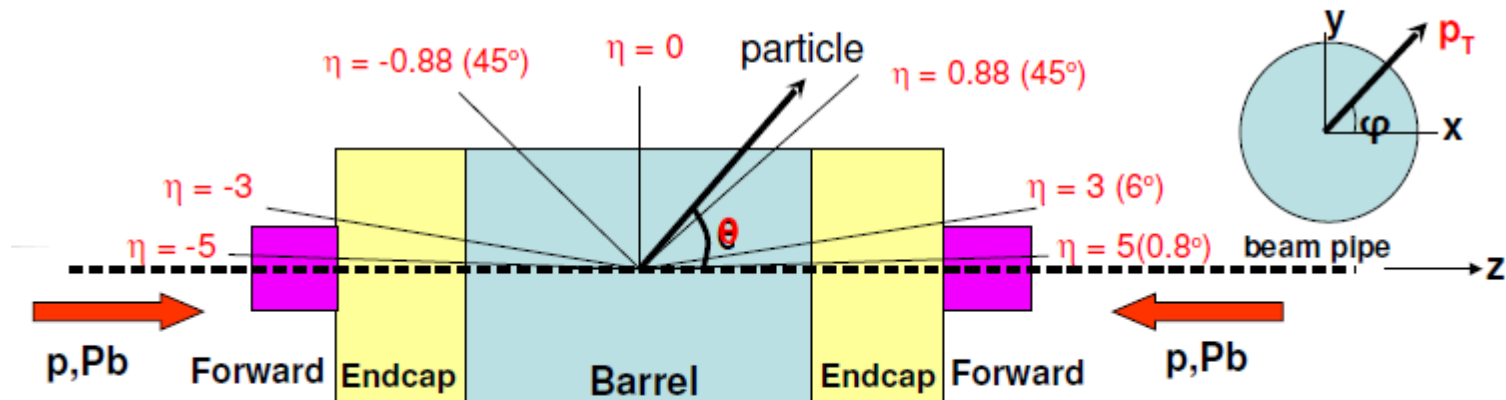
$|\eta| < 1.0 \rightarrow \theta > 45^\circ \text{ and } \theta < 135^\circ$

$|\eta| < 2.4 \rightarrow \theta > 10^\circ \text{ and } \theta < 170^\circ$



Hadron collisions: kinematics

- Hadron = “beam” of partons with initial $p_T \sim 0$ but unknown p_L fractions



- **Transverse momentum:** $\mathbf{p}_T = (p_x, p_y)$ $|\mathbf{p}_T| = p \sin(\theta)$

- **Rapidity:** $y = \frac{1}{2} \log \frac{E + p_z}{E - p_z}$ (Differences in rapidity are conserved under Lorentz boosts in the z-direction)

Pseudorapidity: $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ $\eta \sim y$ if $E \gg m$, and θ not too small)

Коллайдер RHIC

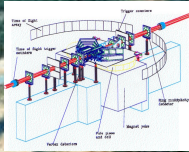
$p + p$, $Au + Au$ and $d + Au$ at $\sqrt{s} = 200$ ГэВ

Установки

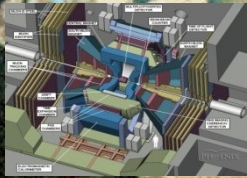
STAR, PHENIX, PHOBOS, BRAHMS

The Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC. 100+100 ГэВ/нуклон

PHOBOS



PHENIX

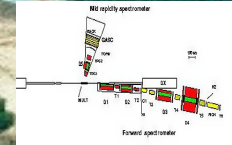


RHIC



STAR

BRAHMS



BOOSTER

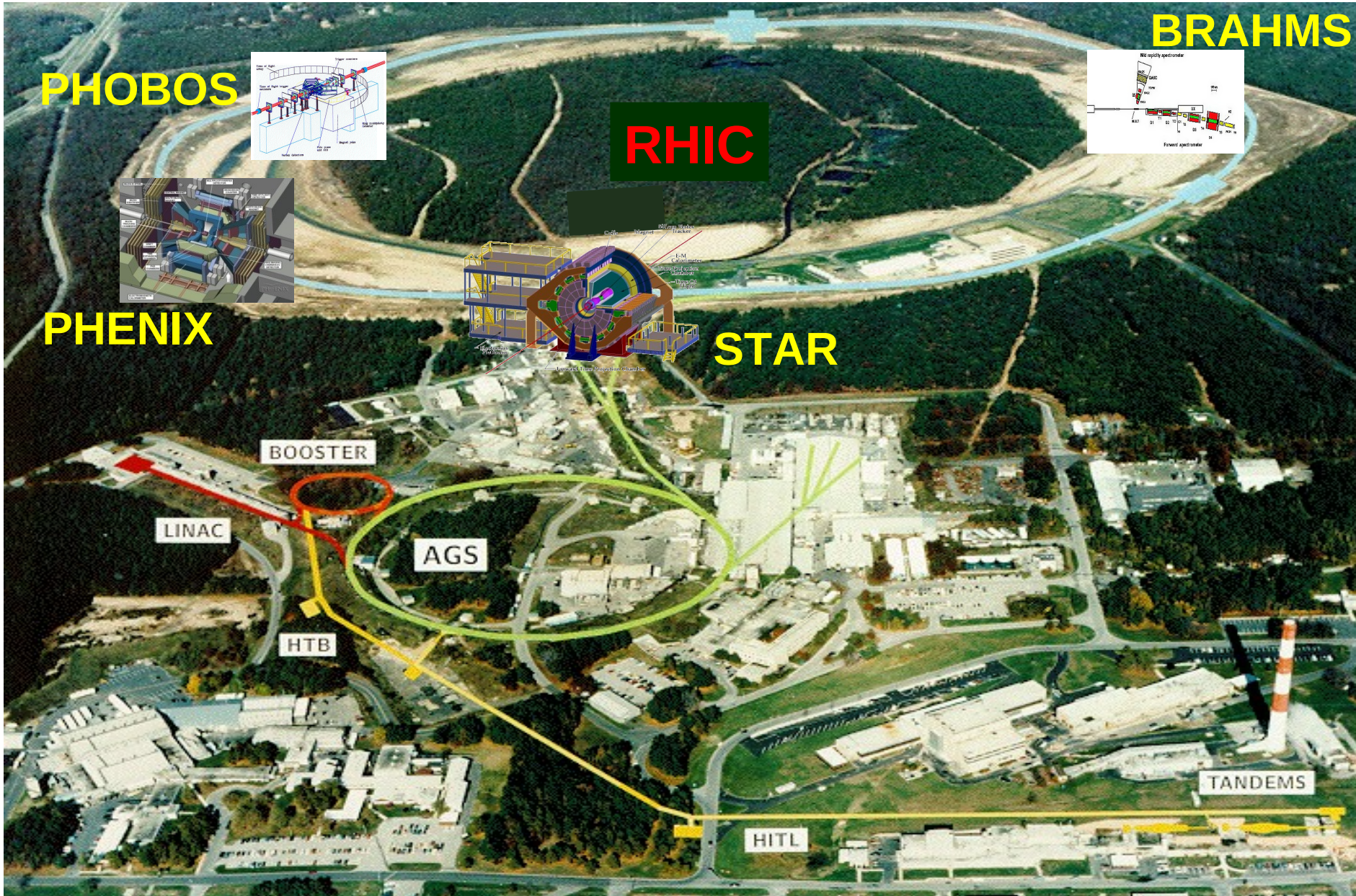
LINAC

HTB

AGS

HITL

TANDEM



RHIC – ускоритель с периметром окружности 3.8 км, с двумя идентичными кольцами из сверхпроводящих магнитов для встречных пучков протонов или ядер с энергией 100 ГэВ на нуклон в 6 точках пересечения. Светимость пучка

$$\mathbf{L(Au)} = 4 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 0.4 \text{ mb}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\mathbf{L(p)} = 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 4 \times 10^5 \text{ mb}^{-1} \text{ s}^{-1} .$$

В 4-х точках пересечения колец расположены детекторы 4-х экспериментальных групп

STAR, PHENIX, PHOBOS, BRAHMS

Задача. Для оценок приводят светимость за год.

Определите годовую светимость на RHIC для A+A и p+p столкновений. Вычислите полное число взаимодействий ядер Au+Au, считая полное неупругое сечение равным $\sigma = \pi(R_1 + R_2)^2$



$$1 \text{ mb} = 10^{-3} * 10^{-24} \text{ cm}^2, \quad 1 \text{ cm}^{-2} = 10^{-27} \text{ mb}^{-1}$$

На коллайдере RHIC

4 дополняющих друг друга эксперимента:

2 «больших»:

STAR – большой «аксептанс» адронного и электромагнитного детекторов позволяет изучать много-частичные корреляции, странные и очарованные адроны, восстанавливать струи в $p+p$ столкновениях.

PHENIX – предназначен для измерения жестких проб КХД таких, как адроны с большими p_T , прямые фотоны, лептонные пары и адроны с большими ароматами

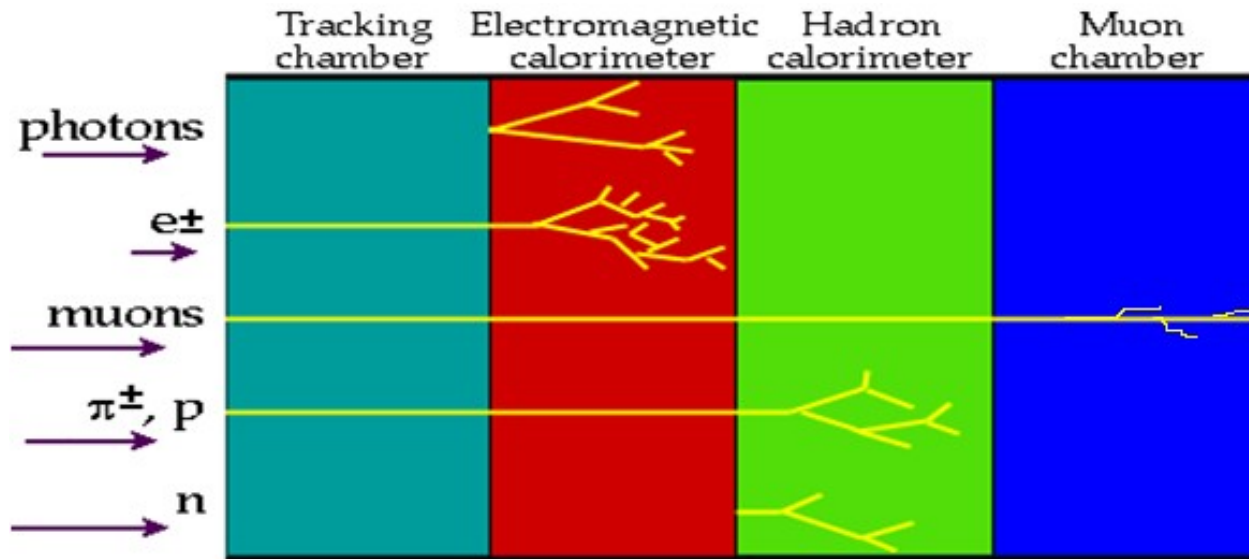
2 «маленьких»:

BRANDS – широкая область значений «быстрот» и идентификация частиц.

PHOBOS – перекрывает почти полный телесный угол ($|\eta| < 11$) для заряженных частиц, обеспечивая превосходные измерения глобальных характеристик на RHIC с идентификацией частиц.

Общие принципы выбора детекторов

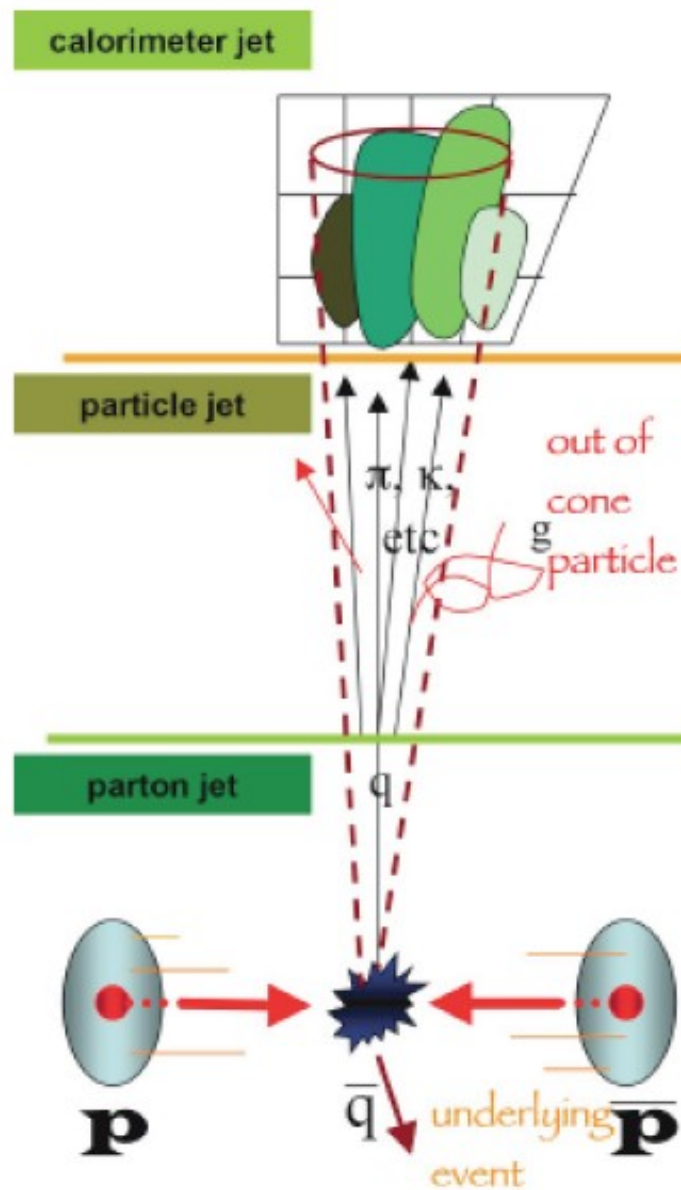
Частицы измеряются различными детекторами и идентифицируются по характерным следам в веществе.



Кварки и глюоны реконструируются по адронным струям.

Аромат кварка определяется по реконструкции адронных распадов тяжелых мезонов и вторичных вершин распада.

Струи партонов



Конструкция детекторов



CMS Detector



ECAL

Scintillating PbWO₄ crystals

4 Teslar
Superconducting

COIL



Plastic scintillator/brass sandwich

HCAL

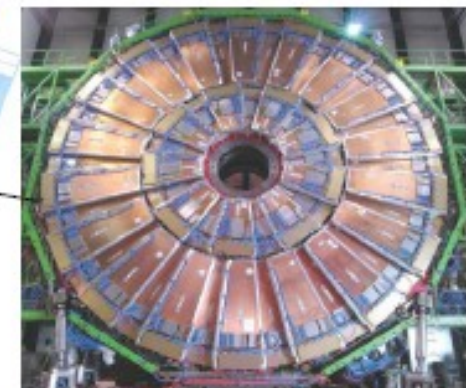


TRACKER
Silicon Microstrips
Si Pixels



IRON YOKE

MUON ENDCAPS



MUON BARREL



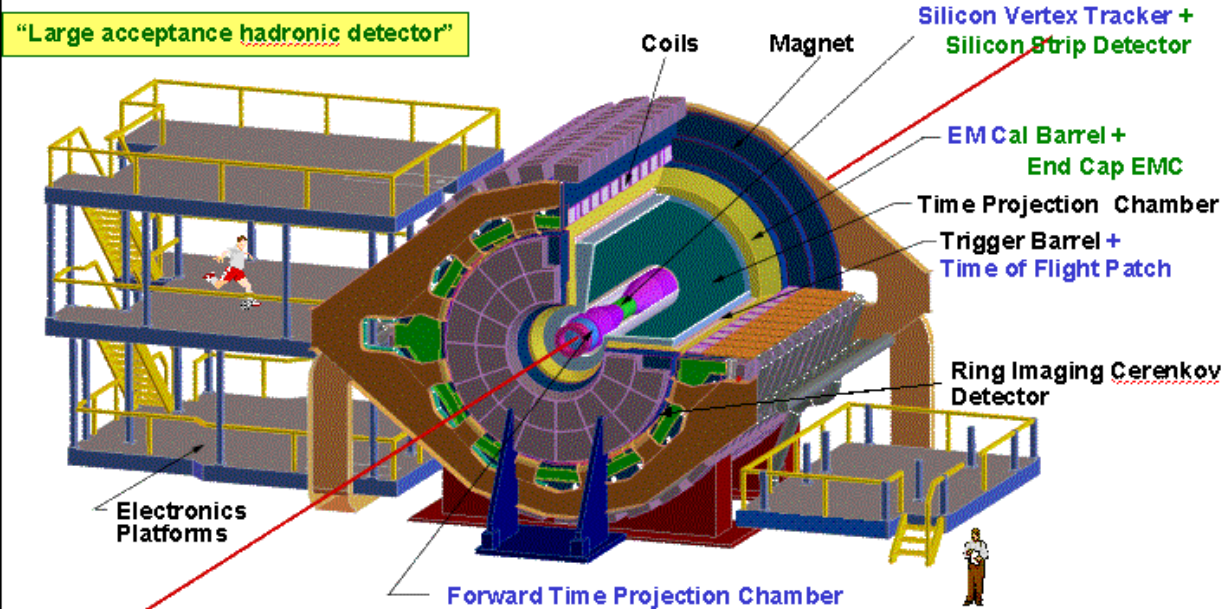
Drift Tube
Chambers (DT)
Resistive Plate
Chambers (RPC)

Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

Length: 21.6 m
Diameter: 15 m
Weight: ~12500 tons

Эксперимент **STAR** имеет большую времени-пролетную камеру (TPC) внутри соленоидального магнита радиуса 260 см и магнитным полем 0.5 Т. Радиус TPC 200 см с полным перекрытием по азимутальному углу ϕ и с захватом по псевдобыстроте $|\eta| < 1.4$. TPC позволяет идентифицировать частицы по потерям dE/dx и восстанавливать вторичные вершины для слабо распадающихся частиц. Дополнительное измерение траекторий обеспечивается внутренними силиконовыми дрейфовыми детекторами при средних $|\eta|$ и торцевыми детекторами FTPC при $2.5 < |\eta| < 4$.

STAR Detector at RHIC



Detectors Run 2000

- TPC, Trigger Barrel, RICH

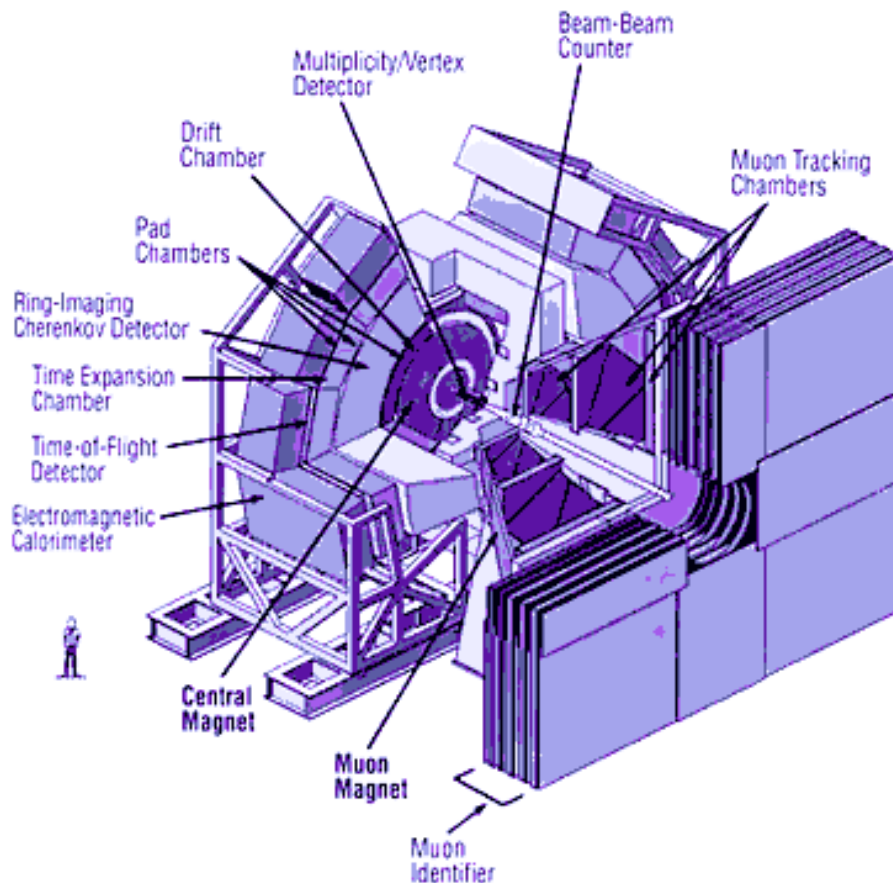
New Detectors in 2002:

- SSD, PMD* (not shown)

Фотоны и электроны измеряются баррельными и торцевыми калориметрами (EMC) в области $-1 < \eta < 2$ и для всех ϕ . Имеются дополнительные детекторы при «нулевом» угле (ZDC) для специального отбора событий.

Эксперимент **PHENIX** имеет хорошее разрешение по массе частиц и малую гранулированность детекторов из 13 подсистем (350000 каналов):

- 1) 2 центральных спектрометра для электронов, фотонов и адронов в области $|\eta| < 0.35$, $\Delta\phi = \pi$,
- 2) 2 торцевых спектрометра для мюонов ($|\eta| = 1.15-2.25$, $\Delta\phi = \pi$) и
- 3) 4 глобальных внутренних детекторов. Два типа ЕМС измеряют фотоны и электроны.



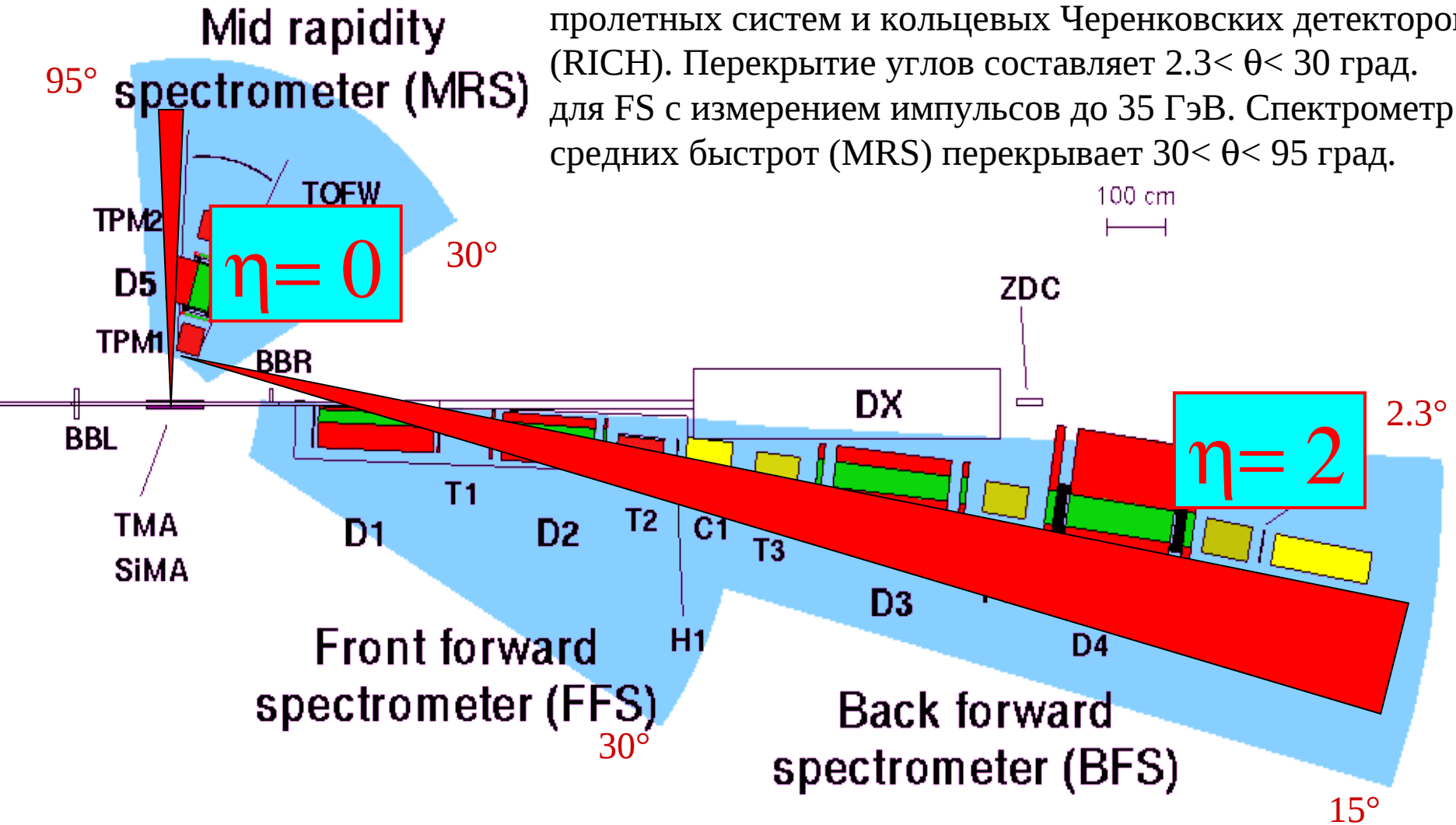
Детектор RICH дает дополнительную идентификацию электронов.

Заряженные адроны измеряются в аксиальном магнитном поле 1.15 Т дрейфовыми камерами (DC).

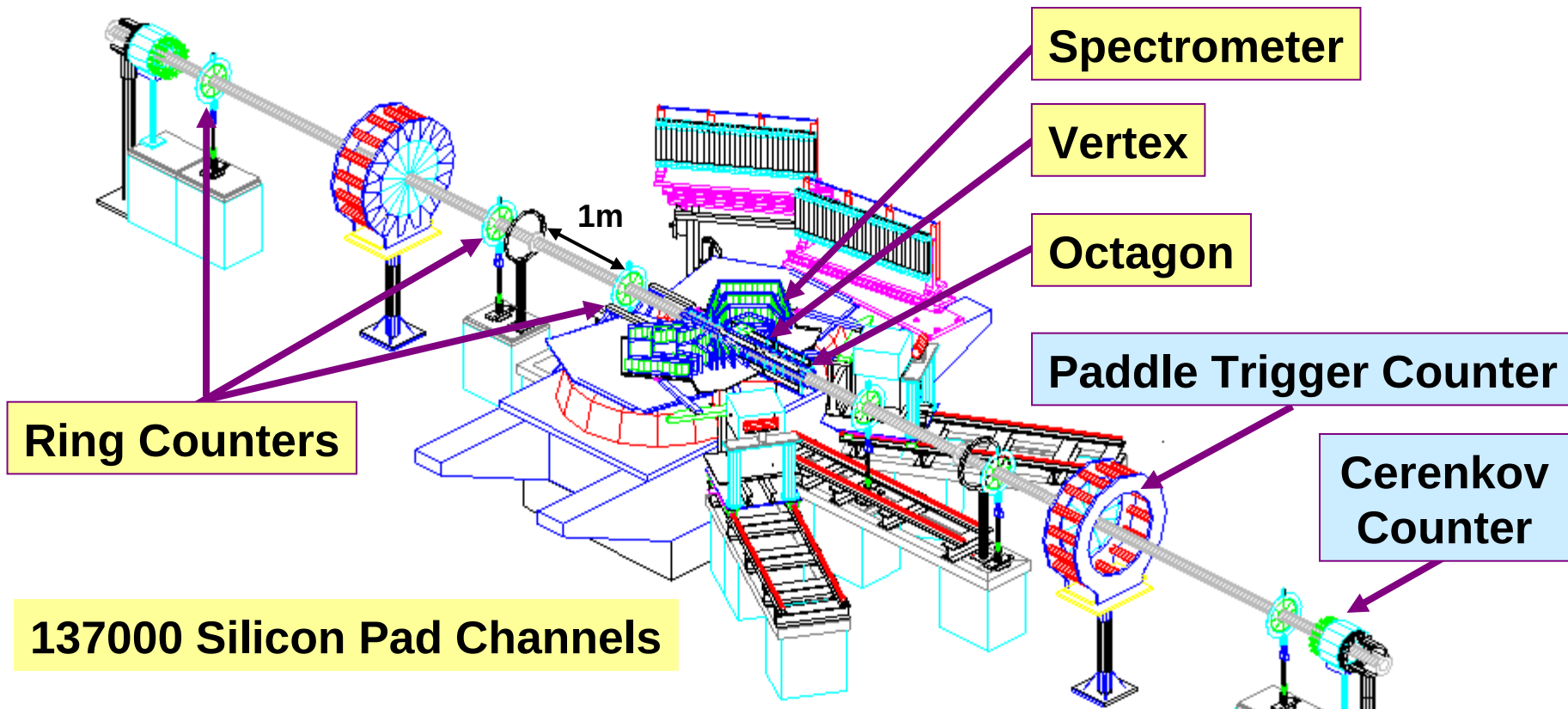
Идентификация частиц π^\pm , K^\pm , и p , \bar{p} выполняется времени-пролетными детекторами (TOF).

Уникально быстрая система сбора данных (DAQ) сохраняет на диске 300 МВ/с события размером 100 КВ, т.е. со скоростью 3 kHz.

Эксперимент **БРАHMS** имеет 2 подвижных магнитных спектрометра с идентификацией адронов и возможностью измерять частицы при больших быстротах до $y = 4$. Два спектрометра состоят из 5 трековых камер 5 магнитных диполей с полем до 1.5 Т, 2-х времени-пролетных систем и кольцевых Черенковских детекторов (RICH). Перекрытие углов составляет $2.3 < \theta < 30$ град. для FS с измерением импульсов до 35 ГэВ. Спектрометр средних быстрот (MRS) перекрывает $30 < \theta < 95$ град.



The PHOBOS Detector



Эксперимент **PHOBOS** основан на кремниевых pad детекторах и перекрывает почти полный телесный угол ($|\eta| < 11$) для заряженных частиц. Он состоит из 4-х подсистем. Многочаеистая система (Octagon, $|\eta| < 3.2$ и кольца, $|\eta| < 5.4$), прекрасно сегментированный вершинный детектор и 2-х плечевой магнитный спектрометр (поле 1.5 T) при средних быстротах, включая времени-пролетную стенку и несколько триггерных детекторов. Идентификация частиц (P I D) основана на времени пролета и на потерях энергии в кремниевых детекторах.

Коллайдер **LHC**

(начало работы в 2009 г)

Большой Адронный Коллайдер
(БАК)

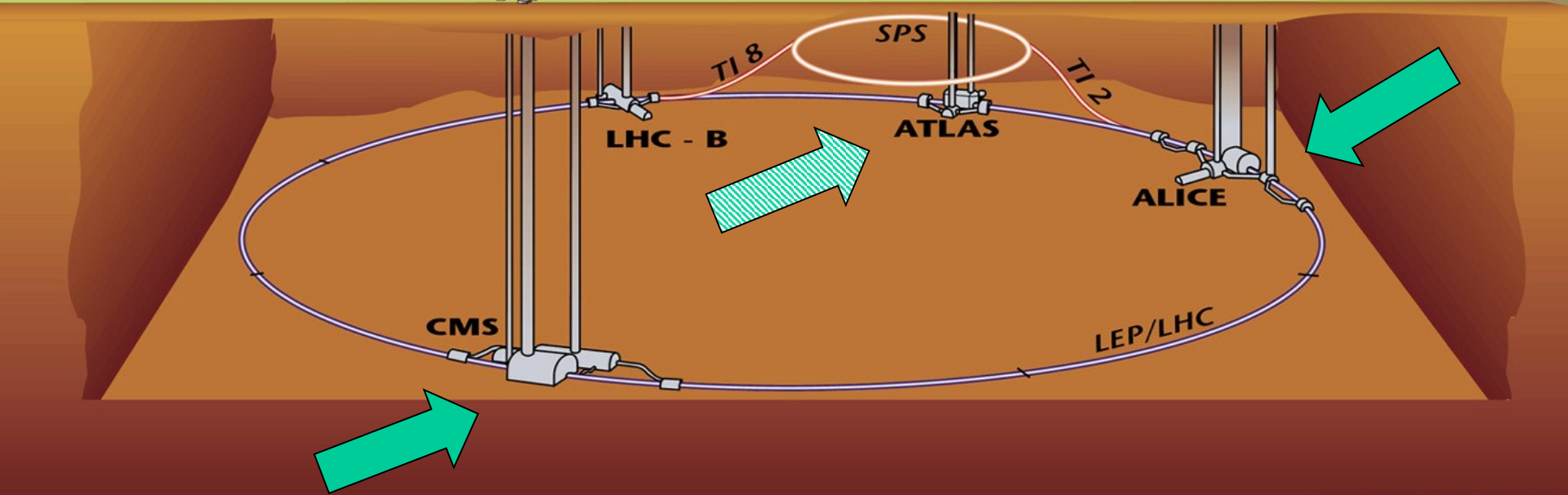
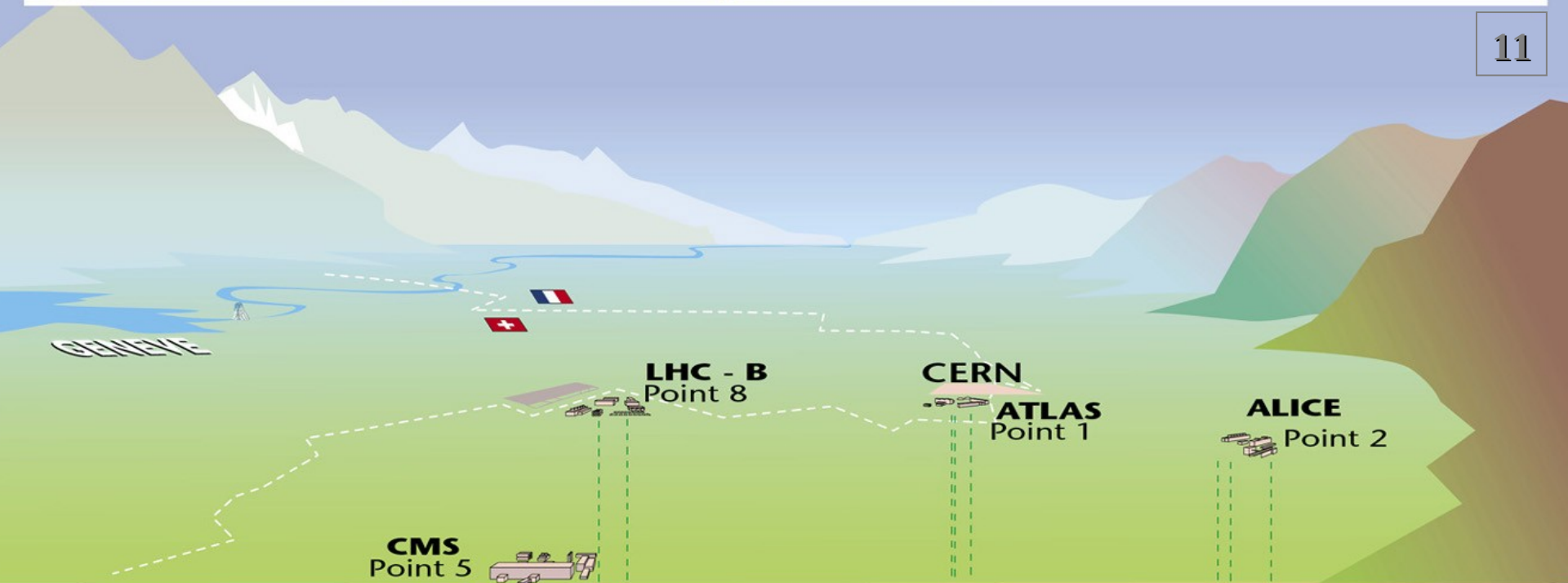
на энергию $\sqrt{s}=14000$ ГэВ в p+p
и $\sqrt{s}= 5500$ ГэВ в Pb+Pb

СТОЛКНОВЕНИЯХ



$$7000 * 82 / 208 = 2760$$

Overall view of the LHC experiments.

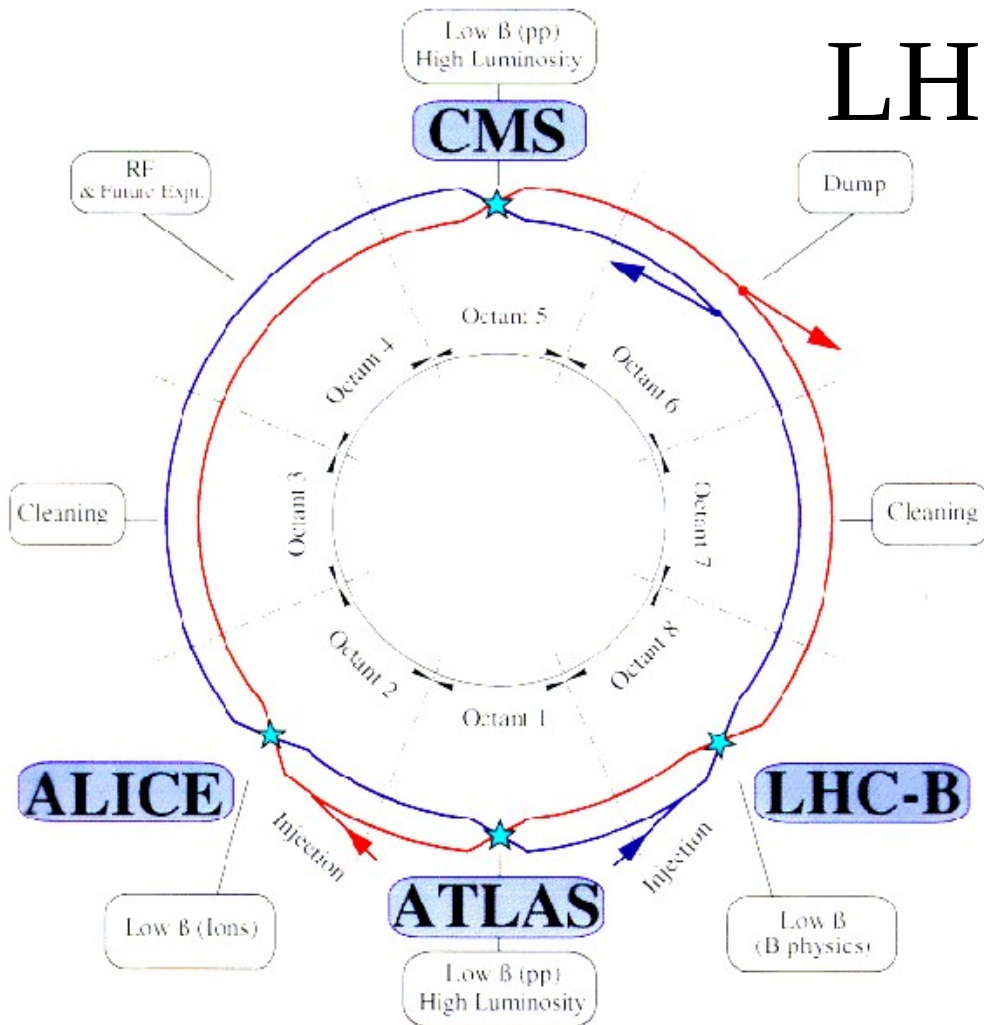


What we need to produce new physics.

an accelerator that is able to produce masses up to a few TeV



LHC



Установки:
ATLAS, CMS,
ALICE, LHC-B

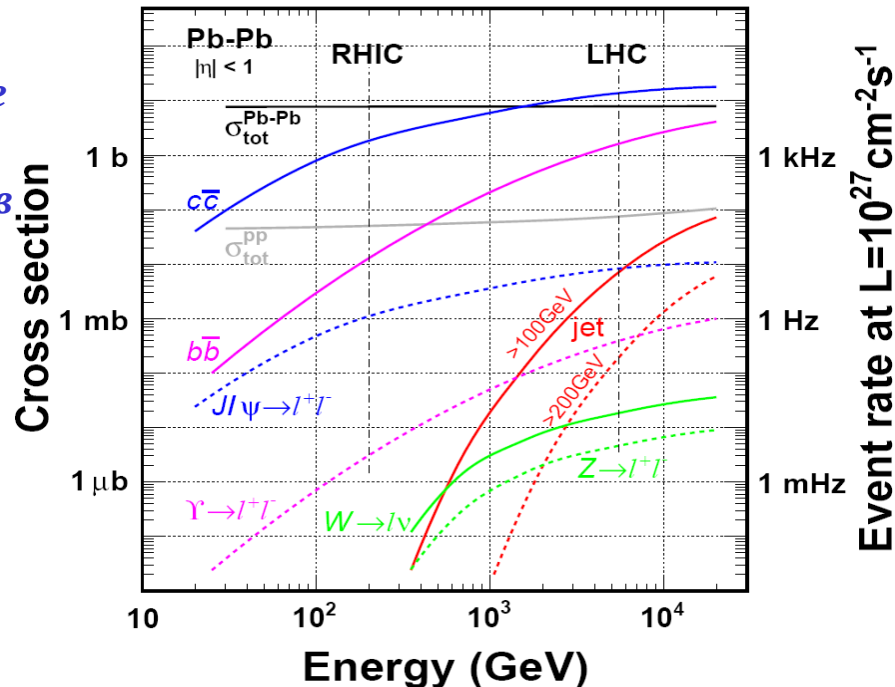
ALICE, CMS и ATLAS (дополнительно) будут исследовать кварк-глюонную материю в столкновениях релятивистских тяжелых ионов (Au+Au, Pb+Pb)

LHC layout

Характеристики ЛНС и ожидаемые сечения процессов

тип пучков	$\sqrt{s_{NN}}$ (ТэВ)	светимость L_0 ($\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$)	$\langle L \rangle / L_0$ (%)	время работы (сек/год)	σ_{geom} (bn)
pp	14.0	10^{34}		10^7	0.07
PbPb *	5.5	$4.2 \cdot 10^{26}$	70-50	10^6	7.7

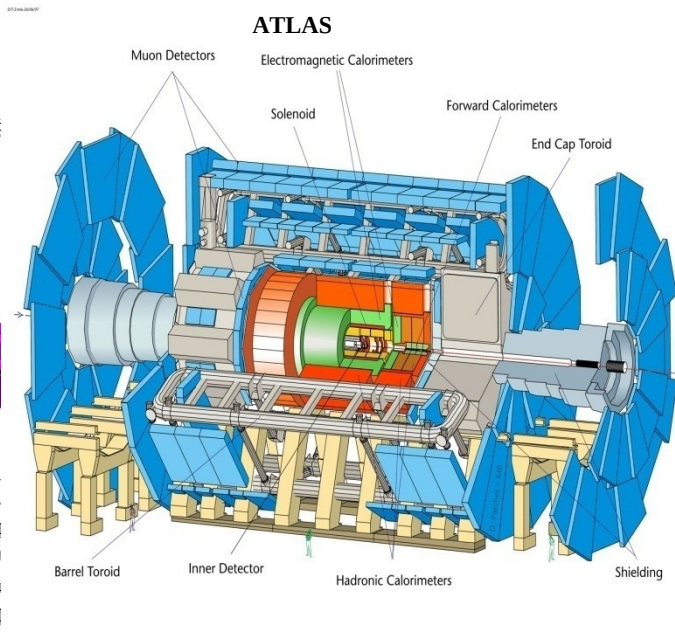
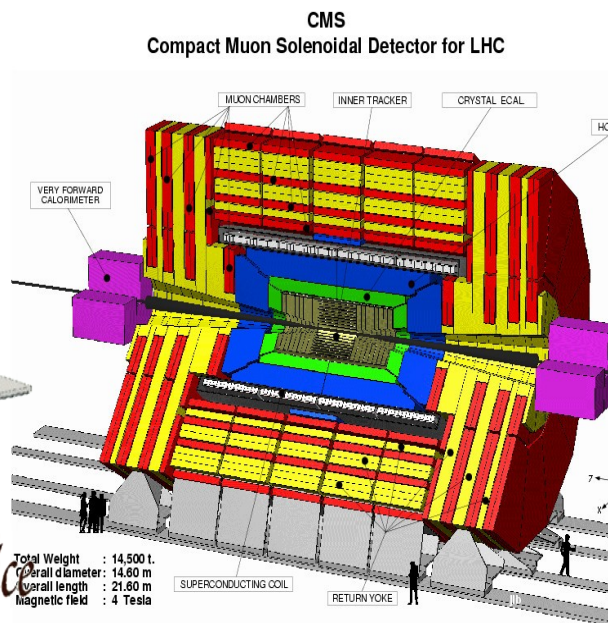
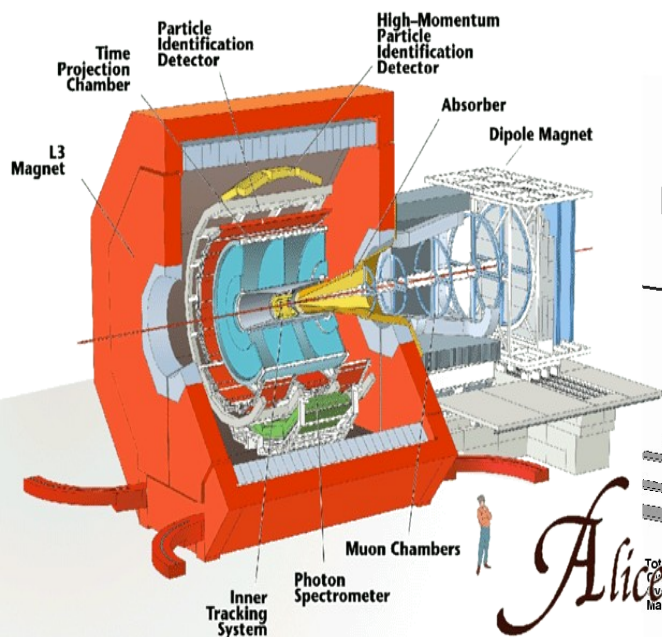
* В перспективе также столкновения pPb и более легких ионов



Потенциал физики тяжелых ионов на ЛHC (Pb+Pb,

$\sqrt{s} = 5500$ А ГэВ, старт – 2010)

Новый режим физики тяжелых ионов с доминированием жестких
КХД-процессов в горячей и долгоживущей КТП
взаимодополняющие измерения **ALICE & CMS/ATLAS**

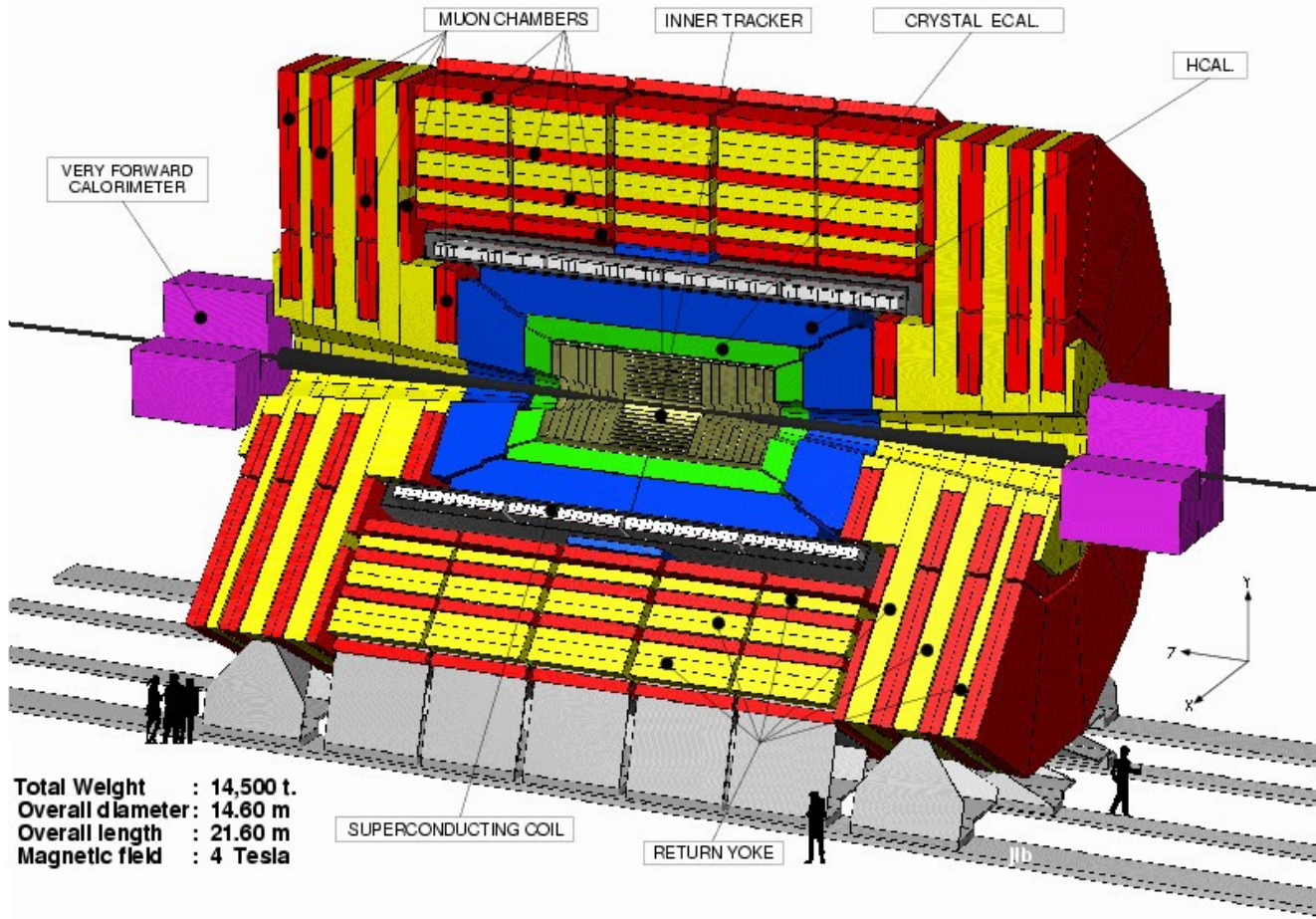


ALICE (трекинг малых p_T , ID адронов,
 e и μ (J/ψ , Y), γ , ...)
мягкие тесты + некоторые жесткие тесты

CMS/ATLAS (трекинг частиц больших p_T ,
 e , μ (J/ψ , Y , Z), γ , струи,...)
жесткие тесты + некоторые мягкие тесты

The CMS Detector

Compact Muon Solenoidal Detector for LHC



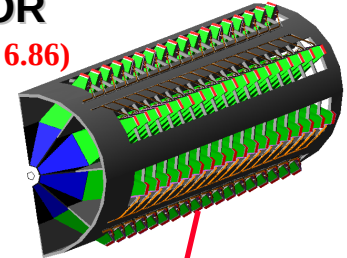
Total Weight : 14,500 t.
Overall diameter : 14.60 m
Overall length : 21.60 m
Magnetic field : 4 Tesla

SUPERCONDUCTING COIL

RETURN YOKE

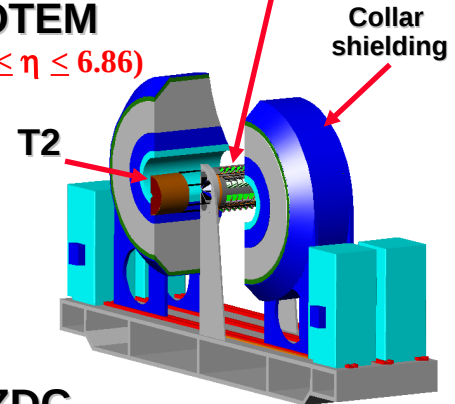
CASTOR

$(5.32 \leq \eta \leq 6.86)$



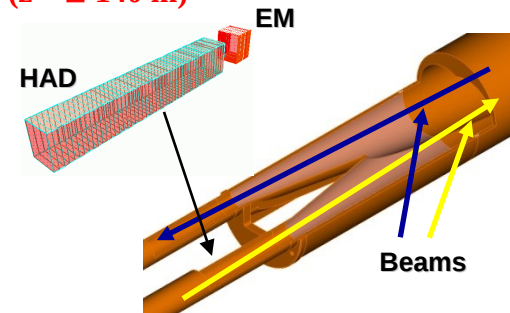
TOTEM

$(5.32 \leq \eta \leq 6.86)$

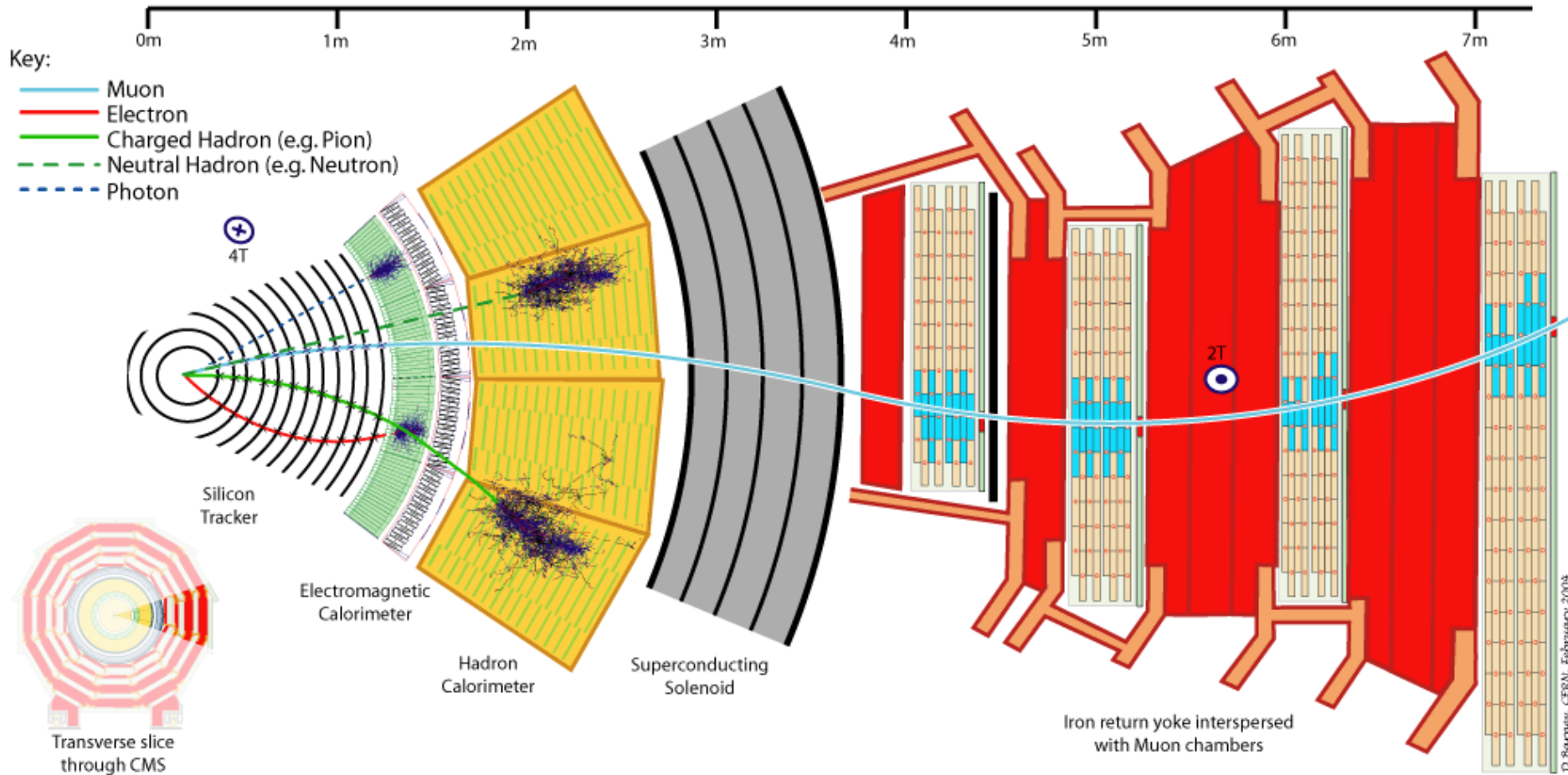


ZDC

$(z = \pm 140 \text{ m})$



Пример расположения детекторов на установке CMS LHC

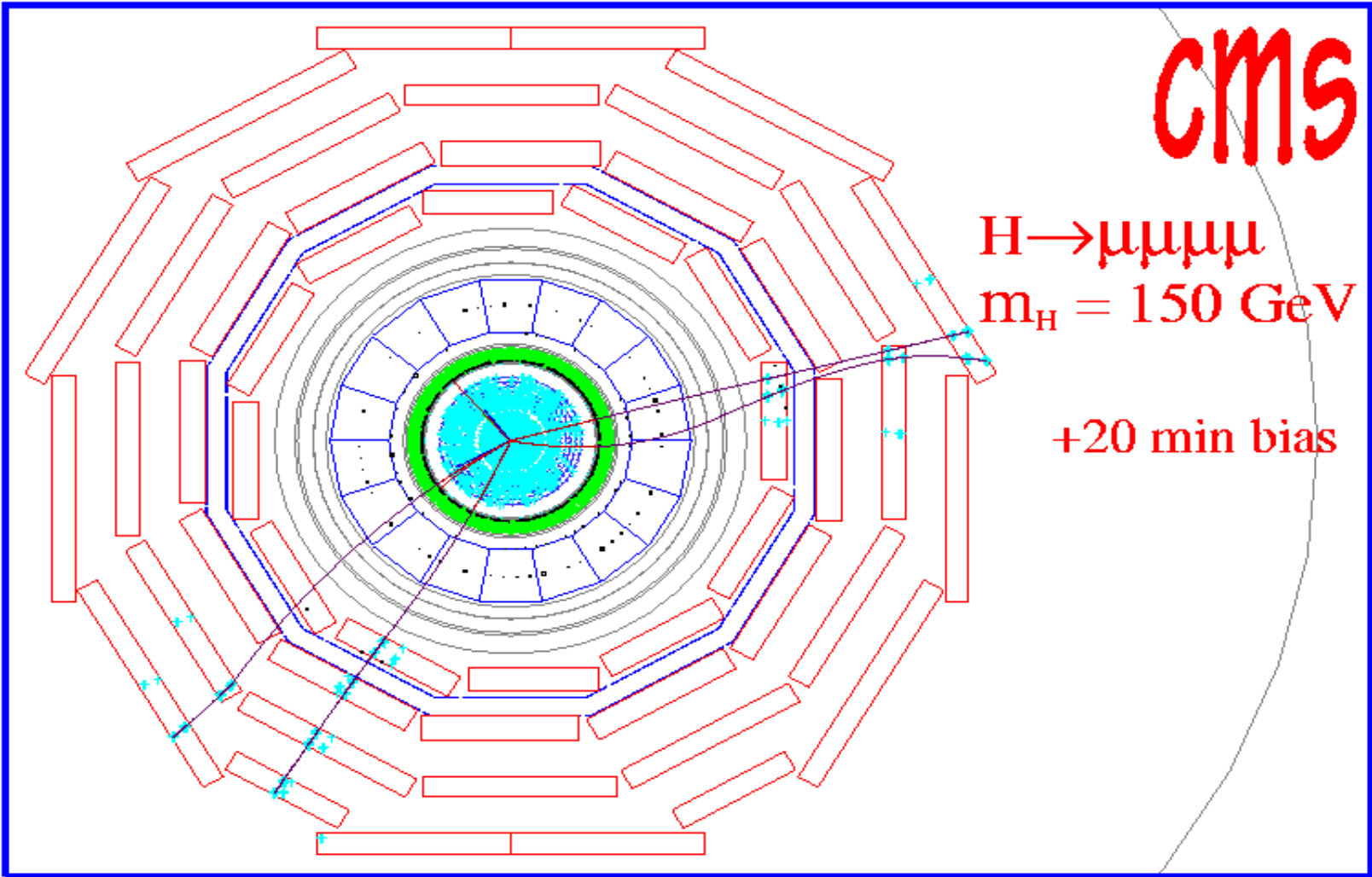


CMS: Higgs in 4 muons

CMS

$H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$
 $m_H = 150 \text{ GeV}$

+20 min bias



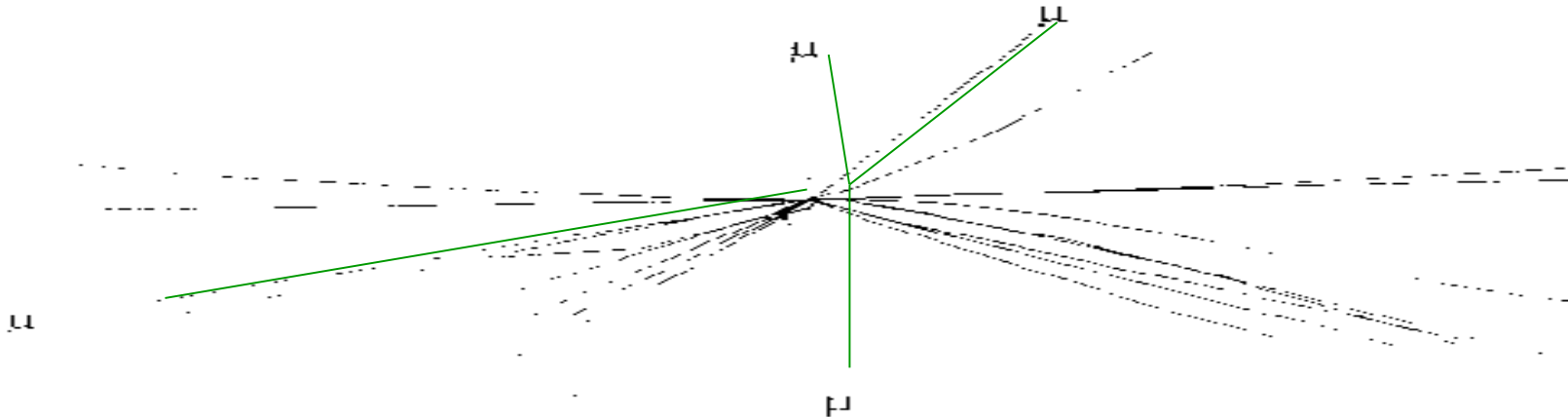
Моделирование события в CMS детекторе

30 minimum bias events +

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$



all charged particles with $|\eta| < 2.5$



reconstructed tracks with $p_t > 2.0$ GeV

The LHC Design Parameters

$$L = \frac{N_b^2 n_b f_{\text{rev}} \gamma_r F}{4\pi \epsilon_n \beta^*}$$

N_b = number of proton per bunch

n_b = number of bunches

f_{rev} = rotation frequency ($\sim 11\text{Hz}$)

F = crossing angle factor

Rms transverse beam size $=\sqrt{\epsilon\beta/\gamma}$

ϵ_n = renorm. transverse emittance

β^* = optics at beam crossing (m)

γ_r = relativistic factor

IP1: Atlas

IP5: CMS

IP2: Alice

IP8: LHCb

Nominal settings	
Beam energy (TeV)	7.0
Number of particles per bunch	$1.15 \cdot 10^{11}$
Number of bunches per beam	2808
Crossing angle (μrad)	285
Norm transverse emittance ($\mu\text{m rad}$)	3.75
Bunch length (cm)	7.55
Beta function at IP 1, 2, 5, 8 (m)	0.55,10,0.55,10

3.2×10^{14}
p/beam

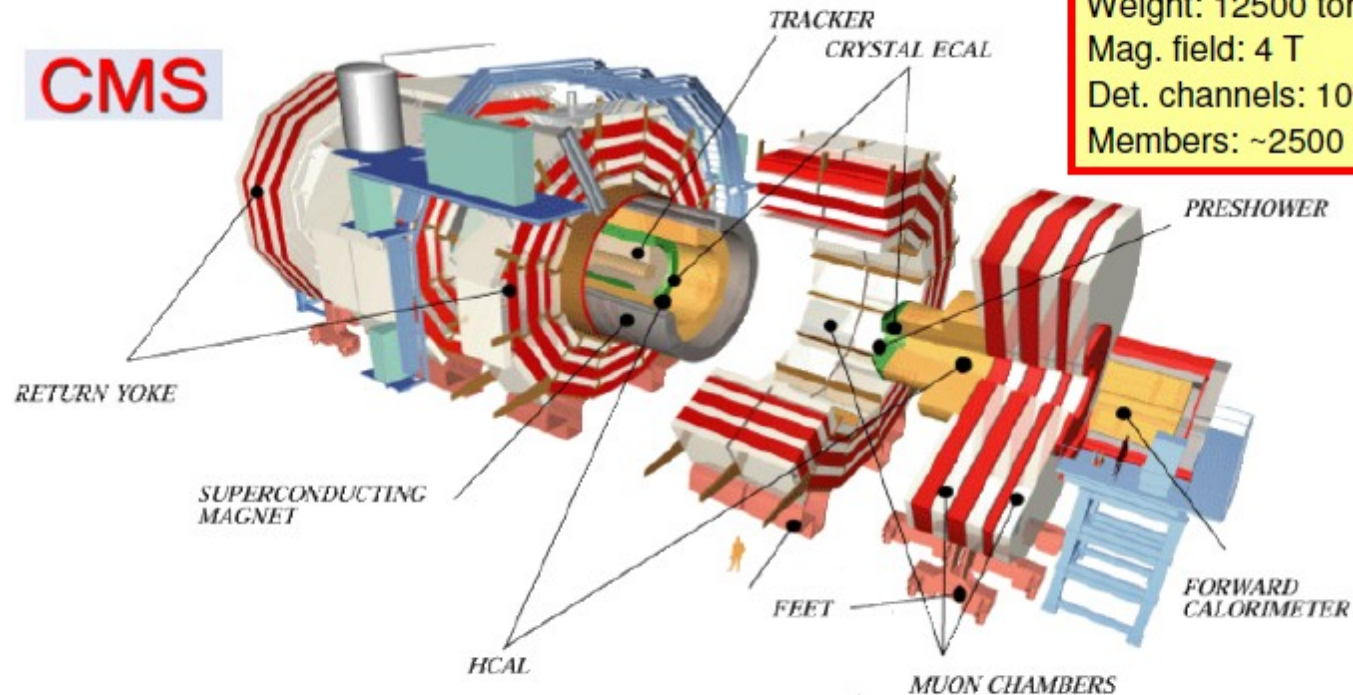


25 ns between
crossing

Derived parameters	
Luminosity in IP 1 & 5 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10^{34}
Luminosity in IP 2 & 8 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)*	$\sim 5 \cdot 10^{32}$
Transverse beam size at IP 1 & 5 (μm)	16.7
Transverse beam size at IP 2 & 8 (μm)	70.9
Stored energy per beam (MJ)	362

Запасные слайды

CMS: general purpose detector



- Multi-purpose detector: SM, new physics, heavy-ions, ...
- Key aspects: largest magn. field (highest- p_T), fwd. acceptance, heaviest

Упражнения для промежуточного зачёта

Выполнить упражнения в «LecT_1_exercise_hlp» в интерактивном режиме на персональном компьютере

Для начала полезно просмотреть текст и выполнить упражнения в разделах RL1 (EL1), посвященным кваркам и структуре адронов и частично КХД

Затем для промежуточного зачета нужно выполнить упражнения в разделах EL2_1, EL2_2 , EL2_3, EL2_4

В заключении разгадайте кроссворд в «RL1ENDFU»