

Научная программа и инфраструктура Лаборатории физики высоких энергий



Д.Пешехонов. INP, Astana, 01.06.2026



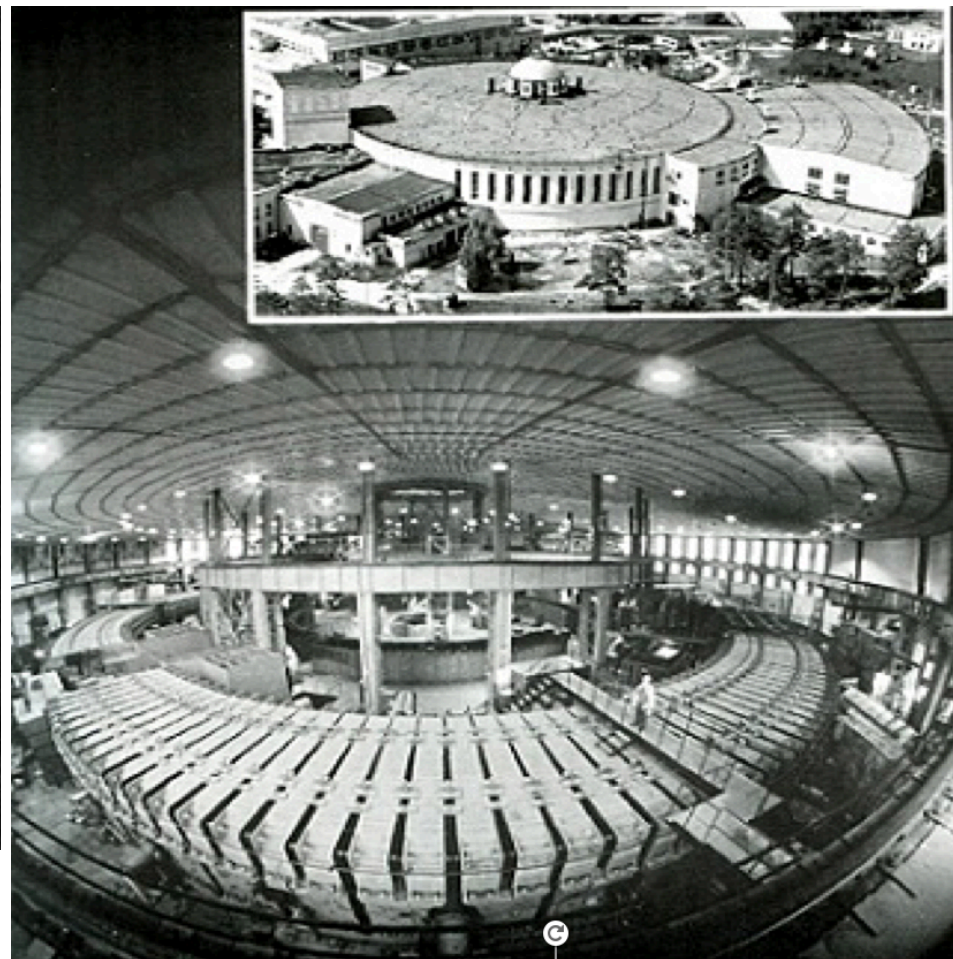


1953 основана Электрофизическая лаборатория АН СССР

1956 создана Лаборатория высоких энергий



Д.И.Блохинцев, В.И.Векслер,
Ф.Жолио-Кюри



«Чтобы задумать и построить такое сооружение, нужна была очень большая смелость».
Нильс Бор

1949 г. – начало проектирования; 1952 г. – начало строительства;

1957 г., 16 апреля, 23 часа 40 минут – есть проектная энергия 10 ГэВ !!;

1969 г. – ускорение дейтронов; 1972 г. – получен выведенный пучок протонов;

1981 г. – ускорение ядер от H до Si; 1983 г. – ускорение поляризованных дейтронов;



1957

Синхрофазотрон

Протонный синхротрон –
лидер по энергии (10 ГэВ)

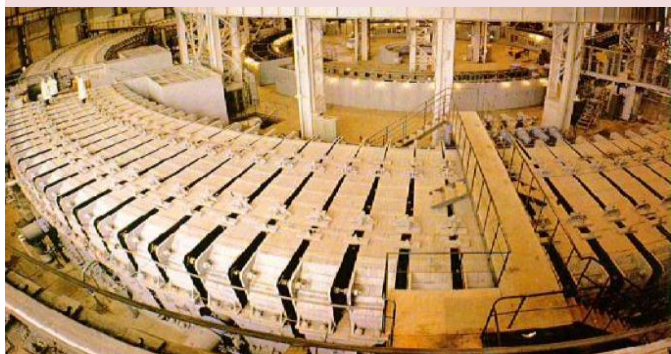


*Начало эры
физики
высоких
энергий*

В.И. Векслер, автор

*«Принципа
автофазировки»*

(1944)



1993

Нуклотрон

Первый в Европе
сверхпроводящий ускоритель
тяжелых ионов



(Теватрон, 1987,
pp̄)

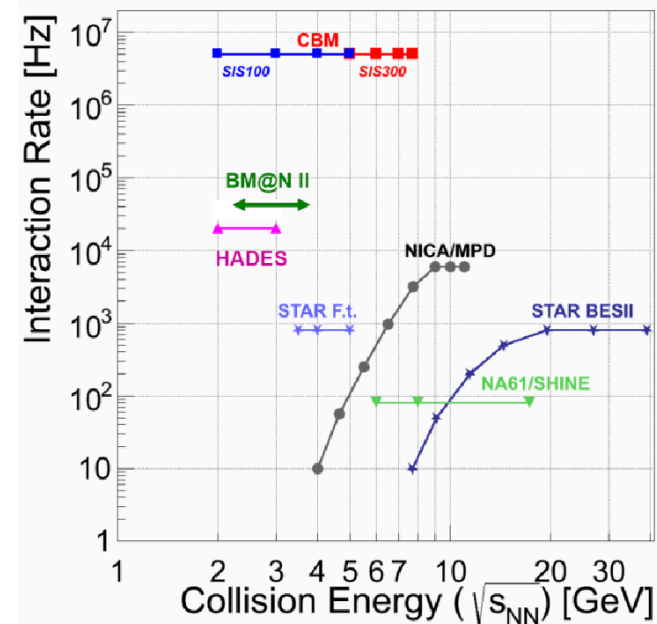
А.М. Балдин
пионерские
исследования по
релятивистской ядерной
физике



NICA

Выведенные пучки
BM@N – 2018;
Сверхпроводящий
коллайдер тяжелых ионов;
MPD – 2026; SPD – 2030+

Исследования ядерной
материи при экстремально
высоких плотностях (GSI,
BNL, CERN, **JINR**, FAIR)



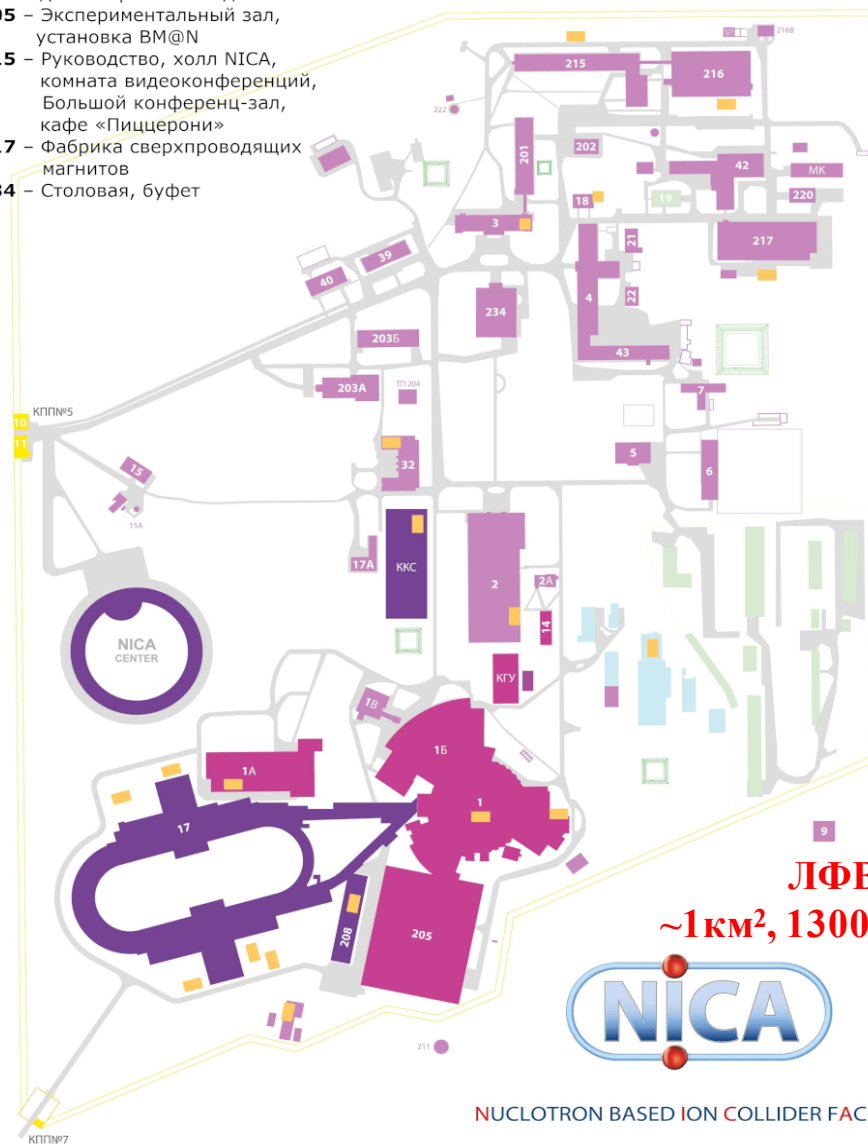


16 Стран-участниц
5 ассоциированных членов
2 страны с особым статусом
 (соглашение о сотрудничестве на правительственном уровне)
900+ партнерских исследовательских организаций и университетов из **60+** стран

7 лабораторий
~ 5200 сотрудников
 из **33 стран**

Назначение зданий на схеме площадки ЛФВЭ

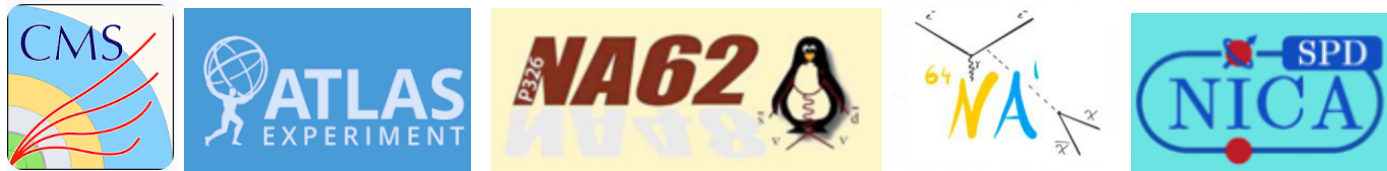
- 1** – Ускорительный комплекс: источники ионов, линейные ускорители, Бустер и Нуклотрон
- 2** – Пультавая ускорительного комплекса NICA, офисы ускорительного отделения
- 3** – Офисы, библиотека, малый конференц-зал
- 17** – Здание коллайдера NICA
- 39** – Административное здание
- 205** – Экспериментальный зал, установка BM@N
- 215** – Руководство, холл NICA, комната видеоконференций, Большой конференц-зал, кафе «Пиццерони»
- 217** – Фабрика сверхпроводящих магнитов
- 234** – Столовая, буфет



ЛФВЭ это
~1км², 1300 сотрудников

Научная программа ЛФВЭ

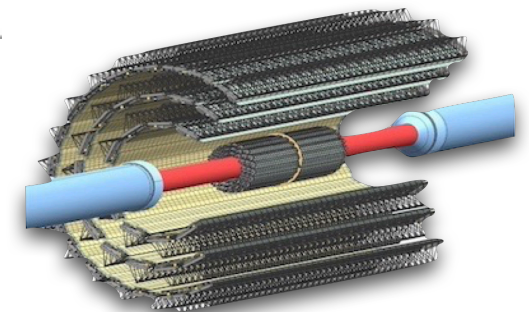
- Ускорительная физика (ЛНС, NICA, FAIR, СП-магниты)
- Физика частиц (проверка СМ, поиск новой физики)



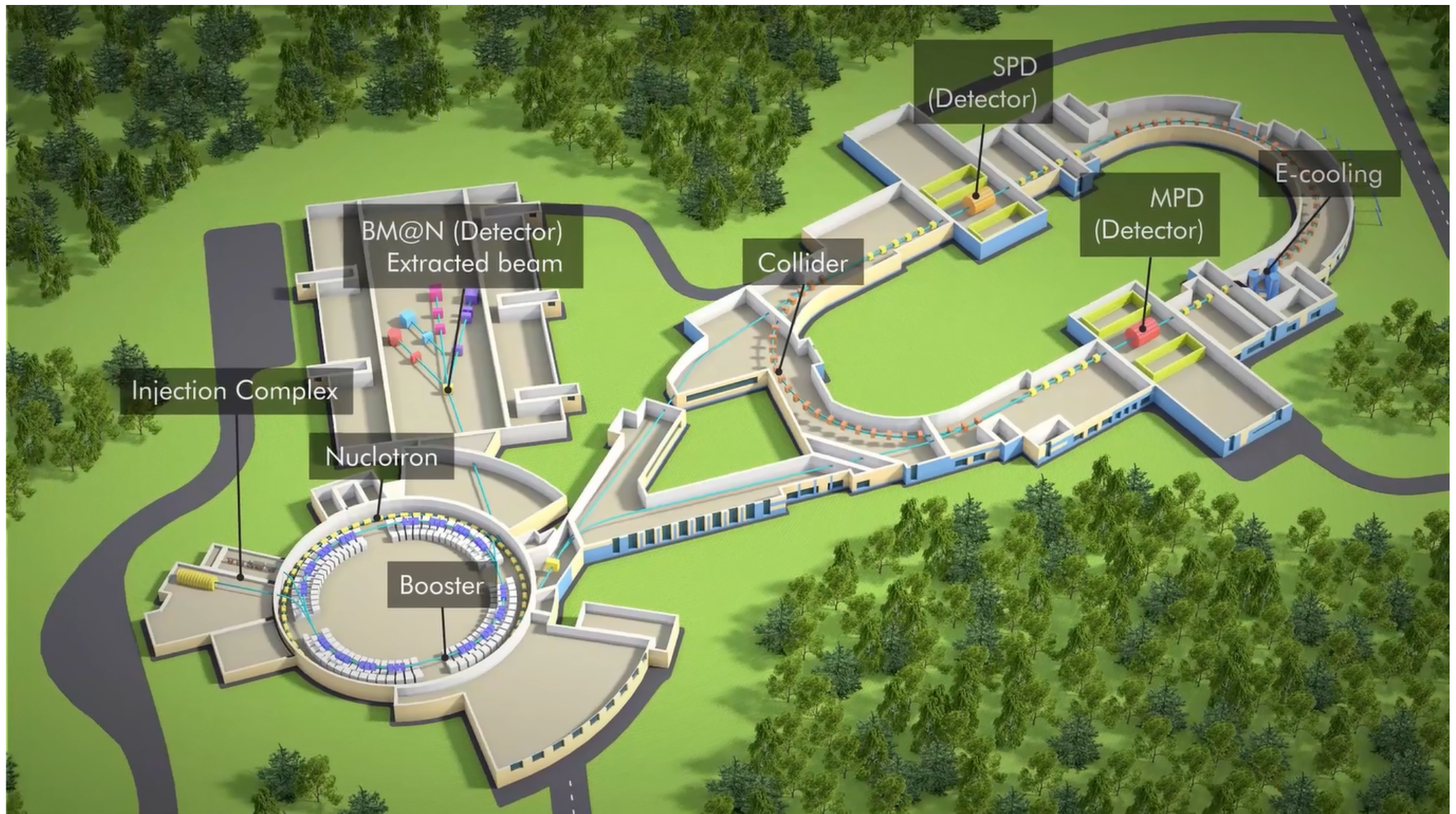
- Физика тяжелых ионов высоких энергий



- Детекторные технологии и прикладные исследования



- **Фундаментальные исследования** в физике, биологии и др. науках.
- Медицина (терапия опухолей, диагностика, производство радиоактивных изотопов).
- Безопасность (диагностика скрытых веществ).
- Добыча ресурсов (нейтронный каротаж скважин при добыче углеводородов).
- Материаловедение (обработка поверхностей путём имплантации ионов, увеличение прочности, антикоррозийные технологии).
- Производство микроэлектроники.
- Генерация синхротронного излучения на электронных ускорителях.
- Генерация нейтронного излучения электронами.
- Трансмутация ядерных отходов.
- Промышленное применение ускорителей (сварка и резка материалов, стерилизация продуктов, медицинских материалов и др.)



Источник легких ионов



**ЛУ-20 был запущен в 1974, модернизирован в 2007г., в 2016г. изготовлены
новый форинжектор RFQ и источник поляризованных ионов SPI**



*Линейный ускоритель
тяжелых ионов*



Линия инжекции в Бустер



<i>A/q (Целевой пучок Au³¹⁺)</i>	<i>6.25</i>
<i>Ток пучка</i>	<i>< 10 нА</i>
<i>Частота посылов</i>	<i>< 10 Hz</i>
<i>Энергия на выходе</i>	<i>3.2 MeV/u</i>

**Линейный ускоритель тяжелых ионов
ЛУТИ запущен в 2018 г.**

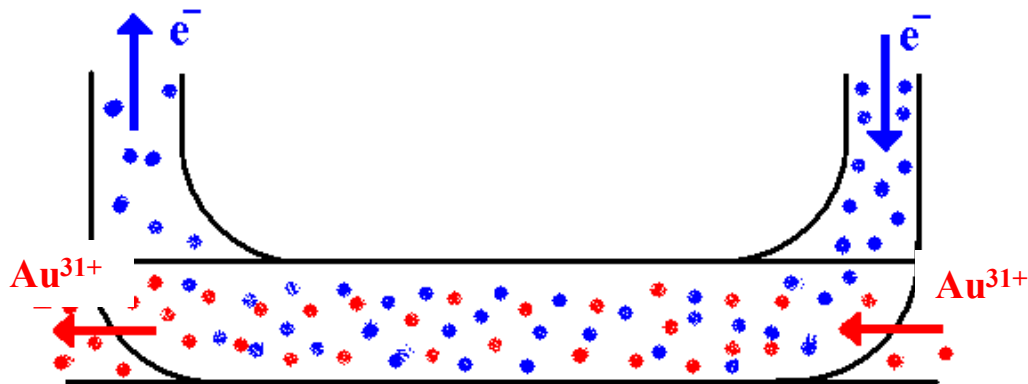
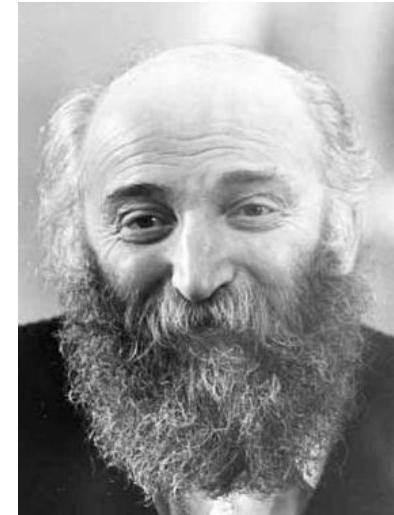


Параметр	
Периметр, м	210
Структура	DFO
Энергия инъекции, МэВ/нуклон	3.2
Максимальная энергия, МэВ/нуклон	578
Поле в диполях, Тл	1.8
Магнитная жесткость, Тл·м	25.0
Сорт ионов (проектный)	$^{197}\text{Au}^{31+}$ $^{209}\text{Bi}^{35+}$



Задача Бустера ускорить инжектированный пучок ионов **не потеряв интенсивность и сформировав банчи**, далее провести полную обдирку ионов ($\text{Au}^{31+} \rightarrow \text{Au}^{79+}$) и перевести в Нуклотрон для дальнейшего ускорения.

Реализовано специалистами из **Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН)** (Новосибирск), где исторически зародился сам метод электронного охлаждения.



Электронное охлаждение это процесс термального обмена путем Кулоновского рассеяния между «горячими» тяжелыми частицами пучка и «холодными» электронами

Для того чтобы метод работал скорости пучков должны максимально совпадать.

Сверхпроводящий синхротрон (магниты «Дубна»: 1.8Тл, 2Тл/с)

**В работе
с марта 1993 года**

Периметр ~ 251м

М. жесткость < 43Тлм

**Медленный вывод
пучка: в 2000г.**

59 сеансов работы



**Ускорены пучки:
Ионы от p до Xe (C, Mg, Fe, Ar, Kr)
Поляризованные p & d**

**Энергия p max 12 GeV
Лёгкие ионы max 6 GeV/u
Тяжелые ионы max 4.5 GeV/u**

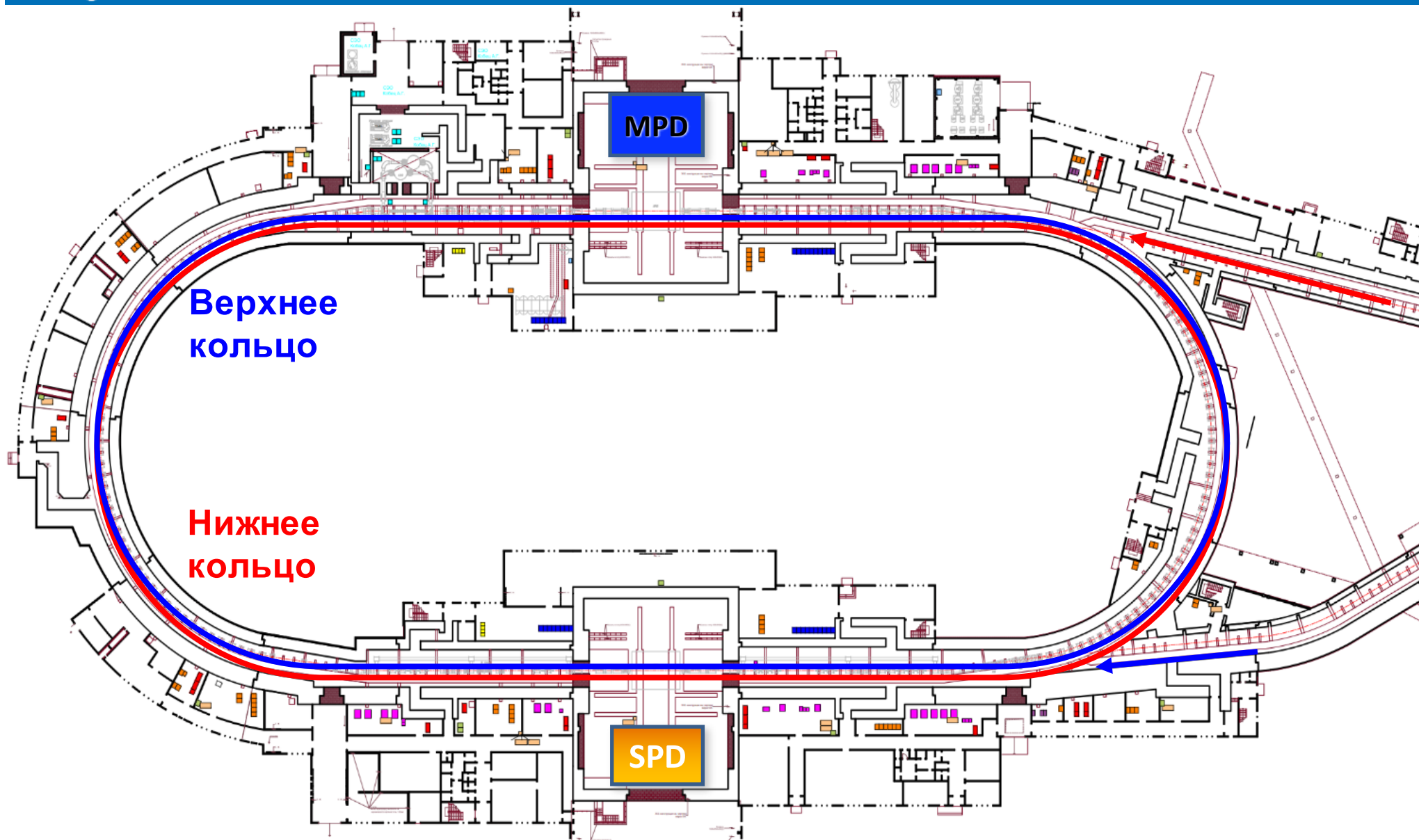


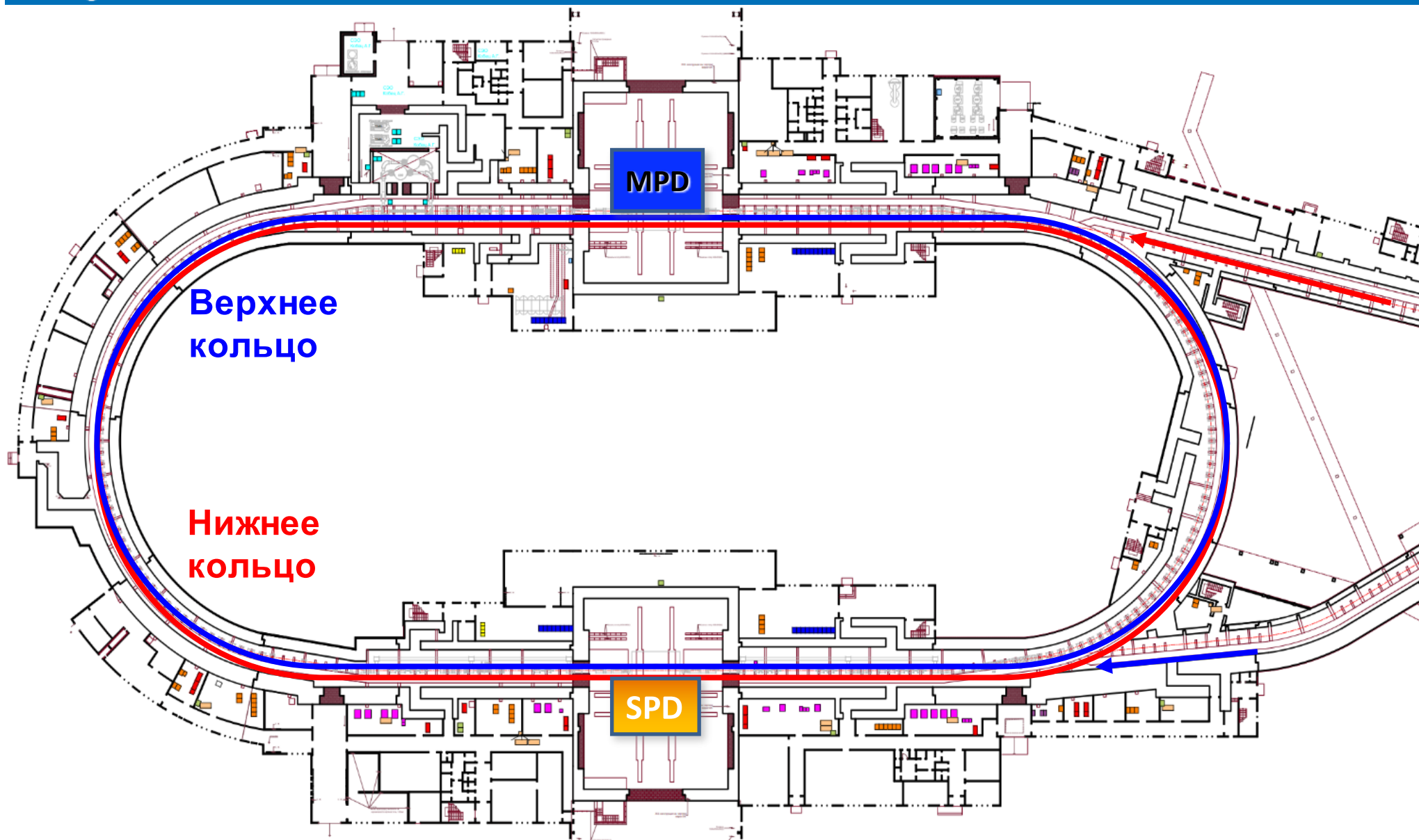
Строительная площадка. Свайное поле под арки, шпунт Ларсена в прямки MPD и SPD.

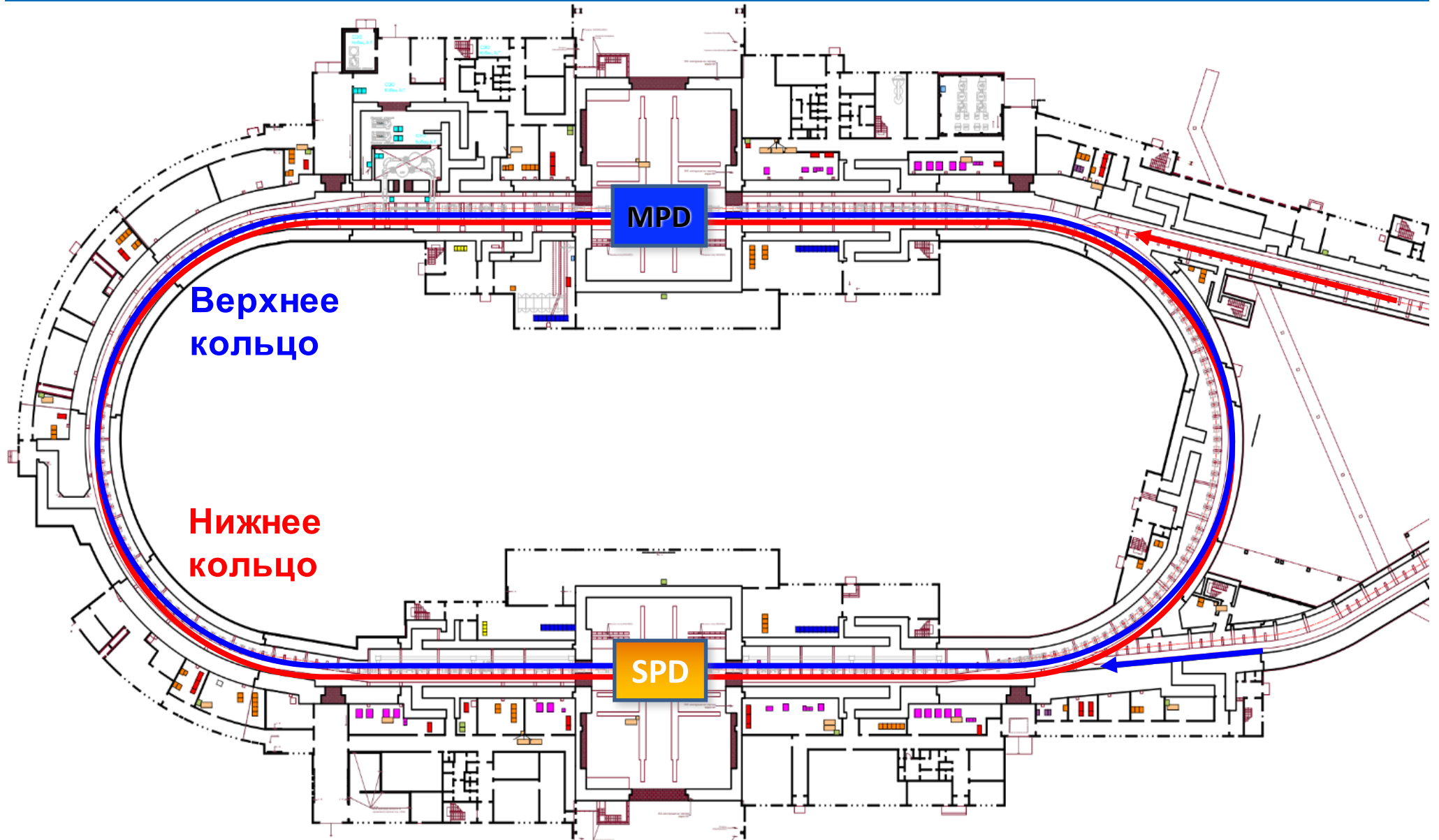


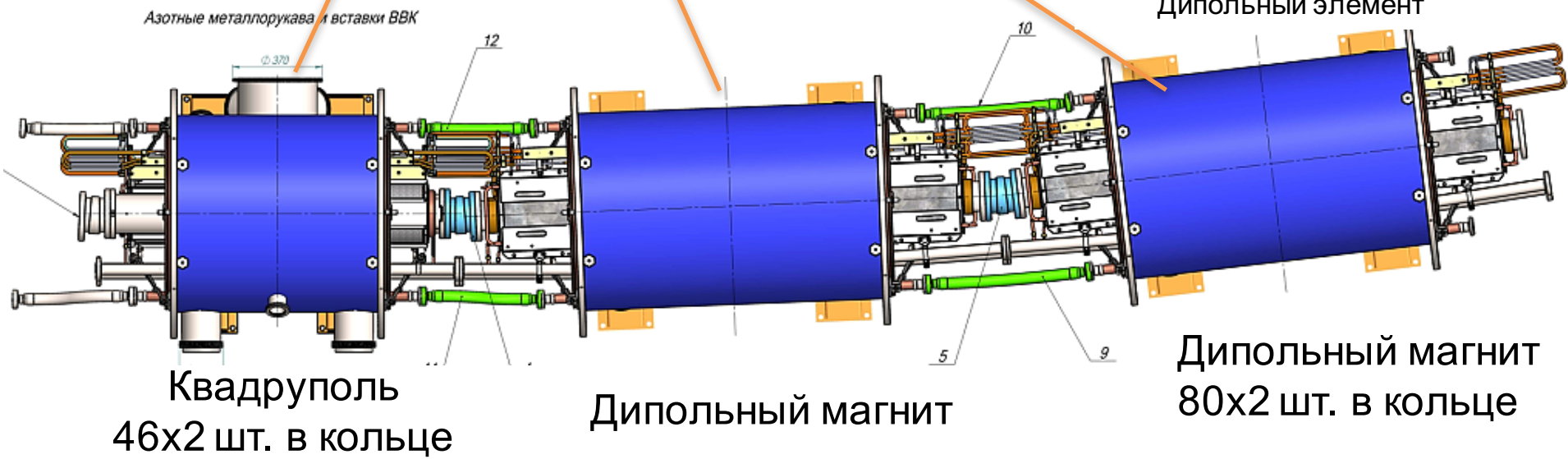
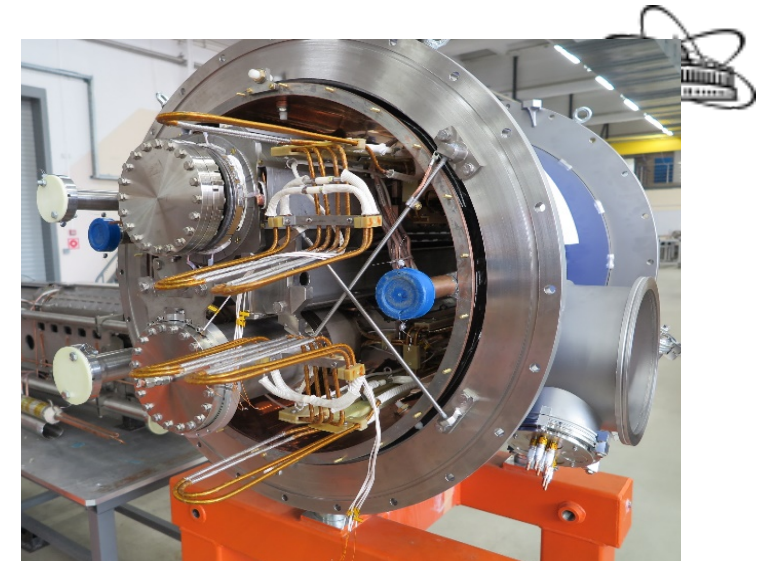
Более 5,5 тыс. свай.

Погружение методом задавливания (с нагрузкой 300 т) заняло 3 года!









Стартовая конфигурация

- RF-1 (барьерная) для накопления
- RF-2 в сокращенной комплектации:
по 2 резонатора на кольцо (50%)
- 1 канал Стох. охлаждения на кольцо
(продольное охлаждение)

Базовая конфигурация

- RF-1 (барьерная) для накопления
- RF-2 (22h) восемь резонаторов (по 4)
- RF-3 (66h) проектная = 16 рез.
- Сток. охлаждения полная конф.
- СЭО
- Обратные связи

22 сгустка длиной $\sigma \sim 2$ м

в каждом кольце

светимость $L \sim 5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

22 сгустка в каждом кольце

длиной $\sigma \sim 0.6$ м

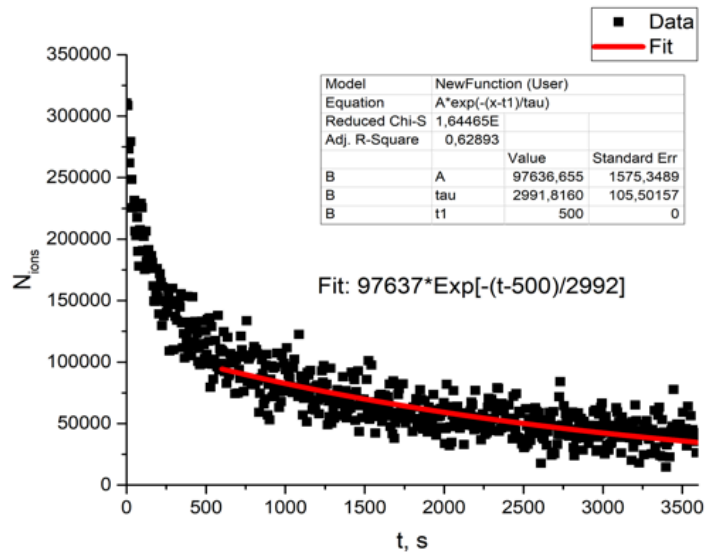
светимость $L \sim 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

11^{ого} января 2026 получен циркулирующий пучок в нижнем кольце.

23^{ого} января пучок Хе с энергией 1.76 ГэВ, интенсивностью $2 \cdot 10^6$

успешно инжектирован в верхнее кольцо коллайдера. Время жизни

превысило 50 мин



Синхрофазотрон, PS, У-70, SPS, ... LHC, NICA

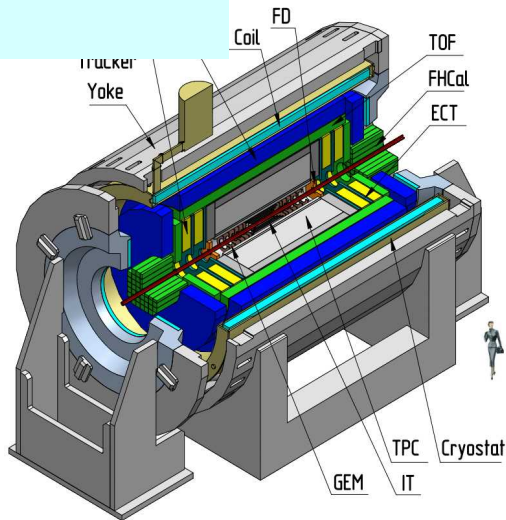
- 2009: решение КПП ОИЯИ о реализации проекта **Nuclotron based Ion Collider Facility**:
- 2016: подписано Соглашение между ОИЯИ и Правительством РФ о создании и эксплуатации комплекса **NICA**
- 2018: Мегасайенс проект Комплекс **NICA** включен в Национальный проект НАУКА



Разработана научная программа **NICA**, нацеленная на исследование: **КХД** диаграммы в мало изученной области **большой барионной плотности**; **спиновой структуры** нуклонов; а также широкого спектра прикладных работ.

2018: Начато формирование международных научных коллабораций

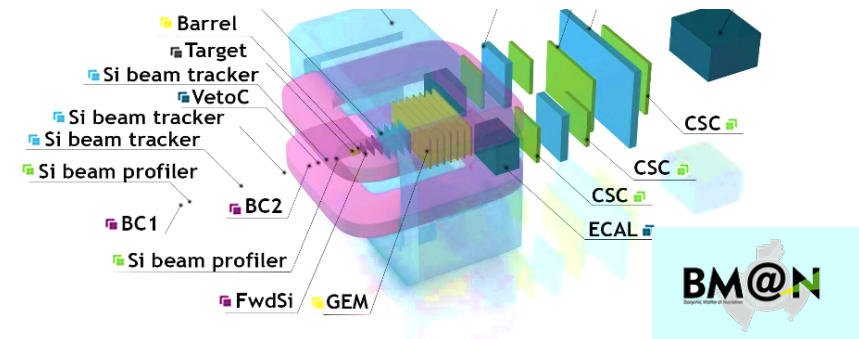
Multi Purpose Detector (MPD) Collaboration:



12 стран + ОИЯИ,
39 центров;
> 500 участников;
завершается создание детектора, подготовка к набору данных

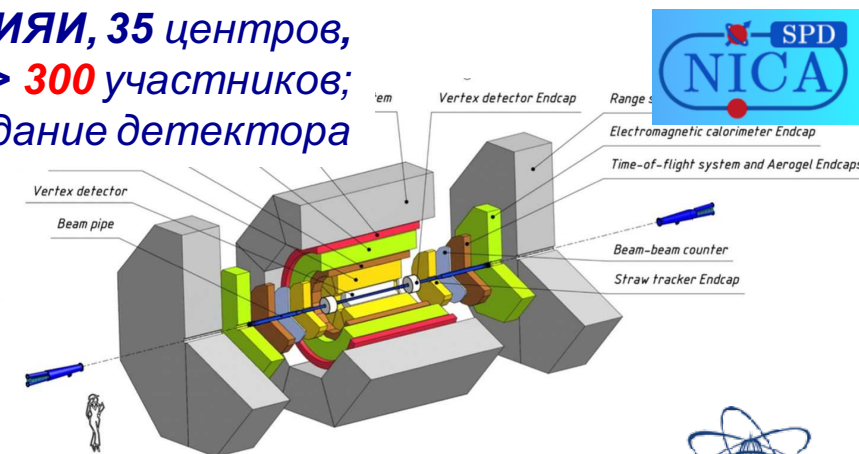
Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N):

5 стран + ОИЯИ, 13 центров, >220 участников;
начаты эксперименты



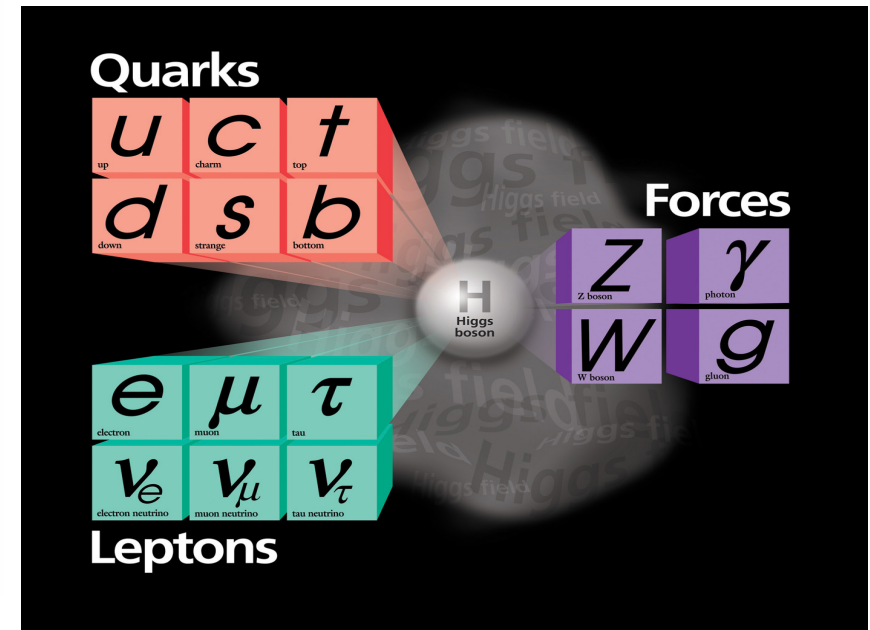
Spin Physics Detector (SPD) Collaboration:

12 стран+ОИЯИ, 35 центров,
> 300 участников;
начато создание детектора



Коллаборация ARIADNA

для прикладных и инновационных работ:
6 стран, 27 центров, > 185 участников;
начаты исследования



- 1911 - открытие Резерфордом атомного ядра.
- 1930th – ядра состоят из нуклонов. В течении многих лет р&n считались элементарными частицами, т.е. не имеют внутренней структуры.
- 1964 – Геллман предложил концепцию кварков.

Тип взаимодействия	Радиус действия
Сильное	10^{-13}
Электромагнитное	∞
Слабое	$2 \cdot 10^{-16}$
Гравитационное	∞

FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2,...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$< 7 \times 10^{-9}$	0	u up	0.005	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.01	-1/3
ν_μ muon neutrino	< 0.0003	0	c charm	1.5	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.2	-1/3
ν_τ tau neutrino	< 0.03	0	t top (initial evidence)	170	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.7	-1/3

Формы адронной материи при различной плотности (давлении)

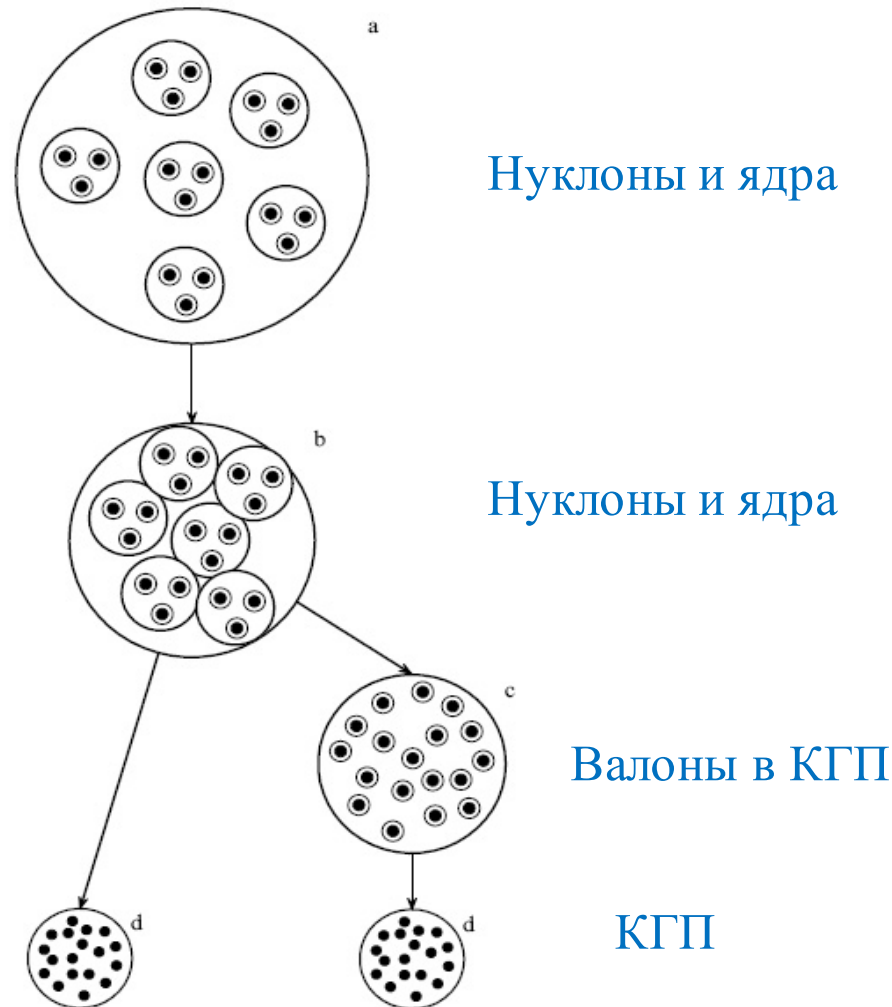
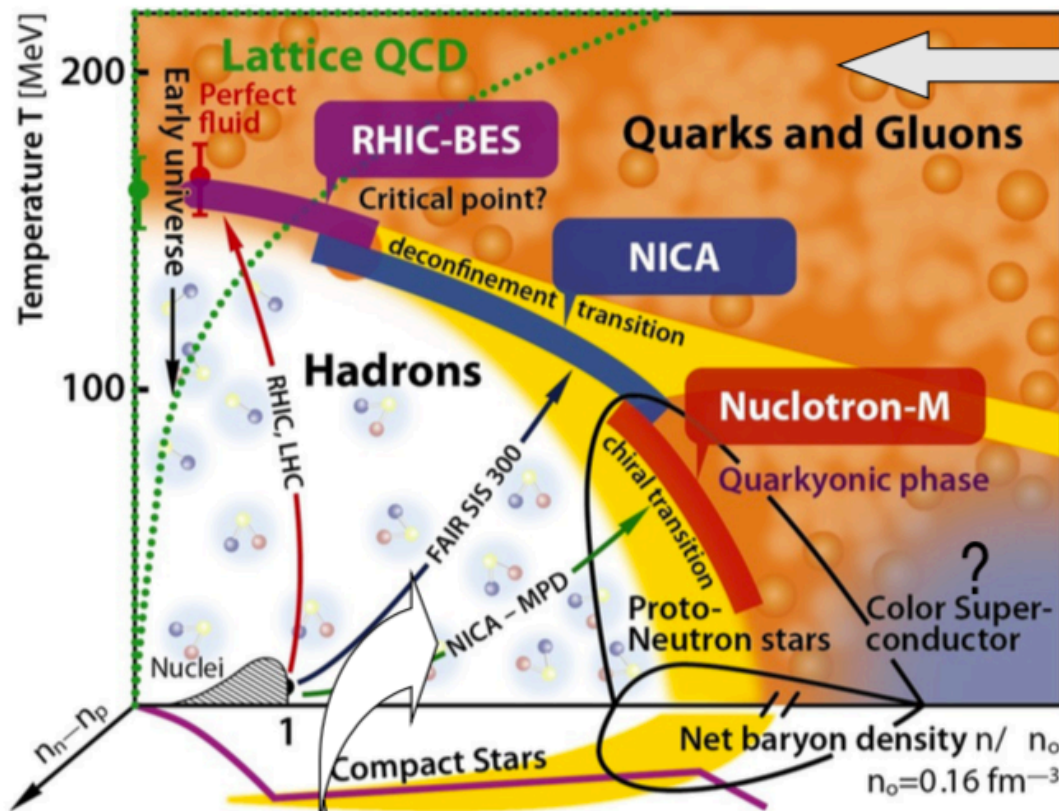


Figure 1. Schematic pattern of the conceivable ways for 'cold' nuclear matter to evolve along with gradual compression. The big circle refers to an atomic nucleus, the smaller ones to the hadrons, the smallest ones to the valons, and the dots to the current quarks. The left-hand branch refers to the coincidence of conditions for color deconfinement and chiral symmetry restoration (direct transition), while the right-hand branch implies that color deconfinement precedes chiral symmetry restoration (indirect transition, an intermediate phase is incorporated).

Heavy ion collisions

The phase diagram of QCD



- Search for the **critical point**



- Study of the **phase transition** from hadronic to partonic matter – **Quark-Gluon-Plasma**

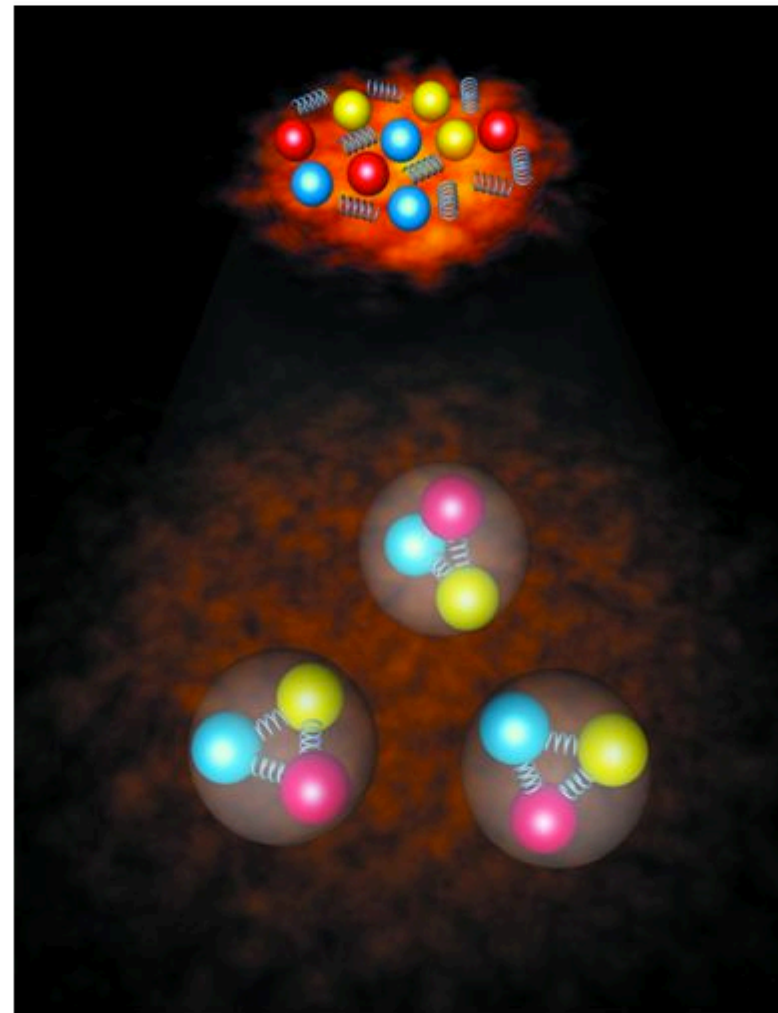
- Search for the **signatures of chiral symmetry restoration**

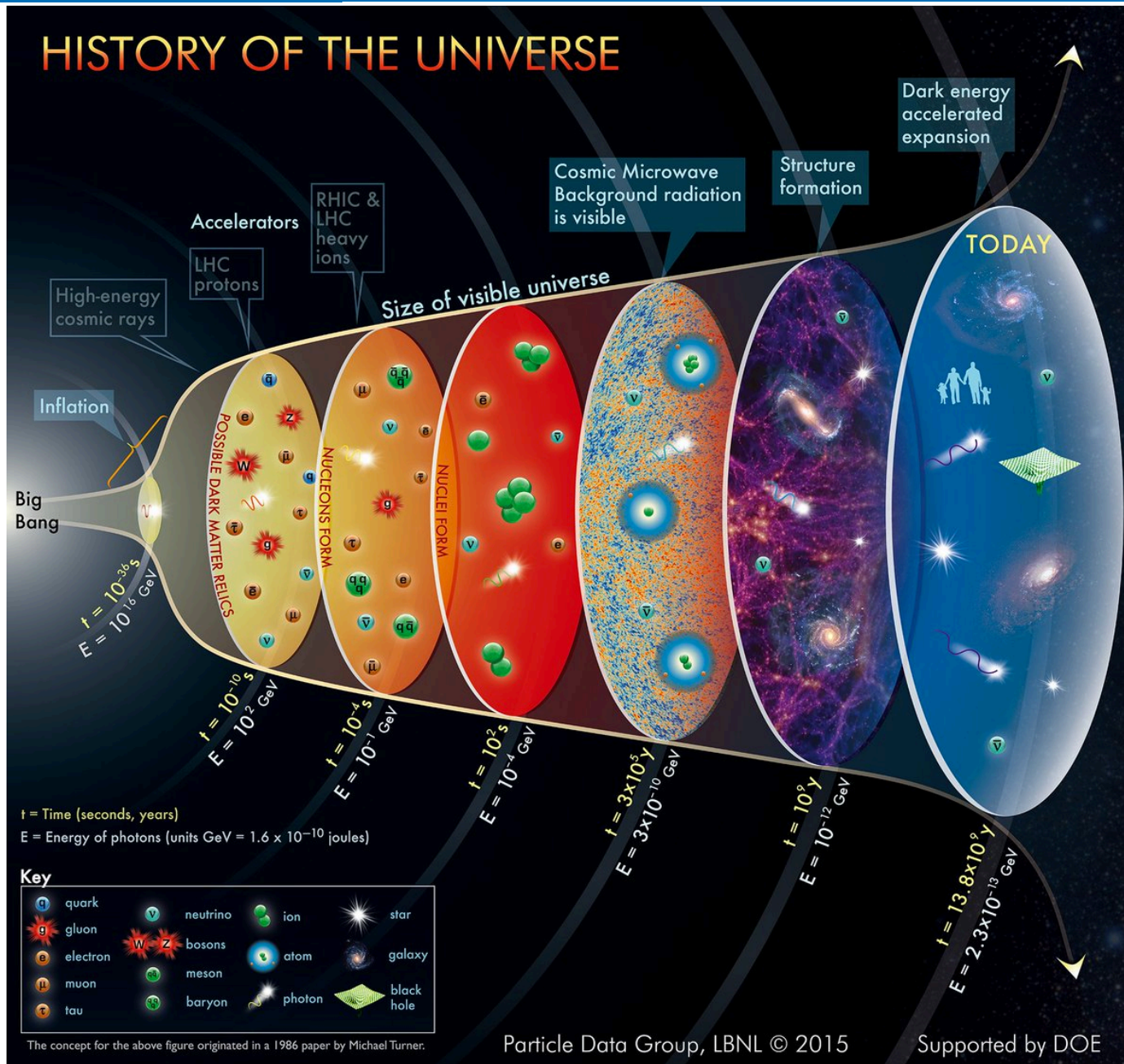
- Study of the **in-medium** properties of hadrons at high baryon density and temperature

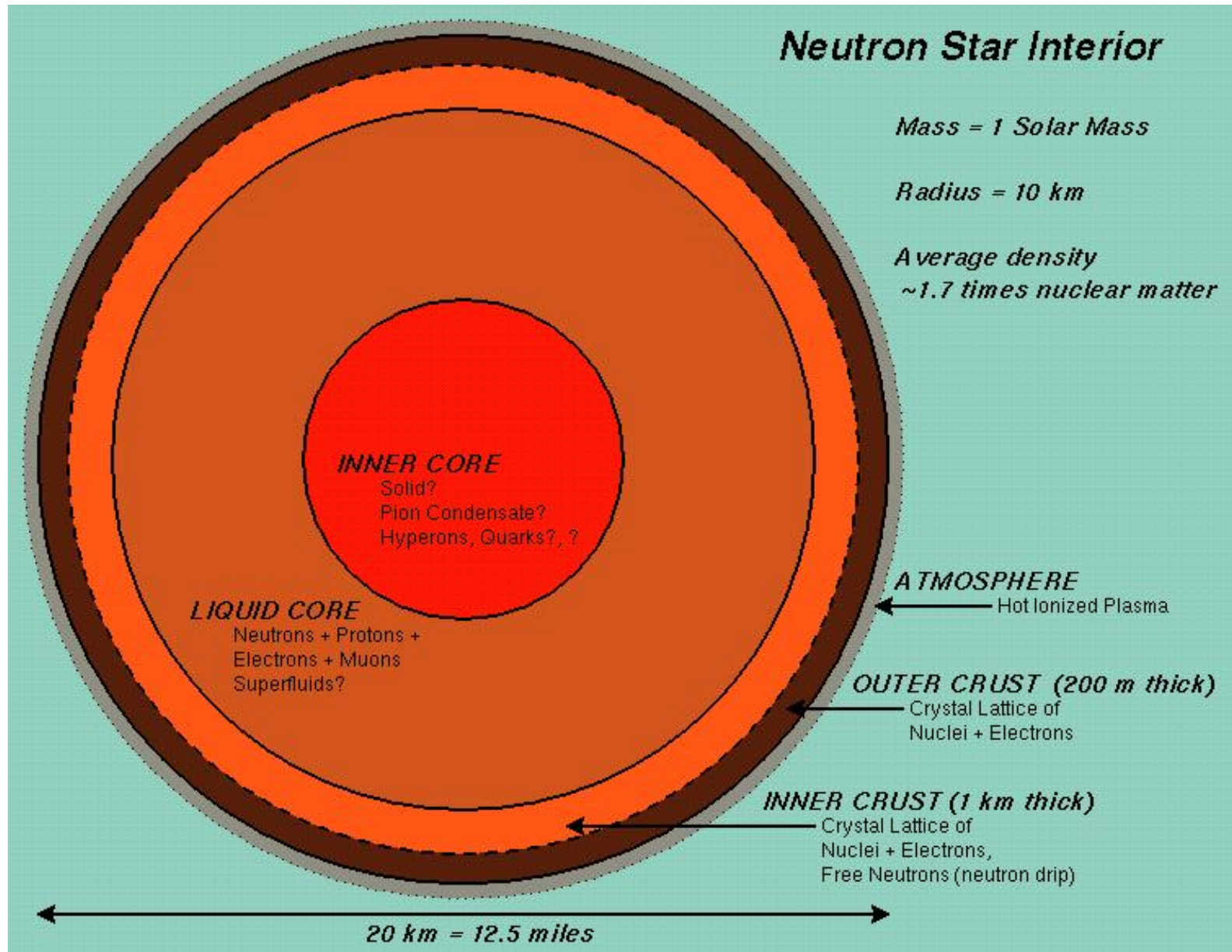
Phases of water

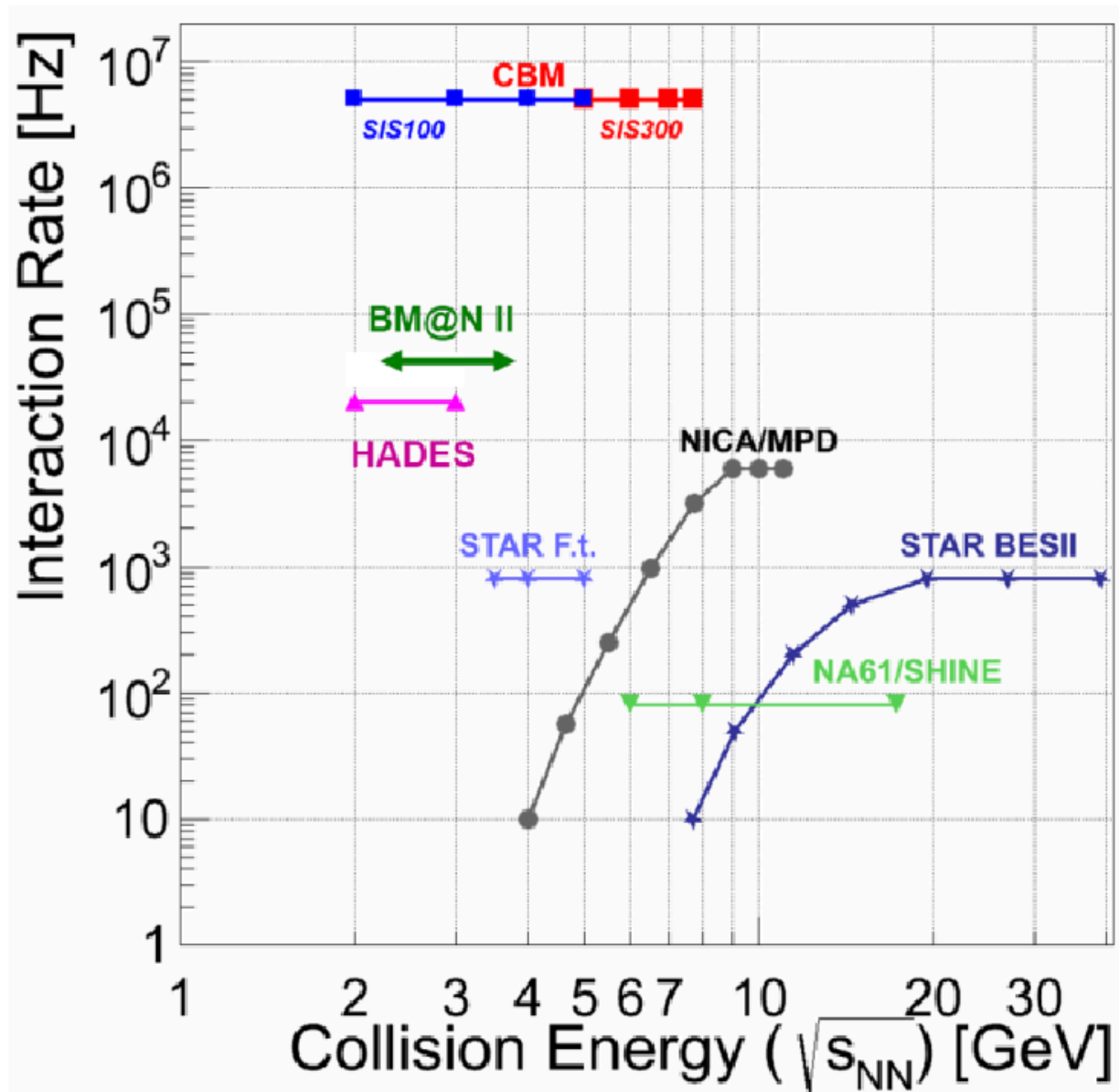


Phases of strongly interacting matter











*MPD International Collaboration was established in 2018
to construct, commission and operate the detector*

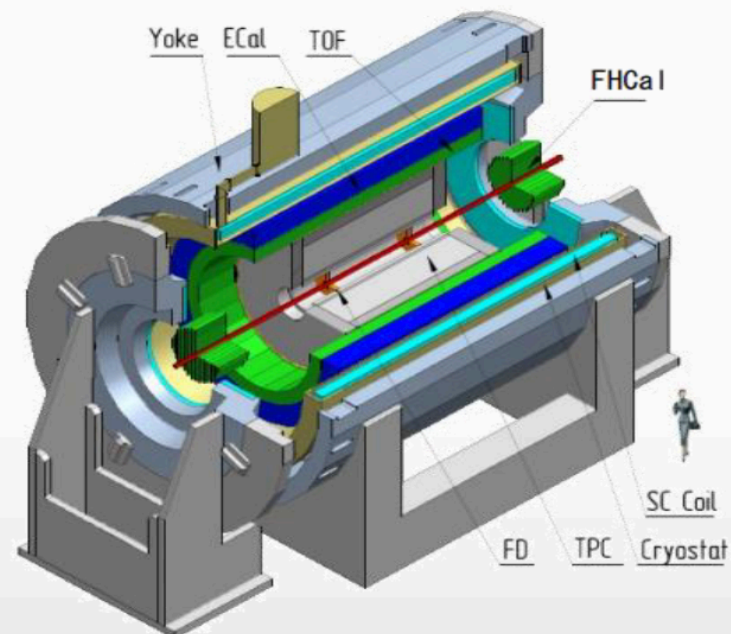
12 Countries, >500 participants, 38 Institutions and JINR

Organization

Acting Spokesperson: **Victor Riabov**
Deputy Spokespersons: **Zebo Tang, Arkadiy Taranenko**
Institutional Board Chair: **Alejandro Ayala**
Project Manager: **Slava Golovatyuk**

Joint Institute for Nuclear Research;

A.Alikhanyan National Lab of Armenia, Yerevan, **Armenia**;
Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, **Belarus**;
Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, **Belarus**;
SSI "Joint Institute for Energy and Nuclear Research - Sosny" of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, **Belarus**;
University of Plovdiv, **Bulgaria**;
Tsinghua University, Beijing, **China**;
University of Science and Technology of China, Hefei, **China**;
Huzhou University, Huizhou, **China**;
Institute of Nuclear and Applied Physics, CAS, Shanghai, **China**;
Central China Normal University, **China**;
Shandong University, Shandong, **China**;
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, **China**;
University of South China, **China**;
Three Gorges University, **China**;
Institute of Modern Physics of CAS, Lanzhou, **China**;
Egyptian Center for Theoretical Physics, **Egypt**;
Tbilisi State University, Tbilisi, **Georgia**;
Institute of Physics and Technology, Almaty, **Kazakhstan**;
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, **Mexico**;
Universidad Autónoma de Sinaloa, **Mexico**;
Universidad Autónoma Metropolitana, **Mexico**;
Universidad de Colima, **Mexico**;
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, **Mexico**;
Institute of Physics and Technology, **Mongolia**;



Belgorod National Research University, **Russia**;
High School of Economics University, Moscow, **Russia**;
Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, **Russia**;
National Research Nuclear University MPhI, Moscow, **Russia**;
Moscow Institute of Science and Technology, **Russia**;
North Ossetian State University, **Russia**;
National Research Center "Kurchatov Institute", **Russia**;
National Research Tomsk Polytechnic University, **Russia**;
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Saint Petersburg, **Russia**;
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, **Russia**;
St.Petersburg State University, **Russia**;
Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, **Russia**;
Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, **Russia**;
Vinča Institute of Nuclear Sciences, **Serbia**;
Pavol Jozef Šafárik University, Košice, **Slovakia**;



CERN, EMC collaboration just discovered “EMC-effect” but must stop experiments with nuclear targets and start with polarized proton target

“...We understand the proton spin structure via the quark parton model and measuring the spin structure functions would not be fruitful...”

BARYON MAGNETIC MOMENTS

BARYON	WAVE FUNCTION	QUARK MODEL MAG. MOMENT	EXPERIMENT (μ_N)
Ω^-	$\uparrow s \uparrow s \uparrow s$	$\mu_{\Omega^-} = 3\mu_s = -2.0\mu_N$	-2.02 ± 0.05
Λ^0	$\uparrow s \uparrow u \downarrow d$	$\mu_{\Lambda} = \mu_s = -0.7\mu_N$	-0.613 ± 0.005
Ξ^0	$\uparrow s \uparrow s \uparrow u, \uparrow s \uparrow s \uparrow u \uparrow, s \uparrow s \uparrow u \uparrow$ KNOWN WEIGHTS	$\mu_{\Xi^0} = \frac{4\mu_s - \mu_u}{3} = -1.6\mu_N$	-1.25 ± 0.04
Ξ^-	$\uparrow s \uparrow s \uparrow d$	$\mu_{\Xi^-} = \frac{4\mu_s - \mu_d}{3} = -0.6\mu_N$	-0.651 ± 0.003
Σ^+	$\uparrow s \uparrow u \uparrow u$	$\mu_{\Sigma^+} = \frac{4\mu_u - \mu_s}{3} = +2.9\mu_N$	$+2.458 \pm 0.010$
Σ^-	$\uparrow s \uparrow d \uparrow d$	$\mu_{\Sigma^-} = \frac{4\mu_d - \mu_s}{3} = -1.8\mu_N$	-1.46 ± 0.025
p	$\uparrow u \downarrow u \uparrow d$	$\mu_p = \frac{4\mu_u - \mu_d}{3} = 3.0\mu_N$	2.793
n	$\uparrow d \downarrow d \uparrow u$	$\mu_n = \frac{4\mu_d - \mu_u}{3} = -2.0\mu_N$	-1.913

FRACTION OF NUCLEON'S SPIN

CARRIED BY QUARKS:-

$$\int_0^1 g_1^p dx = \Gamma_1^p = +\frac{g_A}{12} f(\alpha_s) + a_8 \frac{f(\alpha_s)}{36} + \Delta\Sigma \frac{h(\alpha_s)}{9}$$

$$\int_0^1 g_1^n dx = \Gamma_1^n = -\frac{g_A}{12} f(\alpha_s) + a_8 \frac{f(\alpha_s)}{36} + \Delta\Sigma \frac{h(\alpha_s)}{9}$$

$f(\alpha_s); h(\alpha_s)$ - QCD Radiative correction factors ~ 1

SU3:-

$$a_8 = \frac{1}{\sqrt{3}}(3F - D); \quad g_A = F + D = 1.26 \quad (= \frac{g_A}{g_A} \text{ From } n \beta \text{ Decay})$$

(F, D Symmetric, antisymmetric SU(3) couplings from hyperon decay, $F = 0.48 \pm 0.01, D = 0.76 \pm 0.01$)

In QPM

$$\Delta\Sigma = \Delta u + \Delta\bar{u} + \Delta d + \Delta\bar{d} + \Delta s + \Delta\bar{s}$$

= Total fraction of proton spin carried by quarks

$$a_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \{ \Delta u + \Delta\bar{u} + \Delta d + \Delta\bar{d} - 2(\Delta s + \Delta\bar{s}) \}$$

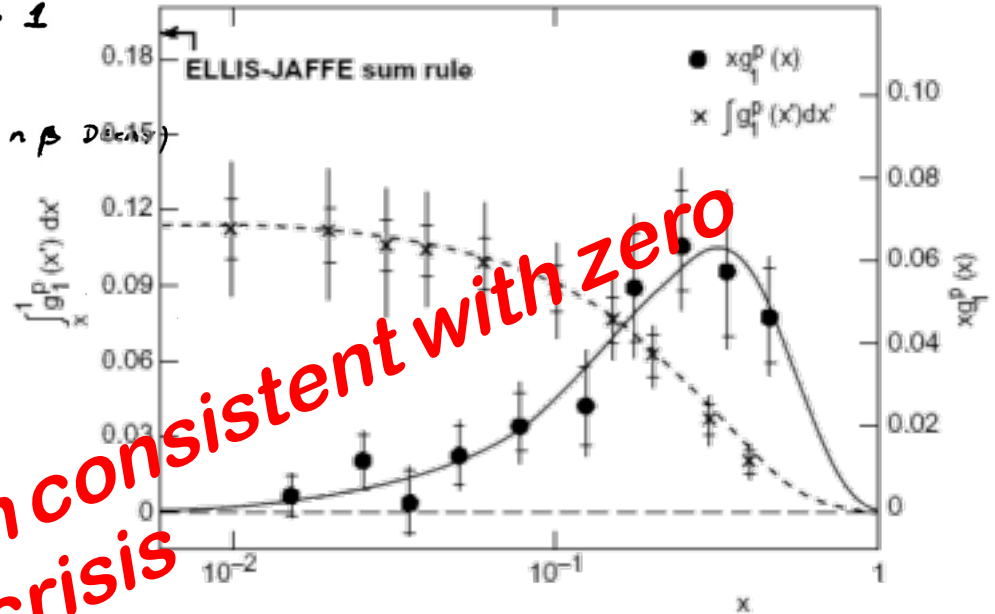
$$g_A = \Delta u + \Delta\bar{u} - \Delta d - \Delta\bar{d}$$

- use Γ_1^p, Γ_1^n to obtain $\Delta\Sigma$; then g_A and a_8 to solve for $\Delta u, \Delta d, \Delta s$.

- previously Ellis - Jaffe sum rule obtained by assuming $\Delta s = 0$ to get predictions for Γ_1^p, Γ_1^n

- the modern data shows that the Ellis - Jaffe sum rule is violated, so the strange sea is polarised.

EMC, J. Ashman et al., PLB 206 (1988) 364
(> 1660 citations)



Quark spin contribution consistent with zero

EMC MEASURED $\int_0^1 g_1^p dx = 0.126 \pm 0.010 \pm 0.015$

ie $\Delta\Sigma = 0.12 \pm 0.09 \pm 0.14$

ie. $\sim 12\%$ OF SPIN OF PROTON CARRIED BY

QUARKS

"Experiments with spin have killed more theories than any other single physical parameter"

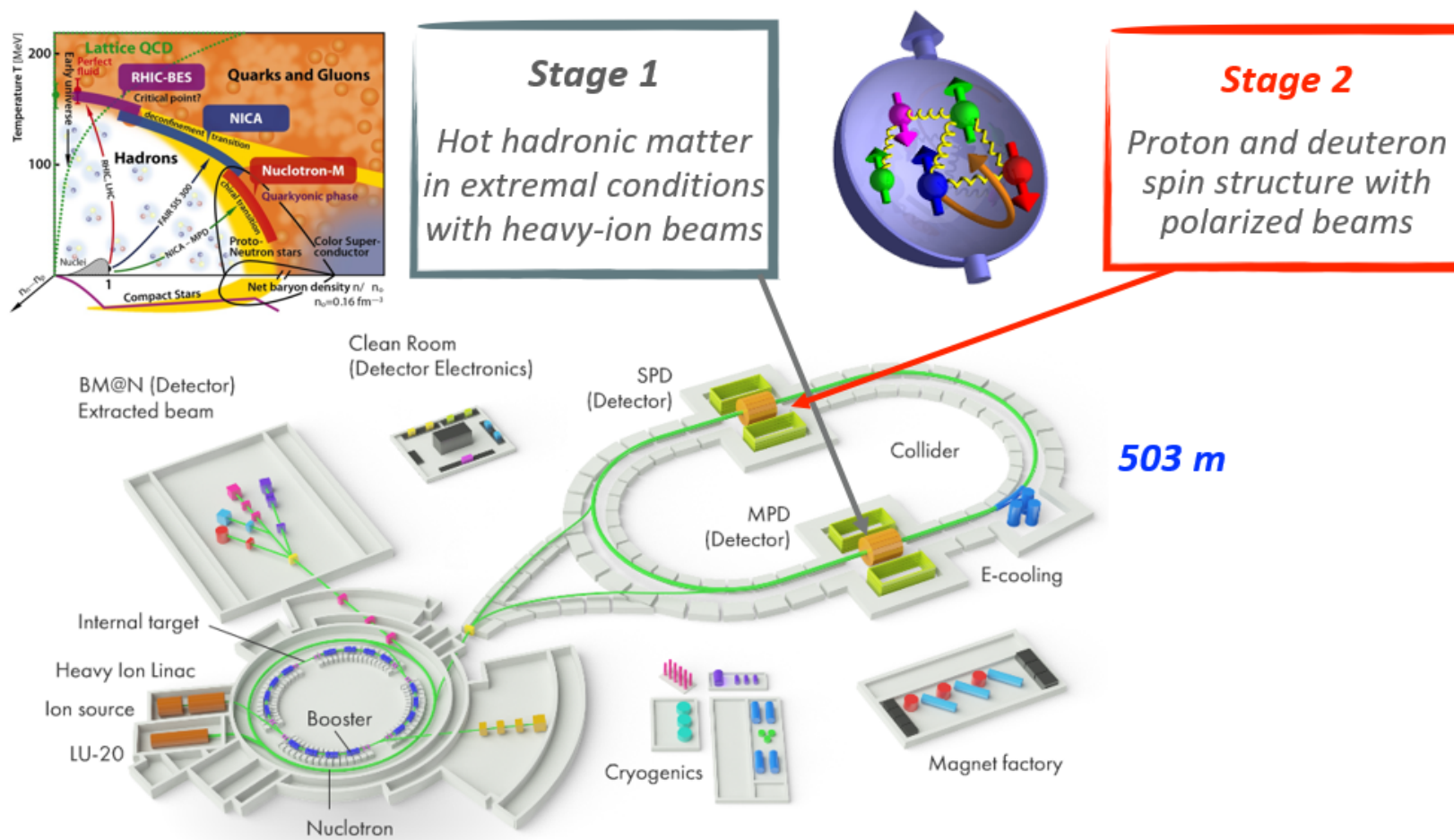
Elliot Leader, Spin in Particle Physics, Cambridge U. Press (2001)

"Polarisation data has often been the graveyard of fashionable theories. If theorists had their way they might well ban such measurements altogether out of self-protection."

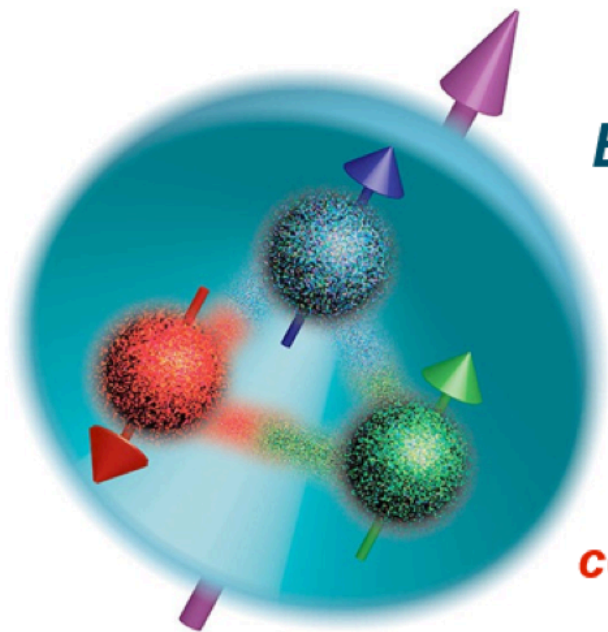
J. D. Bjorken, Proc. Adv. Research Workshop on QCD Hadronic Processes, St. Croix, Virgin Islands (1987).

NICA facility at JINR

NICA (Nuclotron-based Ion Collider facility)



Spin crisis



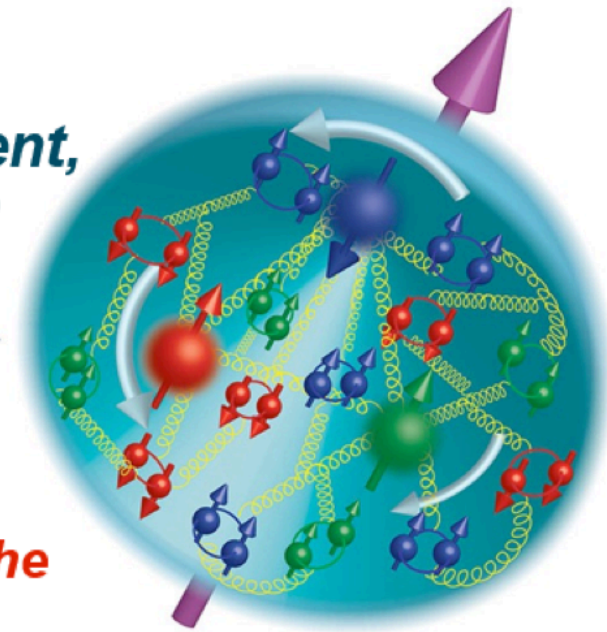
Naive quark model

$$\frac{1}{2} = \sum_{q=u,u,d} \left(\frac{1}{2} \right)$$

**EMC experiment,
CERN 1988**



**Quark
contribution to the
proton spin is
below 30%!**

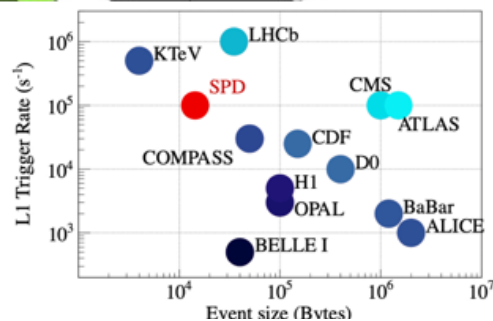
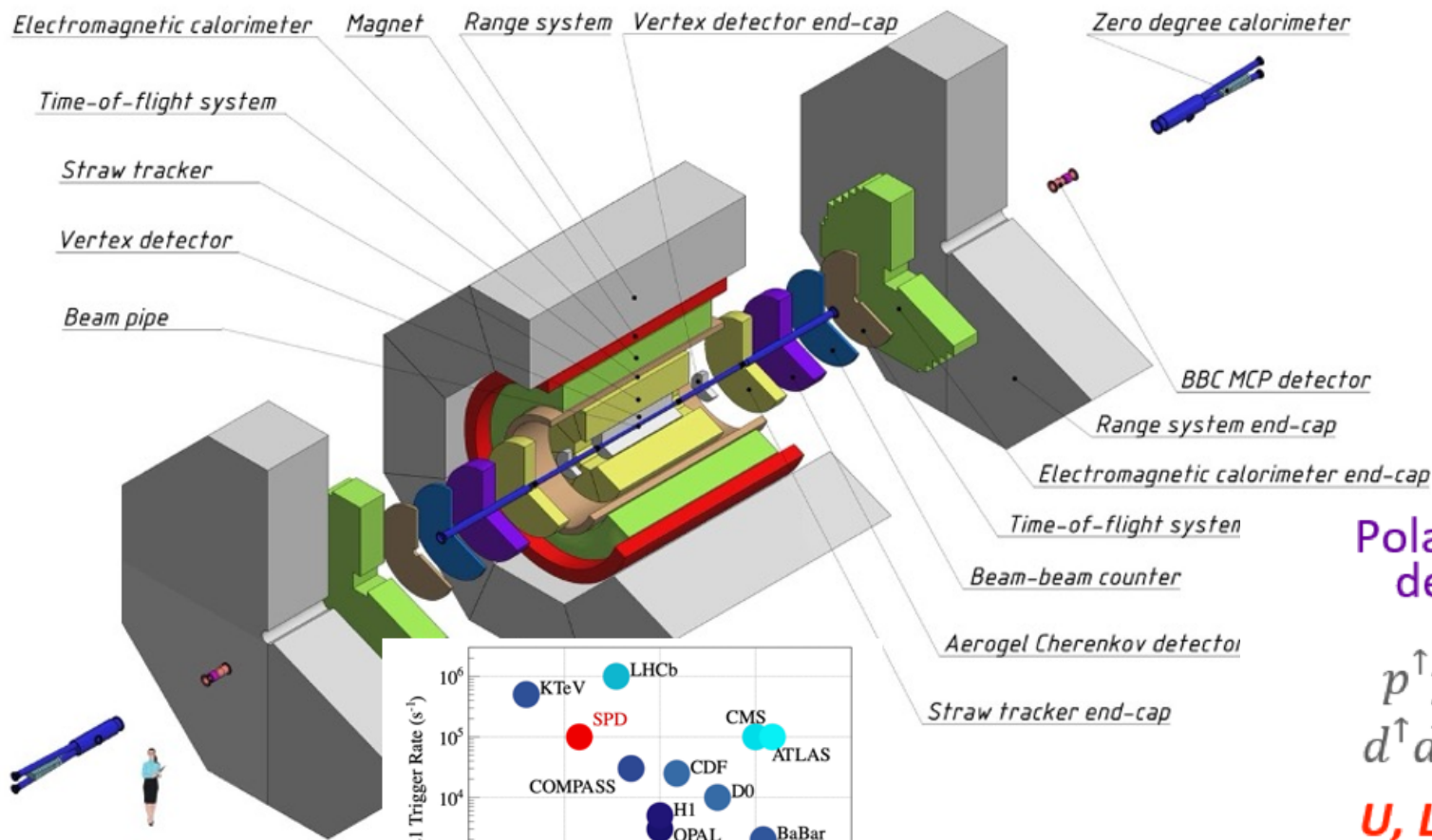


Real situation

**L - orbital moments of quarks
and gluons**

$$S_N = 1/2 = 1/2 \Delta\Sigma + \Delta G + L$$

SPD setup



Polarized proton and
deuteron beams:

$$p^\uparrow p^\uparrow: \sqrt{s} \leq 27 \text{ GeV}$$

$$d^\uparrow d^\uparrow: \sqrt{s} \leq 13.5 \text{ GeV}$$

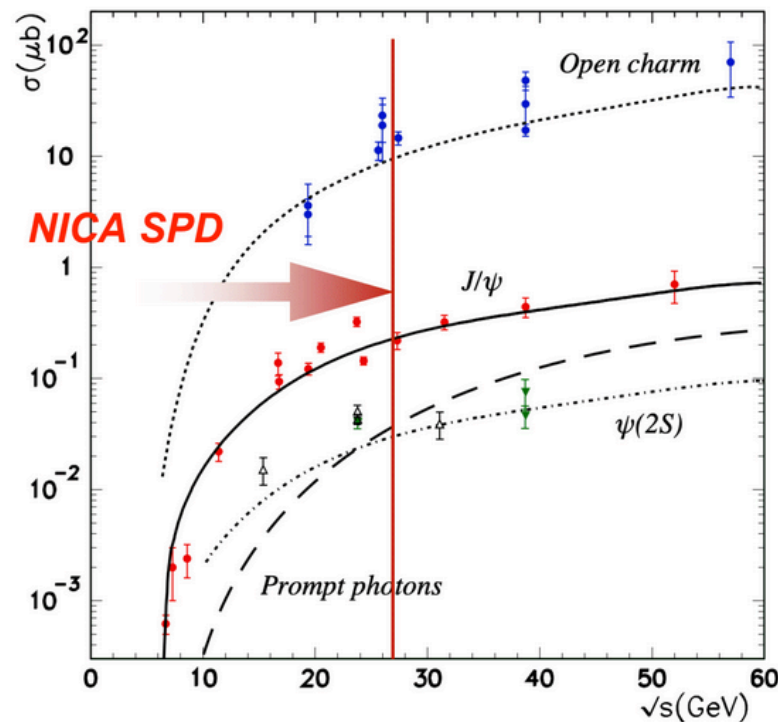
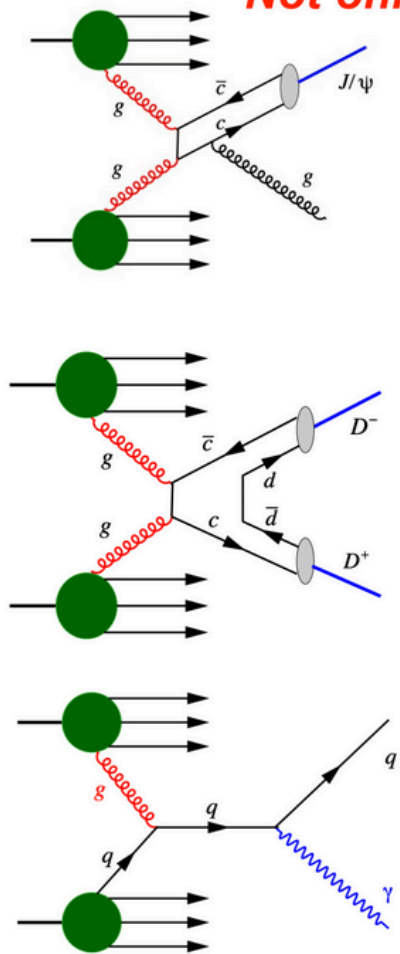
U, L, T |P| > 70%

Free-running DAQ

Polarized ³He beams are also possible

SPD golden probes

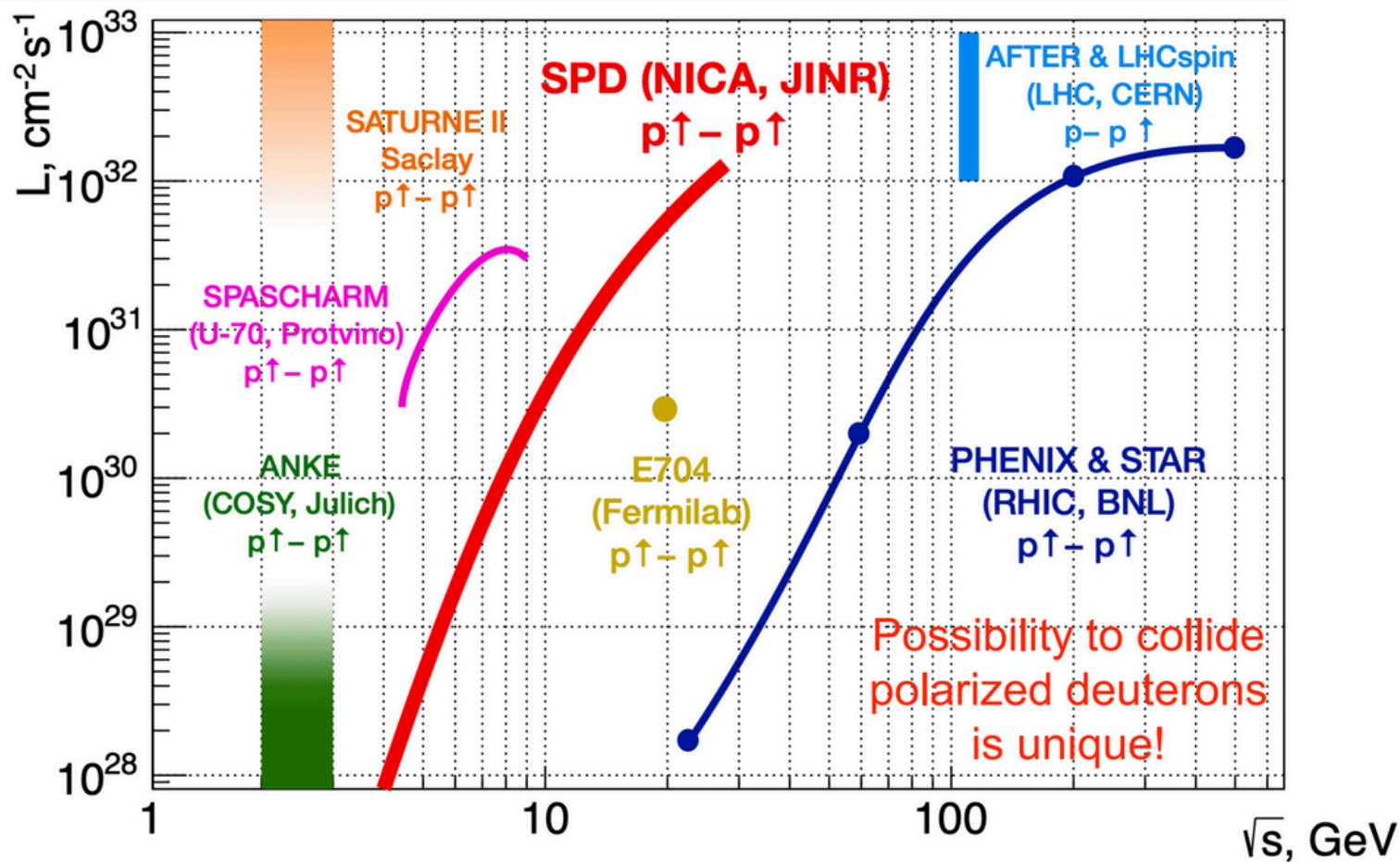
Not only J/ψ !



These golden probes define the layout of the SPD experimental setup.

SPD and other polarized pp exps

non-perturbative QCD | perturbative QCD

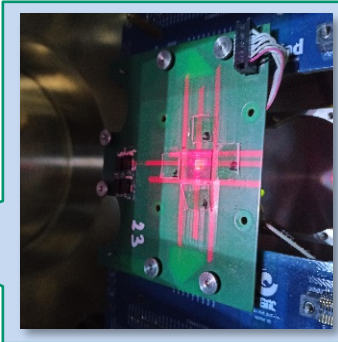


Коллаборация ARIADNA + инфраструктура NICA
СОЧИ + ИСКРА + СИМБО + СИЯЭТ

НИЦ КИ ИТЭФ, АО
«ЭНПО СПЭЛС», МИФИ,
ООО «ВСТ», «ГИРОПРОМ»

Станция Облучения ЧИпов

СОЧИ



**СИЯЭТ = Стенд
Исследований
Ядерной
Энергетики и
Трансмутации**

**СИМБО = Станция Исследований
Медико Биологических Объектов**

**ИСКРА = Исследовательский Стенд
Компонентов Радиоэлектроники**

ИСКРА

СИМБО



Возможность работы в
широчайшем диапазоне сортов
ионов, энергий и интенсивностей.
Ионы **от p до Bi**,
Энергии **от 3.2 до 4500 МэВ/н**
Интенсивности
от 10⁴ до 10¹⁰ ионов в сек.

К реализации мегапроекта **Комплекс NICA** привлечено около **2000** ученых и специалистов из **90** институтов **России** и **26** стран мира.
От **России** участвуют более **1300** сотрудников из различных организаций:

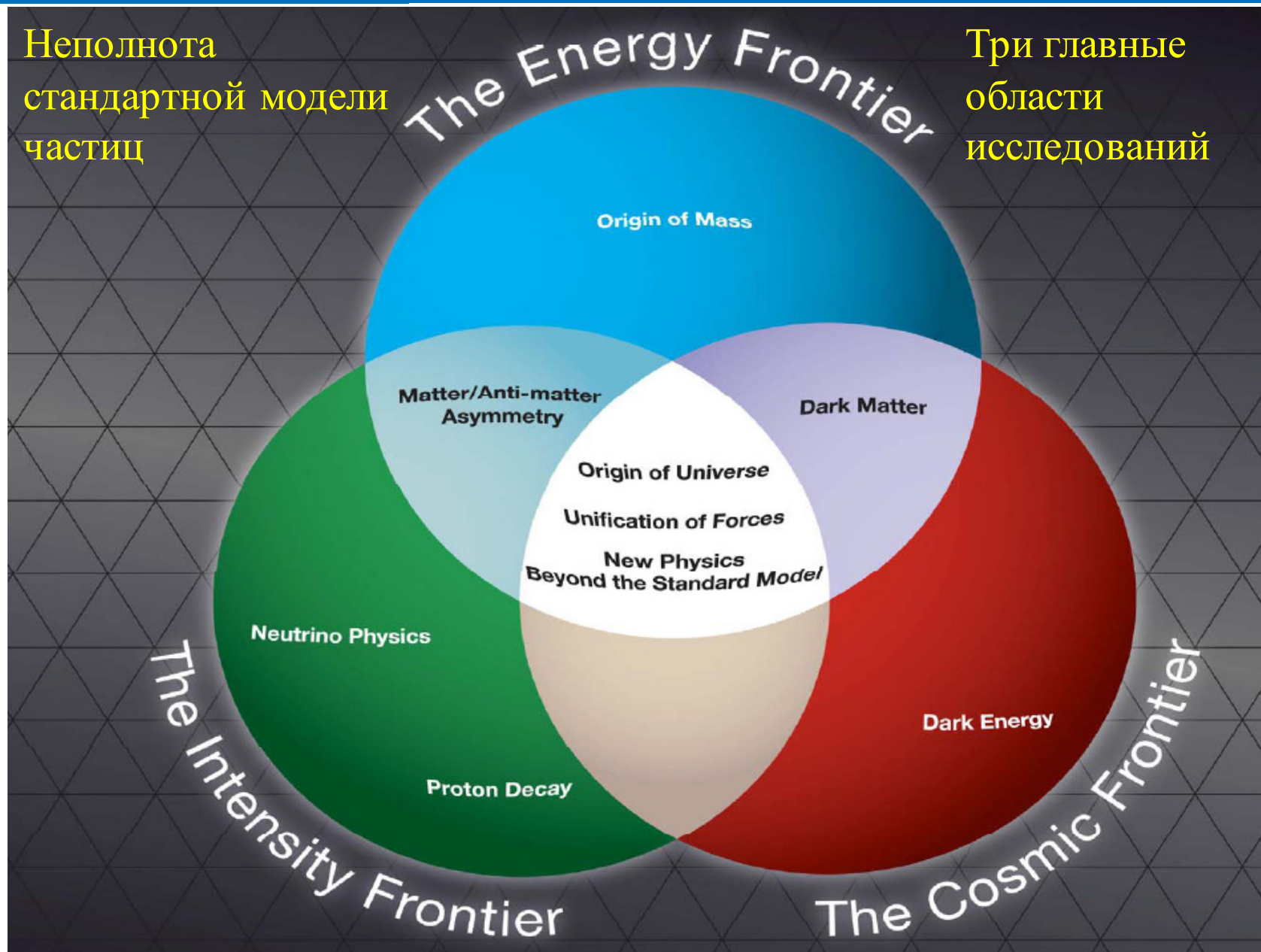
*НИЦ КИ,
ИФВЭ КИ
ИТЭФ КИ,
ПИЯФ КИ,
ИЯФ СО РАН,
ИЯИ РАН,
НИИЯФ МГУ,
НИЯУ МИФИ,
ФИАН РАН,
МФТИ,
СПБПУ,
СПбГУ,
ВШЭ,
Самарский университет,*

*Томский ун-т,
Белгородский ун-т,
Санкт-Петербургский политехнический ун-т,
СОГУ,
ИМБП РАН,
ИОНХ РАН,
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
ФИЦ ХФ РАН,
ИТЭБ РАН,
МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ
радиологии» Минздрава России,
ОИВТ РАН,
и др.*

*После ввода в эксплуатацию **коллайдера NICA** в 2026 г. число участников заметно возрастет.*

Неполнота
стандартной модели
частиц

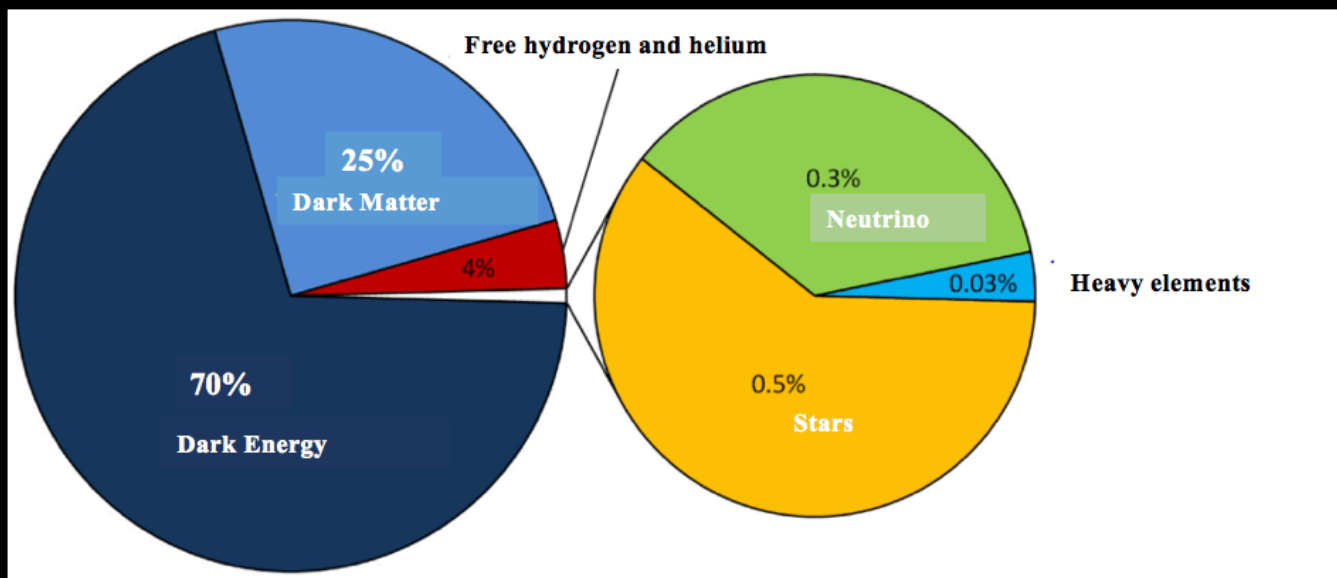
Три главные
области
исследований





Dark Matter

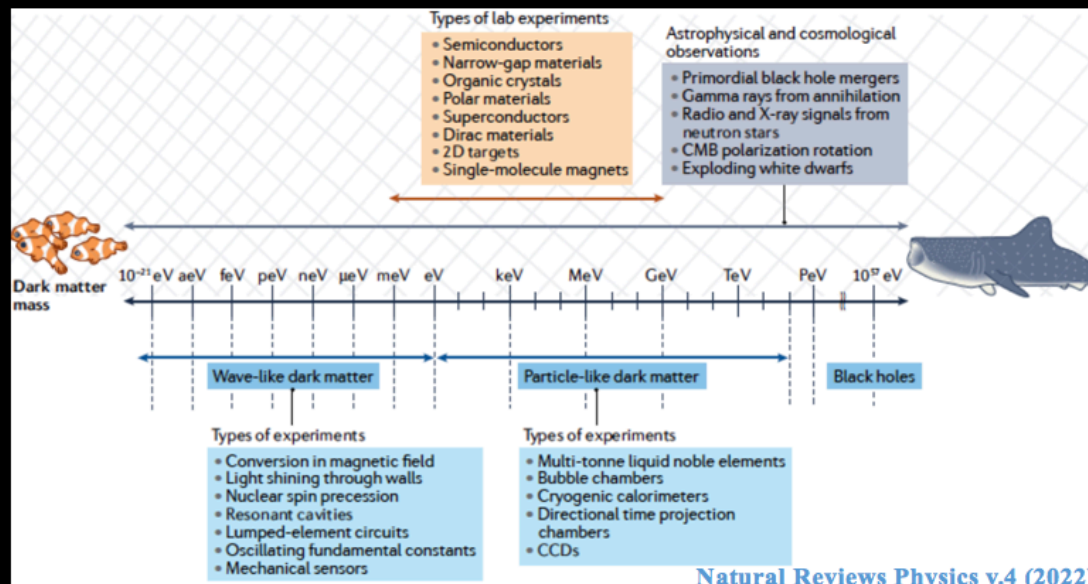
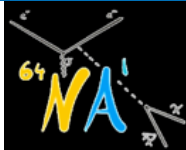
- гипотетическая форма материи не участвующая в электромагнитном взаимодействии
- не прямое наблюдение (гравитация, структура Вселенной)



- электрически нейтральна
- не барионная
- составляет большую часть массы Вселенной

Природа DM - ?

Dark Sector



- “fuzzi DM” $\sim 10^{-22}$ eV (de Broglie wavelength \sim galaxy size) successfully explains the structure and features of galaxies motion;
- massive compact objects (“primordial” black holes, neutron stars);
- **axions & ALP**;
- **Sterile neutrino**;
- **WIMP**: massive particles, E-W scale;
- **light dark matter**

Direct search: gaseous detectors (XENON, PandaX, DarkSide, ...); crystals (CDMS, CRESST, EDELWEISS,...); bubble chambers (PICO)

Indirect search: gamma/ neutrino/ radio telescopes; cosmic rays (IceCube, Baikal, AMS, MAGIC,...);

Search for particle like DM with accelerators:

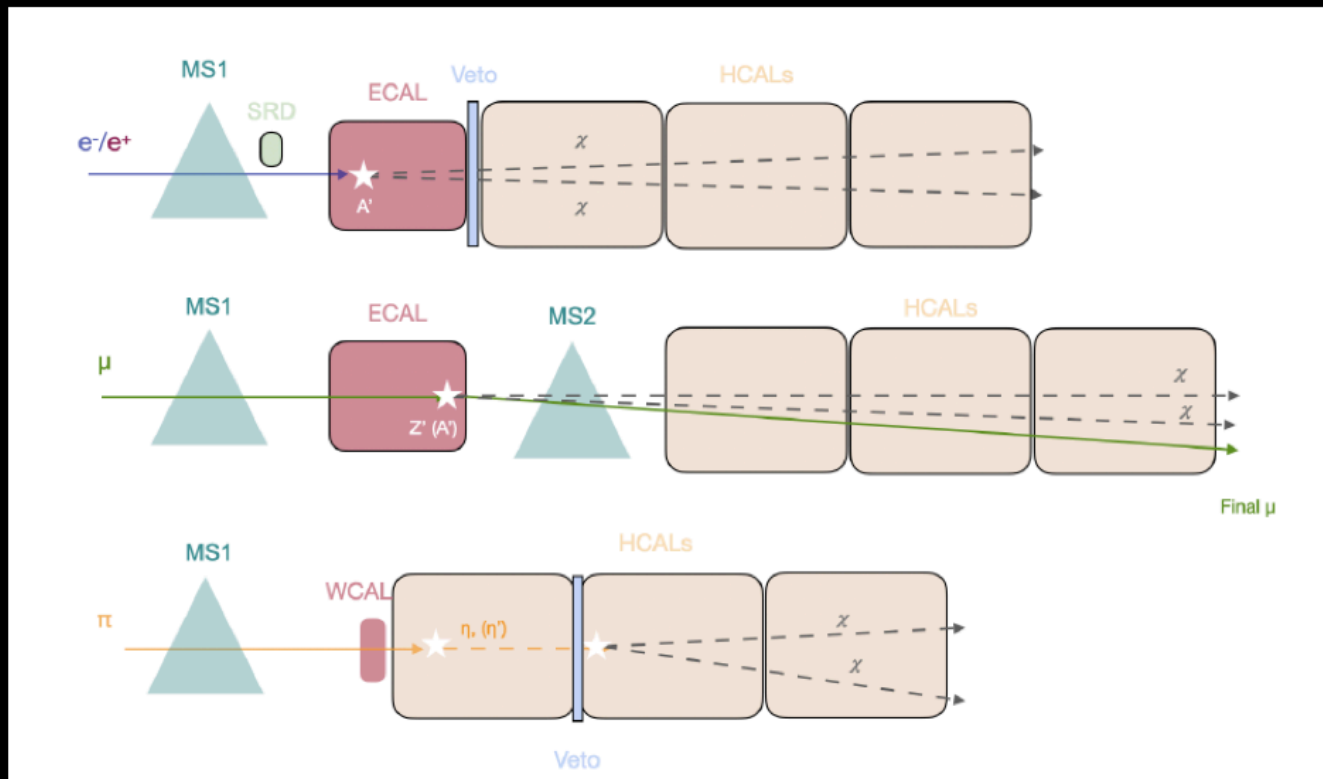
- LHC (WIMP)
- SPS (LDM)

Dark sector ($v \ll c$)





NA64 experiment

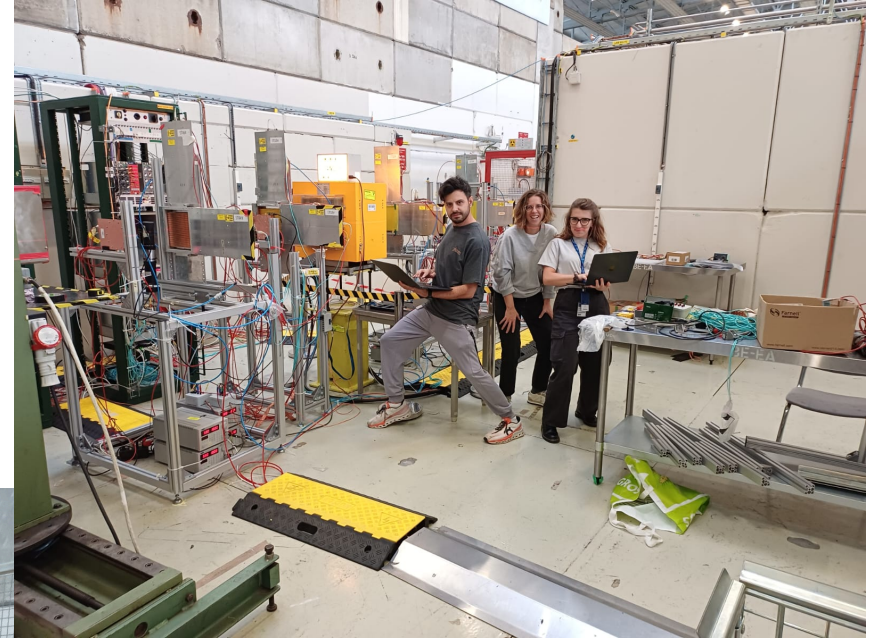


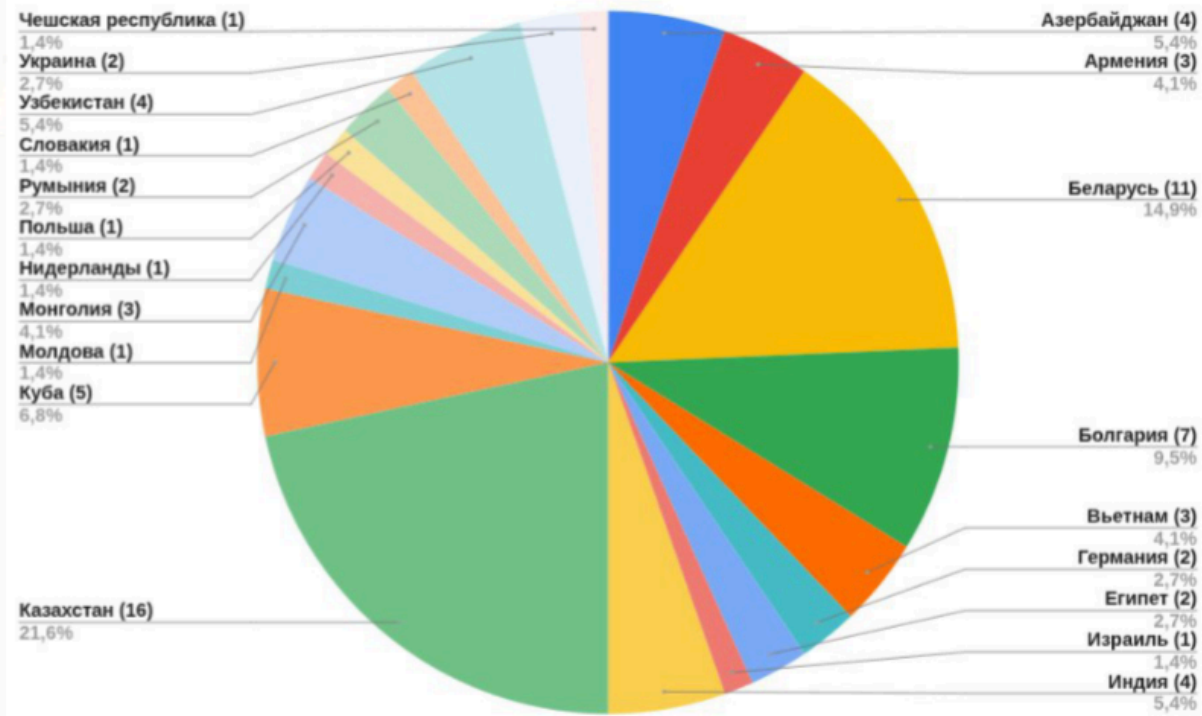
Schematics of the missing energy technique used by NA64 combining initial e^- , e^+ , μ and π beams

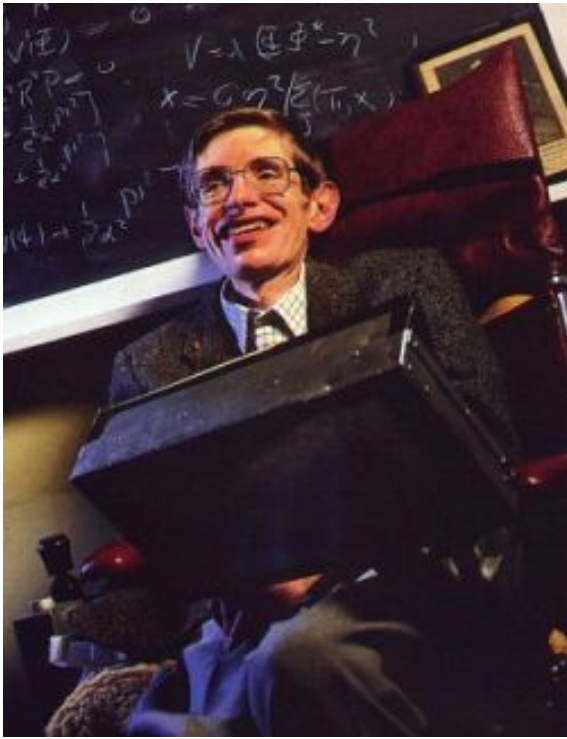
NA64 research program addresses three complementary issues in DS physics that are accessible at the SPS:

1. **NA64e, NA64e⁺:** search for vector-mediated (A') LDM and other BSM physics with masses below the electroweak scale using electron and positron beams at H4;
2. **NA64μ:** search for $L_\mu - L_\tau$ Z' (DS predominantly coupled to the second lepton generation) and LDM with the M2 muon beam;
3. **NA64h:** search for leptophobic DS coupled to light SM quarks with the SPS/PS hadronic beams.

2026 год: 8 недель на канале $H4 e^-$ с энергией 100 ГэВ, далее 5 дней «пилот» по видимой моде с ориентированными вольфрамовыми кристаллами (INFN Sezione de Ferrara)

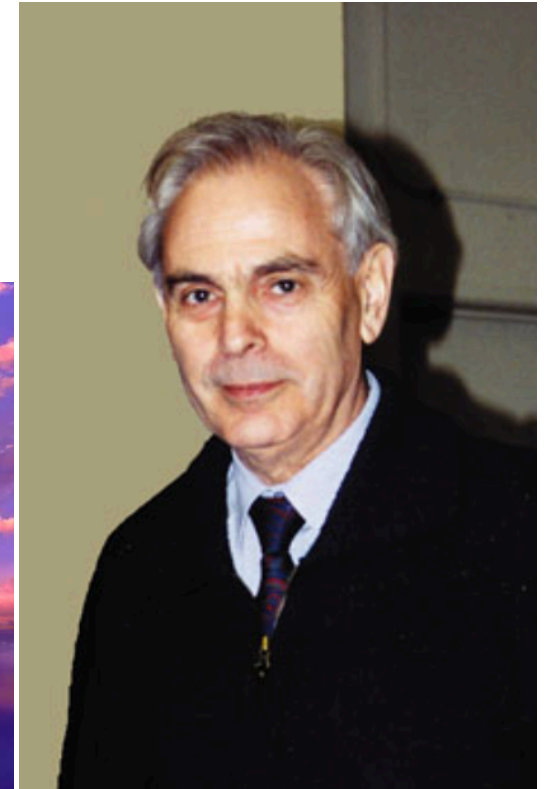






Стивен Хокинг: «Если мы действительно откроем полную теорию ..., то узнаем почему так произошло, что существуем мы и существует Вселенная. ...Это будет полным триумфом человеческого разума, ибо тогда нам станет понятен замысел Бога».

Л.Б.Окунь: «Уровень физики определяет уровень понимания всего окружающего нас мира, уровень интеллектуальной зрелости человечества.»



Спасибо за внимание