

Семинар ОФВЭ ОЯФА ФИАН 15 ноября 2013 г.

О методах охлаждения пучков
заряженных частиц (по
материалам конференции
COOL'13). - Е.Г. Бессонов

International Workshop on Beam Cooling and Related Topics



Mürren, Switzerland

June 10-14, 2013

Hosted by CERN

<https://cool-13.web.cern.ch/>

Visit to CERN 15 June

	Monday 10 June	Tuesday 11 June	Weds. 12 June	Thursday 13 June	Friday 14 June
8.30 – 10.00	Opening Review of Beam Cooling	Stochastic Cooling I	Electron Cooling III (low energy)	Beam Crystallisation	Physics with Cold Beams
10.00-10.30	Coffee	Coffee	Coffee	Coffee	Coffee
10.30-12.30	Muon Cooling	Electron Cooling I (medium & high energy)	Poster Session	Beam dynamics and New Ideas	Dieter Möhl Tribute Closing
Break	Lunch and afternoon break	Lunch and afternoon break	Lunch and afternoon break	Lunch and afternoon break	
16.30-17.30	Operational and Future Facilities I	Stochastic Cooling II & Future Facilities	Free afternoon	Operational and Future Facilities III	
17.30-17.50	Coffee	Coffee		Coffee	
17.50-19.00	Operational and Future Facilities II	Electron Cooling II (medium and high energy)		Operational and Future Facilities IV	
Evening		Fondue at the Allmendhübel		Banquet at Schilthorn	

Охлаждение пучка частиц означает уменьшение шестимерного фазового объёма (эмиттанса) занимаемого этим пучком:

$$V_{6D} = \int dx dp_x dy dp_y dz dp_z,$$

$$\epsilon_{6D} = \underbrace{V_{6D} p^{-3}}_{|p_x, p_x \ll p_z} = \int dx d\theta_x dy d\theta_y dz d\theta_z = (pc)^{-1} \int dx d\theta_x dy d\theta_y dz d\varepsilon.$$

Чем больше число частиц в пучке и меньше его эмиттанс, тем больше яркость пучка, а значит и яркость основанного на нём источника света (ИС), и светимость области пересечения встречных пучков.

Существуют **две возможности охлаждения** пучков частиц:

1. введение в систему **трения** (например, СИ),
2. **селекция частиц**, слежение за движением каждой из частиц пучка и управление движением каждой частицы персонально (обычно в этом детерминистическом случае, по недоразумению, используется термин «стохастическое», т.е. случайное).

Для методов охлаждения основанных на **трении** существуют теоремы **Лиувилля** и **Робинзона** накладывающие ограничения на время охлаждения и указывающие на путь к производству охлаждения пучка частиц

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{v}_{6D} = 0, \quad \vec{r}_{6D} = (\vec{r}, \vec{p}), \quad \alpha_{6D}(\vec{r}, \varepsilon, t) = \left(1 + \frac{1}{\beta^2}\right) \frac{P_{Fr}(\vec{r}, \varepsilon, t)}{\varepsilon} + \frac{\partial P_{Fr}(\vec{r}, \varepsilon, t)}{\partial \varepsilon},$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho \vec{v}_{6D}) = 0, \quad \vec{v}_{6D} = (\vec{v}, \dot{\vec{p}}), \quad \alpha_x = \frac{1}{2} \left[\frac{\bar{P}_s}{\varepsilon_s} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \varepsilon} \Big|_s - \frac{d\bar{P}}{d\varepsilon} \Big|_s \right], \quad \alpha_z = \frac{1}{2} \frac{\bar{P}_s}{\varepsilon_s}, \quad \alpha_s = \frac{1}{2} \frac{d\bar{P}}{d\varepsilon} \Big|_s,$$

Считается, что теорема Лиувилля описывается моделью **непрерывной жидкости**, в которой **траектории частиц не пересекаются**. Но такая модель без оговорок не верна, так как в этом случае плотность числа частиц и плотность заряда бесконечны, а их **траектории в трёхмерном пространстве координат R пересекаются и приводят к внутри-пучковому рассеянию (intra-beam scattering)***.

В теории ускорителей при обсуждении **Теоремы Лиувилля** считается, что частицы пучка не взаимодействуют, фазовое пространство пусто, т.к. частицы точечные, а плотность числа частиц конечна. Отсюда следует вывод, что возможно охлаждение основанное на персональном управлении частицами, сбором их в малом фазовом объёме ограниченном точностью диагностики и размерами **принадлежащих системе** охлаждения элементов управления динамикой частиц.

***внутри-пучковое рассеяние не меняет фазовый объём, но делает его в форме ежа (меняет его «эффективный» фазовый объём).**

To date, five main methods to increase the phase-space density of circulating beams in storage rings are operational:

- 1) cooling of e+e- -beams by synchrotron radiation (1946),
- 2) cooling of proton and ion beams by electron beams (1966),
- 3) stochastic cooling of (anti-)protons and ions (1972),
- 4) cooling of special ions by laser light (1993),
- 5) ionization cooling of muons (1994), is under intense development.

New cooling techniques are developed:

- 1) optical stochastic cooling of (anti-) protons, ions and muons (1993),
- 2) transit time optical stochastic cooling (1994),
- 3) enhanced optical cooling of e-, ion, & μ - beams (screen, UK, 1/2)
- 4) broad band laser cooling of ion beams,
- 5) coherent electron cooling of ion beams,
- 6) a method of delivering of a monochromatic electron beam to the LHC interaction point using **broad band laser cooling**,
- 7) fast broad band laser cooling of ion beams,
- 8) fast broad band laser cooling of long lived ion beams.

Each of these techniques were covered in detail in specialized contributions and private discussions at this workshop.



Stochastic cooling

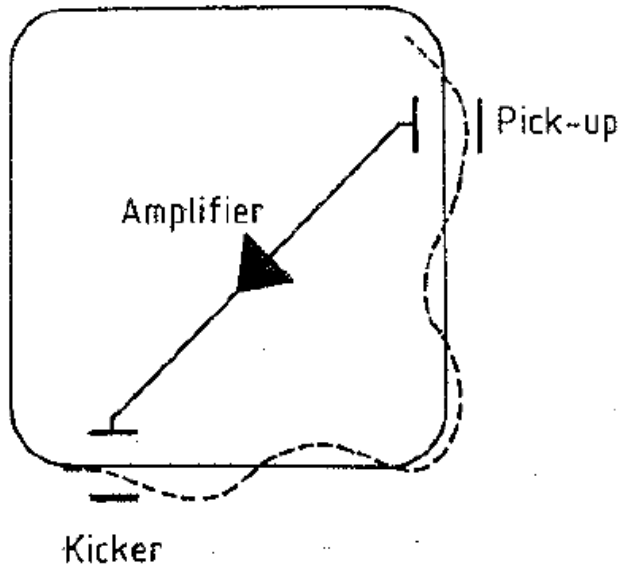
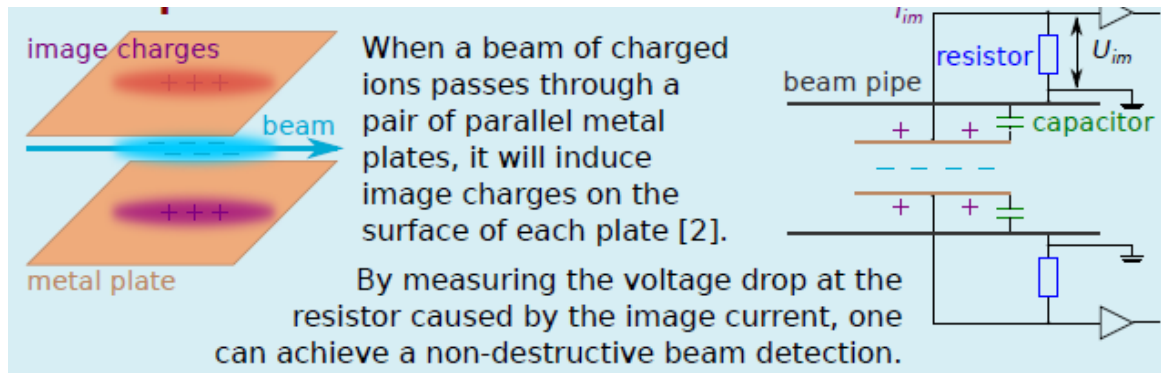
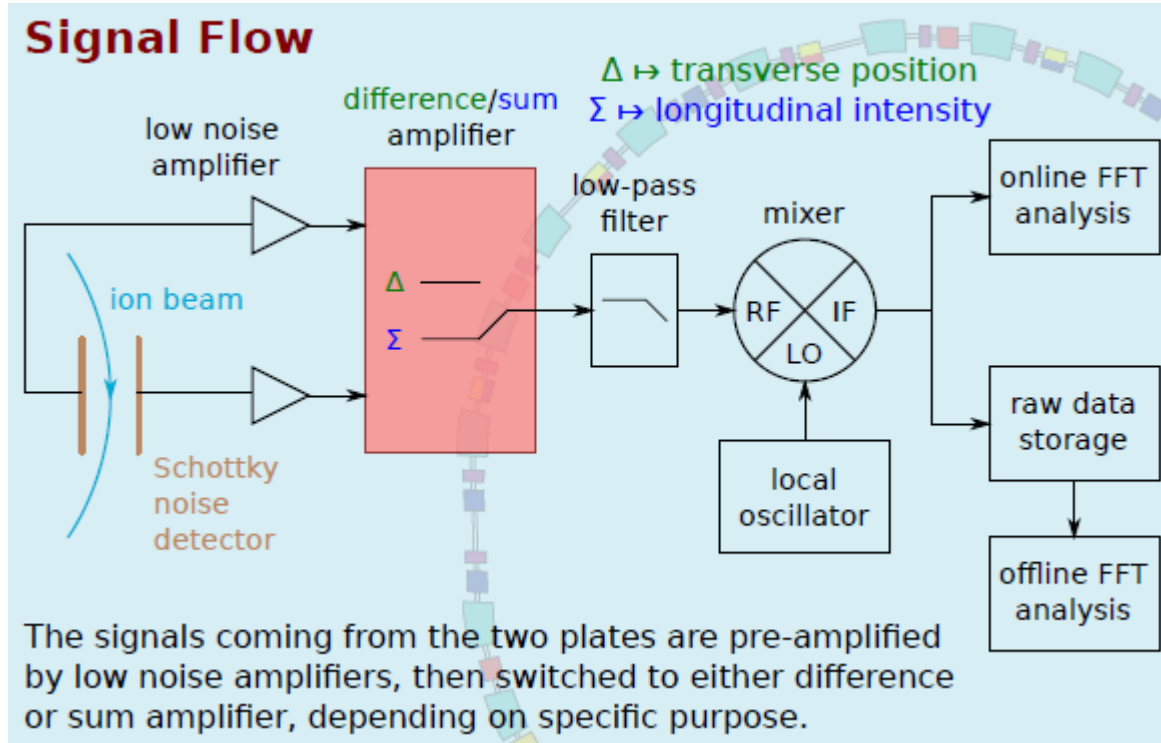


Fig. 2: The basic set up for (horizontal) stochastic cooling



At the time, there were discussions about a possible **clash with Liouville's theorem**, which states that a continuum of charged particles guided by electromagnetic fields behaves like an incompressible liquid. In reality, particle beams consist of a mixture of occupied and non-occupied phase space – much like foam in a glass of beer. Stochastic cooling is not trying to compress this "liquid" but rather it separates occupied and non-occupied phase space, in a way similar to foam that is settling. Once these theoretical questions were clarified there were still many open issues, such as the influence of noise and the required bandwidth. With a mild push from friends and colleagues, Simon finally published the first internal note on stochastic cooling in 1972 (van der Meer 1972).



Simon van der Meer **Nobel Prize in 1984**

Once the validity of the method had been demonstrated, Simon's idea rode on the crest of a wave of **large projects that took life at CERN**. There was the proposal by **David Cline, Peter McIntyre, Fred Mills and Carlo Rubbia** to convert the SPS into a proton–antiproton collider. The aim was to provide experimental evidence for the **W and Z particles**, which

CERN Courier, v.51, No 5, 2011



Fig 1. Stochastic Cooling at LEAR (CERN). Different signal transmission lines cutting through the ring can be seen (CERN photo 9007366)

Т Р У Д Ы

VII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В ДВУХ ТОМАХ

Т О М II

*под общей редакцией член-корр. АН СССР
А. И. АЛИХАНЯНА*

Конференция проводилась под руководством Государственного комитета по
использованию атомной энергии СССР и Академии наук СССР

Содействовал конференции

Международный Союз чистой и прикладной физики

Организатор конференции

Ереванский физический институт

ЕРЕВАН—ЦАХКАДЗОР

27 августа—2 сентября 1969 года

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК
АРМЯНСКОЙ ССР

ЕРЕВАН

1970

О ЗАТУХАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИНХРОТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПУЧКА С РЕЗОНАТОРОМ

С. Г. КОНОНЕНКО, А. М. ШЕНДЕРОВИЧ

Физико-технический институт АН УССР, Харьков
Докладчик А. М. Шендерович

Введение

При исследовании продольных колебаний пучков в накопителе с учетом наведенного напряжения большинство авторов [1—4] рассматривают обычно только движение сгустков, как целого. Относительное движение частиц в сгустке исследовано в работе [5], однако, автор ограничился анализом лишь линейного приближения.

Идея стохастического охлаждения обсуждалась в кулуарах до появления публикации Ван дер Меера 1972 г. Говорились слова, что можно было бы охладить, если бы можно было воздействовать на каждую частицу полями персонально предназначенными каждой частице. Проследить и подкорректировать траектории частиц можно в случае нескольких частиц. Считалось, что для большого числа частиц это не возможно. Оказалось, что возможно.

Этот вопрос обсуждался, например на международной конференции по ускорителям 1969 г. в Ереване. У меня был вопрос к докладчику относительно теоремы Лиувилля в этом случае и реплика относительно технической невозможности охлаждения пучка частиц. Вопрос вошел, а реплика не вошла в Труды конференции.

1. А. И. Барышев, С. А. Хейфец, ЖТФ, 33, 320. 1963.
2. Н. А. Наумов, М. М. Карлинер, А. Н. Скринский и др., Атомная энергия, т. 20, вып. 3, 210, 1966.
3. С. С. Шахиджанов, Атомная энергия, т. 12, вып. 6, стр. 483, 1962.
4. М. М. Карлинер, А. Н. Скринский, И. А. Шехтман, ЖТФ, 38, № 11, 1945, 1968.
5. А. И. Барышев, ЖТФ, 33, № 7, 882, 1963.
6. А. Н. Довбня, С. Г. Кононенко, Л. В. Репринцев, А. М. Шендерович. Исследование нелинейных синхротронных колебаний. Доклад на 1-м Всеюзном Совещании по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1968 г.

ДИСКУССИЯ

Бессонов: Не оговорился ли докладчик, сказав, что в его модели нарушается теорема Лиувилля?

Шендерович: Нет, не оговорился. В рассмотренной задаче происходит нарушение теоремы Лиувилля за счет диссипации энергии в стенках резонатора.

Диденко: Скажите более подробно, как понимать колебания двух сгустков, как единого целого и почему Вы ограничились учетом только двух сгустков?

Шендерович: 1. Рассмотрены два сгустка, каждый из которых движется как целое, т. е. не рассматриваются эффекты типа затухания Ландау.
2. В работе Барышева [5] отрицалось влияние резонатора на относительное движение, поэтому для нас представляло интерес исследовать более детально этот вопрос. Мы исследовали движение двух сгустков, как наиболее простой случай.

Оптические методы охлаждения пучков заряженных частиц

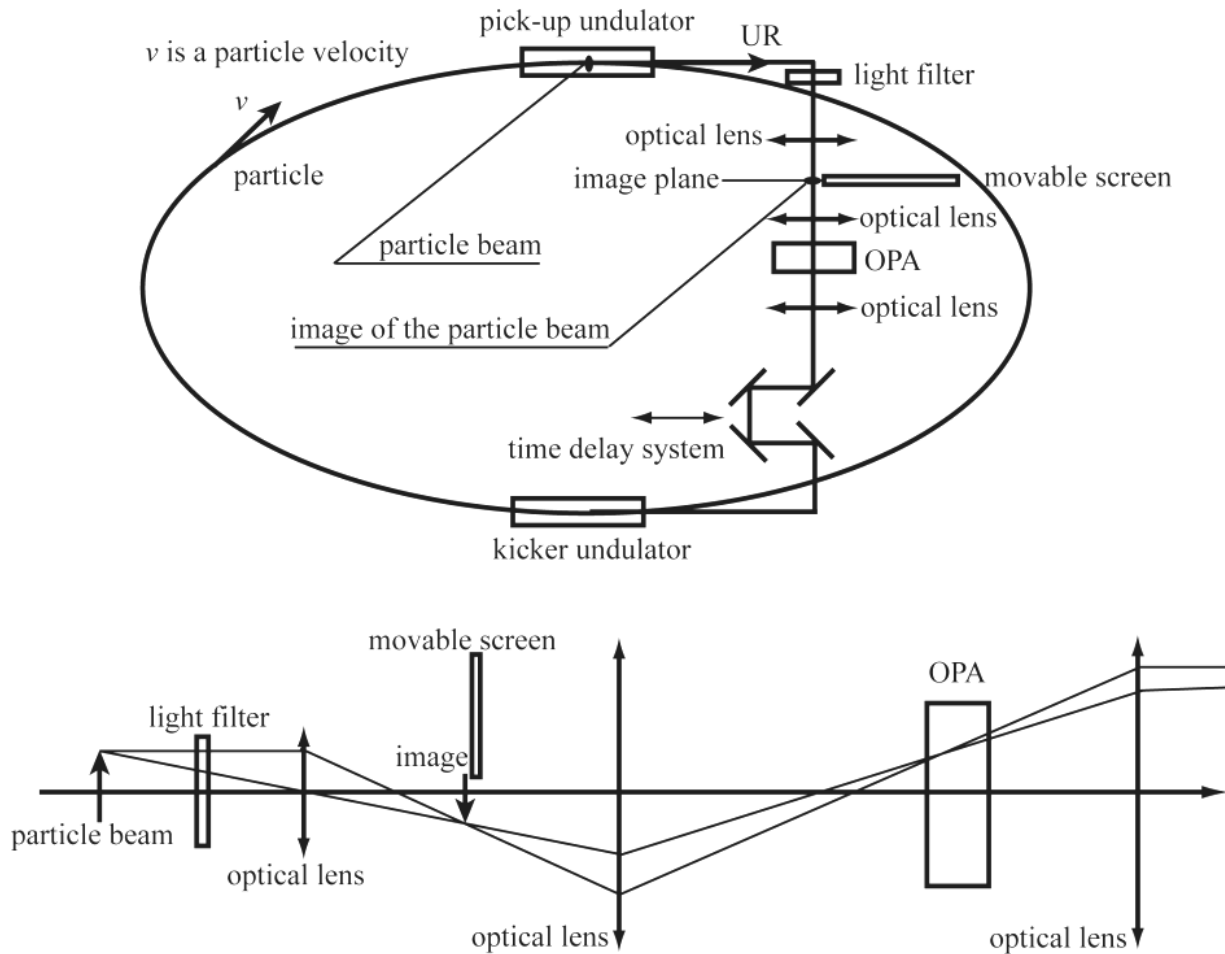


Рис 1: Схема ОО пучка частиц (а) и её развернутая оптическая схема (b)

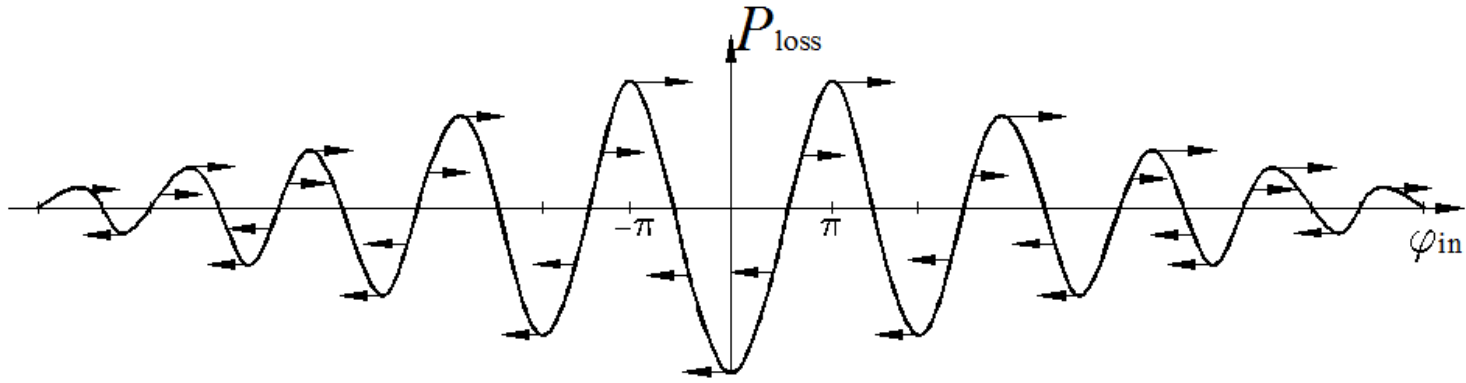


Рис 2: В схеме ОО частицы группируются вблизи фаз $\varphi_{in} = -\pi / 2 + 2\pi m$ (энергий ε_m).

$$\varphi_m = \varphi_{m,\beta,x} + \varphi_{m,\beta,z} + \varphi_{m,\eta} = -\pi / 2 + 2m\pi \quad m = 0, \pm 1, \dots, \pm (M - 1)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_r \left[1 + \frac{(2m - 1/2) \lambda_{1,c} \beta^2}{2L_{p,k} \eta_{c,l}} \right]$$

Если пучок частиц движется вдоль оси ондулятора, то его частицы испускают волновые пакеты длиной $K\lambda_1$, где λ_1 - длина волны первой гармоники ондуляторного излучения. Если предположить, что волновые пакеты не перекрываются, то в этом случае мы имеем дело с режимом слабых токов

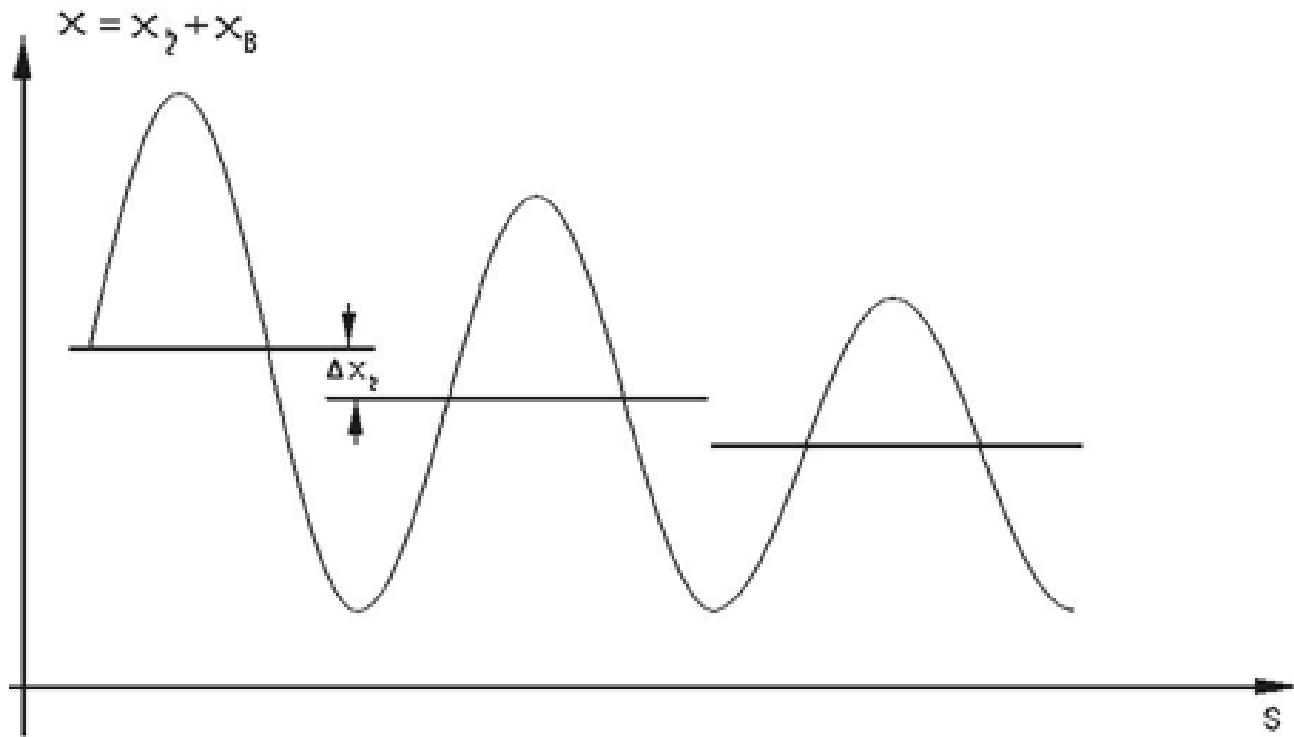
$$i_c = \frac{ec}{K\lambda_1}, \quad i[A] = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^8}{K\lambda_1[m]} = \frac{4.8 \cdot 10^{-11}}{K\lambda_1[m]} \Big|_{K\lambda_1=10^{-4}m} = 4.8 \cdot 10^{-7} A$$

Для **оптического стохастического метода** охлаждения нужна ювелирная работа по селекции и управлению динамикой каждой частицы. В этом случае для уменьшения фазового объёма пучка в продольном направлении необходимо создать условия, при которых:

1. В общем случае, различные по величине и, возможно по знаку, скачки энергии частиц пучка приводят, в среднем, к изменению их энергии в одну сторону: уменьшению или увеличению. В случае уменьшения энергии частиц - темп уменьшения энергии частиц меньших энергий меньше, а в случае увеличения энергии частиц - темп увеличения энергии частиц меньших энергий больше.

Для уменьшения фазового объёма пучка в поперечном направлении необходимо:

2. В момент скачка энергии частицы скачок положения мгновенной орбиты этой частицы должен приводить к её сближению с частицей. Например, если частица в момент скачка её энергии в кикерном ондуляторе находится снаружи от орбиты, а скачок орбиты происходит в сторону частицы (случай ускорения), то амплитуда бетатронных колебаний частицы уменьшится. Это условие должно выполняться в среднем для всех проходов частицы через кикерный ондулятор.



The evolution of the amplitude of an ion betatron oscillations in the radial plane.

Comment on "Damping Force in the Transit-time Method of Optical Stochastic Cooling" **PRL**

In Ref. [1] the author claimed, that he clarifies a specific aspect of a transient time method of optical stochastic cooling [2]. The center point of his concept associated with basic transformation of energy in a kicker undulator described by the formula

$$\delta_i^{(2)} = \delta_i^{(1)} - G \cdot \sin(kR_{56}\delta_i^{(1)}) \quad (1)$$

where $\delta_i^{(1)}$, $\delta_i^{(2)}$ is a particle's relative energy before and after the cooling insertion respectively, $k = 2\pi / \lambda$, λ is the optical wavelength, R_{56} is the time-of-flight characteristics of the cooling insertion, and the G is a damping coefficient. Author uses equation (1) even when the particle manifests substantial slippage with respect to its own wavelet, emitted in a pickup undulator and optically amplified. One can see that if the phase delay $kR_{56}\delta_i^{(1)}$ has an addition factor $2\pi n$ ($n=1,2,3,\dots$) the term $G \cdot \sin(kR_{56}\delta_i^{(1)})$ does not change its value.

.....

E.G.Bessonov, FIAN, Moscow, Russia, A.A.Mikhailichenko, Cornell U., CLASSE, Ithaca, U.S.A.

[1] A. Zholents, "Damping Force in the Transit-Time Method of Optical Stochastic Cooling", PRLST. Mar 1, 2012. 2 pp. Published in Phys.Rev.ST Accel. Beams 15 (2012) 032801.

[2] M. Zolotarev, A. Zholents, "Transit-time Method of Optical Stochastic Cooling", Physical Review E, **50**, 3087(1994).

[3] E.G.Bessonov, M.V.Gorbunkov (Lebedev Inst.), A.Mikhailichenko (Cornell U., Phys. Dept.), "Proposal for an Enhanced Optical Cooling System Test in an Electron Storage Ring", Apr 2007, 18 pp., Published in Phys.Rev .ST Accel. Beams 11 (2008) 011302.
Also Published in Conf. Proc. C070625 (2007) 3363, PAC07-THPAN059, Albuquerque, NM.

Coherent Electron Cooling

Vladimir N. Litvinenko^{1,*} and Yaroslav S. Derbenev²

¹Brookhaven National Laboratory, Upton, Long Island, New York, USA

²Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, Virginia, USA

(Received 24 September 2008; published 16 March 2009)

Cooling intense high-energy hadron beams poses a major challenge for modern accelerator physics. The synchrotron radiation emitted from such beams is feeble; even in the Large Hadron Collider (LHC) operating with 7 TeV protons, the longitudinal damping time is about 13 hours. None of the traditional cooling methods seem able to cool LHC-class protons beams. In this Letter, we present a novel method of coherent electron cooling based on a high-gain free-electron laser (FEL). This technique could be critical for reaching high luminosities in hadron and electron-hadron colliders.

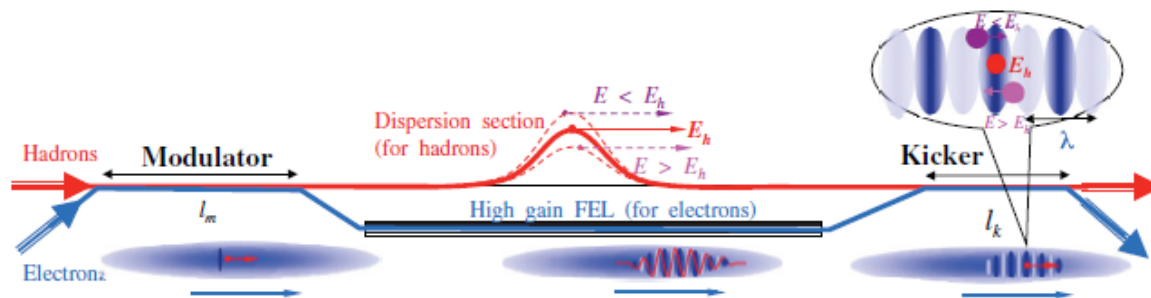


FIG. 1 (color). A general schematic of the Coherent Electron Cooler (CEC) comprising three sections: A modulator; a FEL plus a dispersion section; and, a kicker. The FEL wavelength, λ , in the figure is grossly exaggerated for visibility.

[4] To cool the LHC we suggest to use: (1) a 3.821 GeV ERL with 50 picosecond, 100 A peak current electron bunches at the rep-rate of the LHC's 7 TeV proton beam; (2) an FEL with 65-meter-long helical wiggler (0.9877 T, 5 cm period) operating at 10 nm wavelength [3].

[5] Ya. S. Derbenev, in *Proceedings of 7th Conference on Charged Particle Accelerators, Dubna, USSR, 1980*, p. 269; AIP Conf. Proc. **253**, 103 (1992); in *Proceedings of COOL 2007, Bad Kreuznach, Germany, September 9-14, 2007* (Report No. THM2105).

Comment on "Coherent Electron Cooling"

An interesting method proposed in [1] - coherent electron cooling (CEC) of ion beams in a storage ring of the Large Hadron Collider (LHC). The authors estimated that their method, in contrast to the other traditional methods of cooling, is an efficient cooling procedure for the proton beam at high energy. As the subject of beam cooling is important for practical applications, we decided to compare the method described in [1] with the one described earlier in [2].

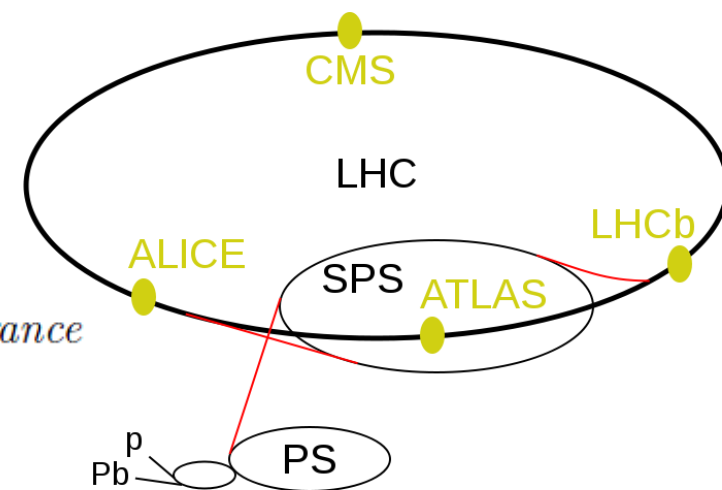
E.G.Bessonov, FIAN, Moscow, Russia, A.A.Mikhailichenko, Cornell U., CLASSE, Ithaca, U.S.A.

[1] V.N. Litvinenko and Ya.S. Derbenev, "Coherent Electron Cooling", PRL, v.102, 114801 (2009).

[2] E.G.Bessonov, M.V.Gorbunkov, A.Mikhailichenko, "Enhanced Optical Cooling of Ion Beams for LHC", Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, pp. 1483-1485; JINST 1 (2006) P08005.

[3] E.G.Bessonov, E.V.Tkalya, Laser cooling of nuclear beams in storage rings, Proc. First HERA-III Workshop: "The new Frontier in Precision Lepton-Nucleon Physics", Max-Planck-Inst., Munich, 18-20 Dec. 2002, <http://wwwhera-b.mppmu.mpg.de/hera3/Presentations.html> ; arXiv:physics/0212100.

Electron Beam for LHC



*Mieczyslaw Witold Krasny,
LPNHE, University Pierre et Marie Curie, Paris, France*

Abstract: A method of delivering a monochromatic electron beam to the LHC interaction points is proposed. In this method, heavy ions are used as carriers of projectile electrons. Acceleration, storage and collision-stability aspects of such a hybrid beam is discussed and a new beam-cooling method is presented. This discussion is followed by a proposal of the Parasitic Ion-Electron collider at LHC (PIE@LHC). The PIE@LHC provides an opportunity, for the present LHC detectors, to enlarge the scope of their research program by including the program of electron-proton and electron-nucleus collisions with minor machine and detector investments.

The electron-proton (electron-nucleus) colliders can neither compete with the hadronic colliders in exploring the small-distance frontier of interactions of the basic constituents of matter, nor with the electron-positron colliders in the measurement precision. Nevertheless, they are very useful for a precise mapping of the emittance and momentum distributions of partonic WBBs generated by colliding hadrons.

The Doppler cooling [4] may be used for this purpose.

[4] E.G. Bessonov, E.V. Tkalya, arXiv:physics/0212100v1, 27 Dec. 2002.

Ионизационное охлаждение

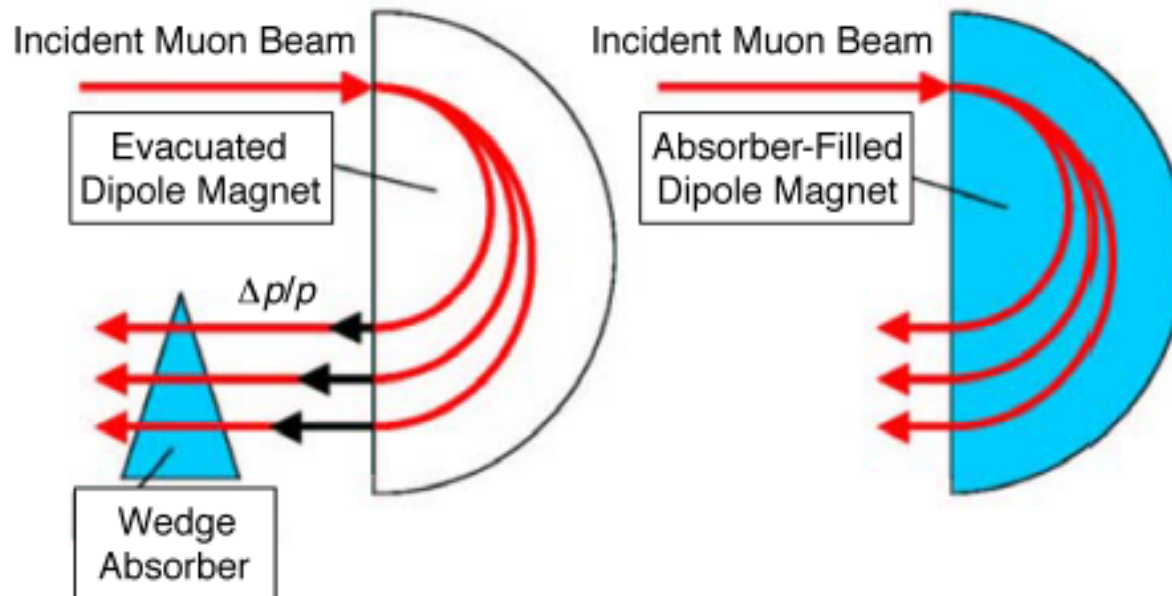


Figure 4: Two approaches to emittance exchange: in each, an initially small beam with nonzero momentum spread is converted into a more monoenergetic beam with a spread in transverse position. (Figure courtesy of Muons, Inc.).

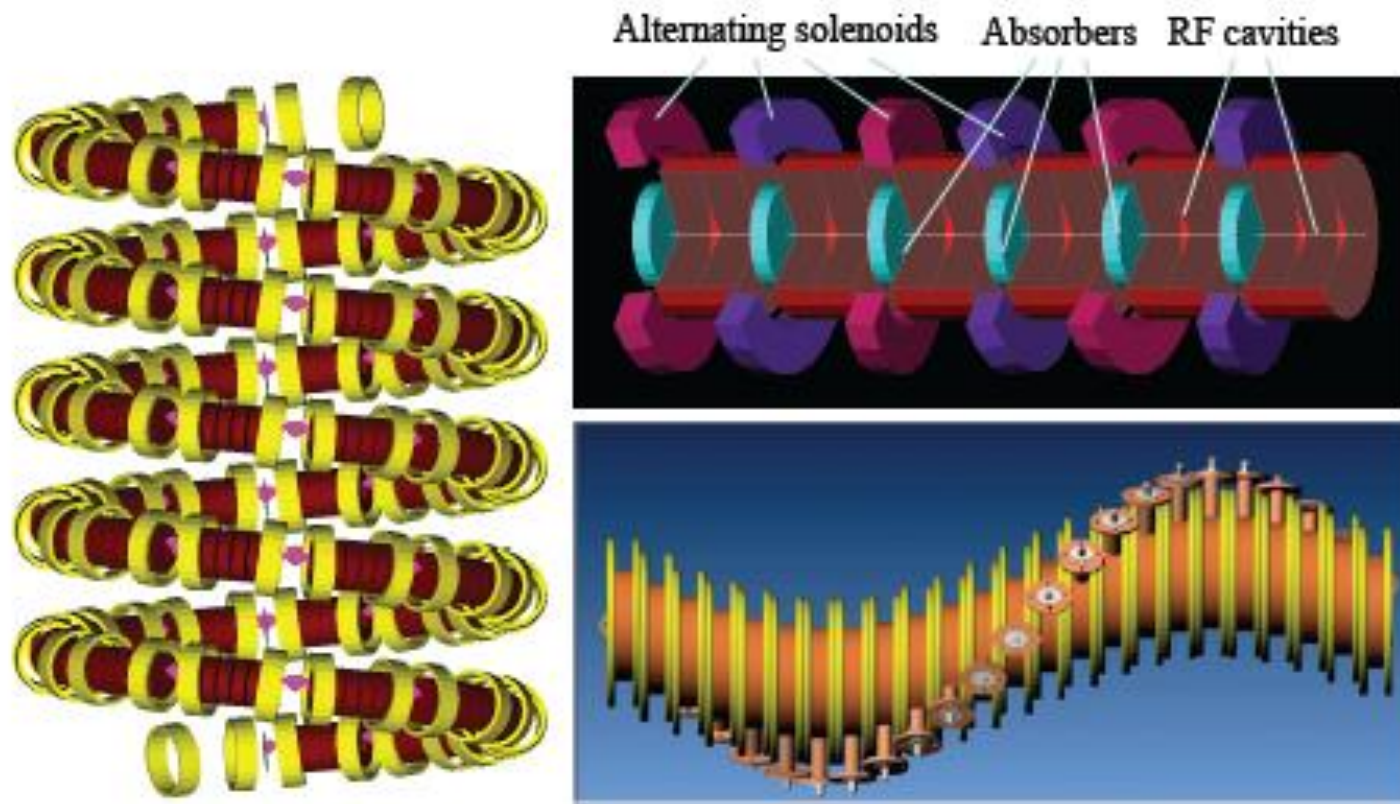
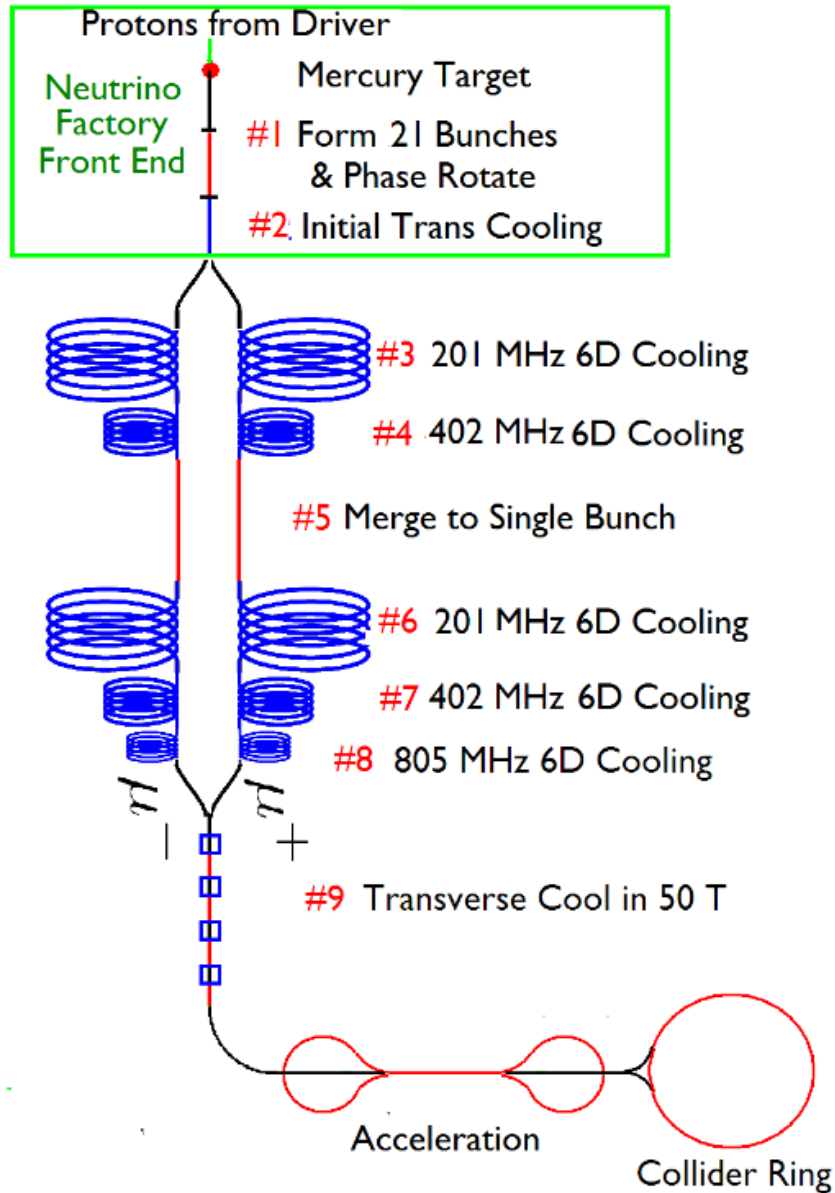


Figure 6: Three approaches to 6D cooling: (left) “Guggenheim” helix [24], (top right) “FOFO Snake,” [25] and (bottom right) “helical cooling channel” (HCC) [19].

Замечу цитирование нашего бывшего сотрудника Ю.М.Адо

Y.M. Ado, V.I. Balbekov, “Use of ionization friction in the storage of heavy particles,” At. Energ. 31(1) 40 (1971), English translation in Atomic Energy (Springer) 31(1) 731, <http://www.springerlink.com/content/v766810126338571/>

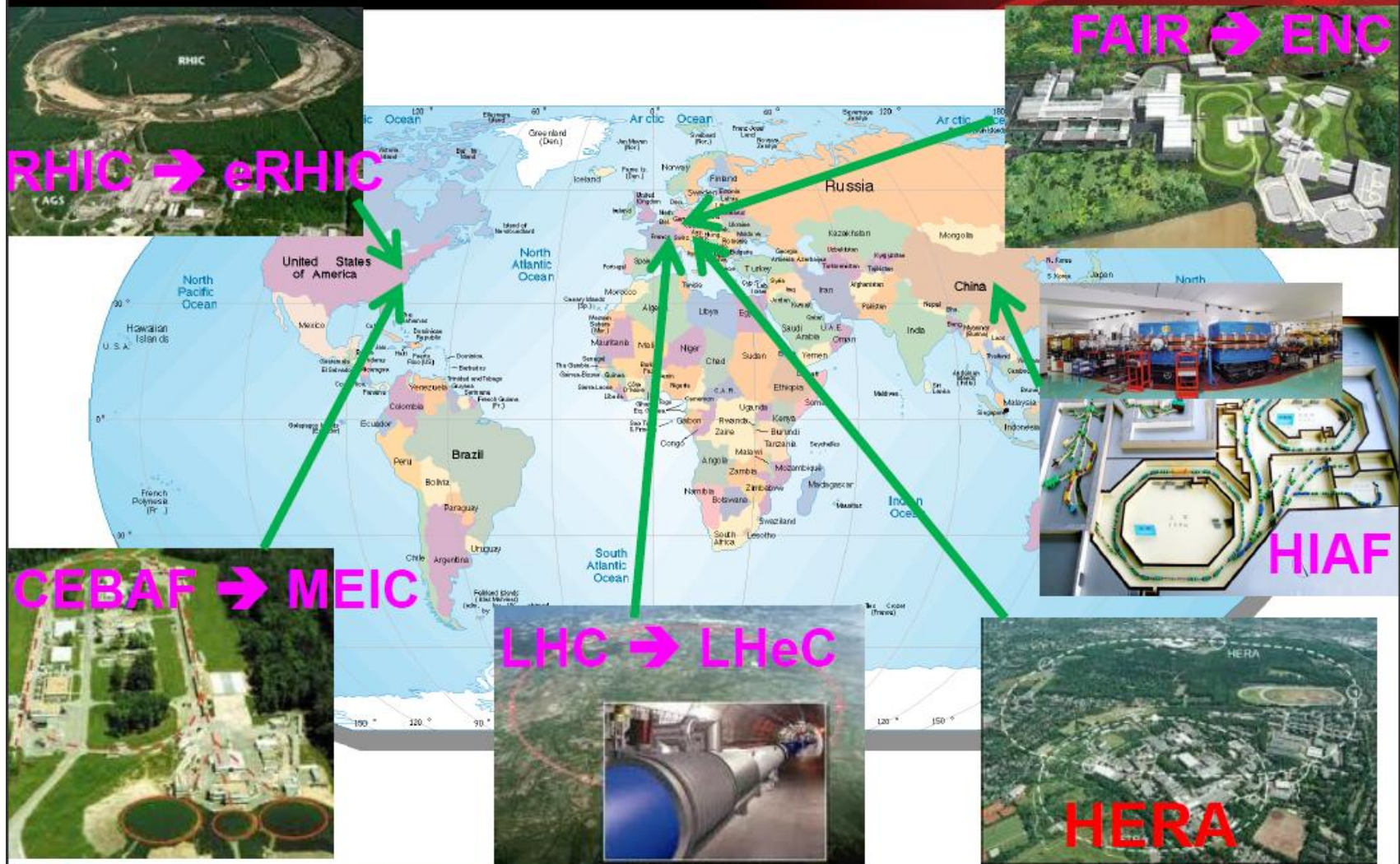
MUON COLLIDER



The muon collider would extend limitations of the $e^+ e^-$ colliders and provide new physics potentials with a possible discovery of the heavy Higgs bosons. At the maximum energy of 2 TeV the projected luminosity is of the order of $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The colliding $\mu^+ \mu^-$ bunches have to be focused to a very small transverse size of $2.8 \mu\text{m}$ which is accomplished by the betatron functions at the crossing point of $\beta^* = 3\text{mm}$. This requires the longitudinal space of the same length 3 mm . These very short bunches at 2 TeV could circulate only in a quasi-isochronous storage ring where the momentum compaction is very close to zero. We report on a design of the muon collider isochronous lattice. The momentum compaction is brought to zero by having the average value of the dispersion function through dipoles equal to zero. This has been accomplished by a combination of the FODO cells together with a low beta insertion. The dispersion function oscillates between negative and positive values.

The Electron-Ion Collider Project at Jefferson Lab, Yaroslav Derbenev (Yuhong Zhang)

Electron-Ion Collider on World Map



Science Goals

The High-Energy/Nuclear Science of LHeC

Overarching Goal: lepton-proton at the TeV Scale

Hunt for quark substructure & high-density matter (saturation)

High precision QCD and EW studies and possible implications for GUT

The Nuclear Science of eRHIC/MEIC

Overarching Goal: Explore and Understand QCD:

Map the spin and spatial structure of quarks and gluons in nucleons

Discover the collective effects of gluons in atomic nuclei

(role of gluons in nuclei & onset of saturation)

Emerging Themes:

Understand the emergence of hadronic matter from quarks and gluons & EW

The Nuclear Science of ENC

Overarching Goal: Explore Hadron Structure

Map the spin and spatial structure of valence & sea quarks in nucleons

JLab Nuclear Science: 12 GeV CEBAF

CEBAF fixed target program

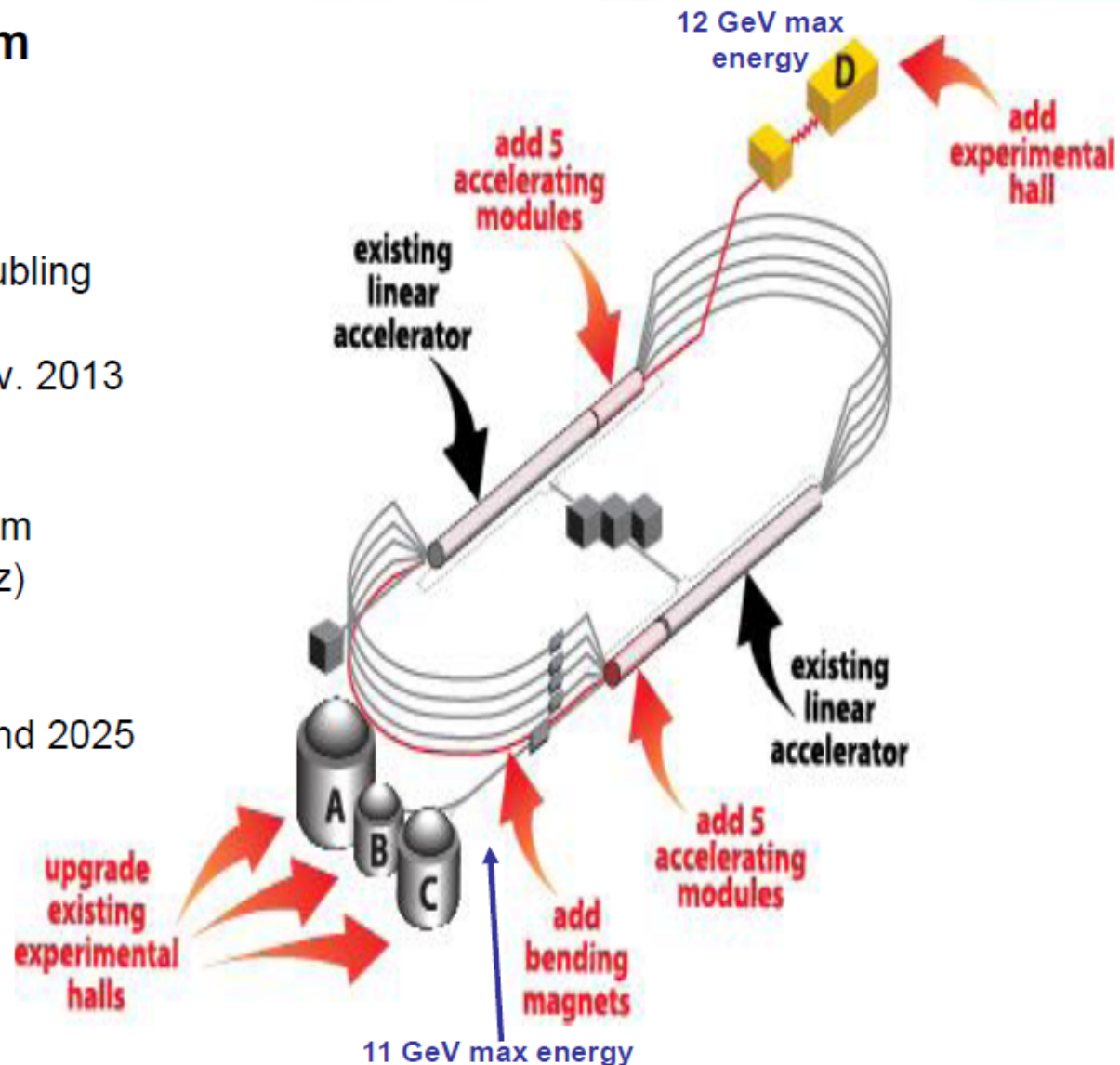
- 5-pass recirculating SRF linac

12 GeV CEBAF Upgrade

- A \$340M project for energy doubling
- Construction near completion
- Commissioning will start on Nov. 2013

New CEBAF will provide

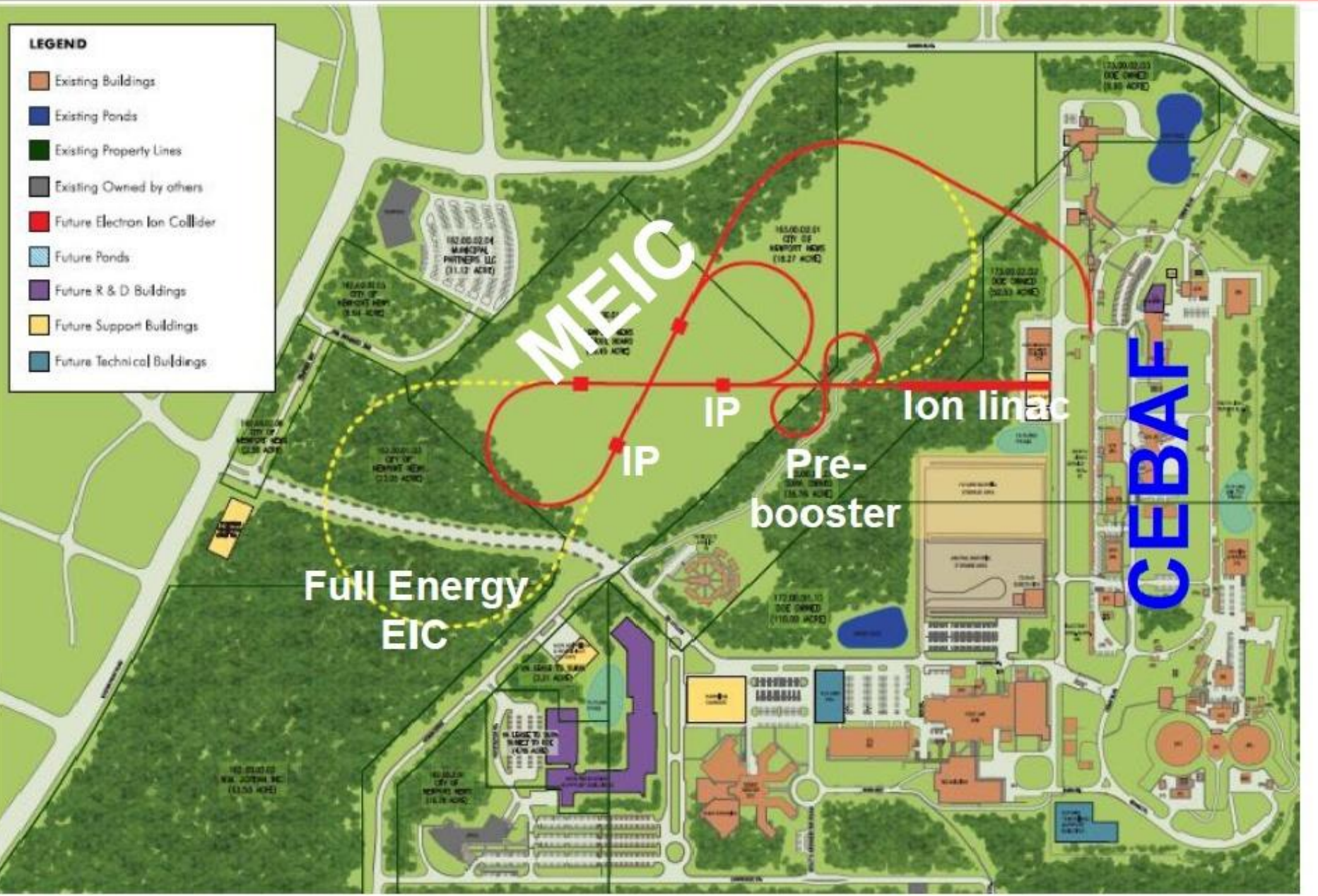
- Up to 12 GeV CW electron beam
- High repetition rate (3x499 MHz)
- High polarization (>80%)
- Very good beam quality
- Exciting science program beyond 2025



Future Nuclear Science at JLab: MEIC

LEGEND

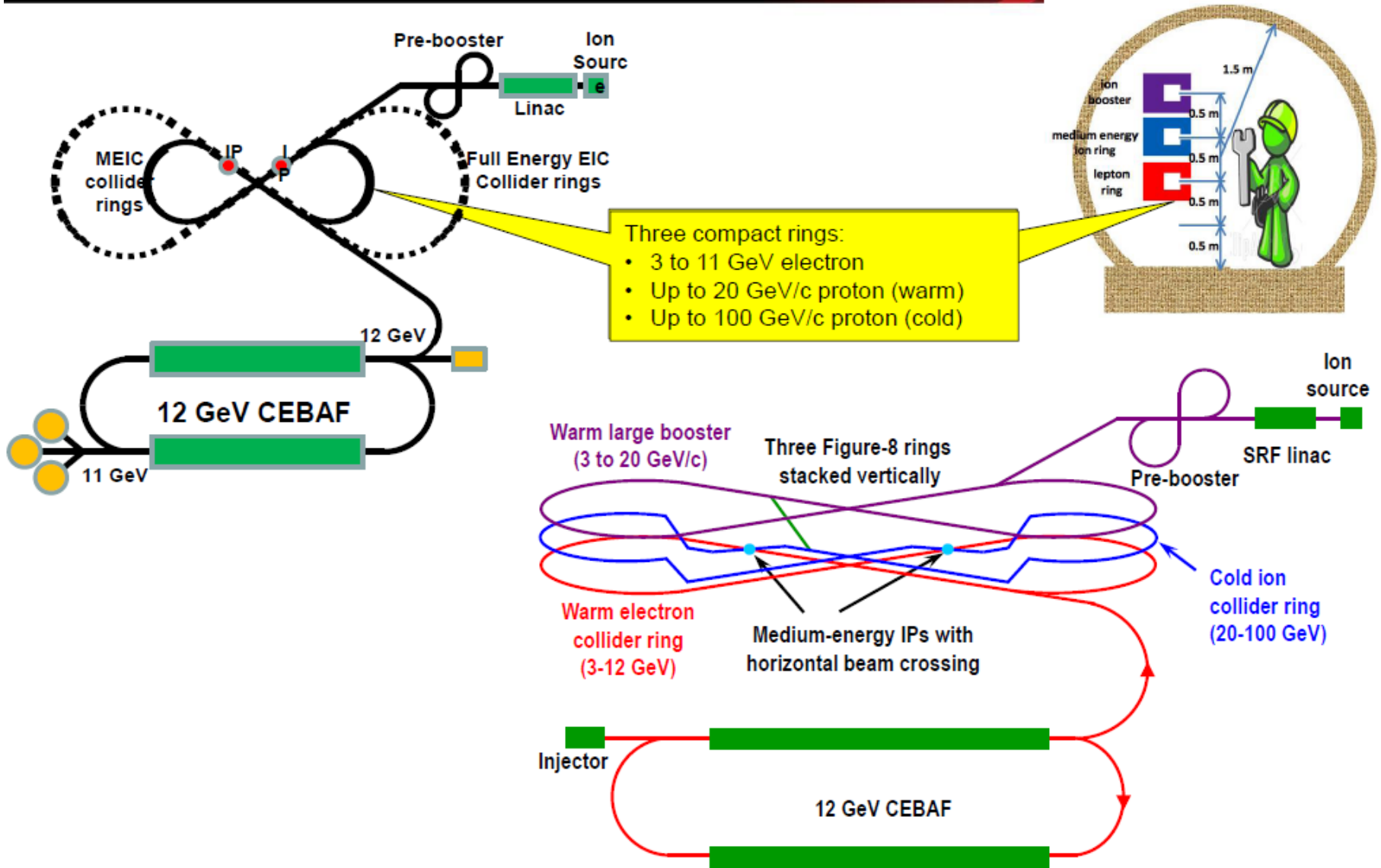
- Existing Buildings
- Existing Ponds
- Existing Property Lines
- Existing Owned by others
- Future Electron Ion Collider
- Future Ponds
- Future R & D Buildings
- Future Support Buildings
- Future Technical Buildings



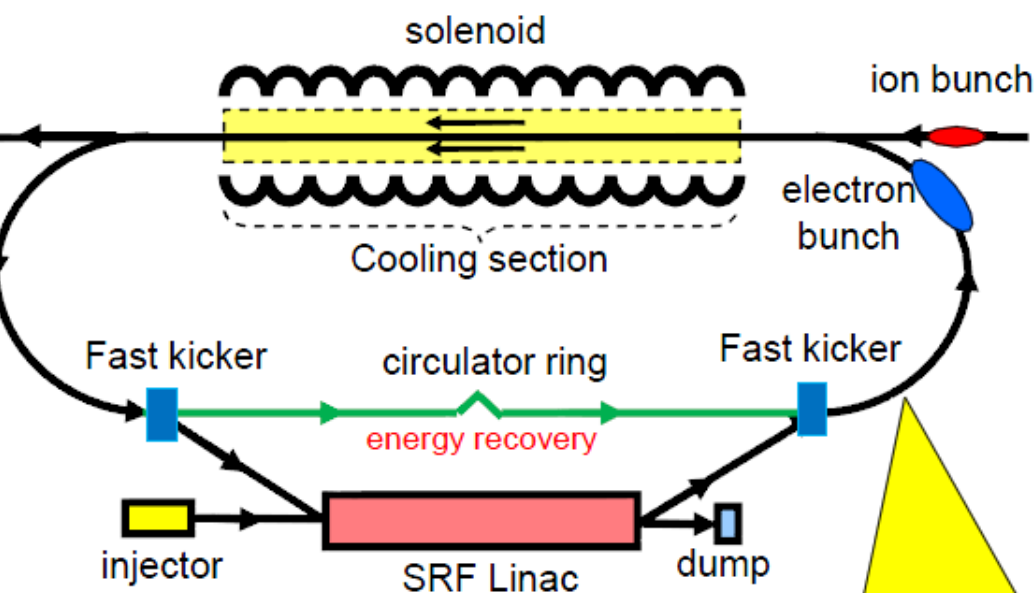
Introduction

- JLab's fixed target program after the 12 GeV CEBAF upgrade will be world-leading for at least a decade.
 - A *M*edium energy *E*lectron-*I*on *C*ollider (MEIC) at JLab will open new frontiers in nuclear science.
 - The timing of MEIC construction can be tailored to match available DOE-ONP funding while the 12 GeV physics program continues.
 - MEIC parameters are chosen to optimize science, technology development, and project cost.
 - We maintain a well defined path for future upgrade to higher energies and luminosities.
 - A conceptual machine design has been completed recently, providing a base for performance evaluation, cost estimation, and technical risk assessment.
 - A design report was released on August, 2012.
-

MEIC Layout

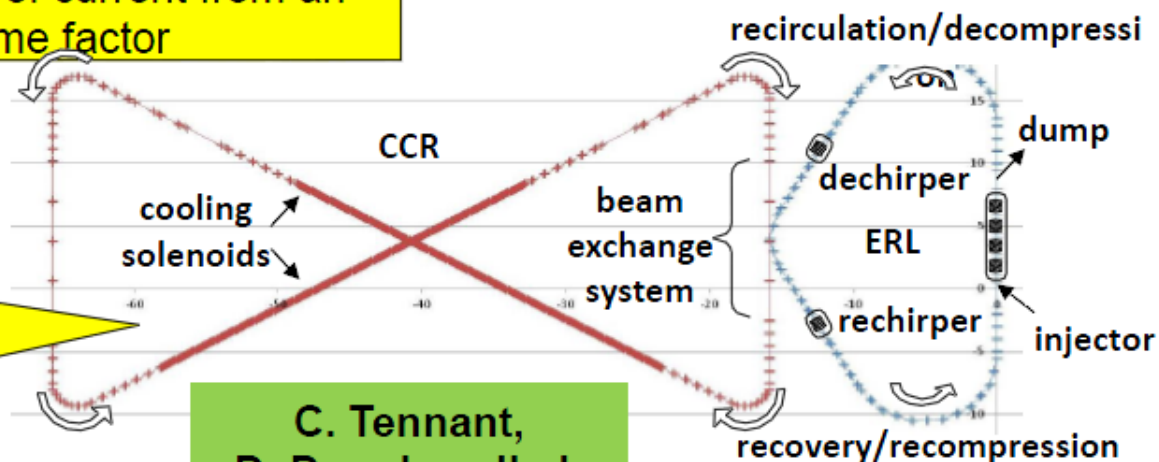


ERL Circulator Cooler for MEIC Collider Ring



e-bunches circulates 10+ turns
 → reduction of current from an ERL by a same factor

Optimization:
 Put it at center of the Figure-8 ring, for eliminating the long return path doubles the cooling rate



C. Tennant,
 D. Douglas, JLab

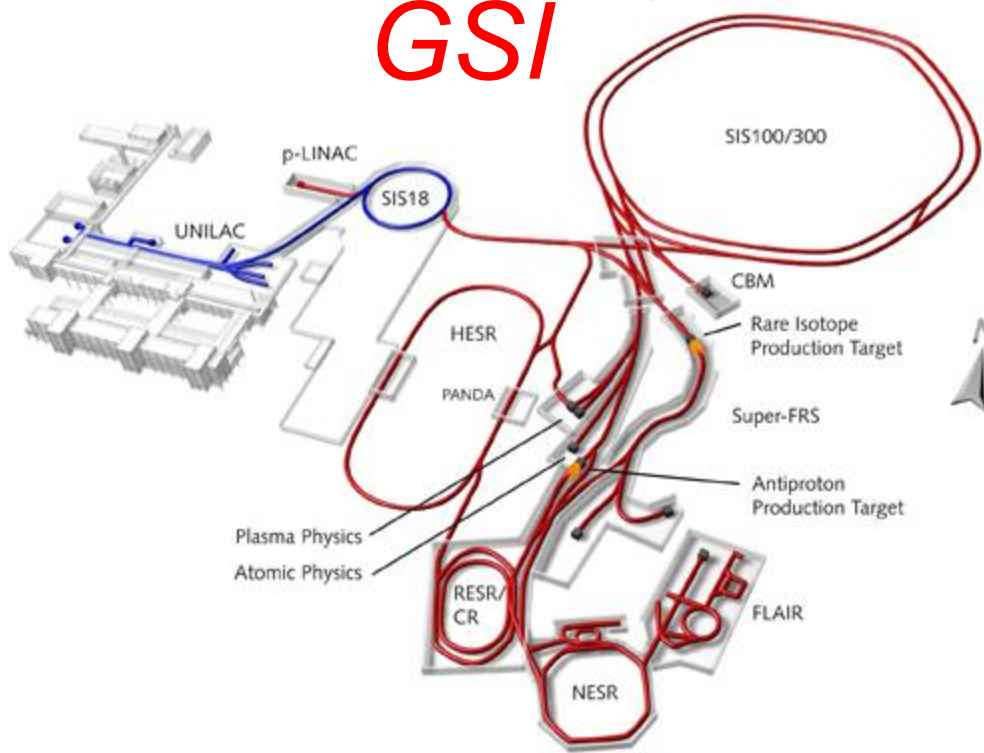
Design Choices

- Energy Recovery Linac (ERL)
- Compact circulator ring to meet design challenges
- Large RF power (up to 81 MW)
- Long gun lifetime (average 1.5 A)

Required technologies

- High bunch charge magnetized gun
- High curr. ERL (55 MeV, 15 to 150 mA)
- Ultra fast kicker

GSI



In the years to come, GSI will evolve to an international structure named **FAIR** for [Facility for Antiproton and Ion Research](#). The first beam was expected by **2013**, but this is not realistic anymore. Among the improvements, two new synchrotrons (with respective magnetic rigidity 100 and 300 Tm), a *Super-FRS* and several new rings among which one that can be used for antimatter research.

The FAIR complex

The chief tool is the heavy ion [accelerator](#) facility consisting of [UNILAC](#), the Universal Linear Accelerator (energy of 2 - 11.4 [MeV](#) per [nucleon](#)), SIS 18, the heavy-ion [synchrotron](#) (0.010 - 2 [GeV/u](#)) and ESR, the experimental storage ring (0.005 - 0.5 GeV/u) and [FRS](#). The UNILAC was commissioned in **1975**, the SIS 18 and the ESR were added in **1990** boosting the ion acceleration from 10% of light speed to 90%.

The **GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research** ([German](#): **GSI** *Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH*) is a federally and state co-funded [heavy ion](#) research center in the [Wixhausen](#) suburb of [Darmstadt](#), Germany.

Схема комплекса NICA

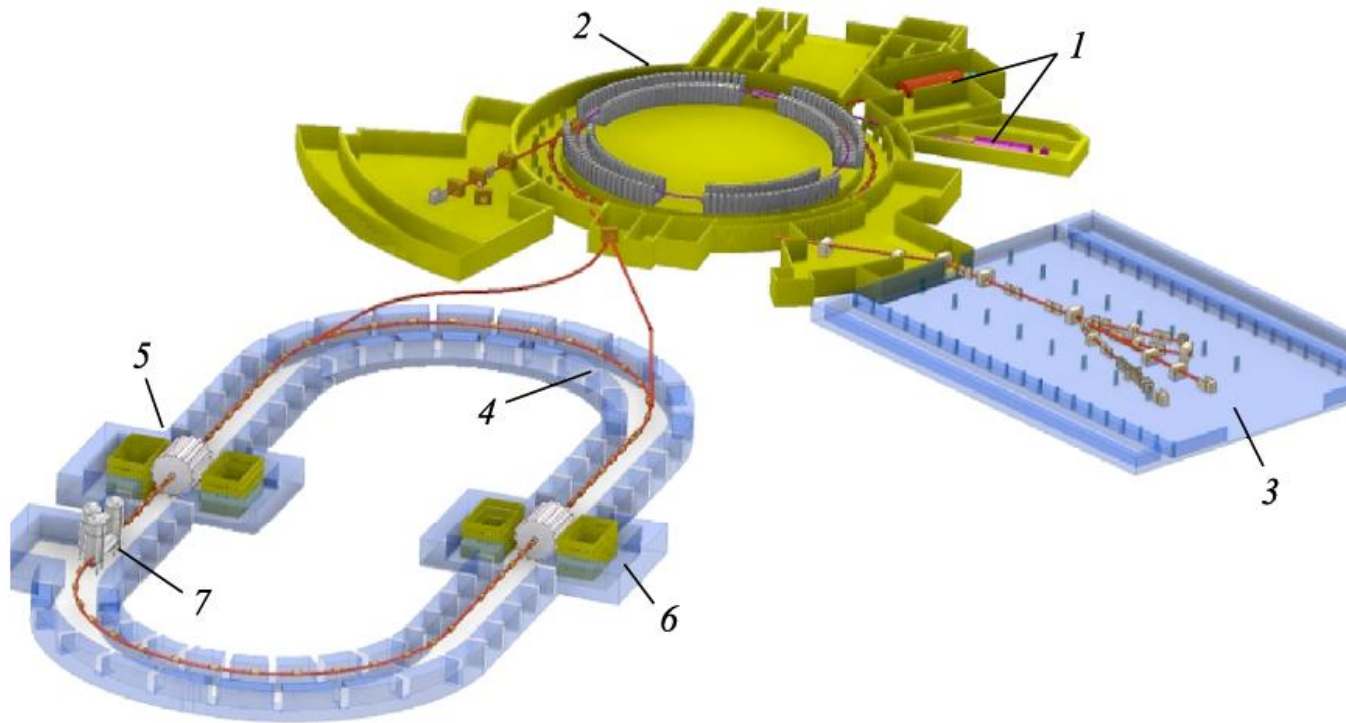
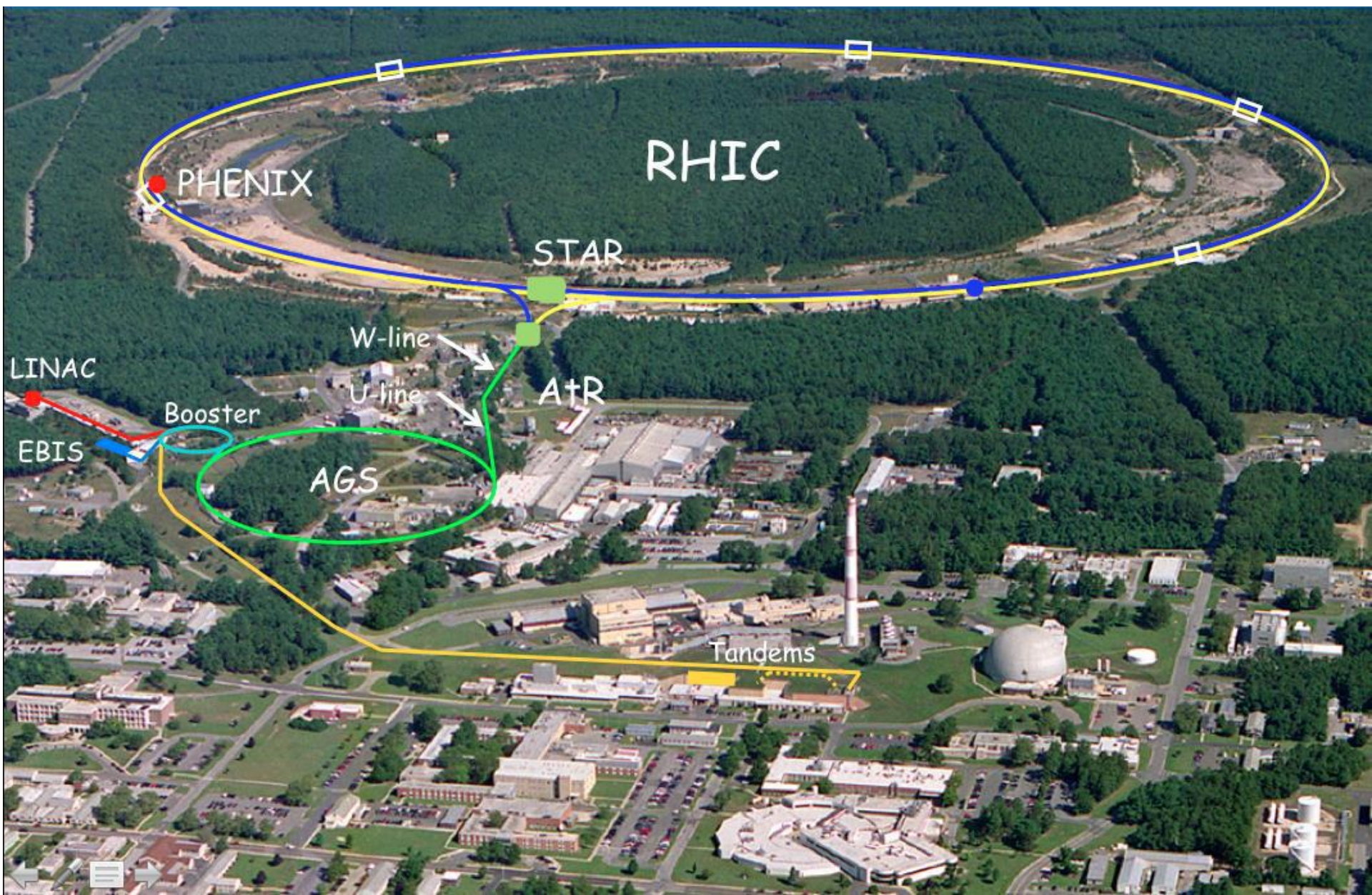


Рис. 1. Схема комплекса NICA: 1 — линейные ускорители; 2 — существующие здания: инжектор, бустерный синхротрон и нуклотрон; 3 — экспериментальный корпус для установок на выведенных пучках; 4 — кольца коллайдера; 5, 6 — детекторные установки MPD и SPD; 7 — высоковольтная система электронного охлаждения

Ускорительный комплекс должен обеспечить ион-ионные столкновения (с возможностью выбора кинетической энергии сталкивающихся пучков в диапазоне от 1 до 4,5 ГэВ/нукл.), а также протон-протонные столкновения (в диапазоне энергии от 5 до 12,6 ГэВ/нукл.) и столкновение пучков дейтронов (в диапазоне энергии от 2 до 5,8 ГэВ/нукл.). В результате реализации проекта будет значительно увеличен потенциал существующего комплекса нуклотрон во всех областях его исследовательской программы: в экспериментах с выведенным пучком на неподвижную мишень, а также в экспериментах с ионными пучками на внутренней мишени. Планируется также, что бустер будет оснащен системой медленного вывода пучка для проведения широкого спектра прикладных исследований в области медицины, биологии, радиационного материаловедения. Коллайдер будет иметь две точки встречи пучков. В первой точке встречи будет установлен

Для достижения требуемых параметров пучков необходимо использовать методы охлаждения пучков и в бустере, и в кольцах коллайдера. В ходе НИРиОКР планируется испытание прототипа системы стохастического охлаждения высокоинтенсивных сгруппированных пучков на синхротроне нуклотрон при энергиях и интенсивностях, соответствующих параметрам коллайдера.



Stochastic cooling crew!



e-cooling for low energy collider operation (A. Fedotov et al.)

Considering use of **Fermilab Pelletron** (used for pbar cooling at 8 GeV) after Tevatron operation ends



Wolfram Fischer

Cooling into space charge limit

$$\Delta Q_{sc} \sim 0.05 \text{ (new collider regime)}$$

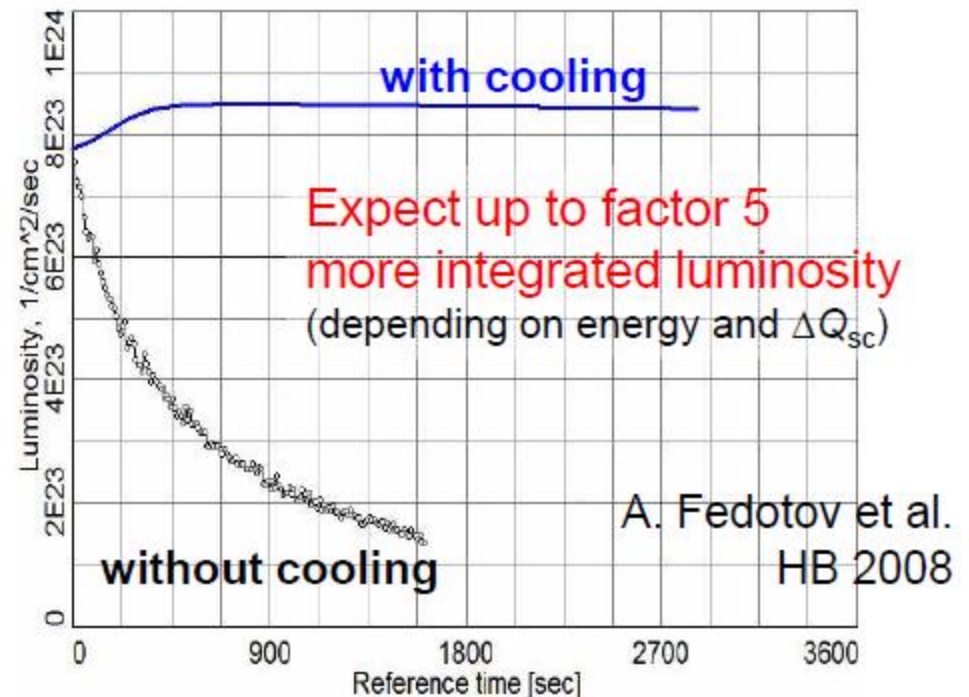
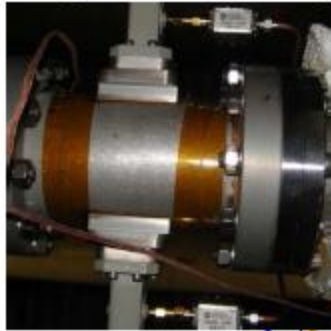


Figure 4. Simulation of luminosity with (blue line) and without (black dots) electron cooling at $\gamma=2.7$.

RHIC – 3D stochastic cooling for heavy ions

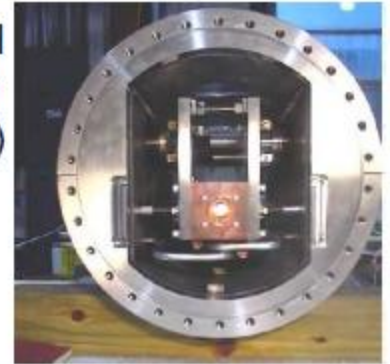
longitudinal pickup



Y h+v pickups

B h+v kickers

longitudinal
kicker
(closed)



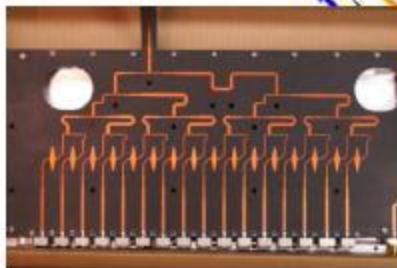
Fiber Optic
Links,
transverse

MicroWave
Links,
longitudinal

horizontal
kicker
(open)



horizontal and
vertical pickups



B h+v pickups

Y h+v kickers

vertical
kicker
(closed)



5-9 GHz, cooling times ~1 h

Monday, June 10, 2013

- 1) [Beam Cooling](#), Past, Present and Future, [Igor Nikolai Meshkov](#) - JINR.
- 2) RHIC Luminosity Increase with Bunched Beam [Stochastic Cooling](#), Michael Blaskiewicz BNL AD
- 3) [Muon](#) Cooling, Muon Colliders, and the MICE Experiment, Daniel Kaplan - Illinois Inst. Technology
- 4) An Overview of the [US Muon](#) Accelerator Program, Mark Alan Palmer - Fermi National Accelerator Laboratory
- 5) [Muon](#) Beam Helical Cooling Channel Design, Rolland Paul Johnson - Muons. Inc.
- 6) Cooling in Periodic Lattices Including a Planar Snake, [Robert B. Palmer](#) – BNL.
- 7) Status of the [FAIR Project](#), Markus Steck - [GSI](#) Helmholtzzentrum GmbH
- 8) The High Luminosity Polarized Electron-Ion Collider Project at JLab*, [Yaroslav Serg Derbenev](#) - Thomas Jefferson National Accelerator Facility
- 9) [LEIR](#) Operations for the LHC and Future Plans, Django Manglunki - European Organization for Nuclear Research Beams Department (BE).
- 10) AD Status and Consolidation Plans, Tommy Eriksson - European Organization for Nuclear Research.
- 11) Towards the Production of [Anti-hydrogen Beams](#), Simon van Gorp - RIKEN Atomic Phys. Lab.

Вторник 11 июня 2013

Progress of the Stochastic Cooling System of the Collector Ring

Christina Dimopoulou - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Stochastic Cooling of a Polarized Proton Beam at COSY

Hans Stockhorst - Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Kernphysik

Stochastic Cooling of Bunched Ions Simulated in the Time Domain

Lars Thorndahl - European Organization for Nuclear Research AB Department

Simulation Study of Stochastic Cooling of Heavy Ion Beam at the Collector Ring of FAIR

Takeshi Katayama - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Novel Ideas in Electron Cooling

Vasily Parkhomchuk - Russian Academy of Sciences The Budker Institute of Nuclear Physics

FERMILAB's Experience with a High-Energy Electron Cooler

Lionel Prost - Fermi National Accelerator Laboratory Accelerator Division

Electron Cooler R&D at Helmholtz-Institut Mainz

Kurt Aulenbacher - Helmholtz Institut Mainz Accelerator Physics and Integrated Detectors

Electron Cooling R&D Program for Medium Energy Electron-Ion Collider at Jefferson Lab

Yuhong Zhang - Thomas Jefferson National Accelerator Facility

Study for Stochastic Cooling **at Nuclotron, JINR**

Nikolay Shurkhno - Joint Institute for Nuclear Research

Potential of Stochastic Cooling of Heavy Ions in **the LHC**

Michaela Schaumann - European Organization for Nuclear Research Beams Department (BE)

High Intensity Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) in **China**

Speaker: Jiancheng Yang - Chinese Academy of Sciences Institute of Modern Physics

Commissioning COSY **Cooler with Electron Beam at Novosibirsk**

Vladimir Borisovich Reva - Russian Academy of Sciences The Budker Institute of Nuclear Physics

Commissioning of the 2 MeV COSY Electron Cooler in Juelich

Vsevolod Kamerzhiev - Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Kernphysik

Среда

Challenges of Beam Cooling at Low Energy,

Andreas Wolf - Max-Planck Institut für Kernphysik

Influence of Electron Energy Detuning on the Lifetime and Stability of Ion Beam in CSRm

Xiaodong Yang - **Chinese Academy of Sciences Institute of Modern Physics**

Cooling Activities at the TSR Storage Ring

Manfred Grieser - Max-Planck-Institut für Kernphysik

Beam Crystallization - Are We There Yet?

Hiromi Okamoto - Hiroshima University Graduate School of Advanced Sciences of Matter Department of Quantum Matter

Latest Results of Experimental Approach to Ultra-cold Beam at S-LSR

Akira Noda - Kyoto University Institute for Chemical Research Advanced Research Center for Beam Science

Simulation Study on Transverse Laser Cooling and Crystallization of Heavy-Ion Beams at the Cooler Storage Ring S-LSR

Yosuke Yuri - Japan Atomic Energy Agency Takasaki Advanced Radiation Research Institute

Broadband Laser cooling of Relativistic C³⁺ Ions at the ESR

Danyal Ferdinand Alexander **Winters** - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Beam Accumulation and Bunching with Cooling

Takeshi Katayama - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Advances in Coherent Electron Cooling

Vladimir N. Litvinenko - Brookhaven National Laboratory Collider-Accelerator Department

Noise Suppression in Relativistic Electron Beams

Gennady Stupakov - SLAC National Accelerator Laboratory

The Low Energy Storage Ring CRYRING@ESR

Frank Herfurth - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

ELENA Project Status

P. Belochitskii - European Organization for Nuclear Research Beams Department (BE)

Present Status of **NICA Project**

Alexander V. Smirnov - Joint Institute for Nuclear Research

Overview of the HESR

Dieter Prasuhn - Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Kernphysik

A Cooler Penning Trap to Cool Highly Charged and Short-lived Isotopes at TITAN

Usman Chowdhury - TRIUMF Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics

Пятница

Recent Experimental Results and Techniques Deployed on the CERN **Antiproton Decelerator (AD)** Complex

Stefan Haider - European Organization for Nuclear Research Physics Department (PH)

Atomic Physics in Traps

Wolfgang Quint - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Heavy Molecular Ion Beams in Electron Cooler Storage Rings

Claude Krantz - Max-Planck-Institut für Kernphysik

Dieter Möhl — His Life as a Scientist, Mentor and Friend

Fritz Caspers - European Organization for Nuclear Research Beams Department (BE)

Dieter: 35 Years of Friendship and Scientific Partnership

Igor Nikolai Meshkov - Joint Institute for Nuclear Research

Recollection of Dieter

Takeshi Katayama - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Recollections of Dieter

Dieter Prasuhn - Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Kernphysik

Dieter Möhl and GSI/FAIR

Bernhard Johannes Franzke - GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Memories of Dieter Möhl

Andrew Sessler - Lawrence Berkeley National Laboratory

