



Monitoring and control in accelerators

Диагностика, контроль и мониторинг пучка в ускорителях

Вячеслав (Слава) Гришин

Задачи диагностики и контроля пучка



1. Ввод в эксплуатацию нового или модернизированного ускорителя:

- проводка пучка;
- измерение и согласование эмиттанса пучка и акцептанса ускорителя;
- контроль пучка в процессе настройки, инжекции (LHC after LS2, ESS linac ...)

2. Оперативное управление ускорителем в процессе регулярной работы, измерение и коррекция параметров:

- равновесная орбита пучка;
- бетатронные и синхротронная частоты;
- хроматизм;
- поперечные и продольные размеры пучка;
- средняя энергия и энергетический разброс частиц пучка;
- светимость (в коллайдерах) или интенсивность (в линейных ускорителях).

3. Задачи ускорительной физики необходимые для оптимизации ускорителя :

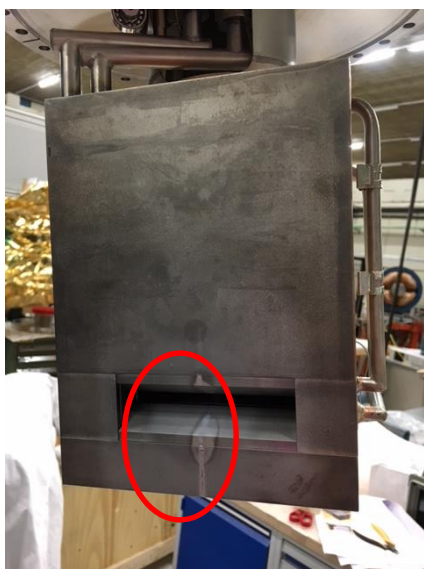
- измерение и коррекция структурных функций;
- изучение нелинейной динамики пучка;
- исследование коллективных эффектов;
- анализ внешних возмущений движения пучка.



Мониторинг потерь пучка



- Серьезной проблемой для сильноточных ускорителей является высокая плотность пучка, которая **способна разрушить оборудование** и вывести магниты из сверхпроводящего состояния.
- Потеря даже небольшой доли интенсивного пучка приведет к огромной радиации и разрушению оборудования.



EMU – Ion source
ESS, Lund, Sweden

Material Damage Experiment at the SPS

Proton beam, 450 GeV, Cu, Fe sandwich target

- beam size $\sigma_{xy} = 1.1 \text{ mm} / 0.6 \text{ mm}$
- $2 \cdot 10^{12}$ no damage
- $8 \cdot 10^{12}$ damage

Safe at 0.6 % of full LHC intensity

05/05/2008 BMW 2008 B. Dehning 3

Система мониторов потерь пучка (МПП) должна быть чувствительна к разным уровням потерь в разных местах ускорителей. МПП должна ограничивать потери до уровня, который **обеспечивает практическое обслуживание**. С другой стороны, система VLM должна быть достаточно чувствительной, чтобы обеспечить **точную настройку** и изучение ускорителя с помощью сигналов VLM. Контроль потерь пучка является краеугольным камнем в защите и настройке ускорителя.



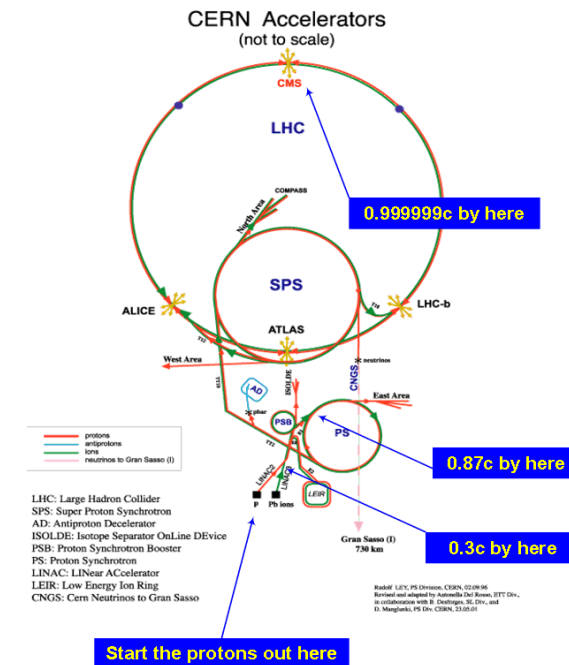
- Большой спектр технологий, который включает знание многих и разных областей:
 - Физика ускорителя - физика элементарных частиц - радиочастотная технология - оптика - механика - электроника - разработка программного обеспечения - ...
 - Много источников шума и фона в процессе измерений
 - Детектор и электроника часто в области большой радиации
 - ВЧ (нагрев пучком)
 - В основном или часто детекторы должны работать в вакууме и быть совместимы с ультра высоким вакуумом
 - Доступность и обслуживание
 -

Классификация приборов диагностики пучка



EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE

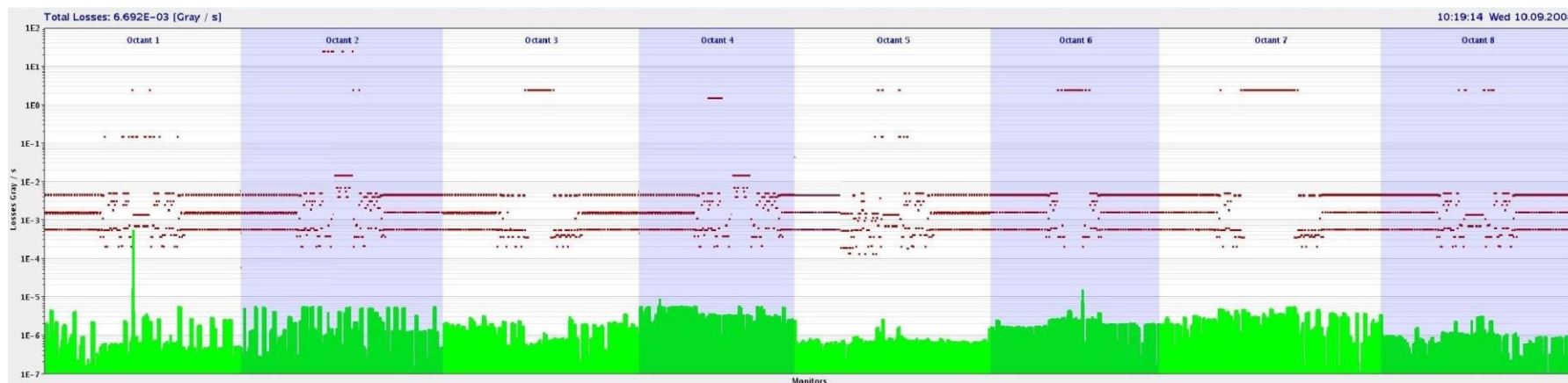
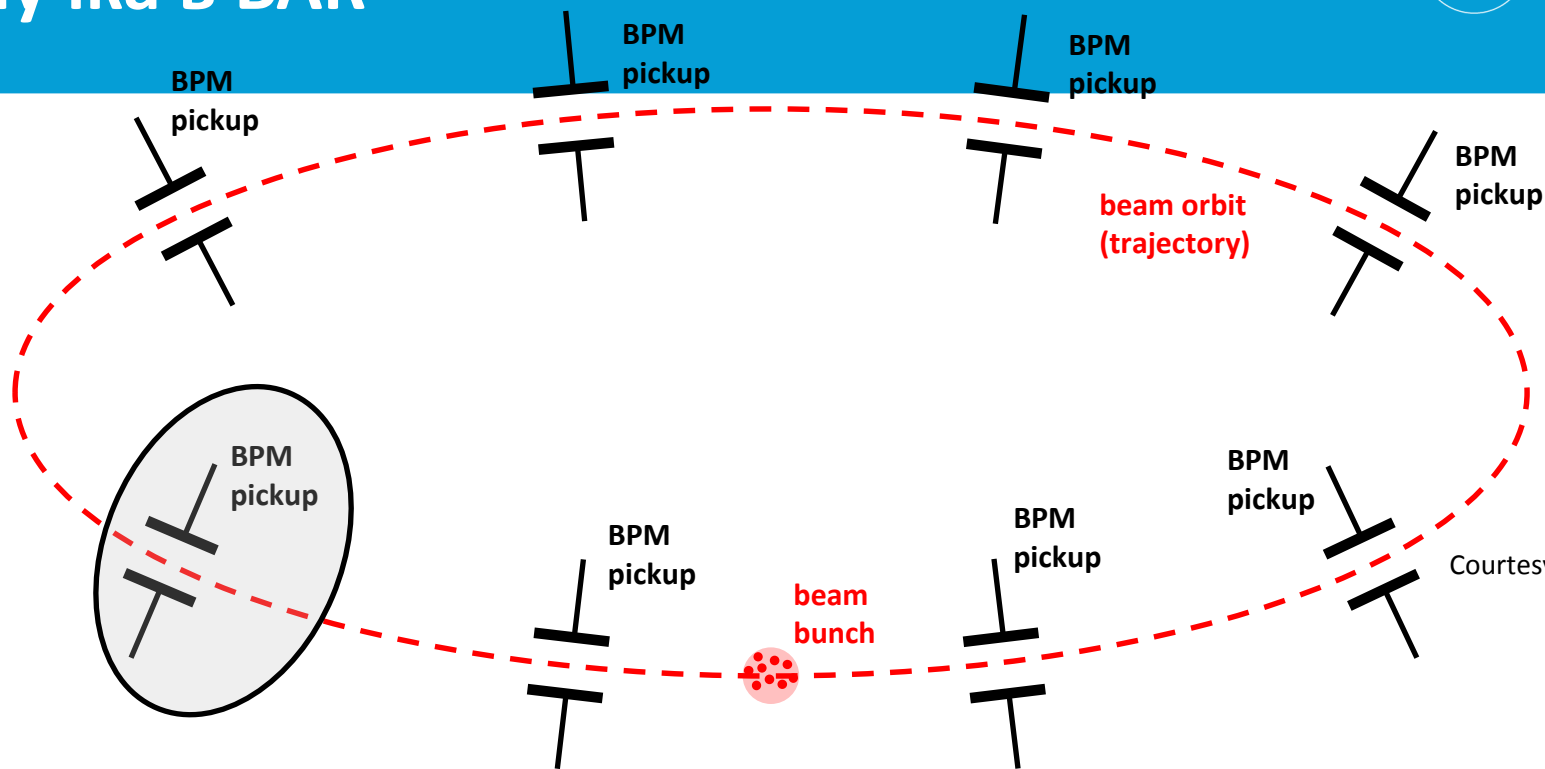
- **Линейные** ускорители и каналы транспортировки пучка : однократное прохождение пучка
- **Синхротрон**: многократное прохождение пучка
- **Адронные ускорители**:
 - коллайдер, накопительное кольцо
 - источник нейтронов
 - медицинские ускорители
- **Электронные ускорители**:
 - источник синхротронного излучения
 - лазер на свободных электронах
- **Протоны / Ионы**: нерелятивистские для $E_{kin} < 1 \text{ GeV/u}$
- Общая энергия пучка (поток пучков x энергия частиц) низкая \leftrightarrow высокая



Мониторы положения и потерь пучка в БАК



EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE

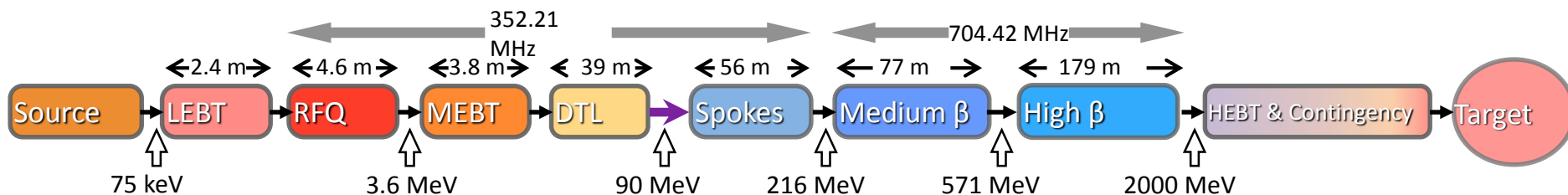


Мониторы диагностики пучка в линейном ускорителе (ESS Linac)

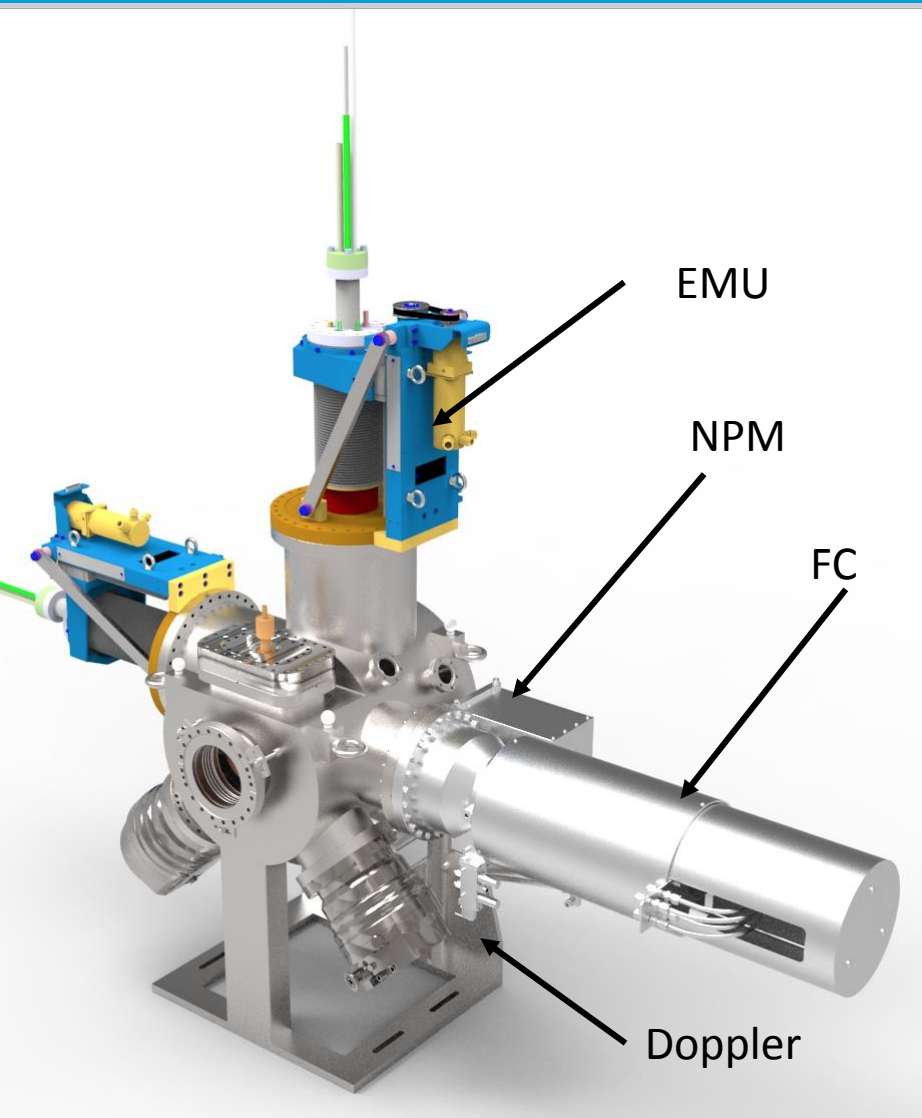


EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE

	LEBT	RFQ	MEBT	DTL	SPK	MBL	HBL	HEBT	A2T	Total:
<i>Doppler</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
<i>BPM</i>	0	0	7	15	14	9	21	17	15	98
<i>WS</i>	0	0	3	0	3	3	1	3	0	13
<i>NPM</i>	1	0	2	0	1	3	1	0	0	8
<i>FC</i>	1	0	3	2	2	1	0	0	0	9
<i>BCM</i>	1	1	2	5	0	1	1	2	3	16
<i>BLM</i>	0	0	0	15	52	36	84	65	19	271
<i>LBM</i>	0	0	1	0	1	1	0	1	0	4
<i>EMU</i>	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2
<i>APTМ</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Total:	5	1	19	37	73	54	108	88	39	424



Приборы диагностики в LEVT части линейного ускорителя



Цилиндр Фарадея (FC)

- Измерение тока пучка

Допплер (Doppler)

- Измерение доли ионов в пучке

EMU

- Измерение поперечного фазового пространства (эмитанса)

NPM

- Измерение профиля и положения пучка

BCM Трансформатор тока

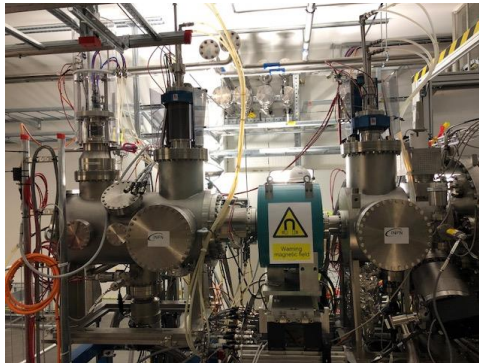
- Измерение тока



Приборы диагностики в LEVT части линейного ускорителя



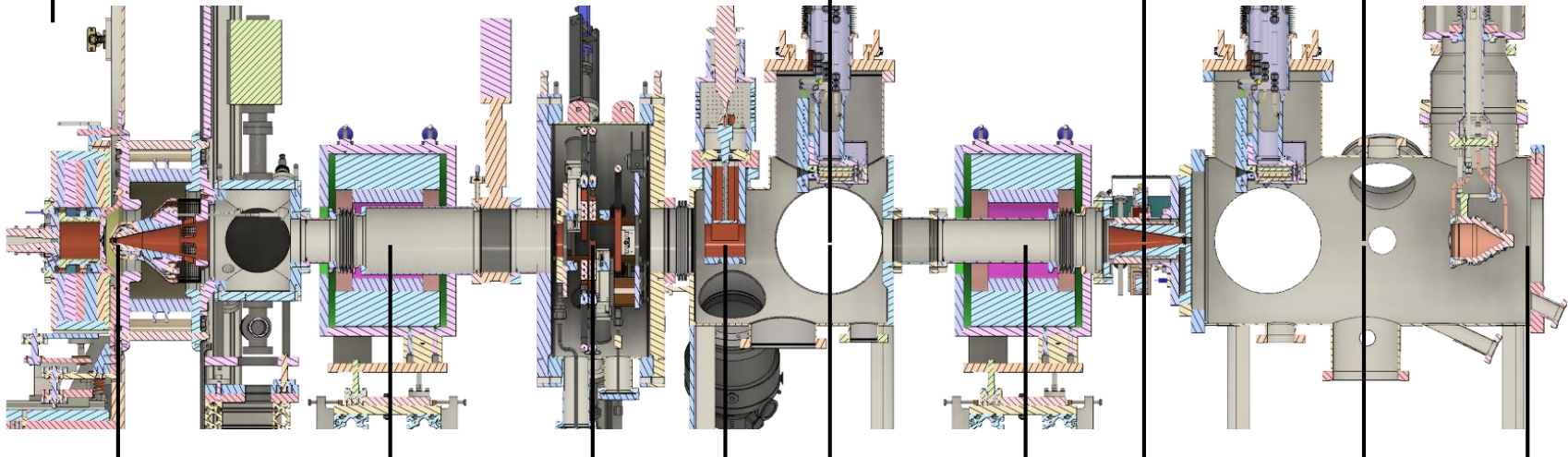
BCM



- FC
- EMU (H)
- EMU (V)
- NPM (H)
- NPM (V)
- Dpl

- NPM (H)
- NPM (V)
- **BCM**

- EMU (V)
- NPM (H)
- NPM (V)
- **FC**



Source extraction

Solenoid 1
(Steerer 1)

Iris

Chopper

Solenoid 2
(Steerer 2)

Collimator

Beam stop

Permanent tank

Commissioning tank

Измеряемые параметры пучка



- Интенсивность пучка
- Энергия пучка
- В идеале: 6D фазовое положение пучка
 - Поперечное положение (среднее x, y)
 - Поперечный профиль
 - Размеры пучка
 - Средний импульс и разброс импульса
 - Эмитанс
 - Измерения гало пучка
- Хроматичность, бета-функция, дисперсия
- Потери пучка
- Поляризация
- Светимость

PROPERTY MEASURED	Intensity/charge	tr. Position	tr. Size/shape	tr. Emittance	l. Size/shape	l. Emittance	Q-value + ΔQ	Energy + ΔE	Polarization	Effect on beam		
										N	+	D
Beam transformers	●				●	●				x		
Wall-current monitors	●	●			●	●				x		
Pick-ups	●	●	●		●	●				x		
Faraday cup	●											x
Secondary emission monitors	●	●	●	●				●			x	x
Wire scanners		●	●	●							x	
Wire chambers		●	●								x	x
Beam loss monitors		●	●	●				●		x		
Residual-gas profile monitors		●	●	●						x		
Scintillator screens		●	●								x	x
Optical transition radiation		●	●	●							x	
Synchrotron radiation		●	●	●	●	●				x		
LASER-Compton scattering			●	●					●	x		
Scrapers and meas. targets		●	●	●								x
Schottky scans	●			●		●	●		x			

H. Koziol, CAS

Влияние монитора на пучок:

N none - незначительное

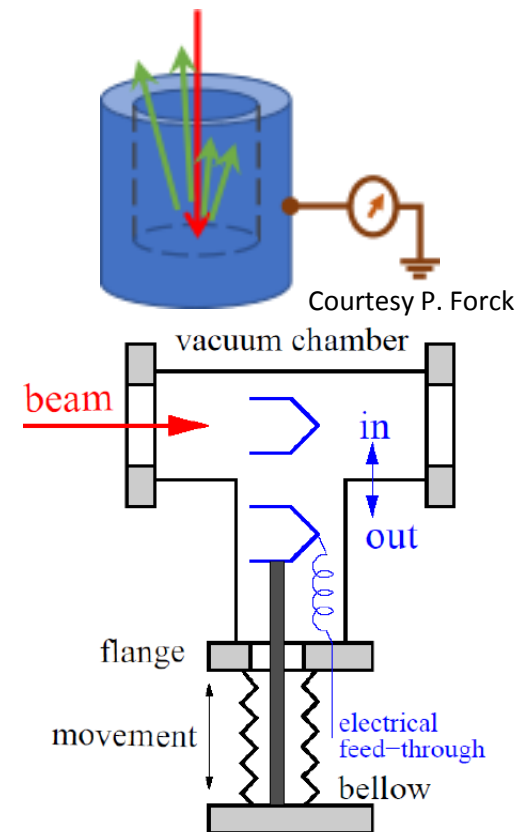
+ возмущающее

D разрушительное

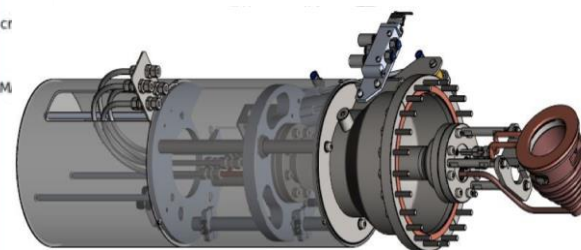
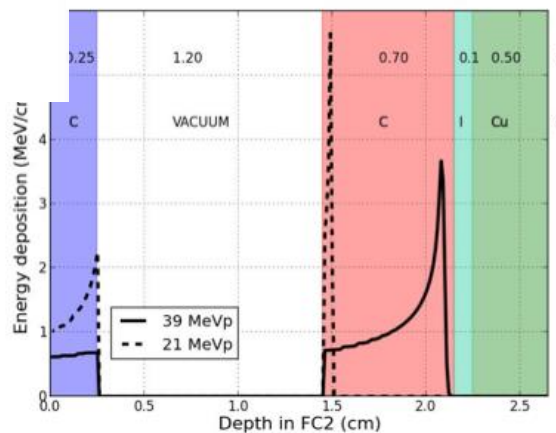
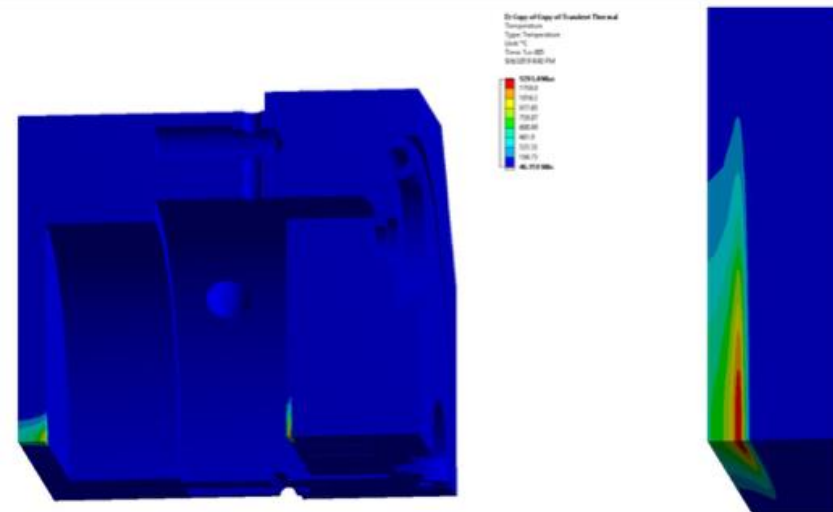
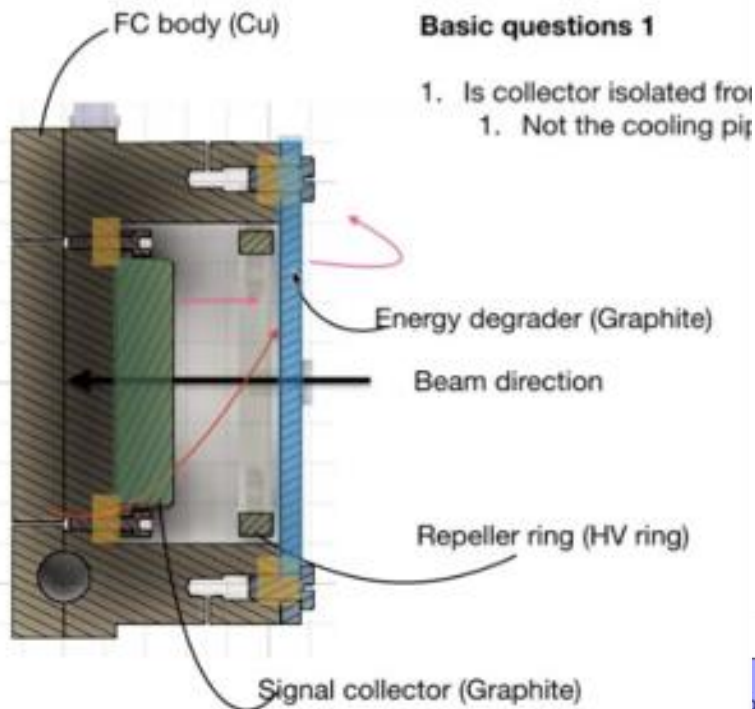
Цилиндр Фарадея (Faraday cup) – измерение тока пучка



- Цилиндр Фарадея (Faraday cup) — один из старейших датчиков интенсивности пучка, основным достоинством которого является высокая точность измерения заряда.
- В простейшем виде цилиндр Фарадея представляет собой массивный, электрически изолированный электрод, стоящий на пути пучка заряженных частиц. Когда пучок частиц поглощается материалом электрода, цилиндр Фарадея оказывается электрически заряженным. К электроду с помощью подводящего провода подключается сопротивление, замыкающее цепь на землю. Таким образом, цилиндр Фарадея является частью замкнутой электрической цепи, состоящей из двух частей — вакуумной, в которой носителями заряда являются частицы пучка, и твердотельной, где носителями заряда являются электроны проводимости.
- **При отсутствии потерь заряда электрический ток в проводнике эквивалентен току пучка в вакууме.**
- Главным критерием является допустимая утечка заряда за счет проницаемости цилиндра Фарадея для частиц пучка.
- Только низкие энергии
- Частицы останавливаются в устройстве (разрушительный)
- Абсолютная точность: $\approx 1\%$ (некоторые мониторы достигают 0,1%)



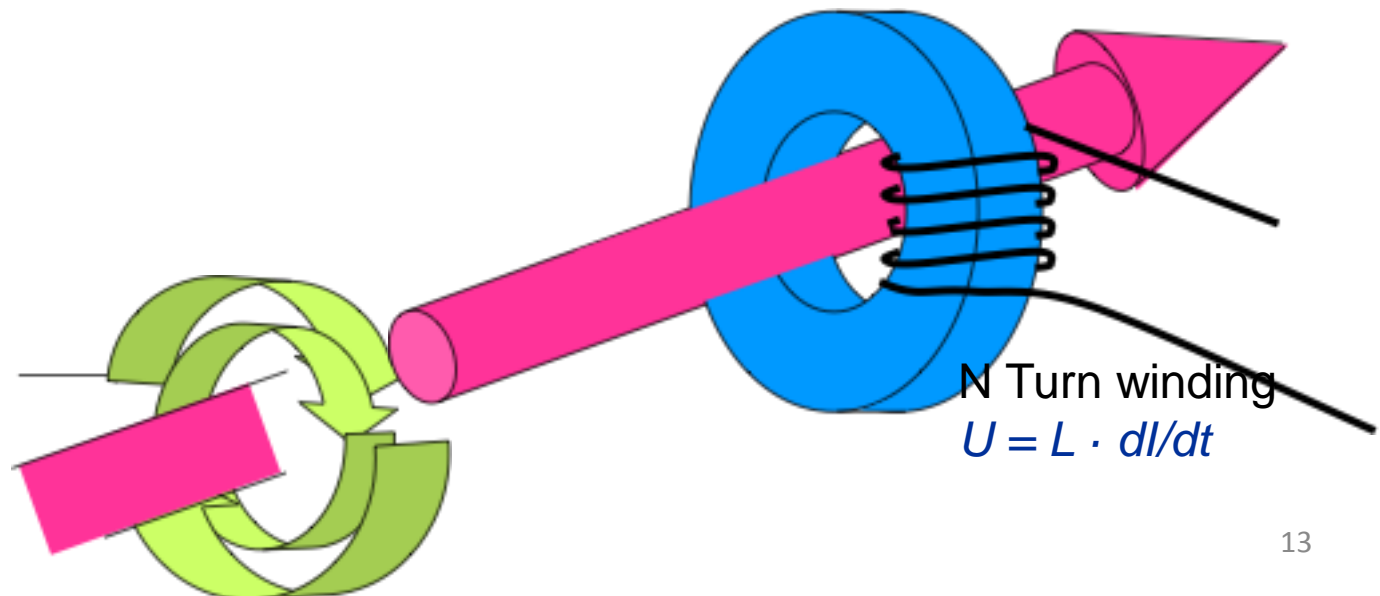
Цилиндр Фарадея (Faraday cup) – измерение тока пучка



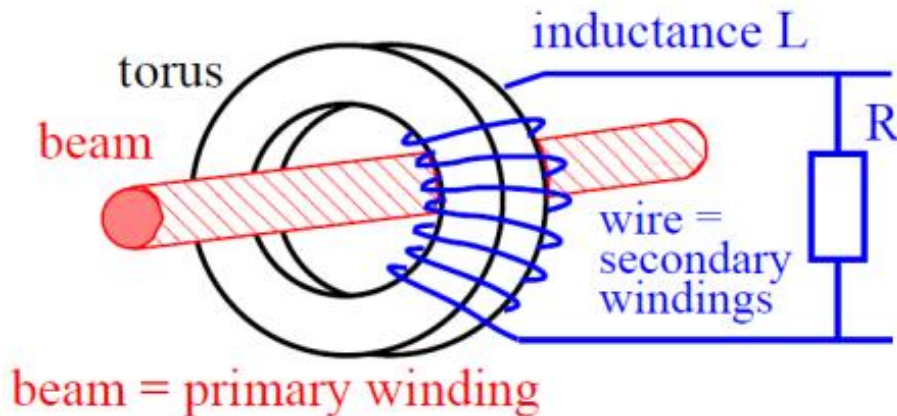
Электромагнитные датчики (Трансформаторы тока пучка)



Магнитоиндукционный датчик для измерения интенсивности имеет вид обмотки с распределенными по азимуту витками, охватывающими пучок. Для измерения интенсивности используют датчик в режиме трансформатора тока, когда сигнал пропорционален току пучка.



Электромагнитные датчики (Трансформаторы тока пучка)



Courtesy P.Forck



Bergoz

$$\text{Beam current } I_{\text{Beam}} = eN_q/t = eN_q \circledast c/w$$

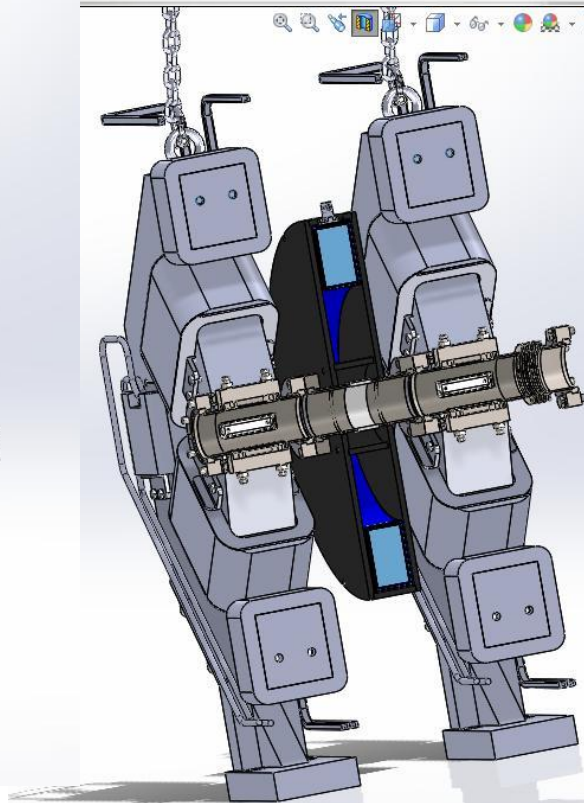
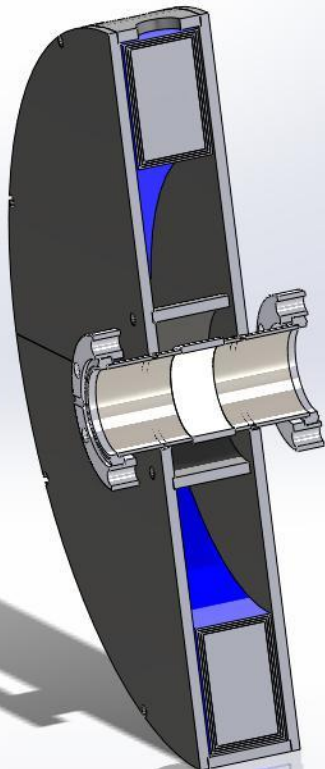
Магнитное поле пучка очень небольшое, например при токе пучка в 1 μA , $r = 10\text{cm}$ 2 $\mu\text{Tл}$, сравним с магнитным полем земли которое 50 $\mu\text{Tл}$

Цель Тороида:

Захват магнитных силовых линий с сердечниками высокой относительной проницаемости

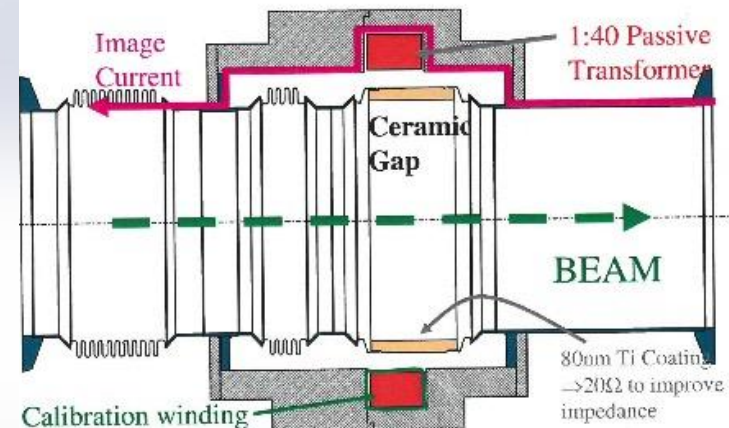
Уровень сигнала практически не зависит от положения пучка

Электромагнитные датчики (Трансформаторы тока пучка)



Transformer Housing

- Image current passing outside of the transformer torus
- High permeability material shields the transformer against external magnetic fields



500 MHz Bandwidth; Low droop ($< 0.2\%/ms$)

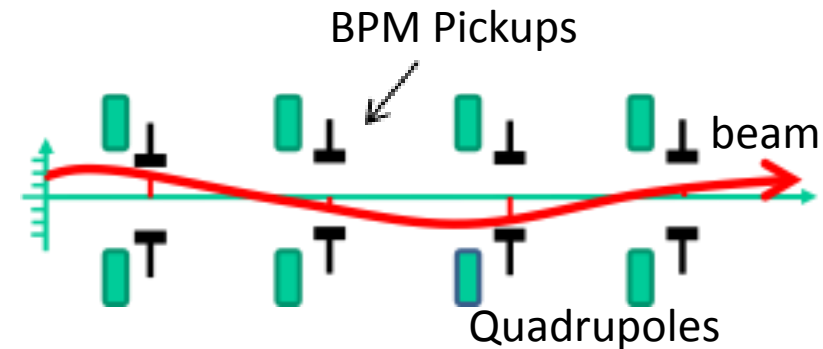
Система измерения положения пучка



- Среди самых многочисленных инструментов

Что меряют:

- Поперечное положение пучка
- Траекторию пучка или замкнутую орбиту



BPM обычно располагаются возле каждого квадрупольного магнита
Измерения на основе электромагнитного поля пучка

Информация о фазе пучка или времени пролета (TOF) в линейных ускорителях являются мощным средством диагностики пучка

Ввод машины в эксплуатацию, определение характеристик лучевой оптики, измерение параметров луча, устранение неисправностей,...

Система измерения положения пучка



Основное использование систем датчиков положения пучка - измерение и коррекция орбиты или траектории пучка



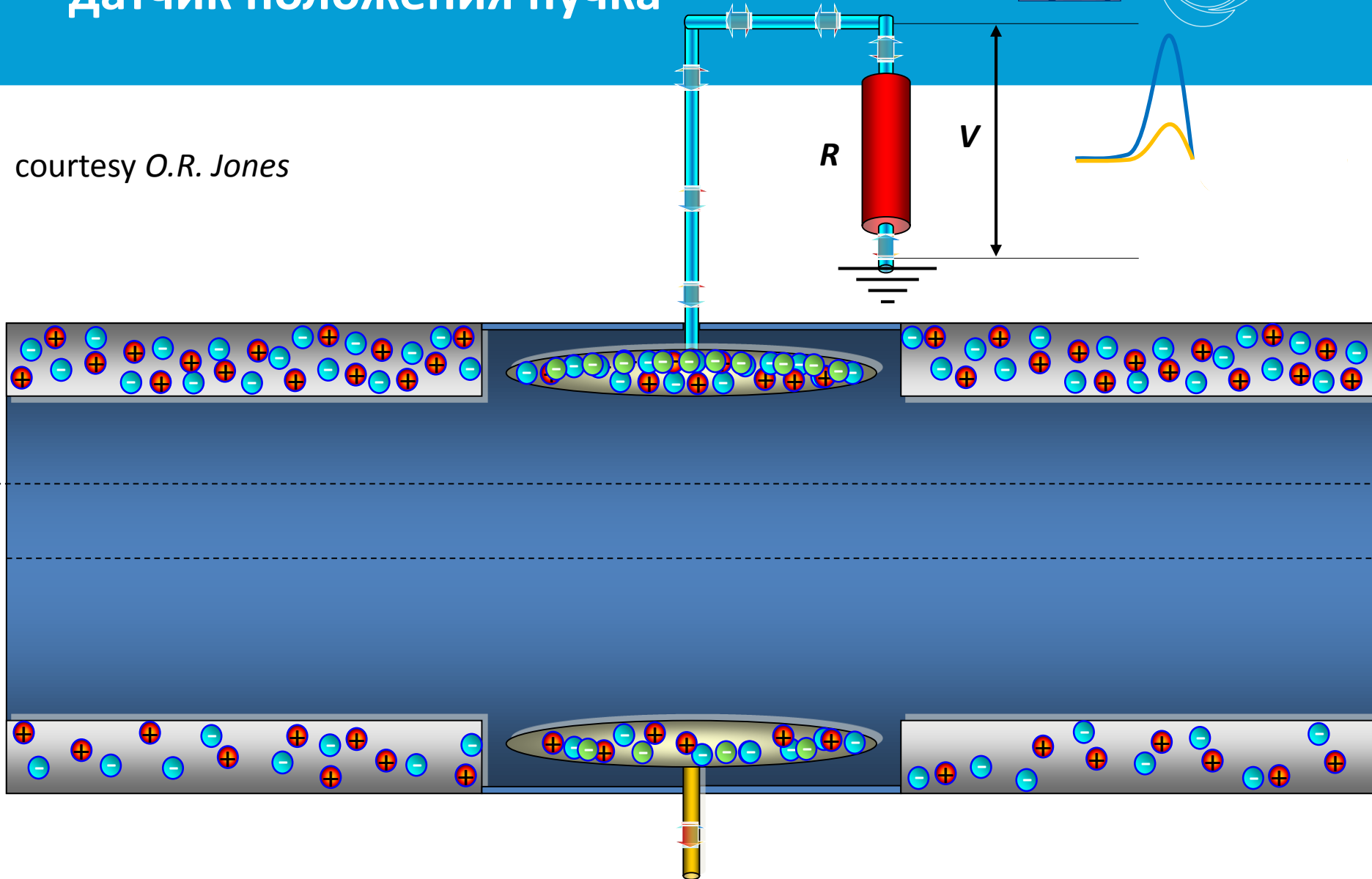
Слишком большая отклонение пучка от равновесной орбиты \Rightarrow необходимо подправить

Электростатический датчик положения пучка



EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE

courtesy O.R. Jones

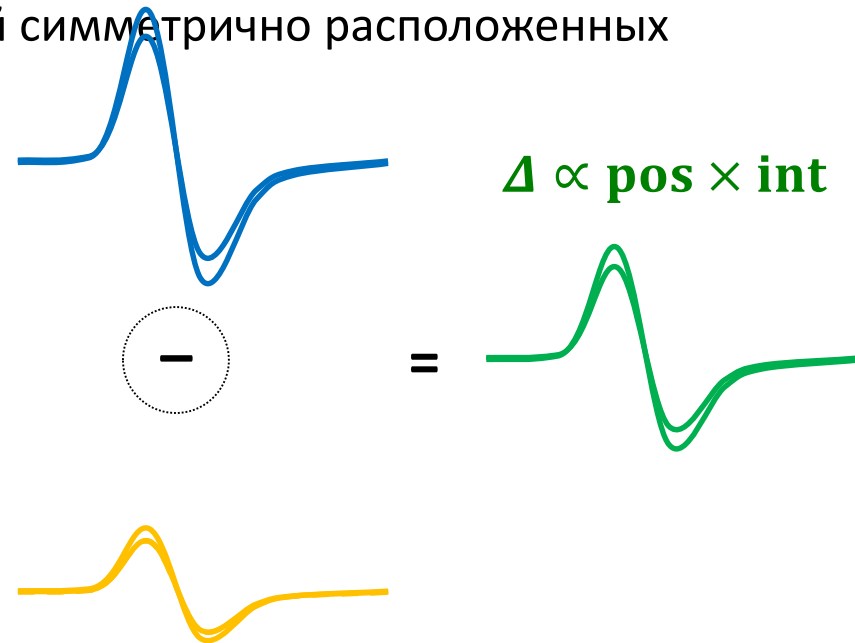
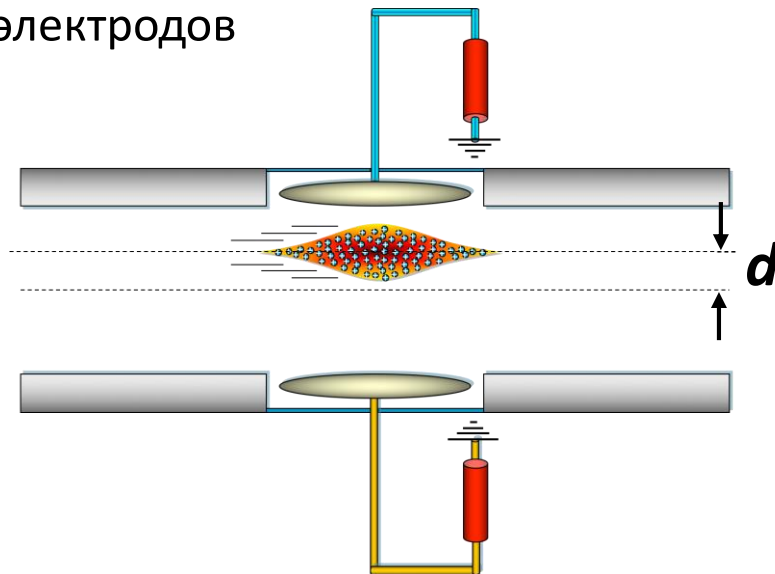


Принцип работы мониторов положения пучка



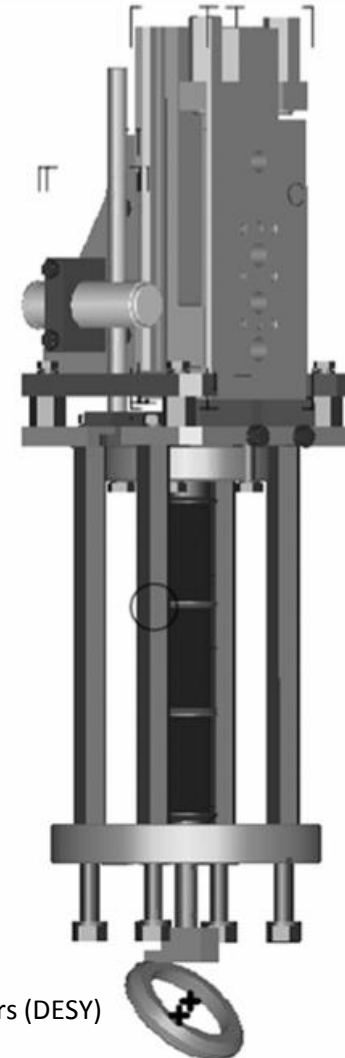
- Принцип BPM основан на симметрии

Смещение пучка d определяется парой симметрично расположенных электродов



courtesy
O.R. Jones

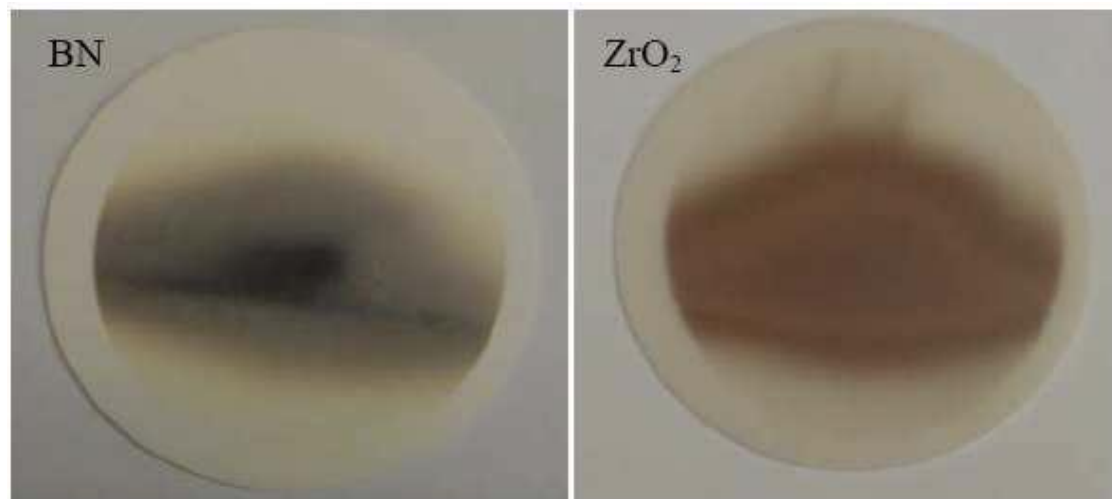
- Для визуального наблюдения пучка частиц используется люминофорный экран (luminescent screen, phosphor screen), помещаемый на пути пучка.
- Люминофорный экран представляет собой пластину с нанесенным на нее слоем люминофора — вещества, излучающего фотоны видимого света при попадании на него частиц пучка. Взаимодействуя с веществом люминофора, частицы пучка теряют часть своей энергии на ионизацию, в свою очередь часть ионизационных потерь преобразуется в оптическое излучение.
- Процесс излучения происходит в три этапа:
 - 1) поглощение атомами вещества энергии частиц пучка;
 - 2) передача части поглощённой энергии центрам люминесценции с их возбуждением;
 - 3) возврат центров люминесценции в основное состояние с эмиссией фотонов.
- Экран вводится в вакуумную камеру с помощью дистанционно управляемого привода, изображение пучка на экране регистрируется видео камерой.



Люминесцентные экраны



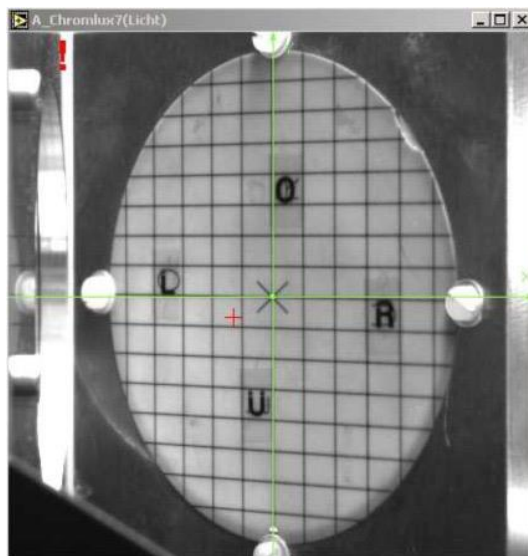
- часть поглощенной энергии приводит к возбуждению электронного состояния → используется также для положения пучка (вместо BPM)
- излучение света которое фиксируется камерой (CCD)
- высокоэнергетическое поглощение особенно важно для машин с тяжелыми ионами
- деградация материала экрана



Сцинтилляционные экраны



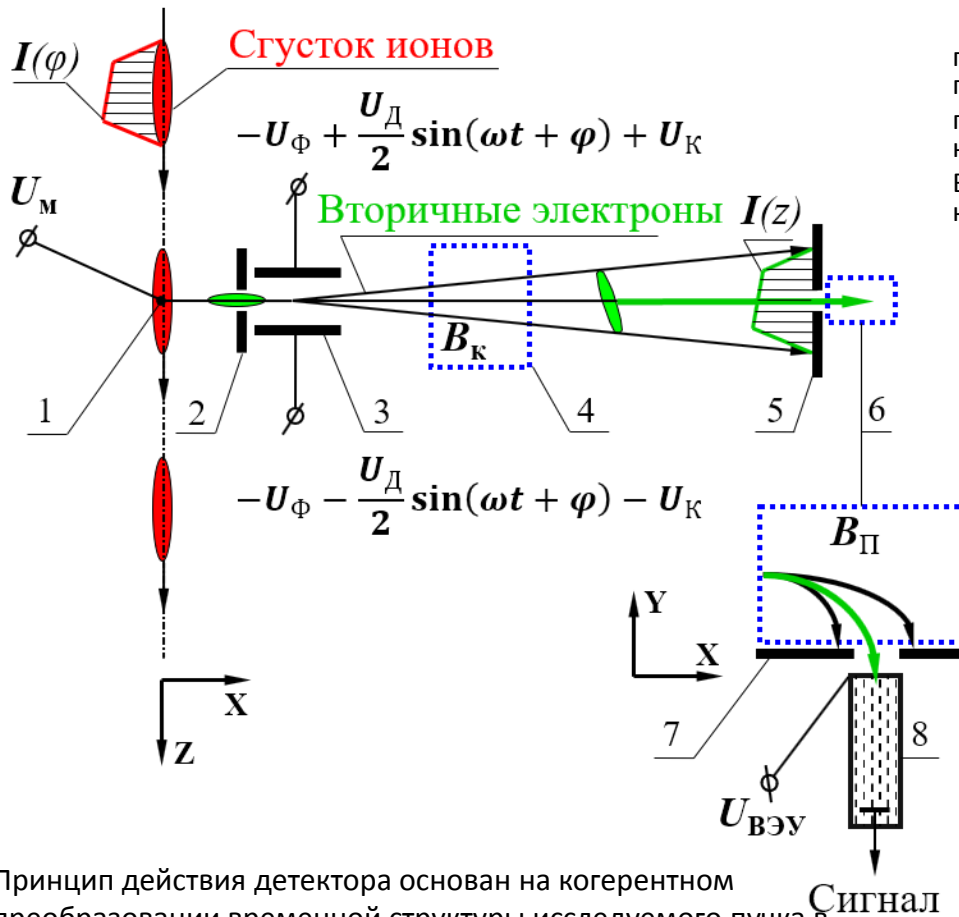
- Как правило, для установки с низкой интенсивностью (мм толщина)
- Чувствительность различных материалов варьируется на несколько порядков



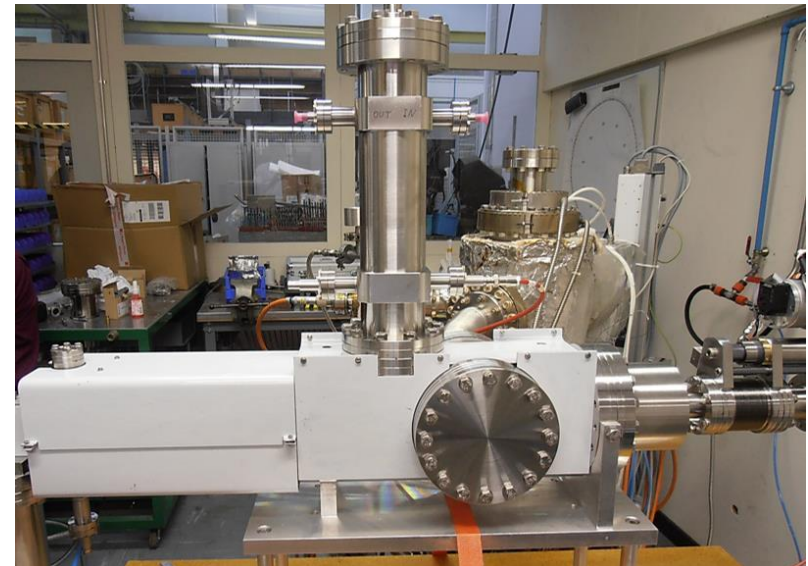
Abbreviation	Material	Activator	max. emission	decay time
Quartz	SiO ₂	none	470 nm	< 10 ns
	CsI	Tl	550 nm	1 μs
Chromolux	Al ₂ O ₃	Cr	700 nm	100 ms
YAG	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Ce	550 nm	0.2 μs
	Li glass	Ce	400 nm	0.1 μs
P11	ZnS	Ag	450 nm	3 ms
P43	Gd ₂ O ₂ S	Tb	545 nm	1 ms
P46	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Ce	530 nm	0.3 μs
P47	Y ₂ Si ₅ O ₅	Ce&Tb	400 nm	100 ns

Courtesy P. Forck

Детектор микроструктуры пучка в линейных ускорителях



первичный пучок пересекает тонкую проволочку на которой потенциал -10 кэВ
 преобразование первичного адронного пучка в низкоэнергетические вторичные электроны
 ВЧ дефлектор преобразует время в пространственные координаты

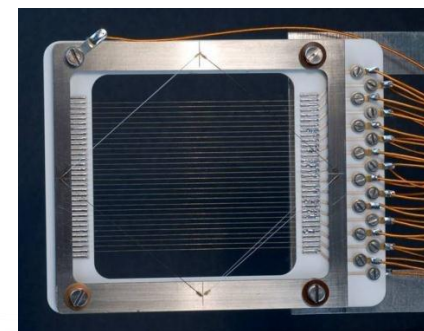


Принцип действия детектора основан на когерентном преобразовании временной структуры исследуемого пучка в пространственное распределение вторичных низкоэнергетических электронов путем высокочастотной модуляции в поперечном направлении.

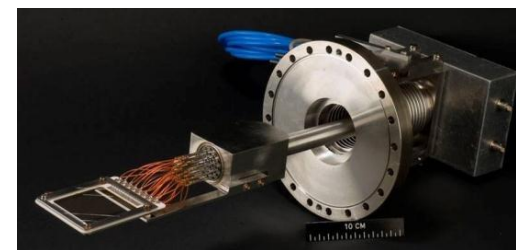
Вторично-эмиссионный датчик



- Вторично-эмиссионный датчик (secondary emission grid, secondary emission monitor, SEM) представляет собой сетку из металлических полосок или проволочек, помещенных на пути пучка. Так как вторичная электронная эмиссия — это поверхностный процесс, то в датчике можно использовать очень тонкую фольгу или проволочки (1–10 мкм) без потери чувствительности. В конструкции вторично-эмиссионного датчика предусматриваются высоковольтные электроды, создающие электрическое поле для отвода вторичных электронов.



Courtesy P.Forck and G.Kube



Проволочные сканеры

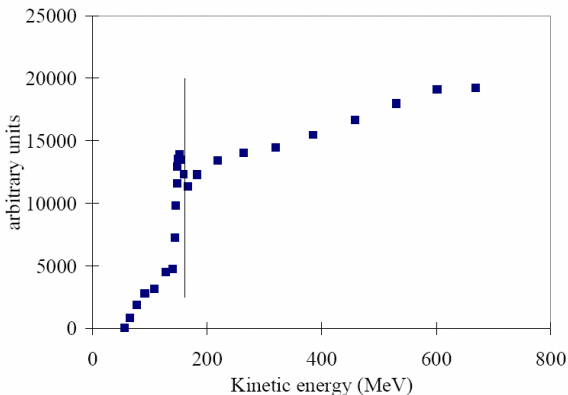
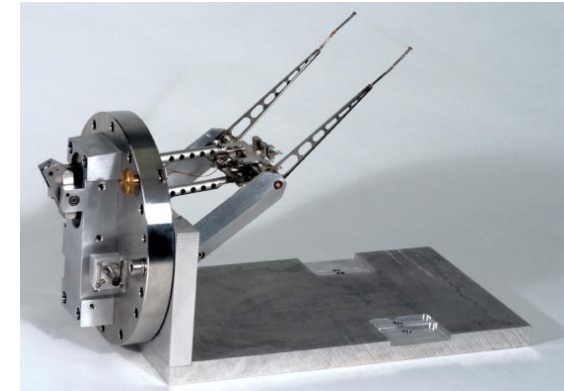


- Тонкая проволока (несколько мкм) перемещается поперек пучка
- Скорость движения чтобы избежать чрезмерного нагрева тонкой проволоки

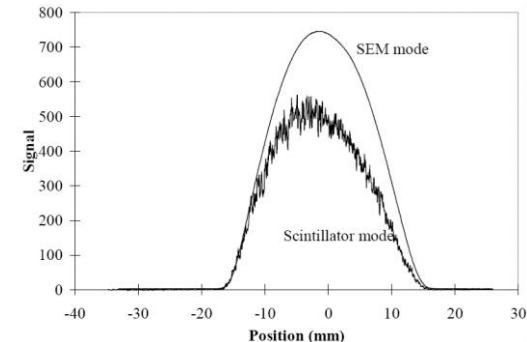
Вторичный поток частиц детектируется вне вакуумной камеры, например, используя сцинтиллятор и фото умножитель

Ток вторичной эмиссии

- Вибрации провода ограничивают разрешение положения пучка

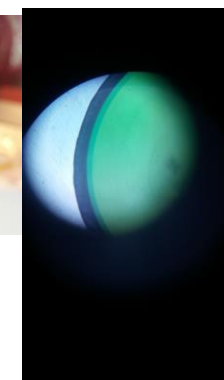
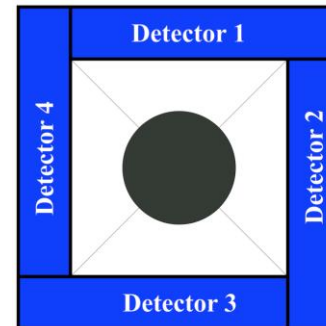
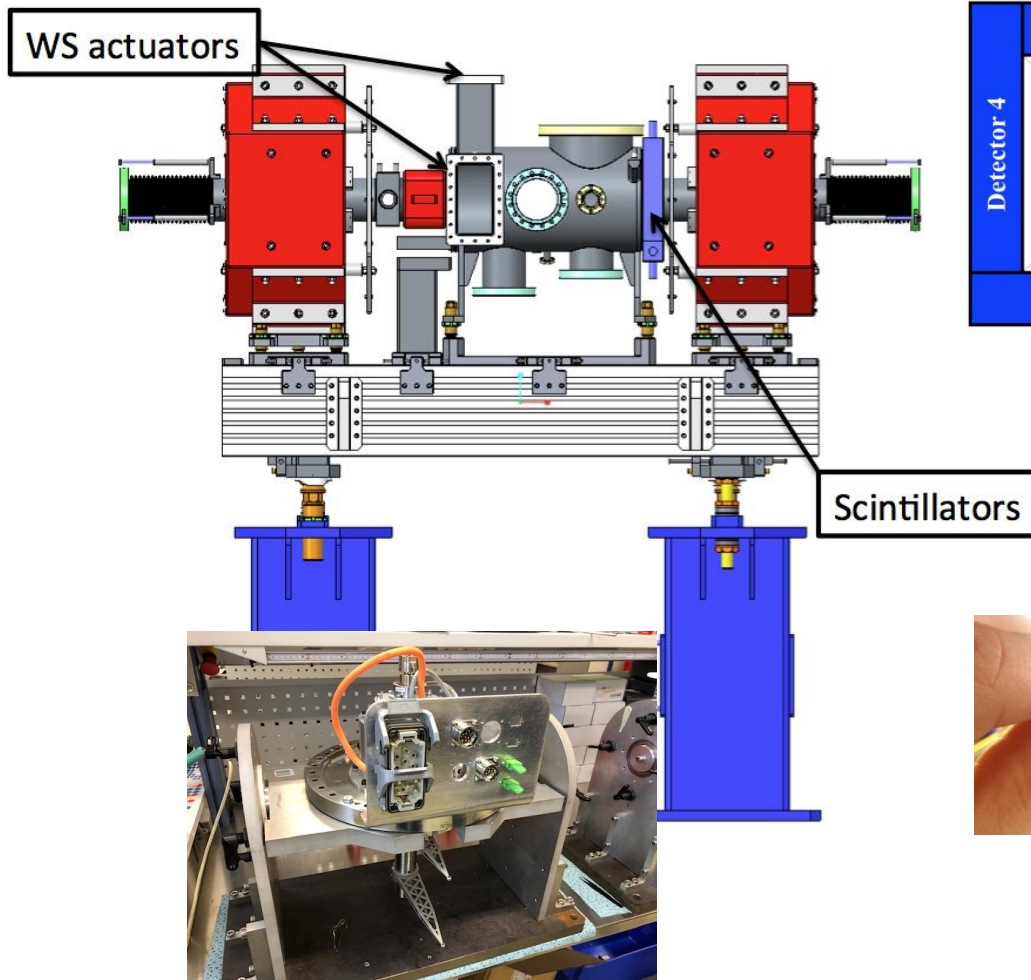


Для энергии пучка ниже 150 МэВ используется вместо тока вторичной эмиссии (SEM) изолированный смонтированный провод



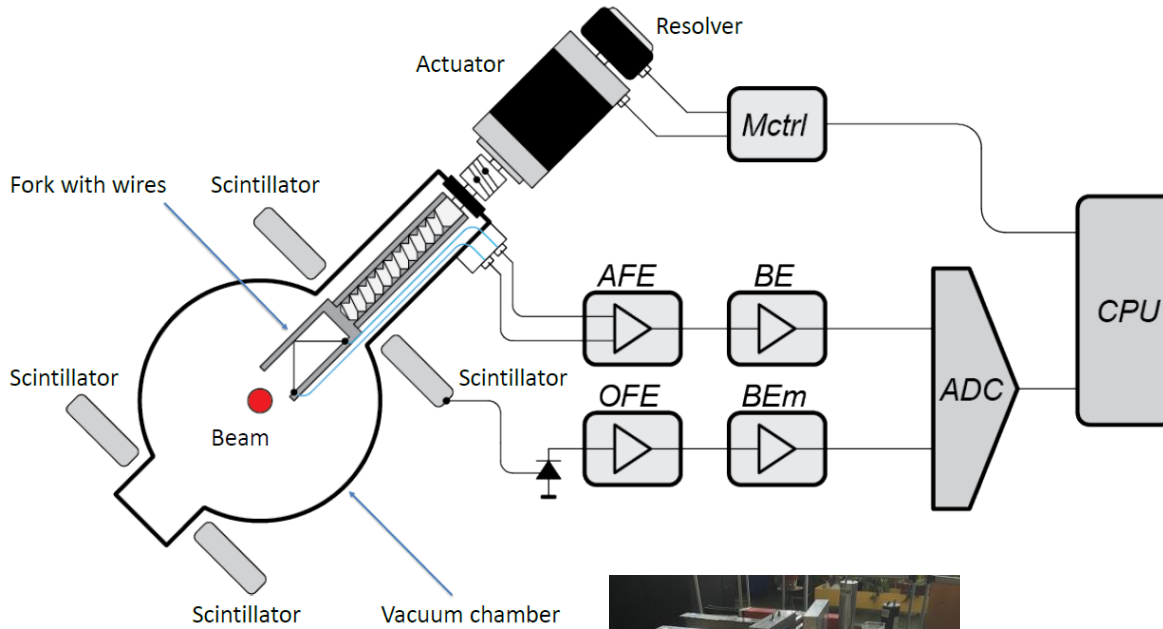
Courtesy G. Kube

Проволочные сканеры



Проволочные сканеры

System general outline

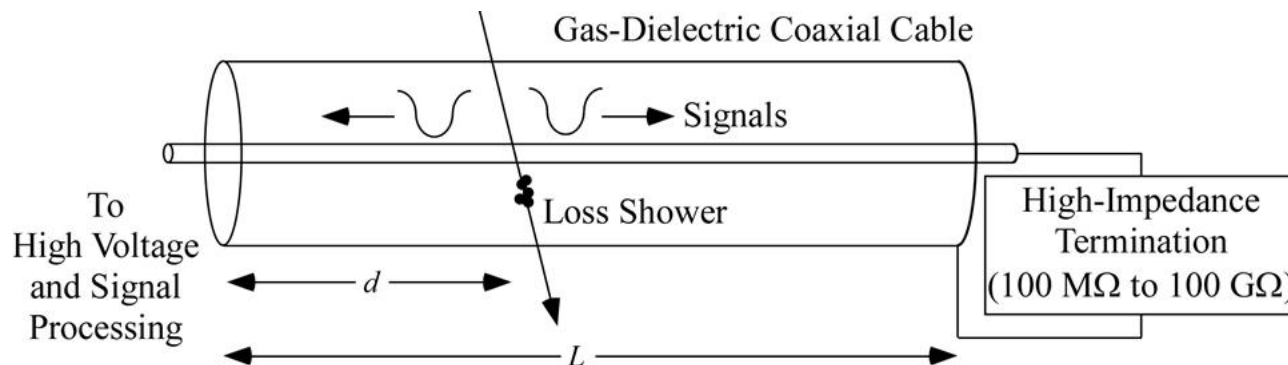


Измерения потерь пучка для защиты и диагностики: типы мониторов



Протяженная ионизационная камера (детектирование заряда) *Long ionisation chamber*

- До нескольких километров заполненных газом полых коаксиальных кабелей
- Информация о продольном положении при измерении времени прибытия сигнала от потери пучка , например, SLAC - разрешение 8 м (30 нс) при длине кабеля 3,5 км
Динамический диапазон до 10^4
- $dE/dxMIP = (1-5) \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$



Измерения потерь пучка для защиты и диагностики: типы мониторов

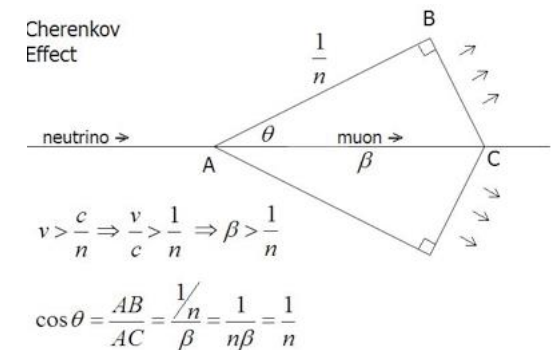


Черенковское излучение

- Разрешающая способность по времени 1 нс
- Минимальные требования к пространству установки
- Нечувствителен к гамма-фону, полям E и B
- Радиационно стойкий
- Динамический диапазон 10^4

$$\text{photon yield} : \frac{dN}{dx} = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \sin^2 \Theta \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)$$

$$\cos \Theta = \frac{1}{\beta n} \text{ with } \beta > 1/n; \alpha = 1/137.036 \text{ and } \lambda_{1,2} = \text{wavelength interval}$$

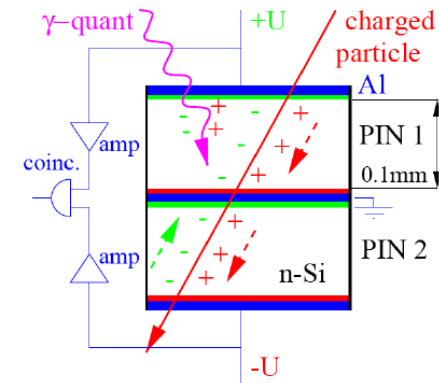


Измерения потерь пучка для защиты и диагностики: типы мониторов



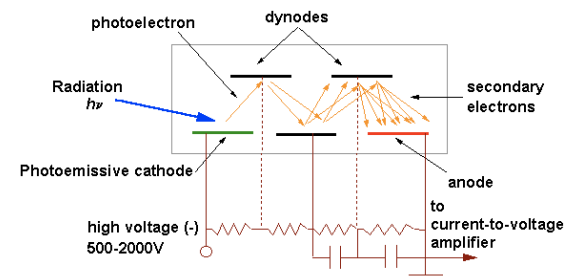
PIN-фотодиод

- Детектирует заряженную частицу
- Нечувствителен к фотонам от синхротронного излучения из-за подсчета совпадений в двух установленных ПИН-диодах
- Скорость счета пропорциональна потере пучка
- Скорость ограничена временем интеграции
- Динамический диапазон до 10^9



Сцинтилляторы и фотоумножители

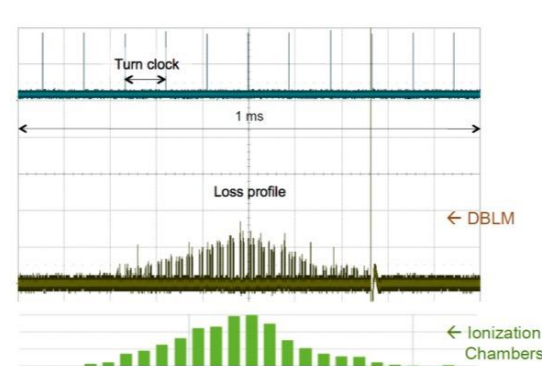
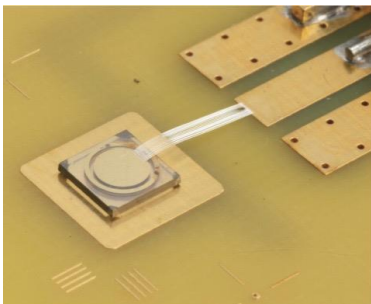
$$Y = dL/dx = R dE/dx$$



Алмазные детекторы



- Небольшие размеры и радиационно стойкий
- Используется в БАК для определения потерь в банче/ между банчами
- Динамический диапазон монитора: 10^9
- Временное разрешение: несколько нс
- Ведутся исследования, чтобы выяснить, могут ли они работать при криогенных температурах.

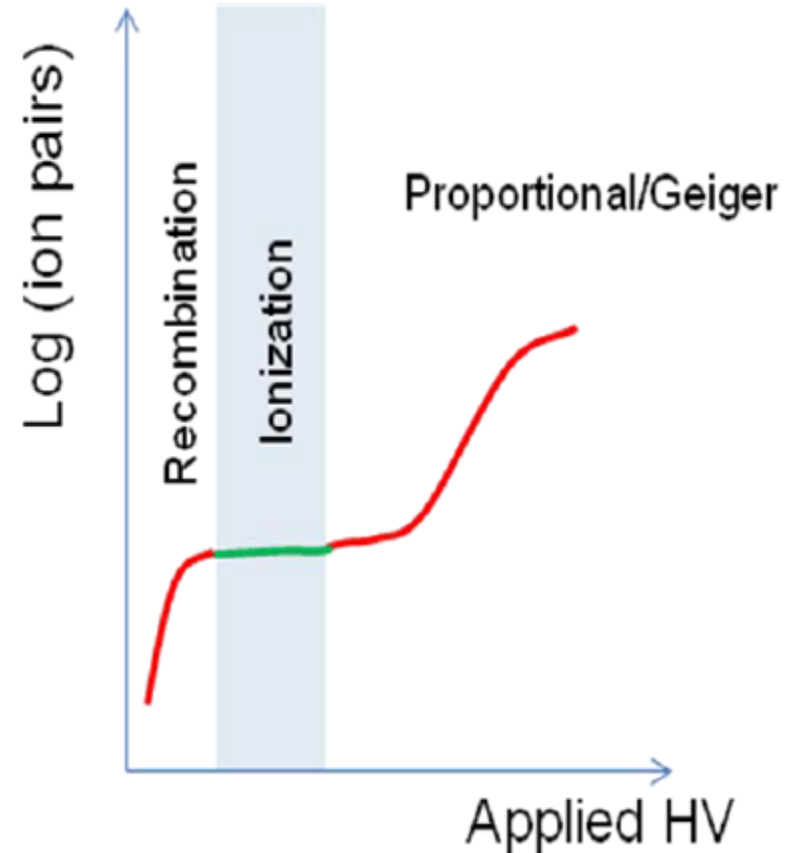


Courtesy E.B.Holzer

Ионизационные камеры



- Ионизационные камеры являются основным типом мониторов потерь, используемых в адронных машинах.
- Газонаполненные камеры, содержащие электродную пару и высокое напряжение.
- Работающий в режиме «ионизации», детектор нечувствителен к колебаниям высокого напряжения.
- Камеры установлены вдоль определенных компонентов и обеспечивают адекватное пространственное разрешение



Мониторы потерь пучка произведённые в России



- Ионизационные камеры (IC), которые установлены в местах минимальной апертуры и в местах потерь.



- Монитор вторичной эмиссии (SEM) - детектор в местах с очень высокой мощностью дозы.
- Малая ионизационная камера (LIC) - детектор, спроектированный чтобы уменьшить чувствительность к насыщению ИК при более высоких потерях.



- Плоская ионизационная камера (FIC), разработанная с учетом геометрии.



Мониторы потерь пучка в ЦЕРНе



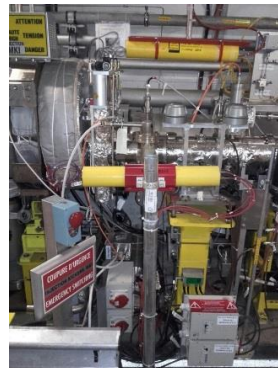
BLM LHC - ~ 3929 мониторов:
с3518 ионизационных камер (IC), 108 LIC и 191 SEM



BLM PSB состоит из 32 IC и 32 FIC.



LINAC 2 - 5 IC
LINAC 4 - 24 IC
~100 ICs - PS

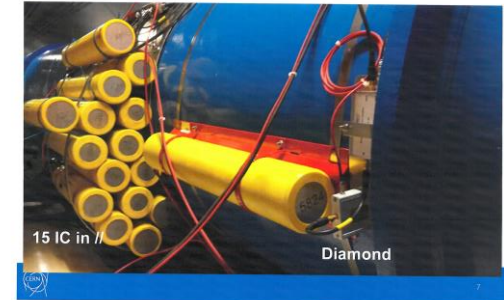


Требования к системе мониторов потерь пучка



1. Чувствительность
2. Динамический диапазон
3. Время отклика
4. Тип излучения
5. Способность защиты от нежелательного излучения
6. Реакция на избыточное облучение (эффекты насыщения)
7. Физический размер
8. Возможность проверки
9. Калибровочная техника
10. Тестирование системы от начала до конца
11. Стоимость

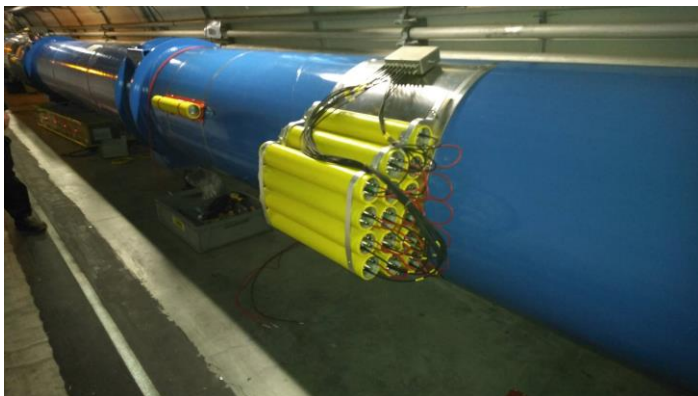
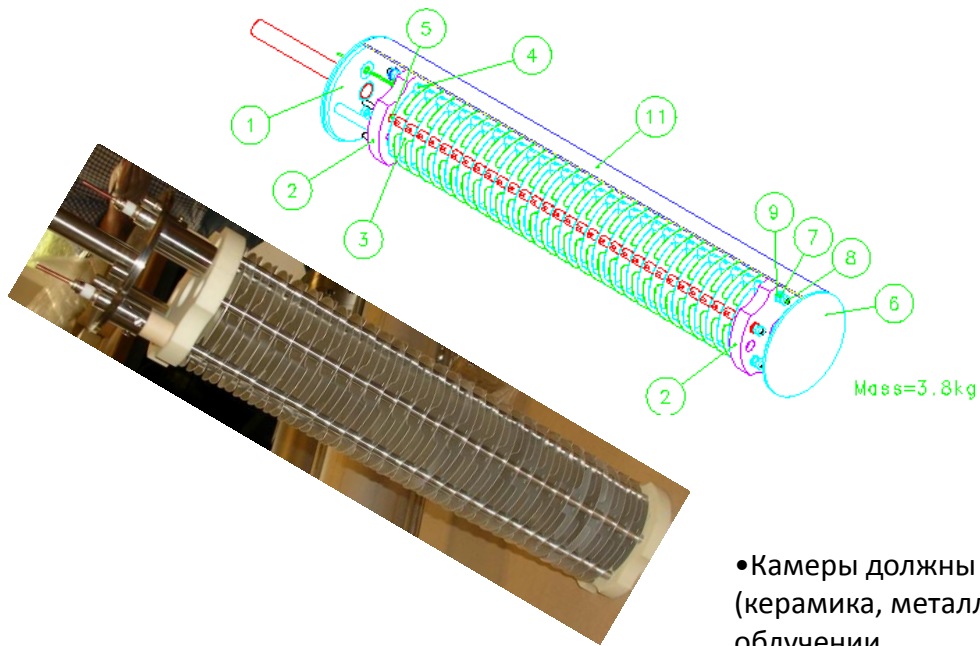
BLM 16L2



Ионизационная камера



EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE



- Камеры должны быть изготовлены из радиационно-стойких материалов (керамика, металл) без «старения» в течении 20 лет и при 10^8 rad облучении
- Более 4000 штук только для ЦЕРН => дешево должно быть
- LHC: необходимо периодически проверять подключение и качество сигнала всех детекторов с радиоактивным источником.

LHC Radiation Day, B. Dehning

29.11.2005

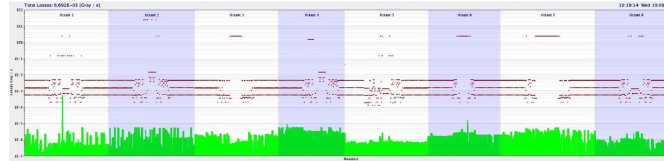
Ионизационная камера



Критерии проектирования:

скорость и надежность сигнала

- Параллельные электроды (Al) разделены на $\sim 0,5$ см
- Напряжение 1,5 кВ
 - LHC



- ESS, GSI, LUPAC
- Длина 50 см; Рабочий объём 1.5 л
- 61 электрод
- Заполнен газом N_2 под давлением 1.1 bar
 - Состав камеры является единственным компонентом в системе BLM, который не контролируется дистанционно в режиме онлайн: свойства газа в камере достаточно близки к воздуху при атмосферном давлении (то есть внутри детектора, в котором произошла утечка), чтобы не нарушать точность системы BLM, но достаточно отличается, чтобы обнаружить утечку во время ежегодной проверки всех камер с радиоактивным источником.
- Время сигнала для электрона и ионов 300ns / 80µs
- Динамический диапазон $> 10^8$

Который ограничен током утечки через керамику изолятора (нижняя предел) и насыщением из-за пространственного заряда (верхняя граница).

Вакуумный стенд для производства ИК

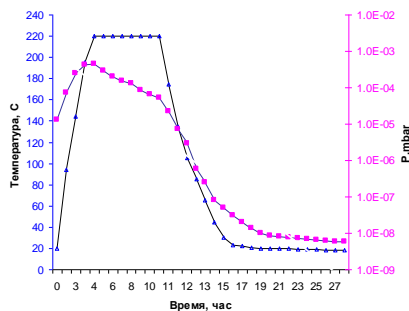


2005

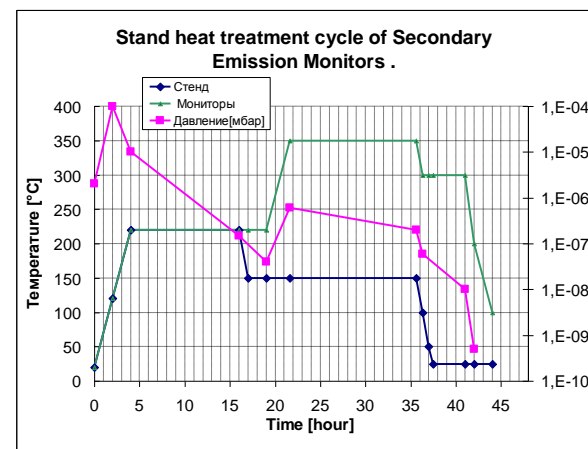


ИФВЭ спроектировал и построил стенд с сверхвысоким вакуумом для производства детекторов, который оснащен квадрупольным масс-спектрометром для определения состава газов внутри системы. Система состоит из двух плечей - 36 посадочных мест с отдельными клапанами для каждого ионизационного детектора разных типов и размеров, SEM или пропорциональных камер.

2018



Цикл термообработки производства ионизационных камер

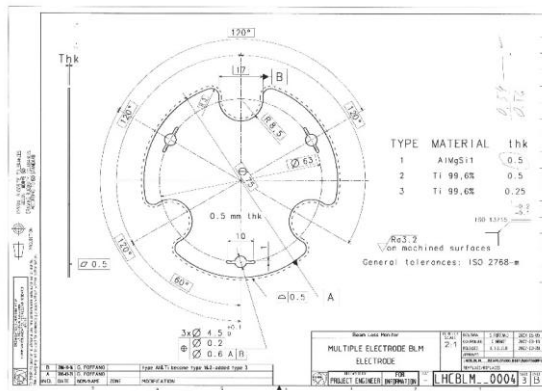


Courtesy A.Larionov

Проверка качества



Различные тесты проводились в ИФВЭ и ЦЕРНе до, во время и после производства для проверки качества камер, как пример все сварные швы проверены на герметичность.



FB-VSC-ACC (Surface Analysis)

Scanning electron microscopy (SEM) report

Client: CERN

Job No.: 2007-2007-SYS-FB-VSC-ACC-2004-01

Job opened for: M. Maud

From: 2007-09-24

Number of samples: 10

Sample identification: 2007-2007

2007-1: Cleaning area on electrode (cut)

2007-2: Cleaning area on electrode (cut)

2007-3: Cleaning area on electrode (cut)

2007-4: Cleaning area on electrode (cut)

2007-5: Cleaning area on electrode (cut)

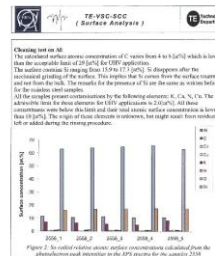
2007-6: Cleaning area on electrode (cut)

2007-7: Cleaning area on electrode (cut)

2007-8: Cleaning area on electrode (cut)

2007-9: Cleaning area on electrode (cut)

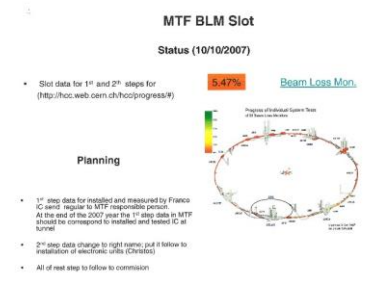
2007-10: Cleaning area on electrode (cut)



2nd test after annealing (2 hours x 1000°C in air) - A

SC-ME-20007

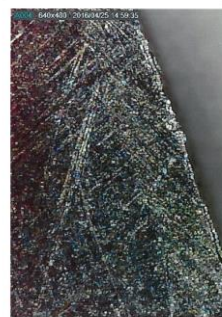
Sample	2007-1	2007-2	2007-3	2007-4	2007-5
µg/g Carbon	6.0	10.0	10.0	10.0	10.0



Cell 46 2372

CERTIFICAT DE CONTRÔLE

Lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
µg/g Carbon	6.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

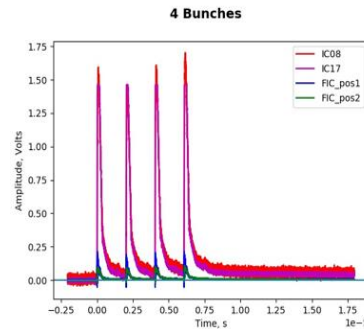
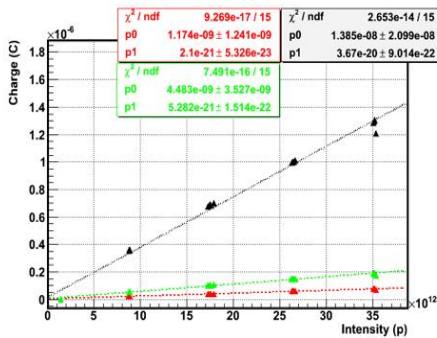


Проверка качества и калибровка на пучке

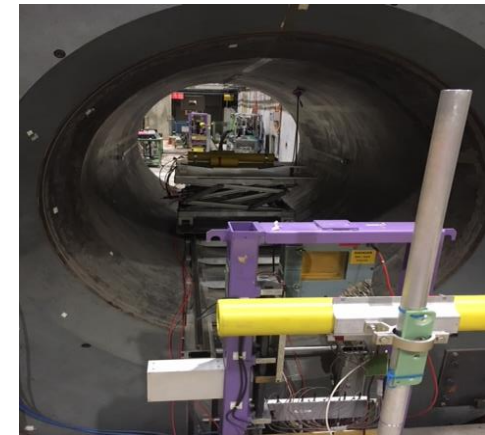


энергия, выделяемая ионизирующими частицами в камере газа, преобразуется в сигнальный ток.
 1 Gy/s = 5.4E-5 A (for IC) 1 Gy/s = 3.86E-6 A (for LIC)

HRM



H2



Мониторы тестируются в разных условиях:
 в магнитном поле при 1,5 Тесла в H2 канале в ЦЕРН.



Courtesy E. Nebot del Busto

Входной контроль

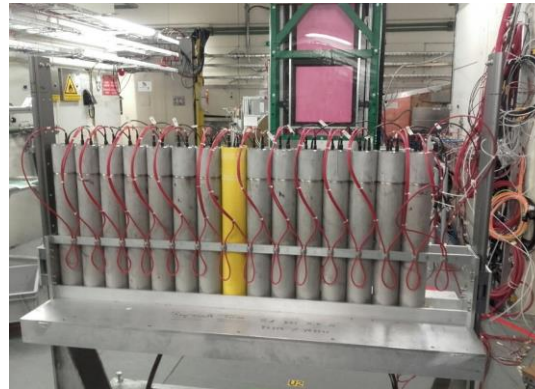
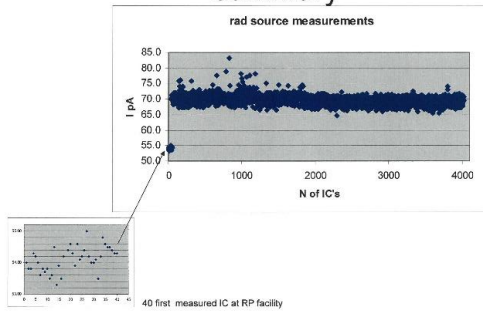


Каждый детектор откалиброван с использованием сильного источника гамма-излучения GIF и GIF ++ следующего поколения.

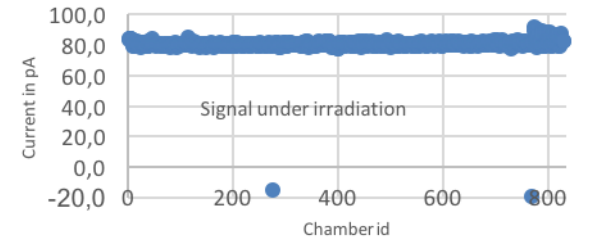
Для каждого детектора испытания состоят из измерений тока утечки и сигнала от ионизационного источника

4250 IC -2008

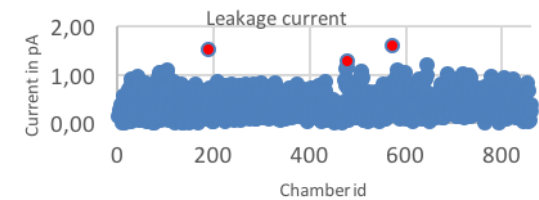
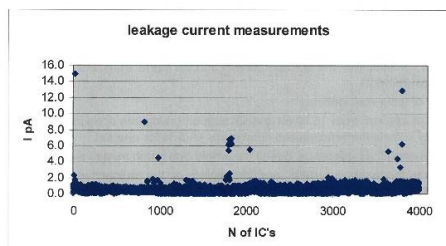
Rad source signal :
summary



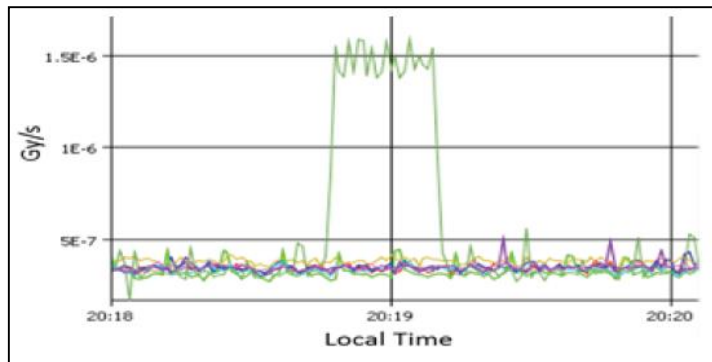
830 IC -2017
830 IC -2017



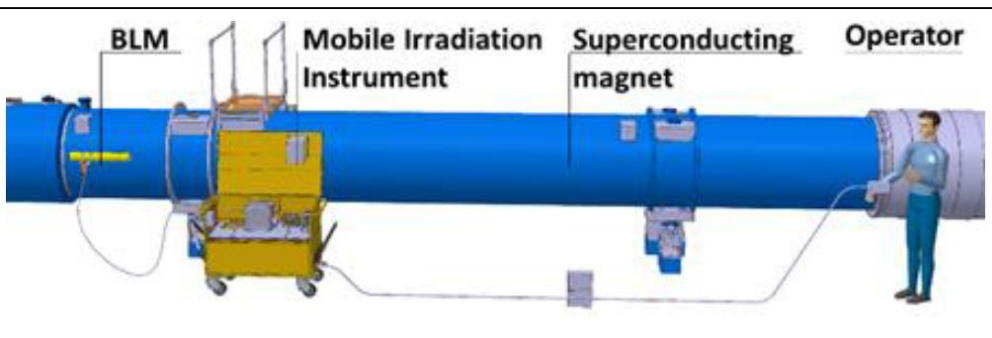
Leakage Current Measurements:
summary



Контроль ИК в LHC



- **LHC:** необходимо периодически проверять подключение к соответствующим каналам электронной системы и качество сигнала всех детекторов с радиоактивным источником.



Courtesy D. Gudkov



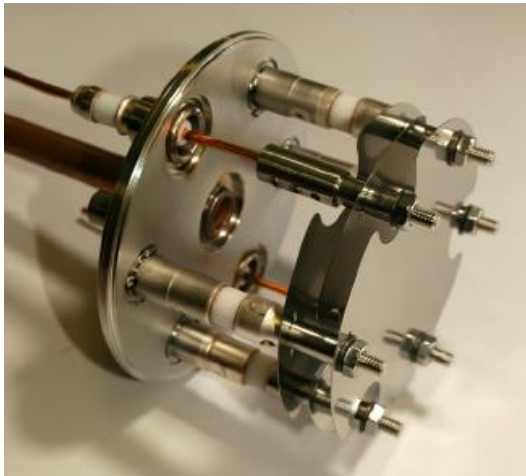
Детектор вторичной эмиссии



В ускорительных зонах с очень высокой мощностью дозы используются камеры SEM для увеличения динамического диапазона. SEM характеризуется высокой линейностью и точностью, низкой чувствительностью, быстрым откликом и высокой радиационной стойкостью. Сигнальный и высоковольтный электроды изготовлены из Ti, чтобы использовать стабильность выхода вторичной эмиссии (излучения). Излучение электронов из поверхностного слоя металлов при прохождении заряженных частиц можно измерить только в высоком вакууме, что приводит к сверхвысоковакуумному приготовлению компонентов и к дополнительной активной защите, осуществляемой геттерным насосом (NEG). Чувствительность примерно в $3-7 \times 10^4$ раза меньше, чем в ионизационной камере.

$< 10^{-7}$ bar

$< 1\%$ ionization to avoid nonlinearities



Сигнал SEM и IC на IP3 в 2011 году

Малая Ионизационная камера



- Детекторы LIC были разработаны, чтобы уменьшить чувствительность к насыщению для более высоких потерь по отношению к ИК LHC и как дополнение к ИК. Активная зона LIC состоит из 3 параллельных алюминиевых электродов, заполненных азотом с керамическим изолятором типа SEM.



Pressure N2, [mbar]	U, [kV]			Current, [pA]
100	1,5			< 1
100		2,0	2,3	spark
200		2,0	3,0	< 1
200			2,5	spark
300			2,5	3,0
300				3,0
400				3,0
500				3,0

Выбор рабочего давления LIC с двумя и одним экранами.

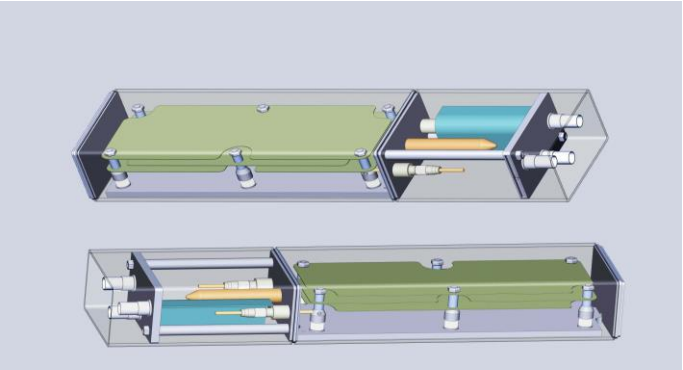
Finally – 1.1 bar and 280 LICs refilled

Плоская ионизационная камера

Детекторы FIC разработаны с учетом геометрии и установлены в LHC booster. Активная зона призмы FIC состоит из 3-х параллельных алюминиевых электродов, заполненных азотом, со специальным керамическим изолятором типа SEM.

Design and production of the first flat ionization chamber (FIC). CERN, IHEP (Protvino)

A. Larionov, B. Dehning, V. Grishin, V. Seleznev, A. Kopyrin



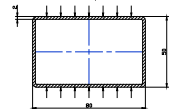
Design and production of the first flat ionization chamber.

Bernd's proposal:

- the flat ionization chamber with dimension in beam direction about 50mm for Booster;
- the standard rectangular st. steel tube with 50x80mm dimensions and 2mm wall thickness.

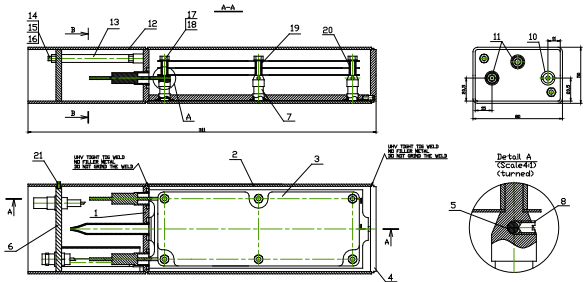
It was executed check-up of the tube wall strength as flat chamber is pumping during production time.

Check-up of the tube wall strength

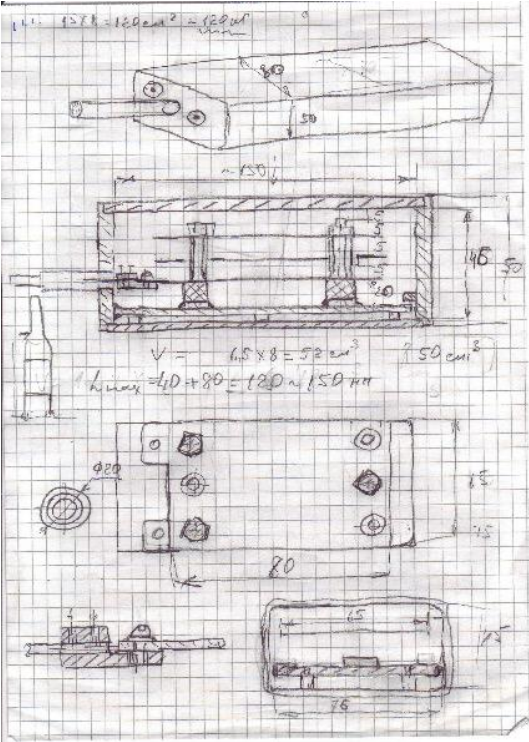


- For st. steel 304L: yield strength – $\sigma_y = 170 \text{ MPa}$, coefficient of strength stock $n_y = 1,5$.
- Permissible stress for yield strength: $\sigma_{y.p} = \sigma_y / n_y = 113 \text{ MPa}$
- The wall thickness is as $S = 224b / \sqrt{\sigma_{y.p} + C} + 2,1 \text{ mm}$, where $b = 80 \text{ mm}$ – wall length, $C = 0,4$ – thickness tolerance.
- Finally rectangular tube with 2mm wall is suitable.

Flat IC assembly



- Outer dimensions: 50x80x310mm.
- Working volume ~100 sm³.





- Диагностика пучка – одна из наиболее активно развивающихся дисциплин , находящаяся на перекрестке разных областей: ускорителей, физики, электроники, программирования и ...
- Обычно основных приборов достаточно для рутинной работы ускорителя
- Но при постоянно возникающих проблемах необходимы новые приборы и методы
- Никогда не бывает мало диагностики пучка

- the CERN accelerator school "Beam Instrumentation 2018" in Helsinki (Finland), especially
Rhodri Jones: Diagnostics Examples from High Energy Colliders
Manfred Wendt: BPM Systems
Gero Kube: Beam Diagnostic Requirements Overview
- Eva Barbara Holzer: Beam Instrumentation and Beam Diagnostics at WE-Heraeus-Seminar on Accelerator Physics for Intense Ion Beams , 2012
- Peter Forck: Lecture on Beam Instrumentation and Diagnostics at JUAS
- Thomas Shea , Ryoichi Miyamoto: several presentations at ESS (Lund, Sweden)
- **В.В. Смалюк : Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях, Новосибирск 2009**
- **В.П.Черепанов: Диагностики пучков заряженных частиц**

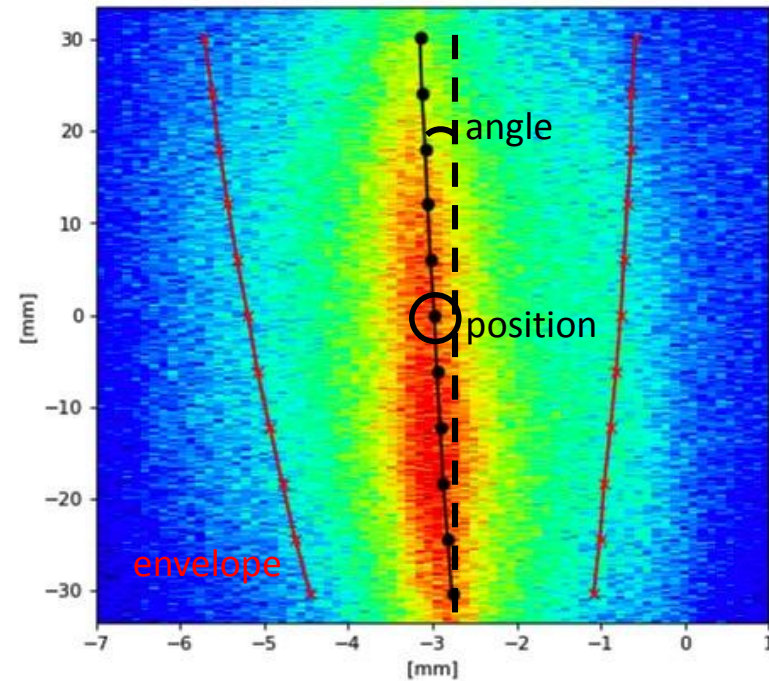
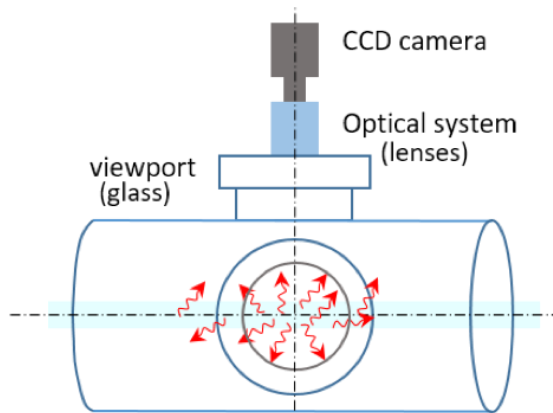
Дополнительные слайды

Unconventional uses

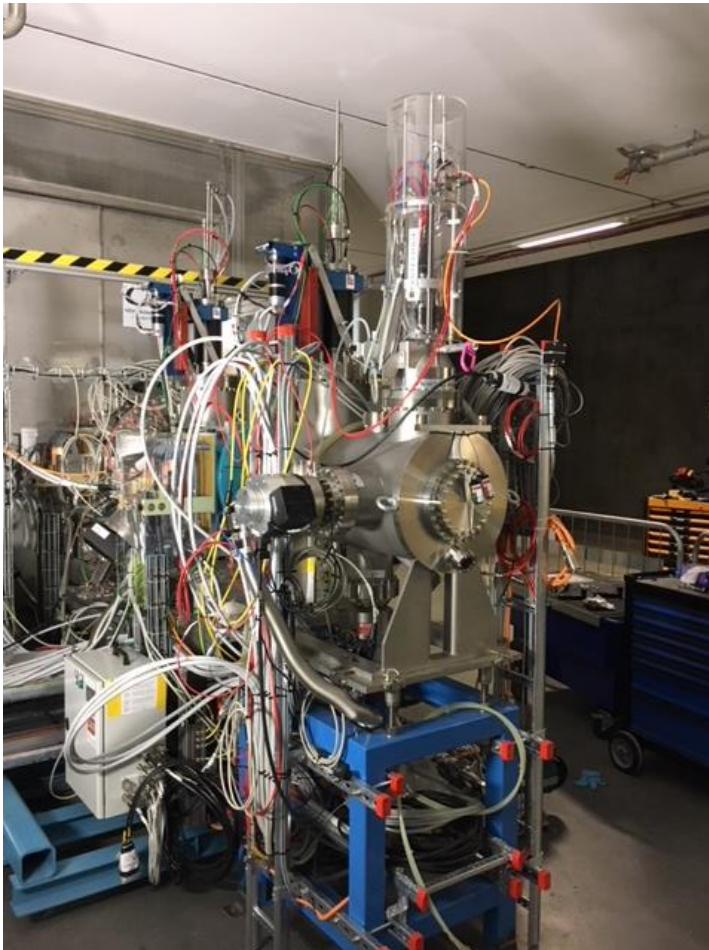
Profile Monitor (NPM in the LEBT section)

courtesy of Cyrille Thomas

FPM: Fluorescence PM



Transverse Profile and Emittance Measurements



Emittance Measurements:

Linear machine

- Transfer profile and angular distribution

Circular machine:

- In dispersion free region

Beam Profile measurements:

- Secondary emission grids and screens
- Wire scanners
- Synchritron light monitors
- Ionization and luminescence monitors



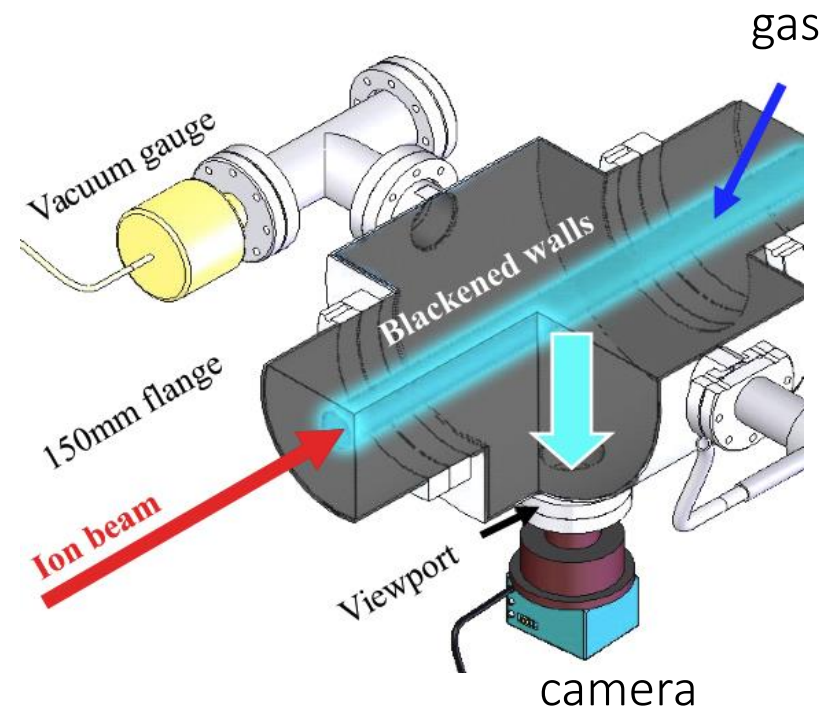
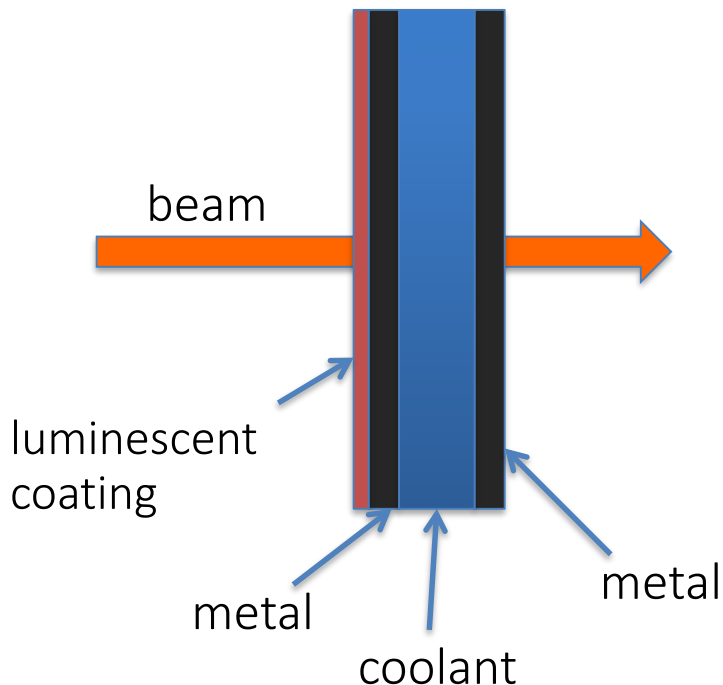
Profile Monitor: Luminescent Coatings and Gases



Inserting luminescent materials into the beam is invasive, but there are options for protection applications

Apply thin coating to cooled surfaces of targets and windows

Use residual gas (N, H, or near targets, He)



Ionization Profile Monitor



Residual Gas Ionisation

Dynamic range: up to 10^3

≈ 10 times more sensitive than Luminescence

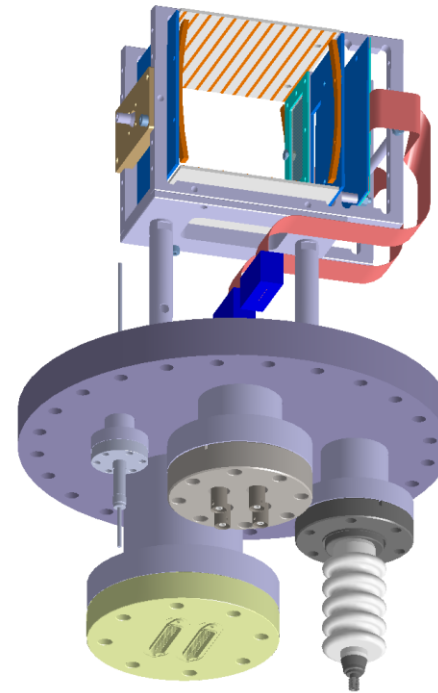
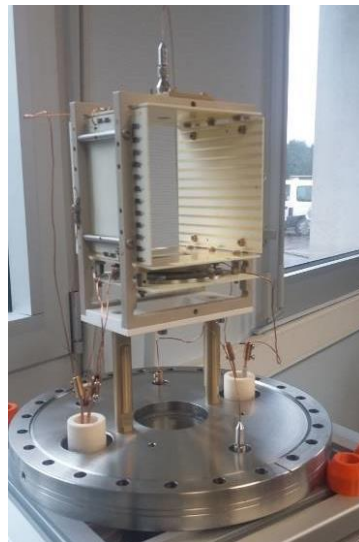
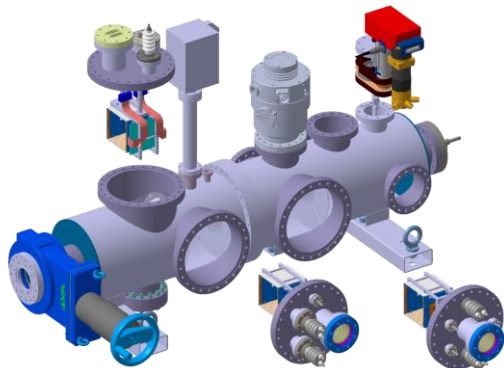
Image broadening due to space charge

More complicated to build

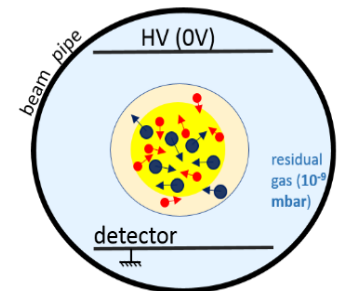
High voltage

Guiding magnetic field

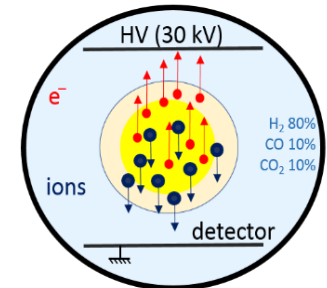
Compensation magnets for the beam



Electric Field OFF



Electric Field ON



- Residual gas ionization induced by beam
- High electric field to drive ions toward a sensitive detector
- beam profile transversal projection
- 2 profilers (X and Y projections)