Калориметрия в физике высоких энергий

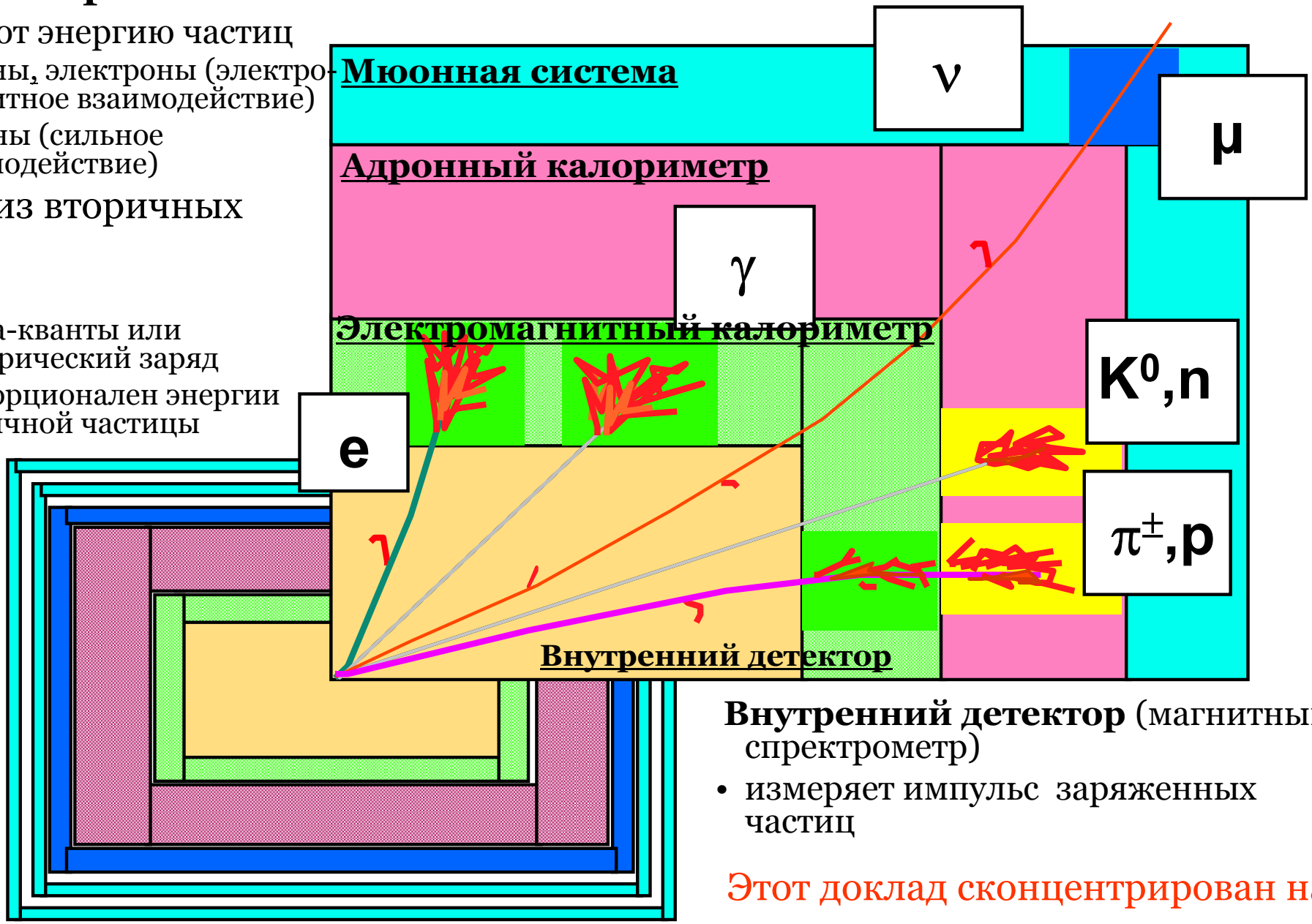
Татьяна Берже-Гринёва
LAPP, Аннеси-ле-вье, Франция

ИСМАРТ-2008, Харьков
20 ноября

Физика высоких энергий: детекторы

Калориметры

- измеряют энергию частиц
  - фотоны, электроны (электро-магнитное взаимодействие)
  - Адроны (сильное взаимодействие)
- ливни из вторичных частиц
- сигнал
  - гамма-кванты или электрический заряд
  - пропорционален энергии первичной частицы



Внутренний детектор (магнитный спректрометр)

- измеряет импульс заряженных частиц

Этот доклад сконцентрирован на электро-магнитных калориметрах.

Преимущества калориметров

- Чувствительность ко всем видам частиц (заряженых и нет)
- Энергетическое разрешение улучшается с E

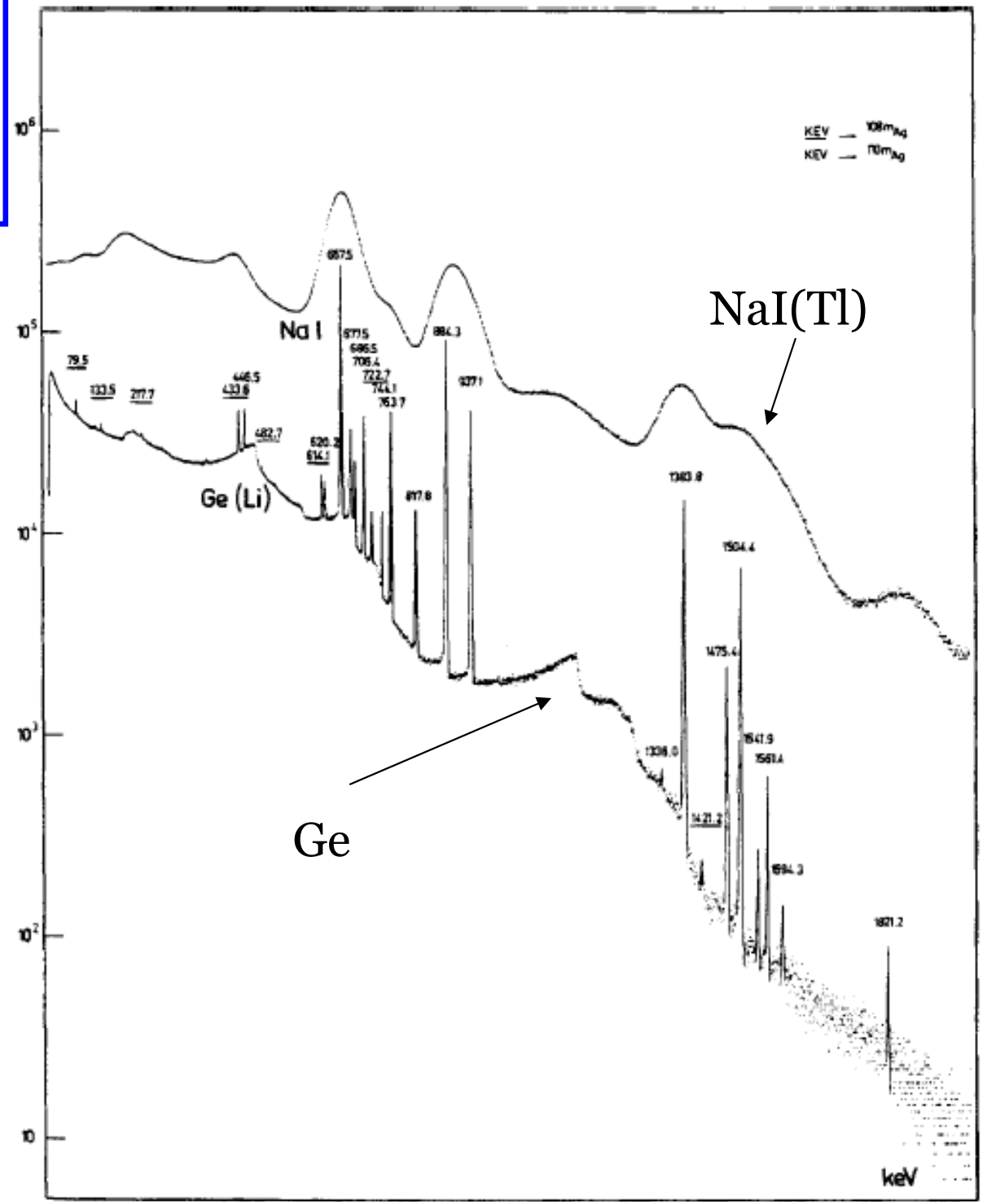
$$\frac{\sigma}{E} \approx \frac{1}{\sqrt{E}}$$ калориметр

$$\frac{\sigma}{p} \approx p$$ магнитный спектрометр

- Многопрофильные детекторы
  - Измерение энергии (основное применение)
  - Измерение направления частицы, начала ливня (сегментация)
  - Идентификация частиц (различный сигнал от электронов, адронов, гамма-квантов)
  - Измерение времени прихода частиц
  - Быстрая реакция → удобно для триггерной системы
- Достаточно выгодны по цене
  - Толщина для поглощения ливня ~ log E (в спектрометре ~ √p)

Энергетическое разрешение

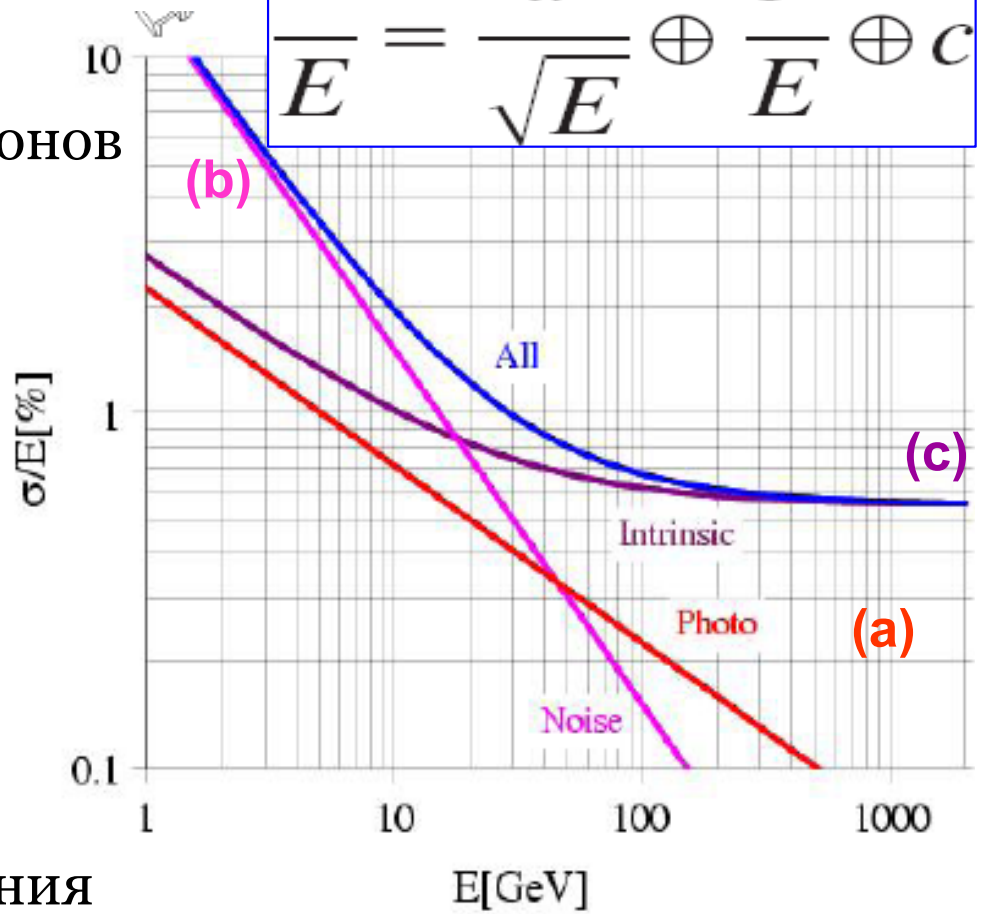
Спектр фотонов ^{108}Ag измеренный Ge кристаллом и Сцинтиллятором NaI(Tl).



Энергетическое разрешение

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

- a – стохастический
  - флуктуации числа (фото)электронов
  - средний диапазон энергий
- b - шумовой
  - <100МэВ/канал
  - низкий диапазон энергий
  - электронный шум:
    - Меньше если детектируется свет
    - Больше если заряд
- c – постоянный (<1%)
  - неопределённости калибрирования
  - неоднородности (сигнала, материала детектора, температуры и т. п.)
  - утечки части ливня
  - высокий диапазон энергий



Геометрия калориметров

Гомогенные/Однородные	Неоднородные/Сандвич
	слоя поглощающего (большое Z) и детектирующего материалов
Энергетическое разрешение	
☺ (2-5%)	☹ (5-20%, ~√толщина поглощающего слоя)
Сегментация	
☹ (поперечная)	☺ (поперечная и продольная)
Компенсация : разница между сигналом от електронов и адронов (для измерения энергий струй)	
☹	☺
Цена	
☹	☺

Все адронные калориметры

Однородные калориметры

Полупроводниковые (Ge, Si)

✓ Великолепное разрешение (~кэВ)

$$\frac{\sigma}{E} \propto \frac{\sqrt{F}}{\sqrt{N_{eh}}}$$

F<< 1 (фактор Фано)

$N_{eh} \approx 10^5$

✘ Оптимальны для низких энергий

✘ Очень дорогие

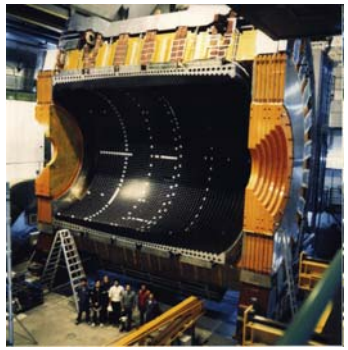
Черенков (PbO)

✘ Низкий световыход ($1/10^4$ NaI)

✘ Плохая радиационная стойкость (PbF_2 лучше)

✘ λ < 300-350nm

$$5\%/\sqrt{E}$$

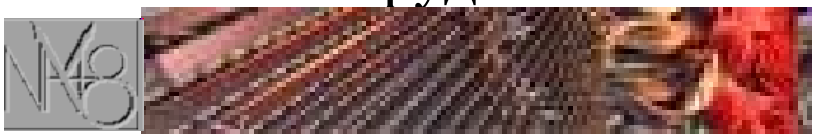


Инертная жидкость (LKr)

✓ Хорошая радиационная стойкость

✓ Однородность детектора

✘ Необходимость охладительного и очистительного оборудования



$$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$$

Сцинтилляторы

Очень популярны!

✓Высокий световыход

✓ Высокая плотность

✘ Не однородность кристаллов

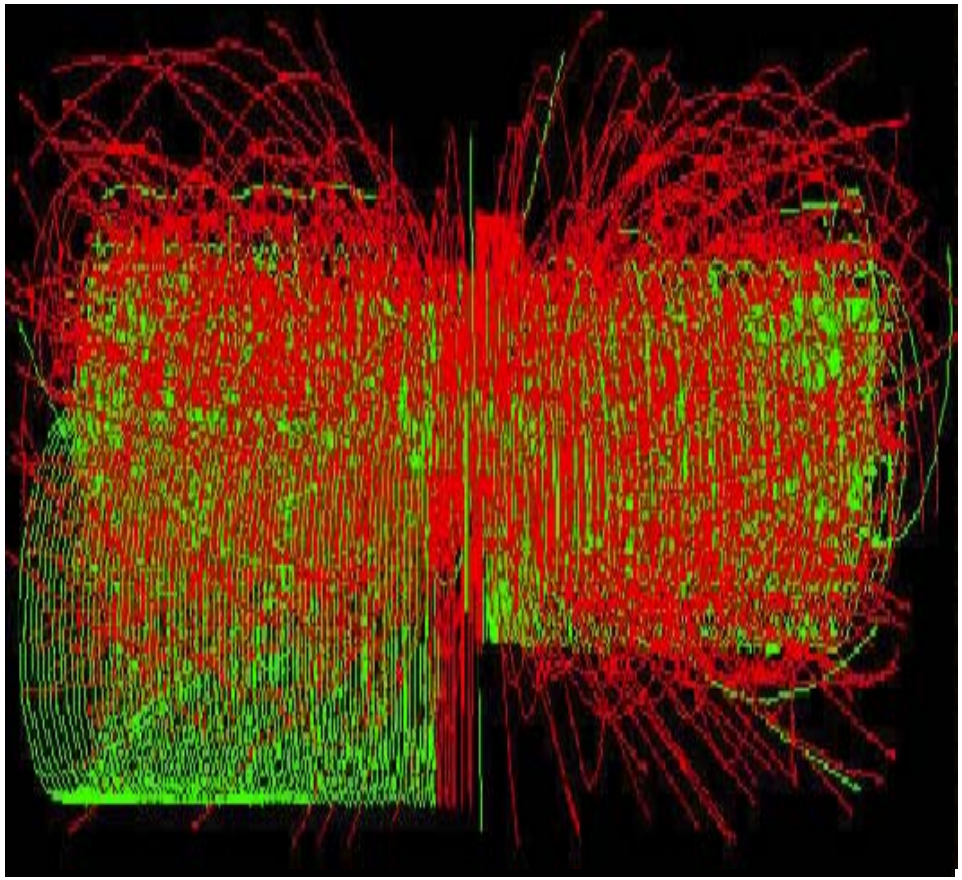
✘ Цена

✓ Свойства «на заказ»

$$2\text{-}3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\text{-}1.4\% \oplus 0.0\text{-}0.2/E$$

Материалы калориметров, их свойства

Материал	CsI(Tl)	$PbWO_4$	PbO	LKr
Плотность (г/см³)	4.51	8.3	4.1	2.41
Радиационная длина (см)	1.85	0.9	2.5	4.7
Радиус Молера(см)	3.5	2.0	3.5	5.5



Higgs→4μ

+30 событий

Высокая плотность ⇒

компактность детектора:

- Возможность поместить внутри магнита
  - Уменьшение материала перед калориметром: улучшение σ_E
- Улучшение пространственного разрешения
- Длина ливня зависит от энергии:
  - BaBar (10ГэВ) CsI(Tl): 16-17.5 X_0
    - Асимметричный детектор, кристаллы короче сзади
  - L3 (100ГэВ) BGO: 22 X_0
  - CMS (1000ГэВ) $PbWO_4$: 25 X_0

Материалы калориметров, их свойства

Материал	CsI(Tl)	$PbWO_4$	PbO	LKr
Experiment	CLEO BaBar BELLE (B-factories)	CMS ALICE (LHC)	OPAL	NA48
Длина волны (нм)	560	560/420	330	147
Время затухания (нс)	1300	50/10		~85/2
Световыход γ /МэВ	$4\ 10^4$	$1.5\ 10^2$	~1	

- Длина волны: фотоумножитель или фотодиод, в магнитном поле или нет
- Допустимое время затухания сцинтилляции зависит от скорости прихода событий:
  - 100 Гц в BaBar
  - 1ГГц (25 событий каждые 25нс) в CMS
- Минимально допустимый световыход зависит от энергии эксперимента:
  - B-factories (>20МэВ) выбор CsI(Tl) (BaBar, Belle, CLEO)
    - Световыход от $PbWO_4$ не достаточен
  - LHC, CERN (>5.0ГэВ) выбор $PbWO_4$ (CMS, ALICE)

Радиационная стойкость

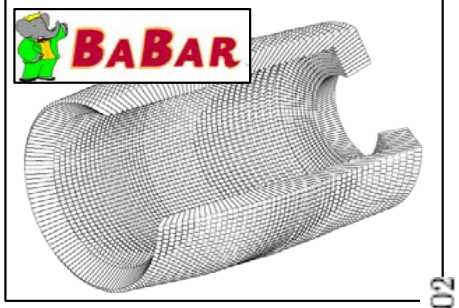
Материал	CsI(Tl)	$PbWO_4$	PbO	LKr
Experiment	CLEO BaBar BELLE (B-factories)	CMS ALICE (LHC)	OPAL	NA48
Радиационная стойкость (Рад)	10k	10M	100k ?	высокая

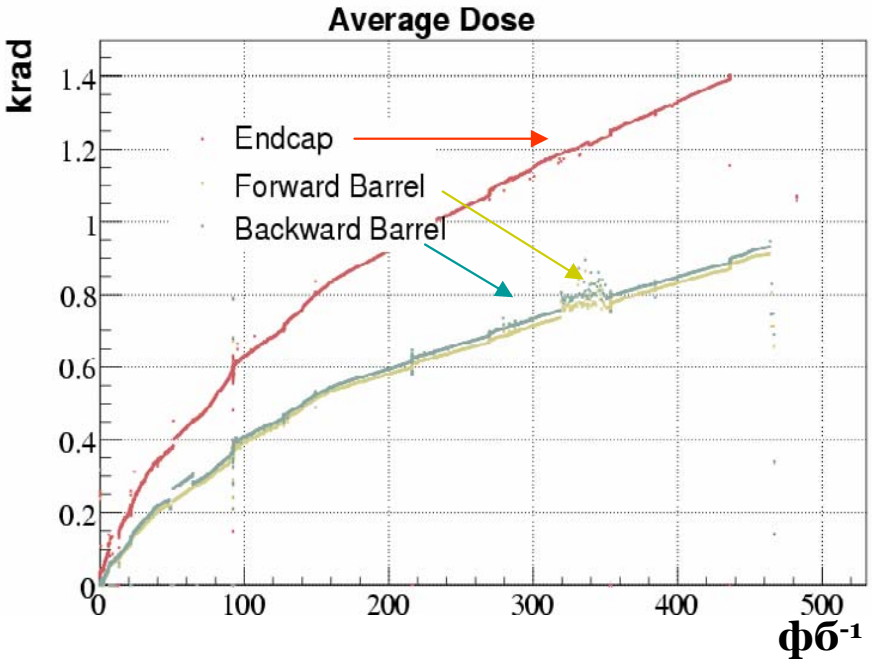
- Радиационная стойкость
  - В основном проблема сцинтилляторов
  - BaBar до 3-6 Рад/фб$^{-1}$ до 1.5кРад общая доза
  - CMS доза облучения 20-1500Рад час, до 1-10 MРад e+γ и 10^{13}-10^{14} нейтронов
- Эффект на энергетическое разрешение

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

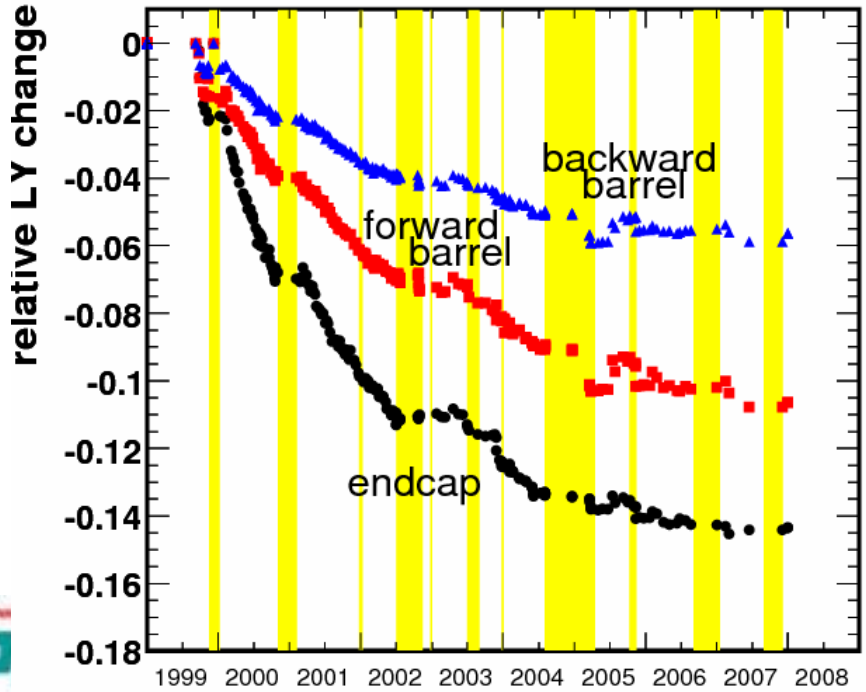
  - Уменьшение числа фотоэлектронов (a)
    - Корректируется калибровкой по ходу эксперимента
    - Важен для среднего диапазона энергий (10-50ГэВ)
  - Изменение световыхода вдоль длины кристала (c)
    - Не возможно измерить по ходу эксперимента, отдельное R&D
    - Важен для высоких энергий (>50ГэВ)

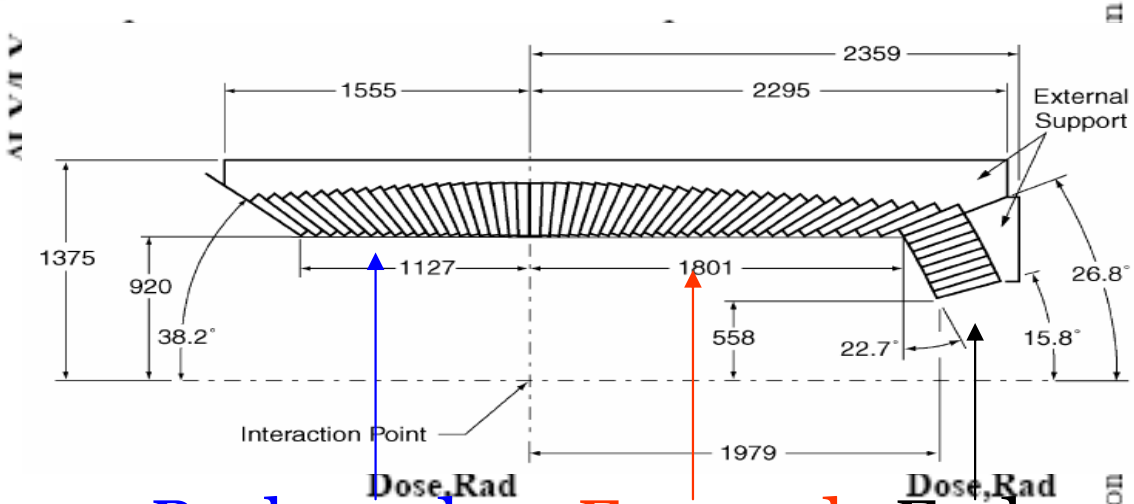
Радиационная стойкость CsI(Tl)

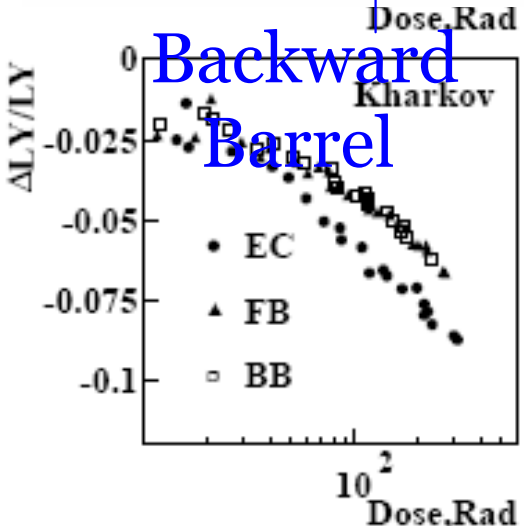


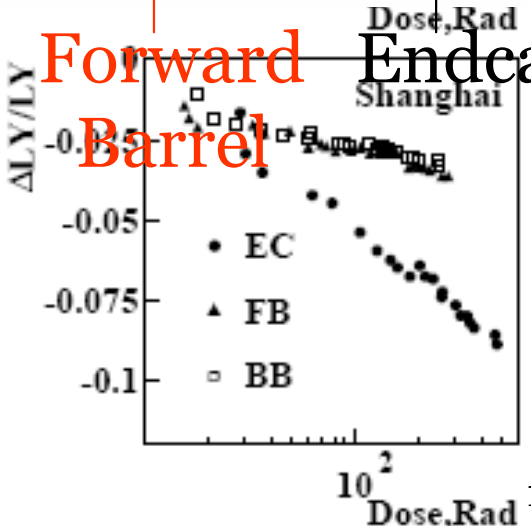


- 6580 кристалов разных производителей
- EC: Hilger, Shanghai, Kharkov
- FB: Kharkov, Hilger, Crismatec
- BB: Crismatec, Shanghai







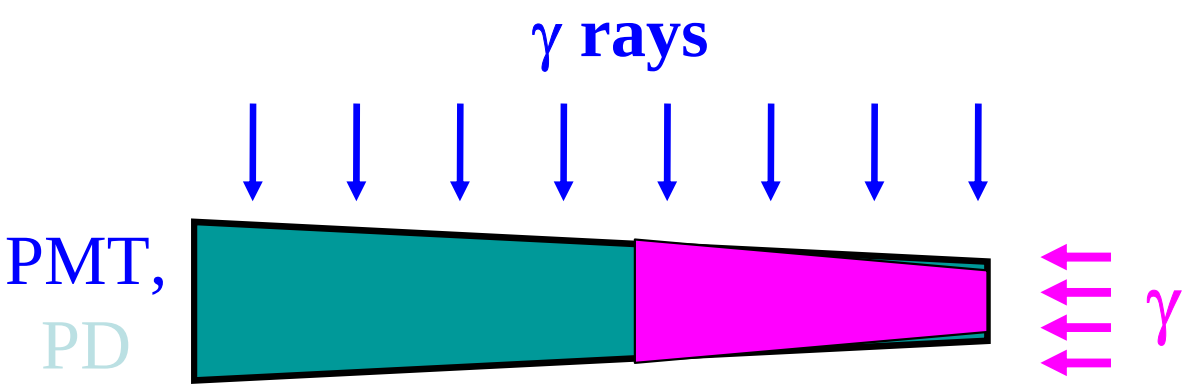


Endcap

n Particle Physics 2002
181. SLAC-PUB-10169

Proceedings of the 10th Interna
Pasadena, CA, USA, 25–29 March

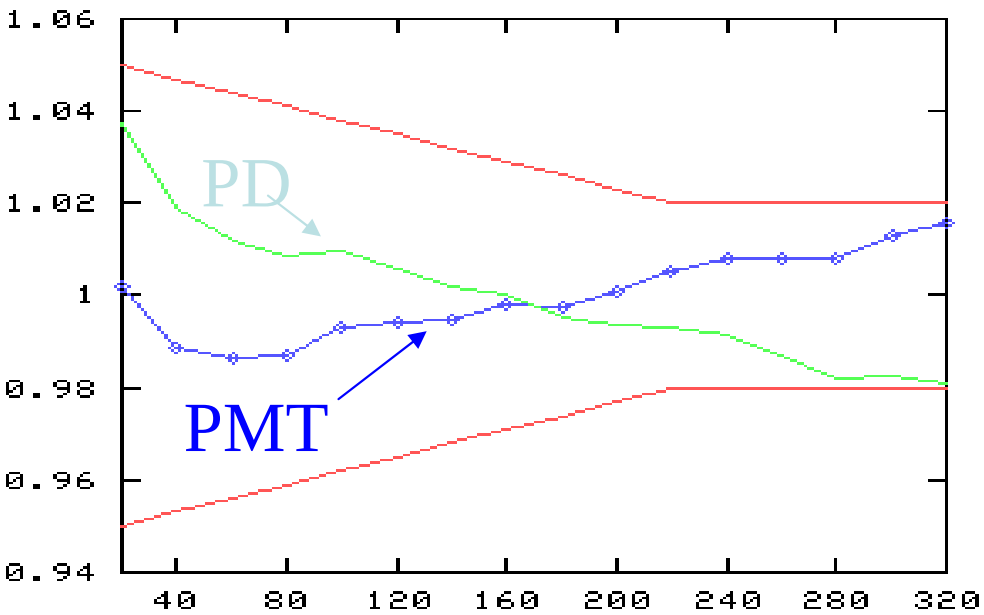
Однородность световыхода



Однородность зависит от:

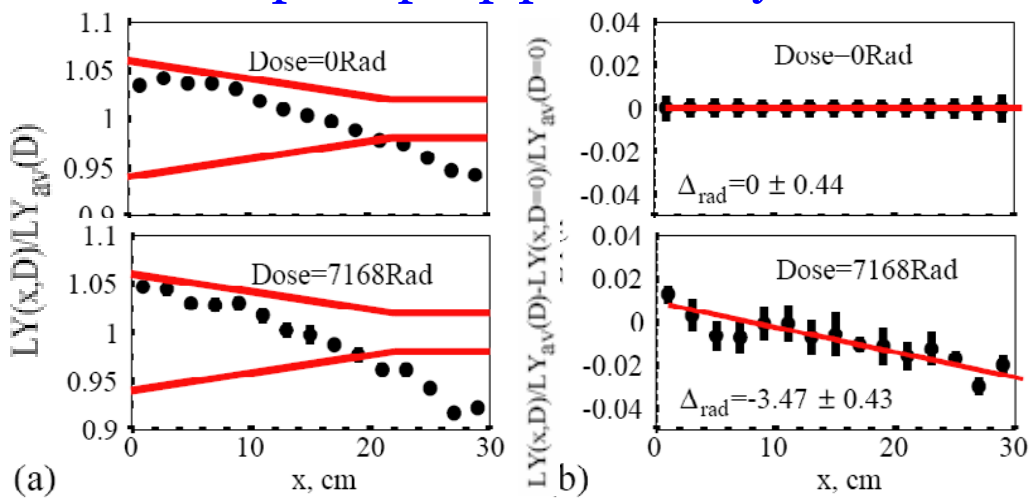
- прозрачности кристалла
- качества поверхности
- обертки
- эффекта радиации

Требования BaBar: вклад в σ_E/E <0.5% до 5ГэВ.



Back (±5%) Front (±2%)

Пример эффекта облучения

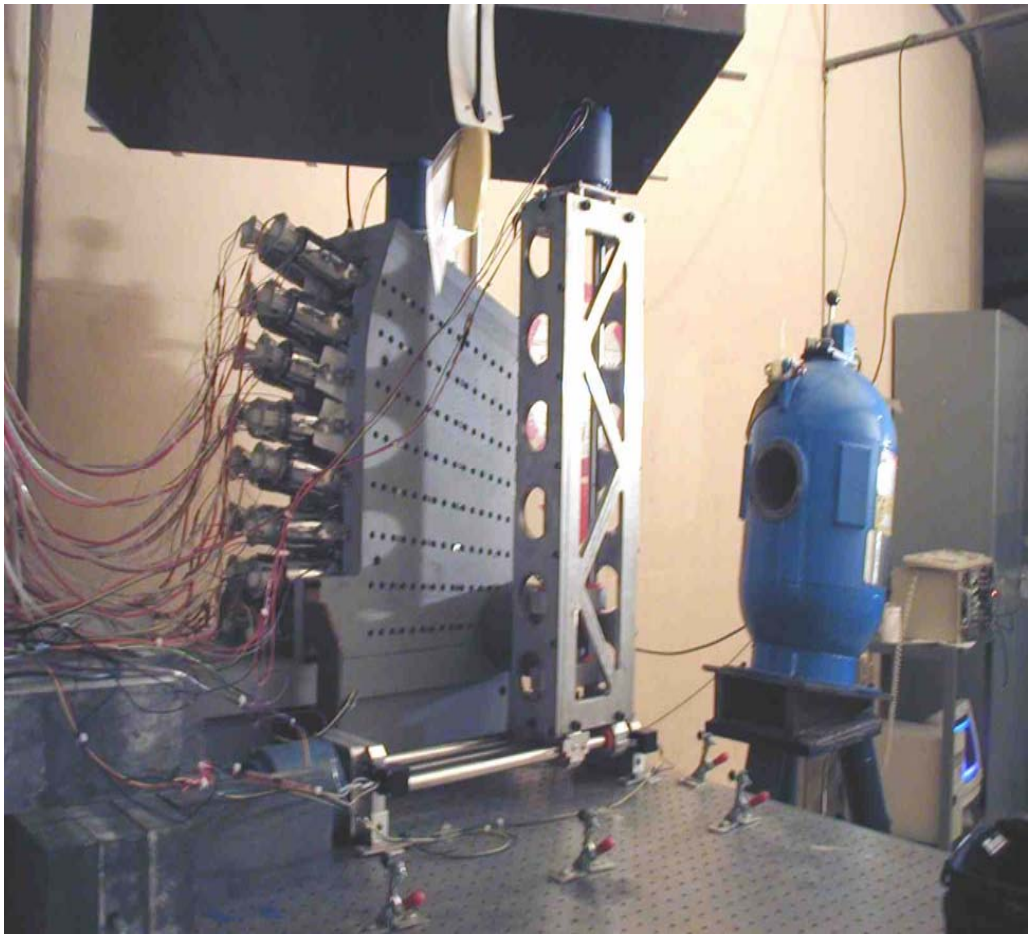


Очень сложное измерение. Результаты часто противоположны!

R.Y. Zhu, Fifth International Conference on Calorimetry in HEP, Frascati Physics Series, vol. VI, 1996, pp. 589–598;

J. Allison, et al., NSS 1999, Conference Record, IEEE 1 (1999) 6.

Однородность световыхода

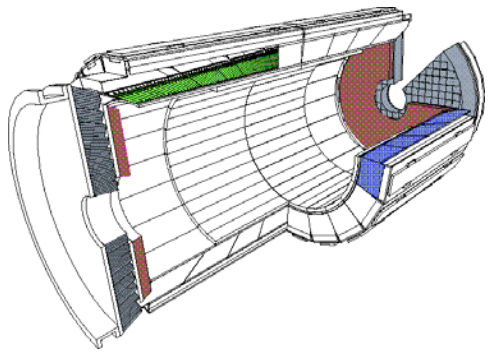


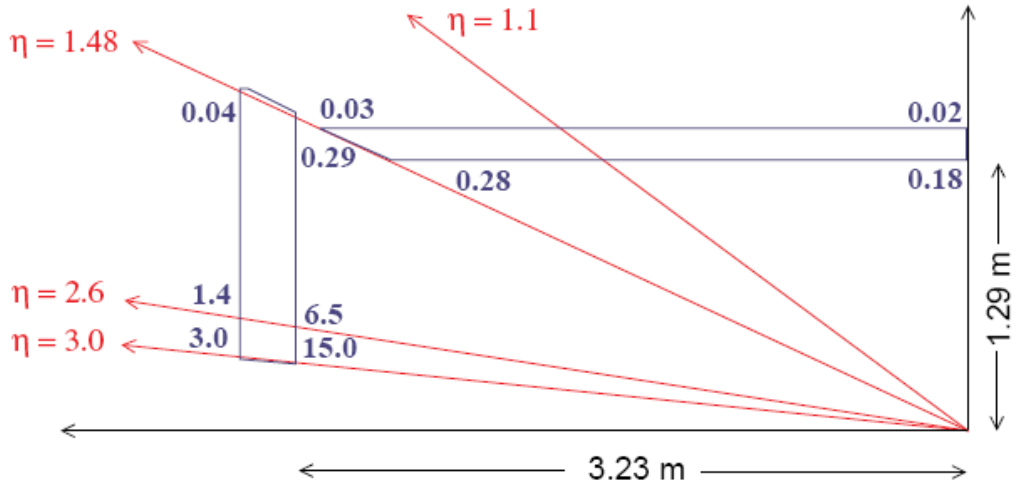
- 16 кристаллов (4 Crismatec, 11 Shanghai, 1 Beijing)
- Облучение Co^{60} 1-2Рад/час
- Изменение градиента световыхода после 10кРад:
  - (-0.4±0.5)% Crismatec
  - (-4.0±0.7)% Shanghai
  - Уменьшение в передней части кристалла
- Ожидаемый эффект на разрешение при 10кРад
  - До 0.5ГеВ σ/E хуже на 3% (не значительно)
  - Выше 1ГэВ улучшение за счет компенсации утечки ливня через заднюю стенку

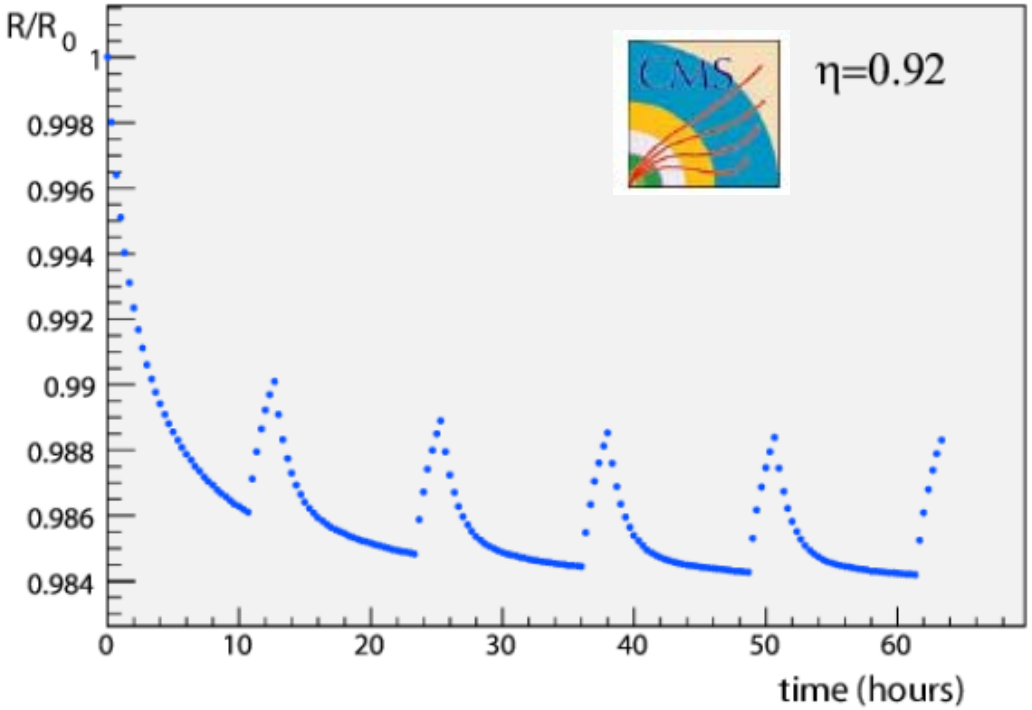
По завершению BaBar (доза ~1кРад) ухудшения разрешения нет

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 535 (2004) 452–456

Радиационная стойкость в CMS



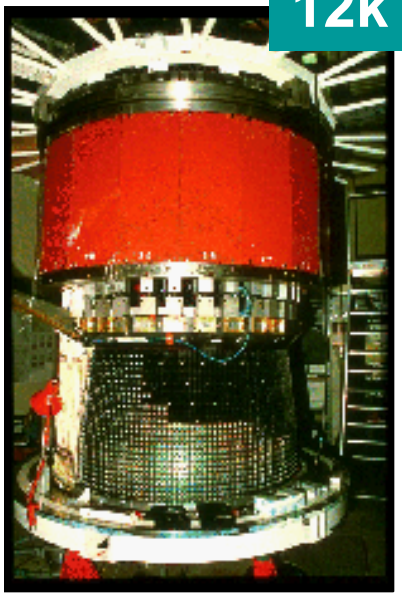




- 75848 кристаллов $PbWO_4$
- Рад-стойкость до 10^7 Рад
- Но падение световыхода при сборе данных
  - Ухудшение прозрачности из-за центров окраски
  - Постоянная калибровка
- Изменений однородности световыхода при облучении нет (Zhu et al)
  - Но этот тест был также негативен для CsI(Tl)
  - Дополнительные тесты?

The CMS experiment at the CERN LHC. 2008 *JINST* 3 S08004

L3 BGO Resolution

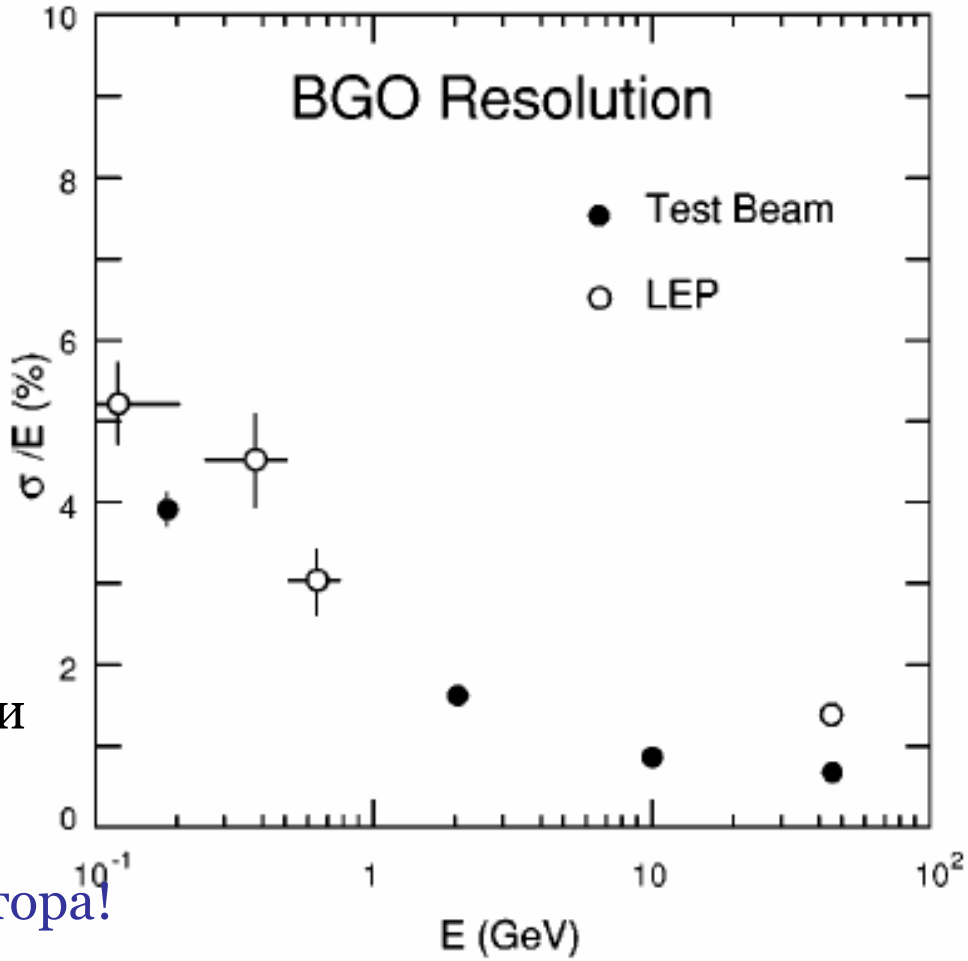


12k BGO

Разрешение полученое в тестовом пучке:

$$1.5\%/\sqrt{E(\mathrm{GeV})}\oplus 0.4\%$$

Но! в эксперименте измерено:
$\sigma_E/E(E=45\text{ГэВ})=1.2\%$
$\Rightarrow$
Постоянный член ~1.2%



Причины:
- Температурные эффекты
- Электроны взаимодействующие на краях кристаллов
- Разница в световыходах между кристаллами

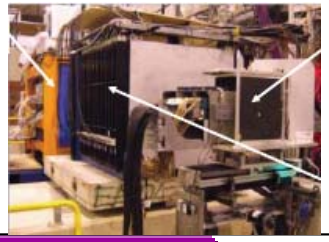
Контроль качества кристаллов очень важен!
Проект может отличатся от конечного детектора!

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 75, OCTOBER 2003

Неоднородные калориметры

Полупроводниковые (Si)

- ✓ Высокая плотность
- ✓ Хороший сигнал
- ✓ Радиационная стойкость?
- ✗ Дорого



Газовые

$\lesssim 20\% / \sqrt{E(\mathrm{GeV})}$

- ✗ Низкая плотность
- ✗ Плохая стабильность
- ✗ Плохая однородность
- ✓ Легко сегментируются
- ✓ Дешево

ALEPH

Инертная жидкость

- ✓ Хорошая радиационная стойкость
- ✓ Однородность детектора
- ✓ Легко калибрируются
- ✓ Хорошее разрешение
- ✗ Необходимость охладительного и очистительного оборудования

$\lesssim 10\% / \sqrt{E(\mathrm{GeV})}$

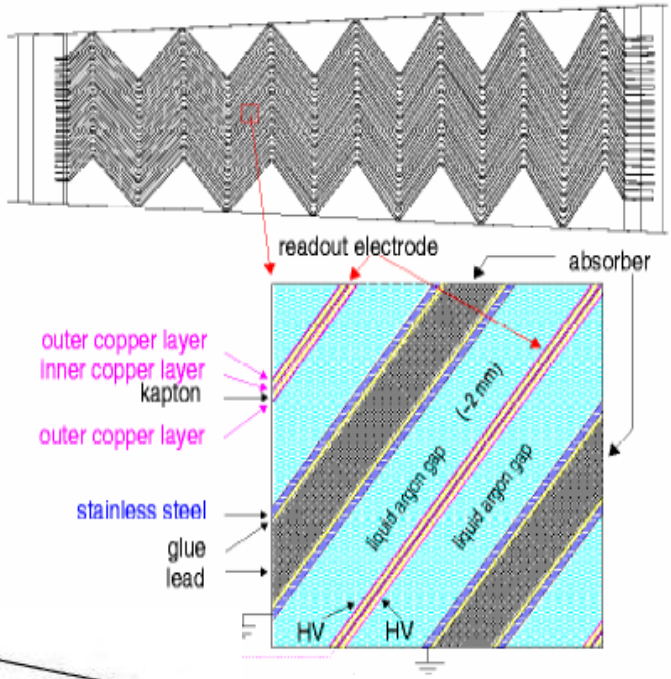
Сцинтилляторы

$5.7\text{–}18\% / \sqrt{E}$

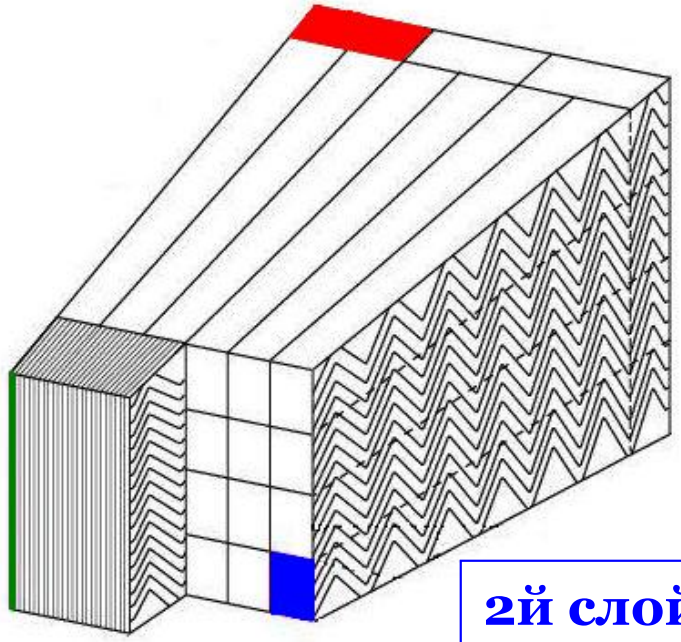
- ✓ Легко сегментируются
- ✓ Не дороги
- ✓ Быстрый сигнал
- ✓ Достаточный световыход
- ✓ Компенсируемые
- ✗ Старение, радиация
- ✗ Неоднородность световыхода

Электромагнитный калориметр ATLAS

- Материал: Свинец / Аргон
- Сигнал: ионизационный заряд
  - Без амплификации
- Форма: аккордион
  - Герметичность
  - Однородность в ϕ
  - Скорость прихода сигнала
- 173000 каналов



1й слой
$\Delta\eta\times\Delta\phi$=0.003×0.1
Высокая сегментация для π/e идентификации и расчета направления



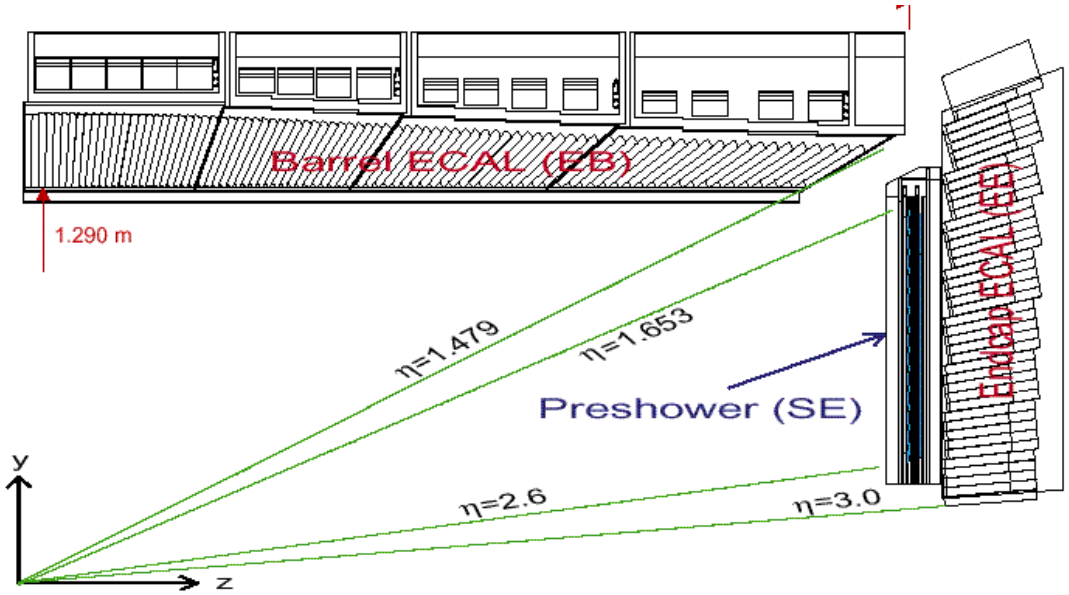
3й слой
$\Delta\eta\times\Delta\phi$=0.05×0.025
Конец електро-магнитного ливня отсортировка адронов

Пресамплер
$\Delta\eta\times\Delta\phi$=0.025×0.1
Оценка потерь энергии перед калориметром

2й слой $\Delta\eta\times\Delta\phi$=0.025×0.025
большая часть електро-магнитного ливня

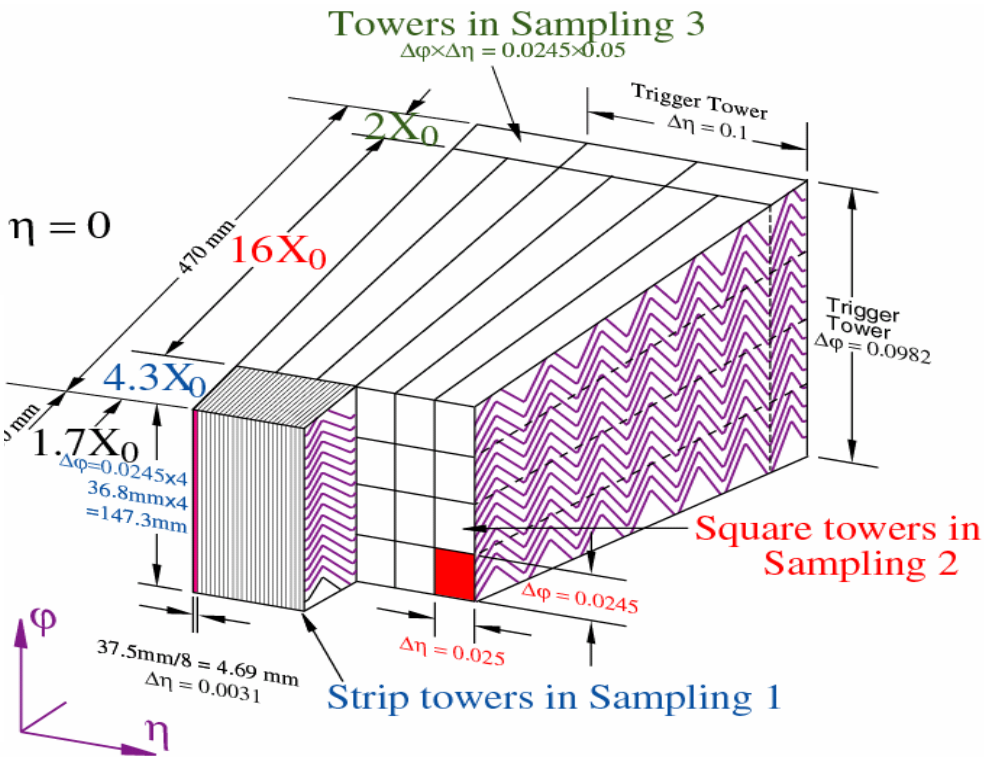
Калориметры для LHC: CMS и ATLAS

Индивидуальные характаристики



- Кристаллы 75848 $PbWo_4$
- Размер η×ϕ×глубина
  ~0.0174×0.0174×25.8X_0
- σ_E/E= 2.8%/√E⊕124MeV/E⊕0.26%
- однородность <0.5%
- охват |η|<3.0

- 173k каналов Pb/LAr аккордион
- 3 слоя по глубине |η|<2.5
- σ_E/E=10%/√E⊕0.245/E⊕0.7%
- направление σ_θ~50мрад/√E
- однородность < 0.5% до 300ГэВ

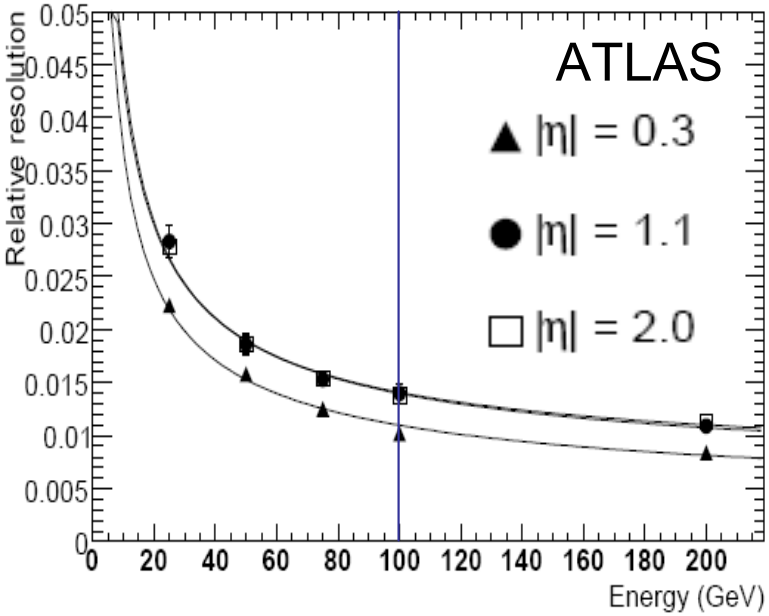


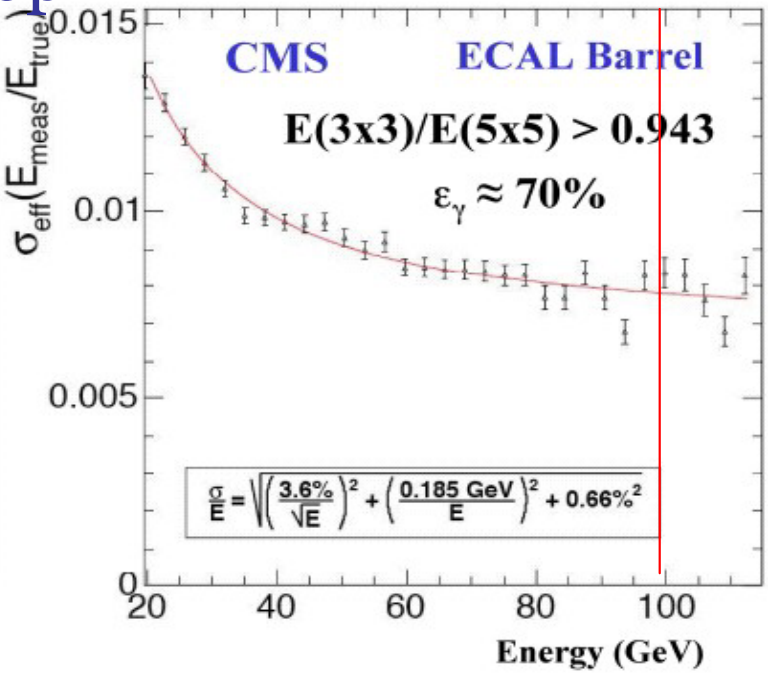
Калориметры для LHC: CMS и ATLAS

Полный детектор

Фотоны 100 ГэВ

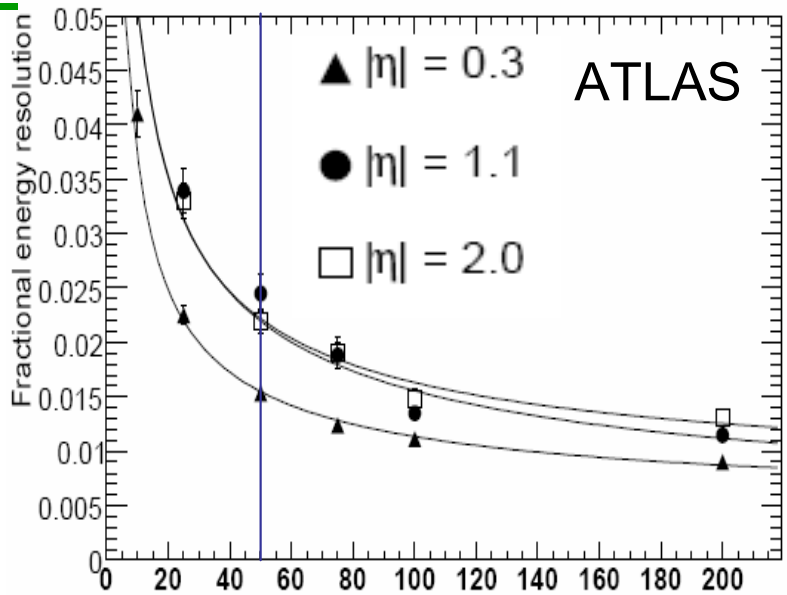
ATLAS: 1-1.5% разрешение (все γ) CMS: 0.8% разрешение (ε_γ ~ 70%)

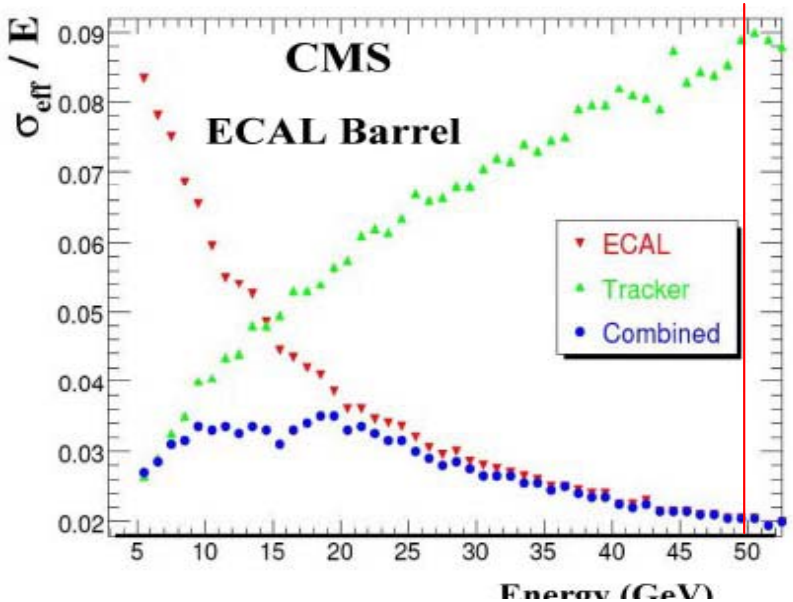




Электроны 50 ГэВ

ATLAS: 1.5-2.5% разрешение (только ЭМ кало) CMS: ~ 2.0% разрешение (ЭМ кало + треккер)

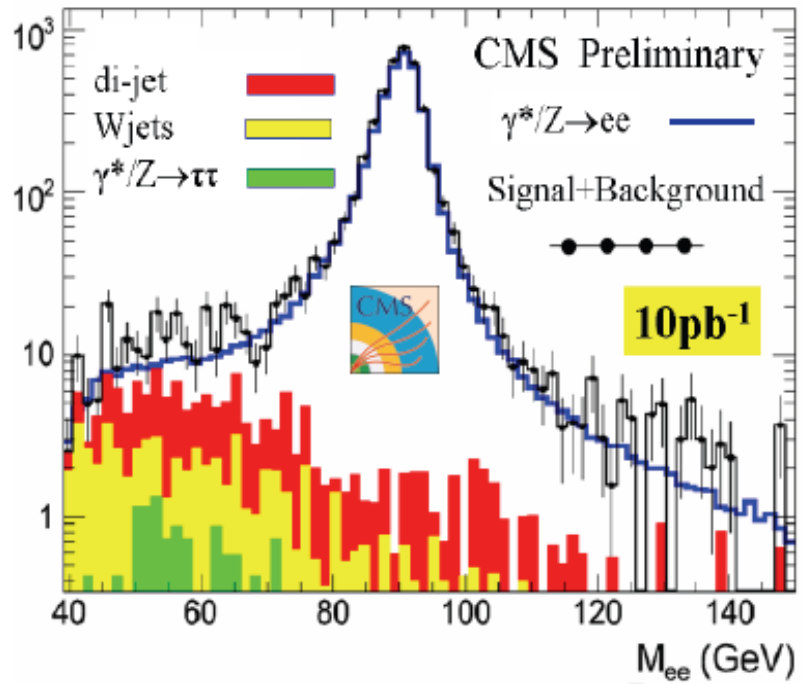


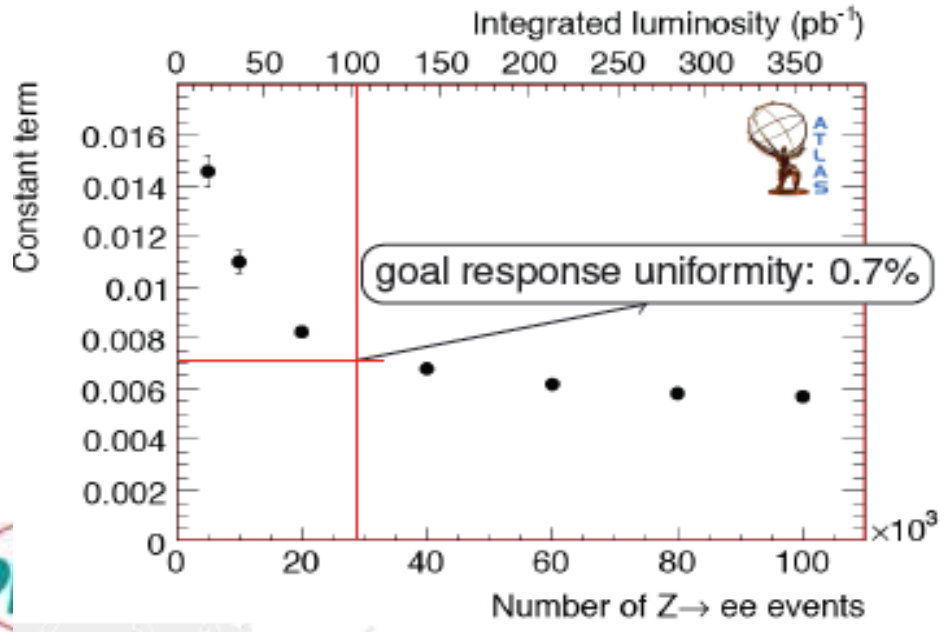


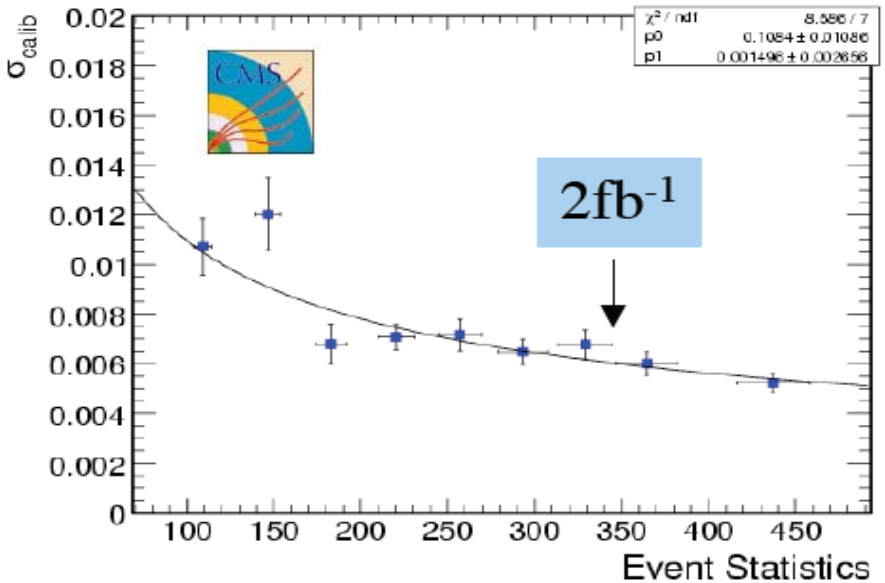
Разрешение электронов и фотонов одинаковы в CMS and ATLAS!

Калибровка калориметров ATLAS и CMS

- Калибровка известными резонансами $Z(J/\psi)\to ee$ задает энергетическую шкалу
- В ATLAS межкалибровка удаленных участков
  - ~30k событий $Z\to ee$ (0.1фб$^{-1}$) для однородности ~0.7% в 0.1x0.1 ($\eta \times \phi$)
- В CMS, разница световыхода между отдельными кристаллами
  - Начальная калибровка: однородность до 2-3%
  - Нужно 2фб$^{-1}$ для оптимальной для поиска Хиггса однородности 0.6%

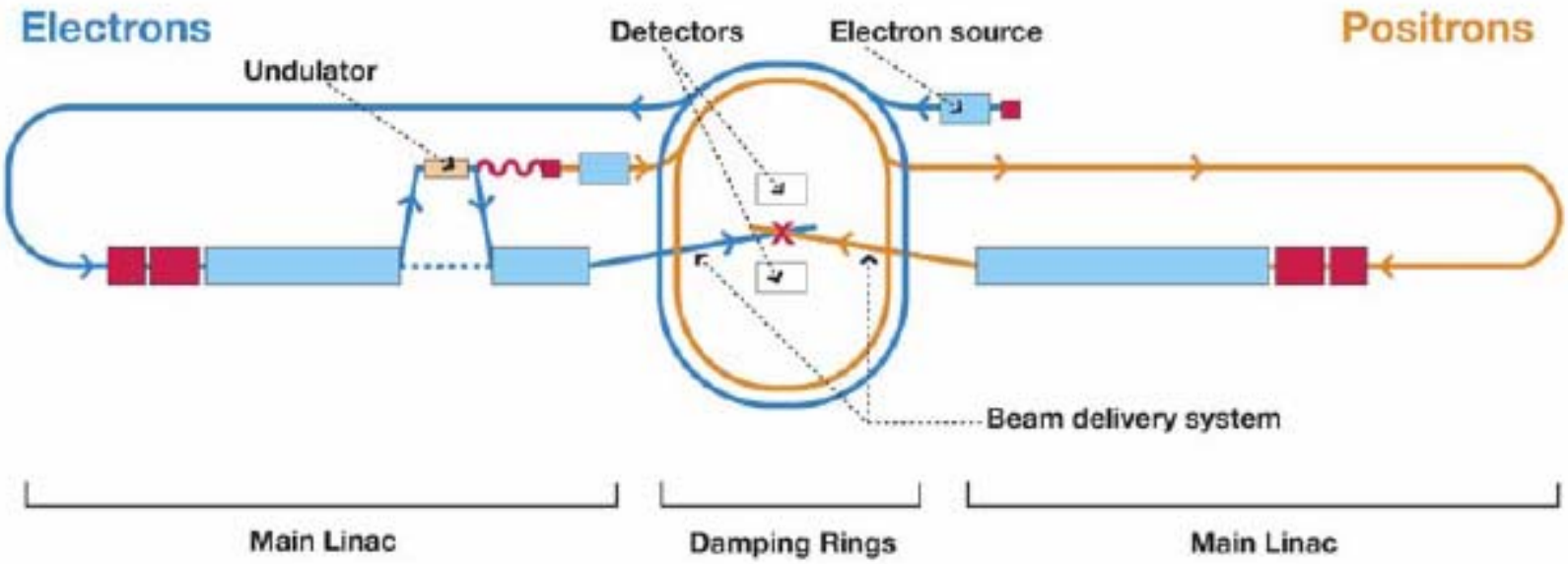






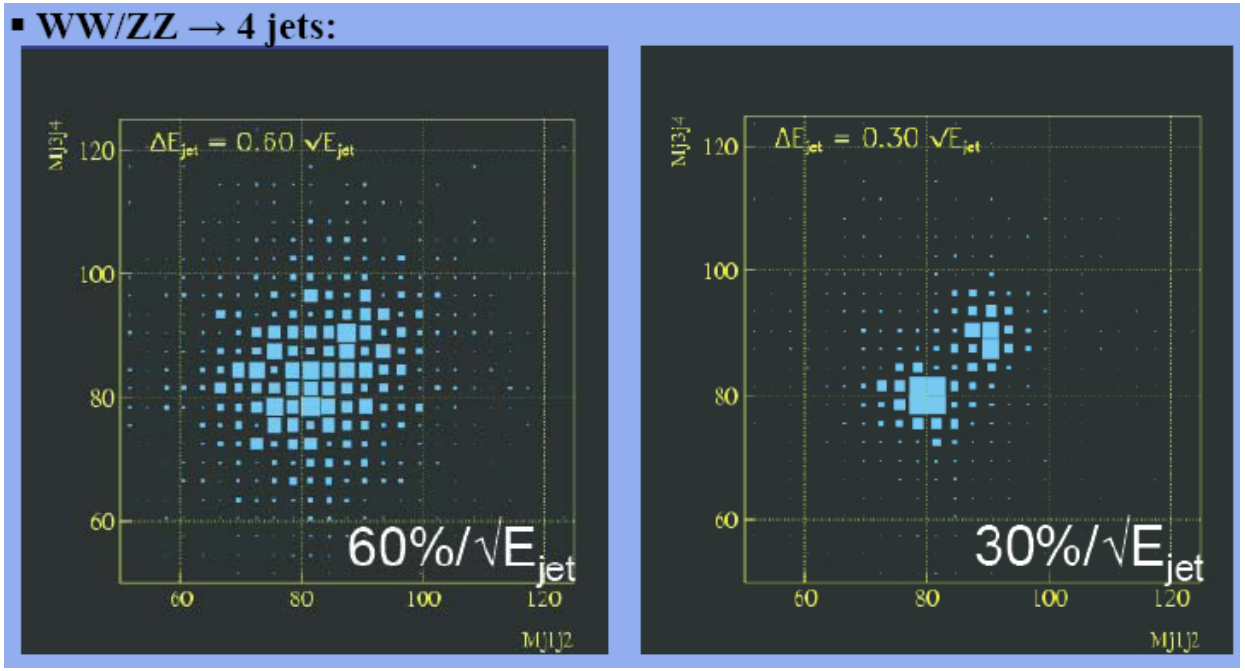
Международный линейный ускоритель

- Следующий большой проект: ILC
- Энергия: 2×250ГэВ (upgrade 2×500ГэВ)
- 1 interaction region
- 2 детектора (3-4 проекта)



Будущие эксперименты

- WW/ZZ → 4 jets:



Сегментация очень важна для разрешения струй!

Алгоритм потока частиц: калориметр работает как треккер.

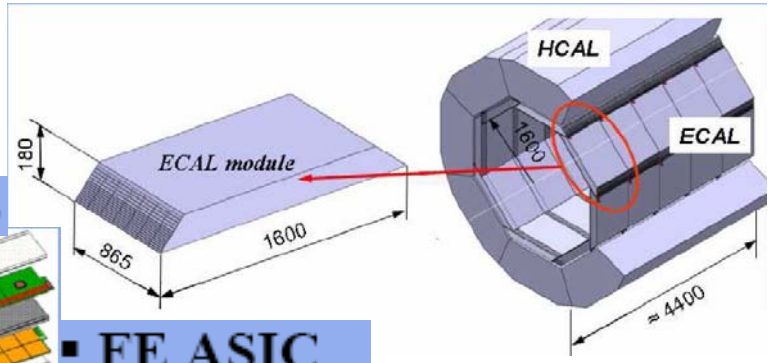
particles in jet	fraction of energy in jet	detector	single particle resolution	jet energy resolution
charged particles	60 %	tracker	$\frac{\sigma_{p_t}}{p_t} \sim 0.01\% \cdot p_t$	negligible
photons	30 %	ECAL	$\frac{\sigma_E}{E} \sim 15\%/\sqrt{E}$	$\sim 5\%/\sqrt{E_{jet}}$
neutral hadrons	10 %	HCAL+ECAL	$\frac{\sigma_E}{E} \sim 45\%/\sqrt{E}$	$\sim 15\%/\sqrt{E_{jet}}$

Будущие эксперименты

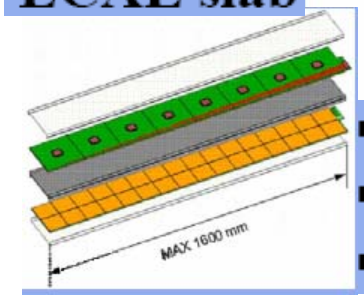
CALICE collaboration (Calorimeter for the Linear Collider Experiment)

Электромагнитный калориметр

- W/Si



ECAL slab



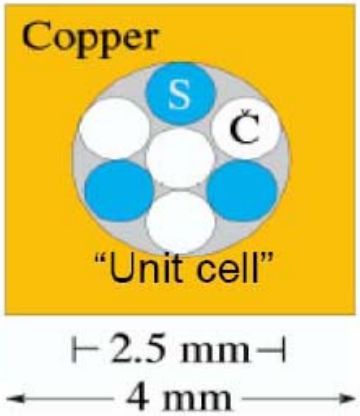
- **FE ASIC**
- **PCB board**
- **Si pads**

  - Электроника в детекторе
  - 5x5мм² сегментация
  - 0.6-1.2X_0 сегмент. глубины ($23X_0$)

- W+сцинт. стрипы
- DREAM:

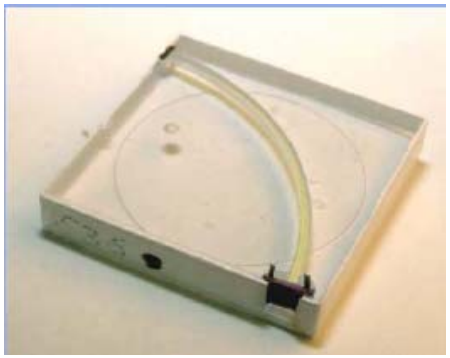
сцинтиллятор+

Черенков волокна

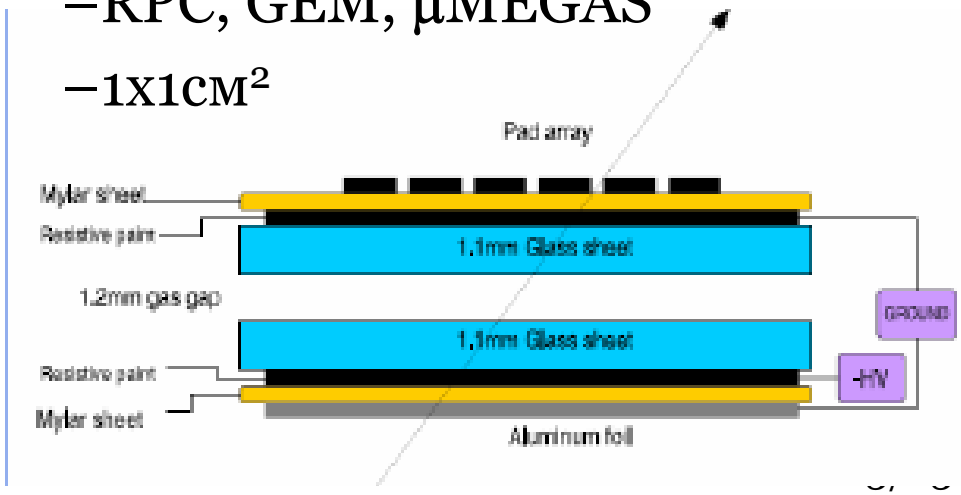


Адронный калориметр

- Аналоговые сцинт тайлы
  - 3x3см²
  - Кремневый ФЭУ



- Газовый цифровой
  - RPC, GEM, μMEGAS
  - 1x1см²



Большое спасибо за внимание!