

CMS HGCAL を参考に EIC ZDC に対する要求を考える

EIC 勉強会

1 May 2020

Yuji Yamazaki (Kobe University)

加速器パラメーター

- CDR に詳しく書いてあった
- 18 GeV e^- の lumi 低い！
 - とはいっても HERA の 30 倍以上
 - 10 GeV scattered e^- が 普通と思わないといけない
- Proton 1A: HERA の10倍
- Electron 2.5 A: ほぼ 100 倍
 - Synchrotron radiation の パワーは HERA の 2% (10GeV) 20% (18 GeV)
 - だが収束マグネットは 強いはず: more SR
 - ビームガス散乱の量は 単純に考えると HERA の 20 倍以上! Dynamic vacuum 対策大事

Table 3.3: eRHIC beam parameters for different center-of-mass energies \sqrt{s} , with strong hadron cooling.

Species	proton	electron	proton	electron	proton	electron
Energy [GeV]	275	18	275	10	100	10
CM energy [GeV]	140.7		104.9		63.2	
Bunch intensity [10^{10}]	20.5	6.2	6.9	17.2	6.9	17.2
No. of bunches	290		1160		1160	
Beam current [A]	0.74	0.227	1	2.5	1	2.5
RMS norm. emit., h/v [μm]	4.6/0.75	845/72	2.8/0.45	391/24	4.0/0.22	391/25
RMS emittance, h/v [nm]	16/2.6	24/2.0	9.6/1.5	20/1.2	37/2.1	20/1.3
β^* , h/v [cm]]	90/4.0	59/5.0	90/4.0	43/5.0	90/4.0	167/6.4
IP RMS beam size, h/v [μm]	119/10		93/7.8		183/9.1	
K_x	11.8		11.9		20.0	
RMS $\Delta\theta$, h/v [μrad]	132/253	202/202	103/195	215/156	203/227	109/143
BB parameter, h/v [10^{-3}]	3/2	100/100	14/7	73/100	10/9	75/57
RMS long. emittance [10^{-3} , eV·sec]	36		36		21	
RMS bunch length [cm]	6	0.9	6	2	7	2
RMS $\Delta p/p$ [10^{-4}]	6.8	10.9	6.8	5.8	9.7	5.8
Max. space charge	0.006	neglig.	0.003	neglig.	0.028	neglig.
Piwnski angle [rad]	5.6	0.8	7.1	2.4	4.2	1.2
Long. IBS time [h]	2.1		3.4		2	
Transv. IBS time [h]	2		2		2.3/2.4	
Hourglass factor H	0.86		0.86		0.85	
Luminosity [$10^{33}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$]	1.65		10.05		4.35	

EIC のゼロ度付近

dipole

Aperture ほかの加速器より
かなり大きくしている

$$4\text{mrad} = 12\text{cm}$$

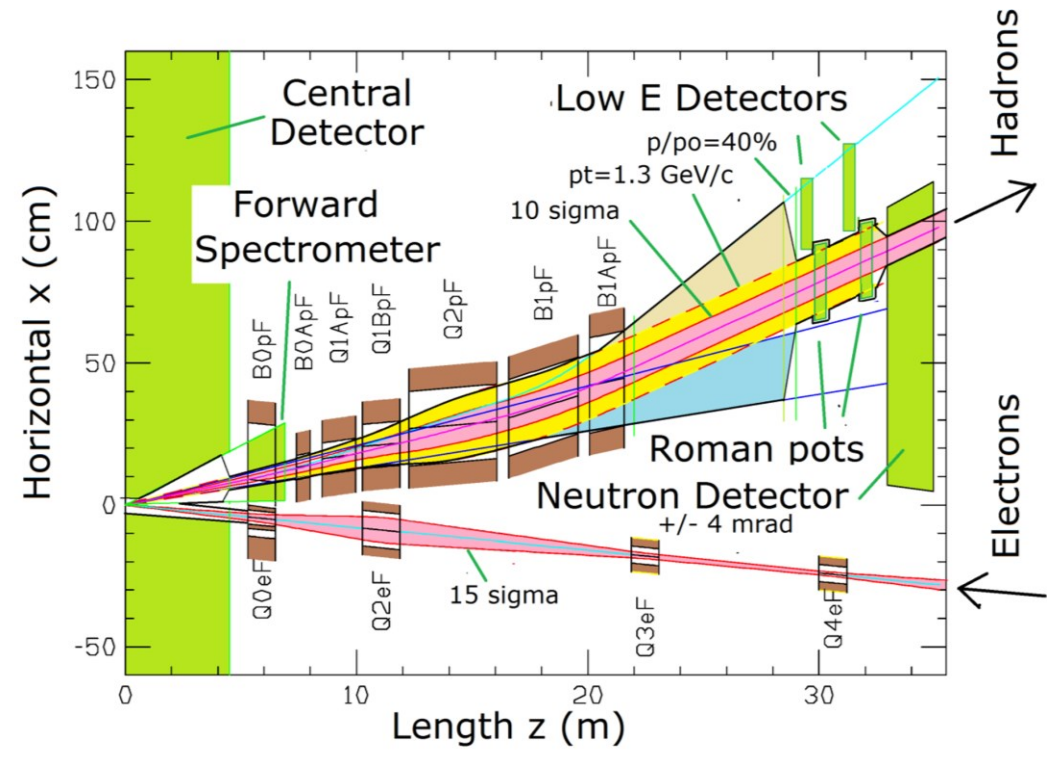
Beam up to 275 GeV

Size: $\pm 60\text{ cm} \times 2\text{ m}$

ハドロンシャワーを
～全吸収で
測れる大きさ

線量のベースとなるレート

- $ep\ 300\text{ fb}^{-1} ? eA?$
- ビームガスとの散乱?



Energy or position resolution?

ハドロンでも位置分解能 1mm くらいはいけるとして,
 $1\text{mm} / 33\text{m} = 0.03\text{mrad} = 3 \text{ MeV} @ 100 \text{ GeV}: 0.03\%$

エネルギー分解能, うまくいけばこのくらい出る?

Hadrons: $50\%/\sqrt{E}$ @ 10 GeV = 17%, @100 GeV = 5%

(275 GeV でも constant term が効いて 5% くらい?)

Photons: $4\%/\sqrt{E}$ @ 10 GeV = 1.3%, @100 MeV = 12%

Neutron に関しては, 位置分解能 1cm 以下であれば十分
エネルギー分解能は欲しい

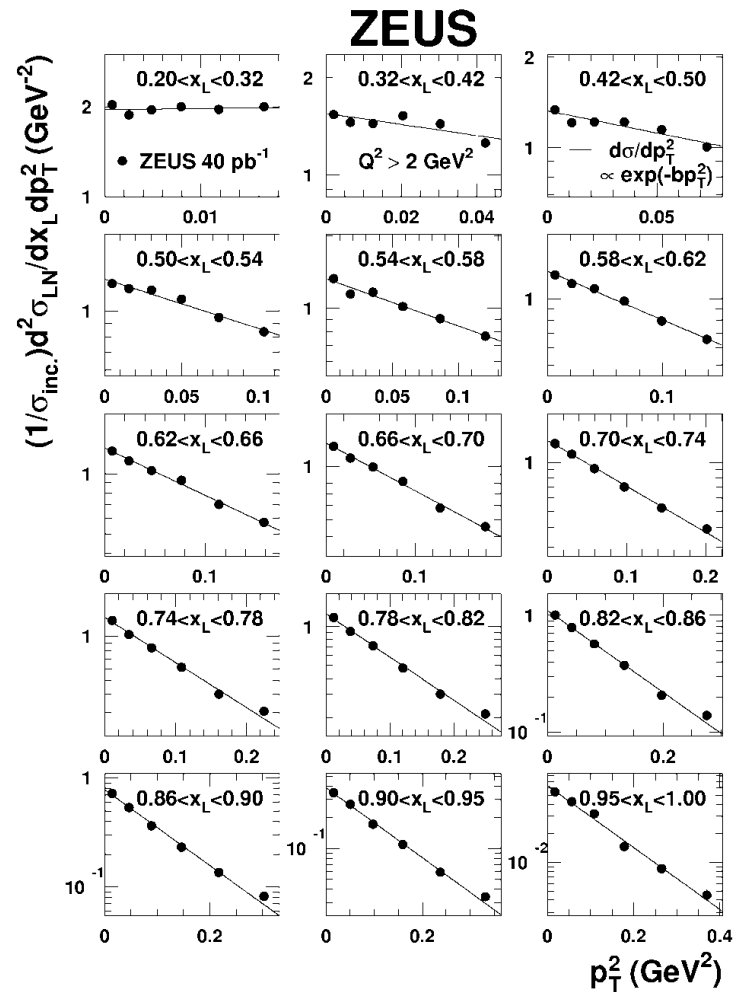
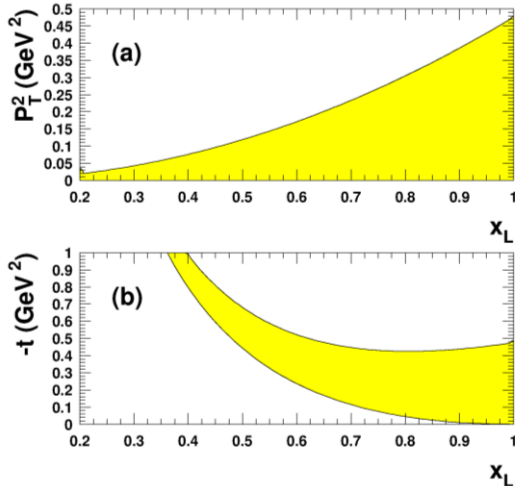
- compensation by software or hardware
- 十分大きくシャワーの漏れがないもの

π^0 だと位置分解能, エネルギー分解能ともに必要

- $4\%/\sqrt{E}$ くらいほしい? 10% でよい?
- 「ゼロ度」の位置を割り出すためにも位置検出も正確に

ZDC で測れる中性子の範囲

- eRHIC: 4mrad \times 275 GeV \sim 1 GeV
 - $|t| < 1 \text{ GeV}^2$
 - diffractive bump も測れる？
 - HI の残りを測るのは OK
- HERA: 0.5mrad = 0.5 GeV
- LHeC: 0.35 mrad = 2.5 GeV



EIC の放射線量: イベントレート

- Elke Aschenauer の昔の発表より
- $ep : 600 \text{ kHz} @ 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - "DIS" cross section $60 \mu\text{b}$ に対応
 - ちょっと小さい? LHeC $68 \mu\text{b}$ とのこと。
全断面積ではないかも (ほとんどが photoproduction = γp)
- ビーム残留ガスとの散乱 10 MHz assuming $10^{-9} \text{ mbar} = 10^{-7} \text{ Pa}$
 - 前方粒子のスペクトルは, 第一近似同じはず。つまり, ビームガス散乱で放射線量が決まる。ただ 10 MHz もあると pile-up が心配? 速い検出器必要。
 - LHeC の真空度は 10^{-8} Pa を仮定 (HERA は 10^{-6} Pa だった)
LEP の人たちによると, 今の技術ではビームパイプのコーティングでかなりよくできるらしい
 - Latifa さんの CFNS2019 workshop で HERA の残留ガスがシミュレーションできたとの報告。そのときのパラメーターは $70 \text{ kHz} @ 10^{-8} \text{ mbar}$ HERA IP (= 10^{-6} Pa) でビームカウンター (C5) 33 kHz , これはかなり正しい値
- とりあえず以下は 10 MHz で計算
 - $10^{14} \text{ events/year}$

<https://indico.bnl.gov/event/4737/contributions/24360/attachments/20396/27266/Latifa-SB.pdf>

EIC ep の放射線量

100 GeV dose / event ~ イベント当たり 1.6×10^{-8} Joule に相当

ep rate が 600 kHz @ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \rightarrow 0.01 \text{ Joule/s}$

- これを放射線量に直すには
LHCf ($\sim 1\lambda_I$) シミュレーションでは全エネルギーの約 1/3 が (シャワーの中心付近の) 1kg あたりに落ちることを用いると, 多いところで 0.003 (J/kg/s) 程度
- つまり, 1年間の ep 散乱からの放射線量は, だいたい **30kGy / year @ 10^{34}**
 - LHCf では $30 \text{ Gy}/10\text{nb}^{-1} \rightarrow 300 \text{ MGy / year @ } 10^{34}$ 5桁上
 σ_{ep} : $10^{-3}\sigma_{pp}$, energy 1/70 でだいたいあっている

ビームガス **10MHz = 16倍 \Rightarrow 500kGy / year ??**

となると, 1年の放射線量は ~ **$O(0.1 - 1\text{MGy})$ or $n_{\text{eq}} \sim O(10^{15-16})$**

- 中性子数への焼き直しは, CMS HGICAL の数を参考に
 - LHC は cavern background もあり, EIC の ZDC の位置でこの数が正しいかは不明。
- でも正しいとすると, 結構きつい...。ビームガスがこの 1/10 だと話は全く違う。

CMS HGCAL

EM, 放射線量の多いところには
Si pad 10(1cm²)

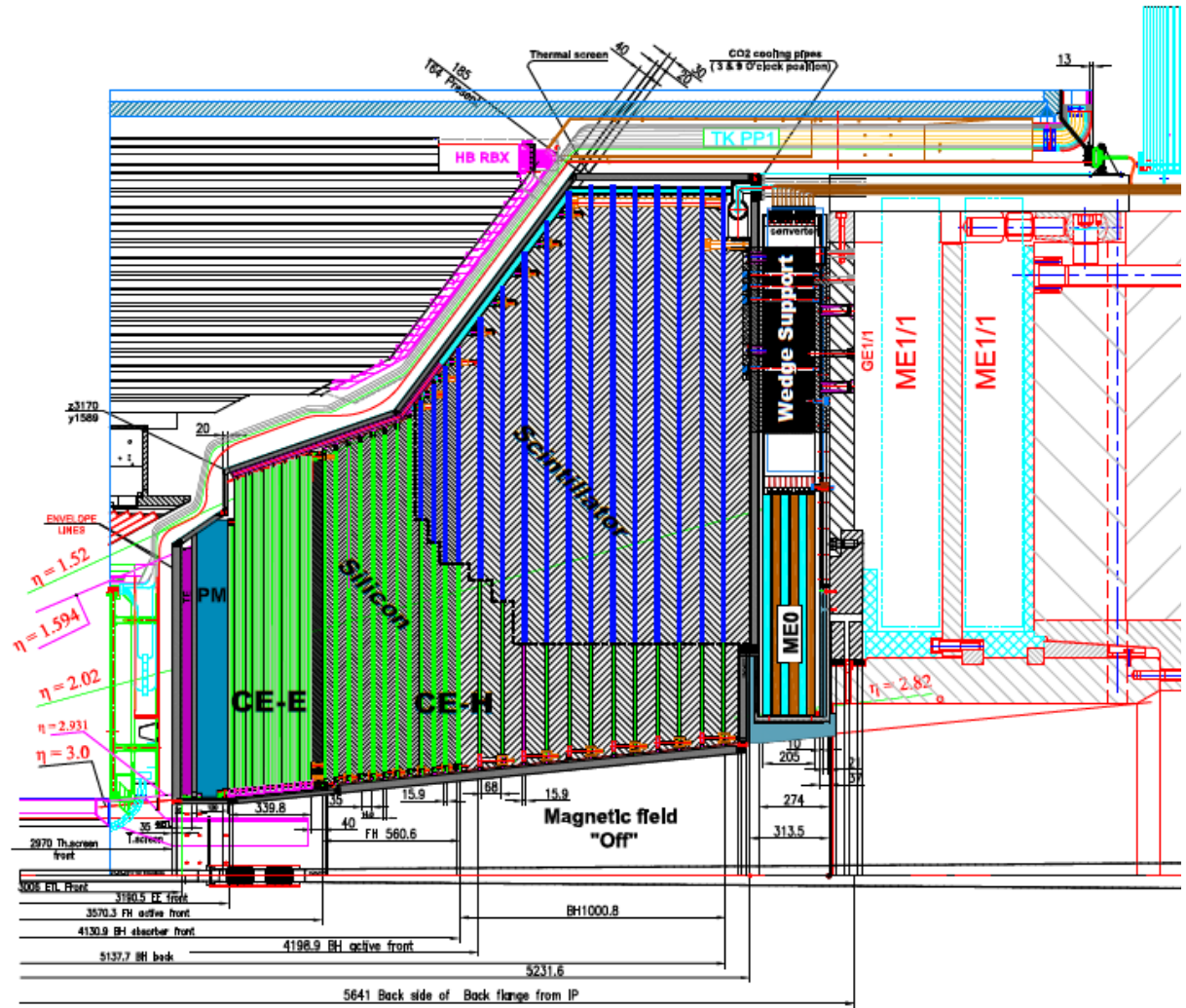
少ないところは
3cm x 3cm
シンチレーター

MPPC 読み出し
(CALICE タイプ)

Si/Sci 境界:

$$n_{eq} = 8 \times 10^{13}$$

全体を -30C° に
冷却（放射線
損傷のノイズ低減）



タワーの構造

EM 28 sampling layers

12.2 mm / layer

吸収層は

Cu, Pb, Stainless, W

などいろいろ使う

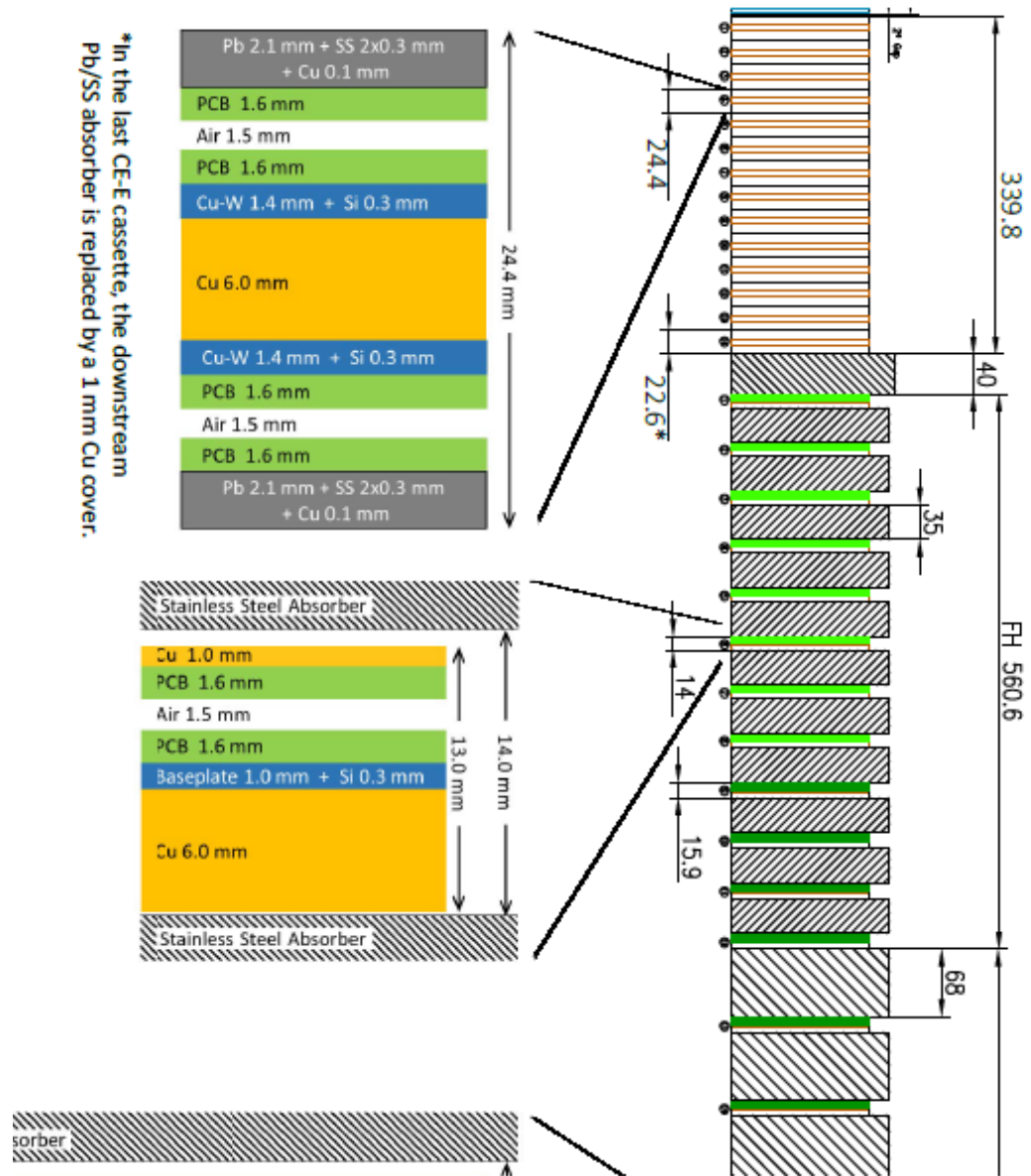
HadCal 前半 / 後半

35mm Stainless

x 12 plane

68mm x 12 plane

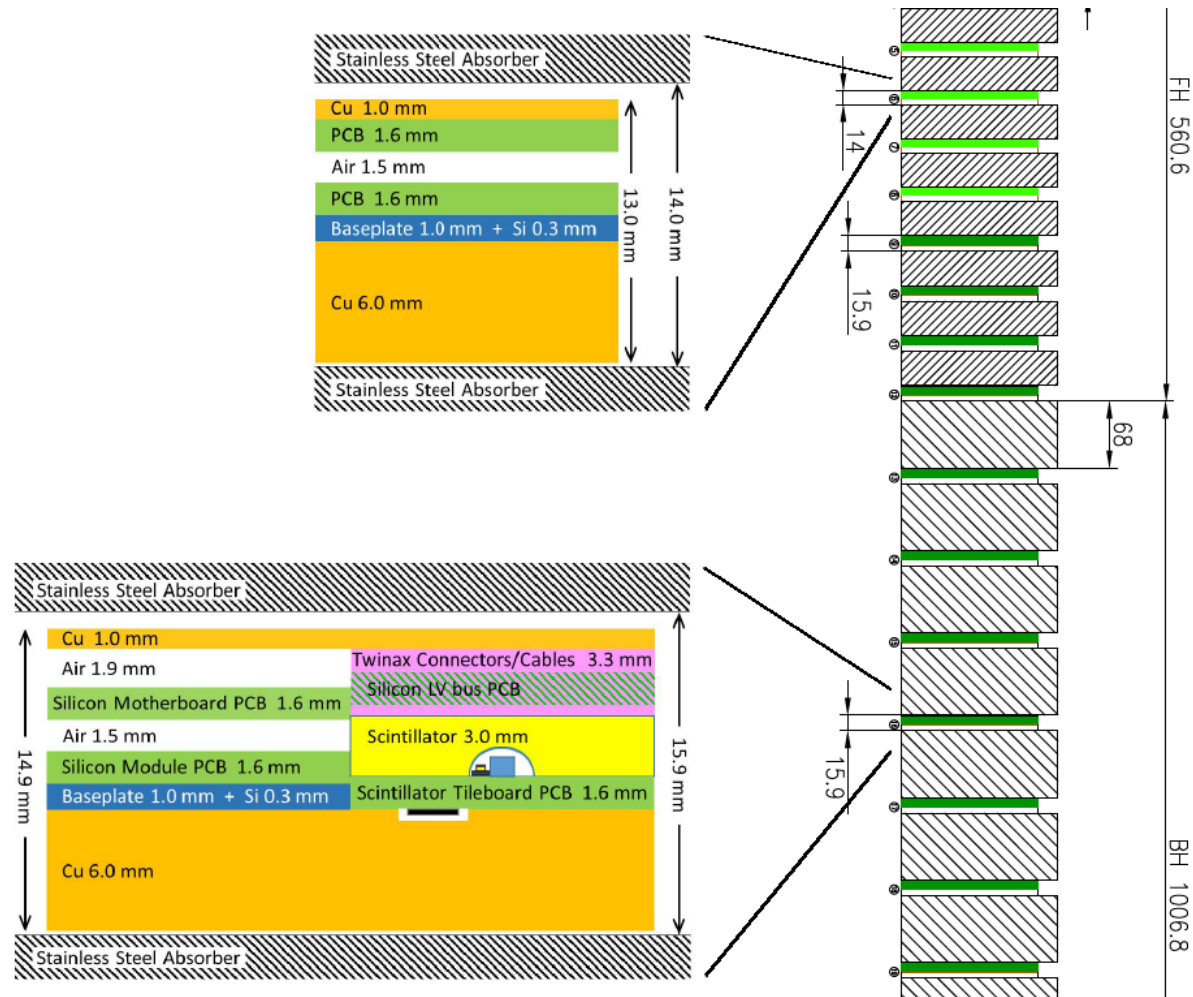
約 3cm 角



CE-E

CE-H

Hadron section の構造

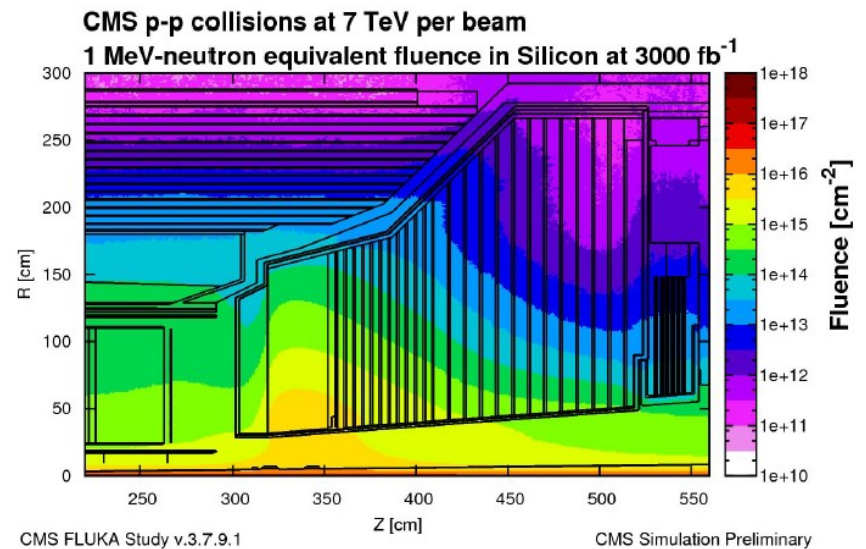
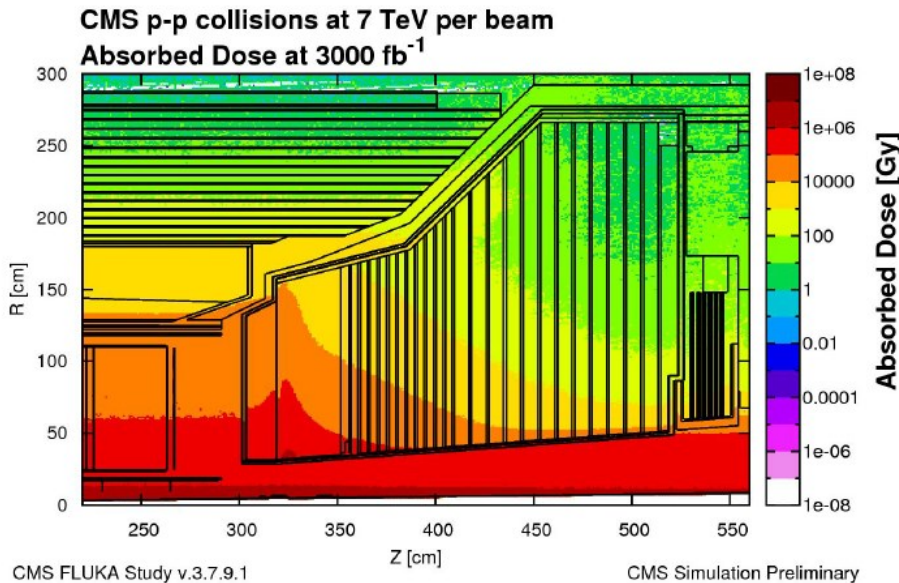


CE-H

- MPPC / sci は ILC とよく似た構造

CMS 積算放射線シミュレーションの例

- TID: わずかに $1\text{MGy} = 100\text{Mrad}$ を超えているところあり
- $n_{eq} : 10^{16}$ をかろうじて下回る



Cf. EIC central detector での同じような位置では ep collision からの n_{eq} up to $5 \times 10^9 / \text{fb}^{-1}$, standard lumi 10/fb つまり 5桁近く小さい

Si センサー

- 3種の厚さ（放射線耐性）

- 電気容量をほぼ一定にして（厚いほうがセルサイズ大きい）MIP に対する S/N の差をあまり大きくしない

Active thickness (μm)	300	200	120
Area (m^2)	245	181	72
Largest lifetime dose (Mrad)	3	20	100
Largest lifetime fluence ($n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)	0.5×10^{15}	2.5×10^{15}	7×10^{15}
Largest outer radius (cm)	≈ 180	≈ 100	≈ 70
Smallest inner radius (cm)	≈ 100	≈ 70	≈ 35
Cell size (cm^2)	1.18	1.18	0.52
Initial S/N for MIP	11	6	4.5
Smallest S/N(MIP) after 3000 fb^{-1}	4.7	2.3	2.2

- MIP で cell-by-cell calibration

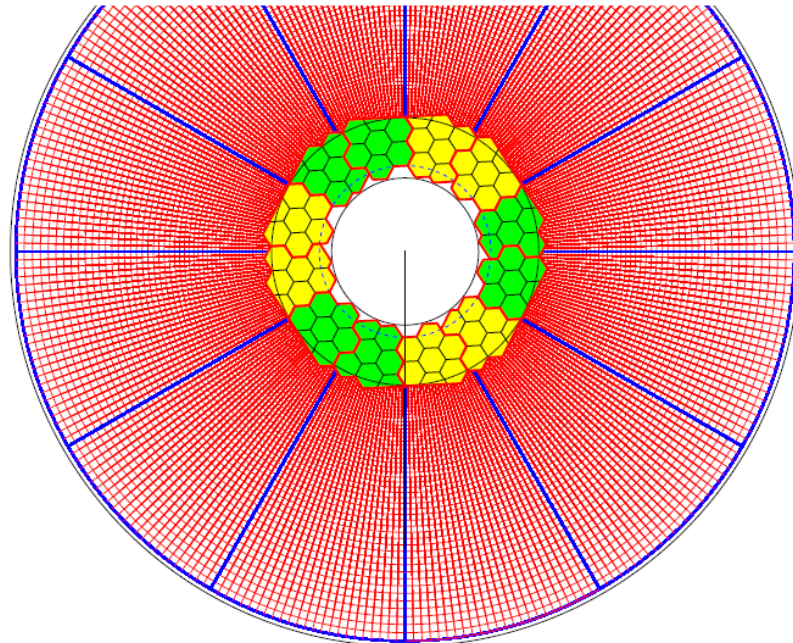
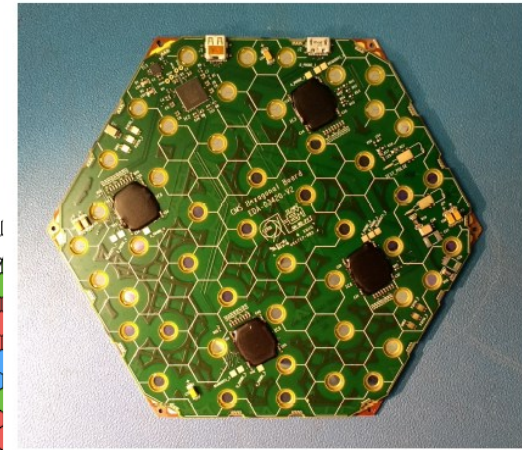
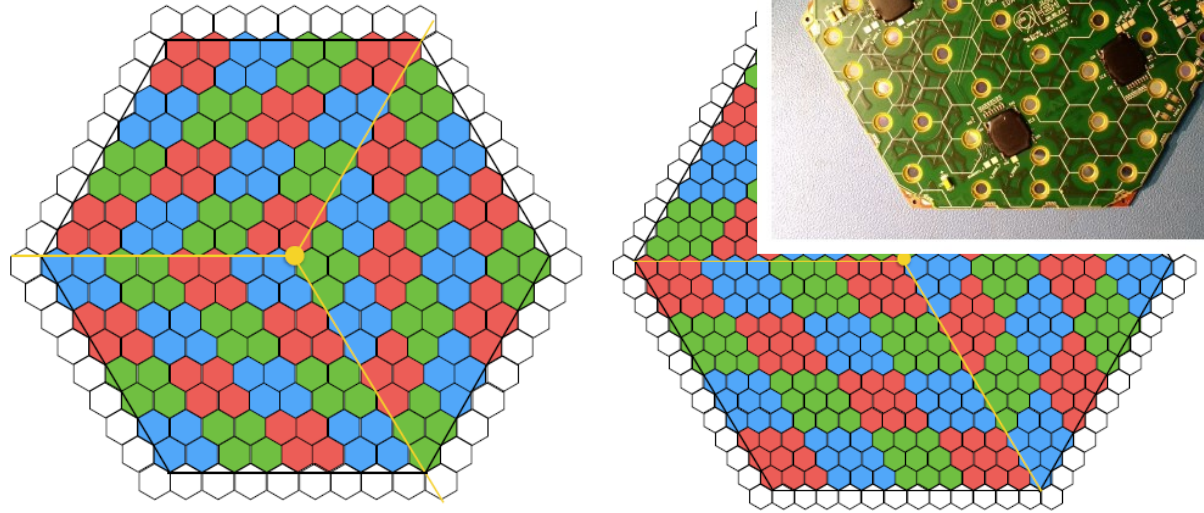
- Sci も同じ
- どんどん損傷していく上で、高エネルギーでは constant term が重要

- EIC では？

- 中性子の場合 $50\%/\sqrt{E}$ だと 100 GeV で 5%
⇒ cell-by-cell variation は < 3% に抑えたい
- EM だとさらに厳しい要求
- EIC ZDC にミュオンは飛ぶのか？

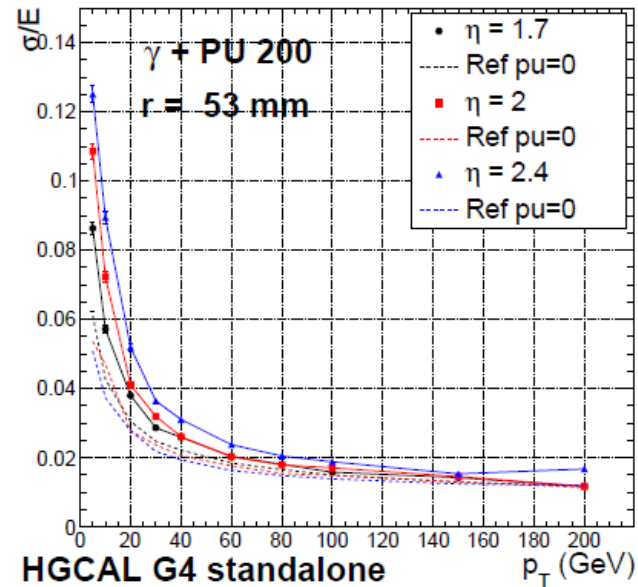
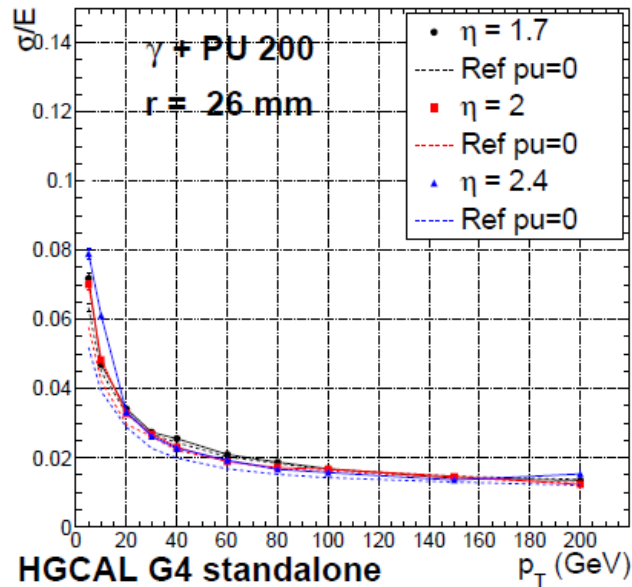
センサーの様子

- 8-inch wafer
 - All by HPK?
 - 六角形のセルの組み合わせで効率よく使う
- トリガータワー:
ダイヤモンド型
- シンチレータータイルと組み合わせの例



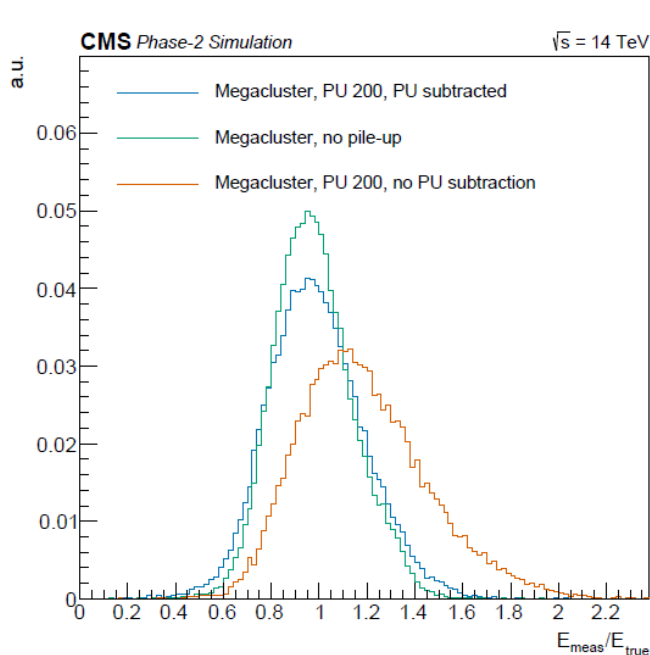
性能

- TDR には, あまり書いていない
 - Pileup rejection の性能については詳しく。
 - Resolution はあまり書いていない。tuning が間に合わなかったと思われる。しかも大したことない。
- EM resolution: pile-up なしで
 - 3% を切ると, calibration が効いてくるはず

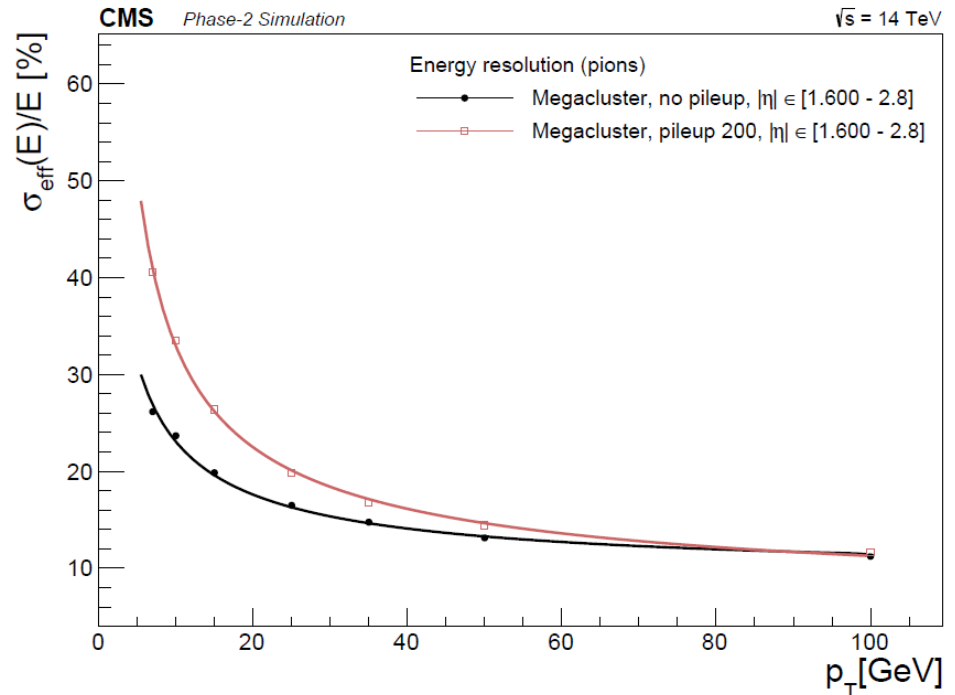


Jet energy resolution

- Single hadron のエネルギー分解能はなし
- Jet の分解能となると, jet の cone の外に出ていくエネルギーなどによる分解能の悪化も込みなので, カロリメーターの公称分解能にはなかなかならないのかも。にしても悪い。



緑はパイルアップなし
赤はパイルアップ補正なし
青は補正後



パイルアップなしで, $130\%/\sqrt{E}$ くらいか。

読んだ・考えた感想

- ビームガスバックグラウンドが 10MHz は，何にせよきつそう
 - 放射線損傷だけでなく
Pileup の心配，早い信号の必要ありなど
 - Crystal EM calorimeter は beam current が高い，あるいは初期のビーム状況がわるいときは，やはりオプションではないかも
 - 普通の plastic scintillator は，shower の外でもダメな可能性もあり
 - どこまで plastic が使える？ (e/h 断然有利)
 - 使えないところは，純粹に resolution の観点からは，Silicon, Glass scintillator, Quartz Fibre のどれがよい？
 - ビームガスの simulation (Y. Fuletova, Laifa Elouadrhiri et al.) を踏まえた study が重要か

読んだ・考えた感想 (2)

- ZDC の性能は, calibration scheme に大いによる雰囲気
 - 頻繁なモニター手法を確立する必要あり。
50%/sqrt(E) ならば, 100 GeV で 5%: constant term 5% だと意味なし
- MIP calibration できるのか？
 - 経験 (ZEUS forward calorimeter) では, もし muon がビームハローから ZDC の位置に飛んでいれば
何とかできる (5% level)
 - segmentation が
細かければ, あらゆる
粒子からの mip peak が
見えて, できるかも。
- うまくやらないと,
ほとんど放射線損傷の
ない quartz fibre などに
負けてしまう？

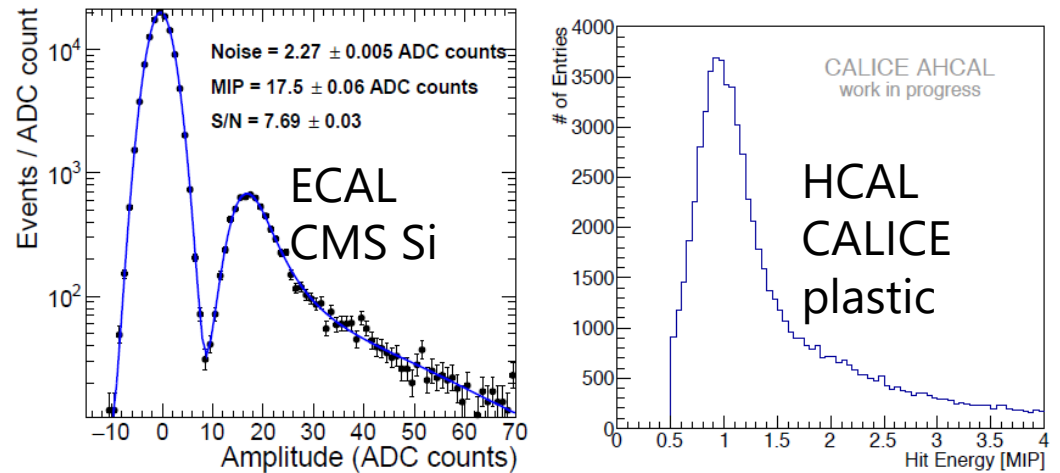


Figure 5.19: Amplitude spectrum (left), measured in ADC counts, of signals in a typical silicon cell in 2016 from incident charged pions in the CE-E section. The amplitude is fitted with a sum of a Gaussian (for the pedestal) and a convolution of a Landau distribution and a Gaussian (for the signal); and (right) spectrum of signals, measured in MIPs, seen in the 864 cells of the AHCAL in 2017, due to single charged particles in hadron showers, following a simple tracking and preliminary calibration.

読んだ・考えた感想 (3)

- Tracker のない ILC シリコンカロリメーターの素の性能が知りたい
 - Dense な energy deposit に $1/(e/h)$ をかける, 的な処方の効果
 - ILD (US) と CALICE (Scintillator option) の比較
- ep collision の全断面積?
 - つまり photoproduction cross section
- トリガーはどうか?
 - Latency 何 μs ? Level-1 に間に合う? そもそもいる?
- ほとんどの study はシミュレーションで可能

Yellow report ちょい見

おまけ

Detector Matrix など

- <https://physdiv.jlab.org/DetectorMatrix/>
- 全体的にはいい感じだが,
Backward Hadcal はあるが barrel はない?
 - $\sqrt{s} = 140$ GeV では EM cal だけでも hadronic final state の reconstruction ある程度は可能かも
 - でも charged current, 特に CC トリガーにはきついのでは
 - L0 missing Et trigger が必要, カロリメーターでないと演算できない
 - Beam-gas background との区別難しい
- Endcap muon ない
 - J/ψ tagging? Jet flavour?

Yellow report working group の状況（ごく一部）

- Yellow report の outline:
http://www.eicug.org/web/sites/default/files/YRs_Outline_v6_draft.pdf
- Forward + IR グループはかなり active
 - Radiation の細かい estimation は collision からのみ
 - DAQ: channel 数など集めている（後藤さんの発表等）
- NC/CC event reconstruction について
 - <https://indico.bnl.gov/event/8389/> (Inclusive Reaction Group 会合1回のみ。Barak さんもメンバー)
 - Truth + ちょっと (smearing 等)
Geant4 を用いた study はこれから