

高エネルギーから (私見+皆さんとお話ししたこと)

神戸大 山崎祐司

高エネルギーの現状

- HL-LHC: 2036 (8)? まで。長い。
 - 並行する R&D, production phase のプロジェクトが必要
- Belle-II あと10年以内
- J-Parc は大忙し
- Future e^+e^- collider: 2035 年ごろ? もっとあと?
 - ILC, CEPC, FCC ee
- 日本では HK など neutrino が順調
- LHeC ?

- 検出器はシリコンが中心に
 - Pixel, strip, pad, SiPM (MPPC) ...
- DAQ, computing の進歩は依然目覚ましい
 - SoC, Ultra-scale FPGA, 5G, 高放射線耐性, 機械学習...

EIC の興味

- 前方中性子 (外川, 川出, 山崎)
 - Diffraction, one-pion exchange etc.
 - おまけ: eA で前方でない中性子も測れると, 宇宙線ミュオンが地下で生成する中性子の量に制限がかけられるかも (つまり, FLUKA の改善)
 - おまけ2: quasi-elastic が測れると, ニュートリノの人もうれしい?
- *ed* 散乱と isospin 情報 @ high-x SFs (長野, 山崎...)
 - LHC にインパクトあり
- Charged current (長野)
 - $\sin \theta_W$ も面白そう
- F_L と low-x, mid-x 物理 (清水)
- 偏極 SFs (東城...)

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)

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

4mrad = 12cm

Beam ~ 100 GeV

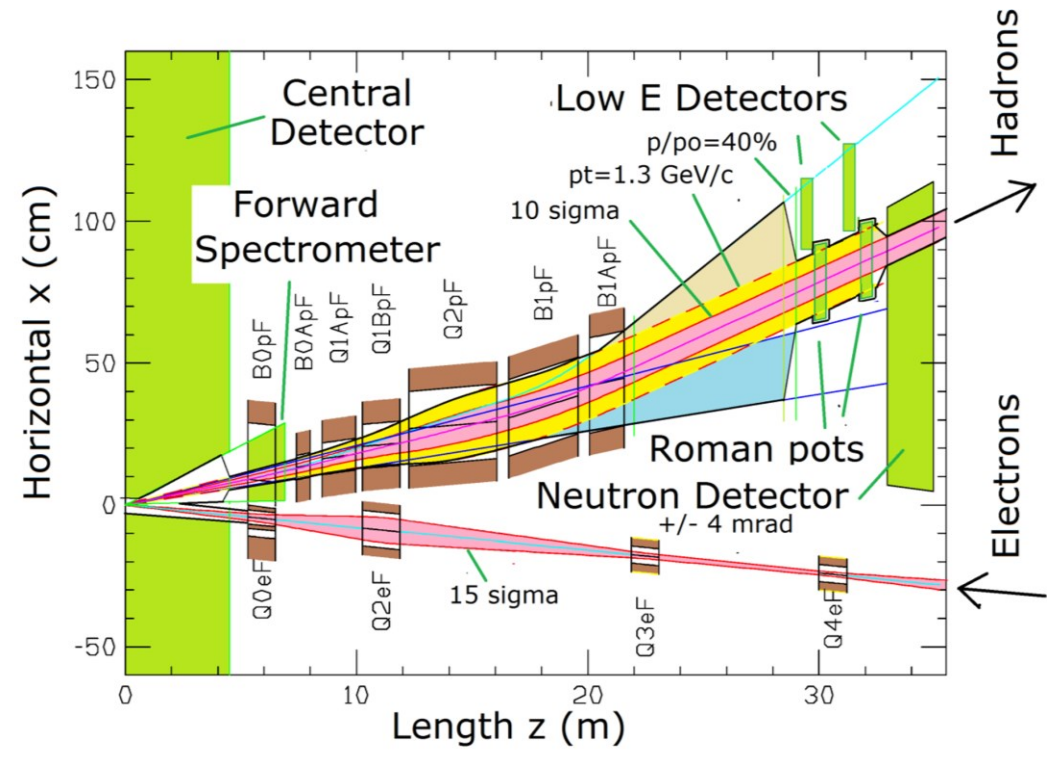
最大は？

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%

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

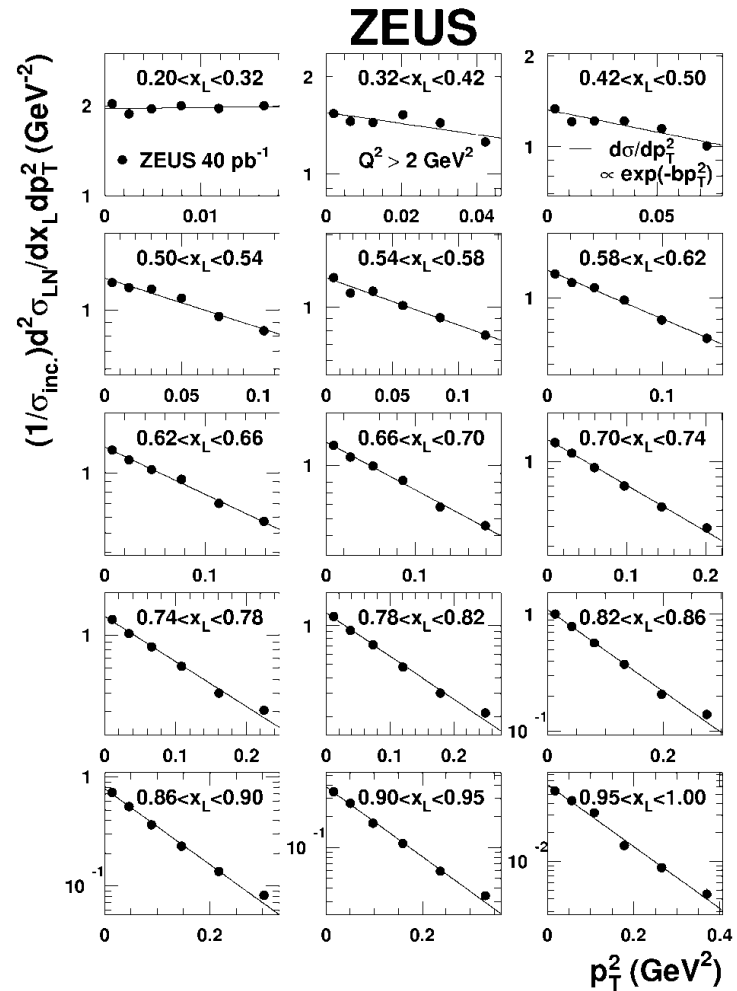
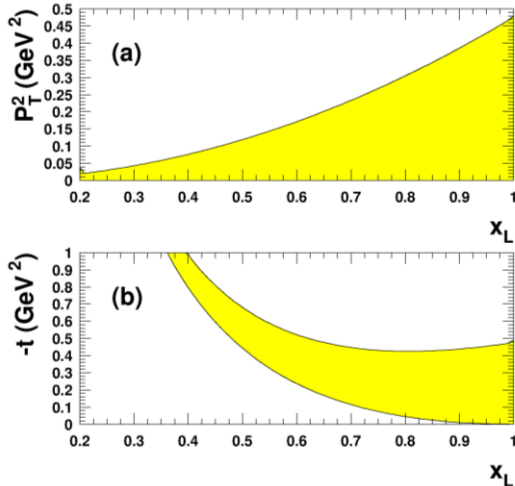
- compensation by software or hardware
- 十分大きくシャワーの漏れがないもの

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?
- 「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: $4\text{mrad} \times 100\text{ GeV} = 400\text{ MeV}$
 - $|t| < 0.2\text{ GeV}^2$
 - Soft な領域は測れるが, diffractive bump は難しい?
 - HI の残りを測るのは OK
- HERA: $0.5\text{mrad} = 0.5\text{ GeV}$
- LHeC: $0.35\text{ mrad} = 2.5\text{ GeV}$



EIC の放射線量: イベントレート

- Elke Aschenauer's 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 10MHz 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 10MHz 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 $70\text{kHz} @ 10^{-9} \text{ mbar}$ HERA IP でビームカウンター (C5) 70kHz , これはかなり正しい値
- とりあえず以下は 10MHz 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 $30 \text{ Gy}/10\text{nb}^{-1} \rightarrow 300 \text{ MGy} / \text{year} @ 10^{34}$ 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 $n_{\text{eq}} \sim O(10^{15})$**

- 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。
- eA の電流, ルミノシティーはどのくらい?

CMS HGCAL

EM, 放射線量の多いところには
Si pad 10(1cm²)

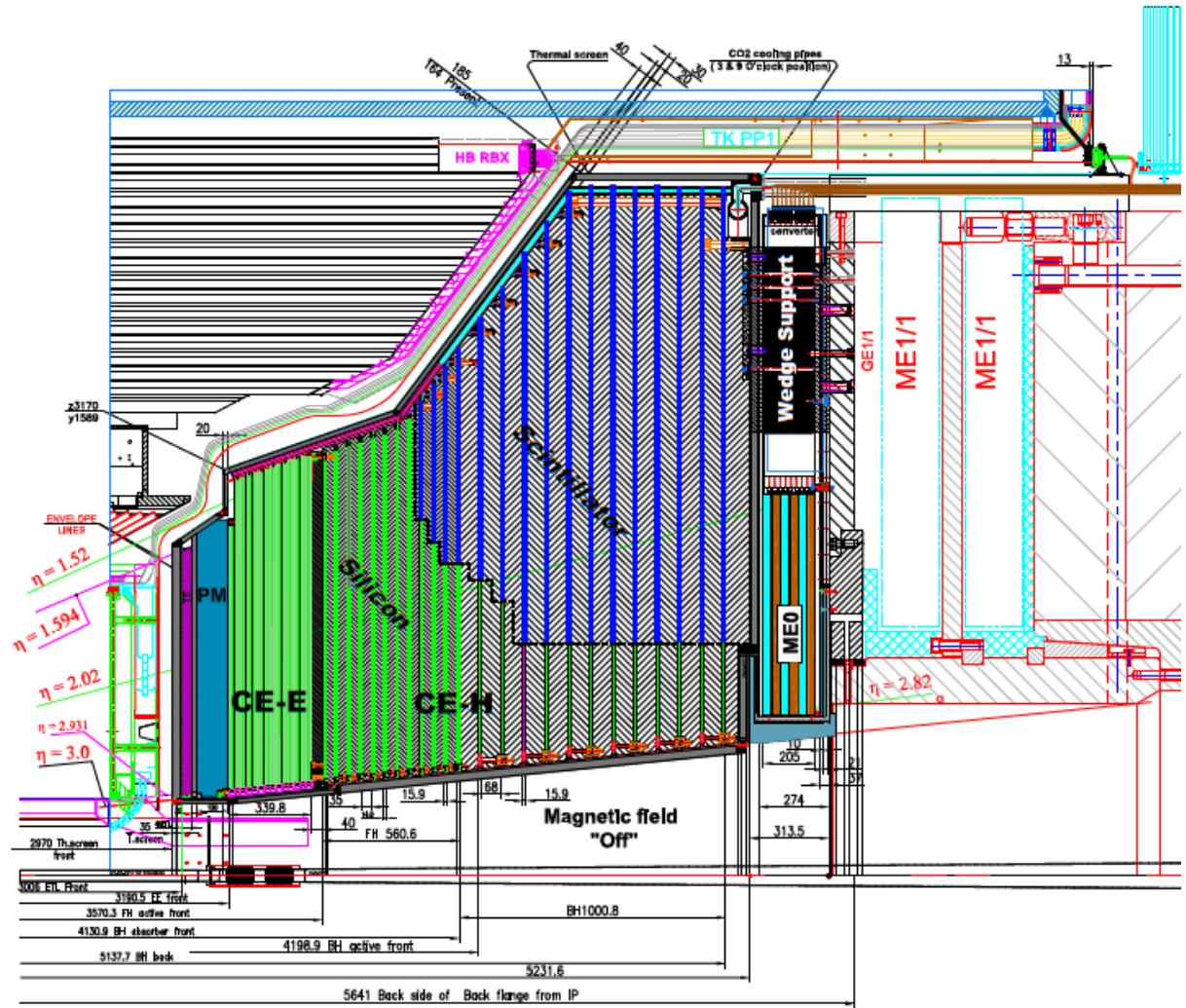
少ないところは
3cm x 3cm
シンチレーター

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

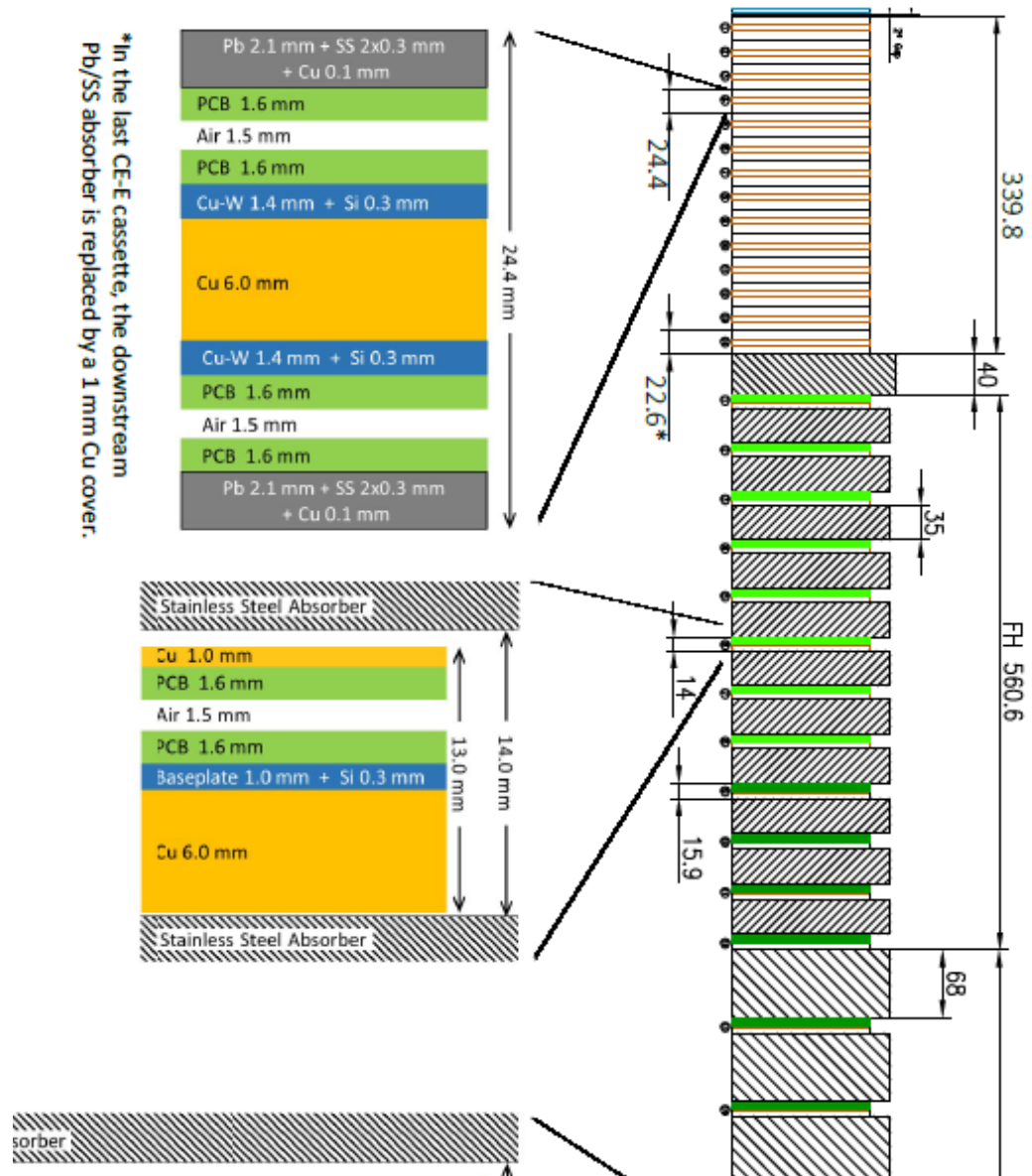
HadCal 前半 / 後半

35mm Stainless

x 12 plane

68mm x 12 plane

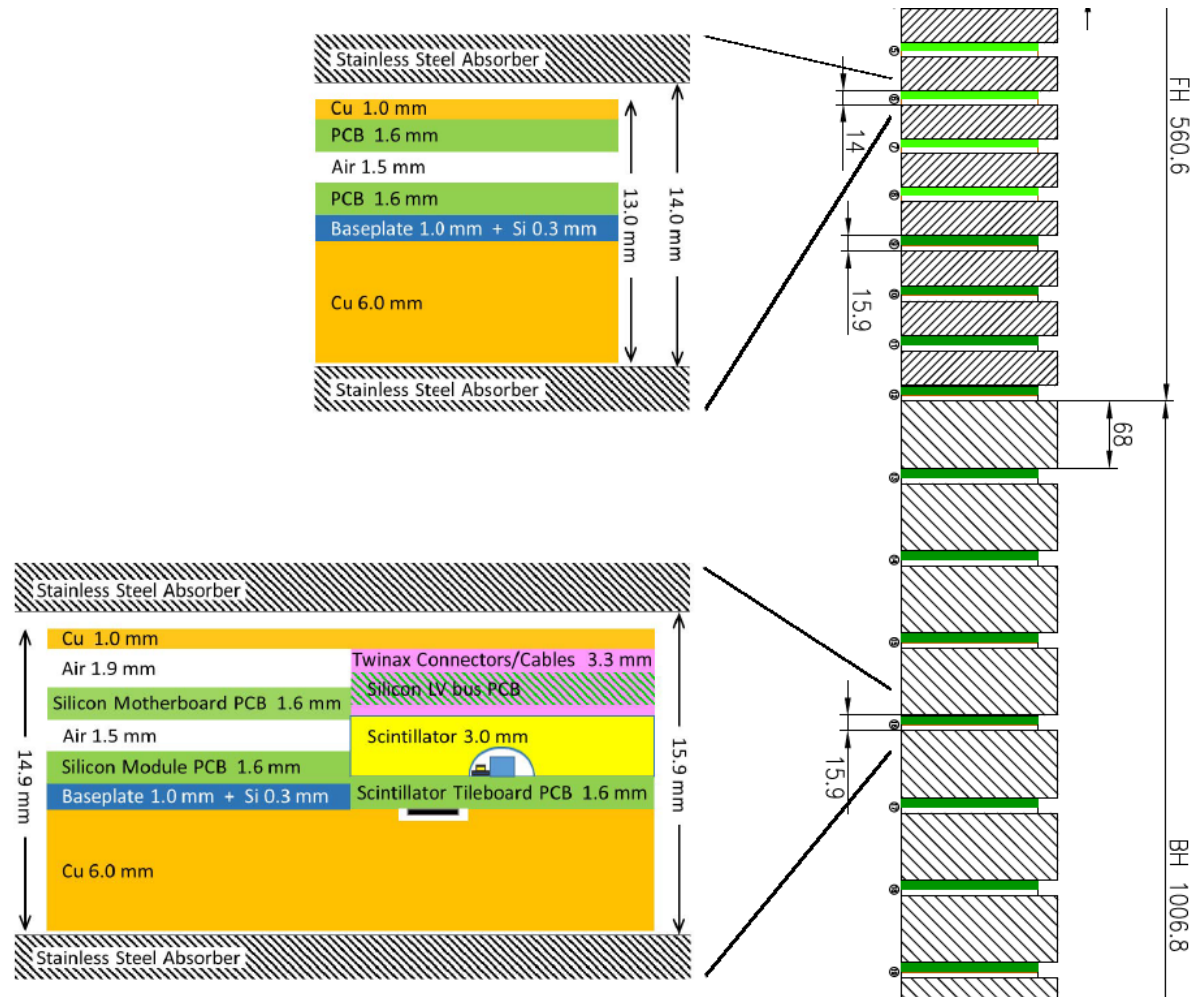
約 3cm 角



CE-E

CE-H

Hadron section の構造

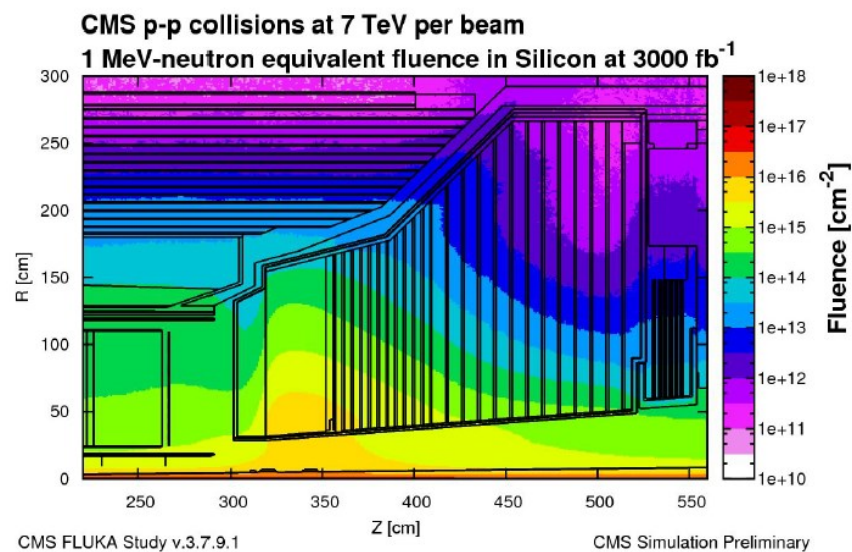
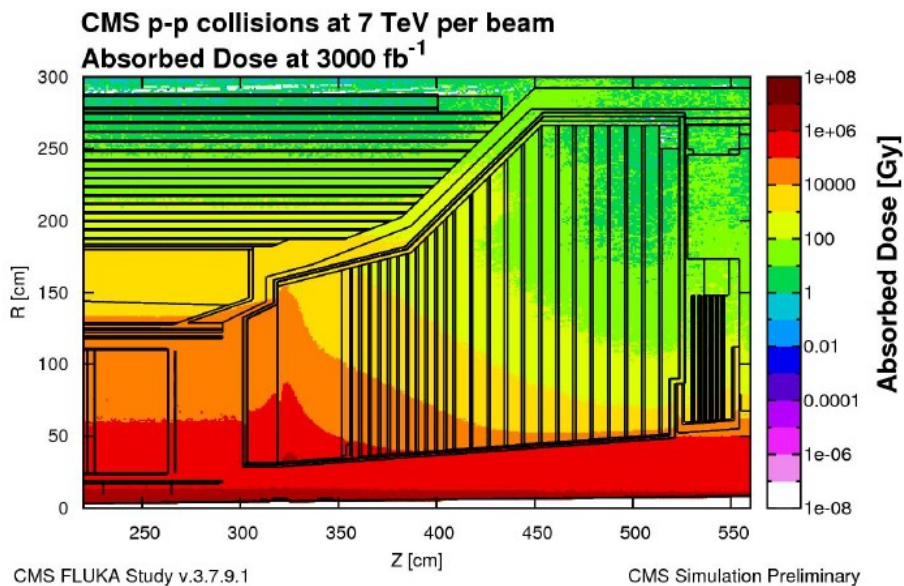


CE-H

- 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



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

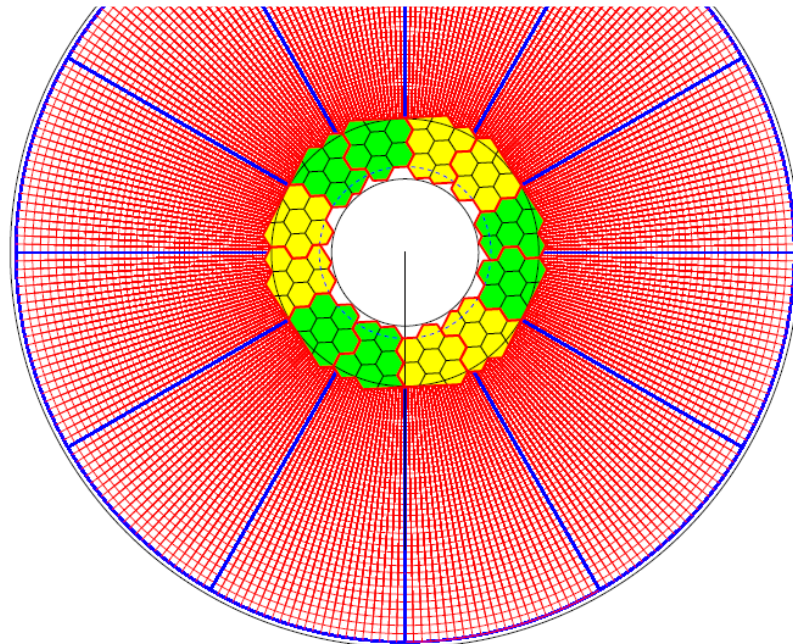
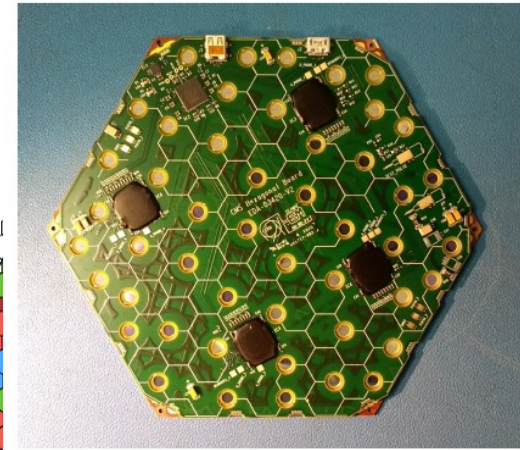
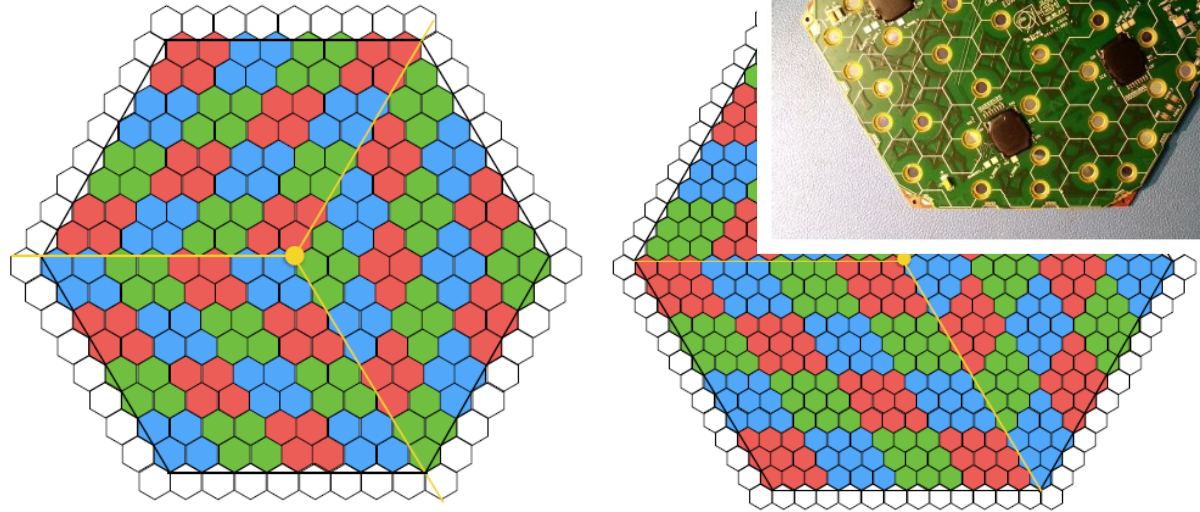
- Sci も同じ
- どんどん損傷していく上で、高エネルギーでは constant term が重要

- 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 にミュオンやシャワーを起こさない π^\pm は飛ぶのか？

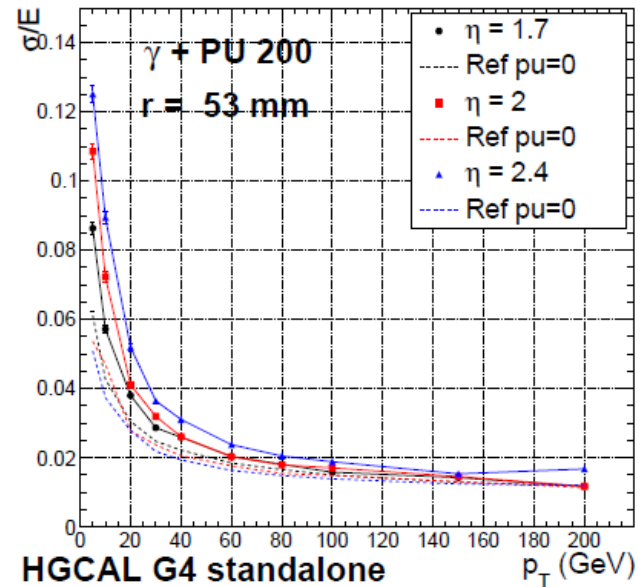
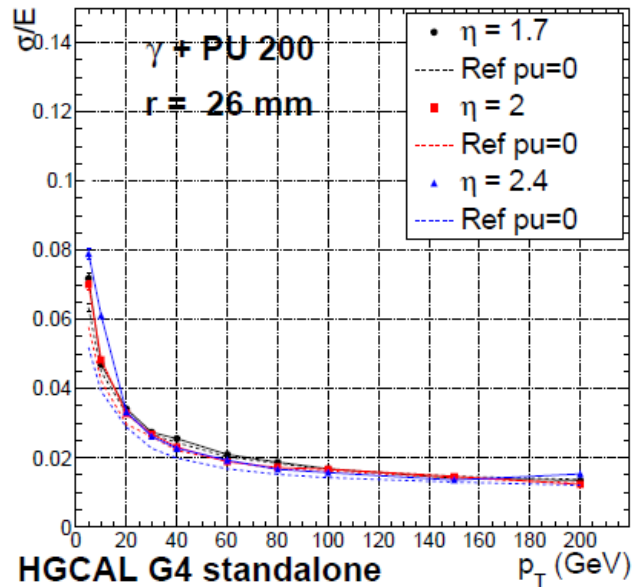
センサーの様子

- 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



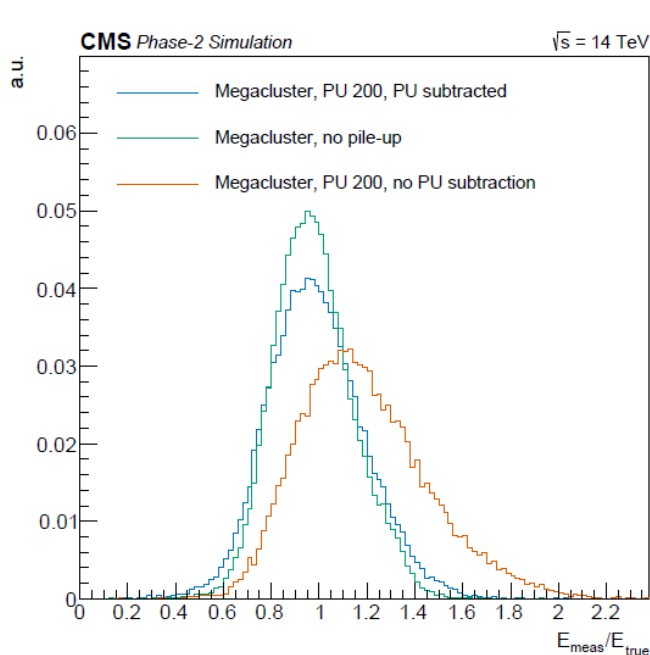
性能

- 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

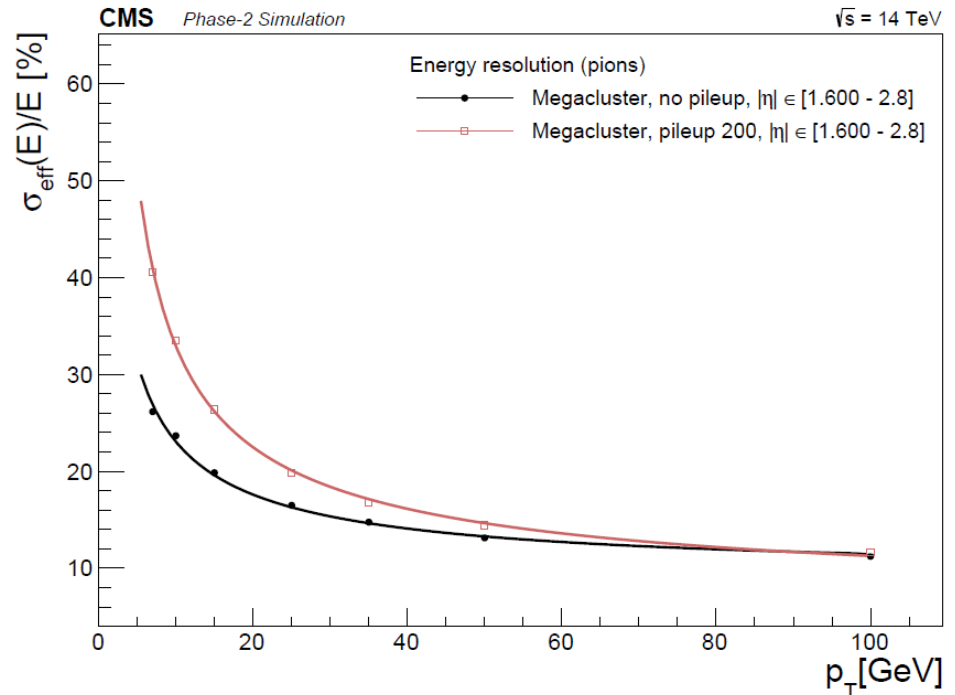


Jet energy resolution

- 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
- 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。
MIP calibration できるのか？ 私の経験 (ZEUS forward calorimeter) ではかなり難しいが， segmentation が細かければできるかも。
 - 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？

読んだ・考えた感想 (2)

- 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?
- ほとんどの study はシミュレーションで可能