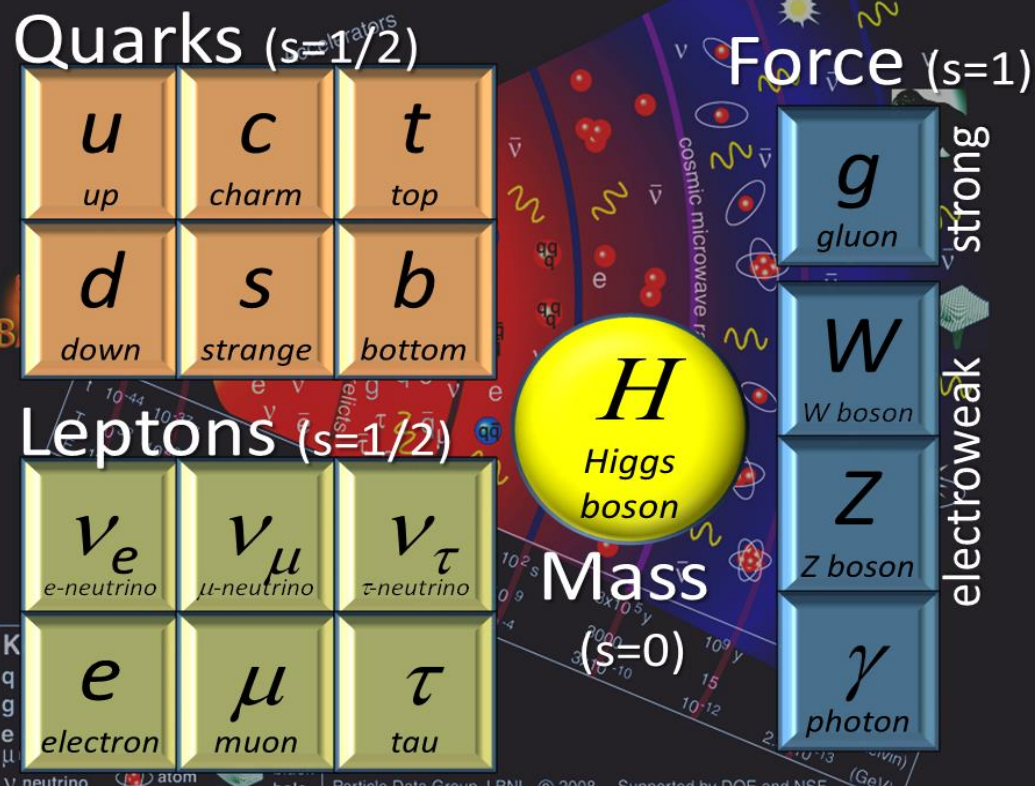


素粒子実験での飛跡検出 —シリコン半導体検出器—

素粒子実験 原

素粒子実験

自然を構成する最も基本的な物、
それらの間に働く力を実験的に理解する



標準模型粒子(すべて実験的に観測)

力の統一の歴史

1864: Maxwell



1919~1937: 陽子・中間子

強い力

電気力

磁気力

電磁気力



1983

陽子崩壊?
XYボゾン?

電弱力

弱い力

1687: Newton



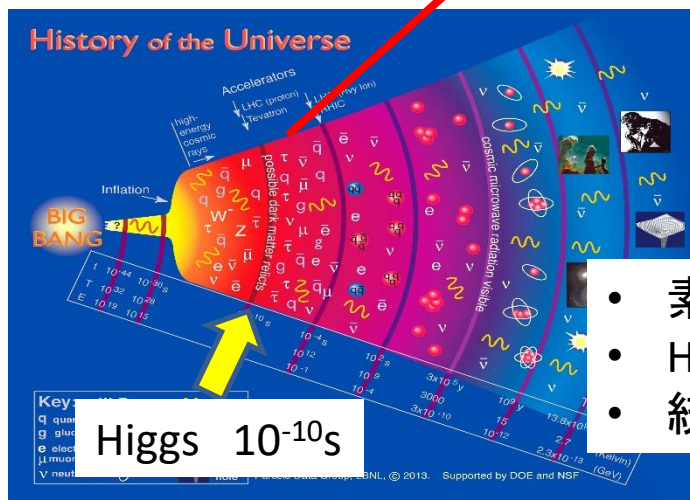
1911~1934: β 崩壊・フェルミ理論

地上の重力

重力=万有引力

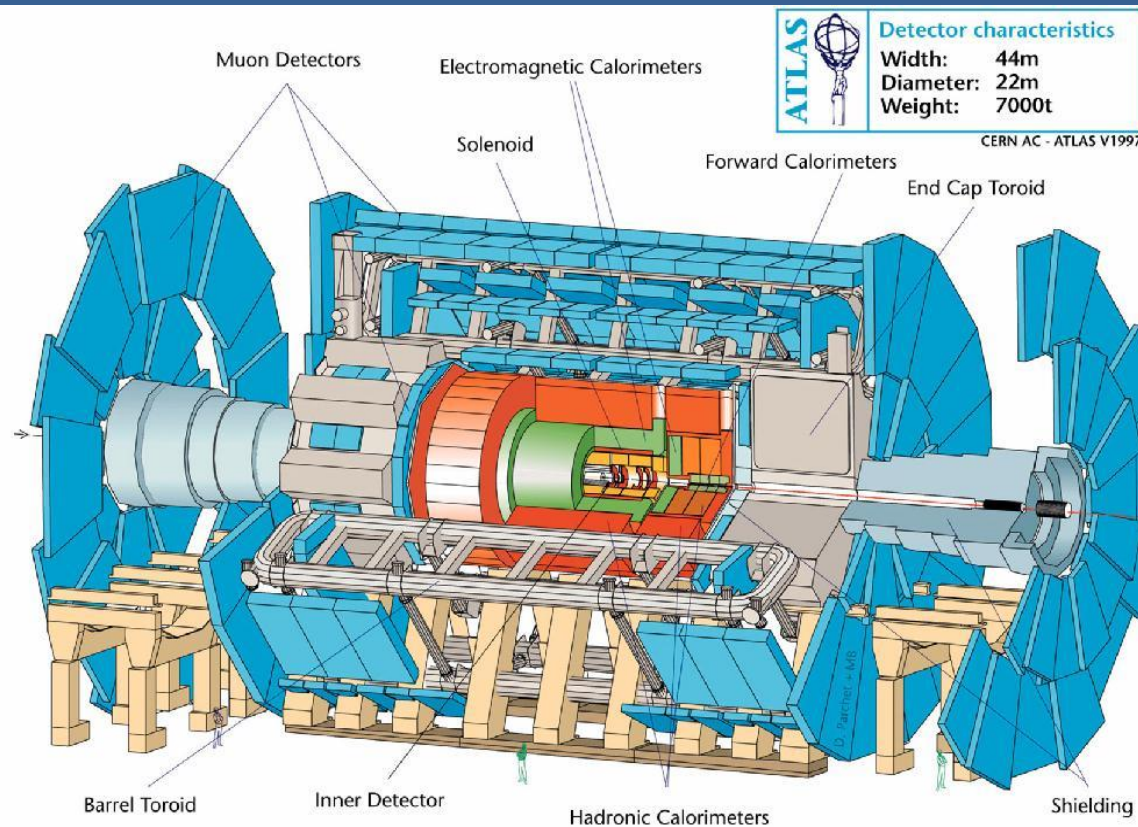
天体間の引力

統一場理論
超弦理論?
重力子?



- 素粒子実験で宇宙の誕生へ迫る
- Higgsは、「真空」への答え
- 統一場には、「次元」の説明が要

LHC - ATLAS実験



反応に使えるエネルギー

$$\sqrt{s} = 2E \rightarrow 14\text{TeV}$$



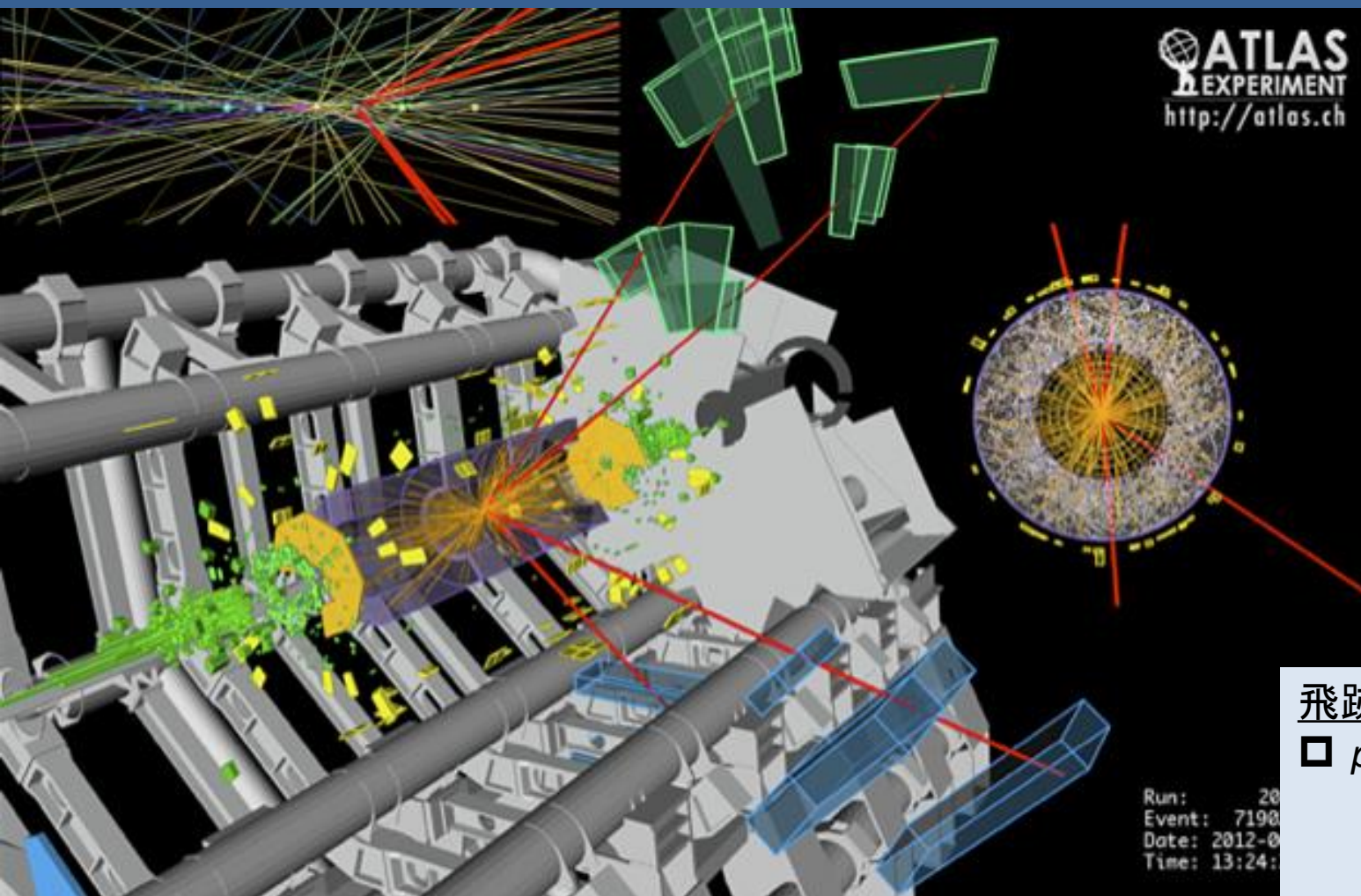
$$\sqrt{s} = \sqrt{2mE} \rightarrow 0.17\text{TeV}$$

1GeV \uparrow

ATLAS検出器(衝突点を4π囲む複数の検出器群)

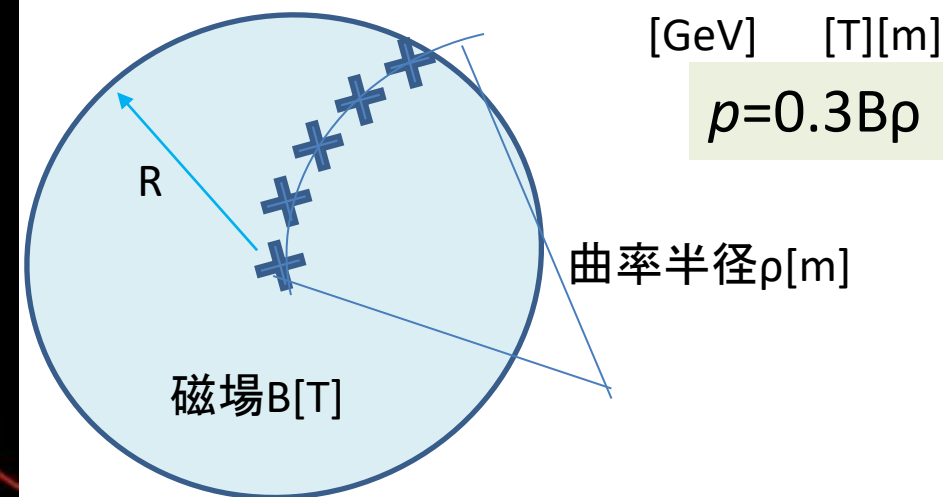
- 内部飛跡検出器(荷電粒子の運動量測定)
- 電磁カロリメータ(e, γ のエネルギー測定)
- ハドロンカロリメータ(p, π, n 等のエネルギー測定)
- μ 粒子検出器(μ 粒子の運動量測定)

飛跡検出と運動量測定



高い運動量をもつ4つの粒子が発した例 (ATLAS Event Display)
 カロリメータを突き抜ける4つの μ 粒子と考えられる
 右側は内部飛跡検出器(半径1m)の拡大図

運動量は磁場中の荷電粒子の曲率から



飛跡検出器への要求

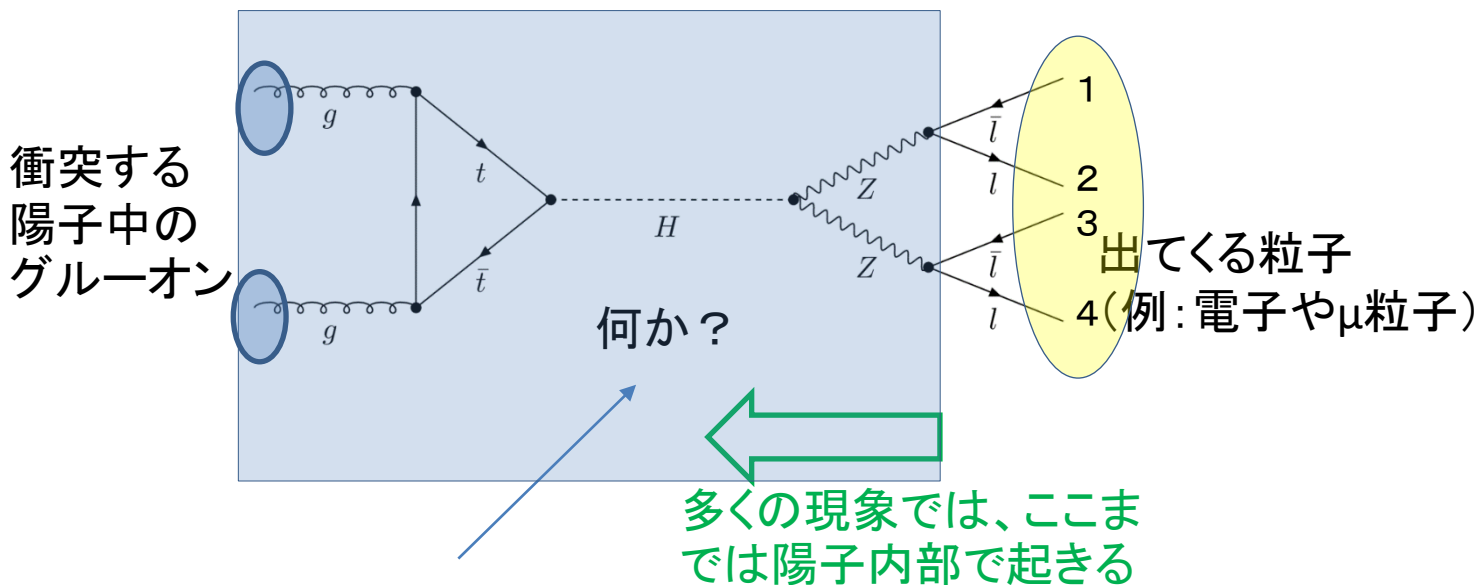
- p を精度よく計測
 - 強い磁場 (B=2T)
 - 大きな磁場領域 (R \sim 1m)
 - 良い位置精度 (O(15 μ m) \sim)
 - 速い応答性能 (25nsが区別できる)
 - 高い放射線耐性
 - 信頼性、コスト、、、
- ビーム衝突間隔

ATLASの場合

飛跡検出と運動量測定

素粒子検出でやっていること:

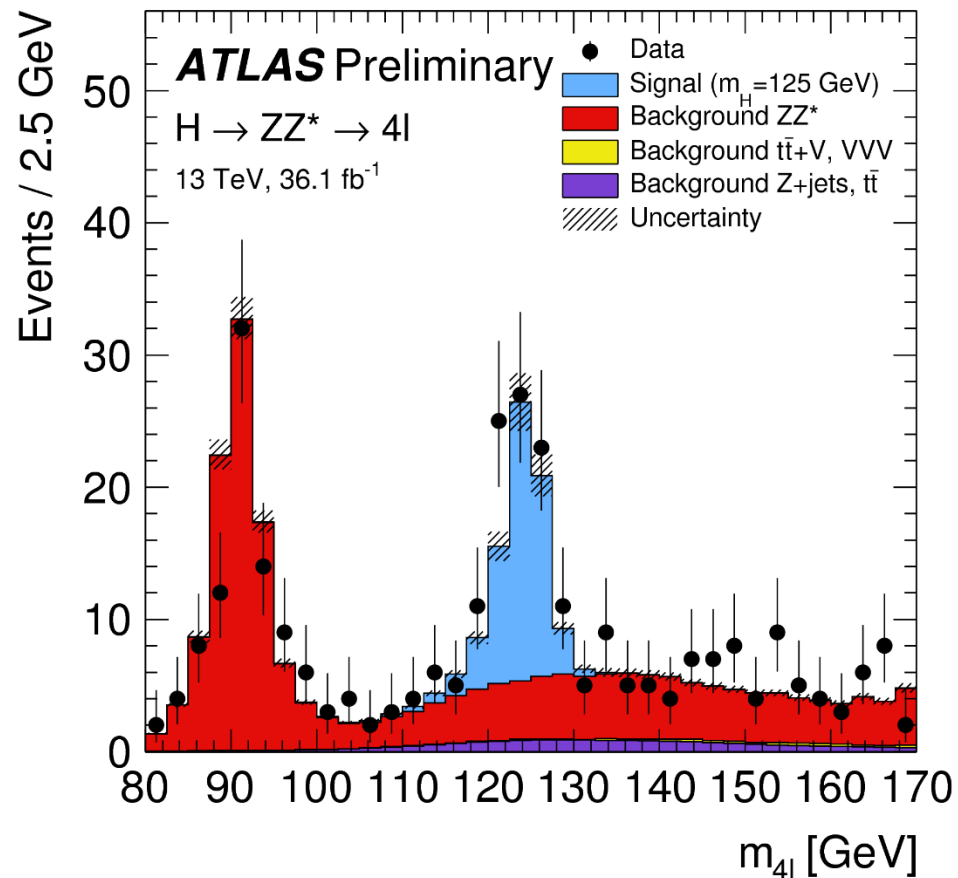
出てくる粒子の運動量、エネルギー(+種類)を測定して、何が発生したかを調べる



$$M_x = \sqrt{E_x^2 - p_x^2}$$

$$= \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3 + E_4)^2 - (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)^2}$$

「xから発生する粒子のエネルギーと運動量を測定するとxの質量がわかる」




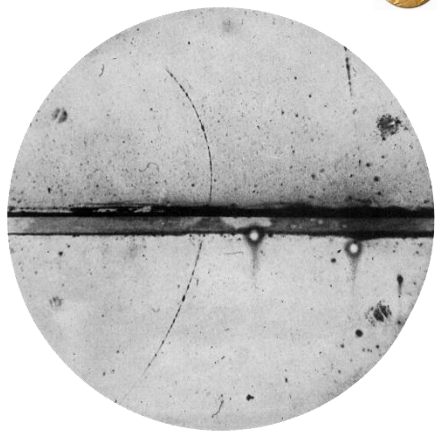
4つのレプトンの不変質量分布→Higgsの発見

多くの粒子では質量が軽いので $E = \sqrt{m^2 + p^2} \sim p$ (運動量が分かればOK)

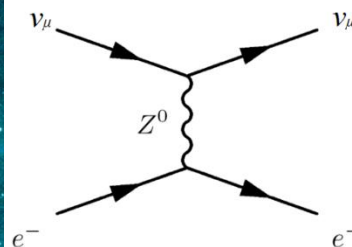
+種類

素粒子実験用飛跡検出器あれこれ(1)

1911 霧箱(Wilson) 




1952 泡箱(Glaser) 



Spark chamber (Geiger/Muller+)





1932 Anderson - positron 

1972 Gargamelle-neutral current

1947 Rochester & Butler-strange quark

写真撮影 

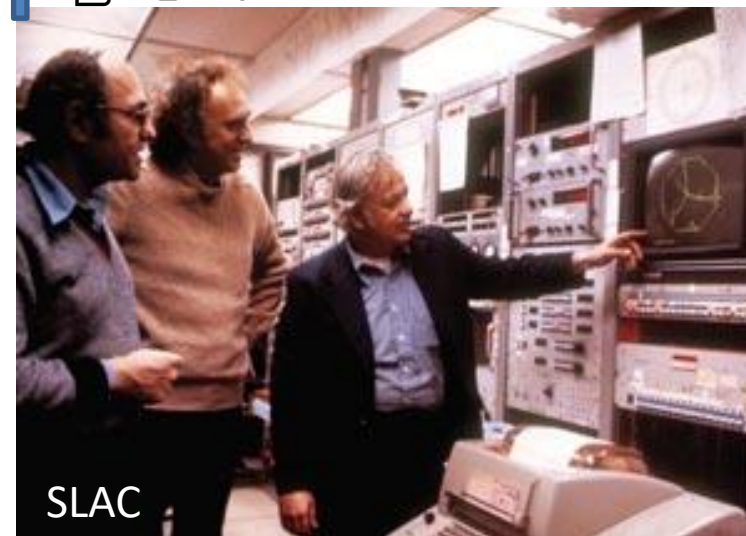
 電子検出器

1974 J/ψ 

Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	<i>e</i> electron	μ muon	τ tau

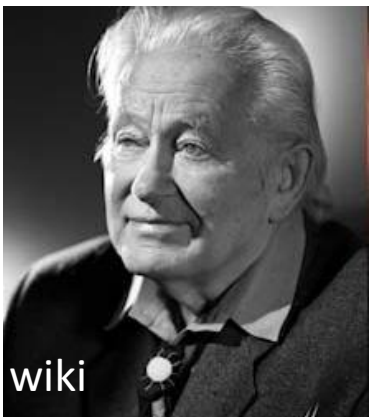
1928 Dirac eq.
⇒反粒子

1964 Quark model
Gell-Mann, Zweig

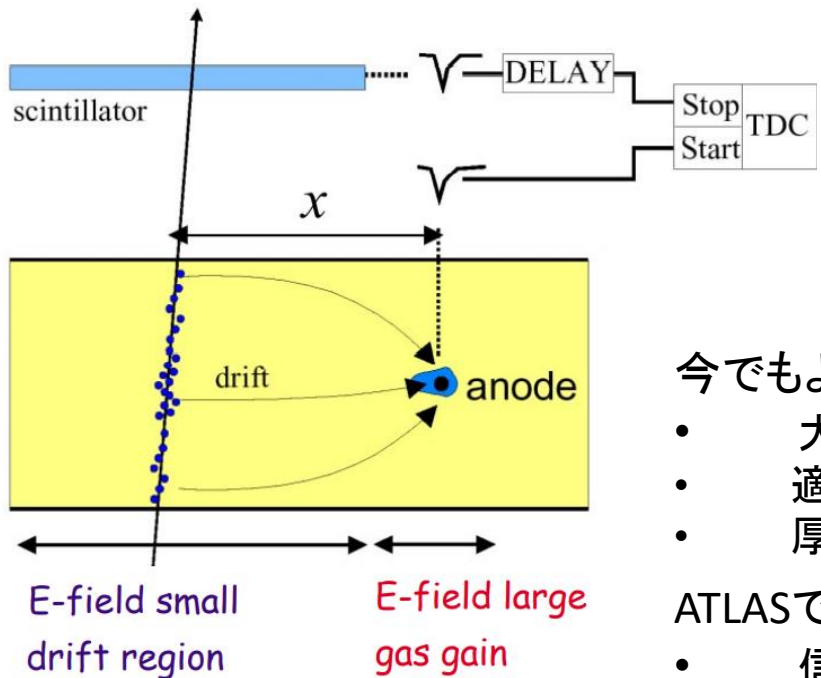
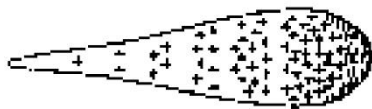


素粒子実験用飛跡検出器あれこれ(2)

1968 Wire chamber (Sharpak) 



陽極ワイヤ近傍の高電場で電子なだれ (GM管と同じ)




電子のドリフト
~5cm/ μ s

時間測定により通過位置を測定 (drift wire chamber)
~200 μ m程度の位置精度

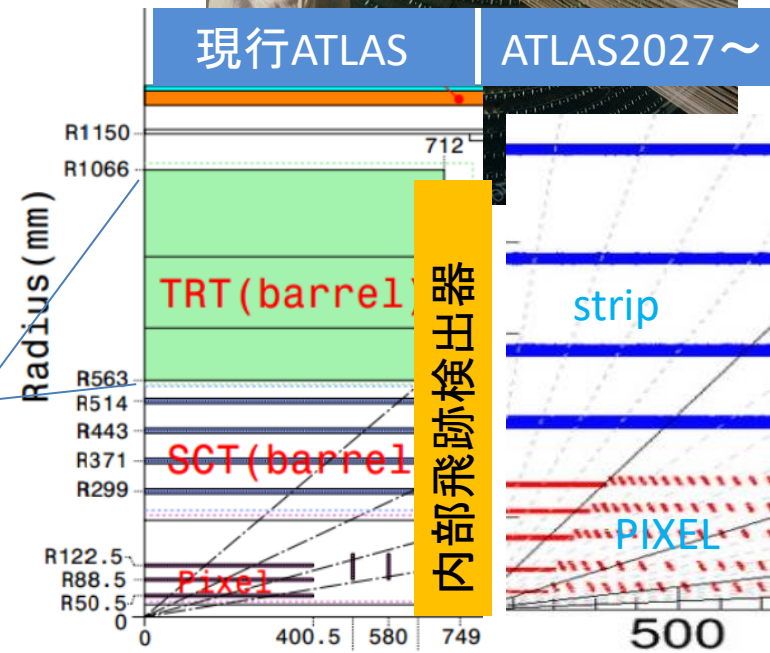
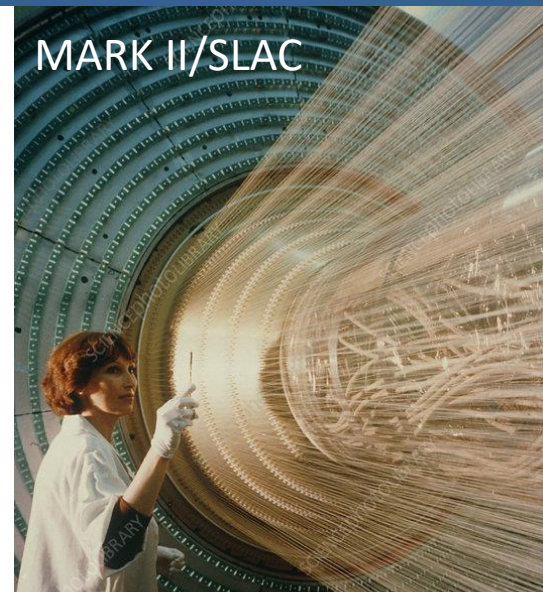
今でもよく使われる

- 大型化に有利(=安い)
- 適度の位置精度
- 厚さ/層~1cm

ATLASでの問題点

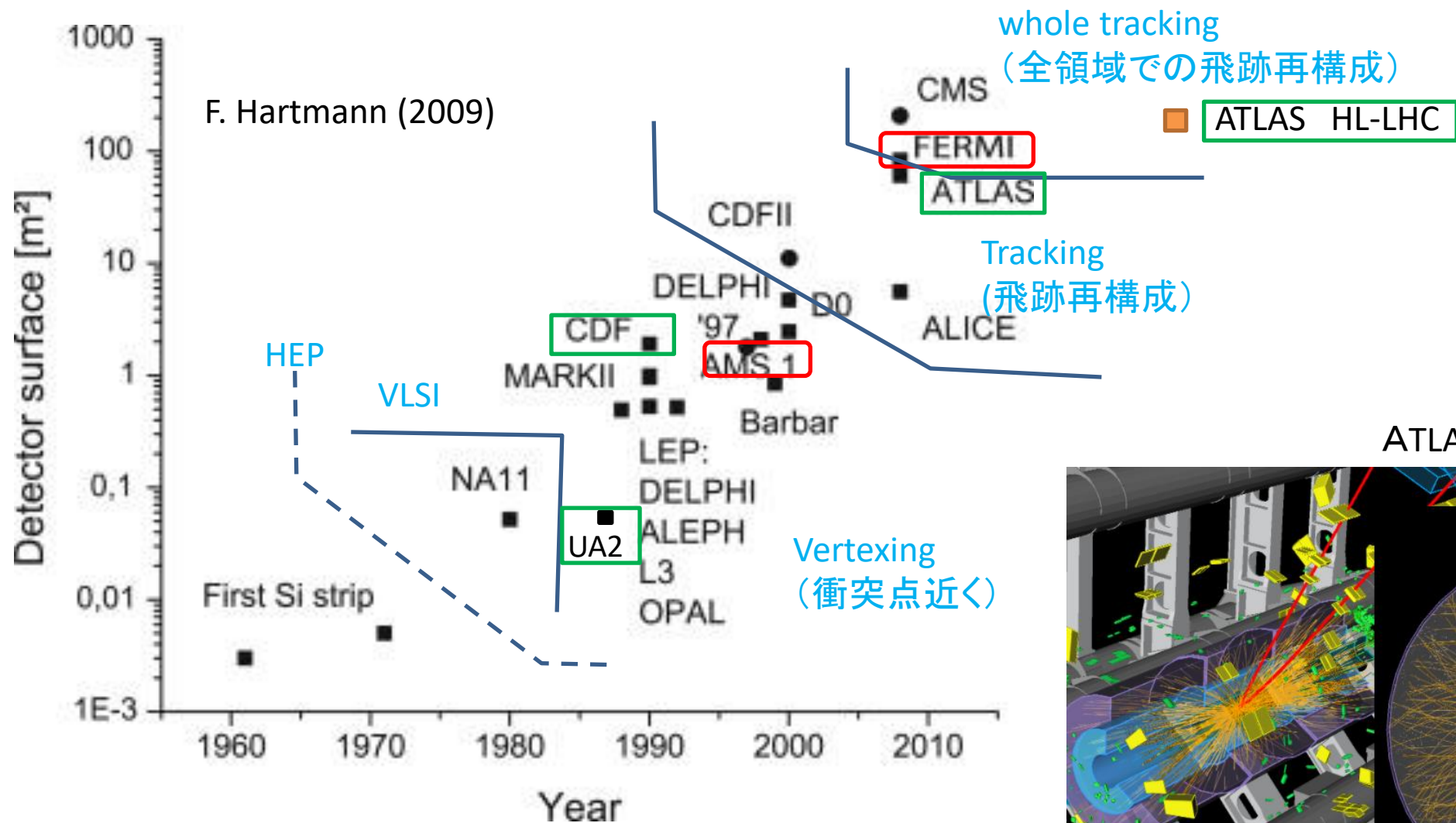
- 信号収集が遅い
- 位置精度は層数で稼ぐ  厚み

次期ATLAS内部飛跡検出器は
すべてが半導体検出器へ

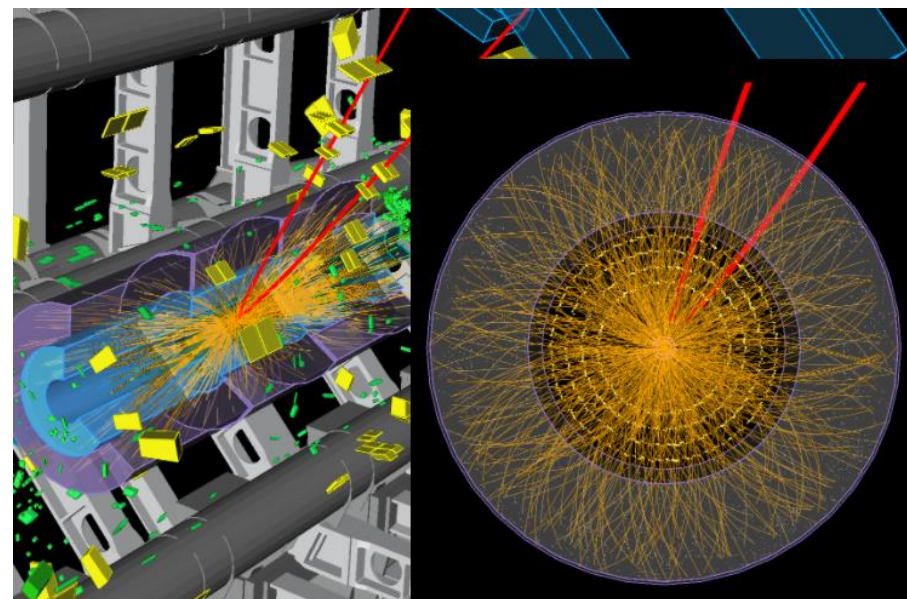


シリコン検出器の総面積の変遷

衛星



ATLASの例

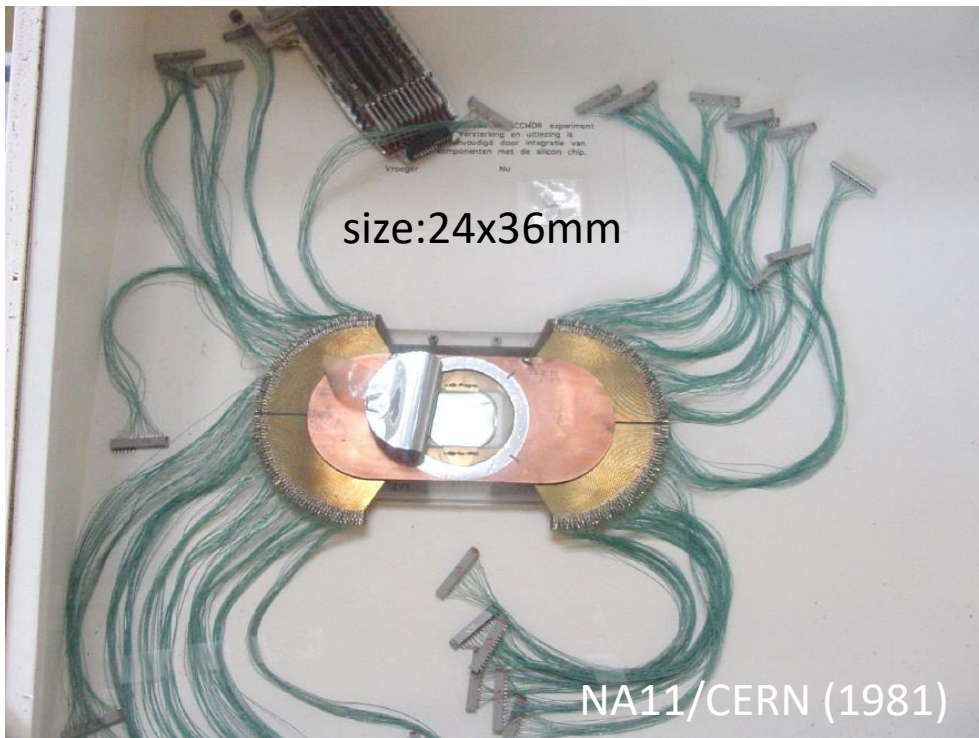


最初のトランジスタ 1947 (Shockley, Bardeen, Brattain)
 Ge(Si) diodes は 50sにエネルギー測定に使われた

follows a la Moore's law

NA11 (CERN) 実験 (pre VLSI)

1981 最初に実験に使われたSi 検出器



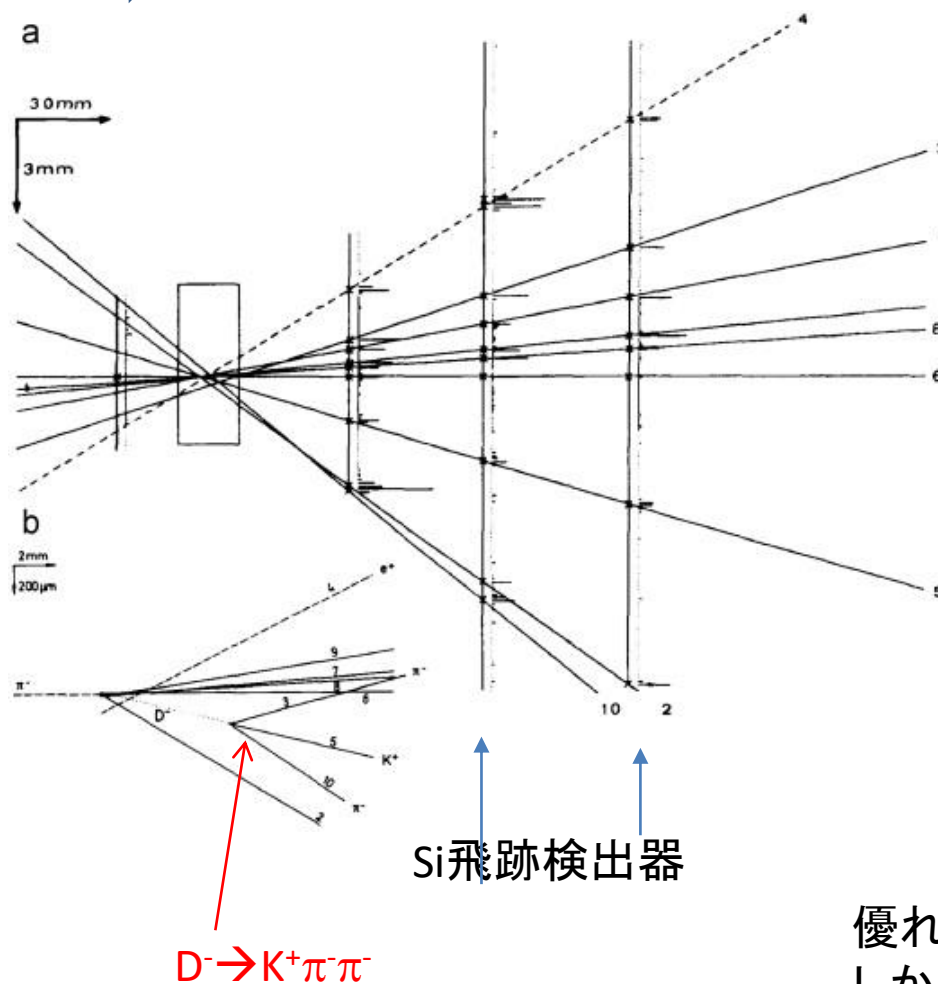
- 実験の目的: チャームを含む中間子(D)の崩壊時間の測定(崩壊長 $c\tau \sim 30 \mu\text{m}$)
 \Rightarrow 位置分解能の要求: $10 \mu\text{m}$

1200 strips, $20 \mu\text{m}$ pitch
 $100 \mu\text{m}$ read-out pitch
 \Rightarrow Resolution of $4.5 \mu\text{m}$



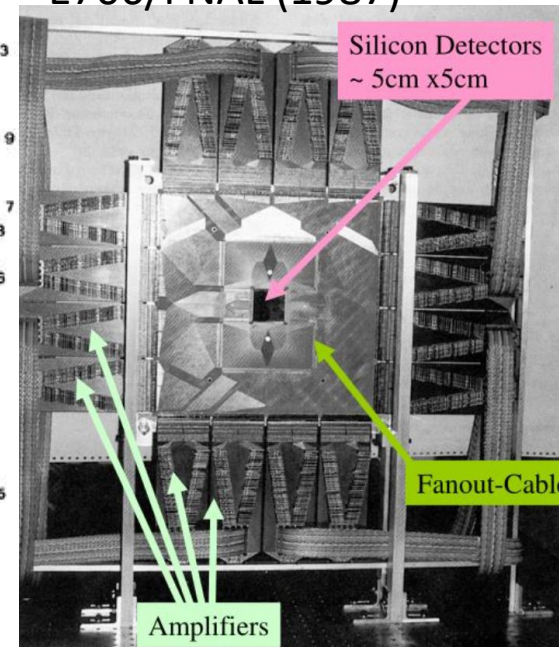
Dメソンの観測

Nucl. Instr. and Meth., 217 (1983), p. 22



相対論効果で $\sim 10\text{mm}$

E706/FNAL (1987)

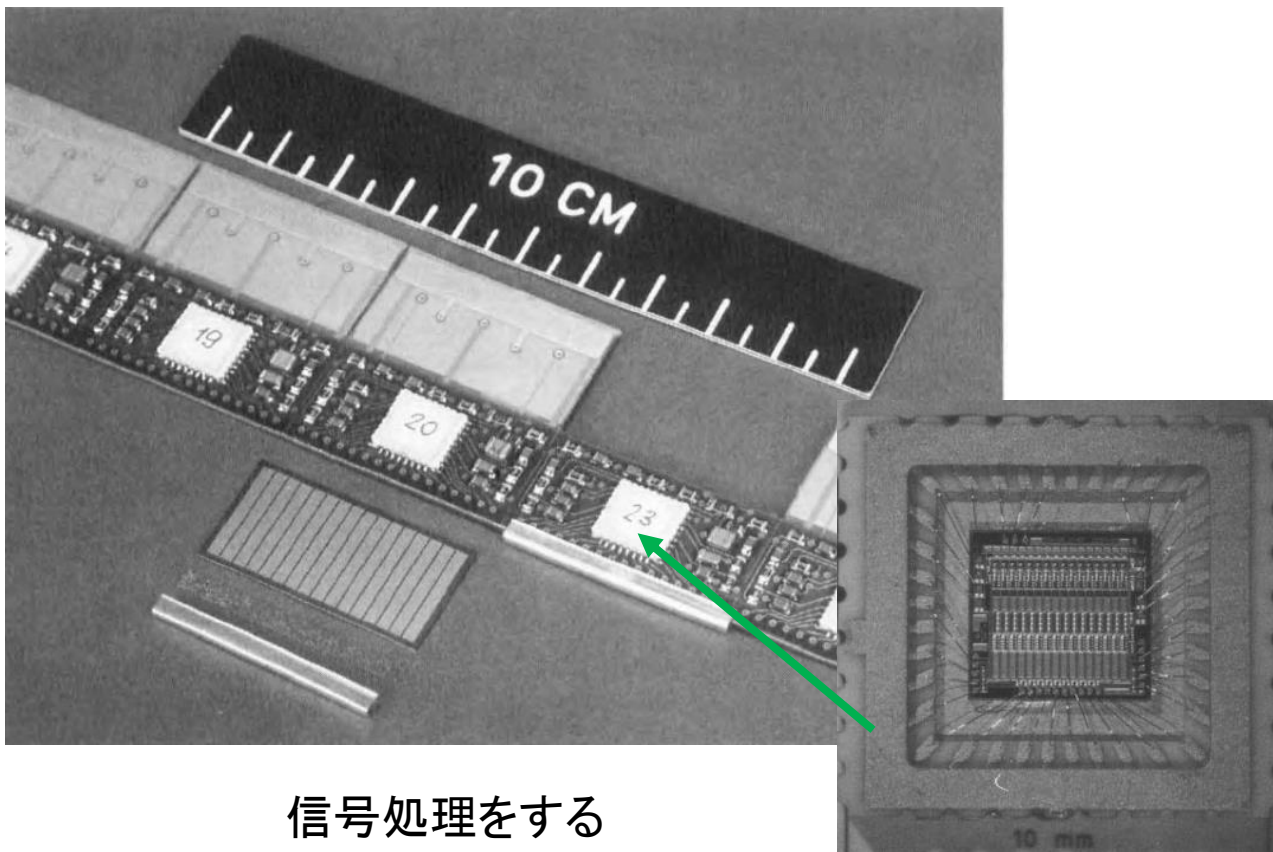


優れた位置精度、
 しかし読み出しは大面積
 固定標的実験だからできた、、、

UA2 (CERN) 実験 (with VLSI)

1987 最初にVLSIが使われたSi 検出器

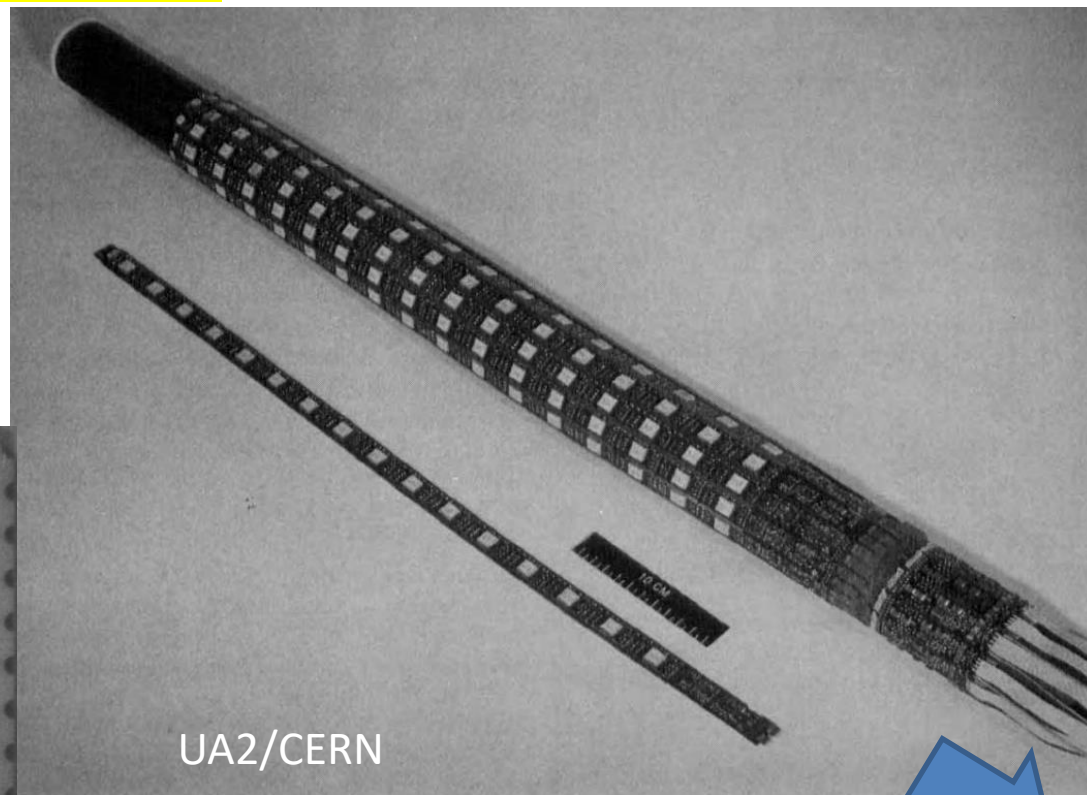
⇒ W/Zの精密測定



信号処理をする
VLSI (大規模集積回路)

特定用途のIC
ASIC (application specific integrated circuit)

16ch ASIC
3 μ m nMOS プロセス



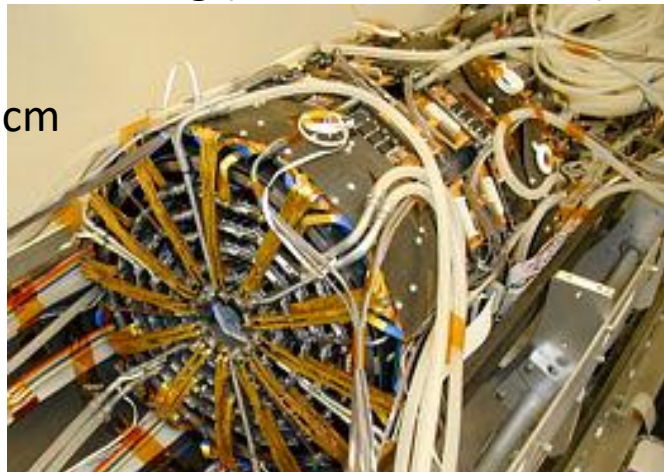
ビームパイプを取り囲む

増幅した(アナログ)信号を外部に順次取り出す



CDF 実験のシリコン飛跡検出器

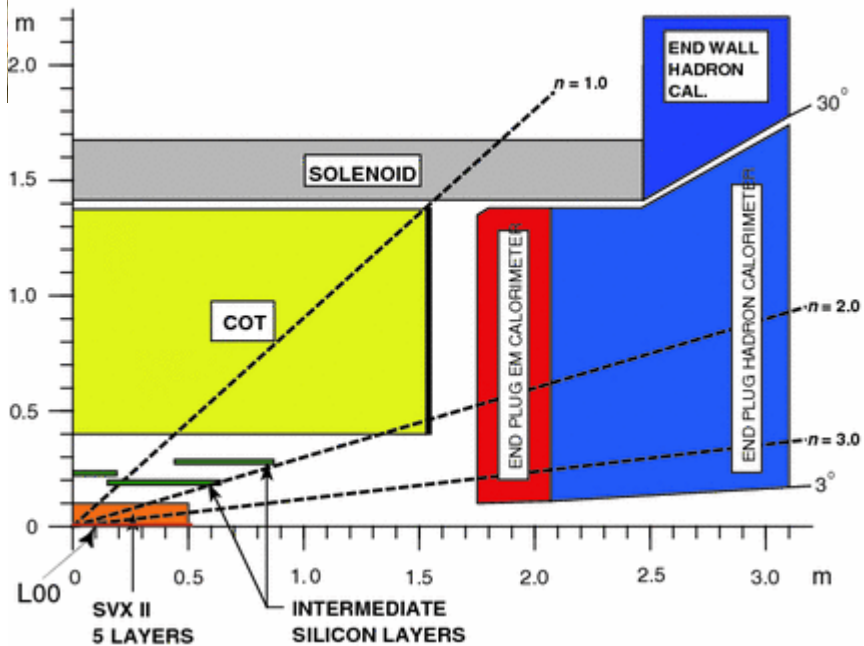
Vertexing (L0+SVX2: 1SS+5DS)



22cm

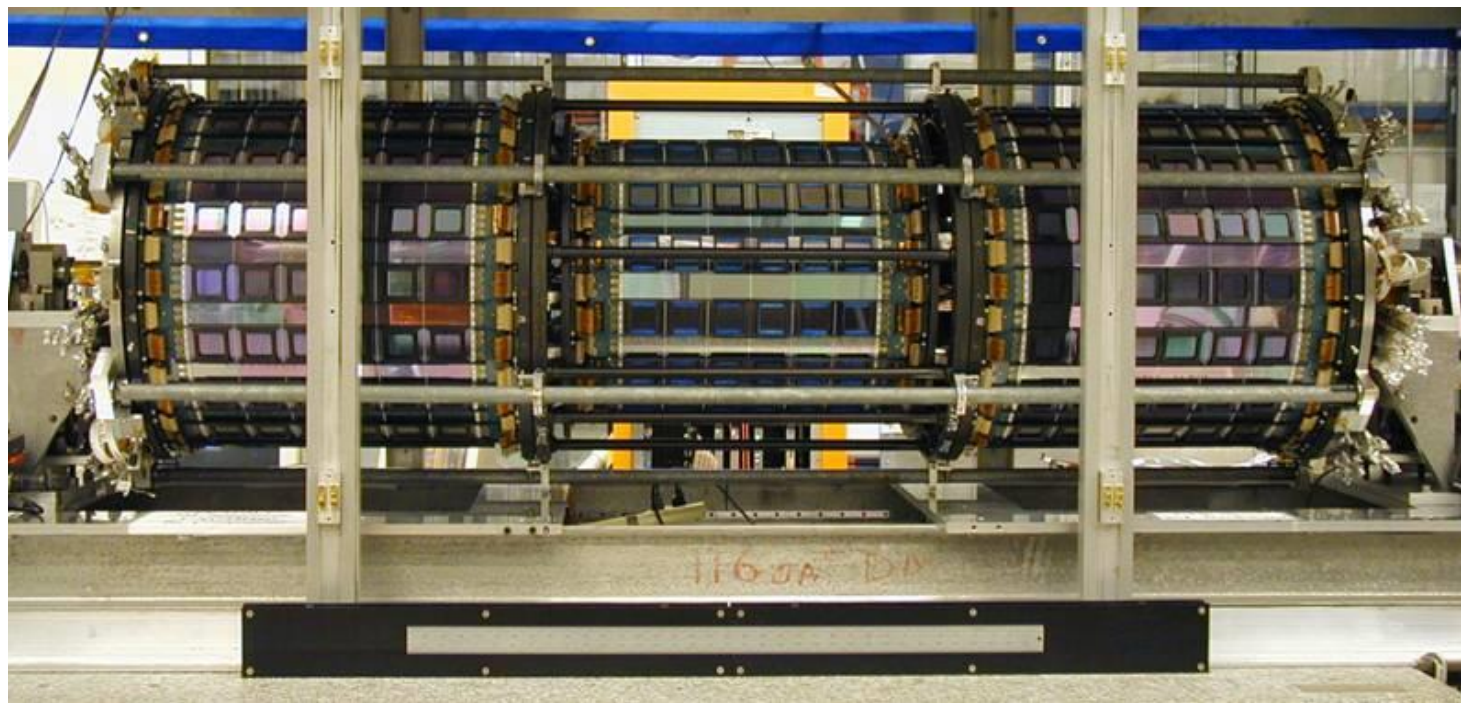


CDF Tracking Volume



トップクォークの発見と精密測定

Intermediate Silicon Layers (2 DS)

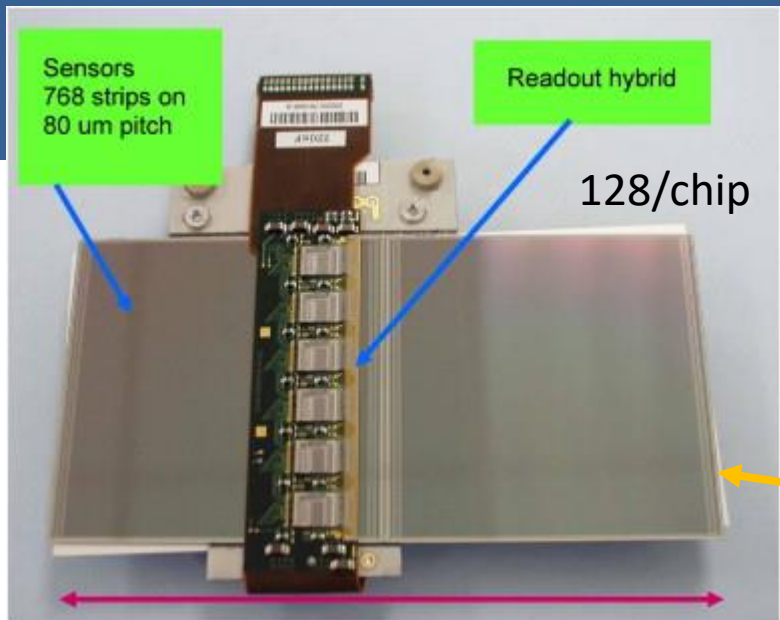


64cm



R=1.4mの領域のほとんどはwire chamber (COT)
衝突点+ 中間領域を位置分解能に優れたシリコンストリップ型

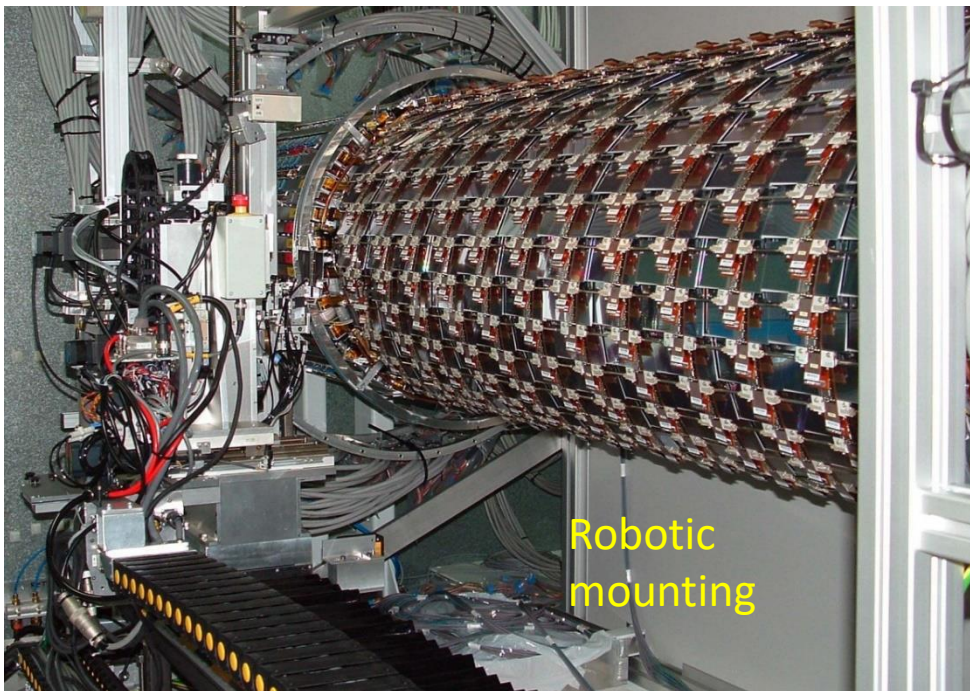
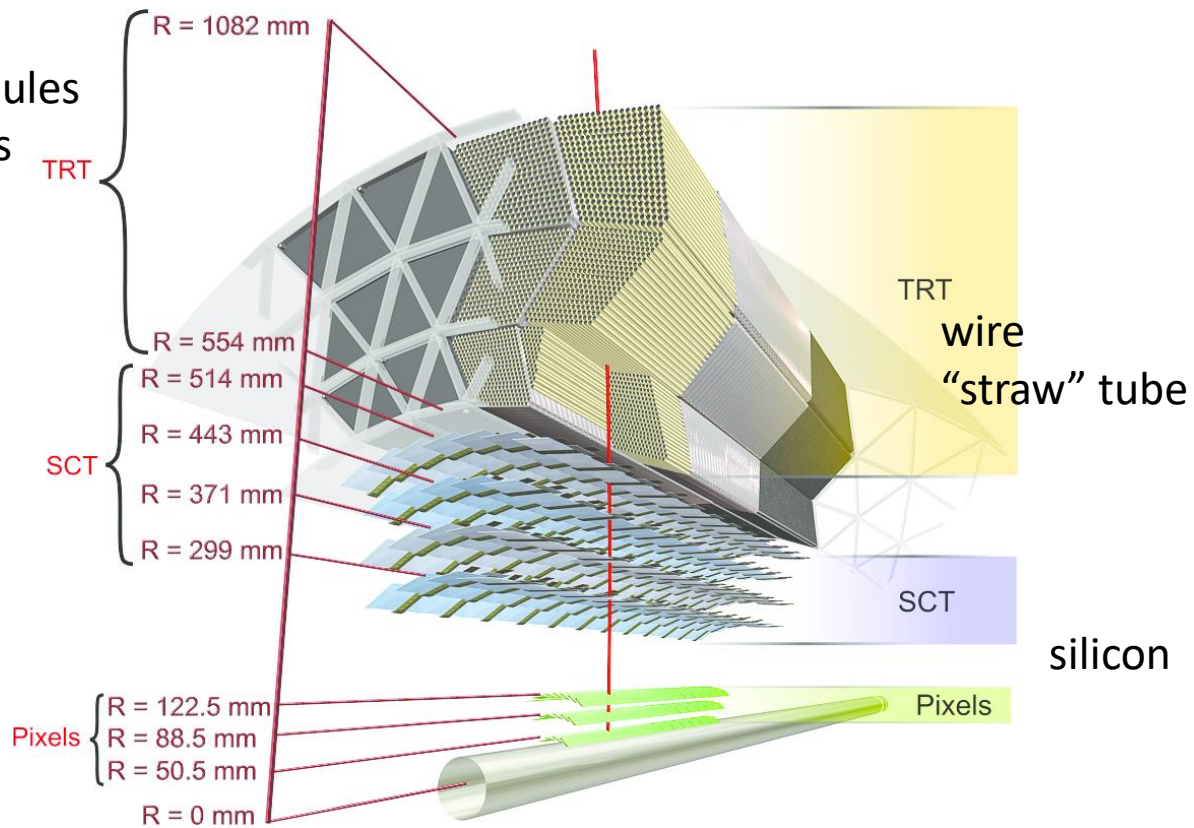
ATLAS 実験のSCT飛跡検出器



ヒッグスの発見と精密測定

~2000 Barrel modules
~2000 EC modules

表裏2枚の貼り付け
☞ stereo角



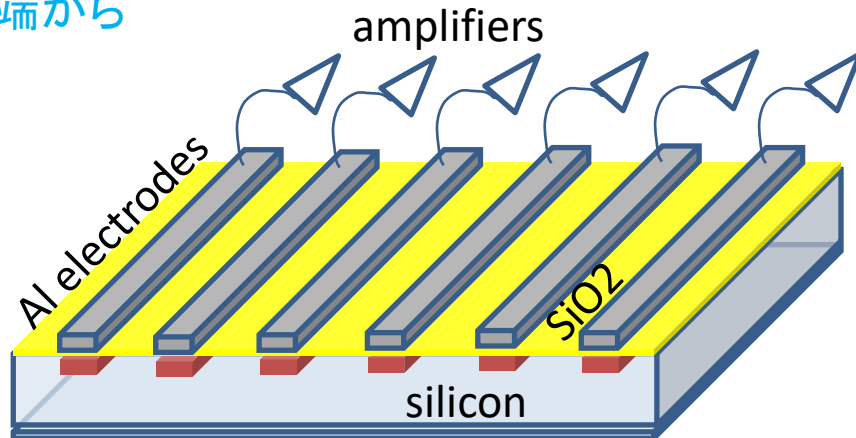
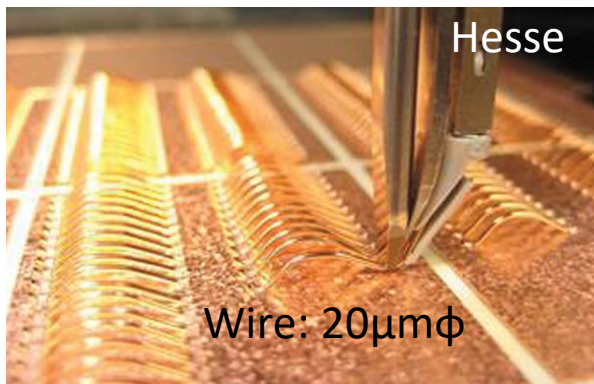
R = 1 mの領域のR = 0.51 mまではシリコン
衝突点近くはピクセル型
中間領域はストリップ型

シリコン Strip & Pixel 検出器

Strip型 : 電極を帯状(=strip)に配置

ch数=N: 広い領域をカバー

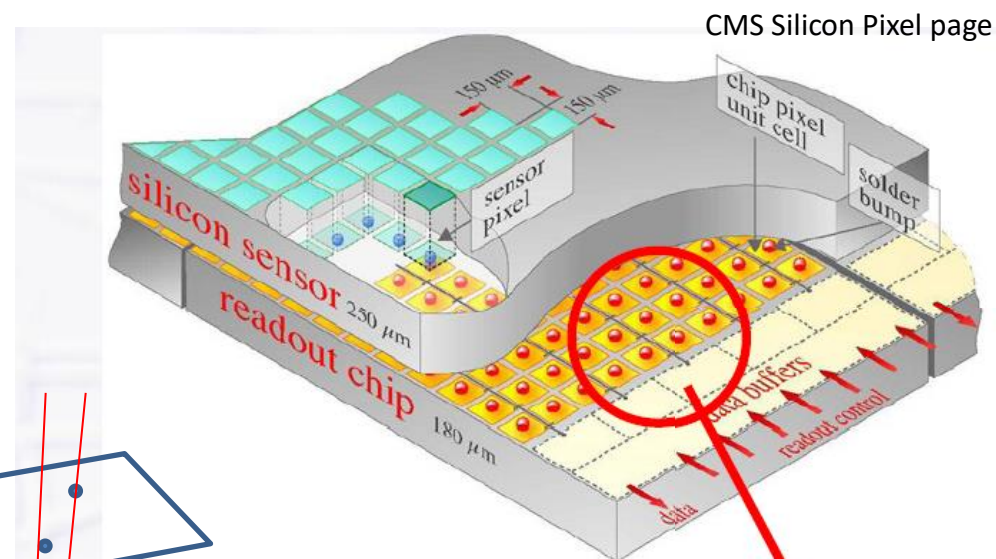
Wire bonding: 読み出しは端から



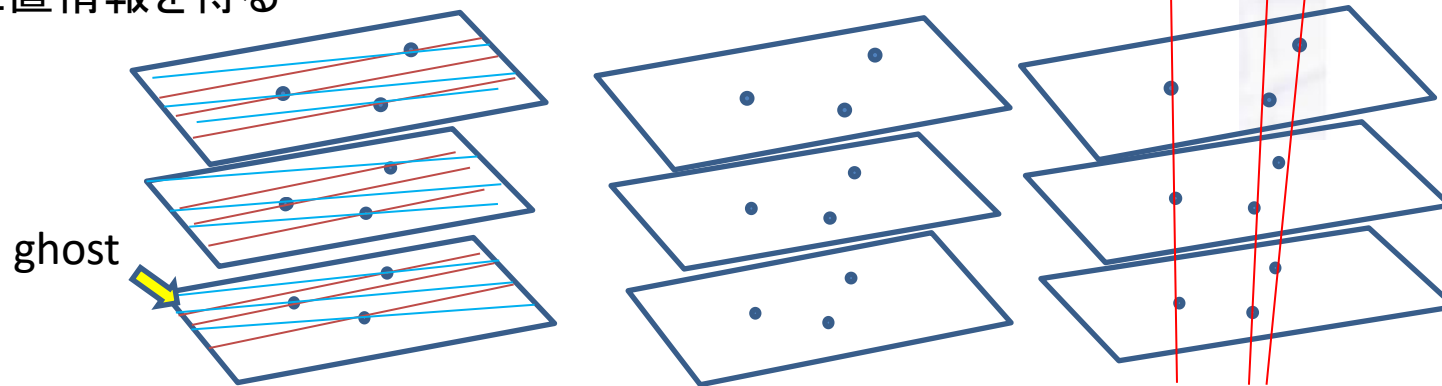
Pixel型 : 電極を2次元に配置

ch数=N²: 高粒子数密度の衝突点領域

Bump bond または別の方法



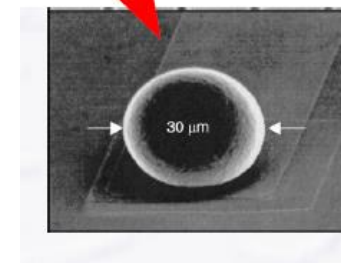
Strip: Small stereo角で長さ方向の位置情報を得る



粒子数密度が高いとghost

組合せ問題は常にある χ^2

Bump: 20μmD

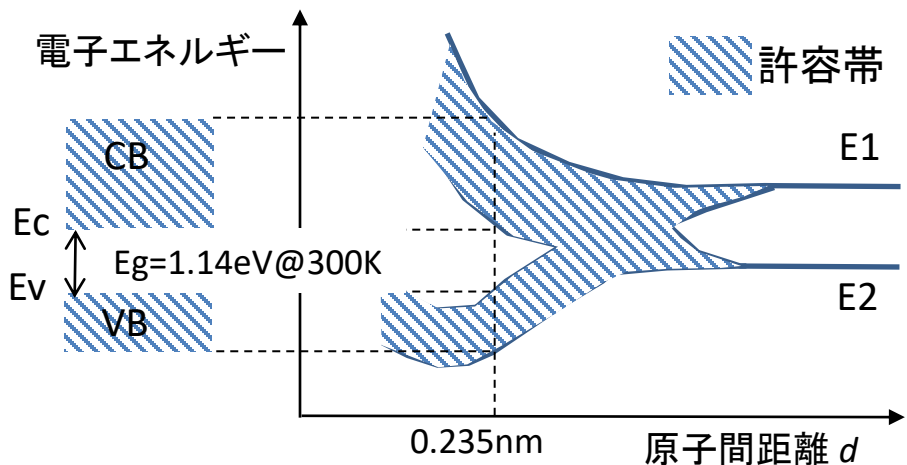


講義の内容

- なぜシリコンか?
 - 半導体
 - p-n 接合ダイオード
 - 空乏化
- シリコン検出器
 - 信号のながれ
 - 信号処理の例
- 位置分解能について
- シリコン検出器の進化(SOI, LGAD)
- 使用上の注意
- 放射線耐性
- 課題

Why silicon? “適切な” バンドギャップ

エネルギーバンド: 多くの原子が集まると独立であった最外殻の準位が混ざりあい、電子が存在できる準位が帯状となる
conduction band 導電帯: 電子は自由に移動可
valence band 価電子帯: 電子は原子結合に寄与



原子間距離 d とともにバンドの様相が変わる

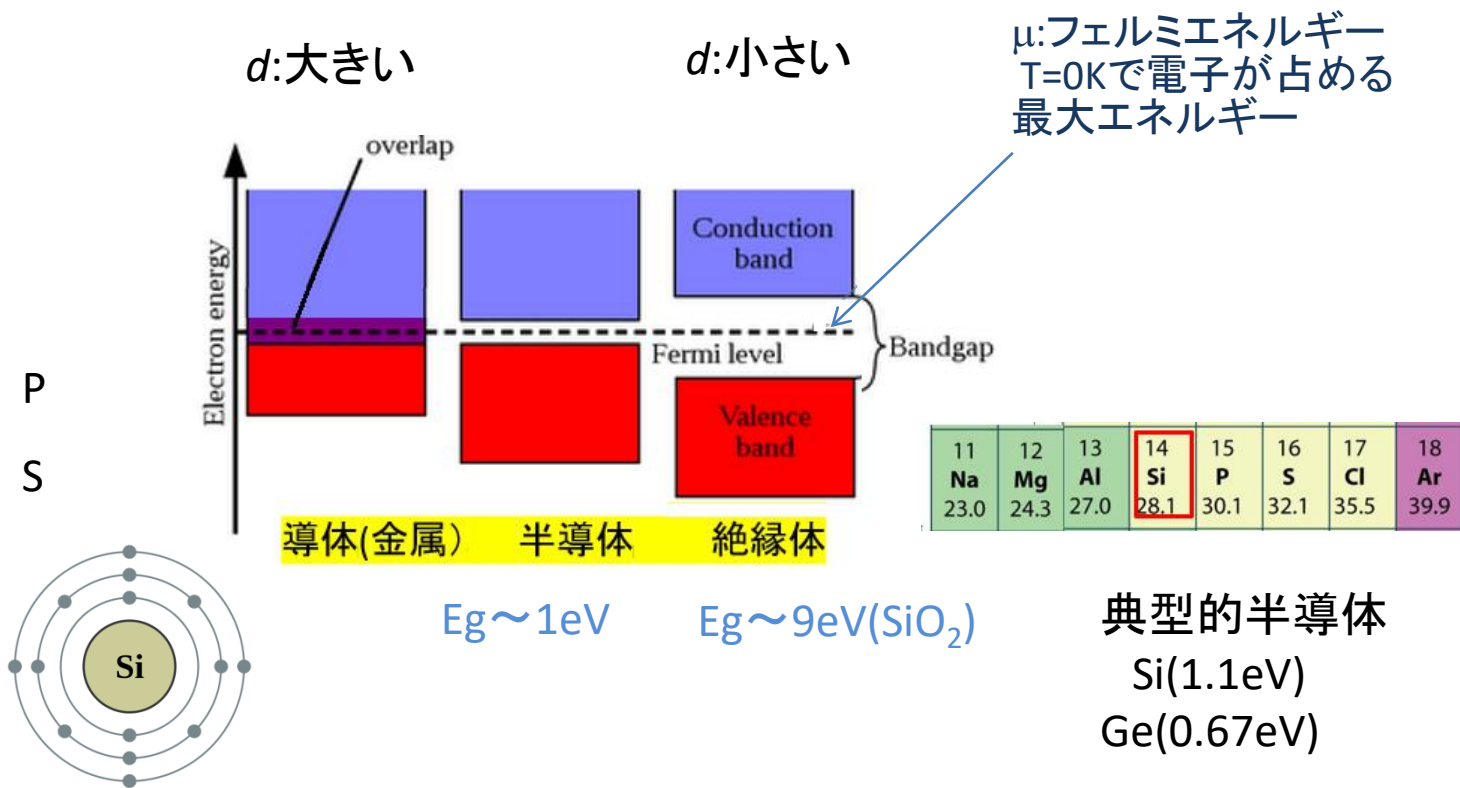
エネルギー ϵ_i に存在する確率

$$\bar{n}_i = \frac{1}{e^{(\epsilon_i - \mu)/kT} + 1} \quad \text{or} \quad \bar{n}_i = e^{-(\epsilon_i - \mu)/kT}$$

(Fermi-Dirac 分布) (Maxwell-Boltzmann 分布)

$kT = 0.026 \text{ eV @ RT}$ なので

$e^{-(\epsilon_i - \mu)/kT} \gg 1$: M-Bとして構わない



室温での確率
 $\sim 10^{-9}$ ($\Delta\epsilon_i: 1.1 \text{ eV}$)
 10^{-6} ($\Delta\epsilon_i: 0.67 \text{ eV}$)

室温ではCBに電子が存在する確率は小さい、が多数原子系では信号として利用できる

Siは積極的な冷却は不要
 Geは冷却して使用 (liq NでSiと同程度)

Why silicon? シリコン検出器の良いところ

- 工業用半導体CMOSプロセスをそのまま使える

サブミクロン単位は通常工程 電極サイズは読み出しエレキの集積度で決まる
技術は急速に進展 (製造コストがダウン, 面積あたりにするとまだ高価)
シリコン半導体プロセス: 読み出しエレキとの一体化が比較的容易

- “信号化”エネルギーが小さいコンパクトに必要な信号量が得られる

電子-ホール対生成は3.67eV : ガス検出器(Xe/Ar:22/26 eV/ion), シンチレータ (100eV/ γ)
薄い検出器(50~300 μm)で高速で拡散が抑えられる: $\sigma_x < 10\mu\text{m}$ が可能 $\Rightarrow \sigma_x < 0.65\mu\text{m}$ w/ SOI
固体なので保持用の構造体は不要 (コンパクトな検出器)

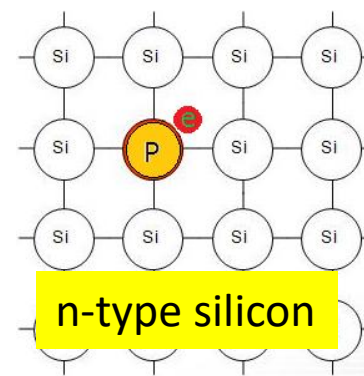
- 放射線耐性のある設計が開発されてきた

素粒子実験で使用できる \Rightarrow 詳細は割愛

Why Silicon?

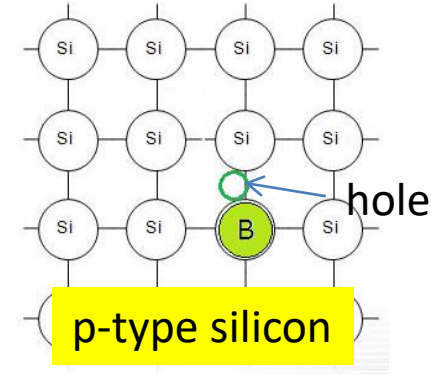
1 H 1.01	2 2A	3 Li 6.94	metal										13	14	15	16	17	2 He 4.00	
		4 Be 9.01	5 B 10.8	non-metal										3A	4A	5A	6A	7A	
			6 He 4.00	noble gas										4 C 12.0	5 N 14.0	6 O 16.0	7 F 19.0	8 Ne 20.2	
11 Na 23.0	12 Mg 24.3	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 8B	10 8B	11 1B	12 2B	13 Al 27.0	14 Si 28.1	15 P 30.1	16 S 32.1	17 Cl 35.5	18 Ar 39.9		
19 K 39.1	20 Ca 40.1	21 Sc 45.0	22 Ti 47.9	23 V 50.9	24 Cr 52.0	25 Mn 54.9	26 Fe 55.9	27 Co 58.9	28 Ni 58.7	29 Cu 63.6	30 Zn 65.4	31 Ga 69.7	32 Ge 72.6	33 As 74.9	34 Se 79.0	35 Br 79.9	36 Kr 83.8		
37 Rb 85.5	38 Sr 87.6	39 Y 88.9	40 Zr 91.2	41 Nb 92.9	42 Mo 95.9	43 Tc [98]	44 Ru 101	45 Rh 103	46 Pd 106	47 Ag 108	48 Cd 112	49 In 115	50 Sn 119	51 Sb 122	52 Te 128	53 I 127	54 Xe 133		
55 Cs 87	56 Ba 88	57 La 89	72 Hf 104	73 Ta 105	74 W 184	75 Re 187	76 Os 190	77 Ir 192	78 Pt 195	79 Au 197	80 Hg 201	81 Tl 204	82 Pb 207	83 Bi 209	84 Po [209]	85 At [210]	86 Rn [222]		

V in IV: 電子過剰



n-type silicon

III in IV: 電子欠乏



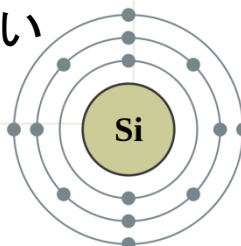
p-type silicon

Siは地殻で2番目に多い元素: いっぱいあるよ

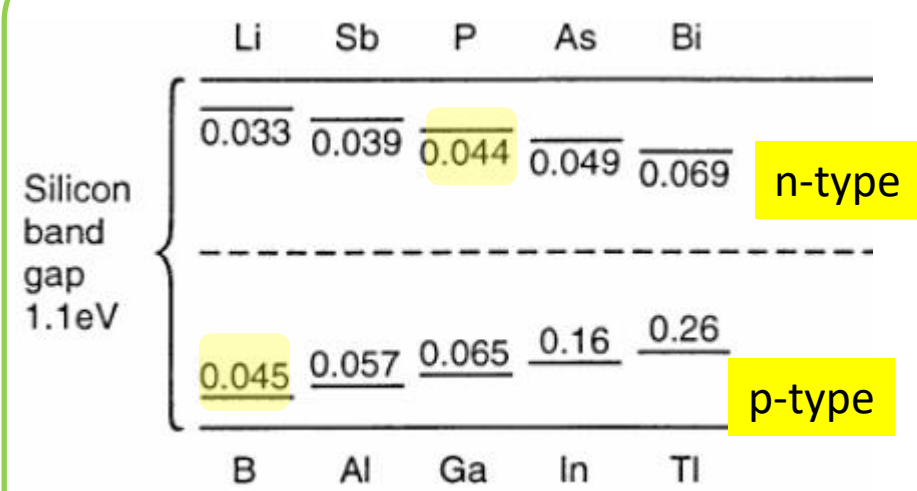
Si検出器は以下の恩恵のため:

- 適正なエネルギーバンドギャップ (1.1eV)
- 優れた絶縁体が形成できる SiO₂ (~10⁷ V/cm)
- B (as donor) や P (as acceptor) はお隣なので結晶に入れやすい
- 読み出し電子回路もシリコン

4 共有電子



不純物準位

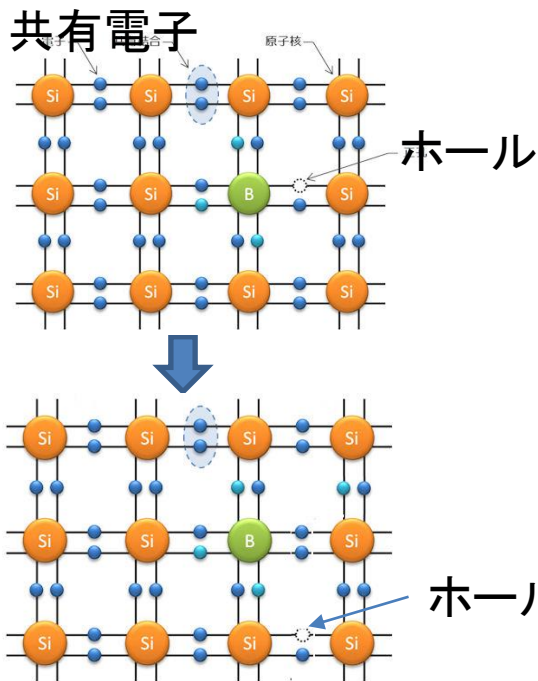


準位の高さは視覚的にはあっていないので注意

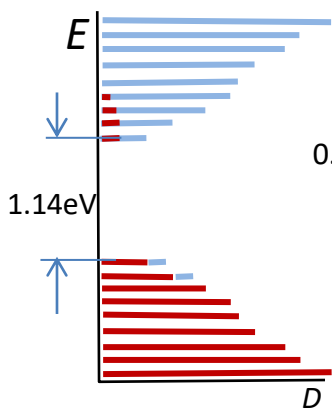
不純物半導体(doped semiconductor)

電子は電圧を受け移動できる

ホールは電圧を受け移動できる

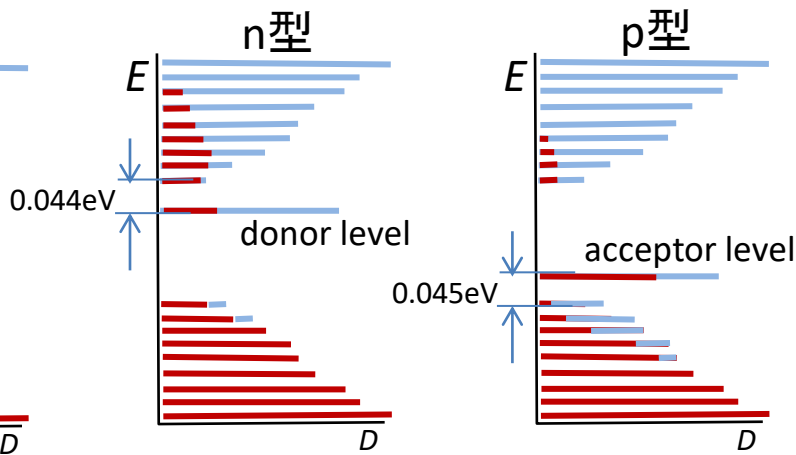


真性半導体:



熱励起

不純物半導体:



電子で占有された準位
占有されていない準位

: 準位数密度

室温で ドナー準位にある電子 => 殆んどがCBへ電子が増える
アクセプタ準位=> 電子で埋まりVBのホールが増える
真性半導体より導電性が高くなる

n, p : 電子密度, ホール密度

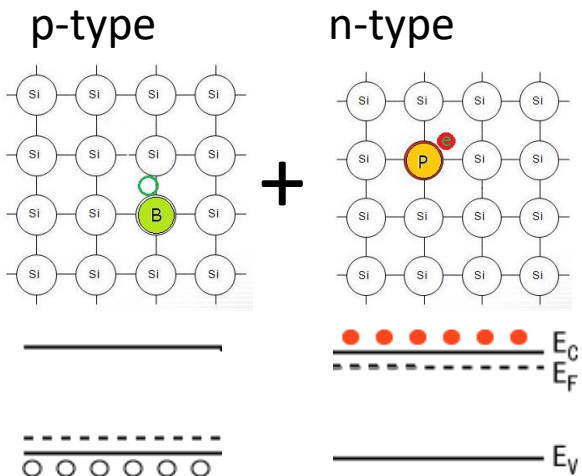
N_A, N_D : アクセプター原子密度, ドナー原子密度

Notation i : 真性 (濃度制御がしにくいので余り使われない)

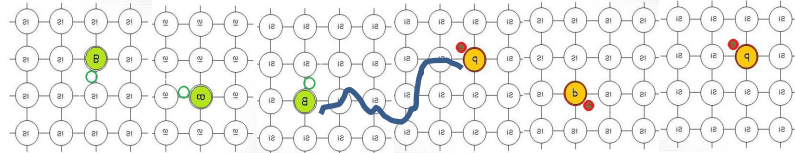
n, p (n, p): 低濃度にドーパされた半導体 (センサー部に使われる)

n^+, p^+ : 高濃度にドーパされた半導体 ("電極"として使われる)

Diode (pn接合)



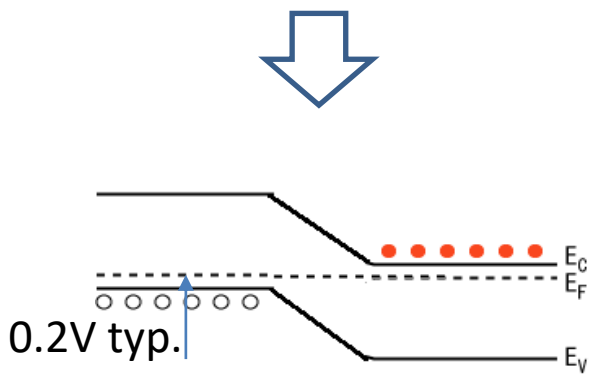
熱拡散により接合部のehが結合 → 原子が帯電(空間電荷)し拡散を止める



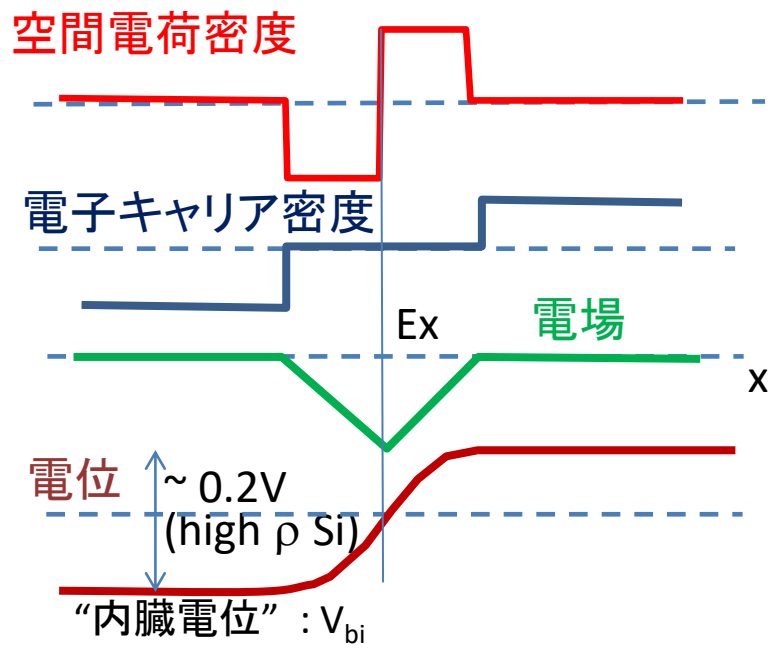
(空乏層)

空乏層

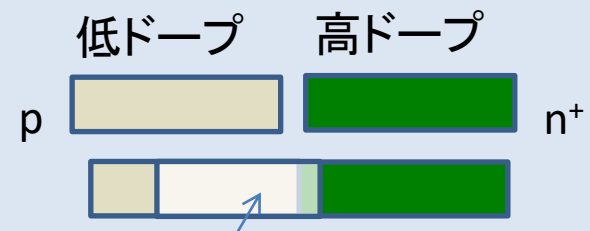
- キャリア(eやh)がない領域,
- 空間電荷が残っている



接合部ではフェルミエネルギーが一致するように準位に段差



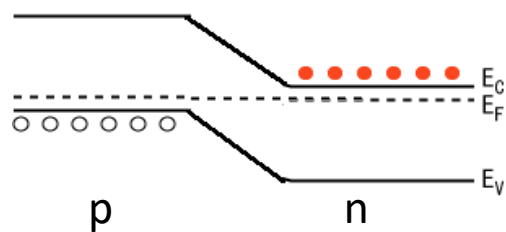
シリコン検出器:
ドーパ量の異なるpn接合



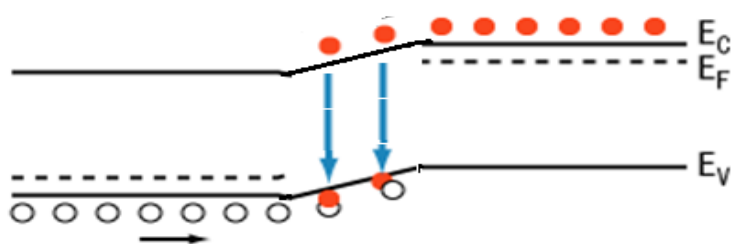
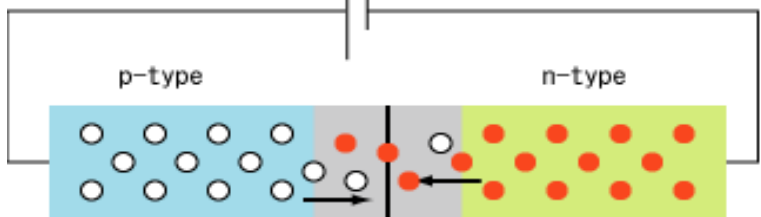
- 空乏化は低ドーパ側に広がる
- ☞ 粒子検出部につかう
- 信号は高ドーパの電極へ

シリコンダイオード検出器 (逆バイアス電圧)

熱拡散後



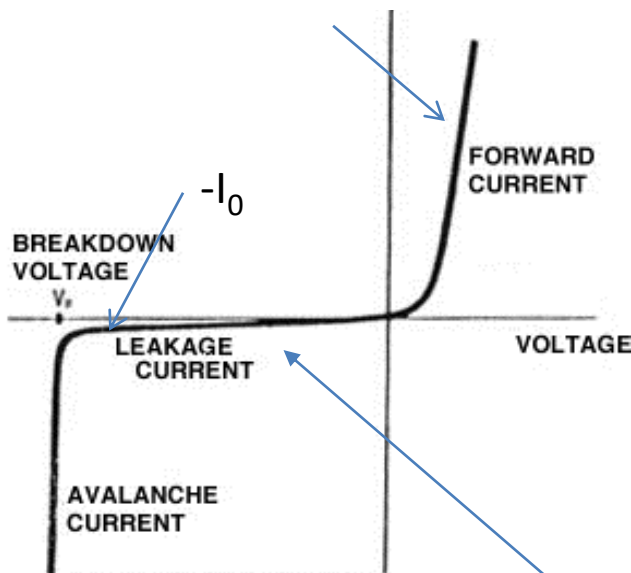
順バイアス: $V_{pn} > 0$ ($V_p > V_n$)



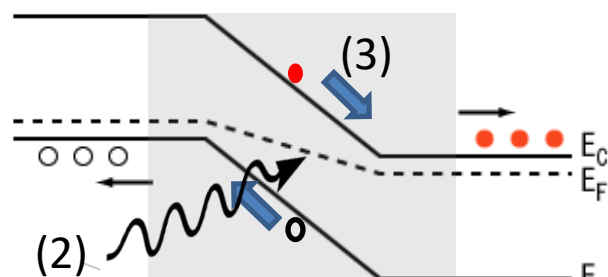
e,hが移動し再結合

ダイオードの整流特性

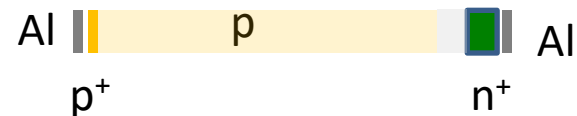
$$I = I_0(e^{eV/kT} - 1)$$



逆バイアス: $V_{pn} < 0$

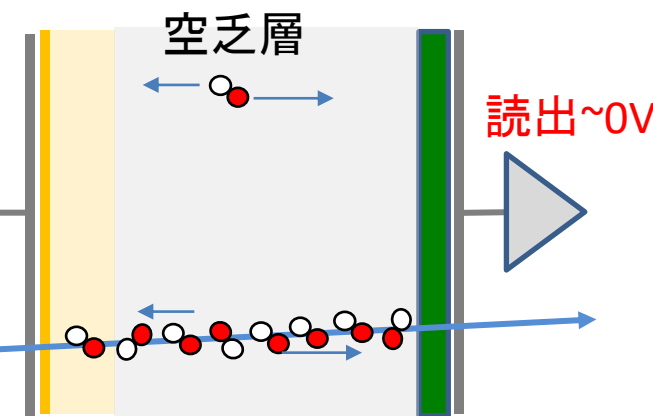


(1) e,hが離れ空乏層が広がる



コンタクト用
アルミ電極

-V
逆バイアス:

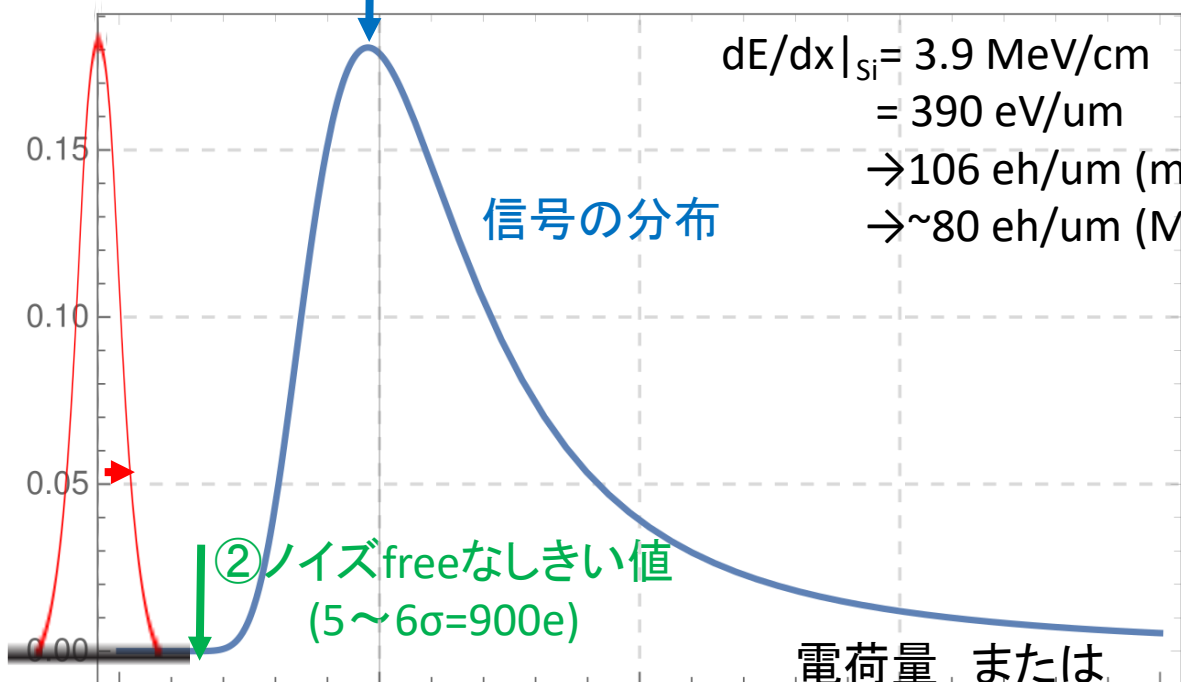


- (1) 逆バイアスをかけて空乏層を広げる
リーク電流(熱によるeh生成)は小さい
- (2) 荷電粒子の通過により $\sim 80eh/\mu m$ が生成
- (3) ehの移動により信号が電極に誘起される

シリコン検出器のS/Nと空乏層厚

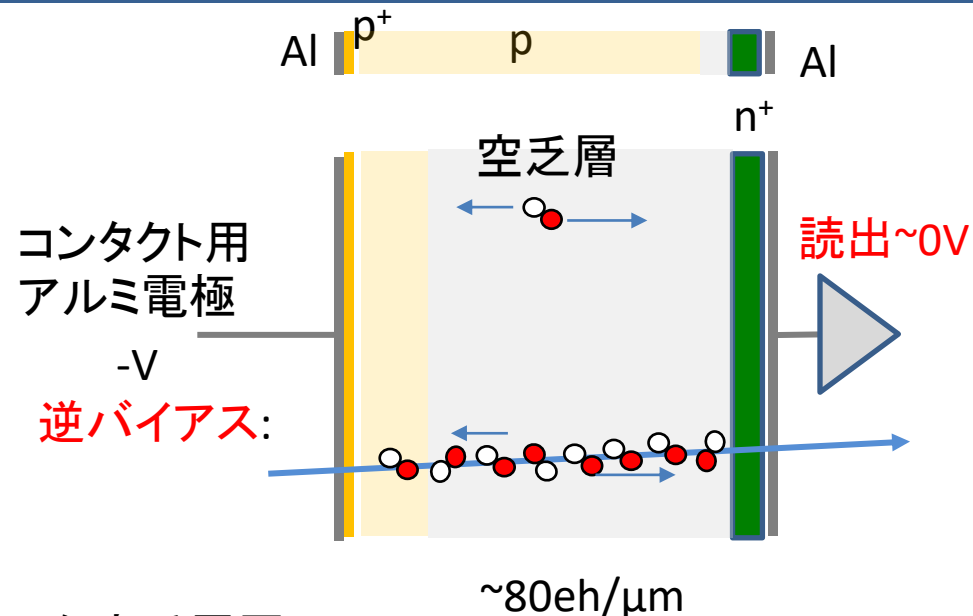
③信号はしきい値の3~4倍
は欲しい ($24\sigma_N=3600e=S$)

ノイズの分布



必要なエネルギー:
 $\langle E \rangle \sim 3.67$ [eV]/eh対生成

$$\begin{aligned} dE/dx|_{Si} &= 3.9 \text{ MeV/cm} \\ &= 390 \text{ eV/um} \\ &\rightarrow 106 \text{ eh/um (mean)} \\ &\rightarrow \sim 80 \text{ eh/um (MPV)} \end{aligned}$$



④必要な空乏層厚

$S/N=24$ には、 $3600[e]/80[\text{eh}/\mu\text{m}]=45\mu\text{m}$
現実には

- 100%は収集できない
 - 隣のチャンネルとの信号分割
 - 放射線損傷による収集電荷量の低下
- 製造時に必要な厚さからの薄化

ATLAS pixel ($\sigma_N=150 \Rightarrow 100/150\mu\text{m}$)

ATLAS strip ($\sigma_N=600 \Rightarrow 300\mu\text{m}$)

① ノイズ
($\sigma_N=150e=N$)

空乏化電圧

厚さ

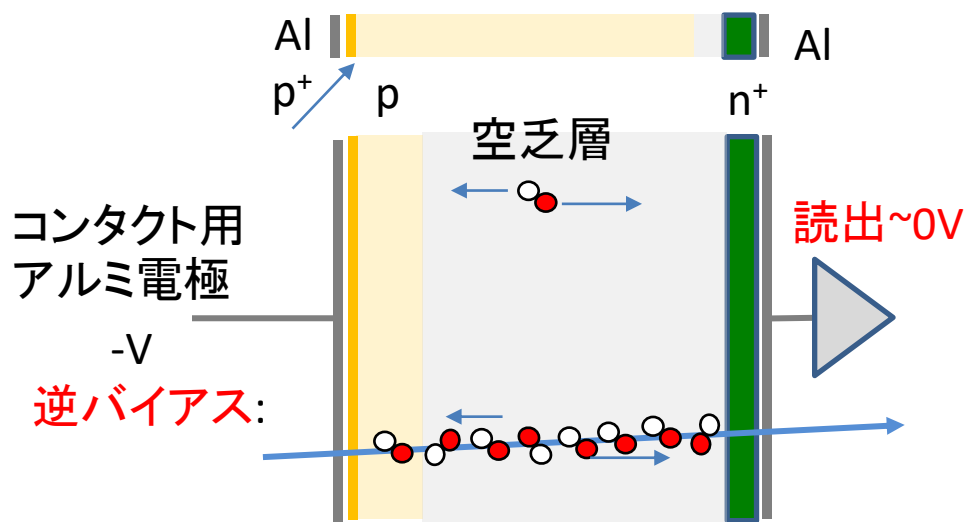
ATLAS strip ($\sigma_N=600 \Rightarrow 300\mu\text{m}$)

ATLAS pixel ($\sigma_N=150 \Rightarrow 100\mu\text{m}/150\mu\text{m}$)

$$d = \sqrt{2\varepsilon\rho\mu V_b} = 0.53\sqrt{\rho_n V_b} = 0.32\sqrt{\rho_p V_b} \quad [\mu\text{m}]$$

↑ ↑
抵抗率

キャリアの移動度(480 vs 1350 cm^2/Vs for p vs n-bulk)



300 μm を全空乏化するには

V_b	1 $\text{k}\Omega\text{cm}$	4 $\text{k}\Omega\text{cm}$
n-bulk	320V	80V
p-bulk	880V	220V

$\rho=4 \text{ k}\Omega\text{cm}$ には

$$N_D \sim 3 \times 10^{12} / \text{cm}^3$$

$$N_A \sim 1 \times 10^{12} / \text{cm}^3$$

「不純物」純度

$\sim 1/10$ 桁

$\sim 1/11$ 桁

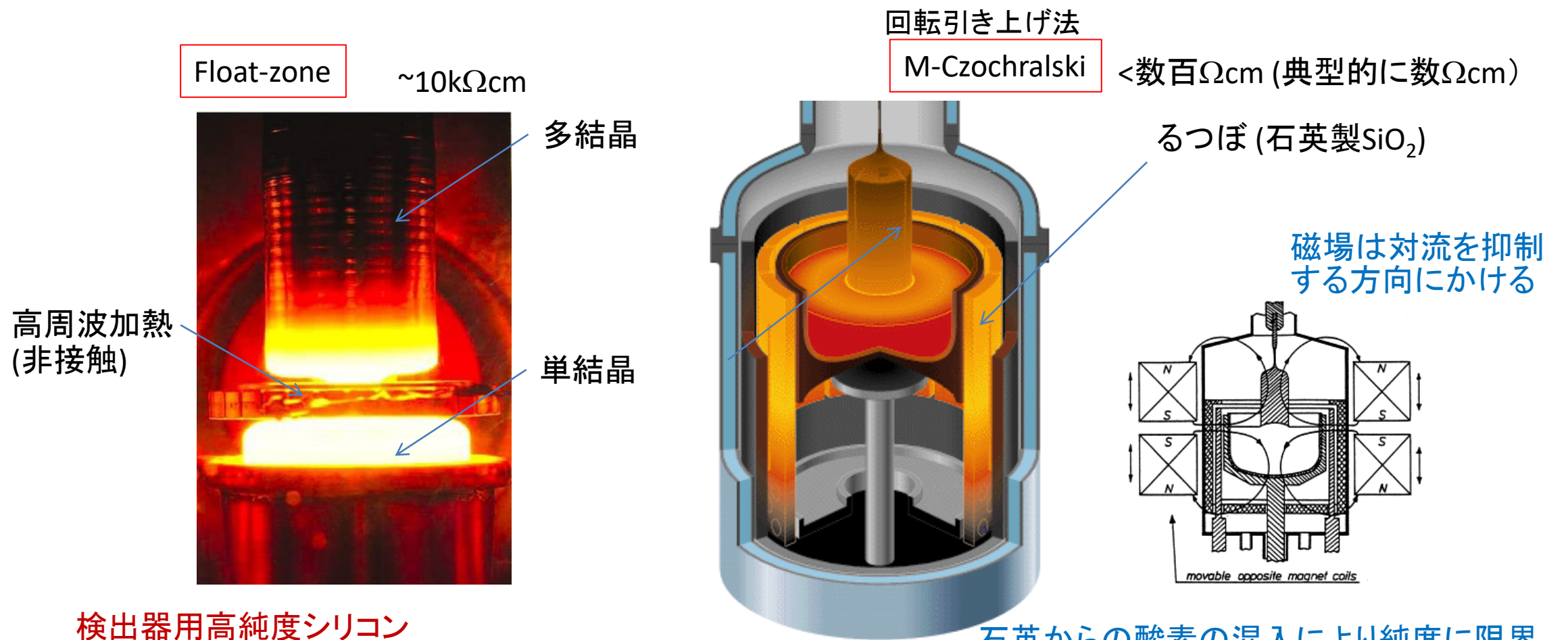
シリコン結晶: $N \sim 5 \times 10^{22} \text{ atoms}/\text{cm}^3$

IC用の「高純度»: a few Ωcm

\Rightarrow センサーには ICプロセス用の1/1000の純度が必要

高純度シリコン

溶融と再結晶の工程により高純度シリコン単結晶を得る: "segregation" (不純物との)分離



検出器用高純度シリコン
但し結晶が弱いために大型化が難しい
($15\text{cm}=6''\phi$ 、最近は $20\text{cm}=8''\phi$)

石英からの酸素の混入により純度に限界
=> 磁場をかけて対流を抑制し混入を抑える
大型化($45\text{cm}=18''\phi$) 主にIC用シリコン

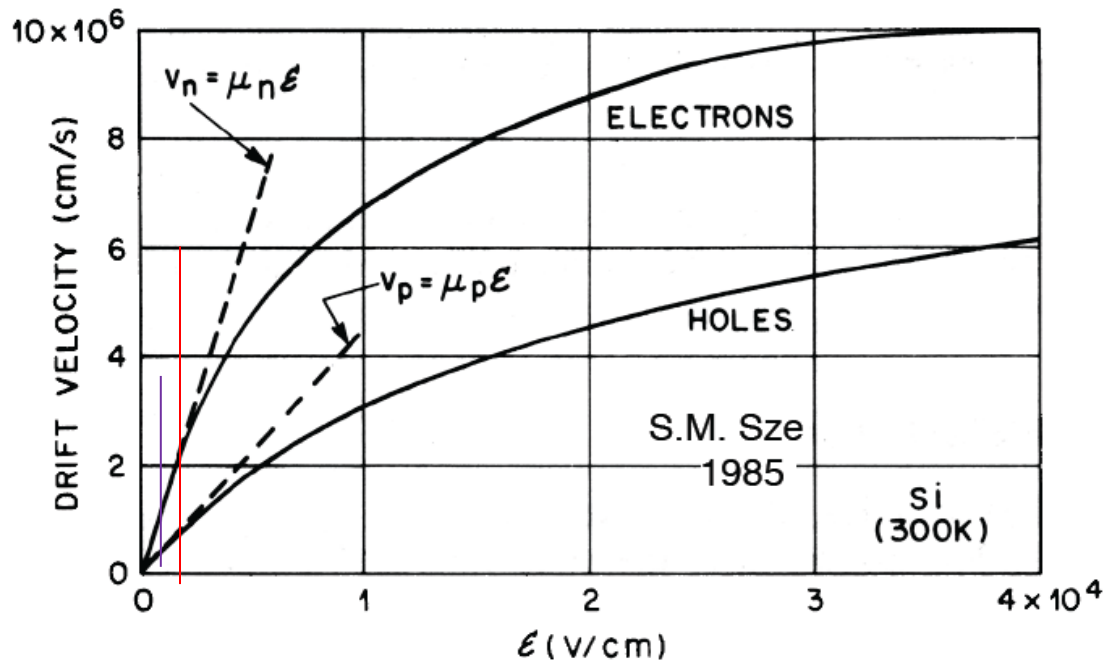
移動度 μ

drift velocity $v_d = \mu E$

キャリアの種類, 密度, 電場, 温度に依存するが、

単位: $\text{cm}^2/\text{s}/\text{V}$

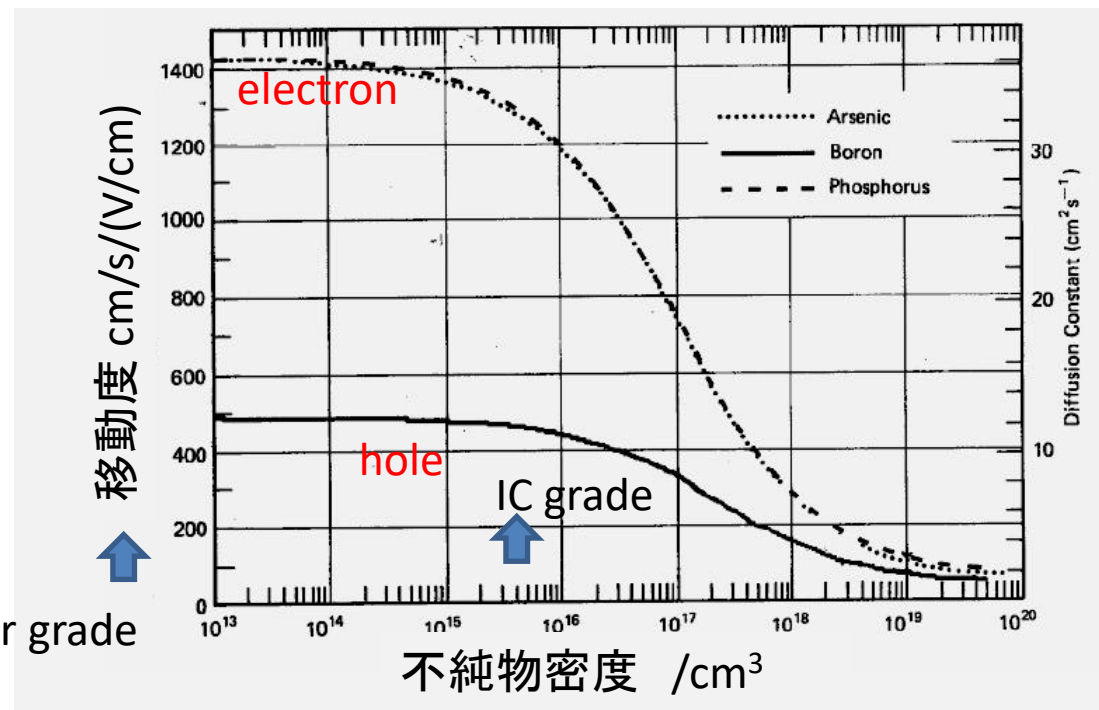
E-field



$300\text{V}/300\mu\text{m} = 100\text{V}/\text{cm}$

Sensorでは

- 比例関係 (μ 一定)
- μ は最大



For $E=200\text{V}/300\mu\text{m}$, $100\text{V}/300\mu\text{m}$

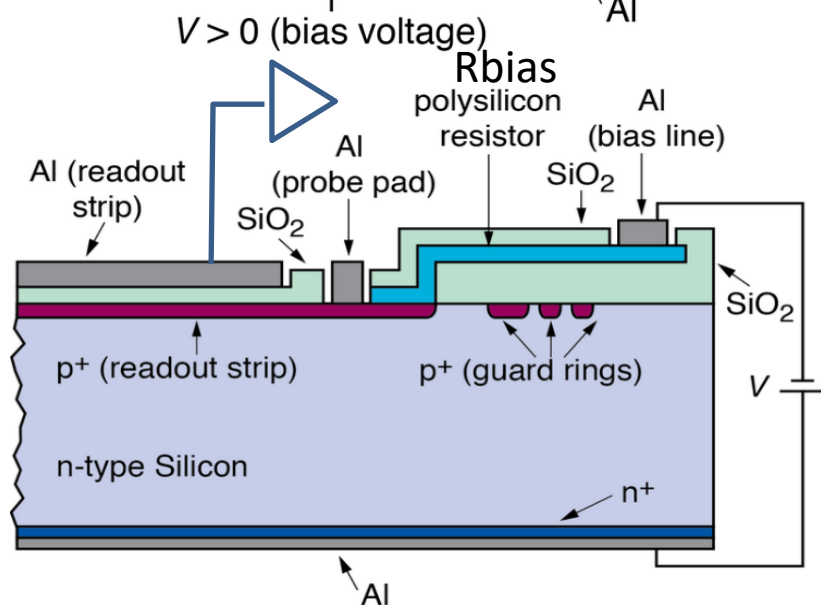
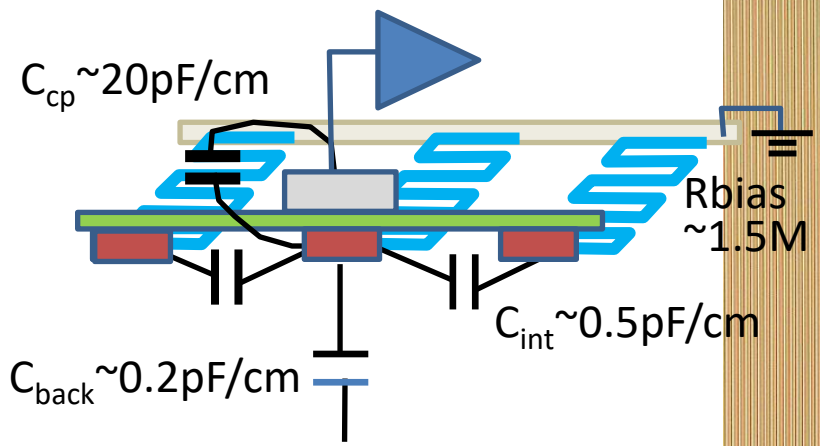
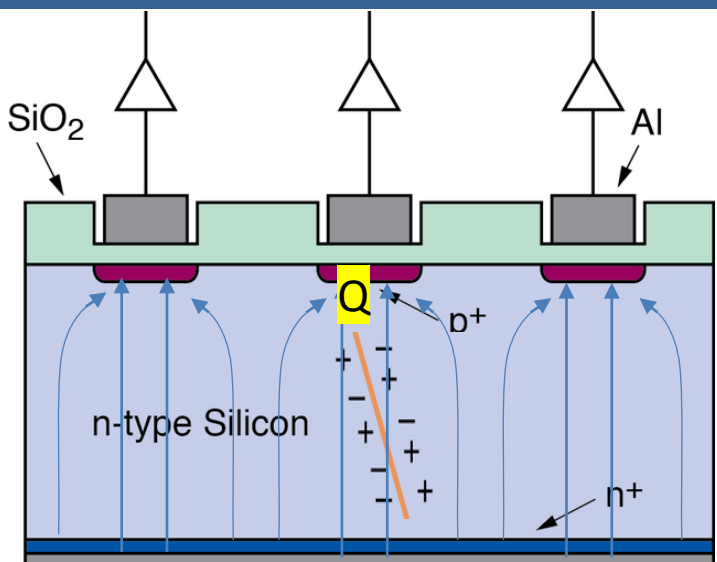
Electrons: $t(300\mu\text{m})=4\text{ns}$, 6ns

Holes: $t(300\mu\text{m})=12\text{ns}$, 20ns @RT

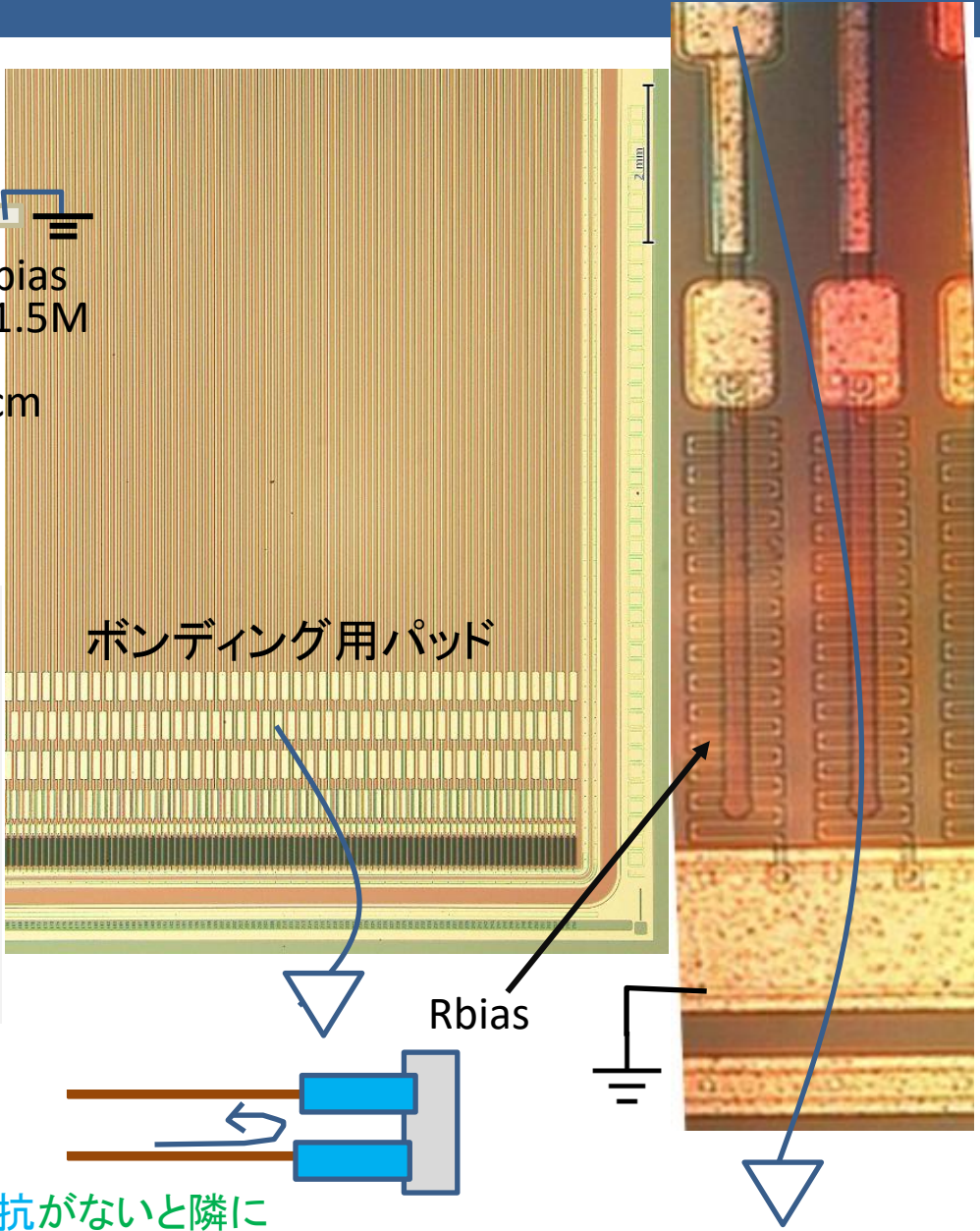
速い信号収集

典型的 gas drift ($v=5\mu\text{s}/\text{cm}$): $t(2\text{mm})\sim 400\text{ns}$

位置測定 (strip型) : 信号の流れ



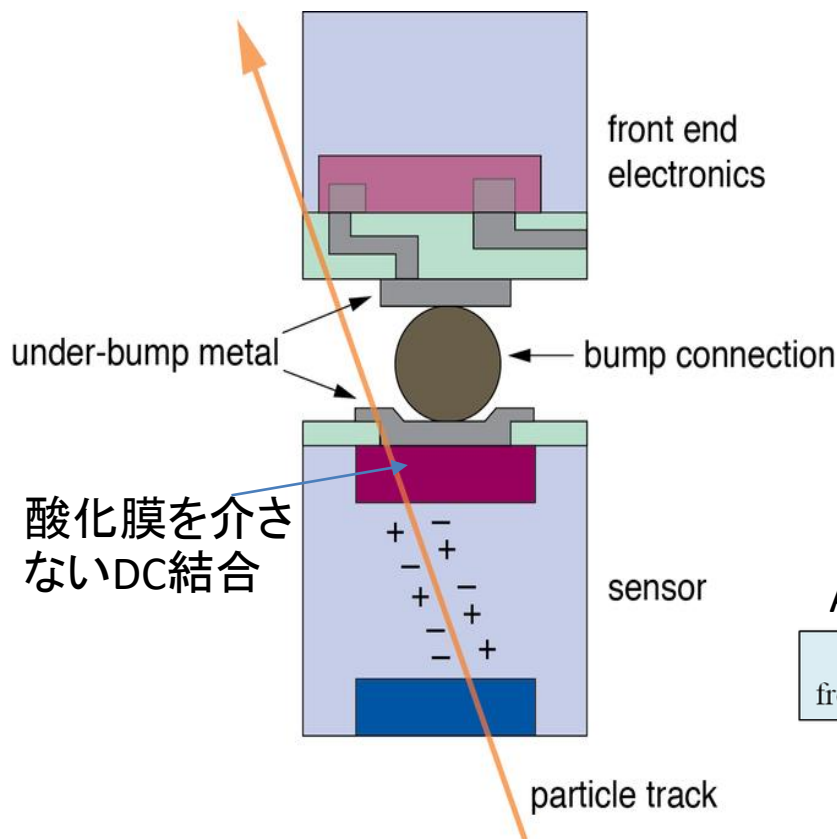
- 信号はアンプへ
- $C_{cp} \gg C_{int} > C_{back}$
 C_{cp} (結合容量) を用いない DC 結合なら信号はすべてアンプへ。しかし暗電流もアンプへ入る。
- 暗電流はバイアス抵抗*を介して GND へ
- $R_{bias} \sim 1 \text{ M}\Omega$



位置測定 (pixel型 +) : 信号の流れ

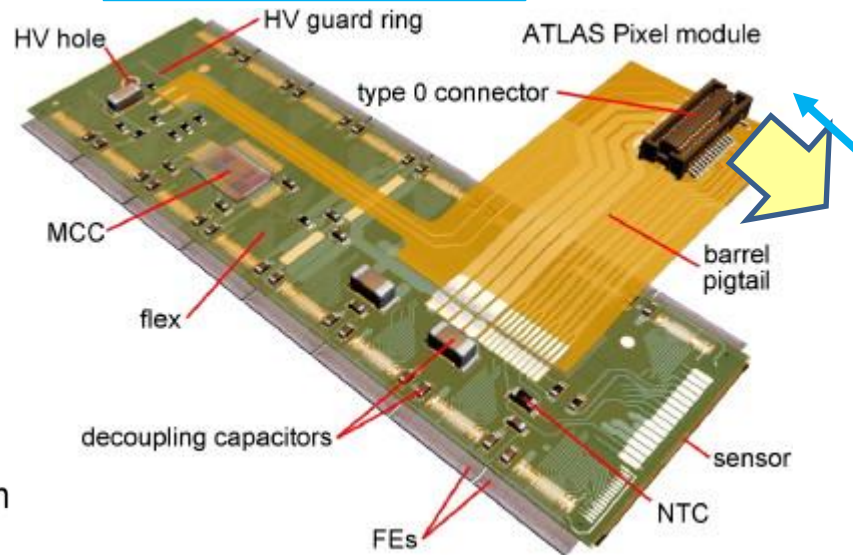
Pixel型はアンプchあたりのSi体積が小さいため暗電流はあまり問題にならない

☞ DC結合

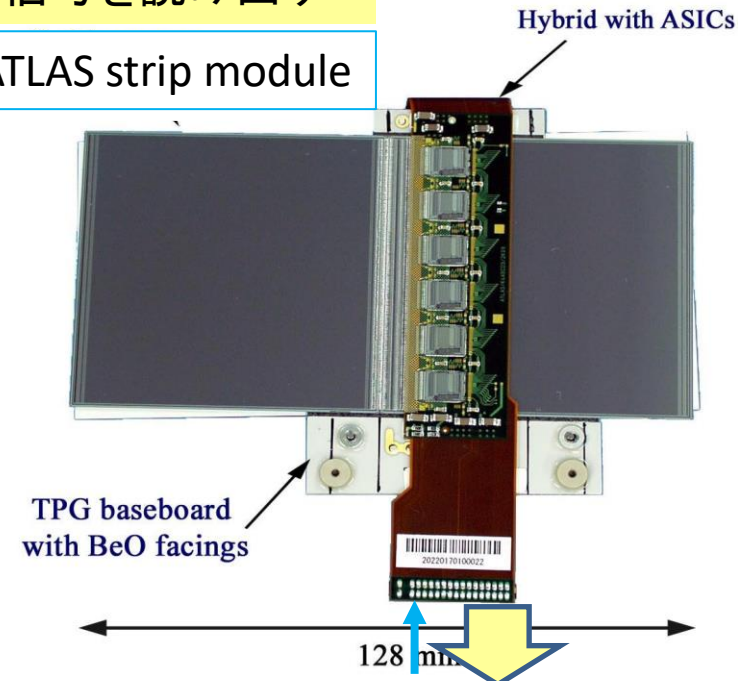


基板上のASICで処理した信号を読み出す

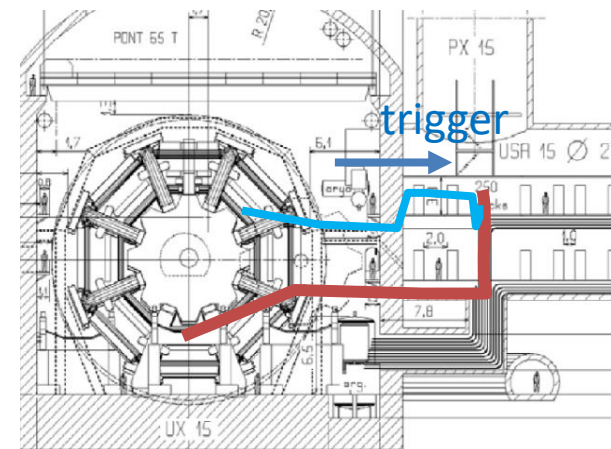
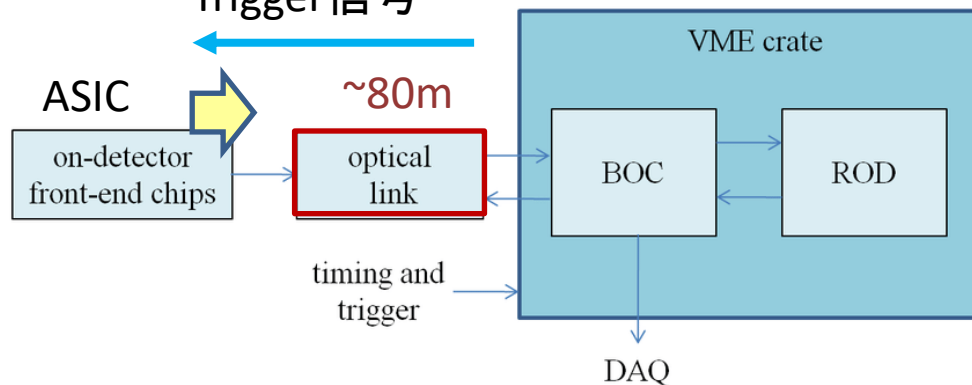
ATLAS pixel module



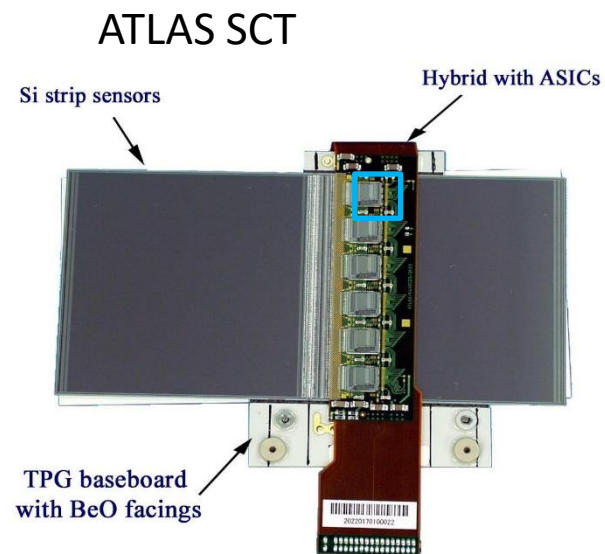
ATLAS strip module



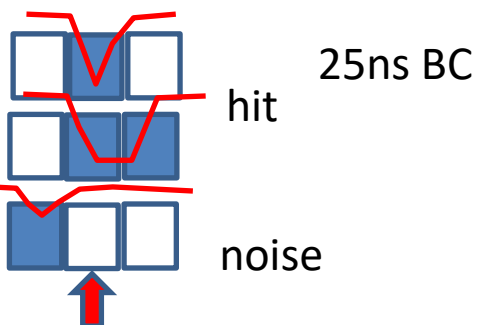
Trigger信号



信号処理の例

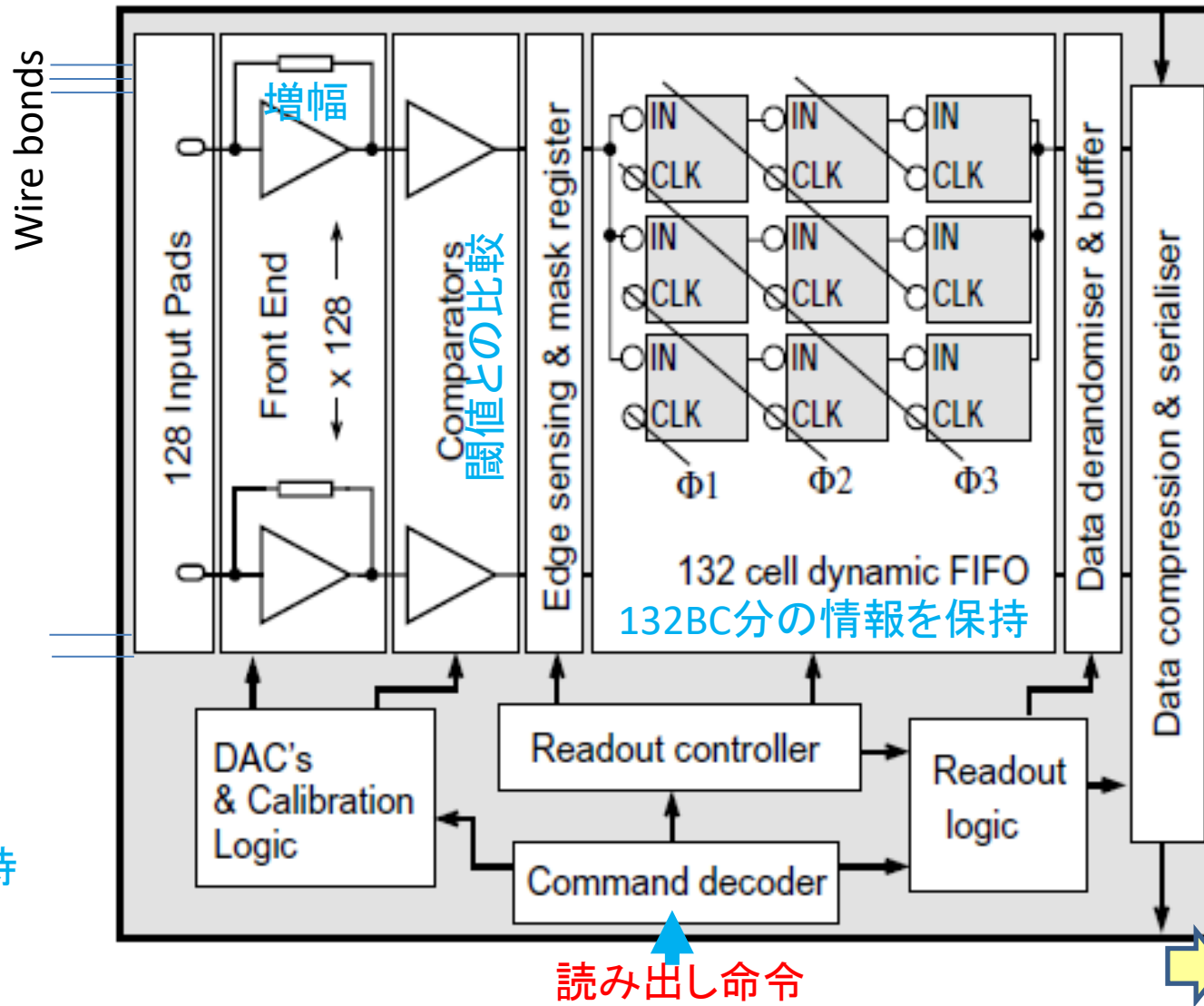


128 mm
3 BC (beam crossing) info



ヒット情報をBCidとともに保持
(最長5.28 μ s)
読み出し命令に従い出力

1 ASIC chipの信号処理系 Binary readout (ON/OFF)



R/O rate:100kHz

要求されたBCid
に“hit”したchの
アドレスを送信

運動量分解能-位置分解能の影響

- 3点での測定の場合 (位置測定精度はすべて同じとする)

$$s = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2} \Rightarrow \sigma_s^2 = \sigma_{x_2}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{x_1}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{x_3}^2 = \frac{3}{2}\sigma_x^2$$

$$\Delta \frac{1}{p} = \left(\frac{\Delta p}{p}\right) \frac{1}{p} = \frac{8}{0.3BL^2} \Delta s = \frac{8}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_x = C \sigma_x$$

$$8 \sqrt{\frac{3}{2}} = 9.8$$

$$\sqrt{\frac{740}{3+4}} = 10.3$$

→ N=3でもかなり良い近似

- 等間隔N点(N>10)での測定の場合 (NIM A24,381(1963))

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right) = \frac{p\sigma_x}{0.3BL^2} \sqrt{\frac{740}{N+4}}$$

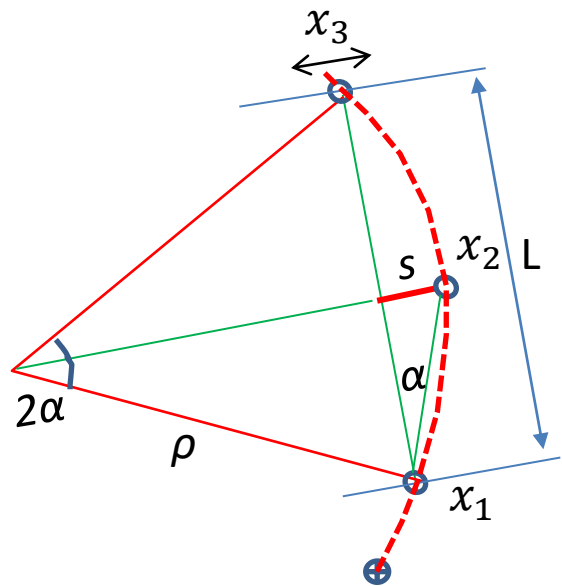
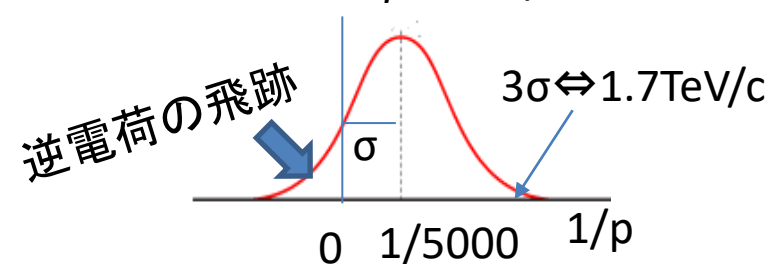
N=13, B=2T, L=1m, σ=20μmの場合

$$\left(\frac{\Delta p}{p}\right) = \frac{p \times 20 \times 10^{-6}}{0.3 \times 2 \times 1^2} \sqrt{\frac{740}{13+4}} = 0.02\% p [\text{GeV}/c]$$

=2% @ p=100GeV/c

=100% @ p=5TeV/c

p=5TeV/cの場合



$$\frac{L/2}{\rho} = \sin \alpha \sim \alpha \Rightarrow \alpha = \frac{L}{2\rho}$$

$$s = \rho(1 - \cos \alpha) \sim \rho \left(1 - 1 + \frac{1}{2}\alpha^2\right) = \frac{1}{2}\rho\alpha^2 = \frac{0.3BL^2}{8p}$$

$$p = 0.3B\rho$$

[GeV/c] [T][m]

$$p = qB\rho \text{ (MKS)}$$

$$p/[\text{GeV}/c] = [c/G]q/[e]B\rho$$

$$= 0.3 [q/e]B\rho$$

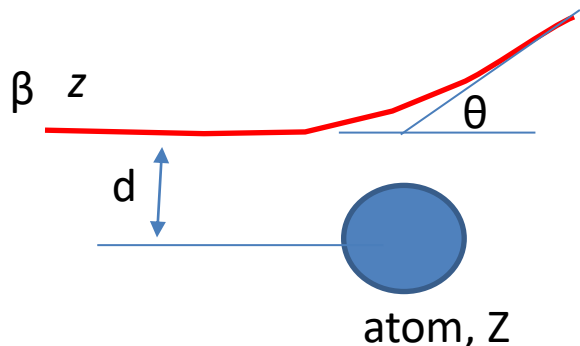
↑
素電荷で割った電荷

運動量分解能を良くするには

- 位置分解能をσを良くする
- 磁場Bを強くする
- 磁場のサイズLを大きくする
- 測定点数Nを増やす...

クーロン多重散乱

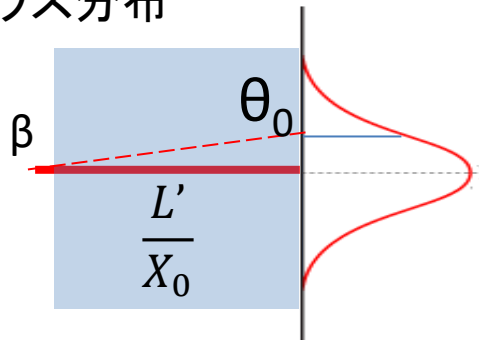
- 単に「測定点数Nを増やす」ではだめで



Rutherford scattering

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{zZ\alpha}{2mv^2 \left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2}\right)^2$$

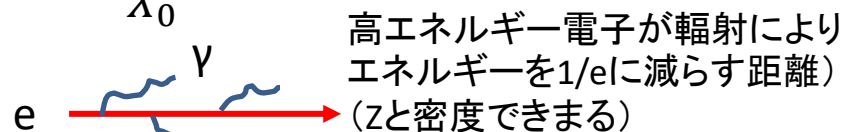
多くの散乱を繰り返すと
ガウス分布



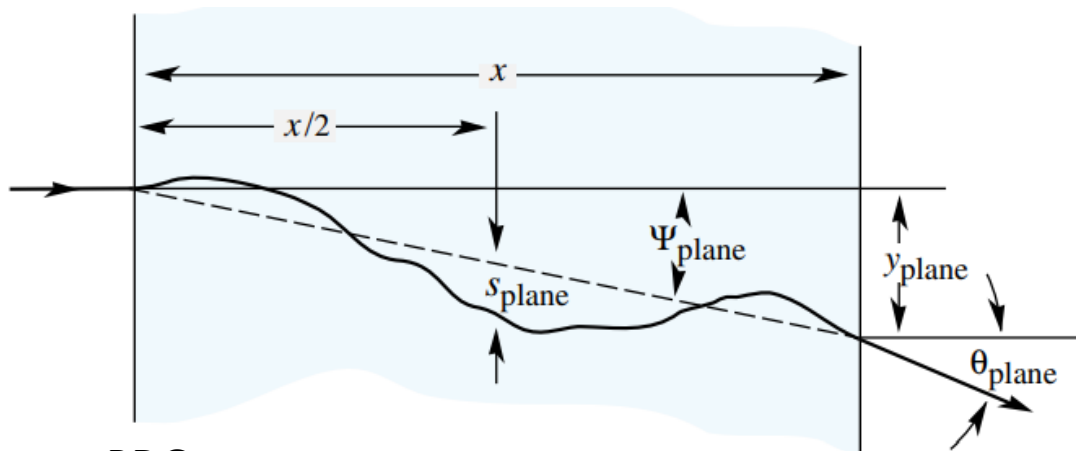
実験を再現する良い近似式

$$\theta_0 = \frac{13.6 \times 10^{-3} [\text{GeV}]}{p\beta c} Z \sqrt{\frac{L'}{X_0}}$$

$\frac{L'}{X_0}$: 物質長を放射長で割ったもの



$$X_0(\text{Si}) = 9.4\text{cm}$$

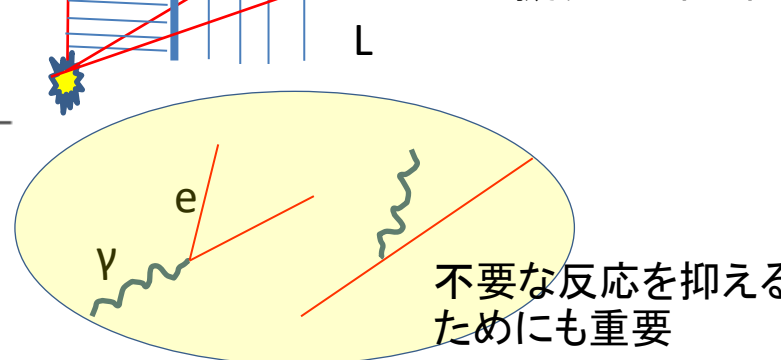
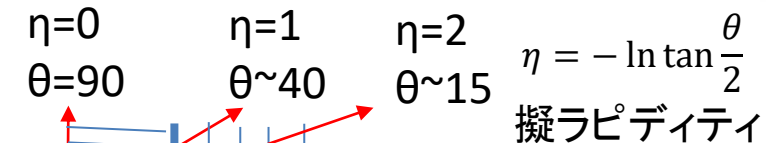
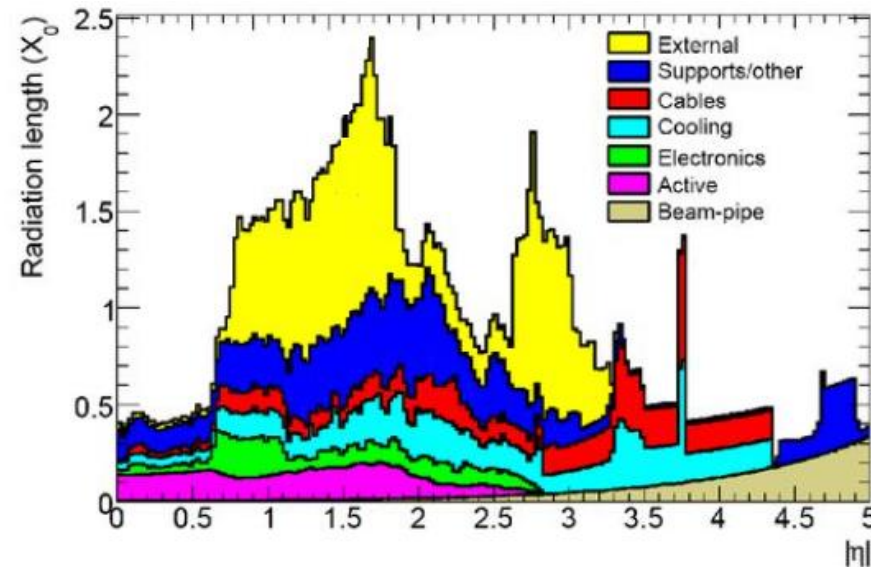


PDG

$$s_{\text{plane-MS}} = \frac{x}{4\sqrt{3}} \theta_0$$

物質量を抑える必要

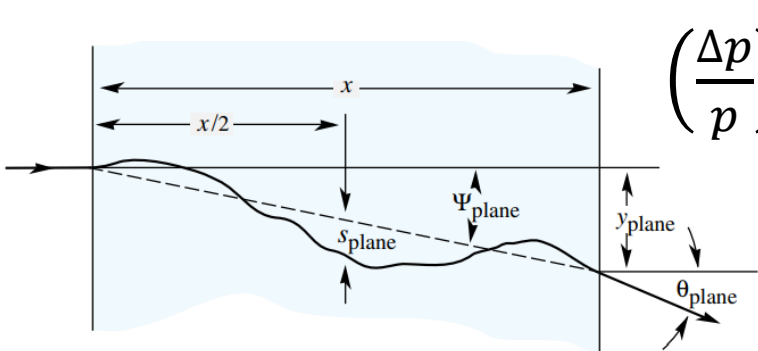
現行ATLAS内部飛跡検出器の物質量



運動量分解能-多重散乱の影響

$$\Delta \frac{1}{p} = \left(\frac{\Delta p}{p} \right) \frac{1}{p} = \frac{8}{0.3BL^2} \Delta s$$

s測定に多重散乱による不定性加わる

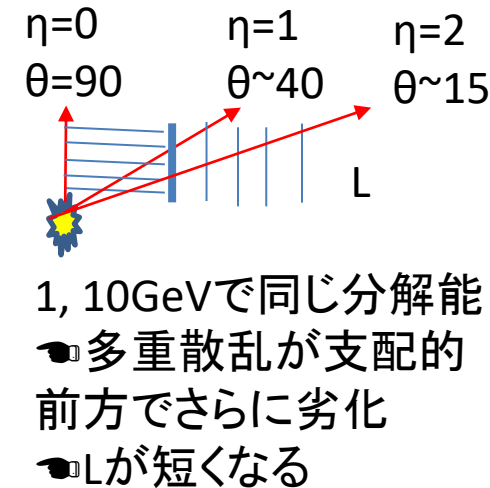
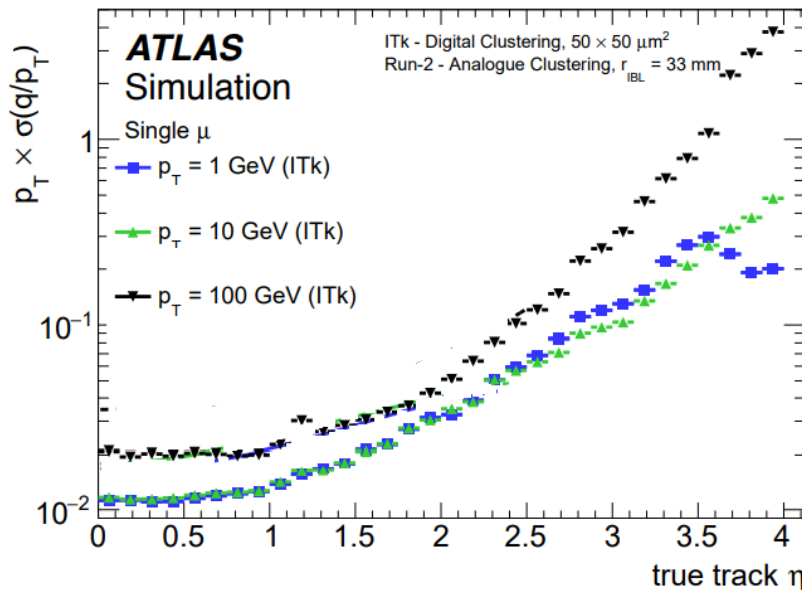
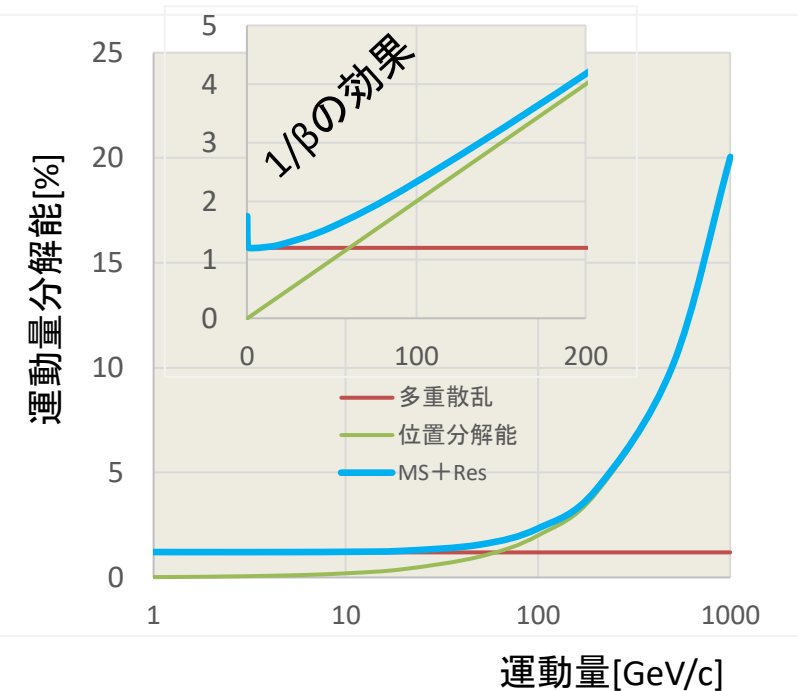


$$\left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{MS} = \frac{8p}{0.3BL^2} s_{\text{plane-MS}} = \frac{8p}{0.3BL^2} \frac{L}{4\sqrt{3}} \frac{13.6 \times 10^{-3}}{p\beta} \sqrt{\frac{L'}{X_0}} = \frac{5.23 \times 10^{-2}}{BL\beta} \sqrt{\frac{L'}{X_0}}$$

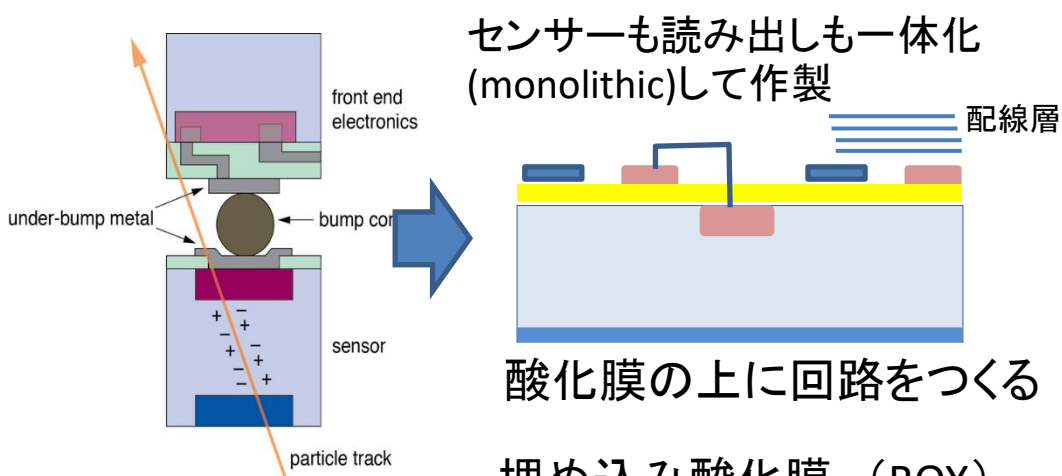
$L'/X_0 \sim 0.15, B=2T, L=1m$ の場合

L'/X_0 :放射長単位での
検出器部分の長さ

$$\left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{MS} = 1.2\% / \beta \quad \dots \text{運動量にほぼ無関係}$$

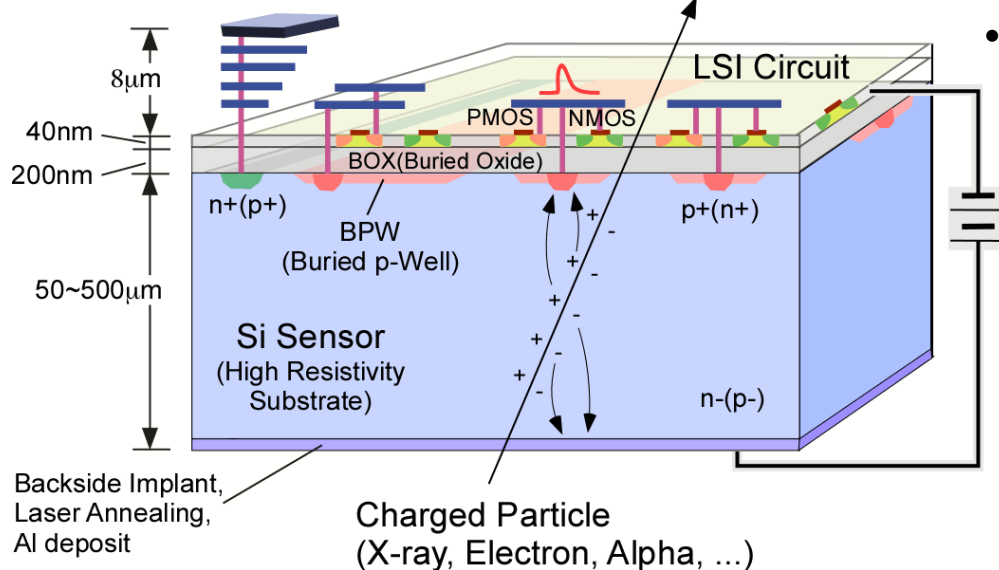


Monolithic pixel : Silicon-on-insulator

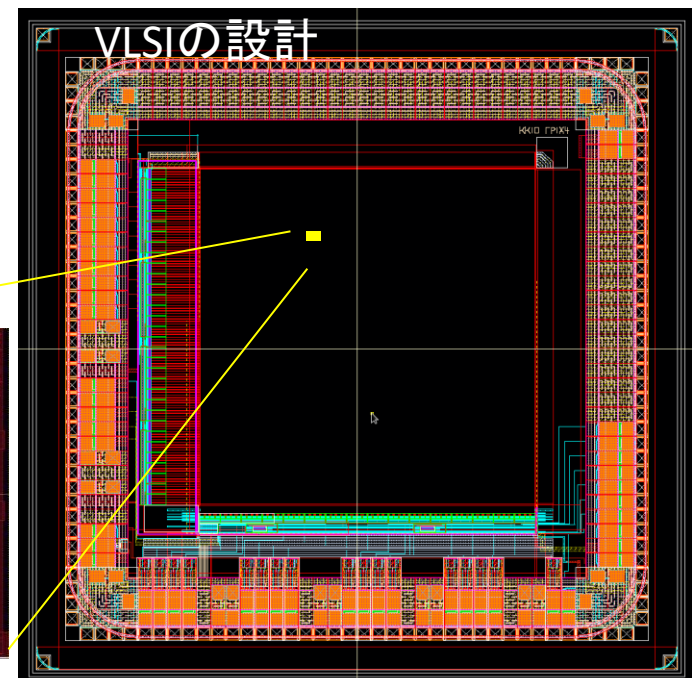
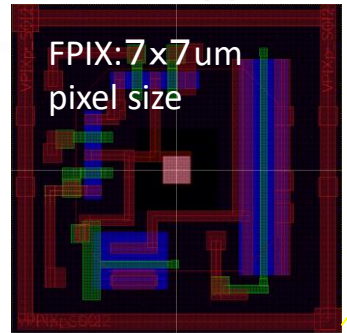
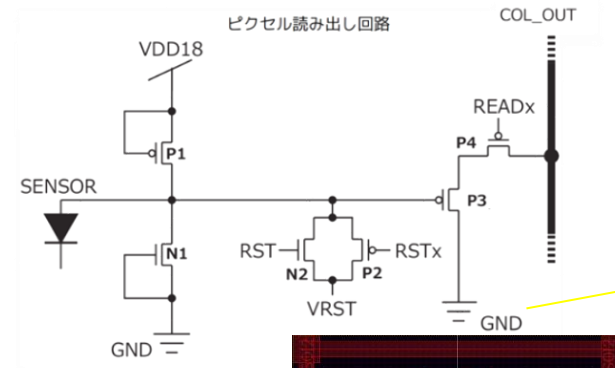
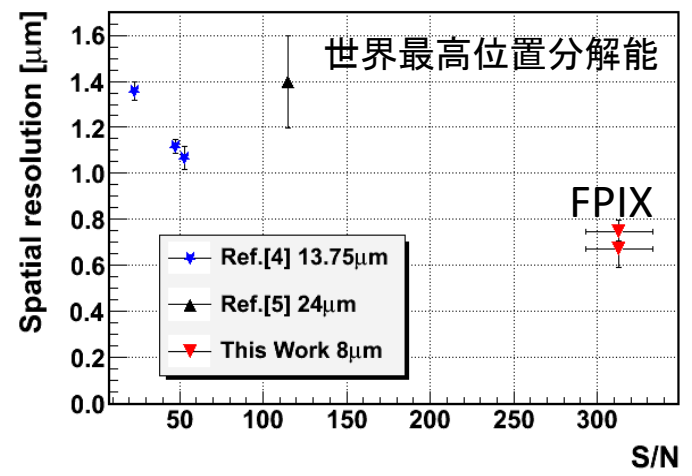


“hybrid”

“monolithic”

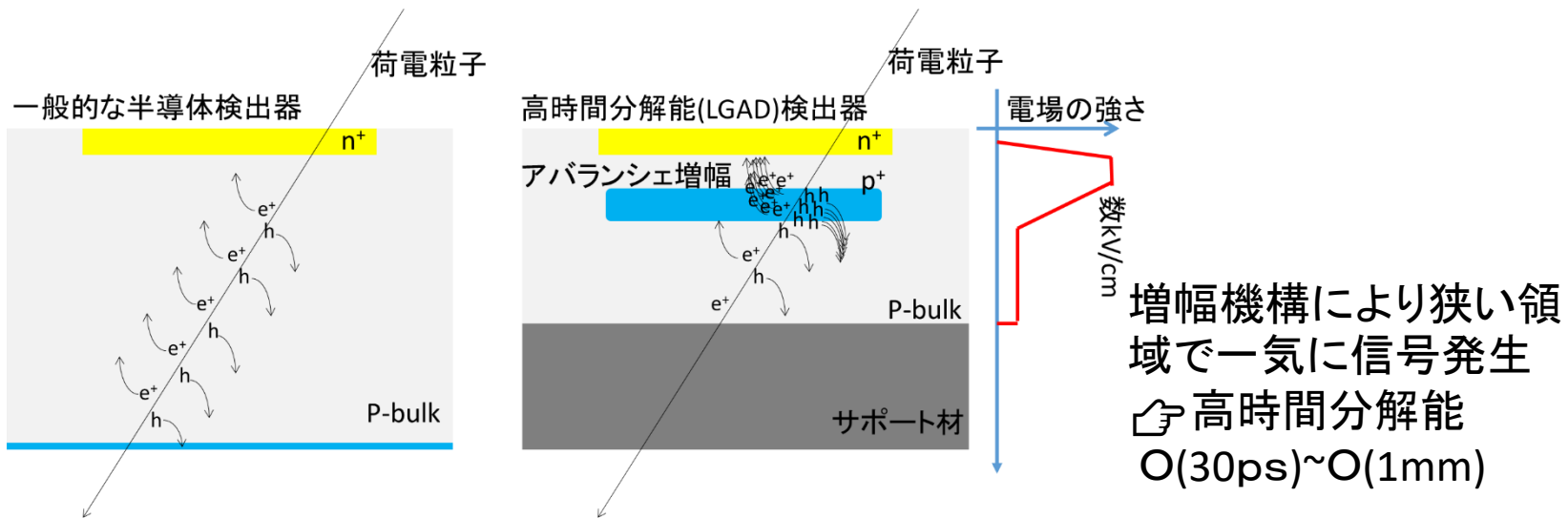
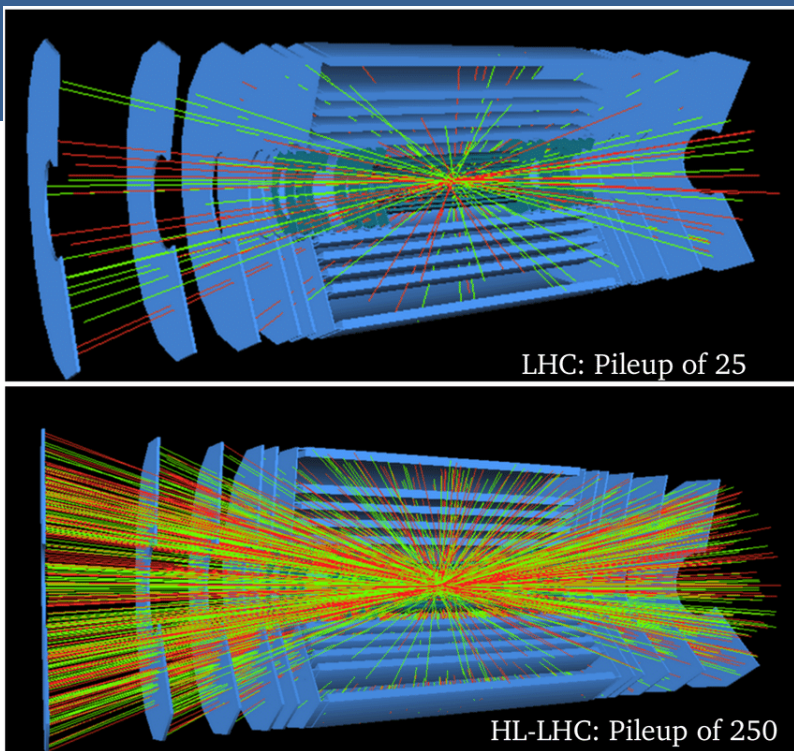


- 微細ピクセル可
- 低物質質量
- 組立簡素化

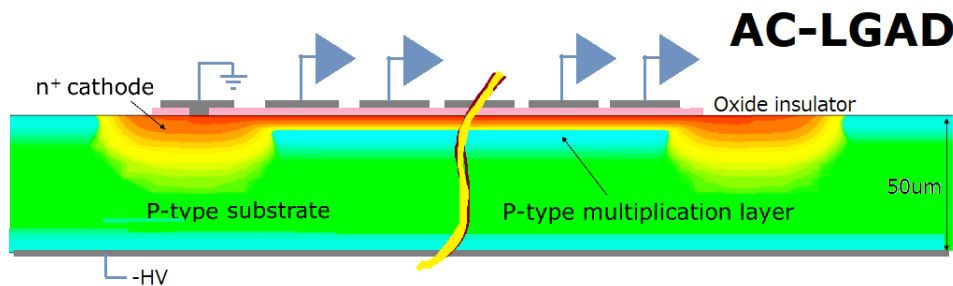
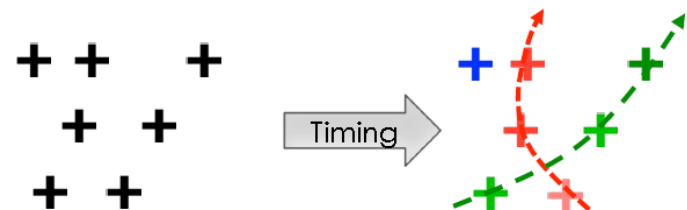



4D sensor - LGAD

Low gain avalanche diode

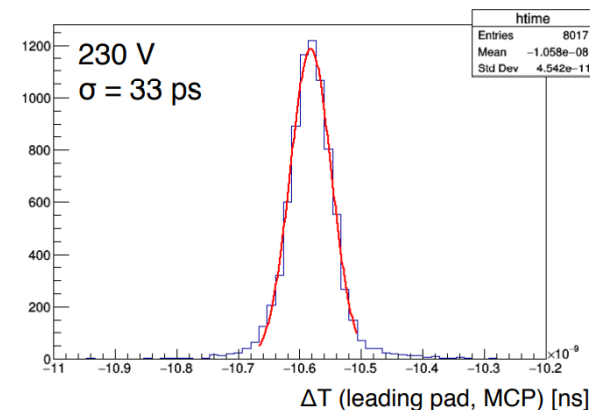


まれに発生するイベントを観測する
 ☑ ビーム輝度をさらに上げる
 ☑ もっと多くの粒子が発生
 位置分解能の向上だけで良いのか?
 ☑ 時間分解能にも優れた4D検出器



酸化膜を介してAC的に信号を読み出すことで
 高位置分解能も達成できる

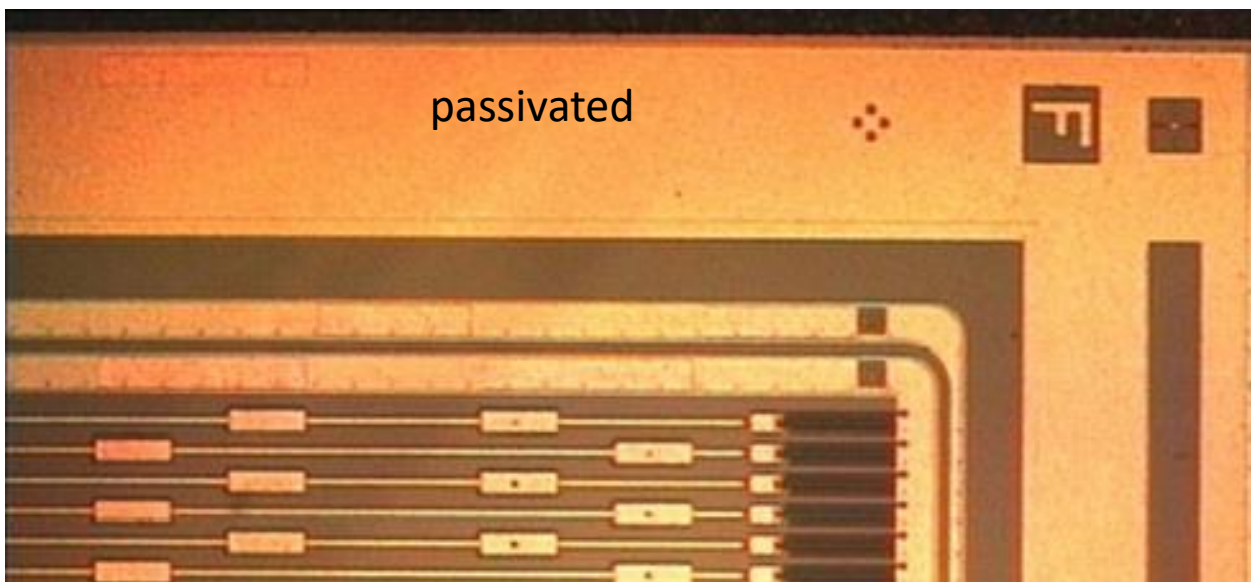
B-2, primary pad only, 230 V



半導体検出器使用上の注意

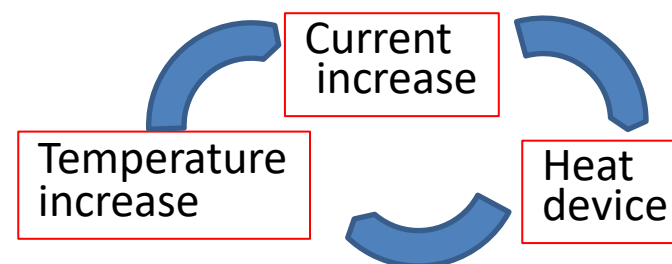
- ✓ 製造時は不良品の原因となるのでクリーン度は重要
試験時の極端なクリーン環境は必要がないが、ダスト起因のトラブル(スパークとか)は発生する
センサーの表面はSiO₂ または相当の “passivation” (不活性化膜) で覆われている (wire-bonding pads 等は除く)
- ✓ イオンが酸化膜にトラップされると絶縁性能が劣化する(HVがかからなくなったり).
Na⁺ は典型的な人間起因のイオン(汗): **Do not touch by hand**
- ✓ MOS 構造の薄い絶縁膜は静電気に弱い: **触る前に静電気放電を**
- ✓ 大きな暗電流を流しつづけると損傷: **Limit the current** (1mA is too high)
- ✓ 熱暴走に注意...: **適切な排熱系・冷却系が必要**

$$j_{gen} \propto T^2 \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right]$$



温度高い → より多くのキャリアが伝導帯に
 ☞ センサーの暗電流が上昇
 ☞ 温度がさらに上がる
 ☞ センサーの暗電流が上昇

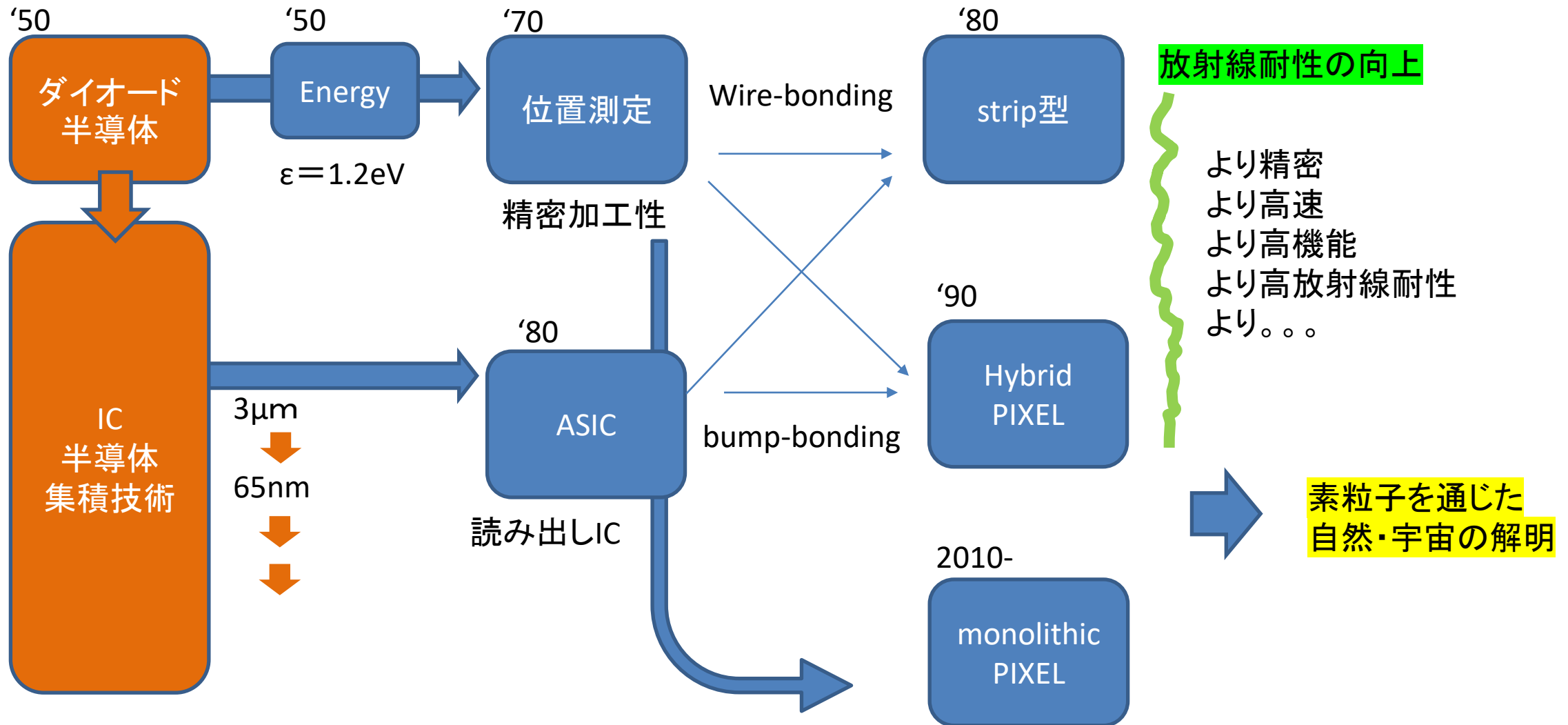
熱暴走



半導体に特有な性質

最後にひとこと

素粒子実験：有用な技術は何でも使う



課題

(1) シリコン検出器の良い点、悪い点を挙げよ

項目は箇条書きにし、必要な説明をそれぞれに記せ

(2) 素粒子実験に用いるために、検出器にどのような工夫がなされてきたか例を挙げ説明せよ

(1)

良い点

- Aaaaa
○○○○○.....
- Bbbbb
○○○○○.....

悪い点

- Aaaaa
○○○○○.....
- Bbbbb
○○○○○.....

(2)

A4で1~2ページを目安に