

Hyper Suprime-Cam



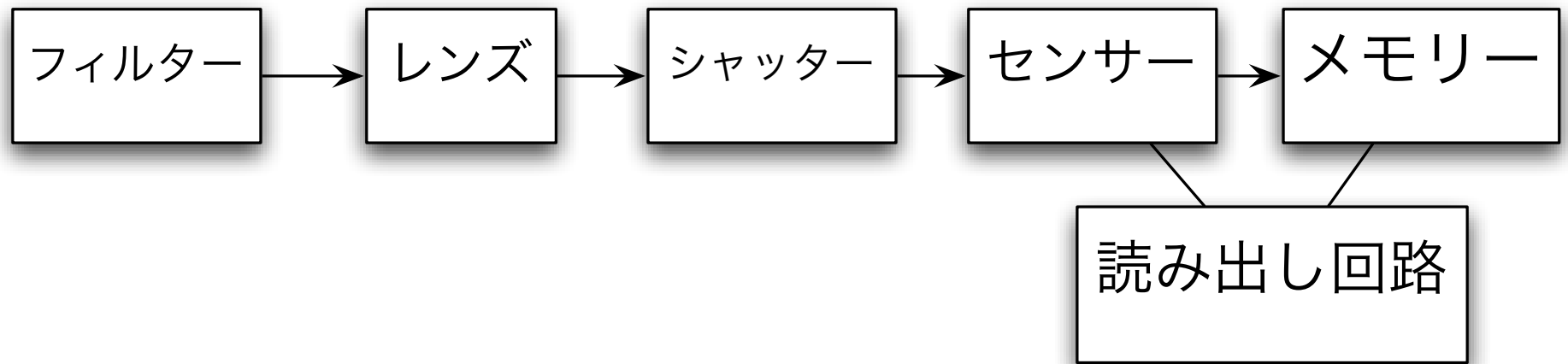
宮崎 聡

国立天文台・HSCプロジェクト

- HSCの紹介
- 要素技術
 - 高感度CCDと読み出し回路
 - 大型光学系の製作
 - 高結像性能を実現する機械系
- 将来計画

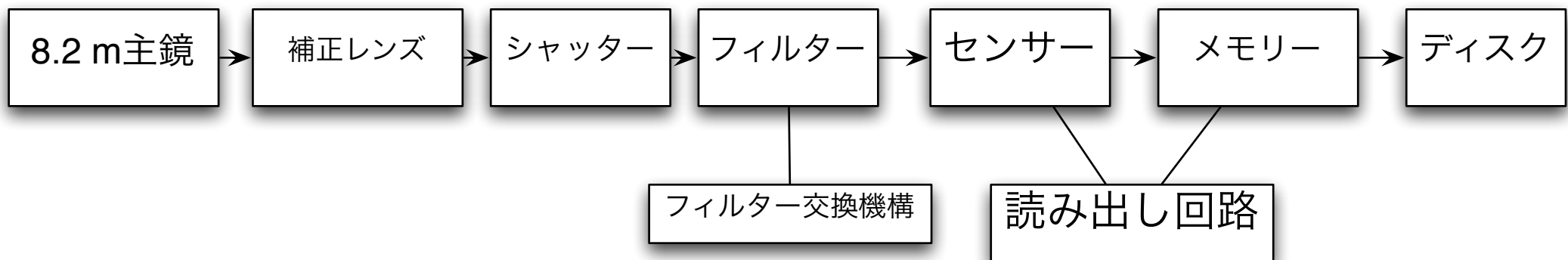
Camera

光電変換





Prime Focus Camera

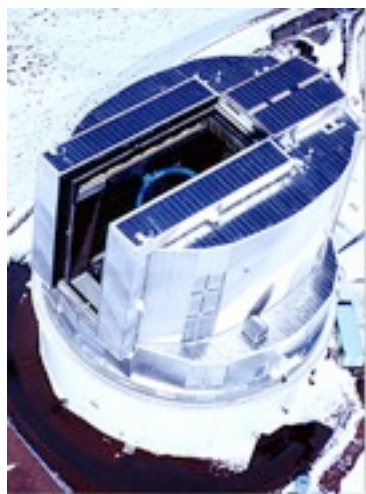


← Hyper Suprime-Cam →

すばる望遠鏡

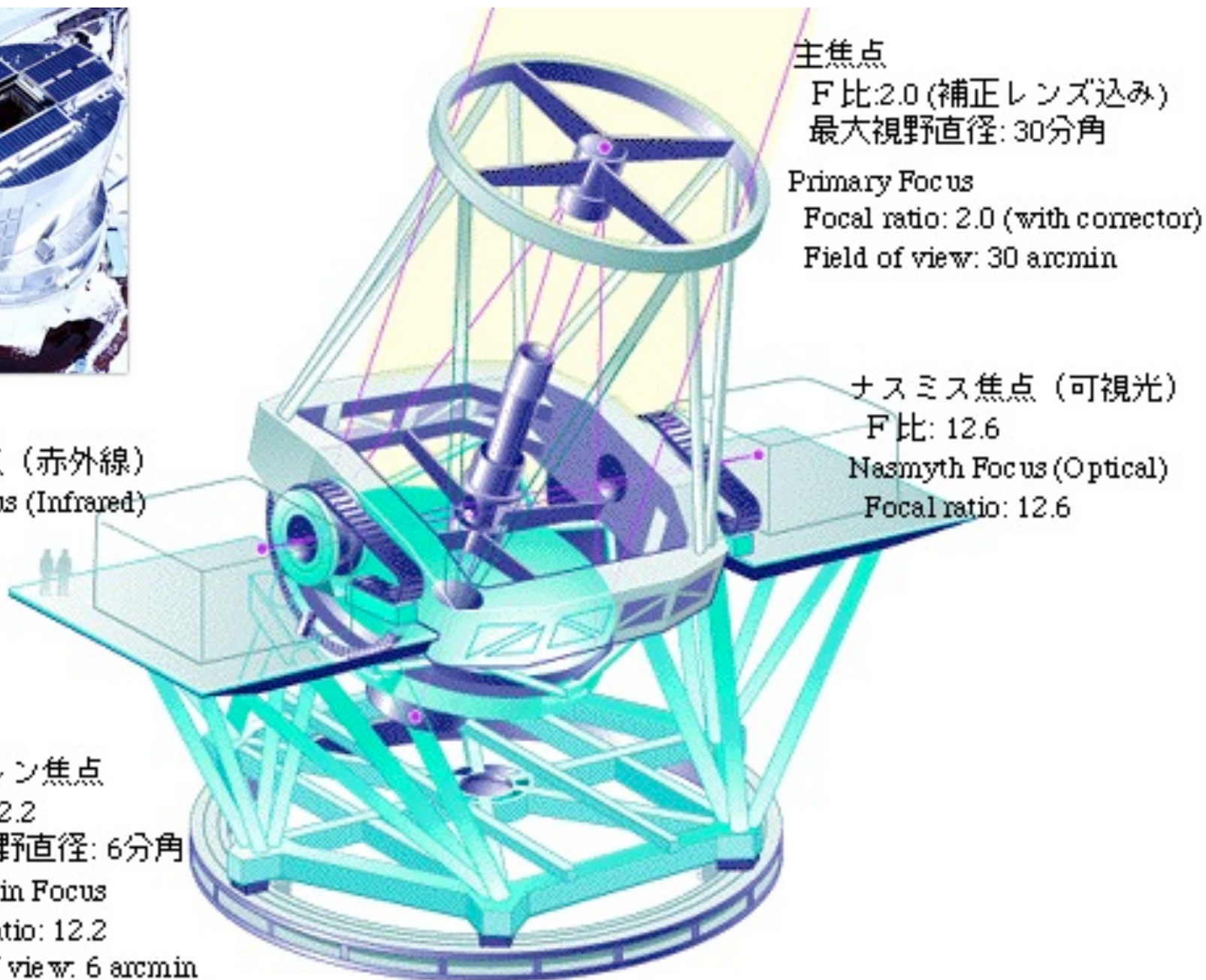


すばる望遠鏡の焦点



ナスミス焦点 (赤外線)
Nasmyth Focus (Infrared)

カセグレン焦点
F比: 12.2
最大視野直径: 6分角
Cassegrain Focus
Focal ratio: 12.2
Field of view: 6 arcmin



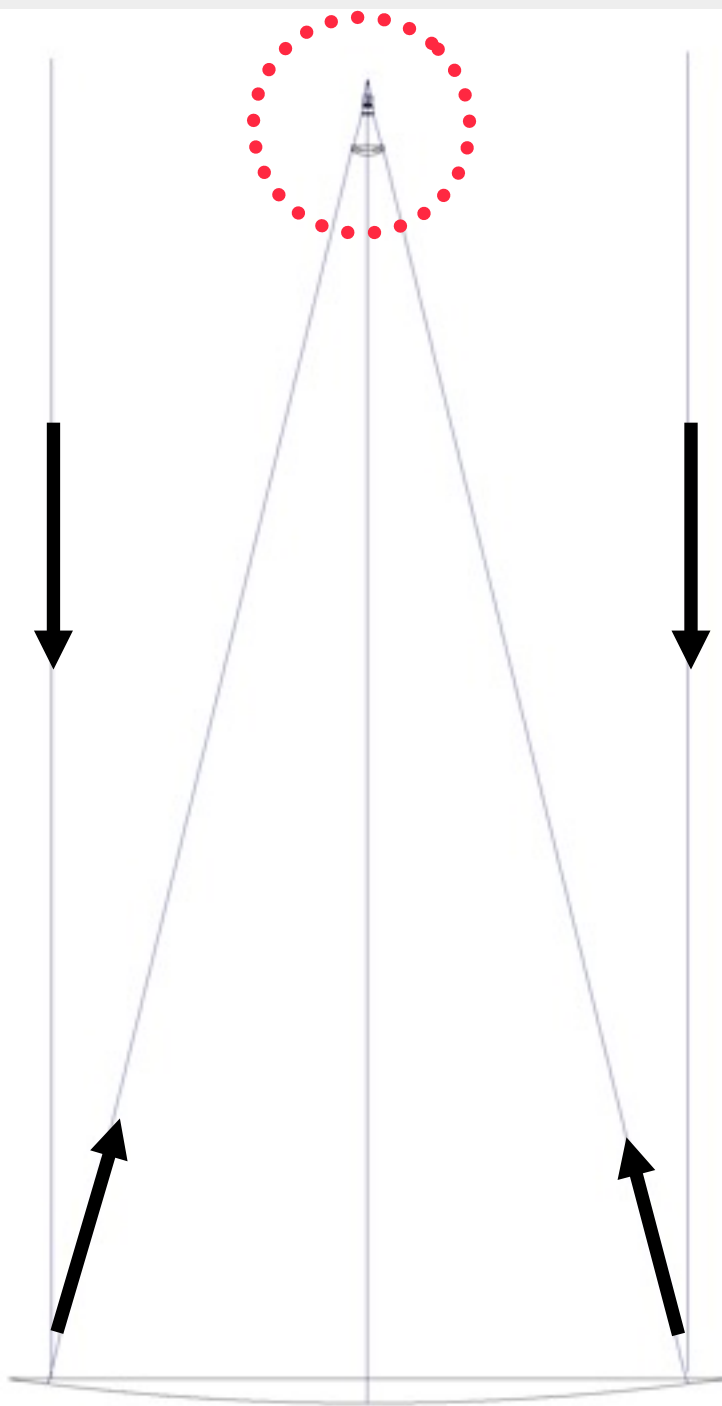
主焦点
F比: 2.0 (補正レンズ込み)
最大視野直径: 30分角

Primary Focus
Focal ratio: 2.0 (with corrector)
Field of view: 30 arcmin

ナスミス焦点 (可視光)
F比: 12.6
Nasmyth Focus (Optical)
Focal ratio: 12.6



すばる 主焦点



焦点距離 16400 mm

口径比 F/2

M1 8.2 m



Hyper Suprime-Cam

モザイクCCDカメラ

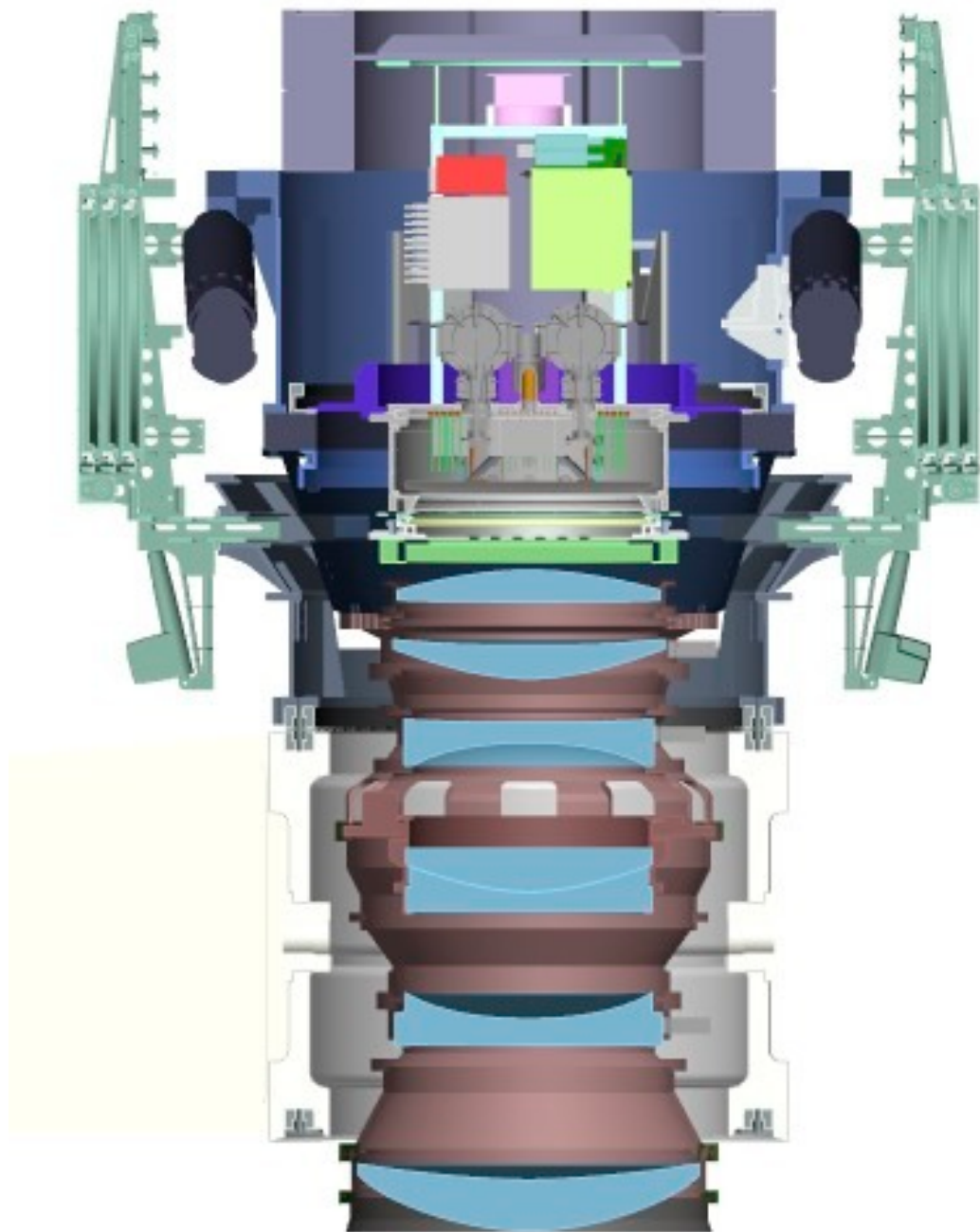
	Suprime-Cam	HSC
Field of View	0.5 deg	1.5 deg
No. of CCDs	10	116
Inst. Img Qlty	0".33	0".35
First Light	1999	(2012)



Hyper Suprime-Cam

	HSC	Pan-STARRS	DES	LSST
Aperture [m]	8.2	1.8	4.0	6.5(eq)
Survey Speed	91	13.4	37	329
Inst. Img Qlty	0".35	~ 0".6	~ 0".6	?
First Light	(2012)	2009	(2012)	(2019)
Lead Country	JP	US	US	US

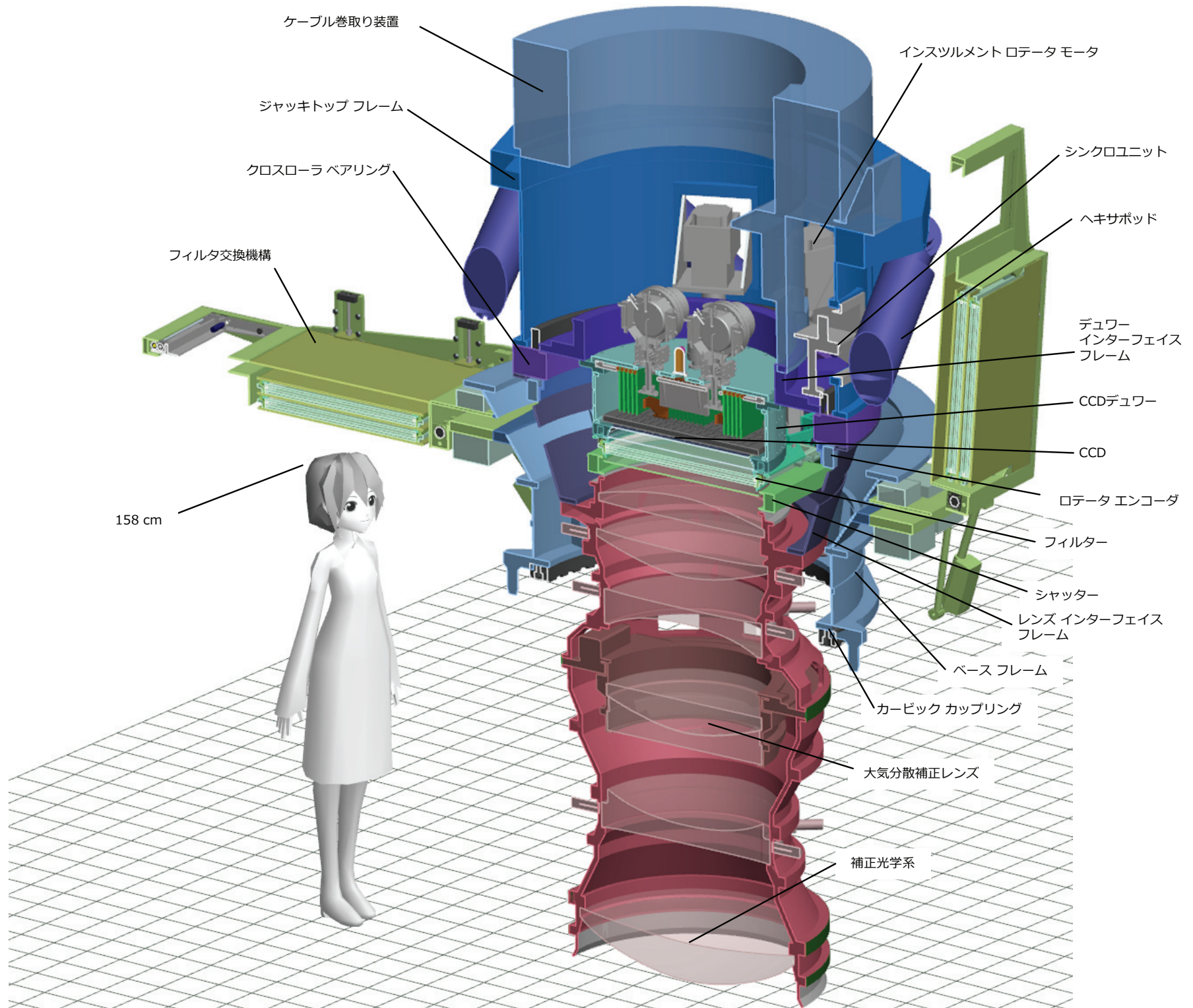
HSC



PFU

Camera

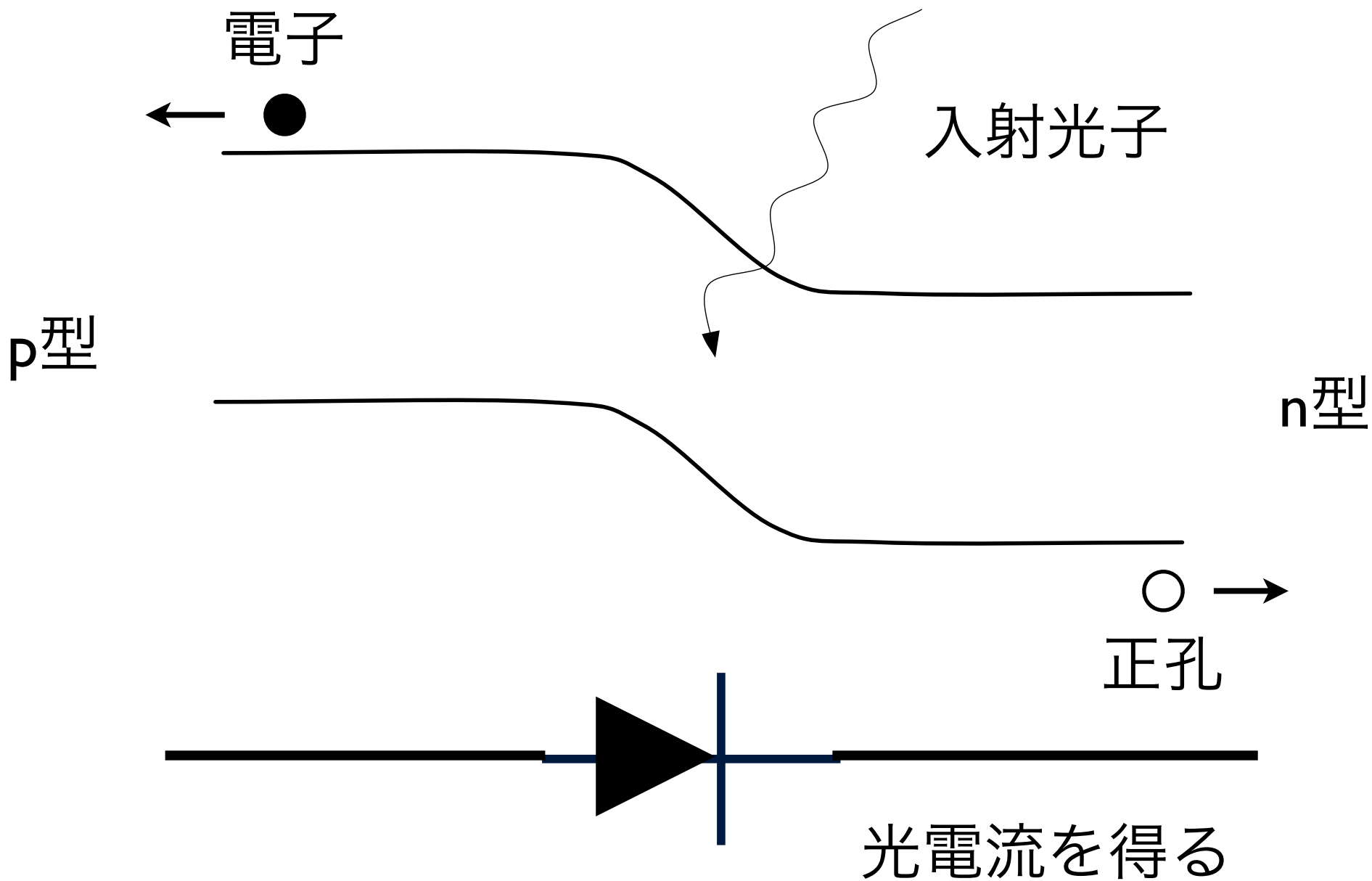
WFC





高感度CCDと読み出し回路

ホトダイオード photodiode



入射光

空乏層

p型Si

+

電子

左図を簡単に示すために、
電極の下に電子の雲が引き寄せられているように書くことが多い

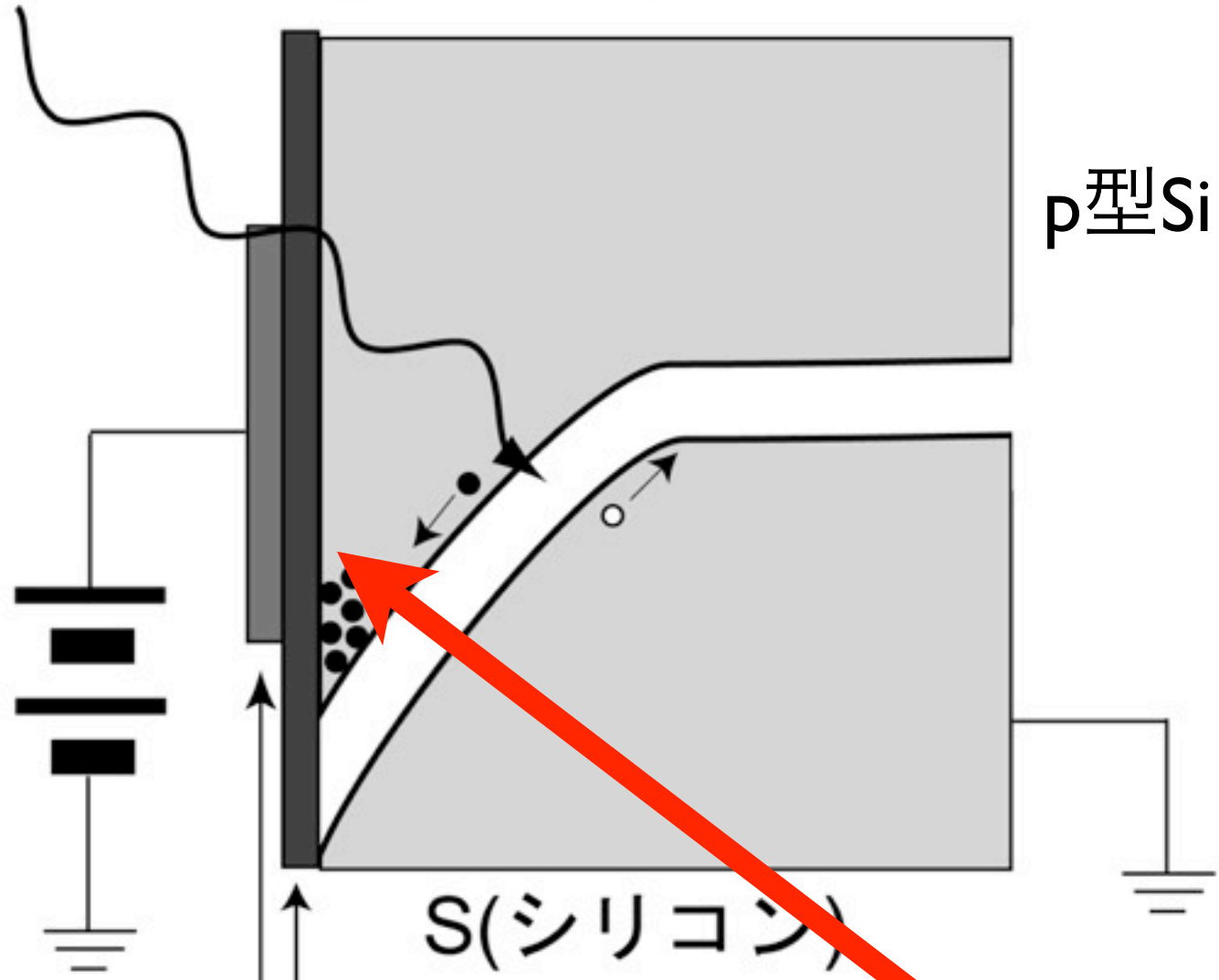
S(シリコン)

Oxide(酸化膜)

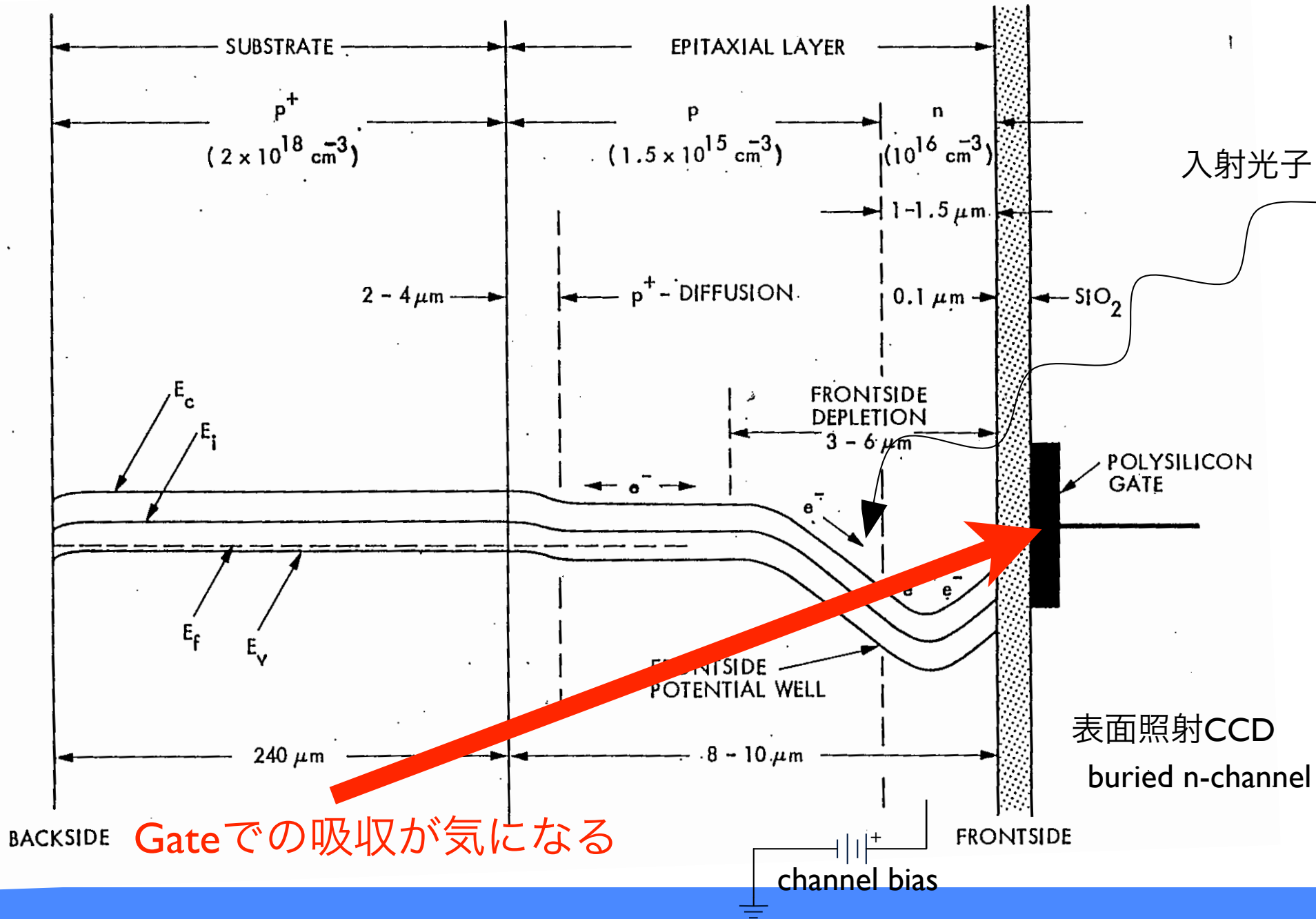
Metal(電極)

MOS構造

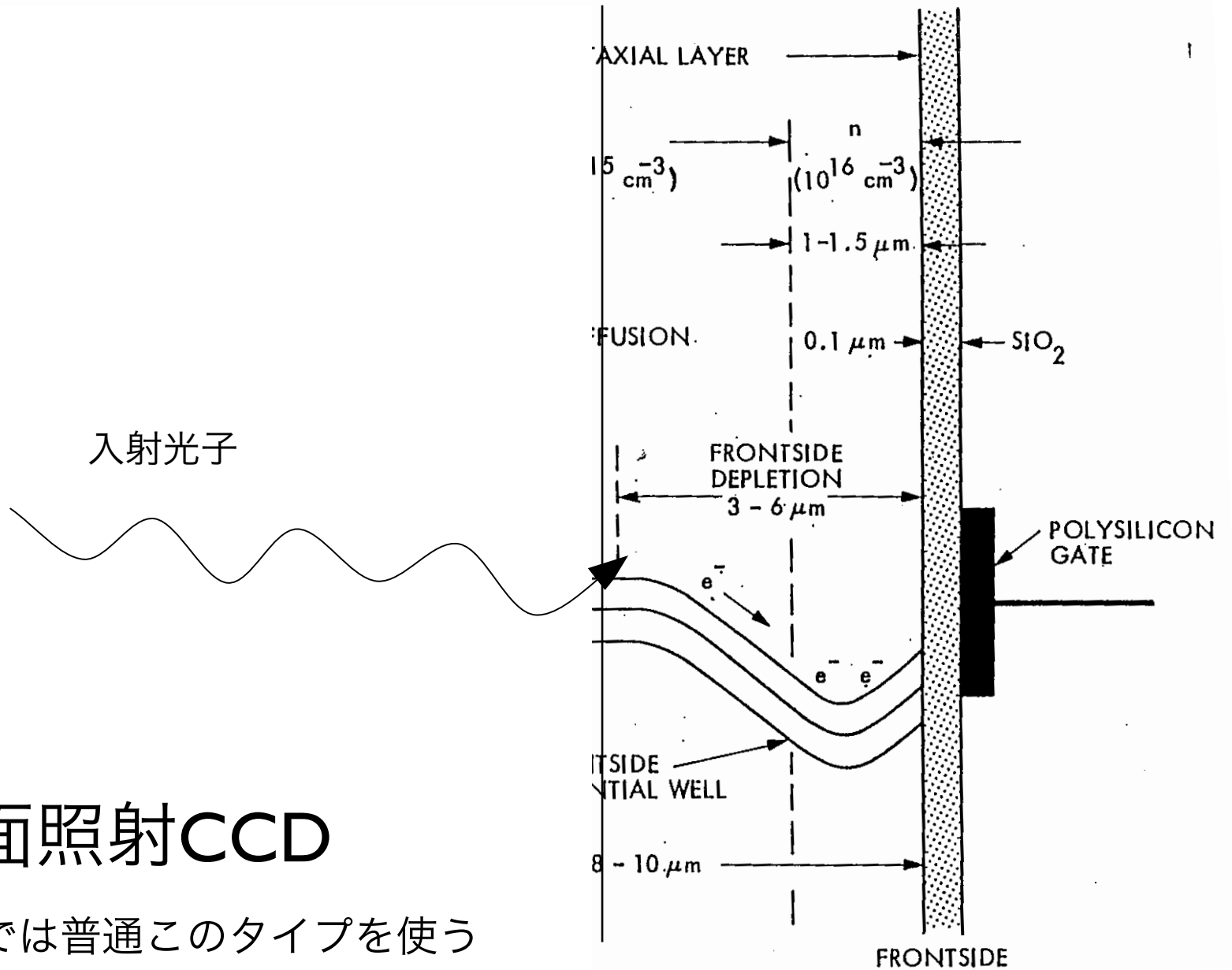
界面トラップが問題



本物のCCDの構造



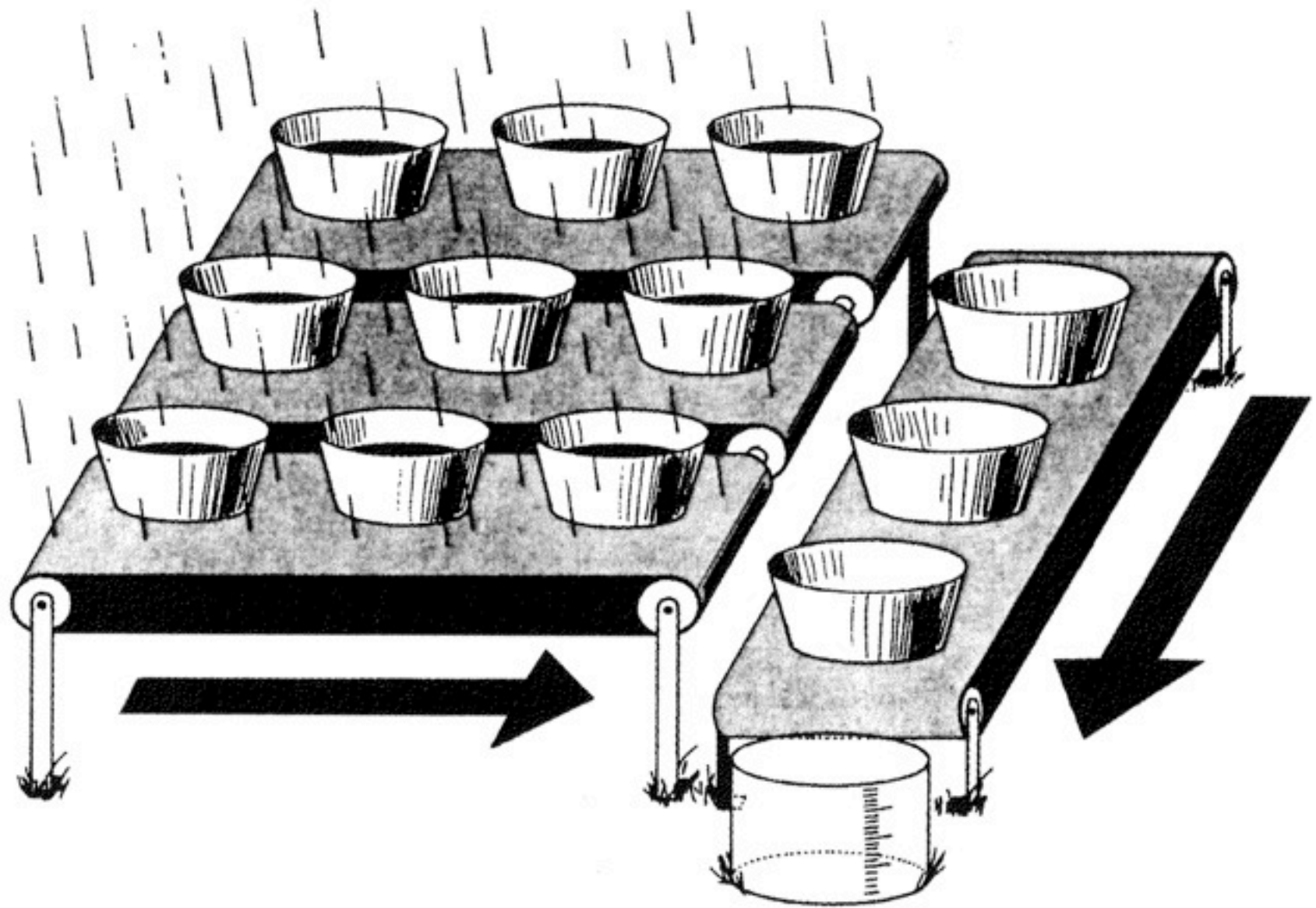
本物のCCDの構造



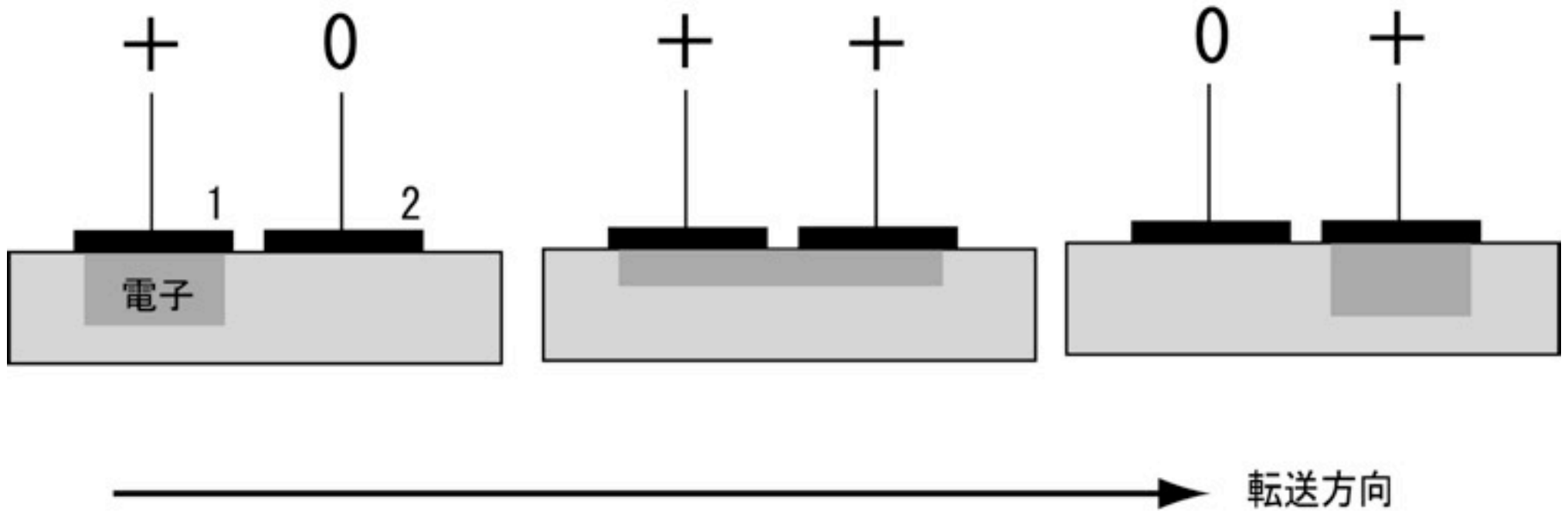
裏面照射CCD

天体観測では普通このタイプを使う

CCDの動作

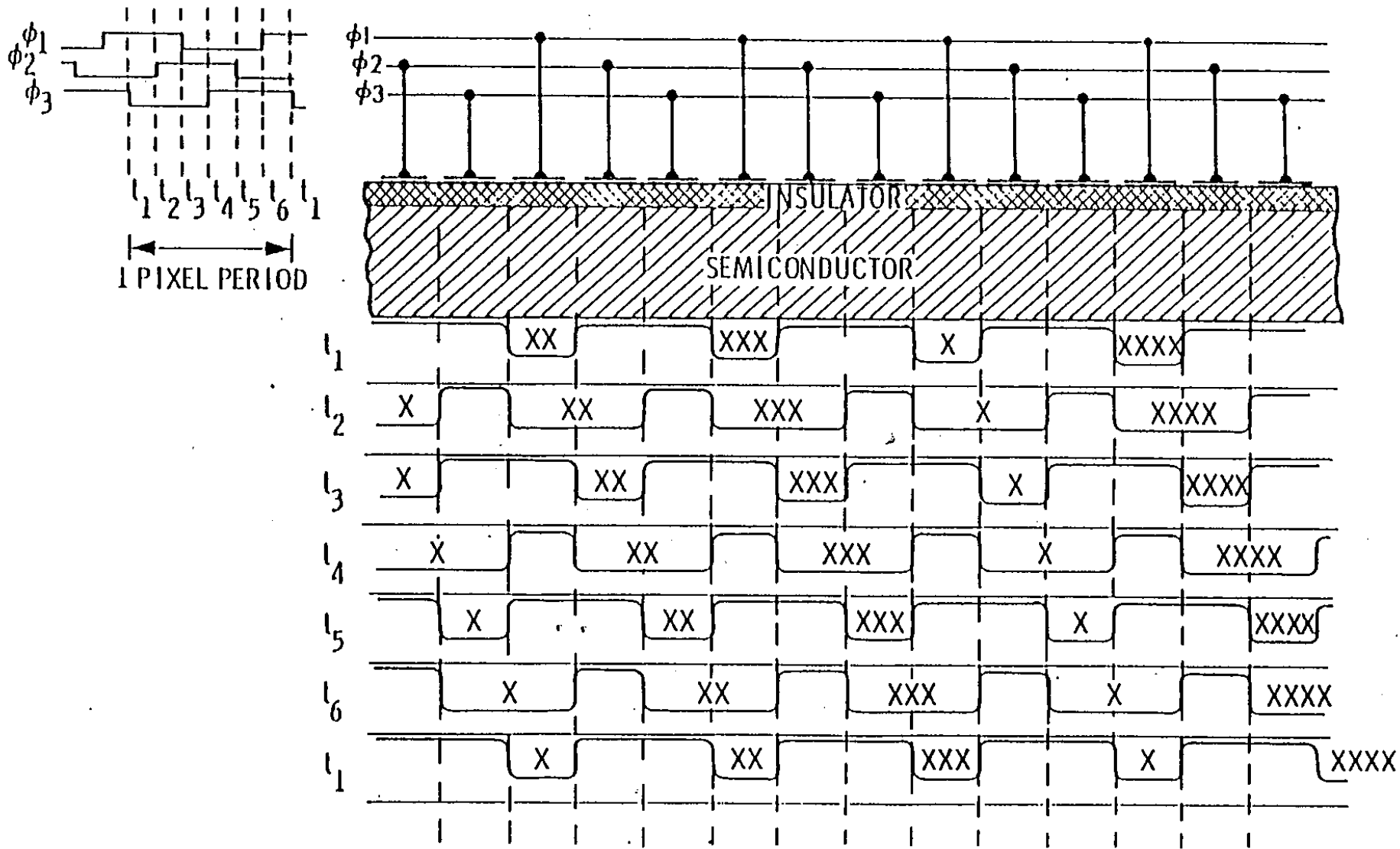


電荷の転送



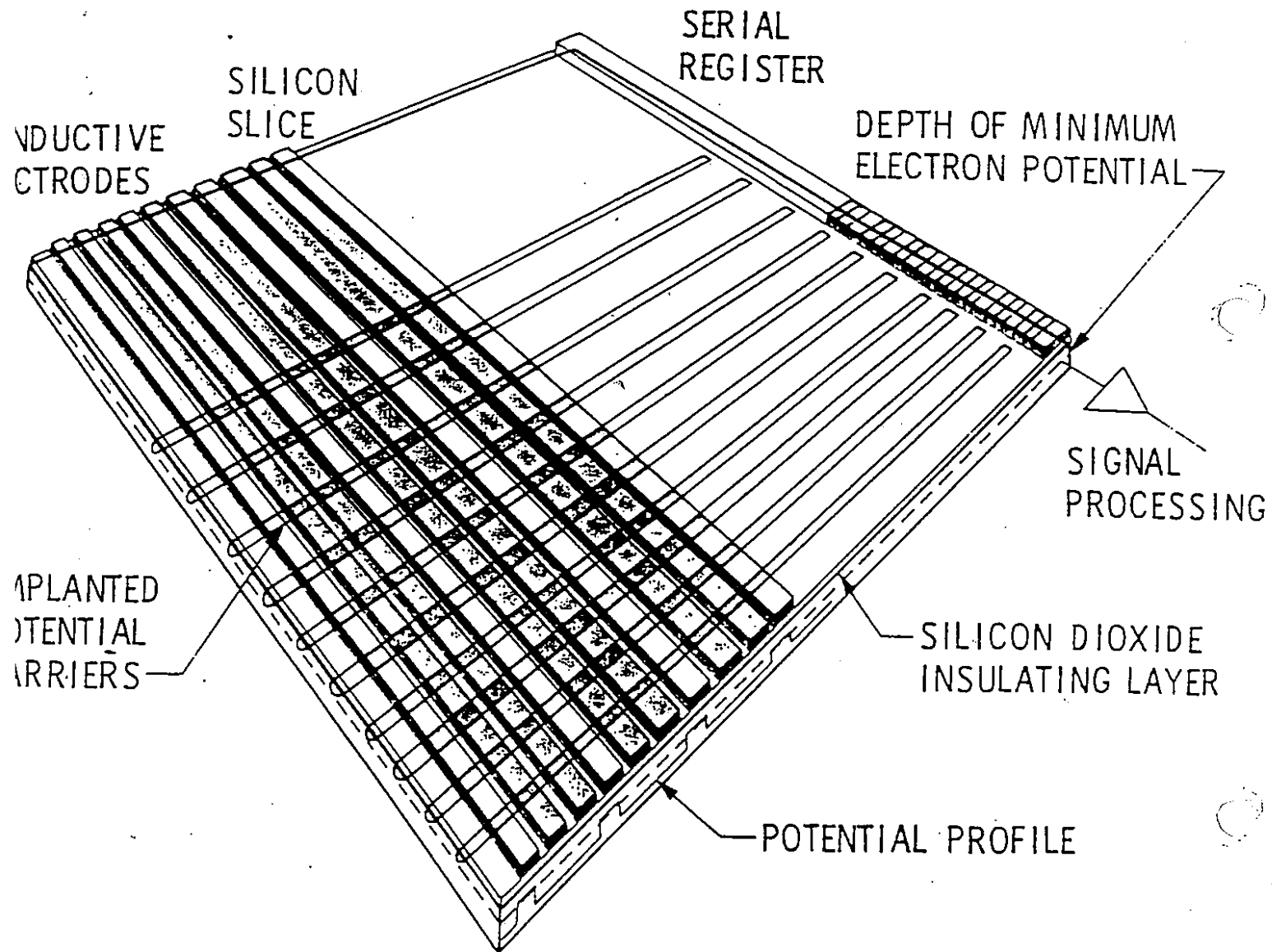
実はこのままでは動かない

電荷の転送

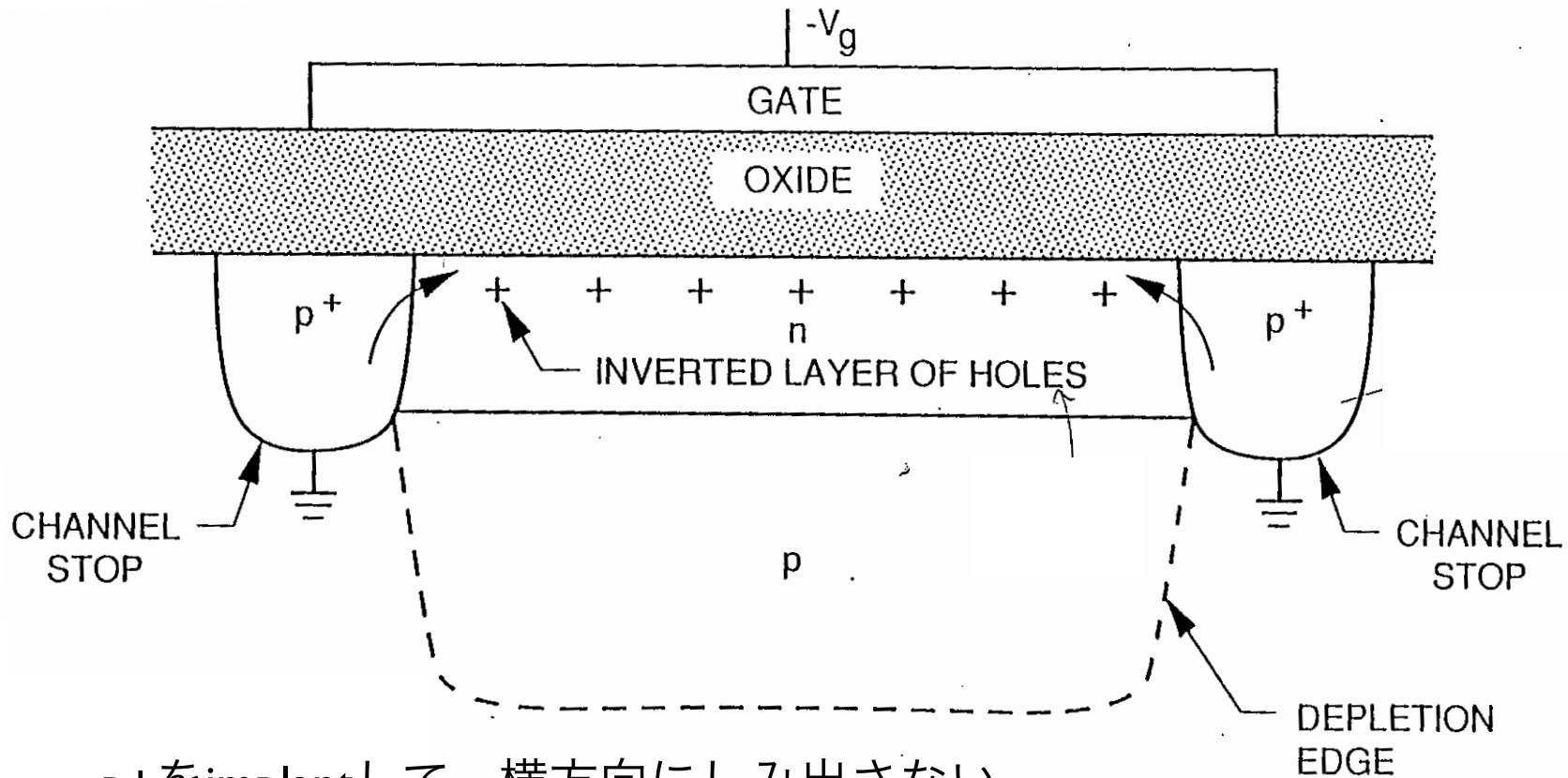


3相使うと転送できる

CCDの鳥瞰図



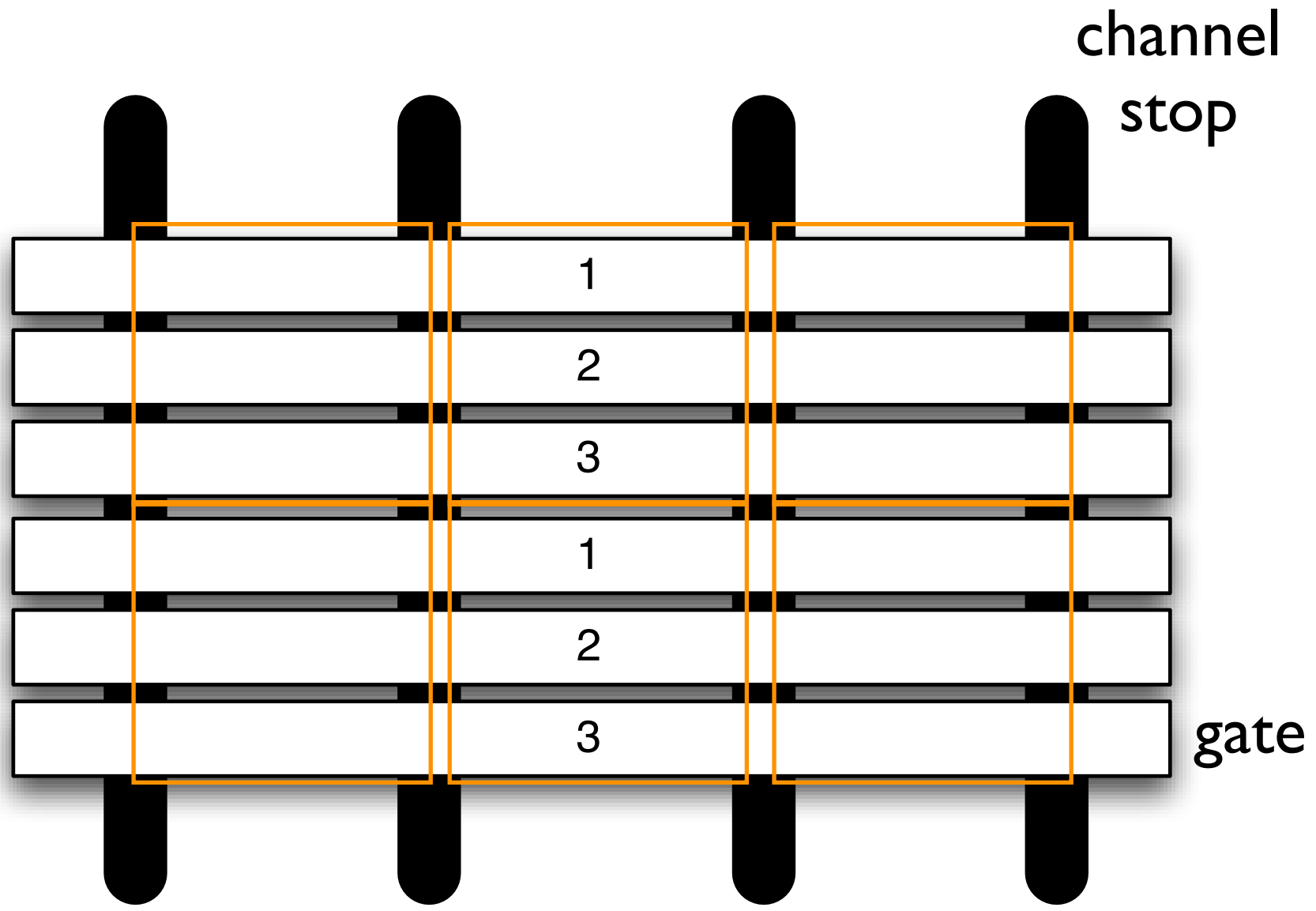
Channel Stop



p+をimplantして、横方向にしみ出さないように、電子に対して高い障壁を作っている

縦方向はゲート電圧で障壁が作られる

CCDのピクセル



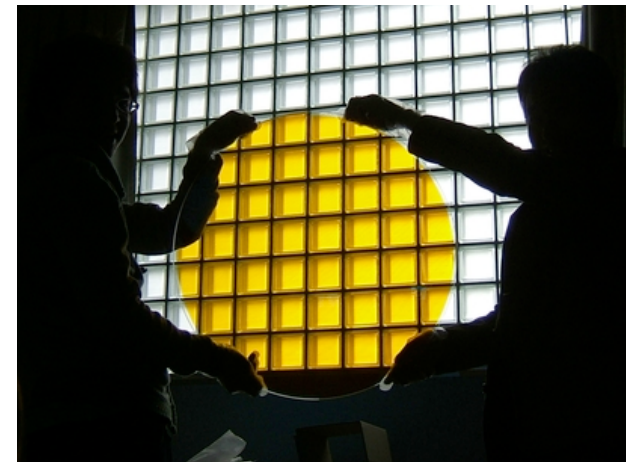
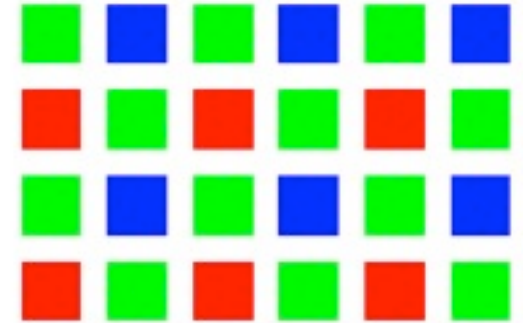
channel stopのpotentialはとても高い





カラーCCD(補足)

- 市販のカラー画像を出力するCCDはピクセルごとにRGBのカラーフィルターがついている
- 天体観測では汎用性を確保するため、CCDにフィルターを直接取り付けることはしない。
- 外部にフィルターを置く



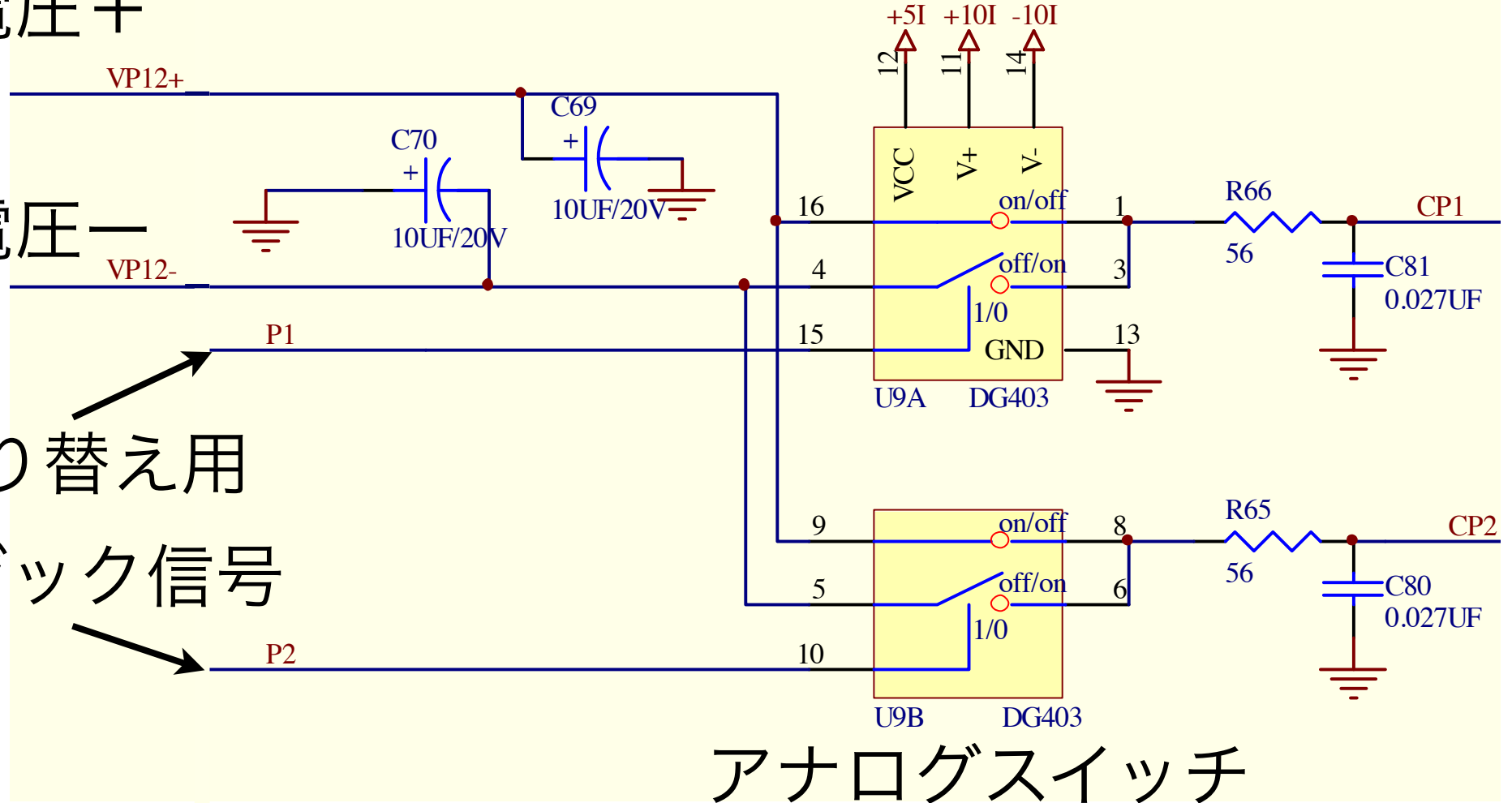
CCDの駆動回路のエッセンス

定電圧+

定電圧-

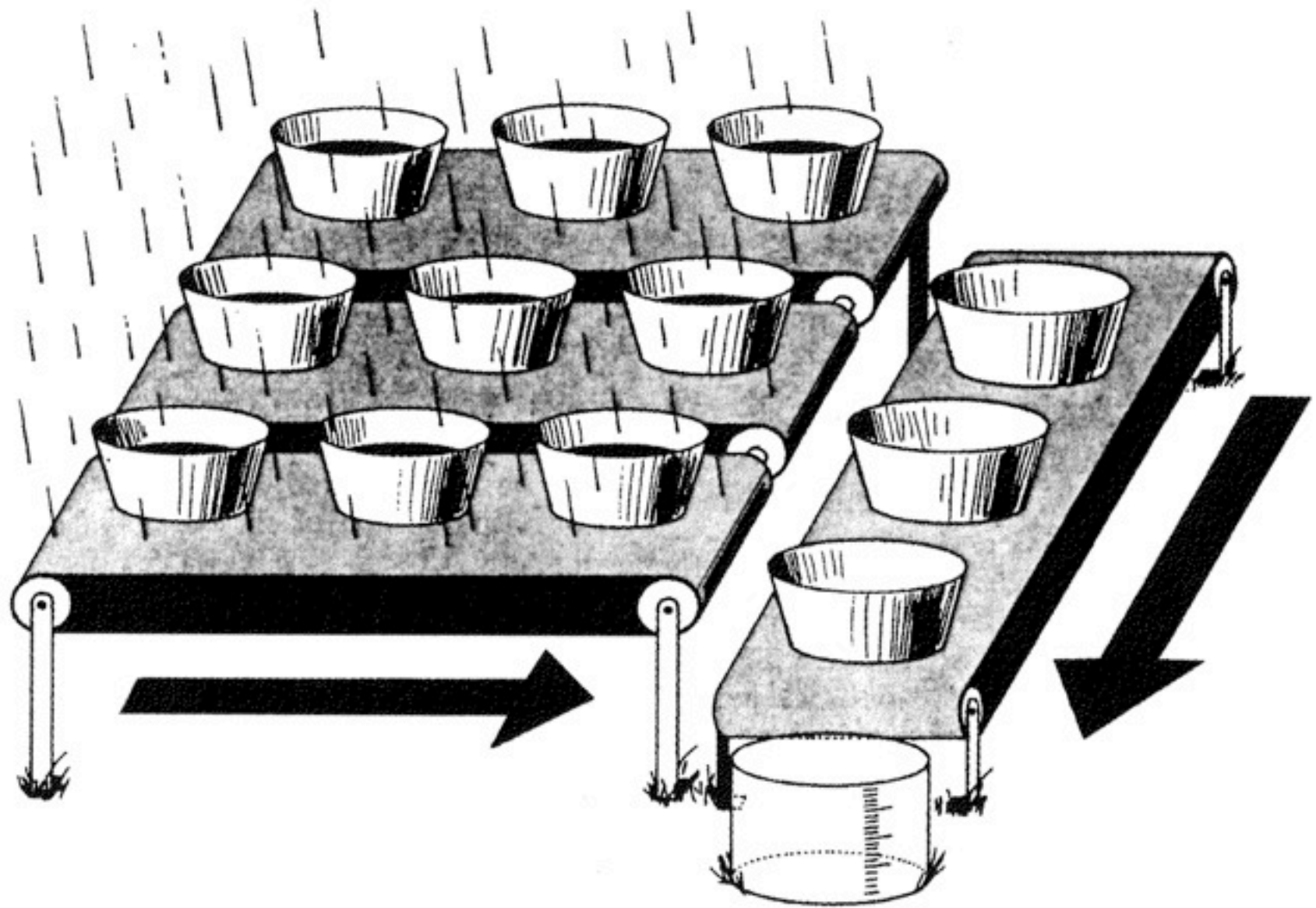
切り替え用

ロジック信号

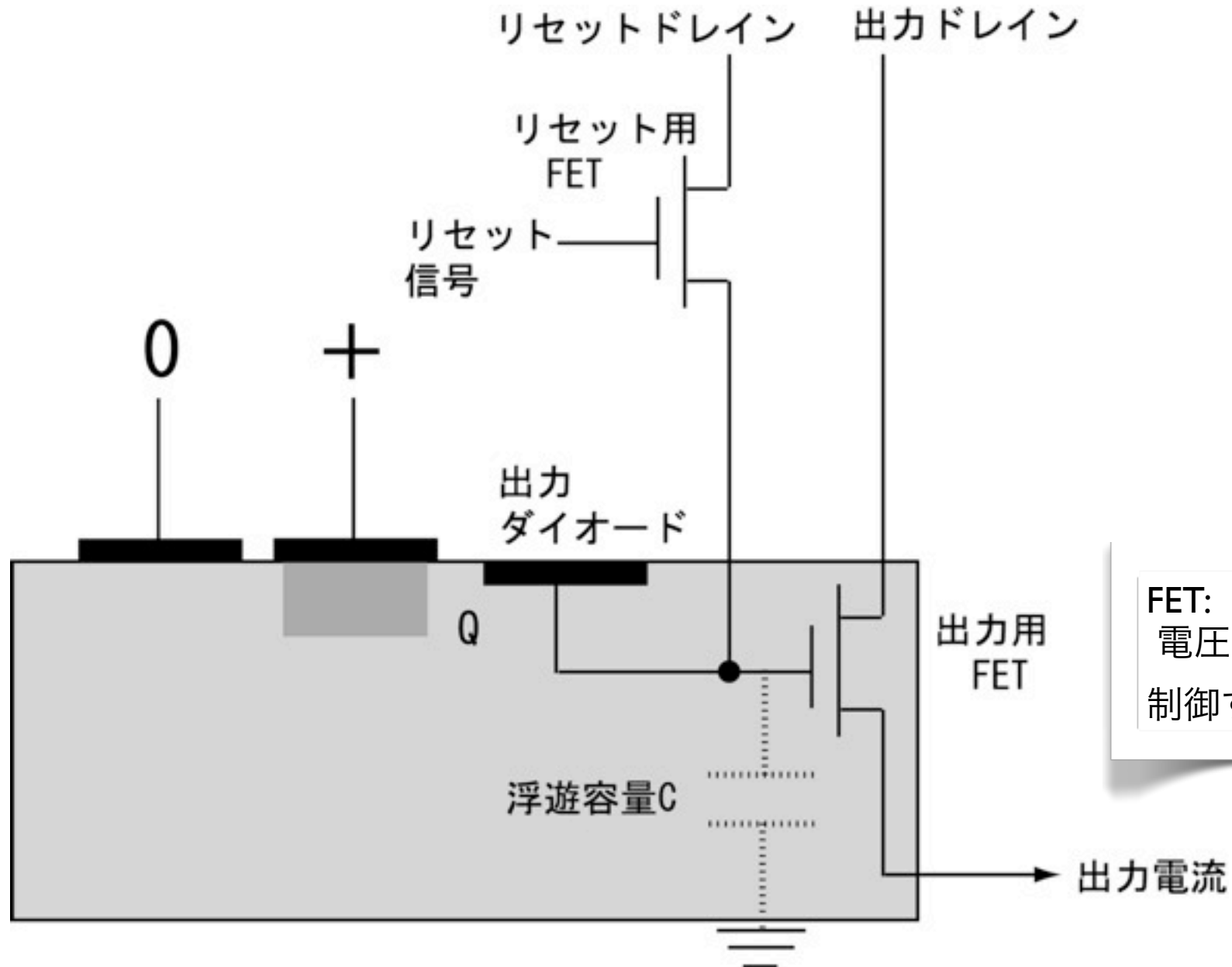


アナログスイッチで定電圧+-を切り替える

CCDの出力

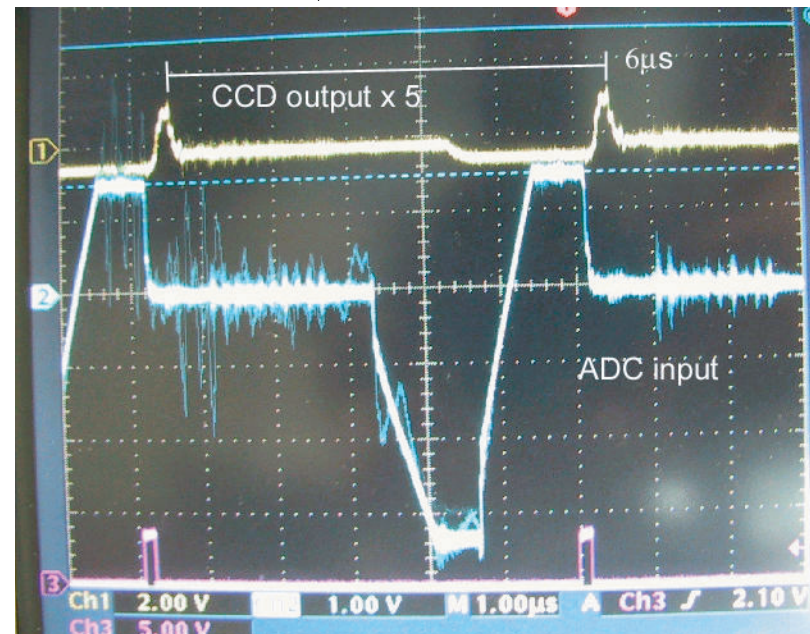
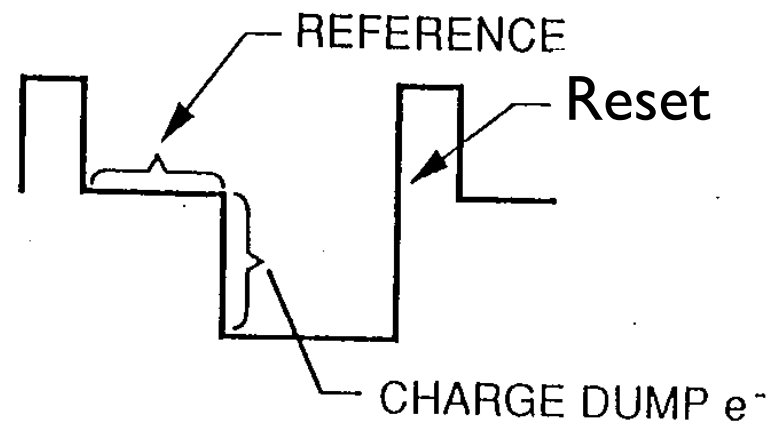
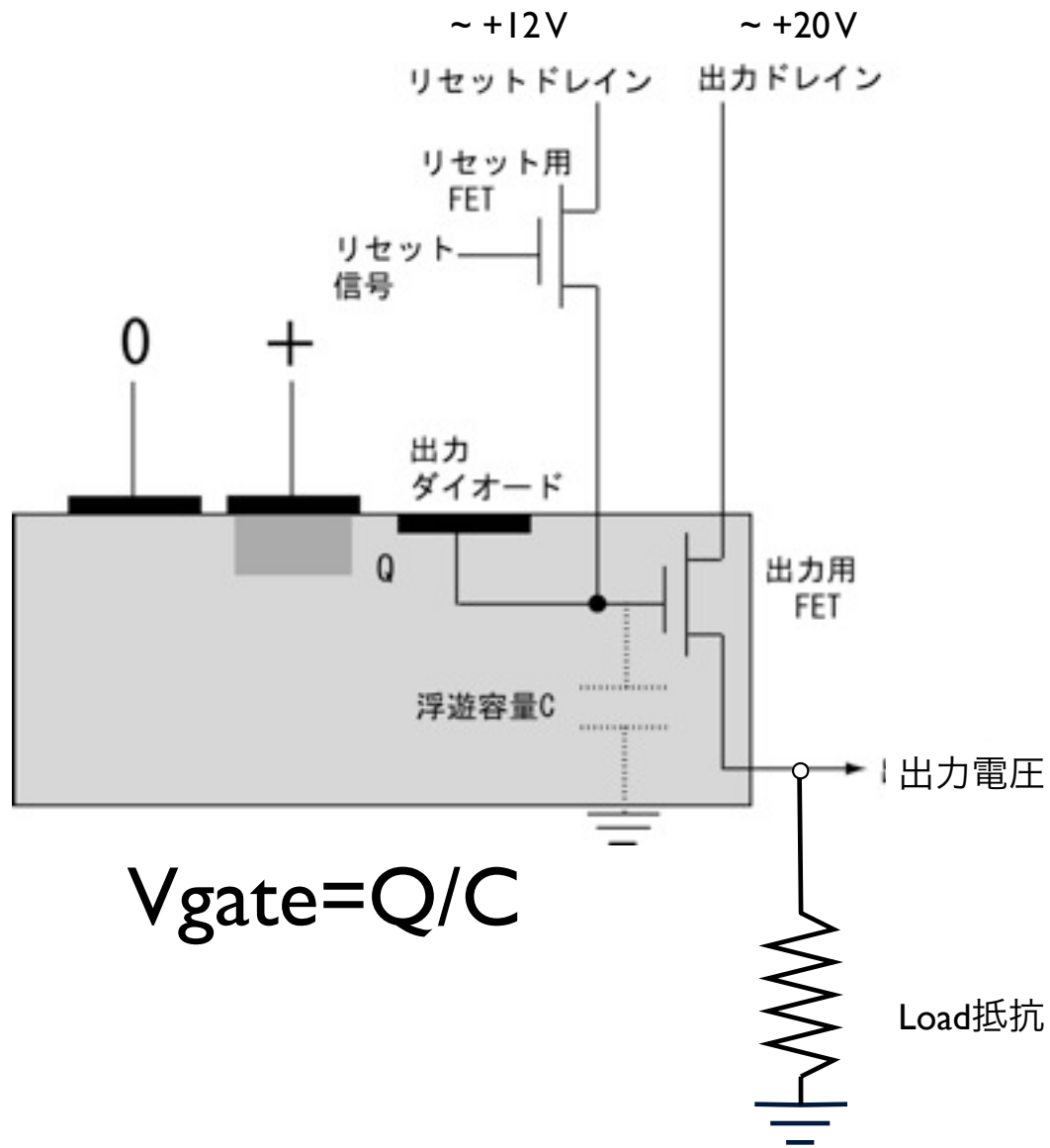


CCD Output

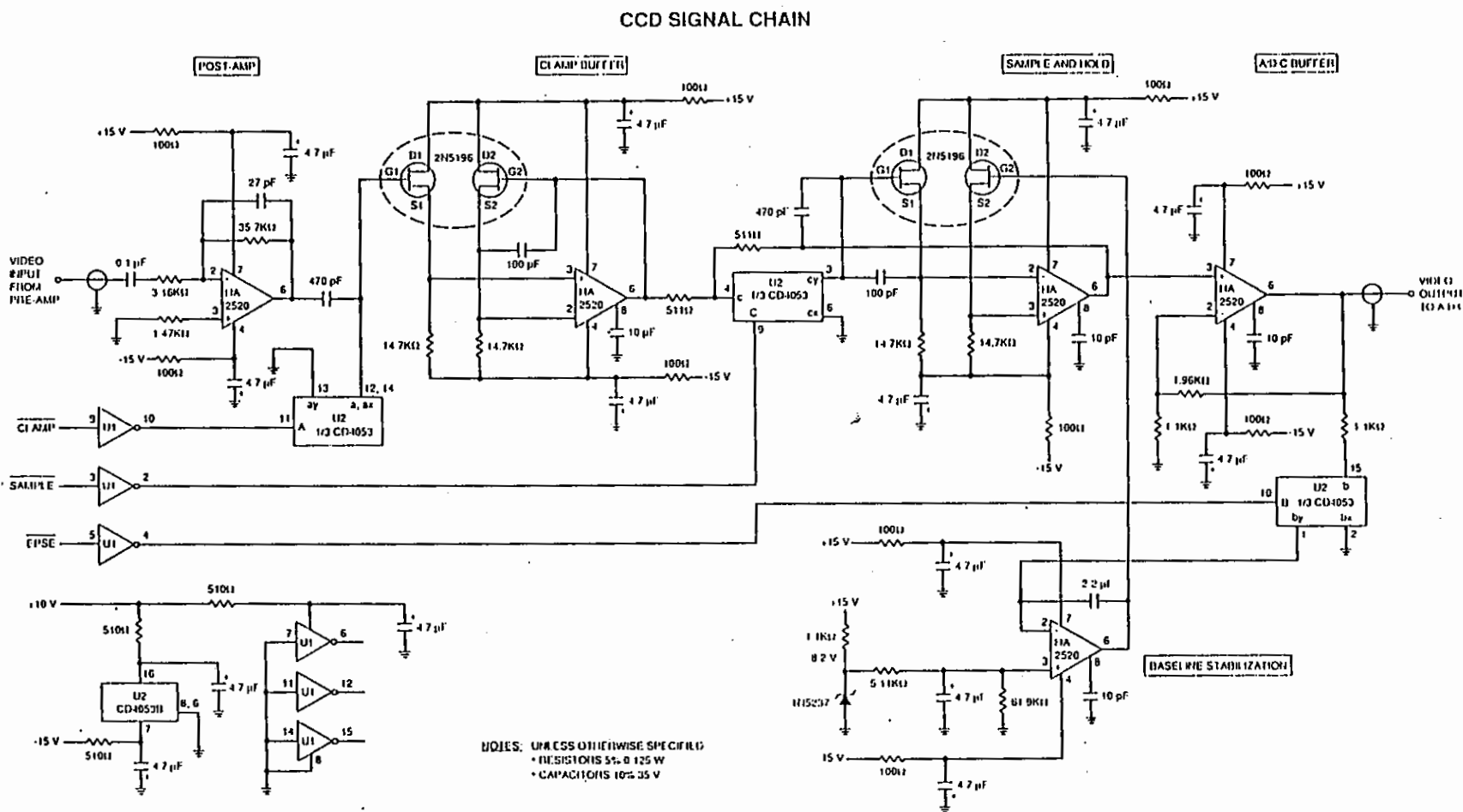


FET:
電圧で電流を
制御する

CCDの出力

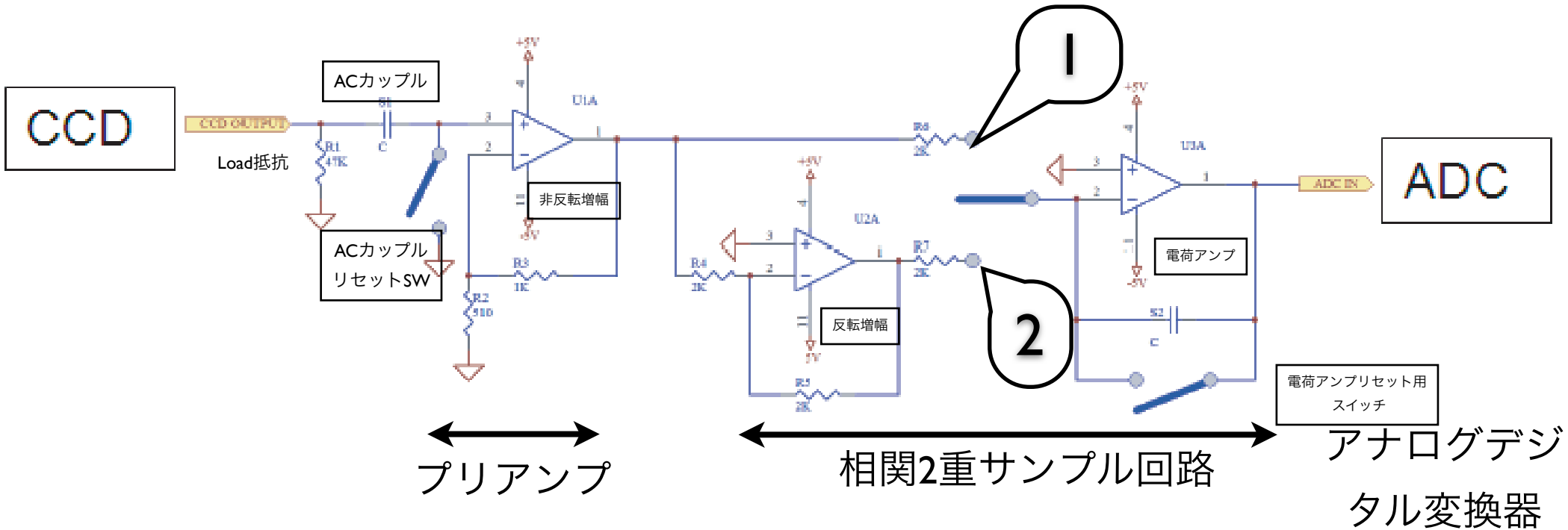


CCDの読み出し回路



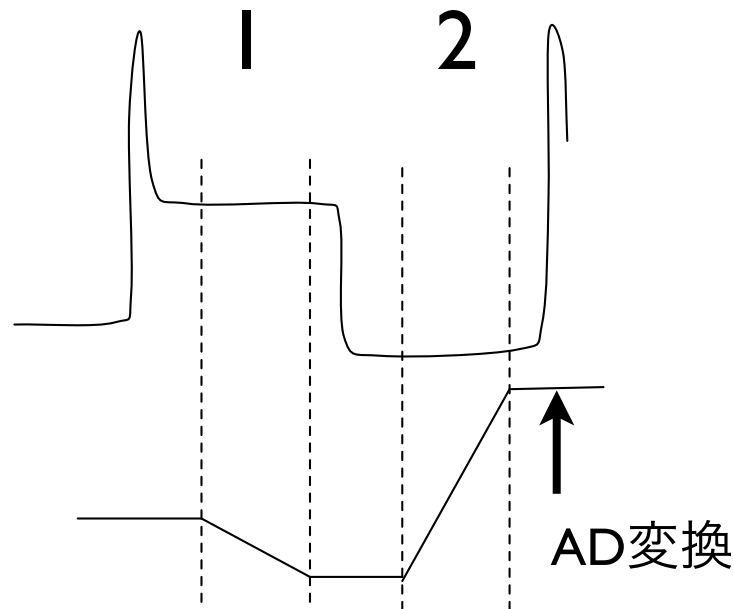
FET入力の入カインピーダンスが高いlow noise op-ampが出来てから設計が楽になった

CCDの読み出し回路のエッセンス



CCD Out

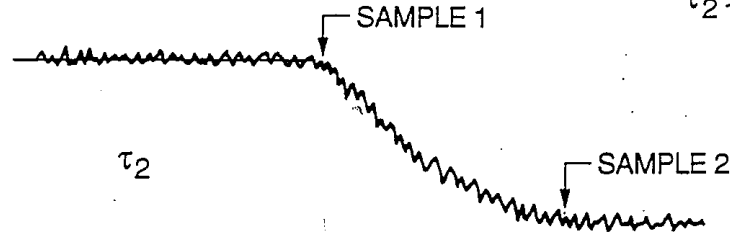
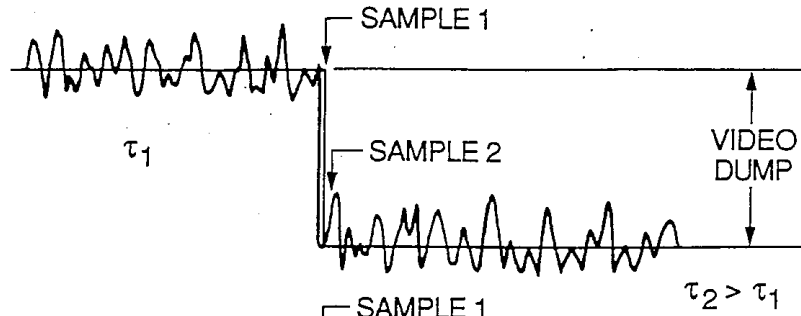
ADC in



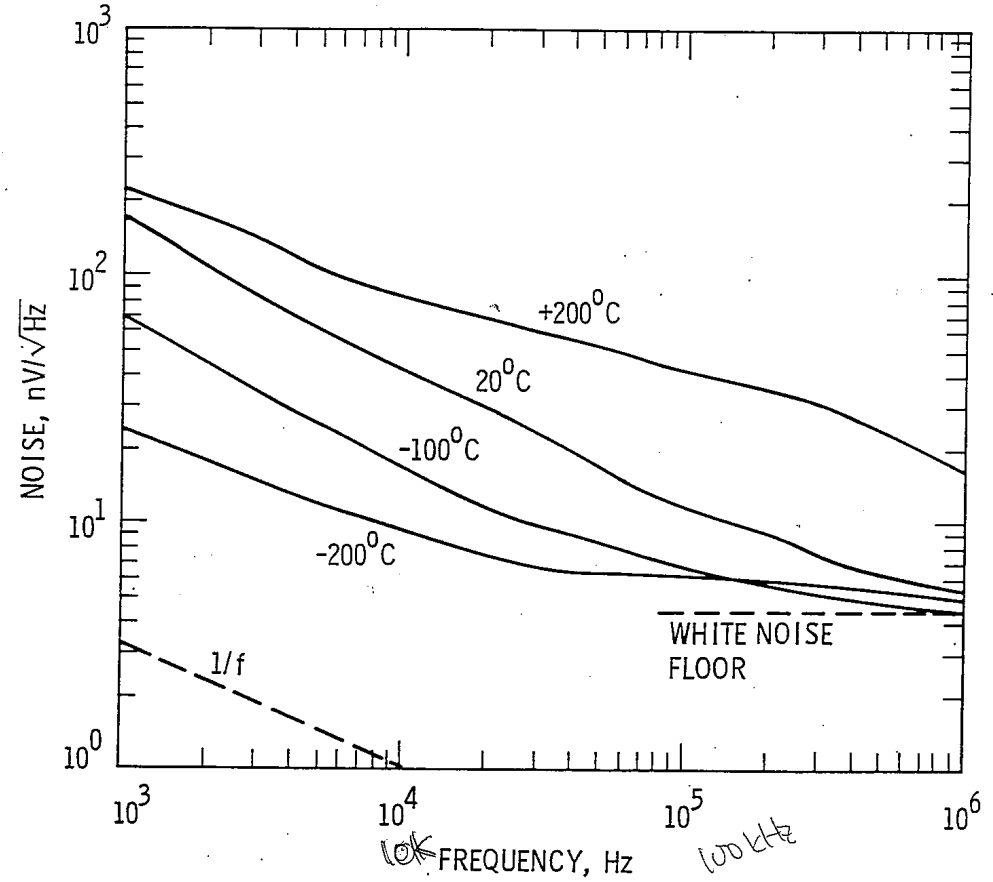
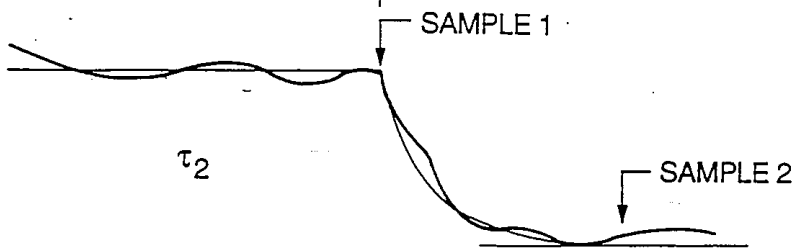
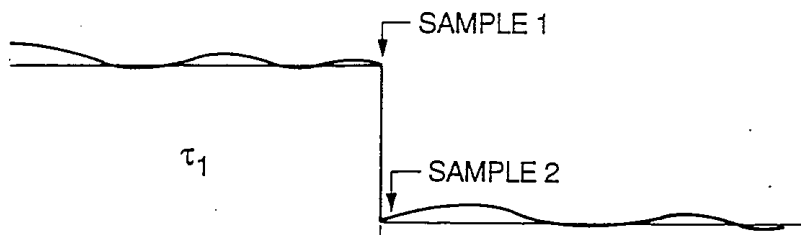
読み出しノイズ

thermal noise

WHITE NOISE



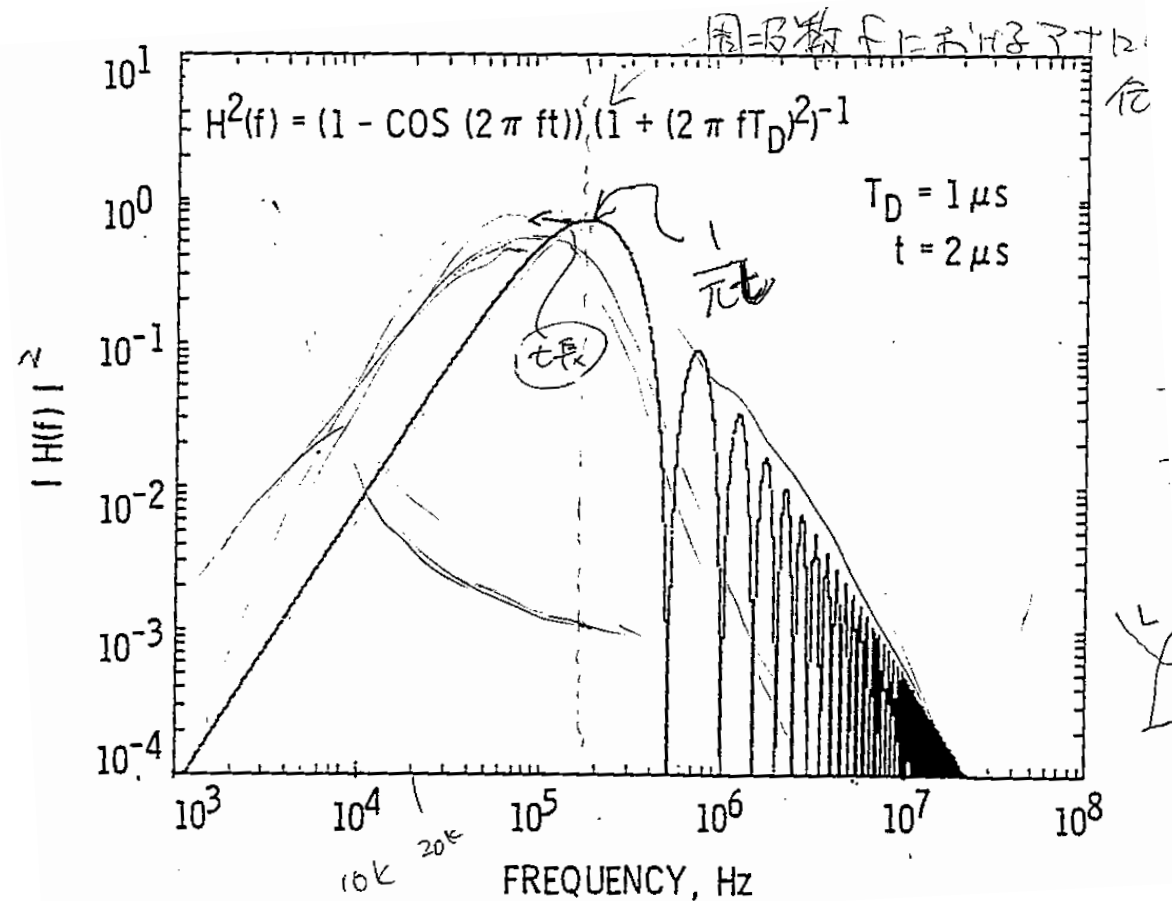
LOW FREQUENCY NOISE (1/f)



読み出しノイズの低減

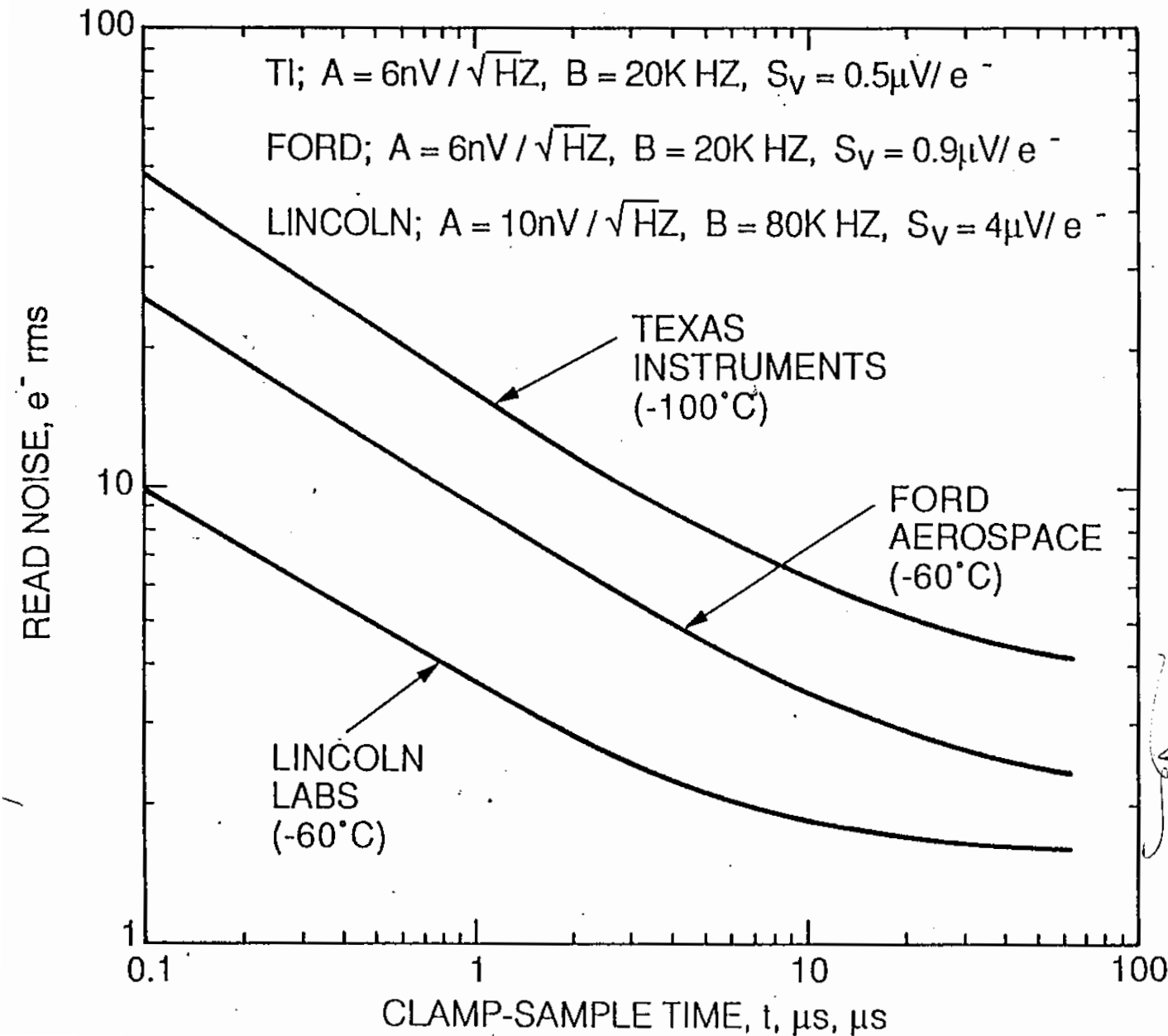
フィルターをかける

CDSがフィルターとして働いている



積分時間を
長くするとより
low passになる

読み出しノイズ



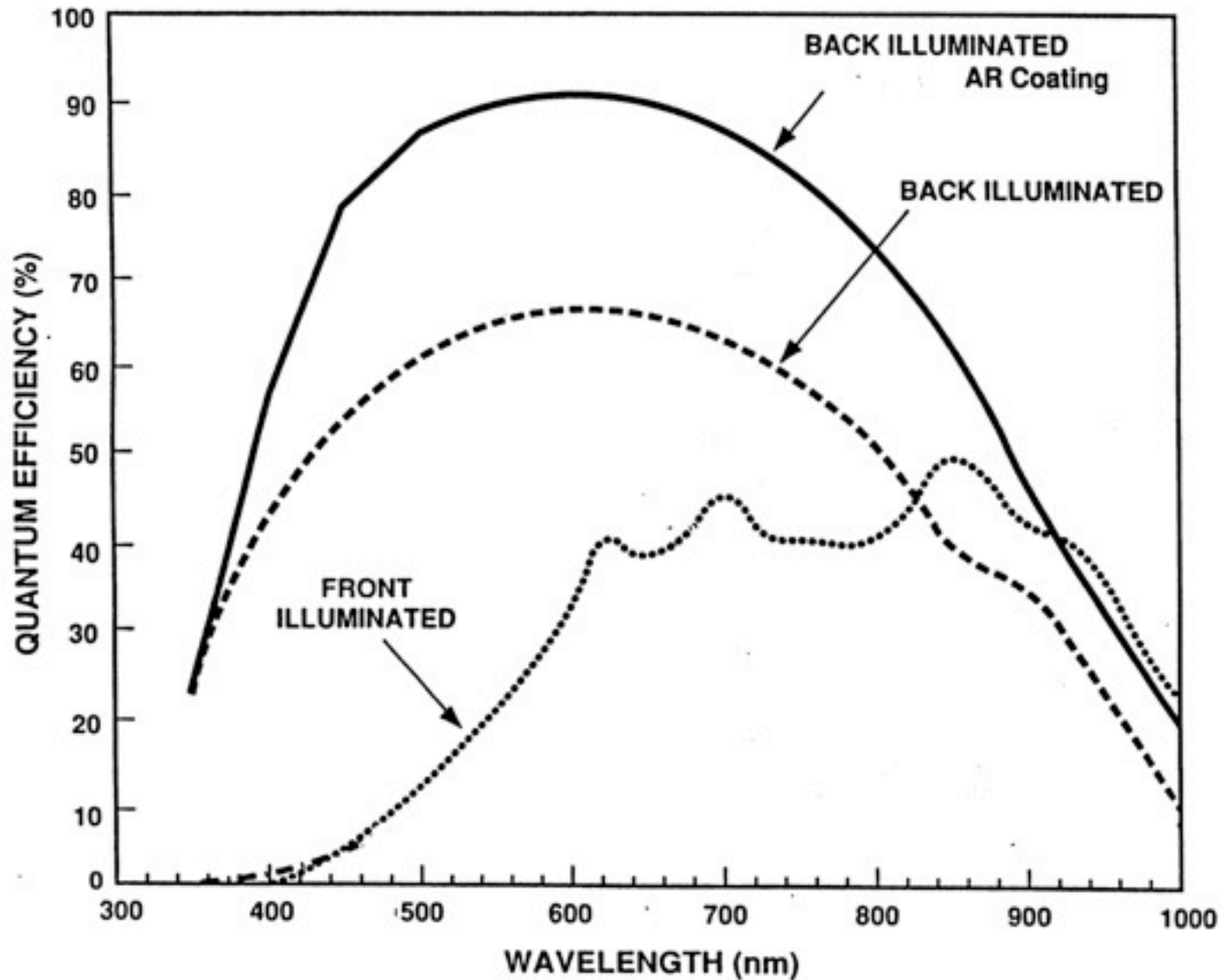
積分時間を長くしていくとノイズは低減するが、底打ちする(1/f)

eで計測するノイズの大きさはアンプのResponsivityでほぼ決まる

(Capacitanceの逆数)

量子効率

QUANTUM EFFICIENCY OF CCD IMAGERS

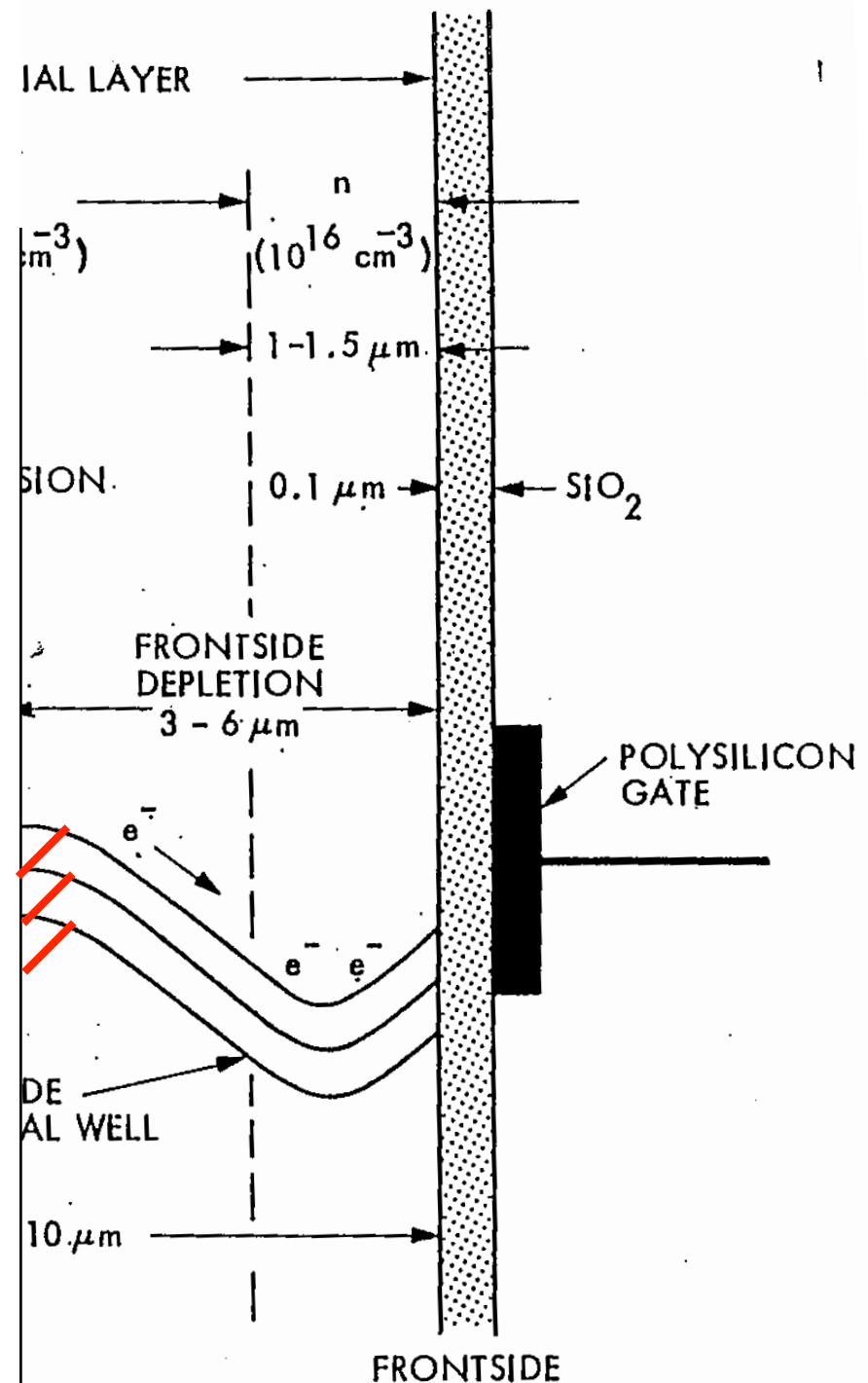


量子効率

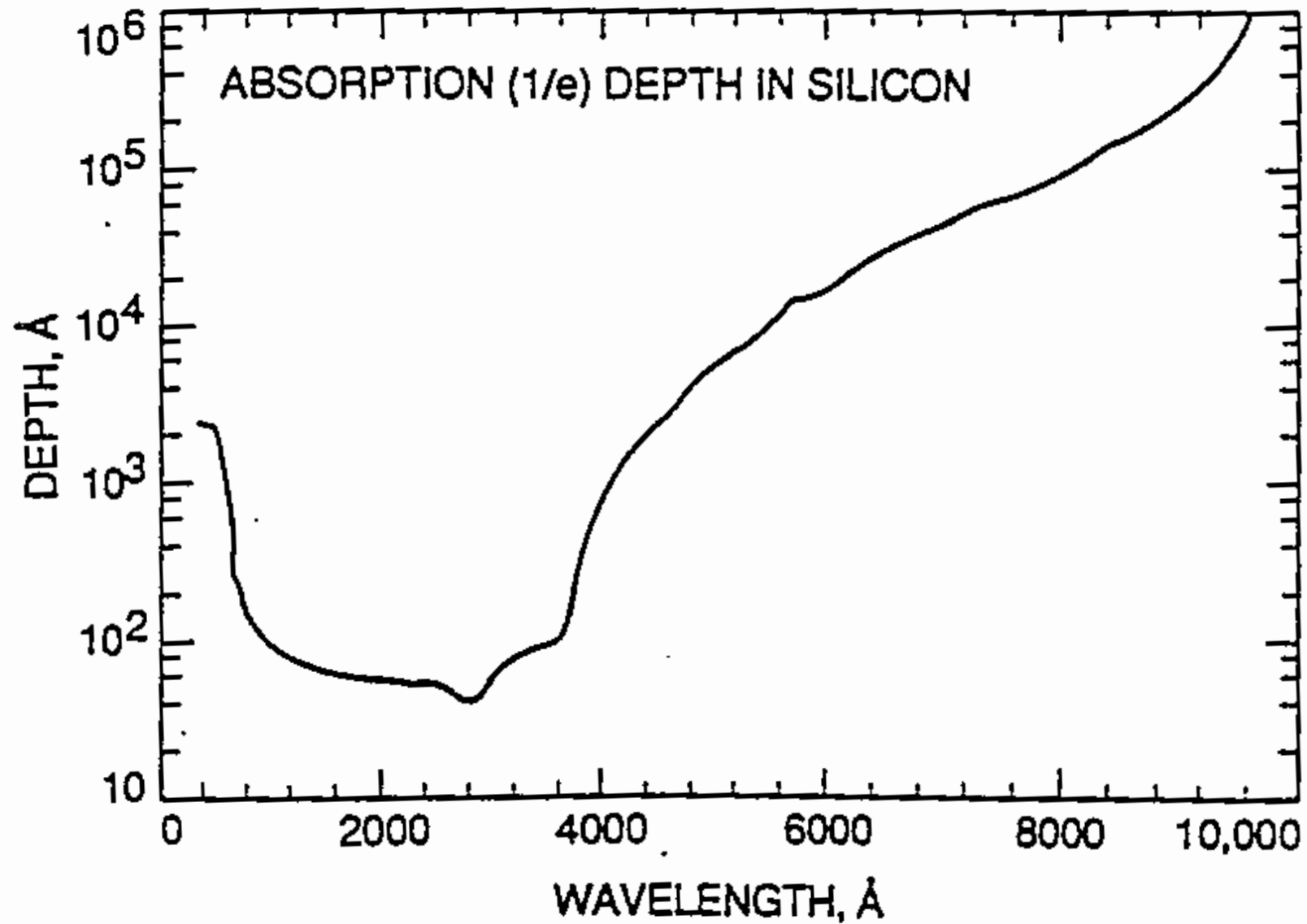
- 量子効率低下の理由
 - 短波長側
 - ポリシリコンでの吸収
 - 裏面照射型CCD
 - 界面準位で光電子がトラップされてしまう
 - Backside charging
 - 長波長側
 - エネルギーが低すぎてe-hを作れない
 - 空乏層が薄くて、光子が透過してしまう

Backside Charging

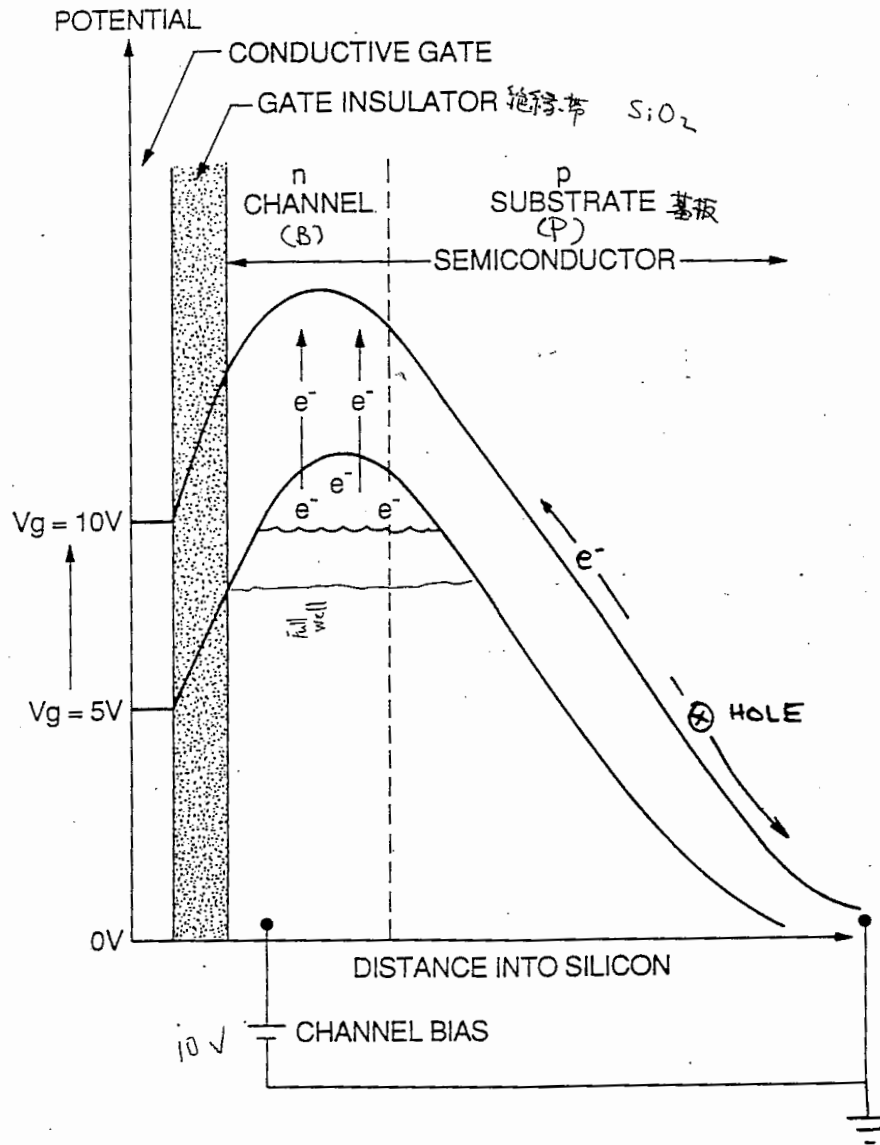
界面準位によるトラップをイオン打ち込み等で矯正すること。



Si内の光の吸収長



完全空乏型CCD



通常のCCD

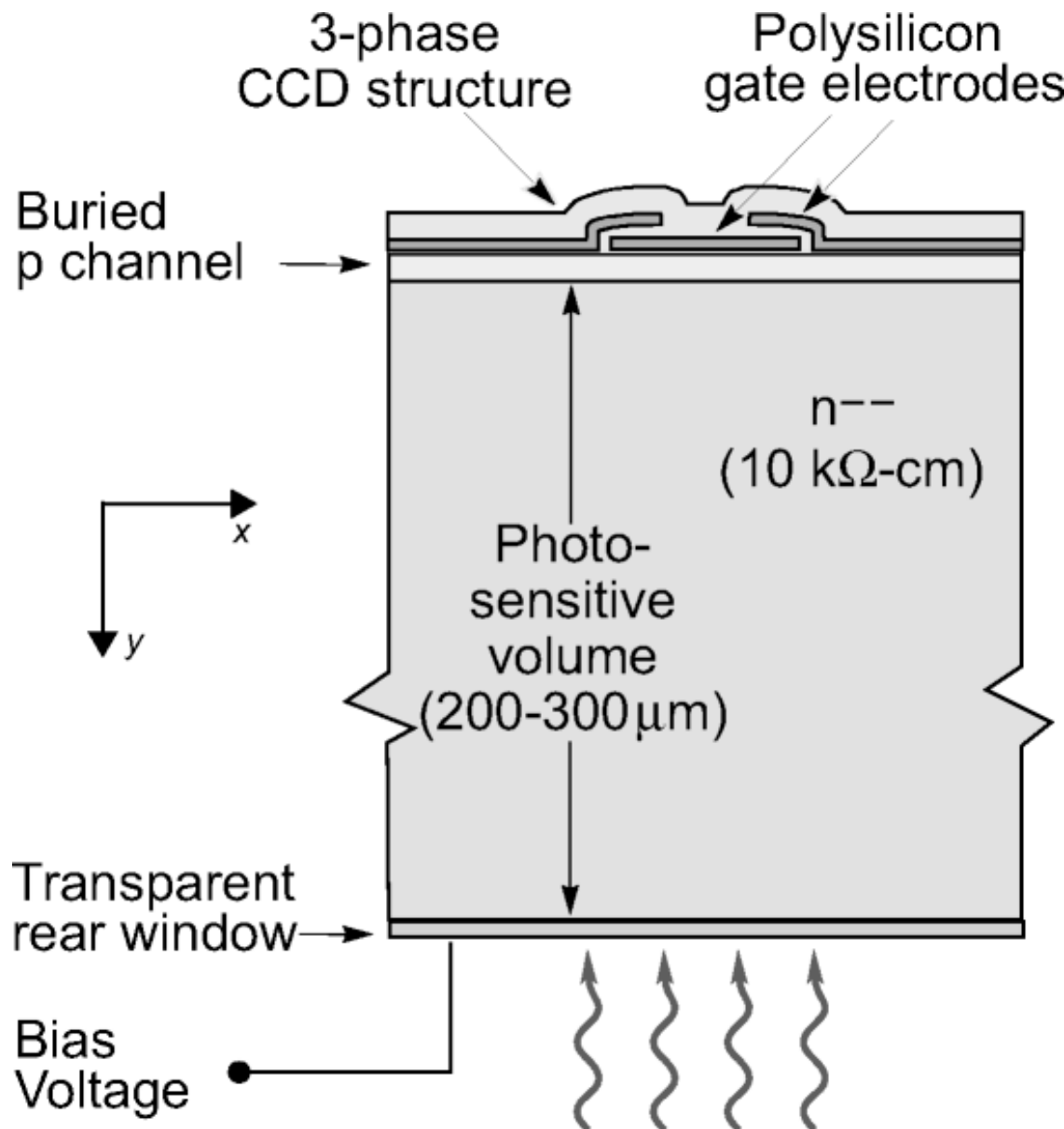
空乏層厚は不純物濃度のsqrt
に反比例

高純度のSiはn型の方が得やすい

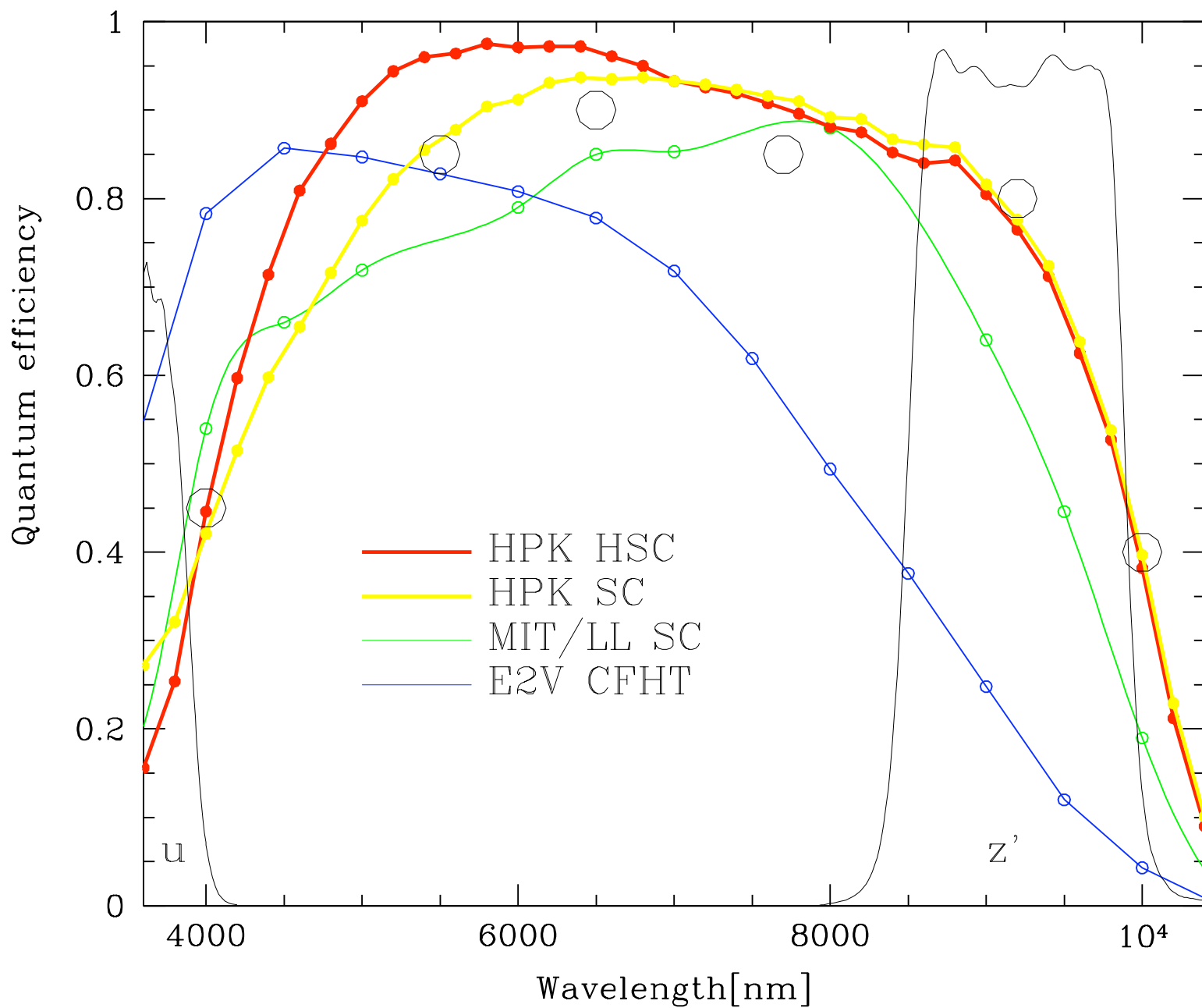
substrateにn--を採用し、
buried p channel構造にすると
空乏層を広げることができる

signal carrierが正孔になる

完全空乏型CCD



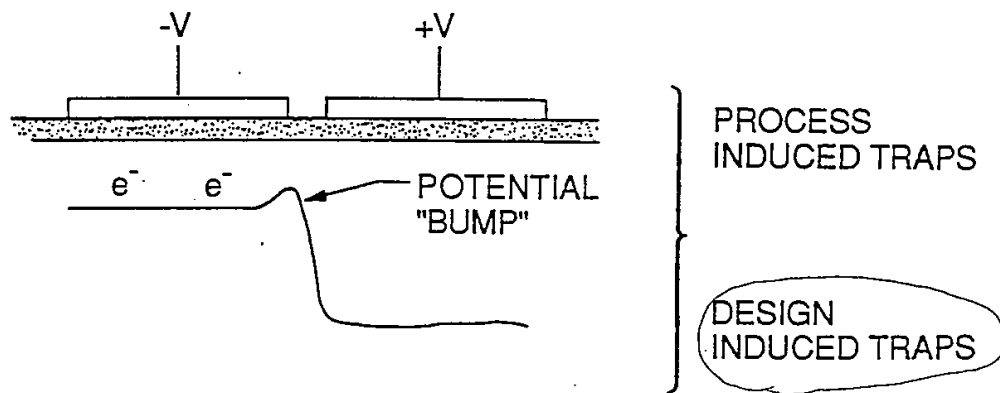
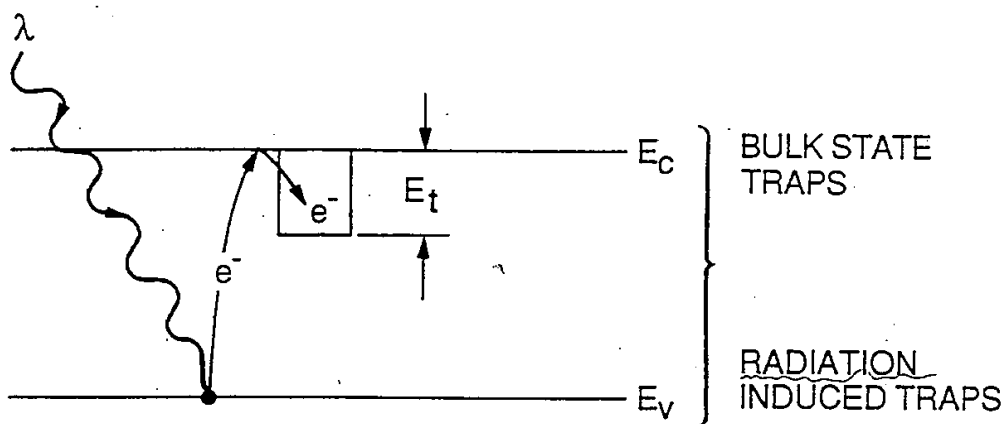
完全空乏型CCD



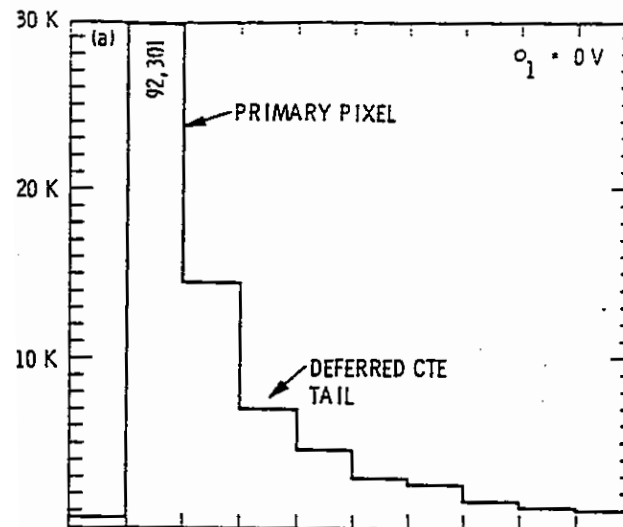
電荷転送効率

Charge Transfer Efficiency: CTE

CCD ELECTRON TRAPS



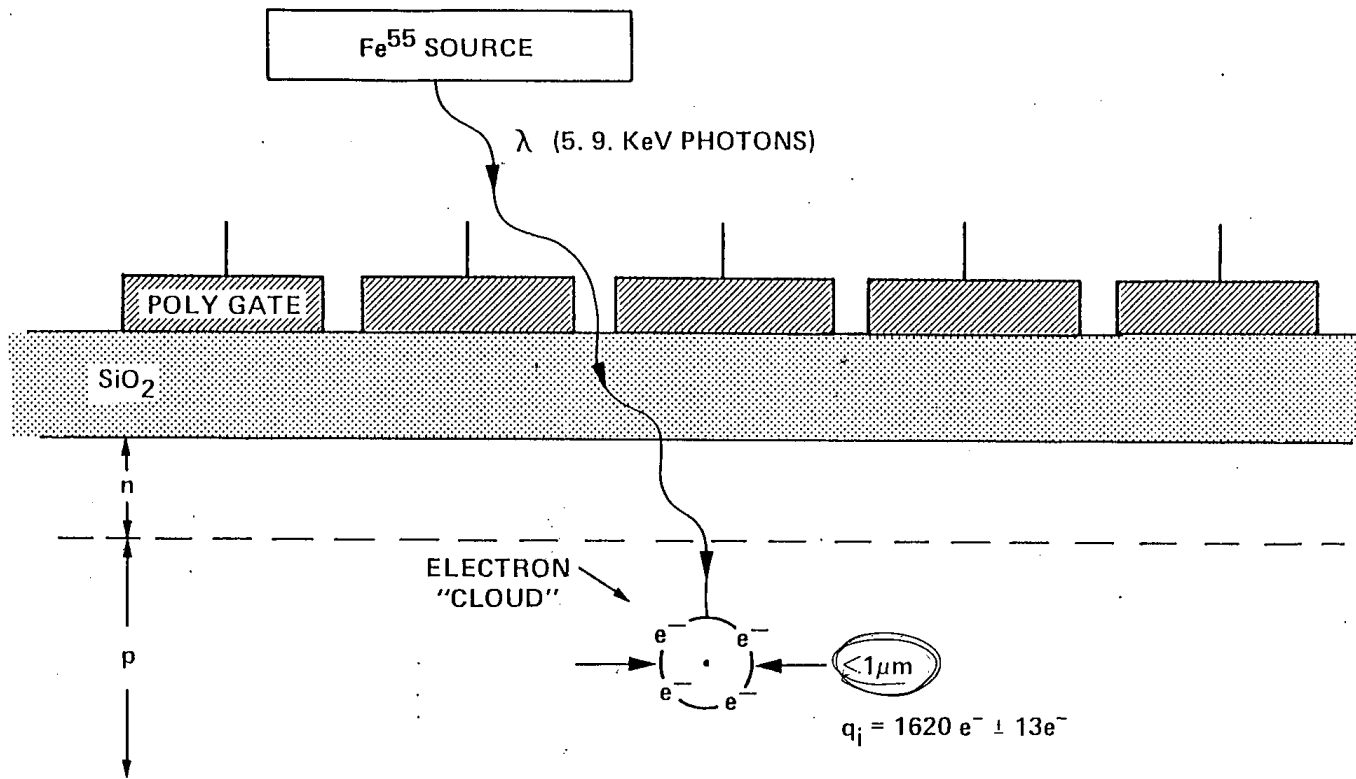
- トラップに捕まったり（後に解放される）、構造の不完全性により、電荷転送が完全に行われないこと
- 転送と逆向きにtailを引く



CTEが悪化すると

- 画像がsmearする
- 宇宙望遠鏡では、放射線ダメージにより次第にCTEが悪化していく
- weak lensingを利用したサイエンスにはインパクトが大きい
- 素子上で一様に悪化しないと、解析による補正は難しい（今後の研究課題）

CTEの計測



ラインX線
を使用する
方法が簡便

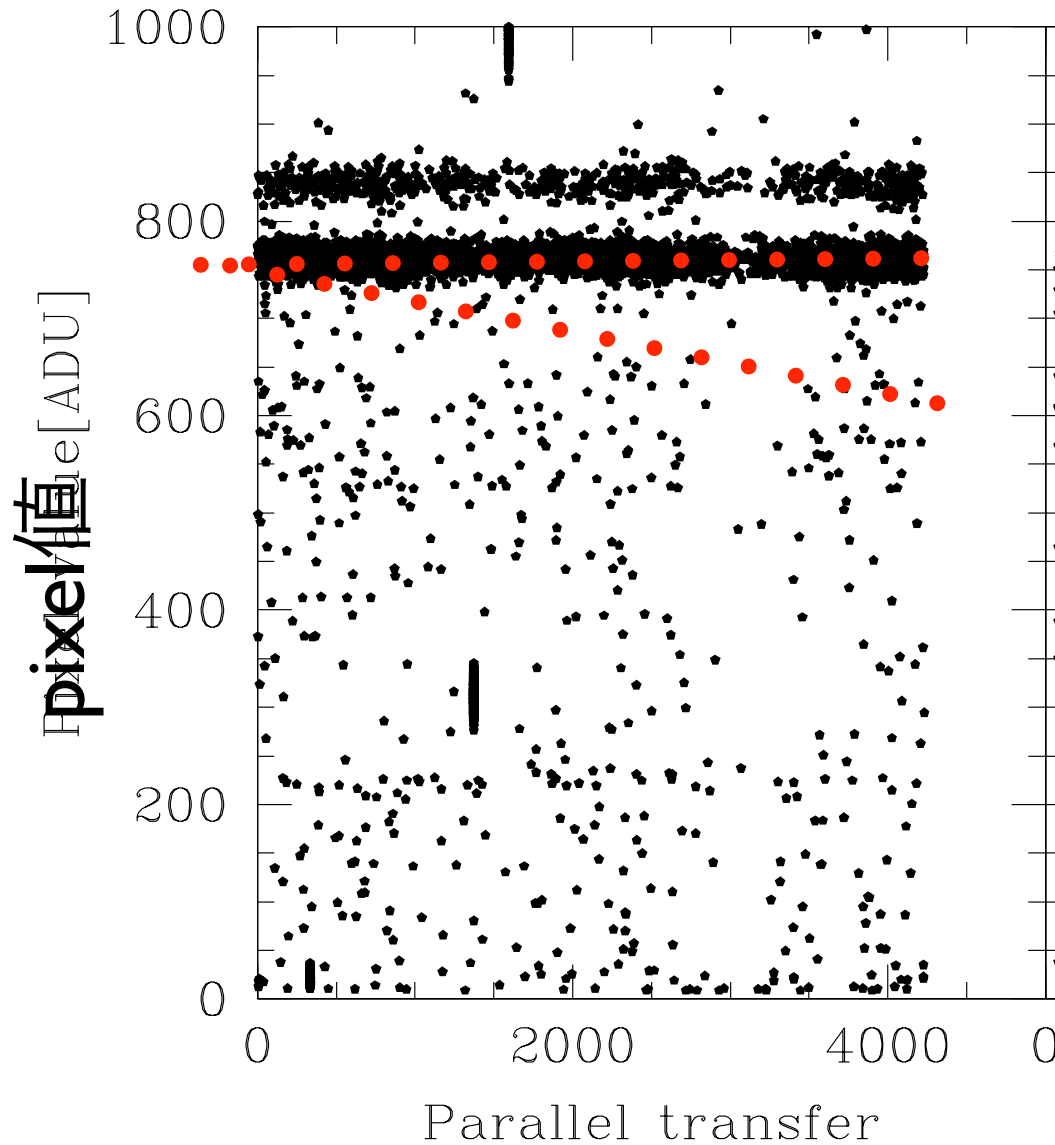
X線の吸収

1 e-h / 3.6 eV
5.9 keV -> 1620 e

全ての電荷はだいたい
1 pixel内に収まる

cf: 可視光の吸収 1 photon -> 1 e-h pair

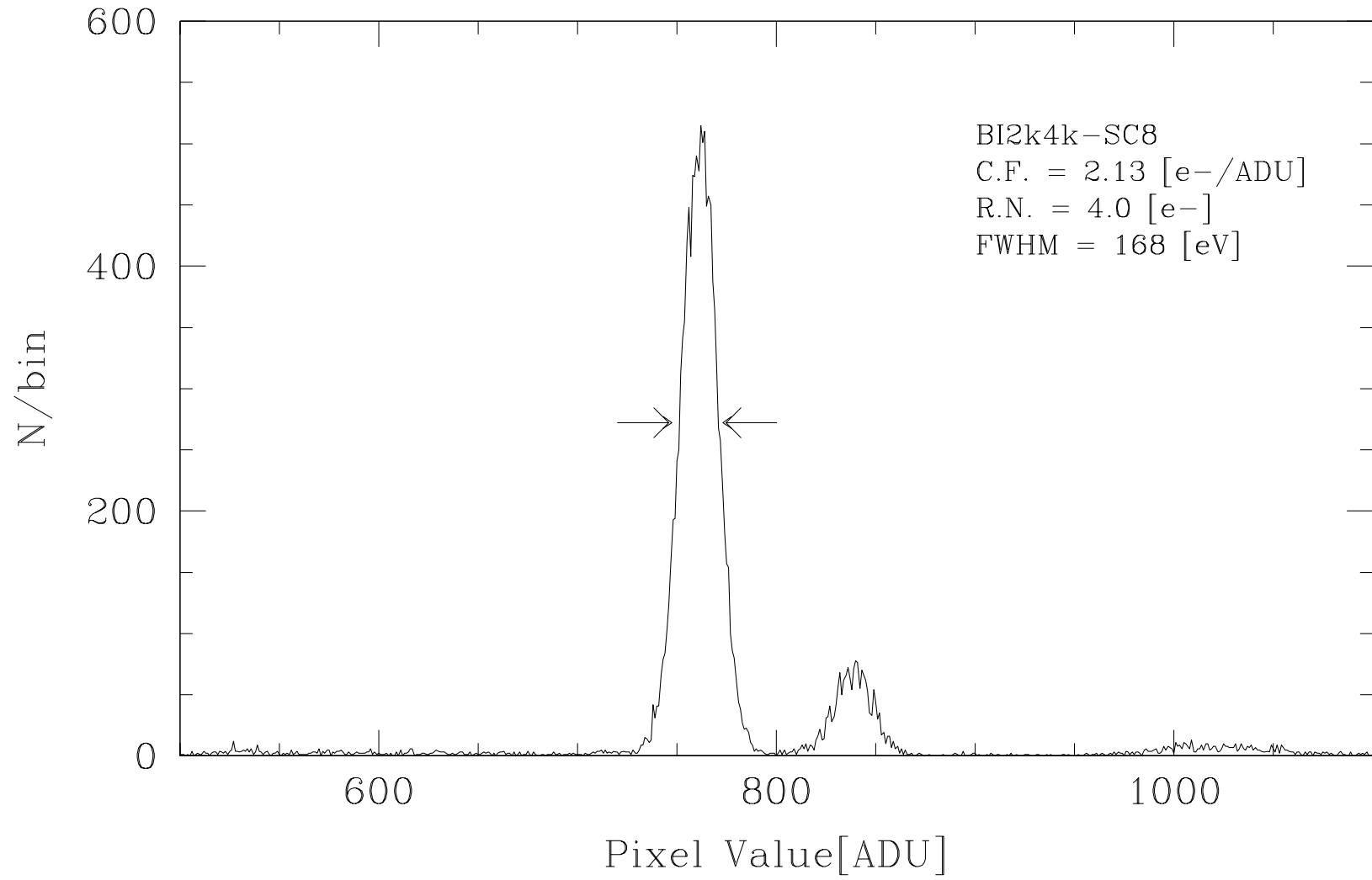
CTEの計測



single event (1 pixelだけに電荷が収まっている)を探してきて、その場所とpixel値(電子の個数)をプロットする

場所(転送回数)

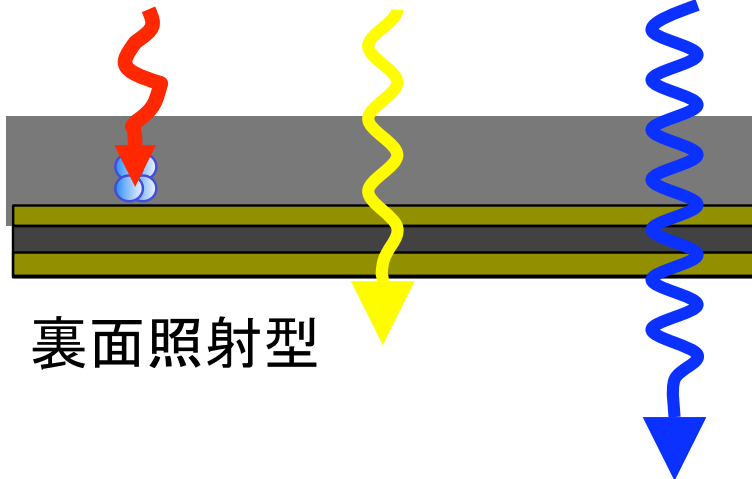
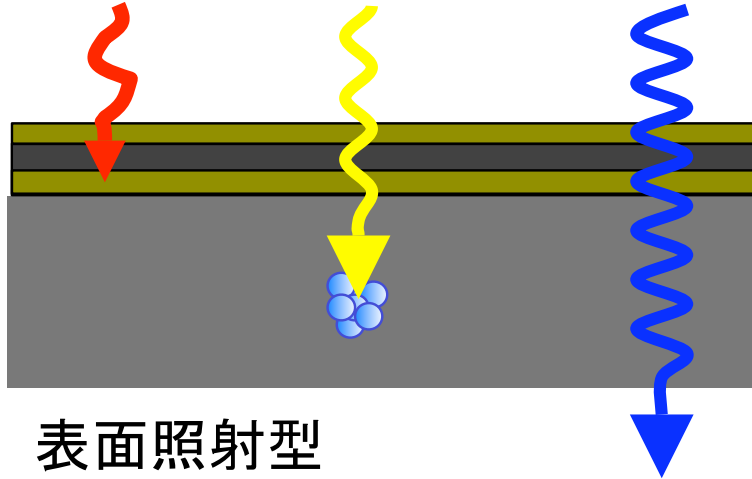
X線エネルギースペクトル



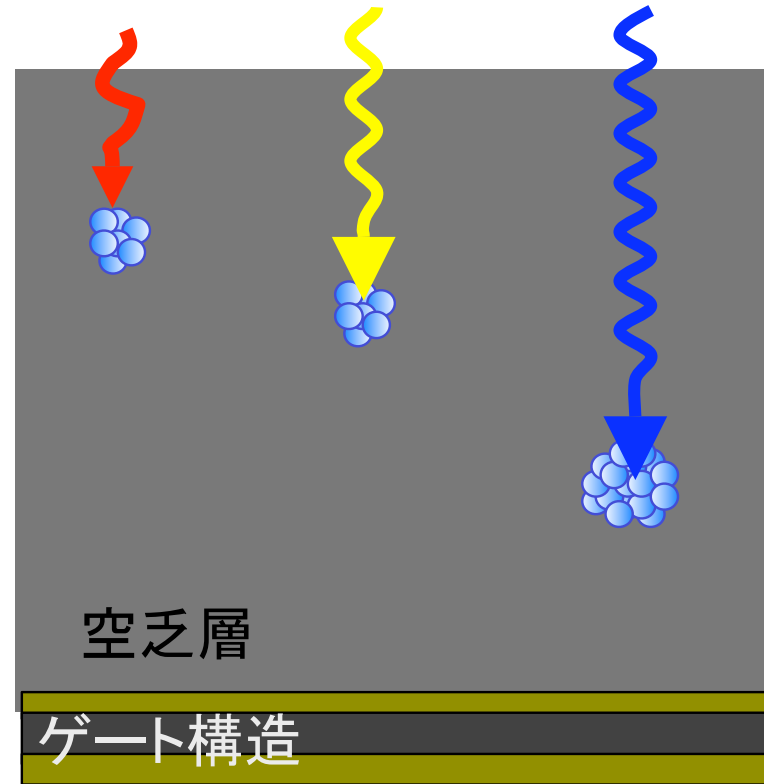
完全空乏型CCD

従来のX線CCD

長い波長 中間の波長 短い波長



FD-CCD

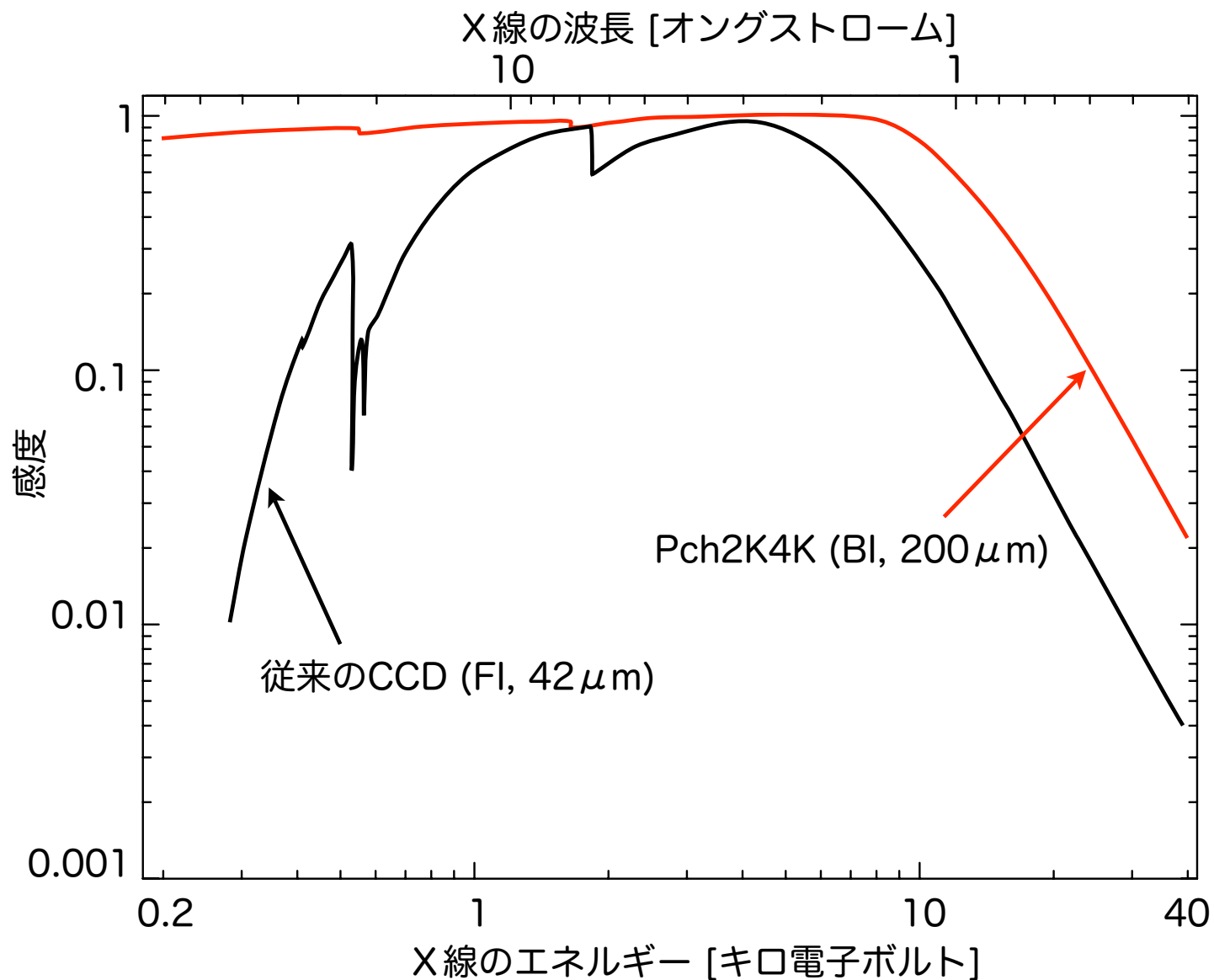


可視光と波長の長短が逆

可視光及びX線とCCD

	可視光	X線
電子正孔対の個数	1光子1個	3.6 eV当たり1個
空乏層が厚いと止まる光子は？	低エネルギー	高エネルギー
素子による分光	不可	可

完全空乏型CCD



**Astro-H衛星
に採用決定!**

完全空乏型CCD

第7回DECIGOワークショップ 2009.4.23

Nano-JASMINEの概要

衛星の仕様

衛星外形	50×50×50cm
質量	約25kg
打ち上げ	2010（予定）
ミッション期間	2年
観測等級	$z < 8\text{mag}$
観測波長	z-band($\lambda \sim 900\text{nm}$)



Nano-JASMINEの想像図

開発体制

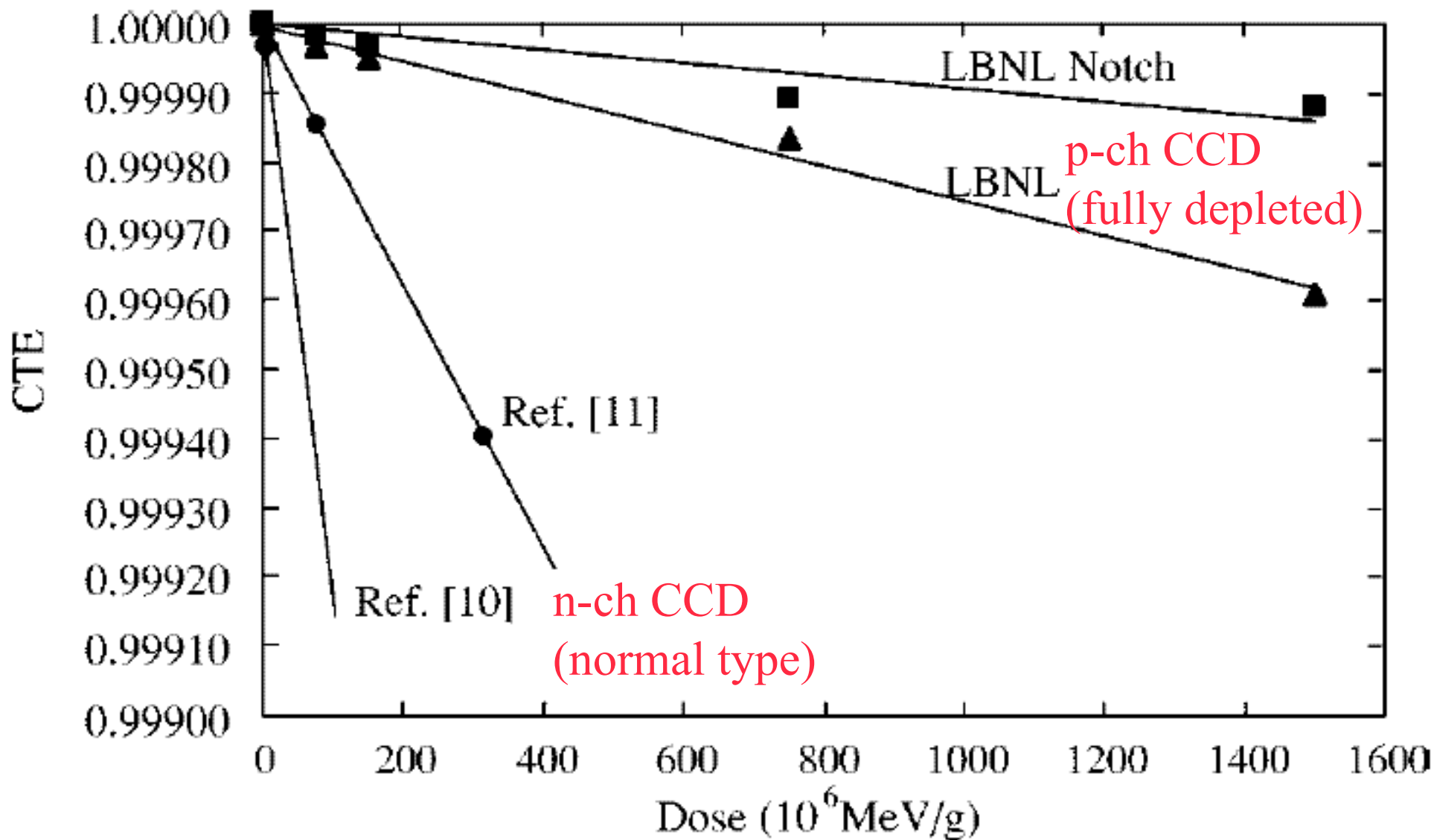
ミッション部（望遠鏡など）→国立天文台&京都大学

バス部（無線器、姿勢制御、電源など）→東京大学&東京海洋大学

先に宇宙に
行くのは

Nano-
JASMINE

完全空乏型CCD



radiation toleranceが高い

宇宙線



地表で観測される宇宙線はほとんど
ミュオン

Siを「まっすぐ」突き抜けて、その
トラックにそって電離e-h pair
が残る

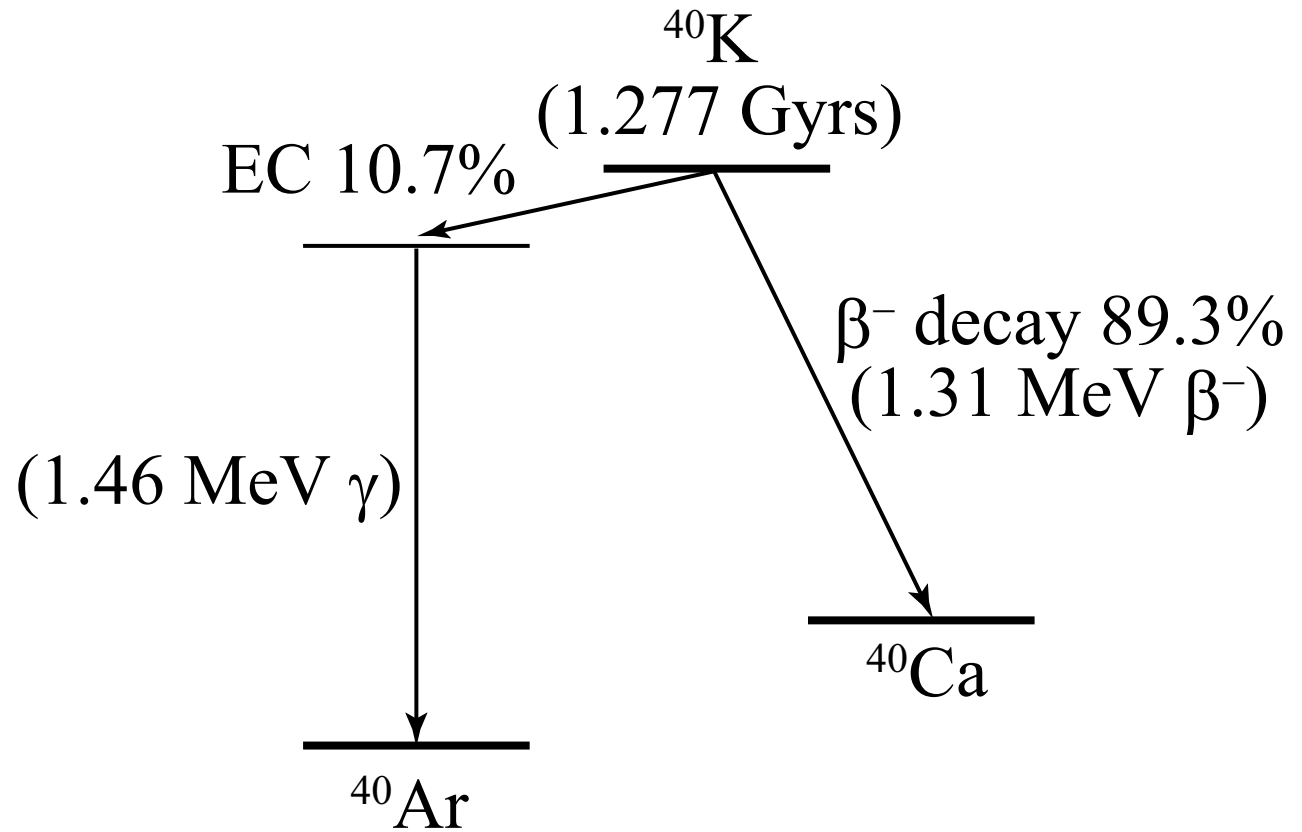
1個/cm²/min

“cosmic ray”と称して見ているイ
ベントのほとんどは、ガンマ線が
compton散乱した電子か（か、検
出器近くで発生したベータ線）

電子がSi中で多重散乱を受けて、
トラックにそってe-h pairができ
る。「くねくね」

身近なガンマ線源

カリウム（コンクリートに多く含まれる）



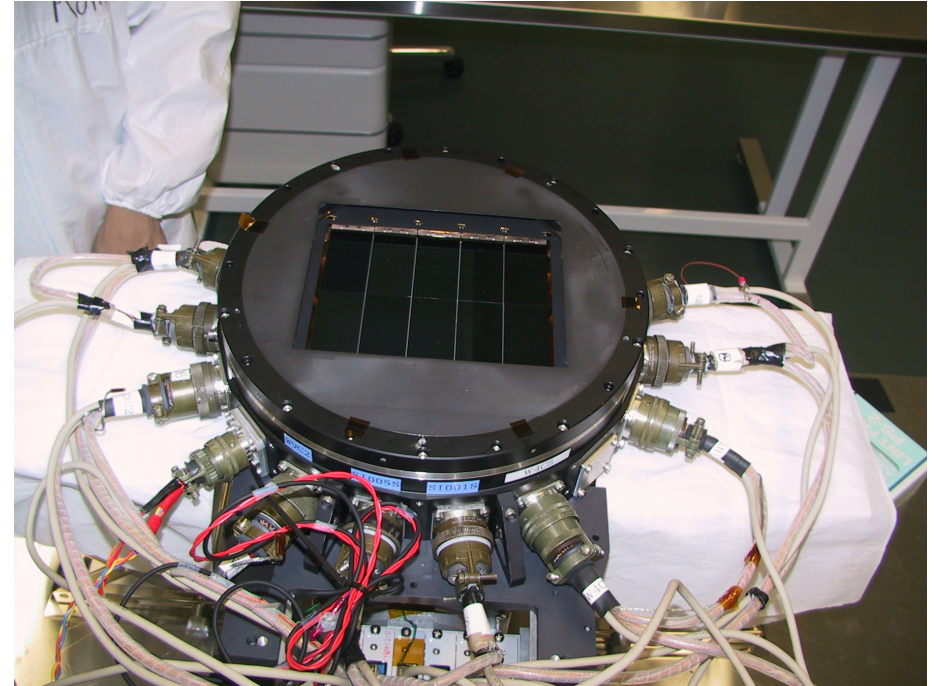
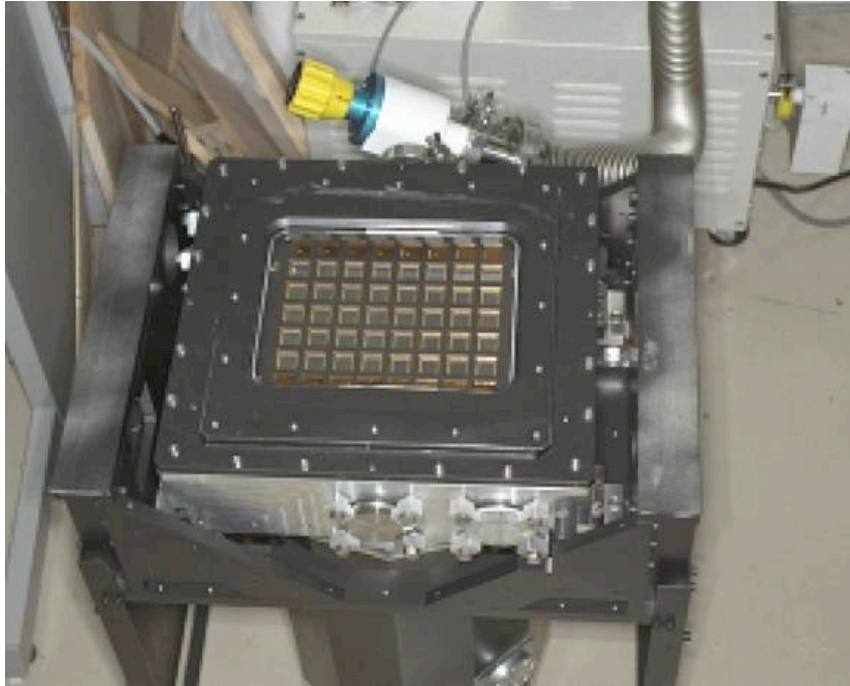
地球

U-Th系列の放射性同位元素



視野を広げる・モザイクCCDカメラ

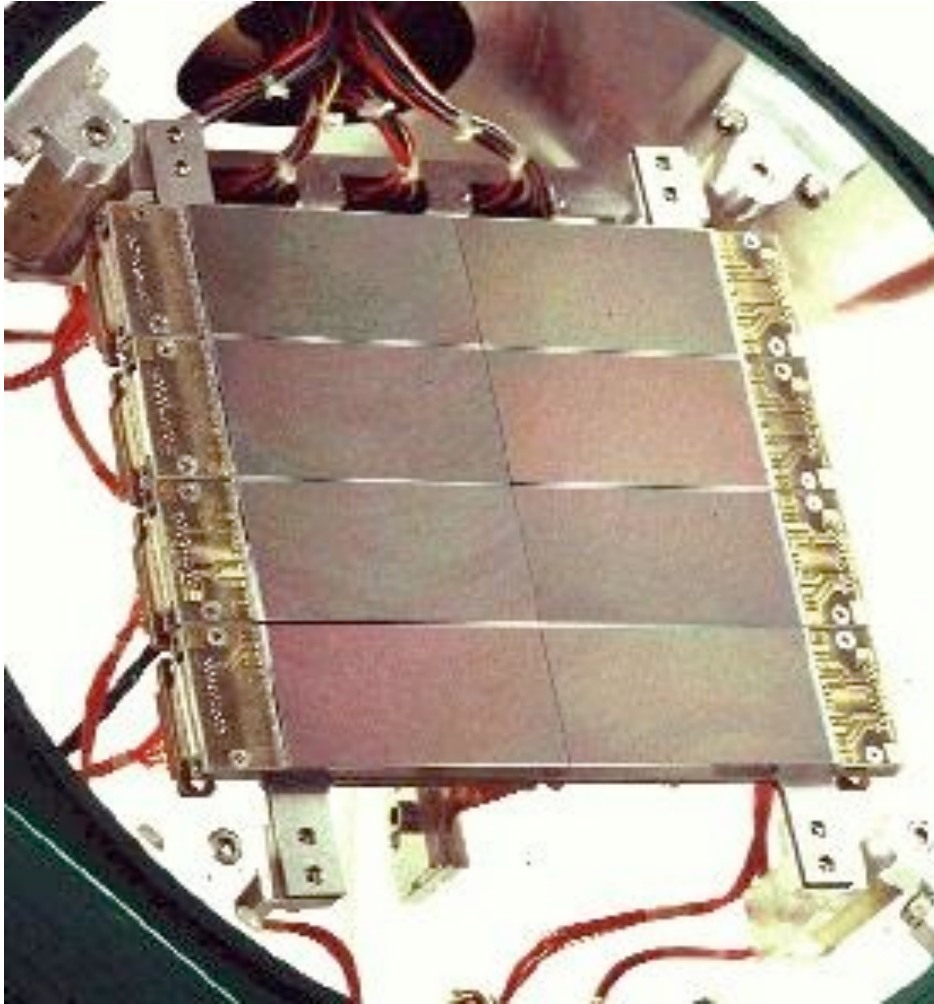
多くのCCDを並べる(mosaic CCD)



NAOJ-UT Mosaic for Kiso Schmidt
Sekiguchi et al. 1992
8 x 8 (1 cm² CCD)
CCD:TITC215
World largest forcal plane in 1992

Suprime-Cam
Miyazaki et al. 2002
5 x 2 x (3cm 6cm CCD)
MIT/LL CCID20
World fastest discovery speed 2002

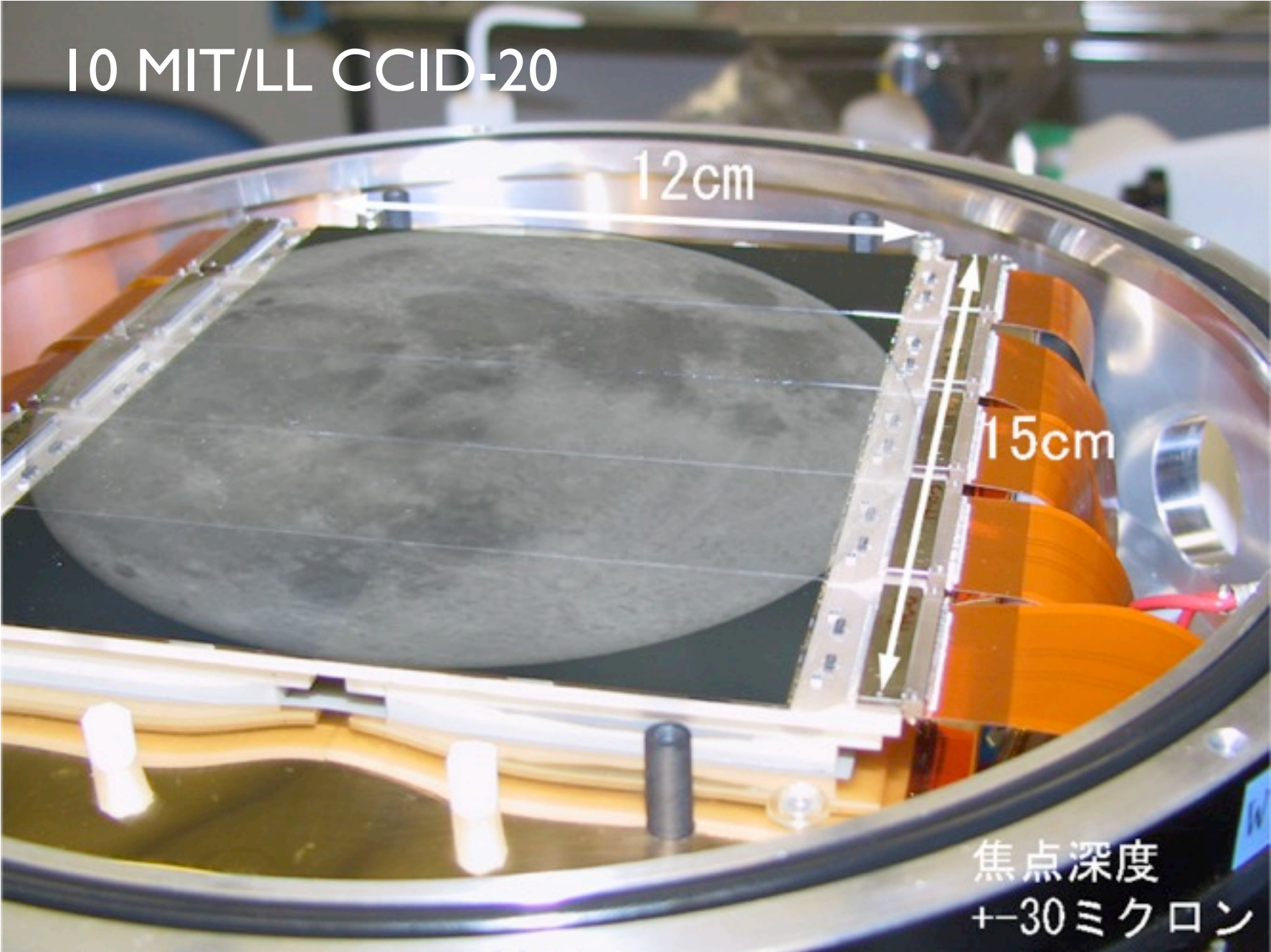
UH8K Camera (1995)



UH IfA Gerry Luppino
First 2k4k CCDs adopted
Designed by CfA
Built at Loral (foundry)

Suprime-Cam

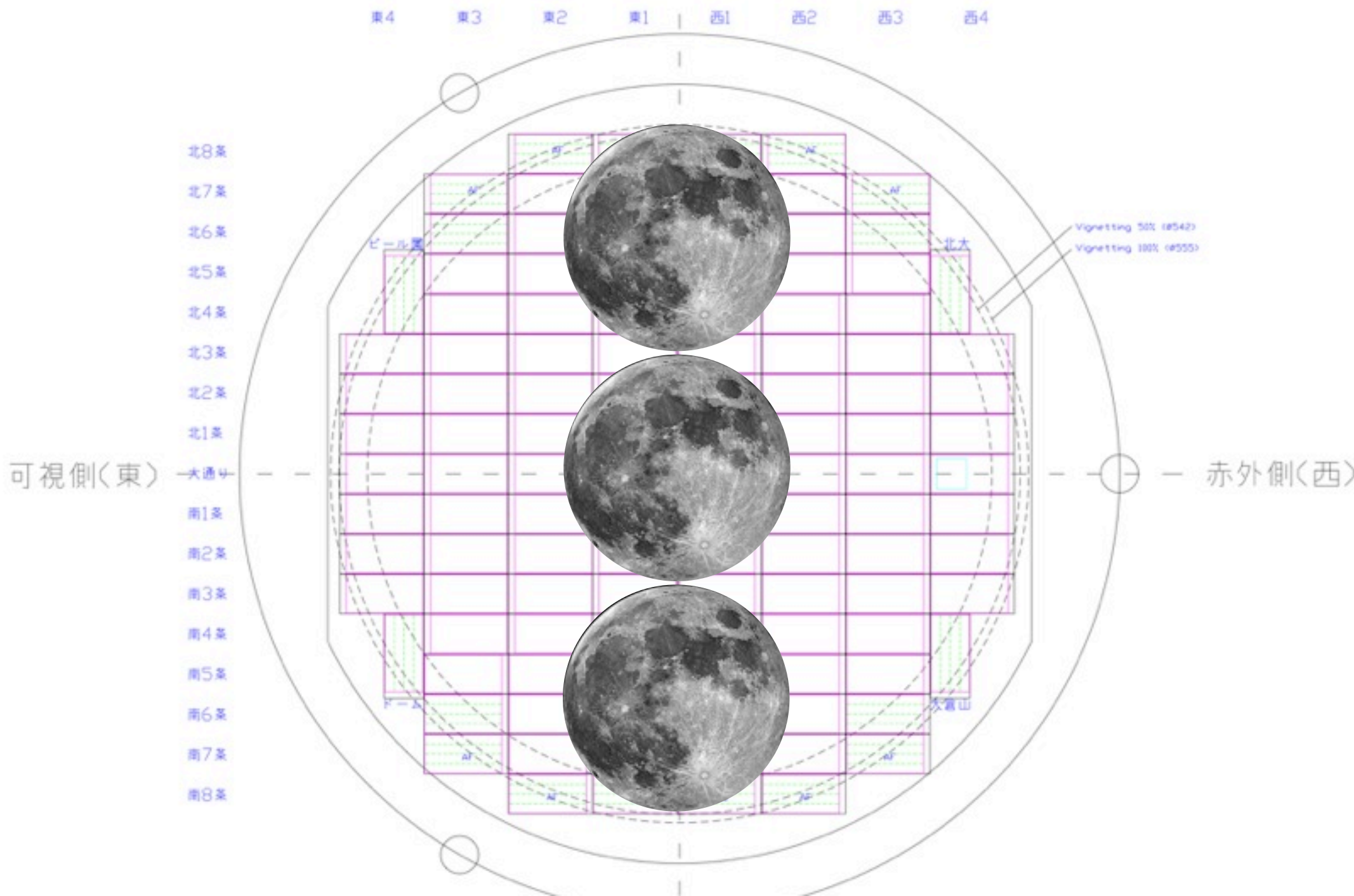
10 MIT/LL CCID-20



焦点深度
±30ミクロン

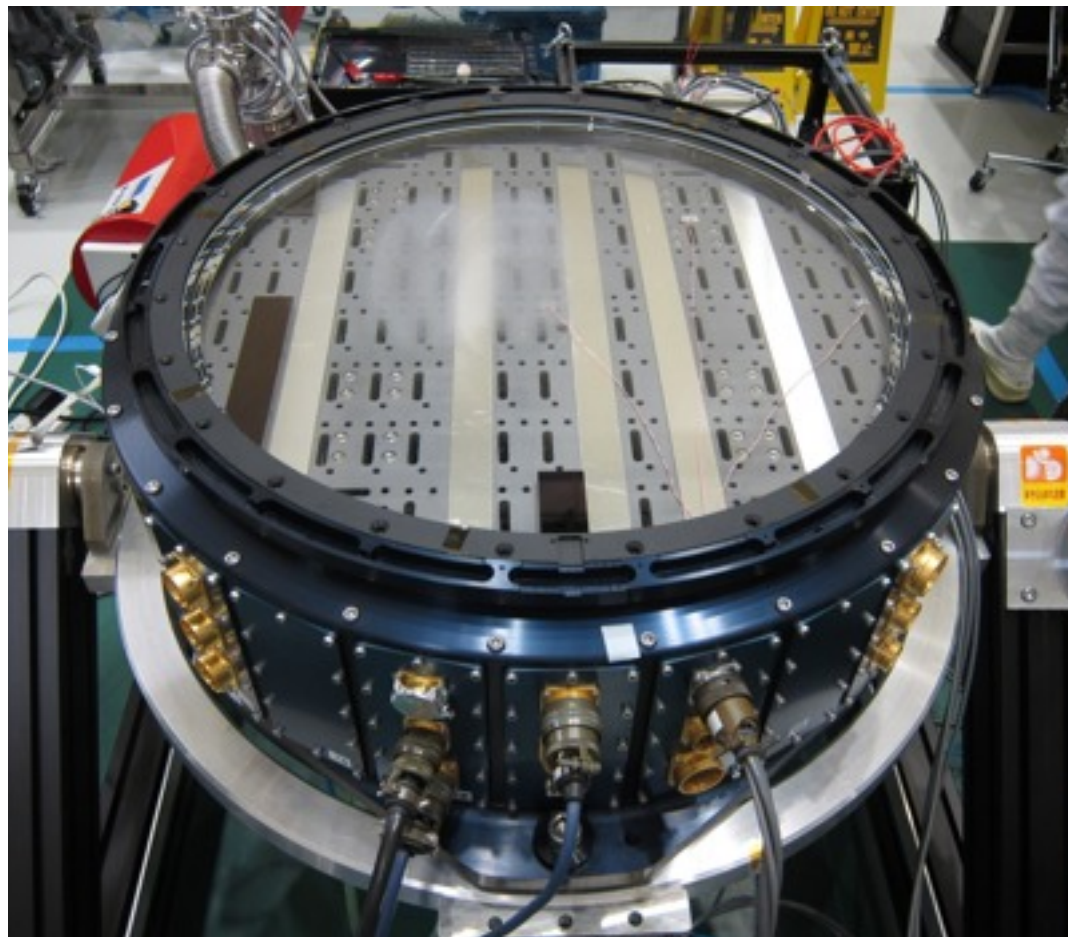
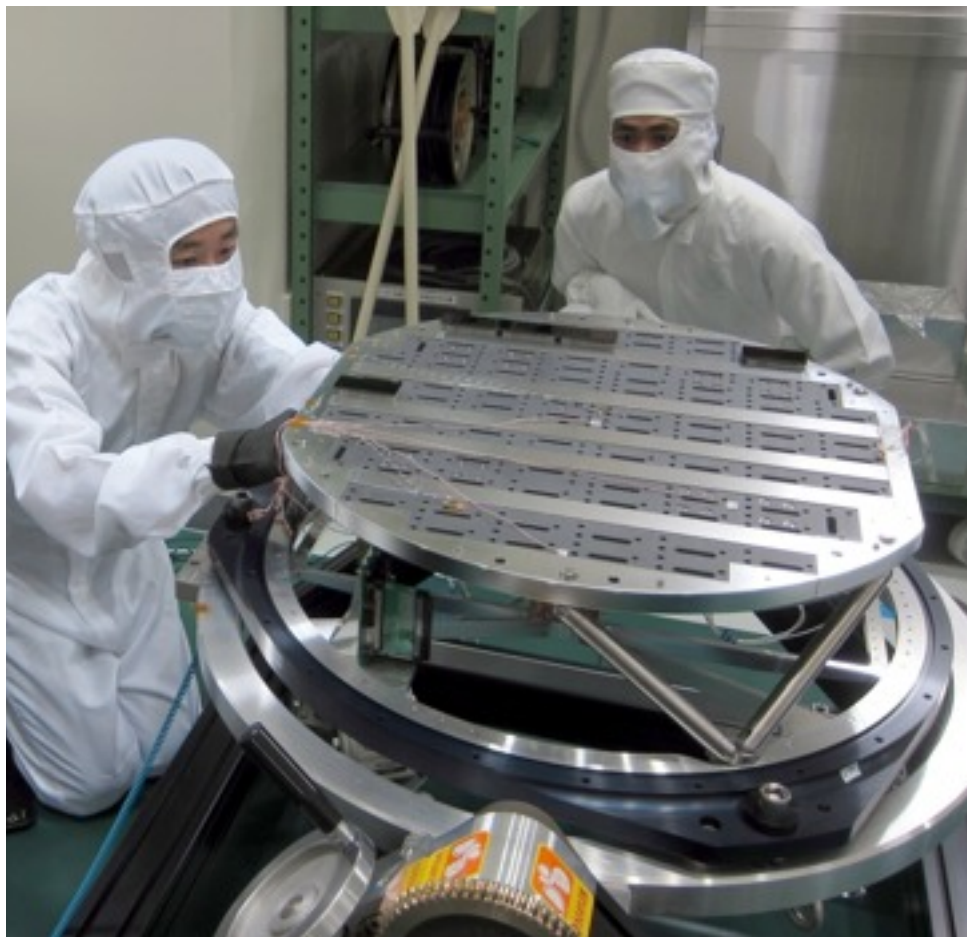


Hyper Suprime-Cam

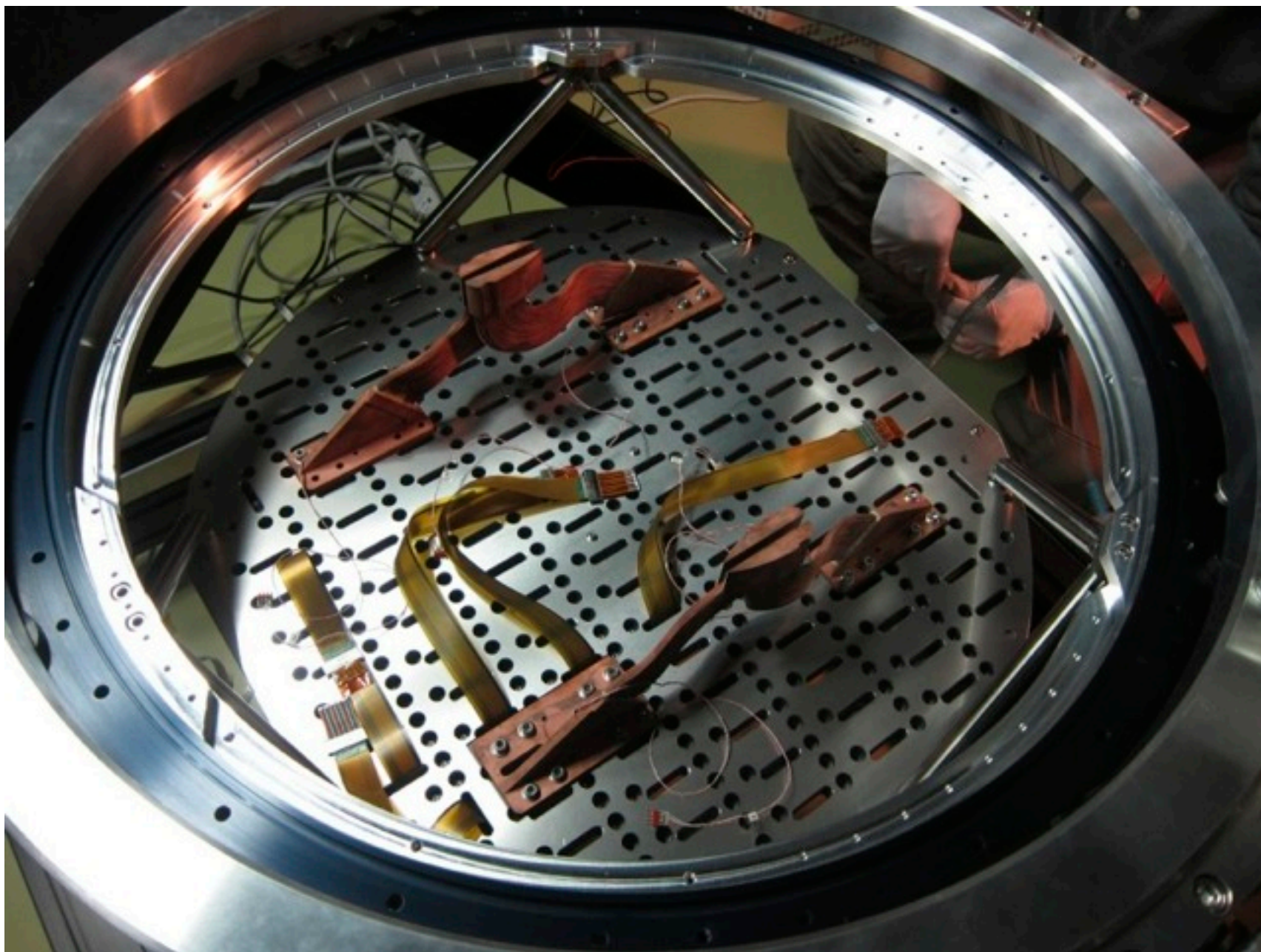




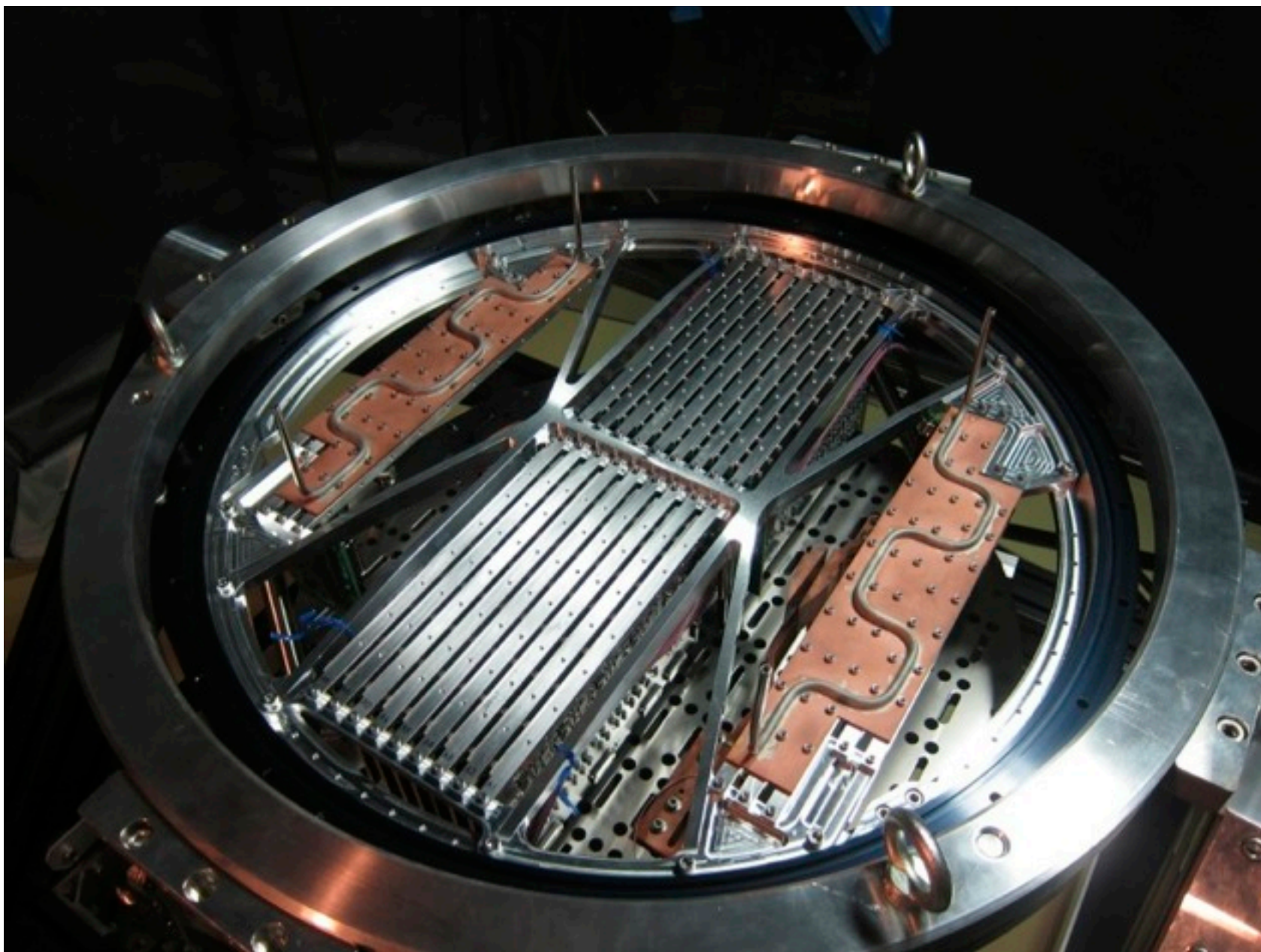
HSC 真空冷却デューワー



暗電流を下げるためにCCD
は冷却しなければならない

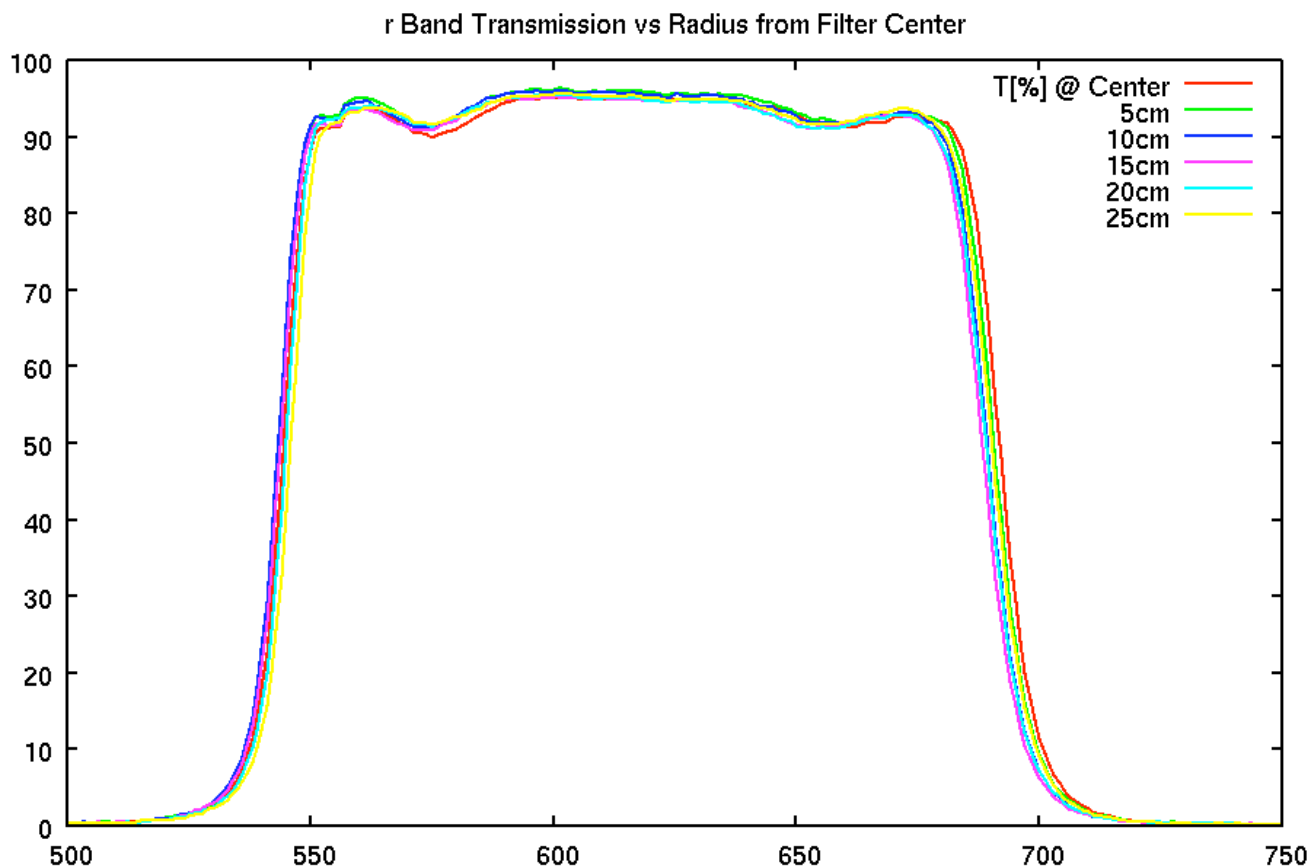


読み出し回路のインストール



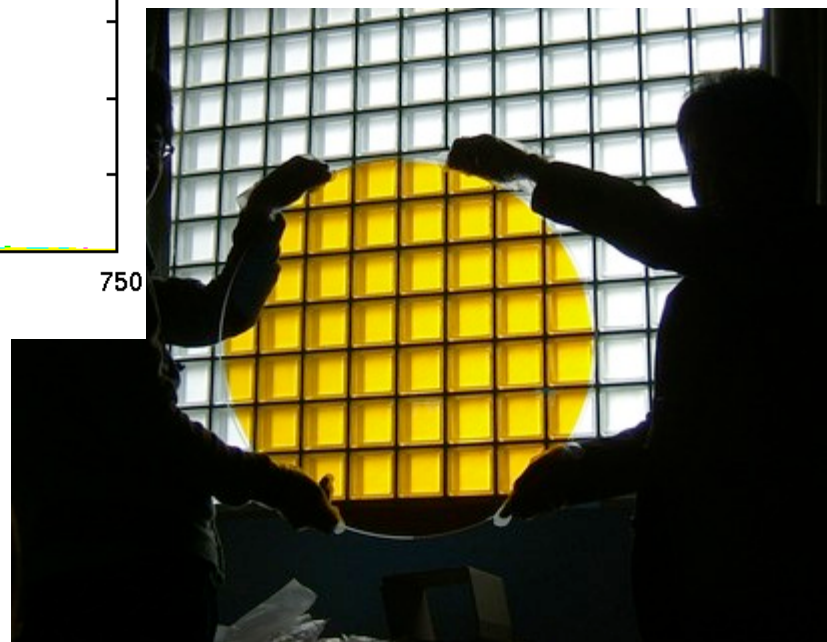
HSCのフィルター

透過率



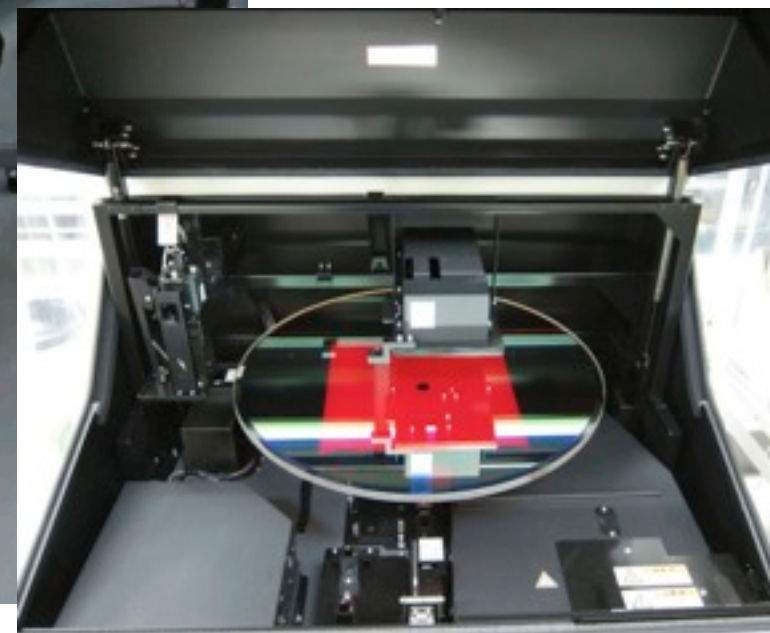
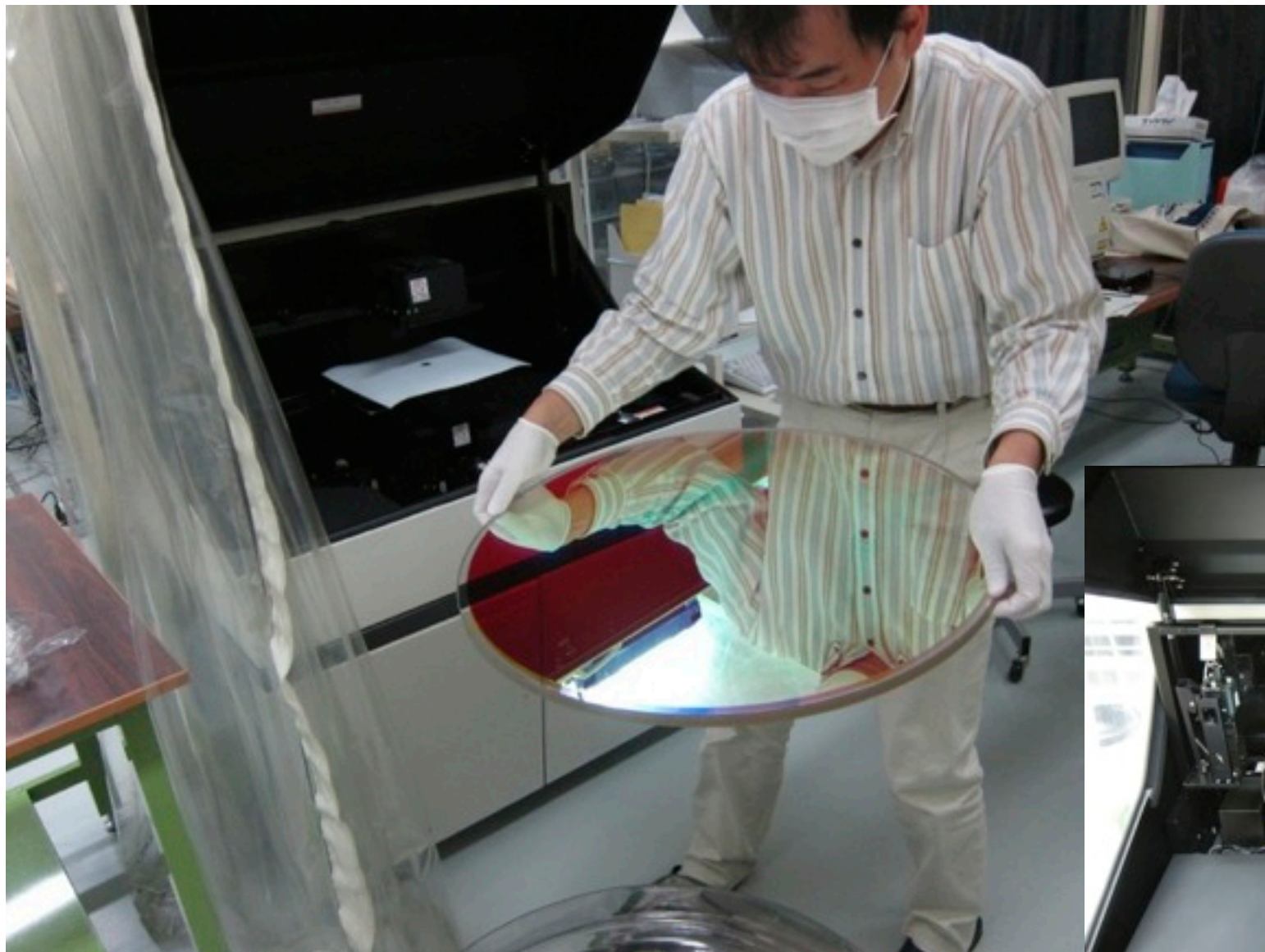
波長

直径 60 cm



大型で透過率特性が一様なフィルターが必要

Filter

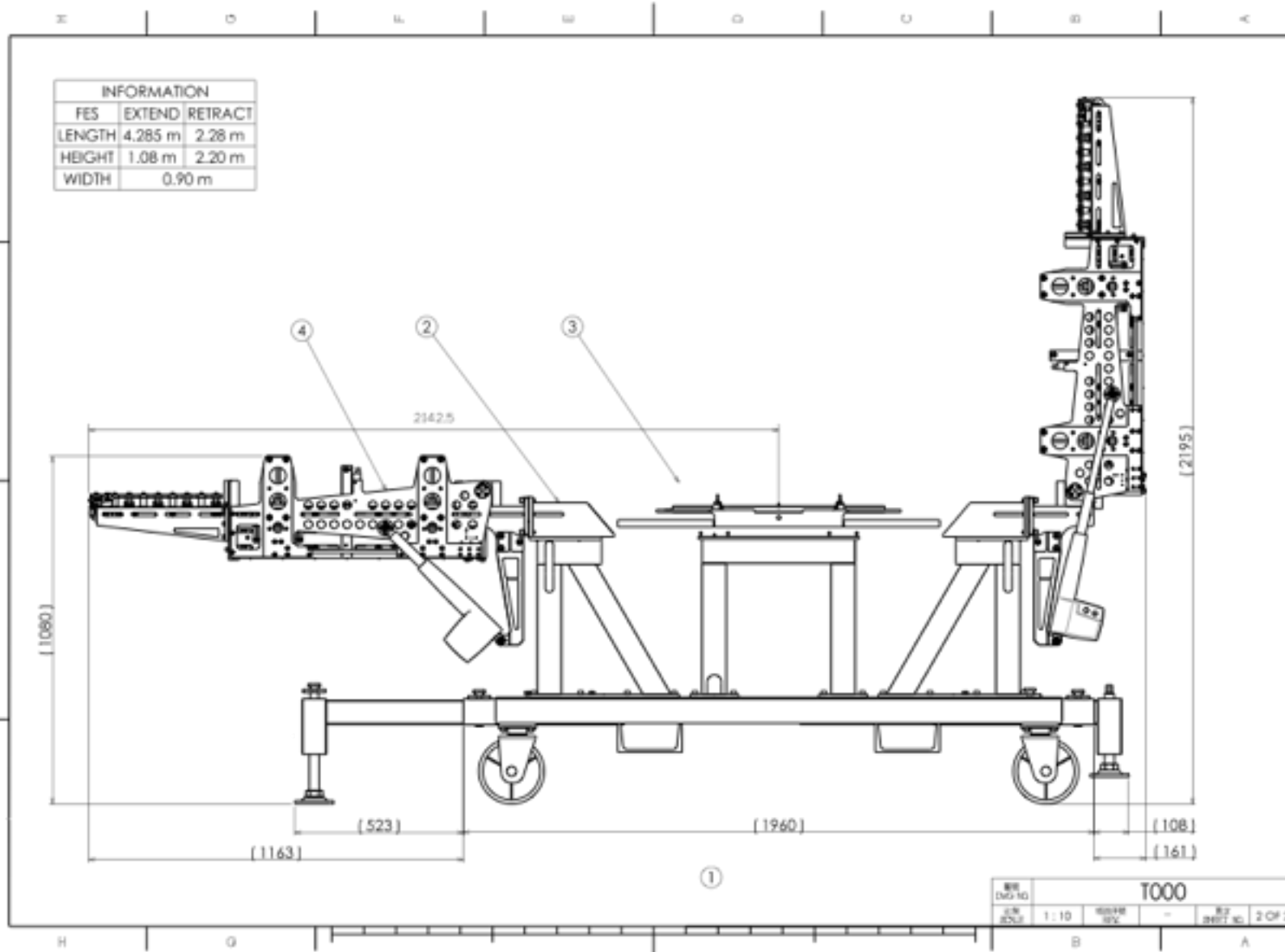


i'- filter : Barr



フィルター交換機構

6枚搭載



ATCで概
念設計

台湾で詳
細設計・
製造



HSCフィルター交換機構



スタッカー
の展開動作

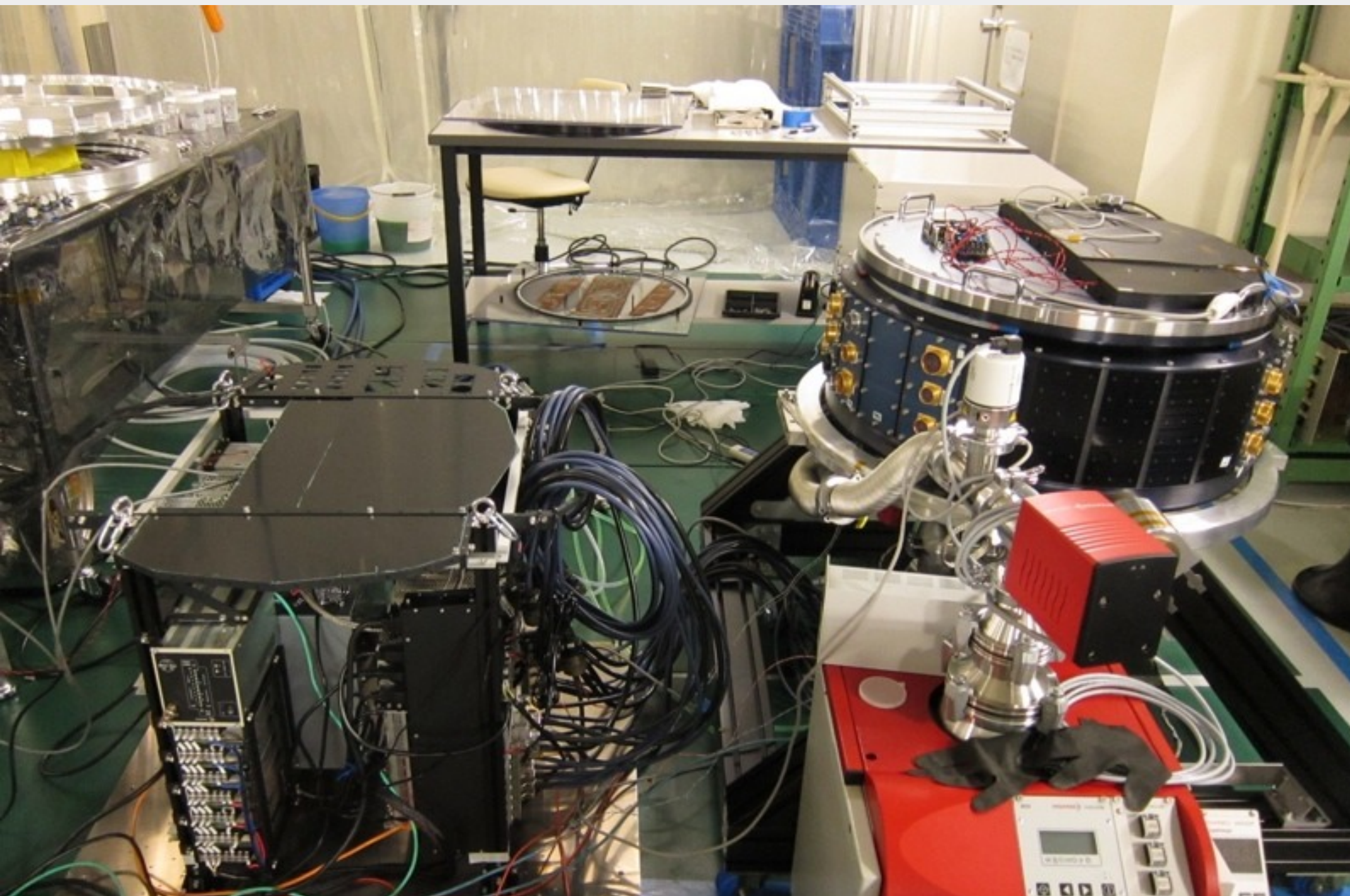
HSC シャッター



ATCで開発



HSCカメラ部の組み上げ





HSCカメラ部の組み上げ





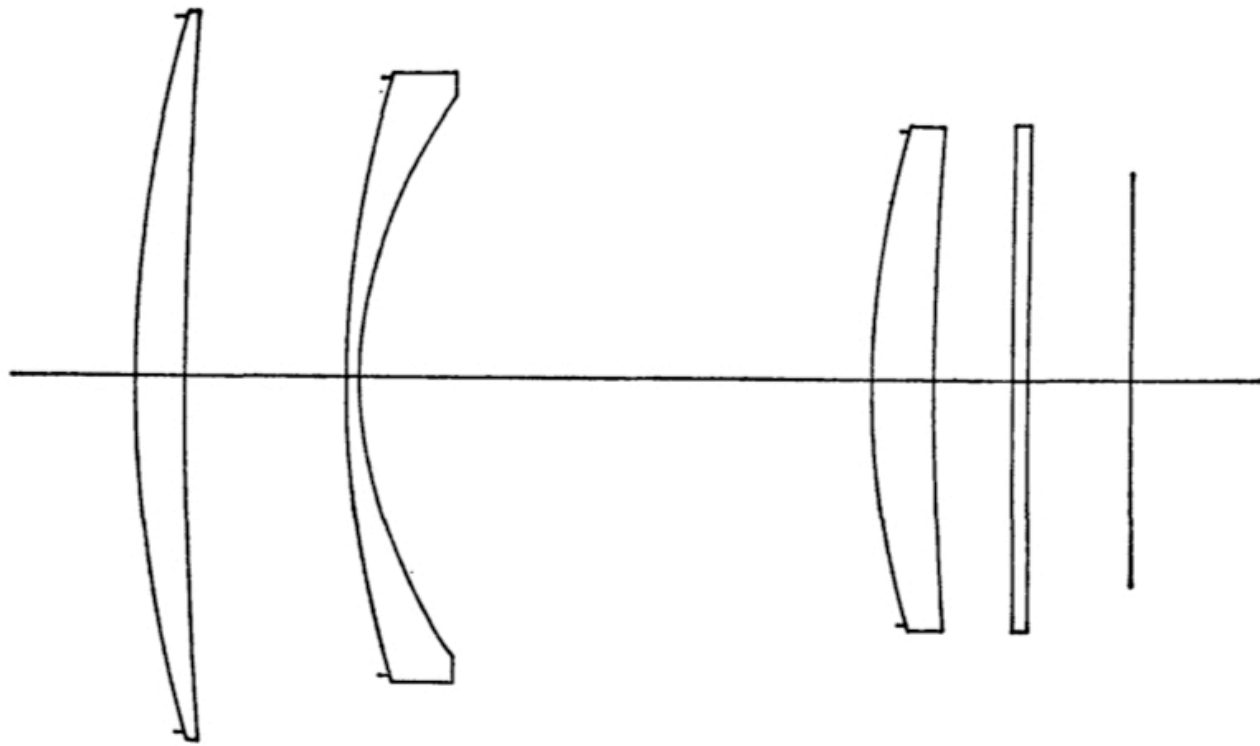
大型補正光学系の製作

補正光学系

- すばるはリッチー・クレチアン (RC) で主鏡は双曲面
- (生の) 主焦点には球面・コマ・非点・像面湾曲の全ての収差が出る (軸上ですら)
- 補正光学系が必要

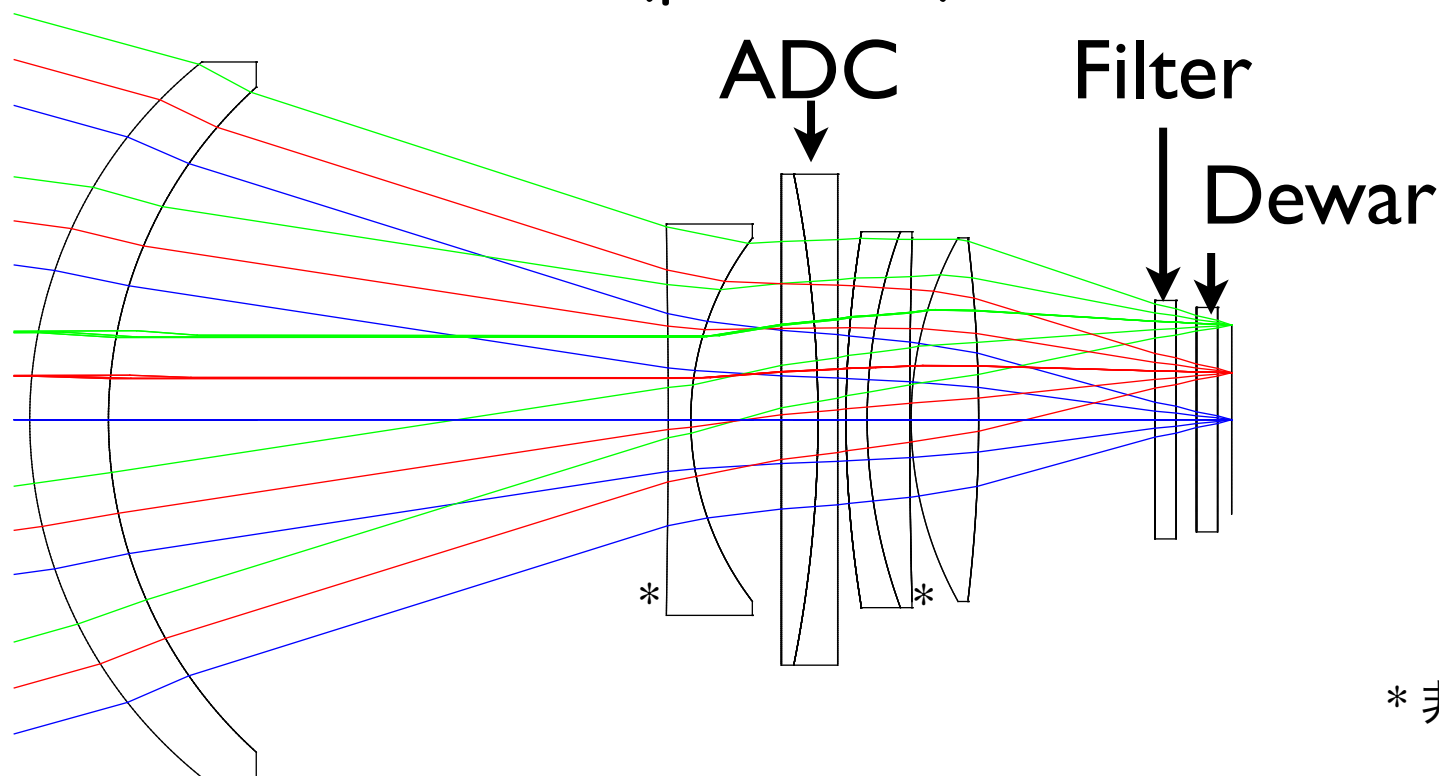
補正光学系

- Wynne Triplet (1968)
- Kitt Peak 4 m望遠鏡用 (F/2.8)
- 全て球面 UBK7ガラス
- 結像性能 $0''.5$ ($\phi=30'$) $1''.0$ ($\phi=1$ deg) 400-500nm



すばる主焦点補正光学系 (8.2m F/2)

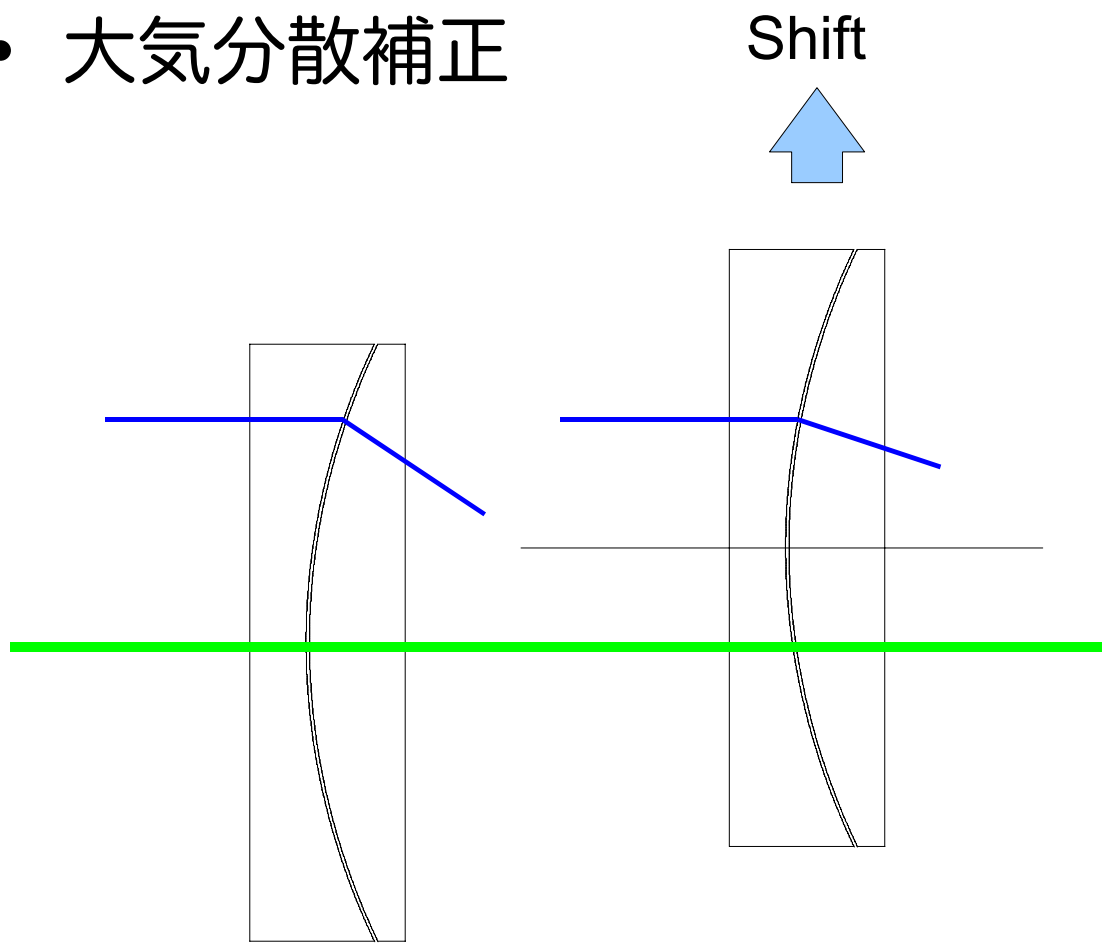
- Wynne Triplet + Lateral Shift ADC
- 様々な光学硝子
- 非球面レンズ
- 結像性能 $< 0''.18$ ($\phi=30'$) : 400 - 1000 nm



* 非球面

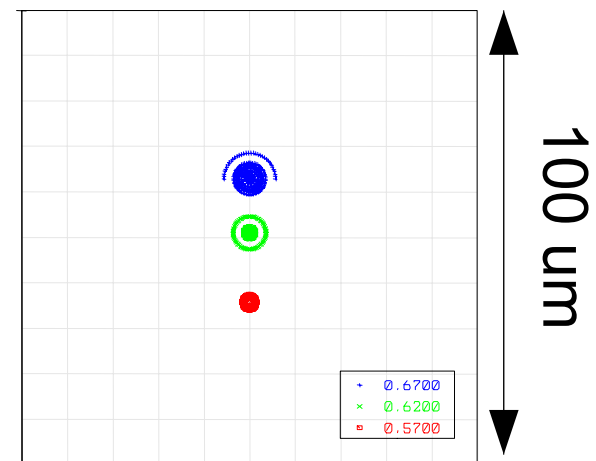
- Atmospheric Dispersion Corrector

- 大気分散補正



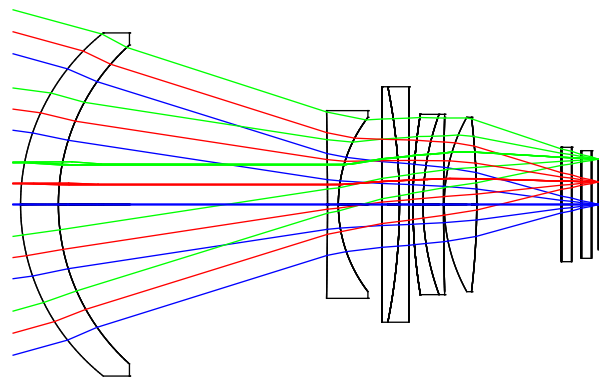
EL = 90

EL < 90

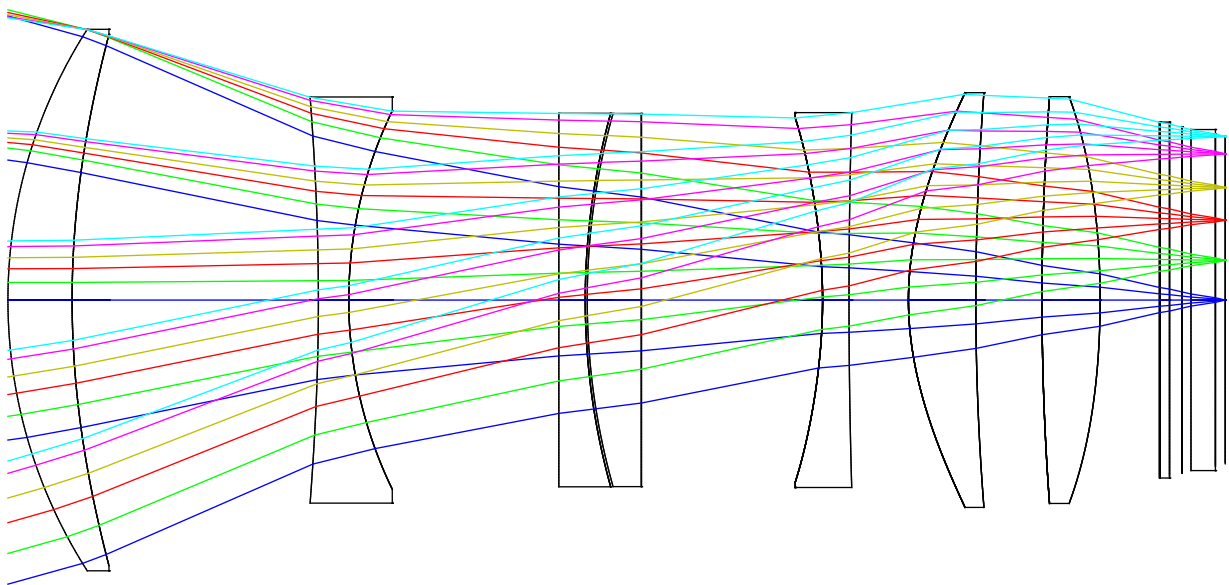




補正レンズ



現行

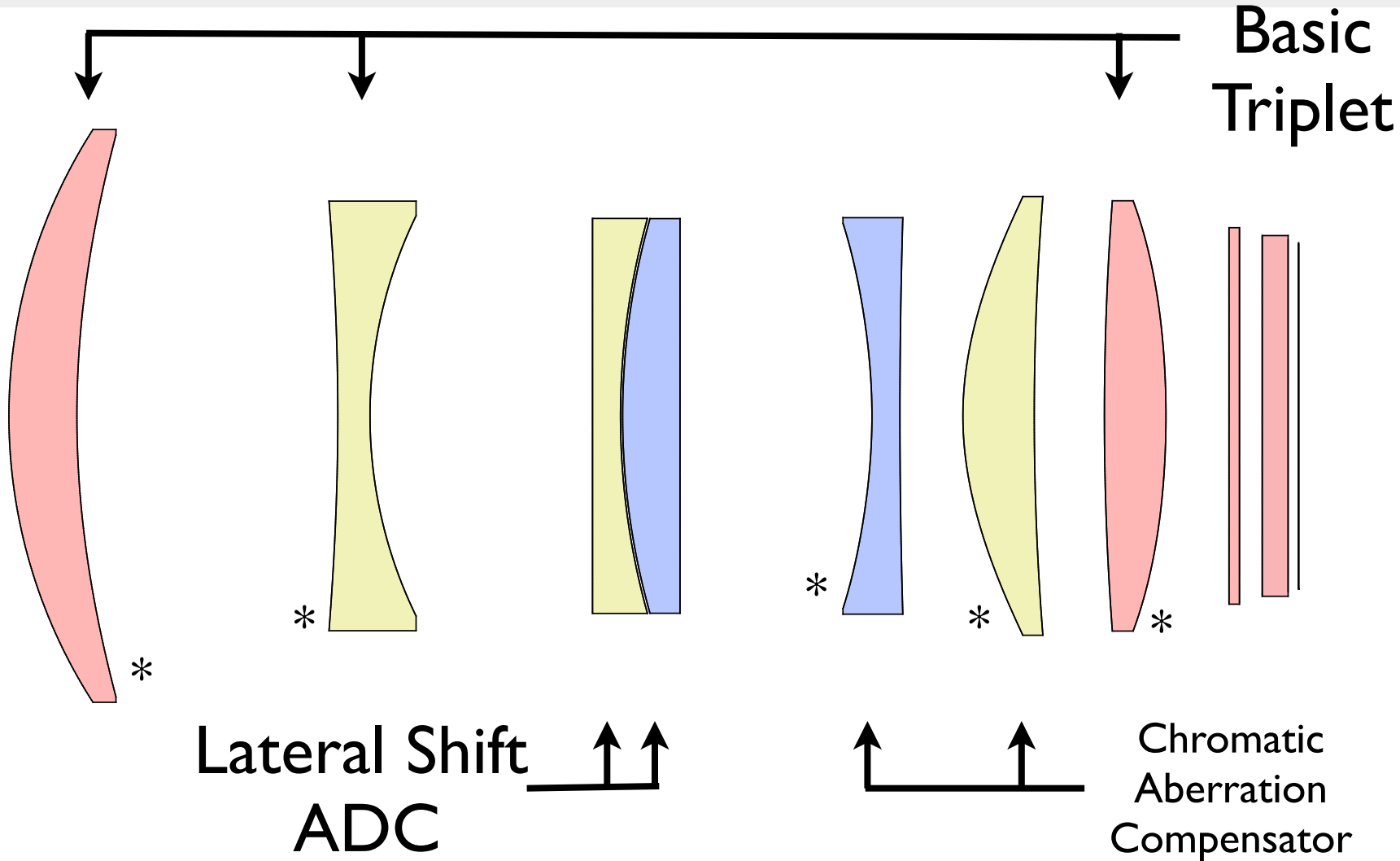


HSC

第一レンズ直径 820 mm



New Wide Field Corrector



- Quartz
- BSL7Y
- PBLIY

大型非球面レンズの製造

- 研磨
 - 研削 -> 球面研磨 -> 非球面研磨
 - NCで数cm角の研磨子を制御
- 検査
 - 接触式を採用

光学的方法では検査が困難な、
凸非球面を採用できる



New WFC G1



HSC補正レンズ



キヤノン工場で組み上げ中
ほぼ予定通り



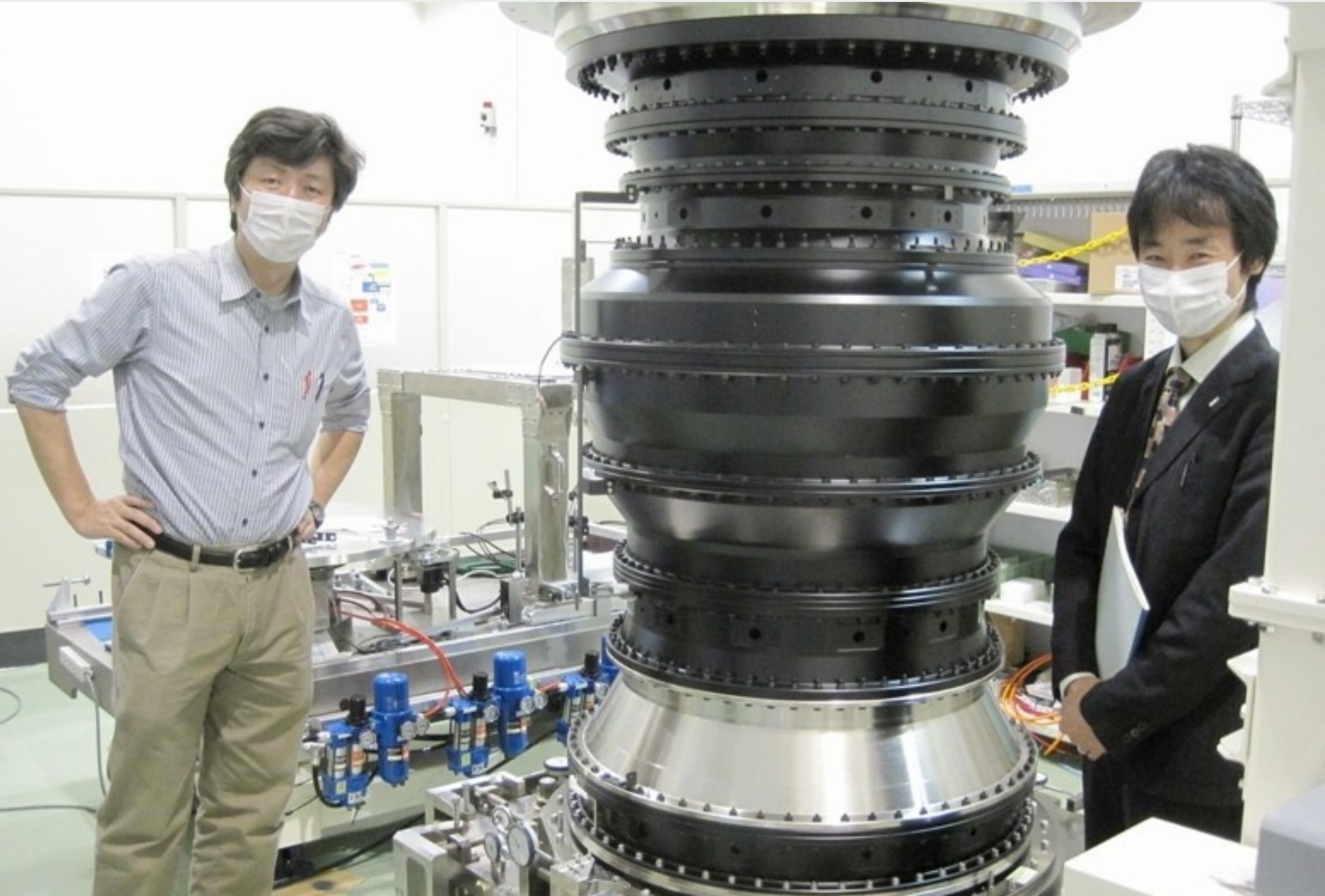
Wide Field Corrector



Measured Performance
0".18 FWHM in R
Delivered in May



HSC補正レンズ





高い結像性能を実現する機械系

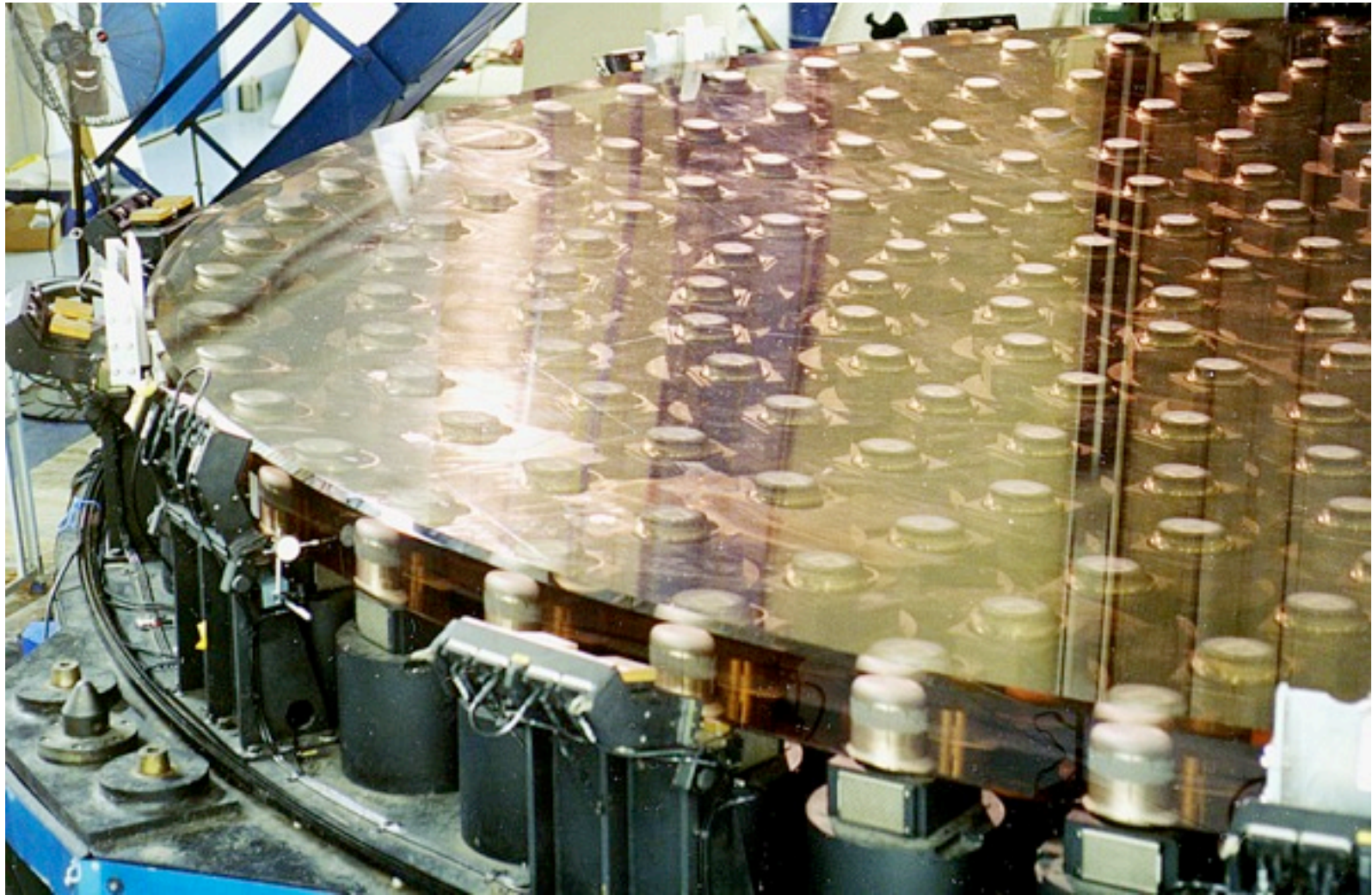


シャープな像を実現する

- 結像性能の劣化要因
 - 主鏡形状の変化
 - 鏡筒のたわみによる光軸ズレ、アオリ

主鏡の変形

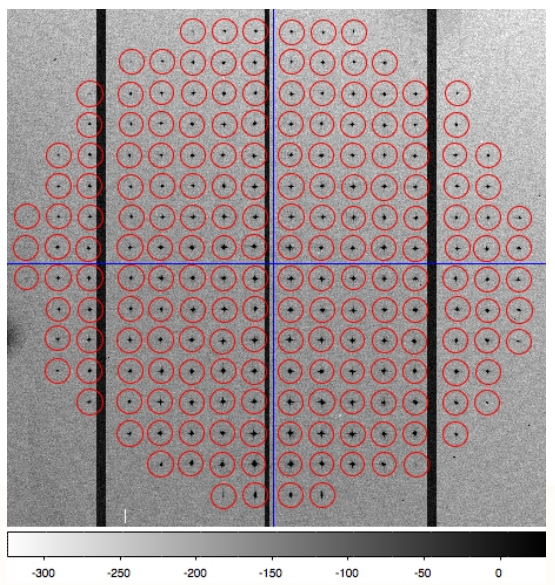
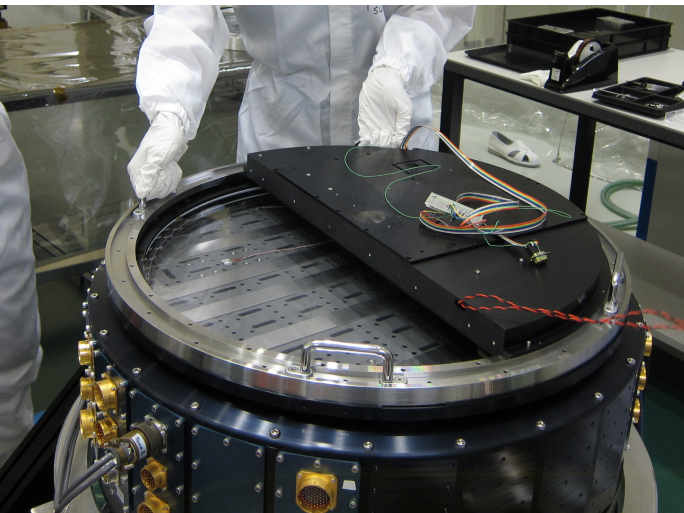
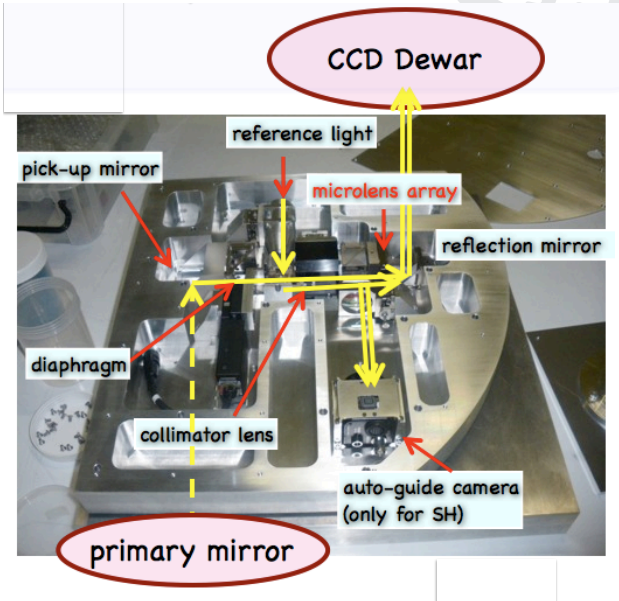
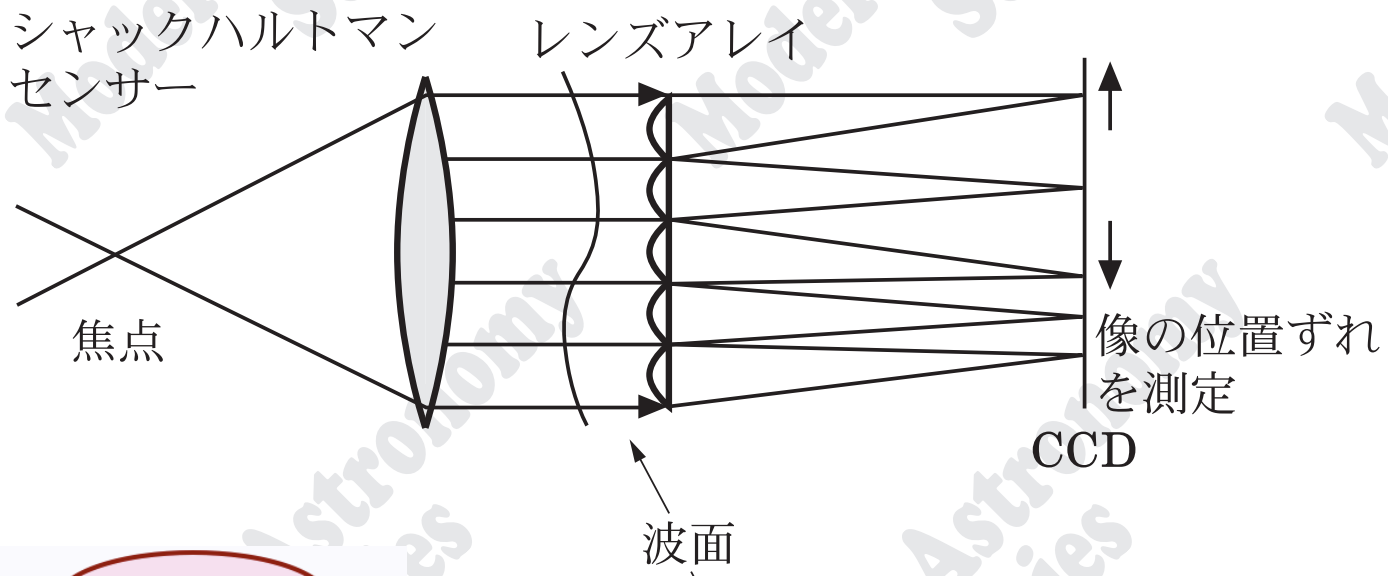
- 検出してアクチュエーターで直す



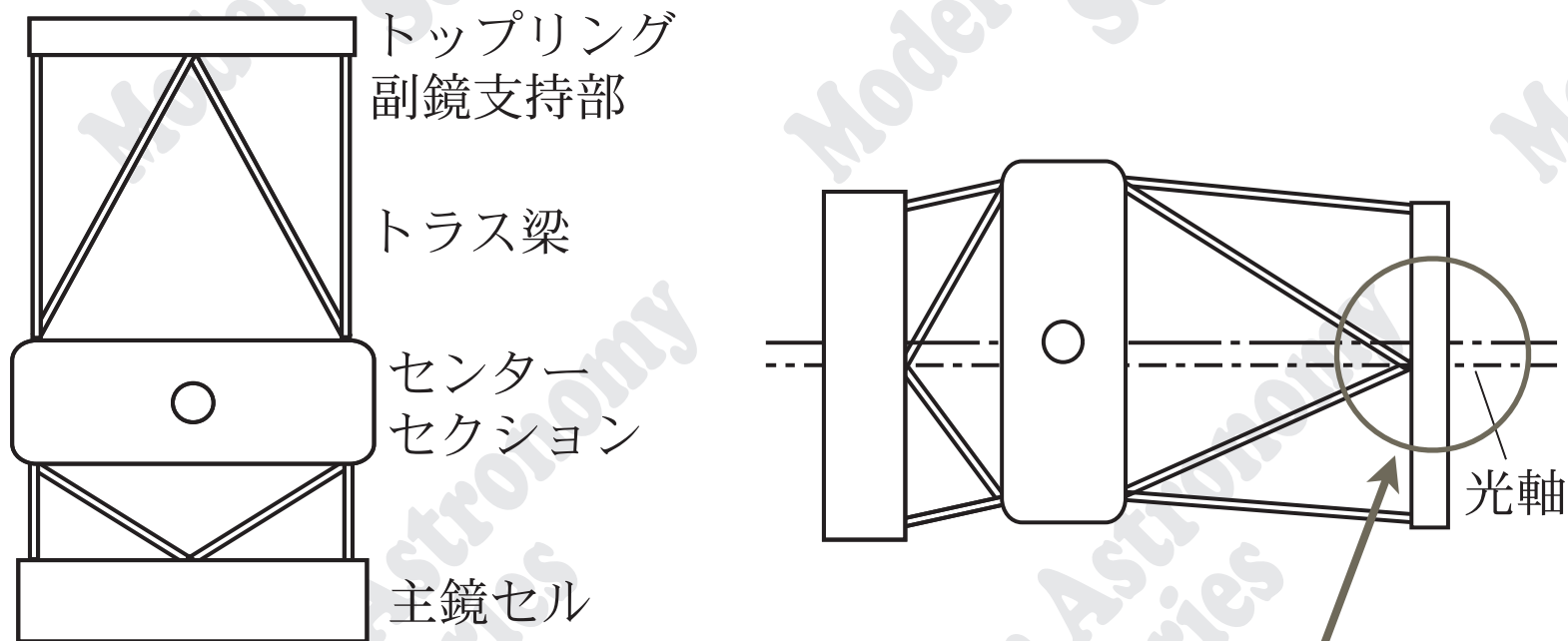
すばるの場合、仰角の関数として
Lookup tableを作っておけばよい

主鏡変形の検出

- シャック・ハルトマンセンサー



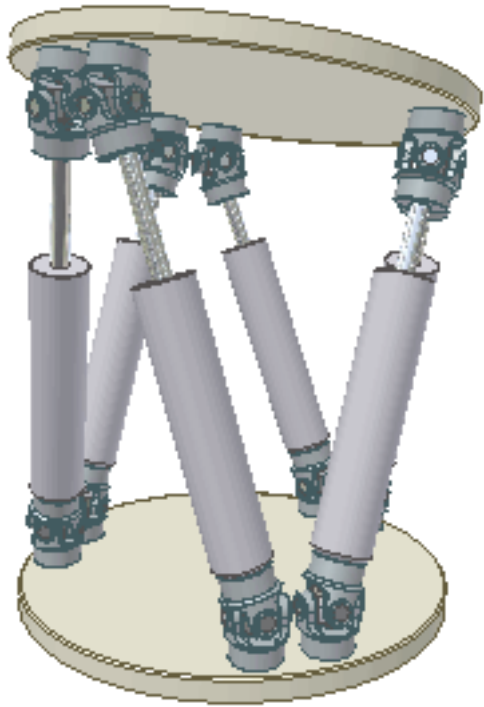
望遠鏡の変形



セルリエトラス構造により、変位の差が最小になるよう設計されているが残差を補正する必要がある

カメラの姿勢
(偏芯、傾き)
を制御する

カメラ（副鏡） 姿勢の制御



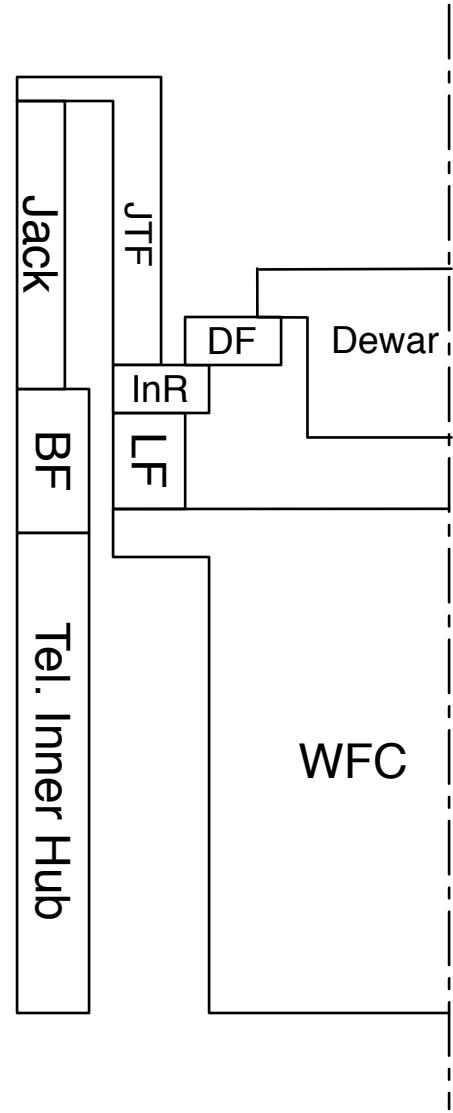
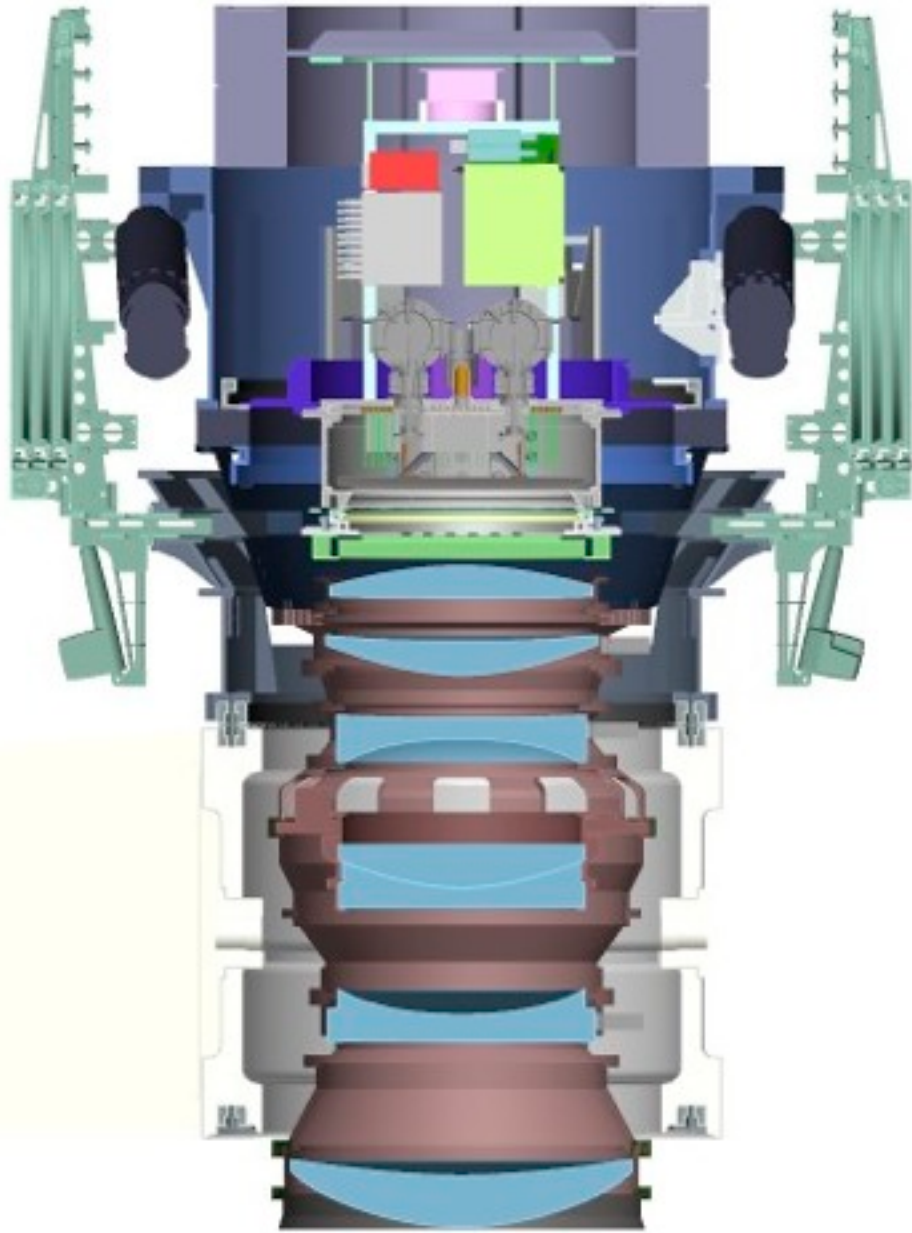
Hexapod(6本のアクチュエータ) を使用する



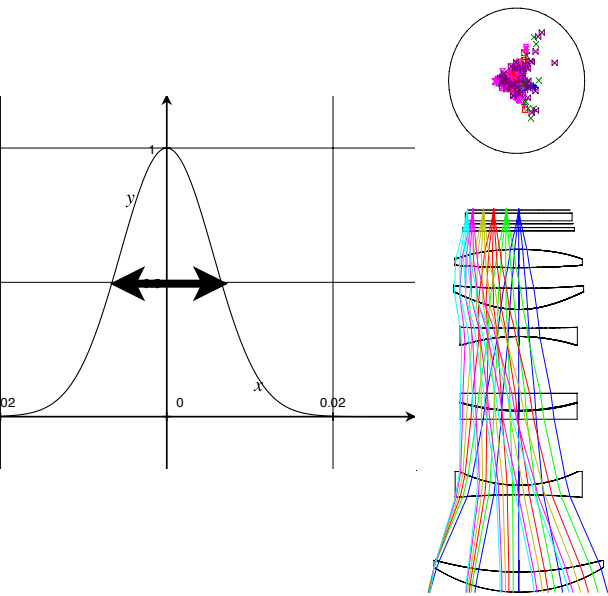
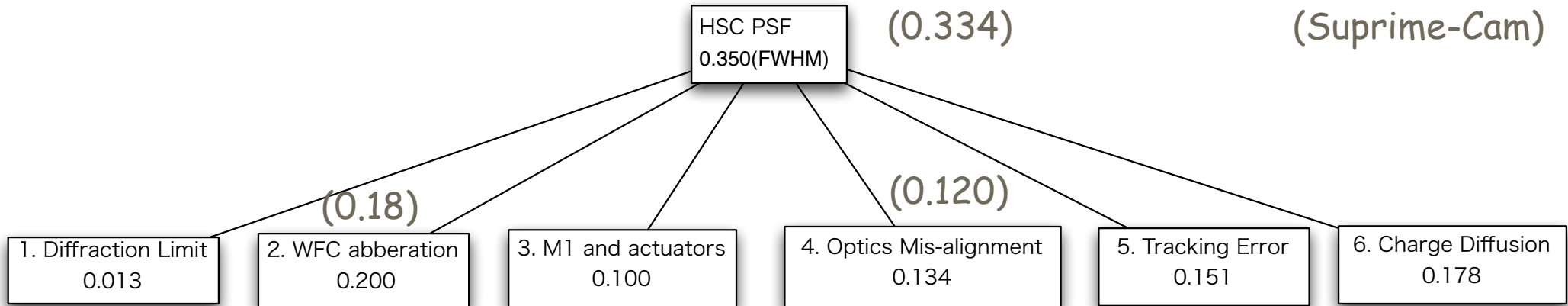
数トンの荷重を1~2
 μm の精度で制御する
技術を要する



カメラ（副鏡）姿勢の制御



結像性能評価



0".013

0".2



0".1

光学機器
間の位置
ズレ

0".134

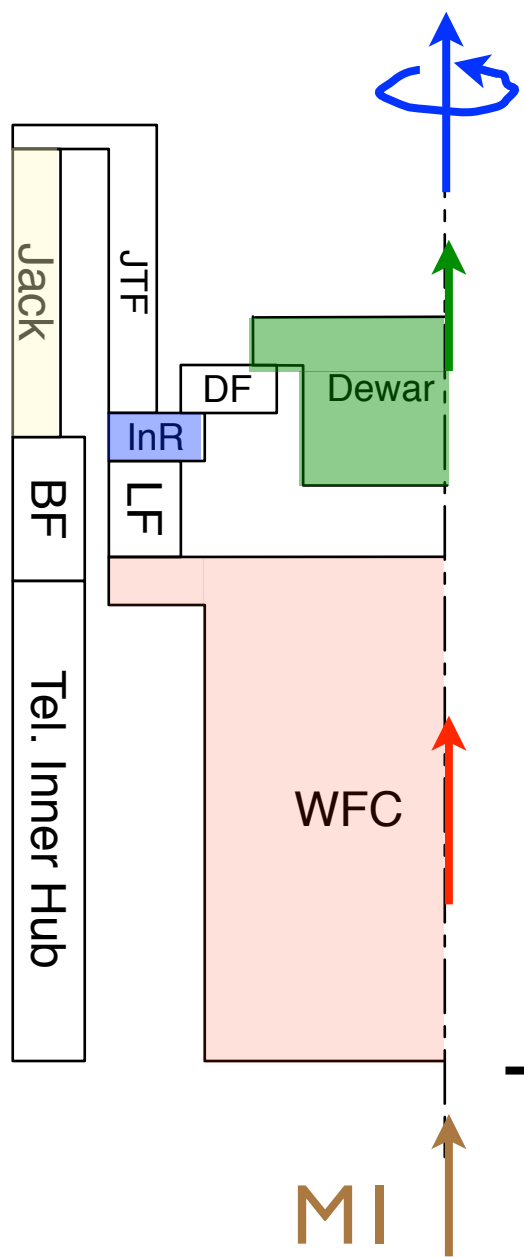


0".15

CCD内
の電荷
拡散

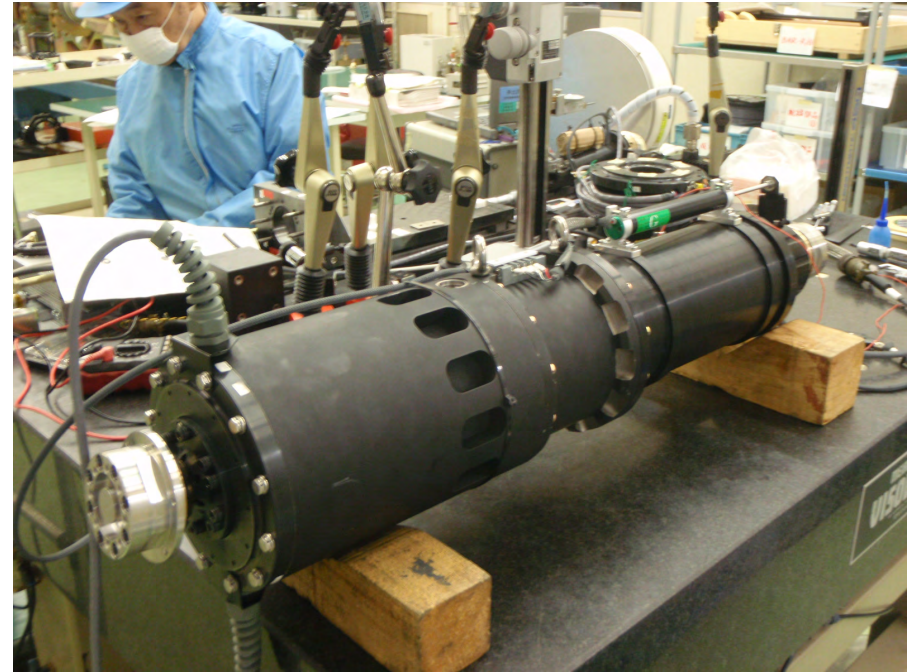
0".18

光学機器間の位置ズレ



Tilt	MI - WFC	0.060
	WFC - InR	0.062
	InR - Dewar	0.083
de-Center	WFC - InR	0.015
de-Focus		0.057
Total mis-alignment		0.134

HSC望遠鏡インターフェース



Jack

Jack Top Frame



HSC組み上げ・試験





HSC組み上げ・試験





HSC組み上げ・試験





HSC組み上げ・試験



WFC-Dewar

相対傾き

< 10''

(30 μm)

EL=90->0



Hyper Suprime-Cam

ハワイにおける立ち上げスケジュール

- 2011年10月 望遠鏡搭載試験
- 2011年11月 カメラをハワイに出荷
- 2012年1月 試験観測開始

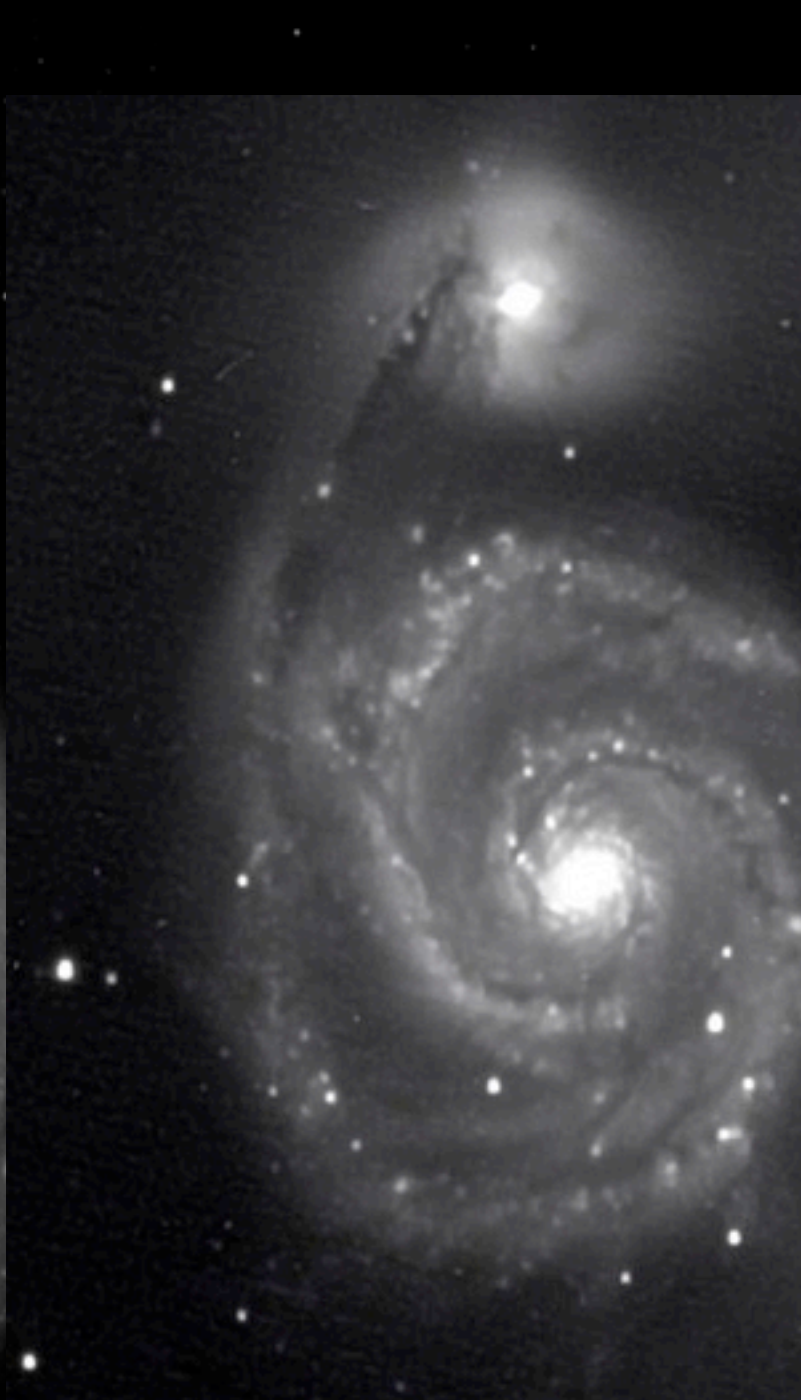


Hyper Suprime-Camで観る宇宙

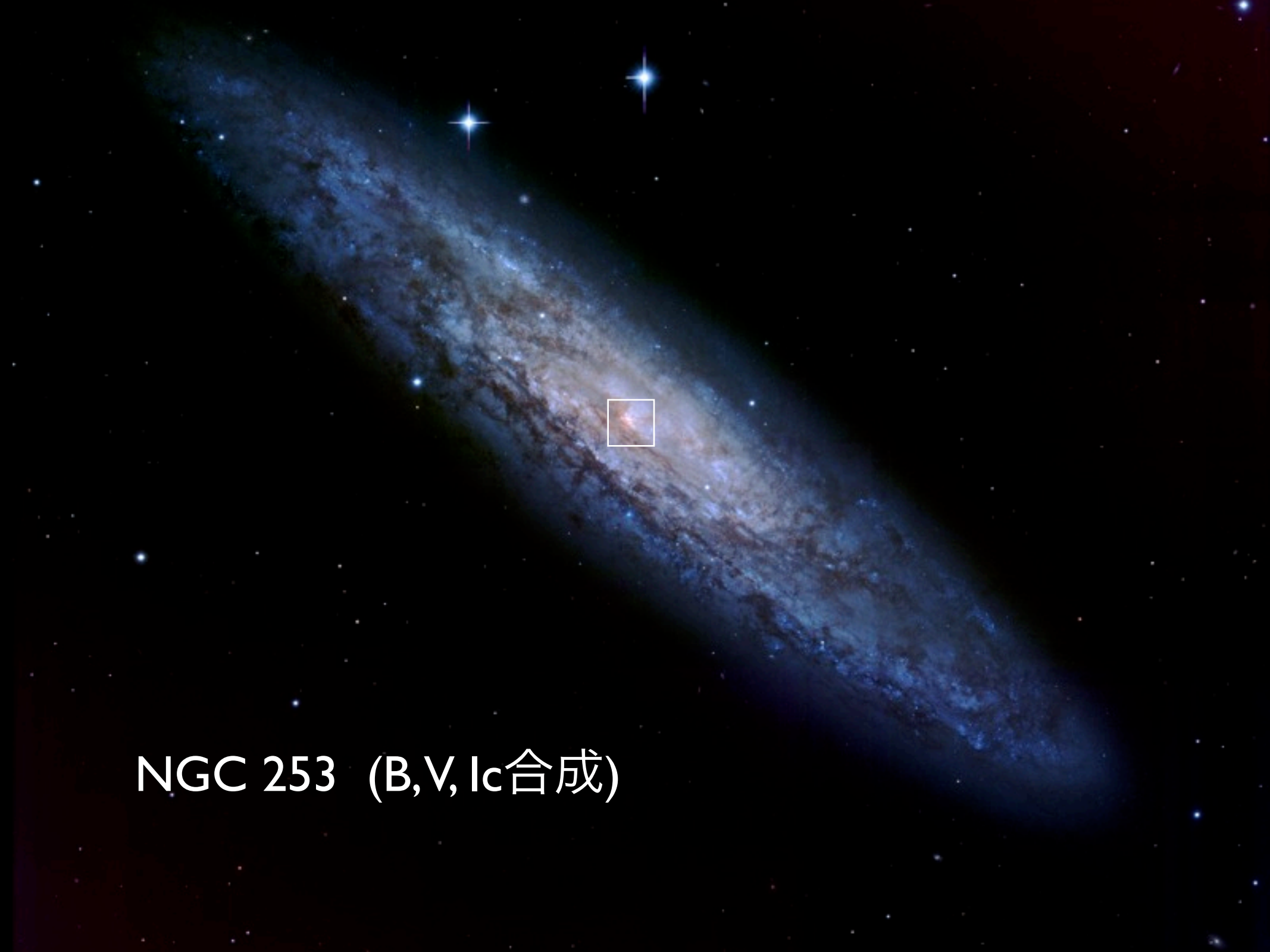


M51

すばる

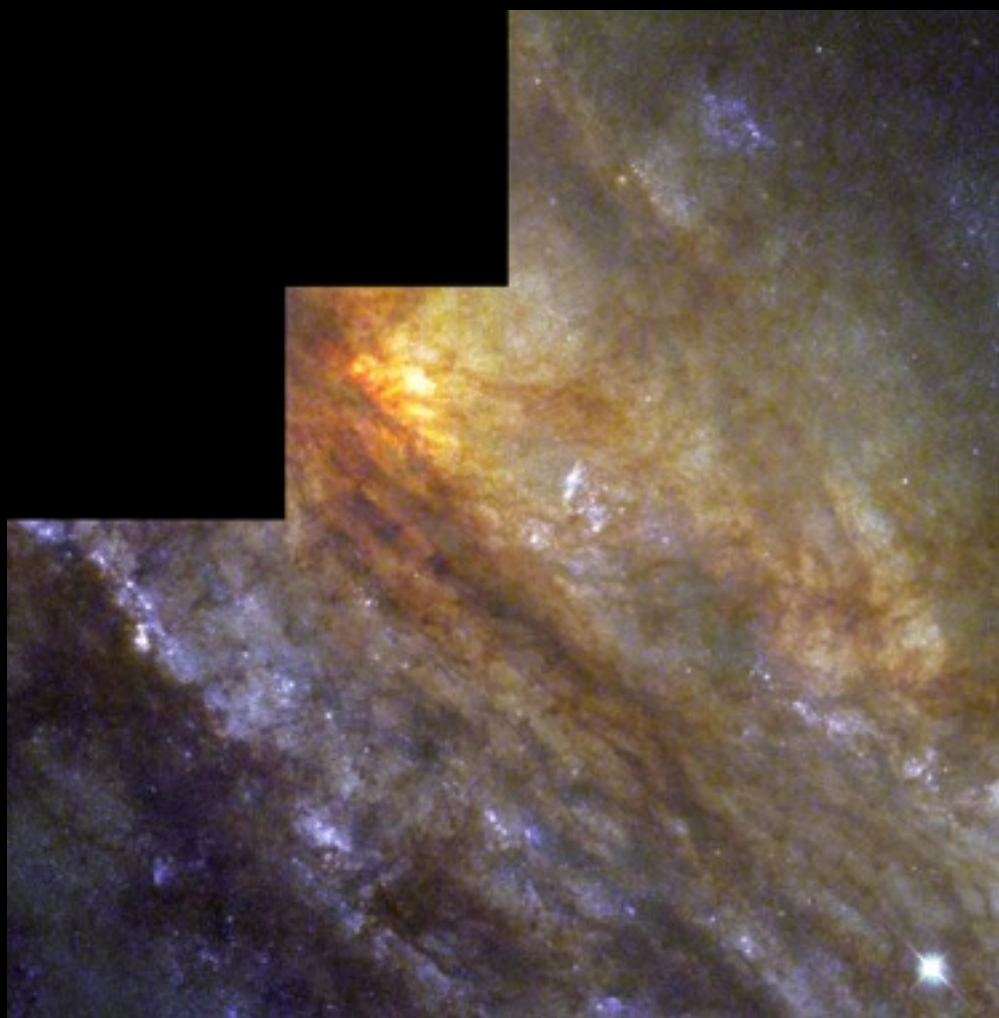


ミューロン210



NGC 253 (B,V,Ic合成)

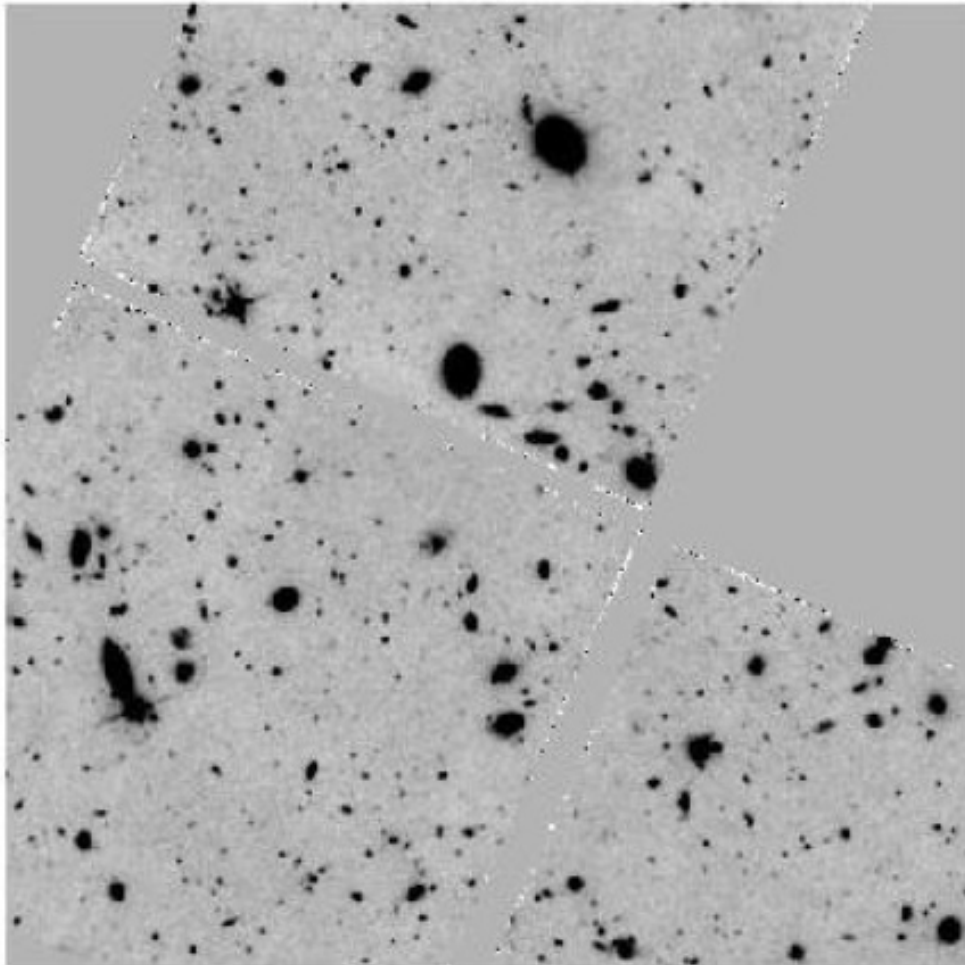




ハッブル宇宙望遠鏡
(全視野)

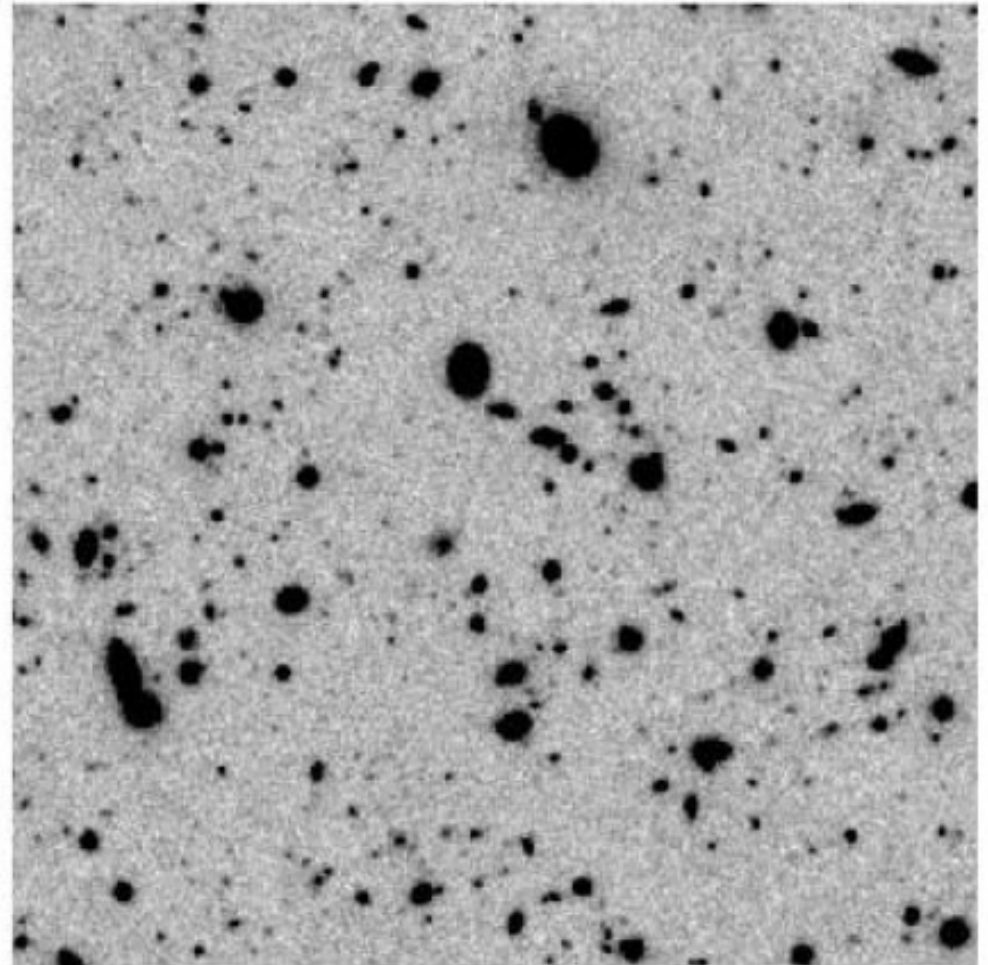


Suprime-Cam
(視野の1/100)



HST 'wide-I' continuum

ハッブル宇宙望遠鏡
(全視野)

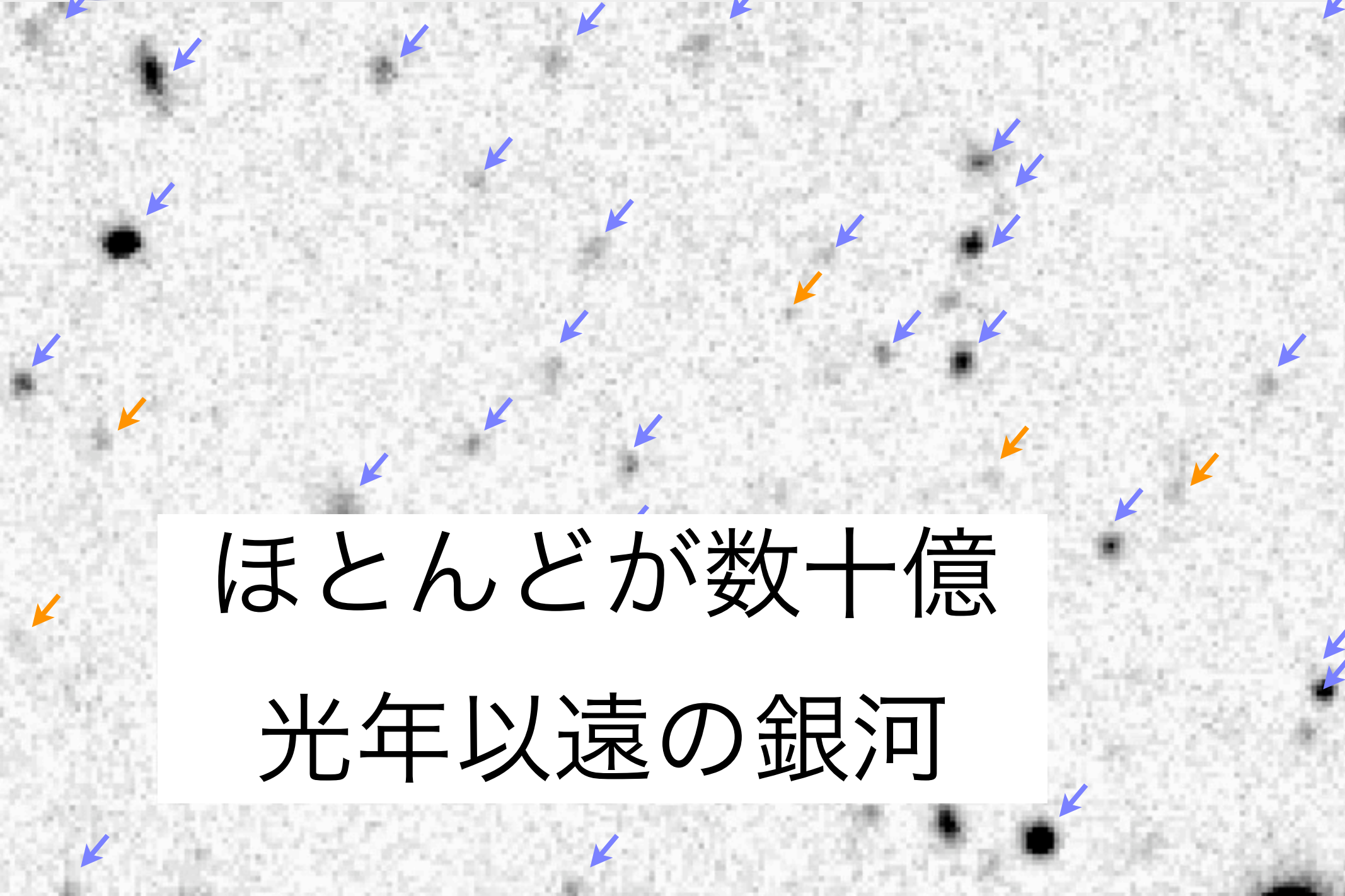


NB816 narrowband

Suprime-Cam
(視野の1/100)

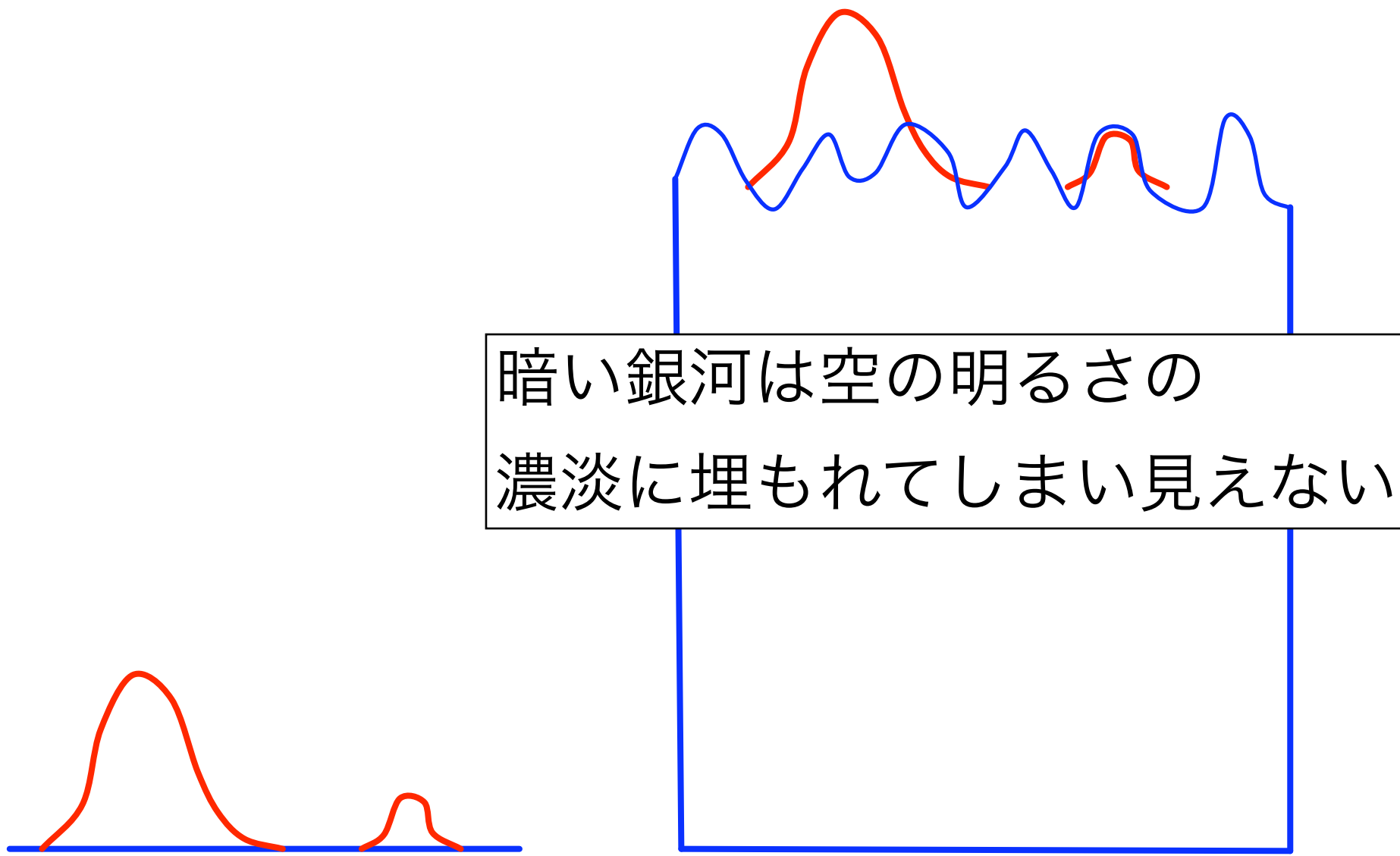


暗い銀河のクローズアップ像



ほとんどが数十億
光年以遠の銀河

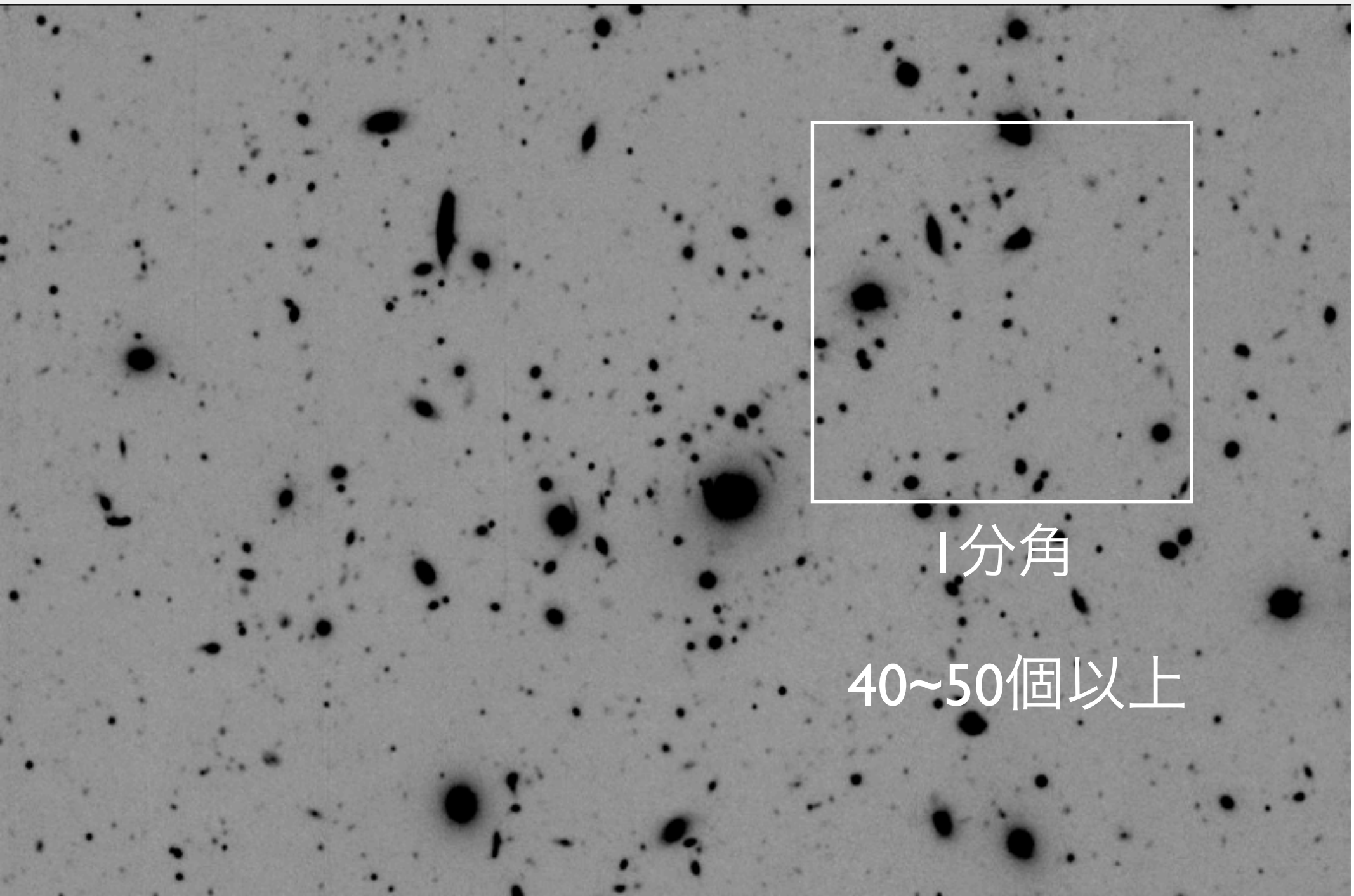
空の明るさと暗い銀河



空の明るさがゼロの場合

空の明るさが明るい場合

銀河の個数



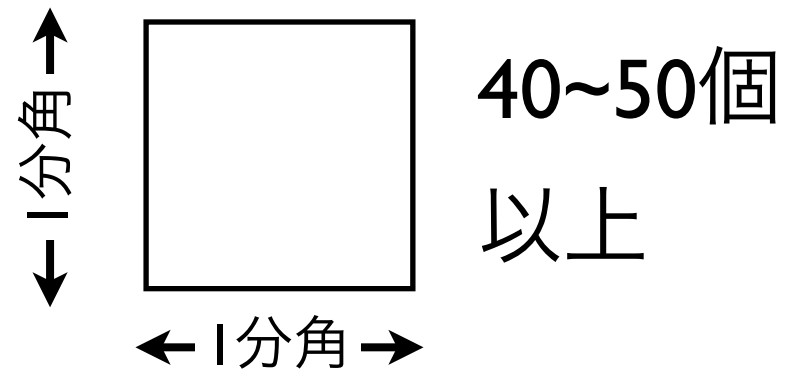
1分角

40~50個以上

1分角

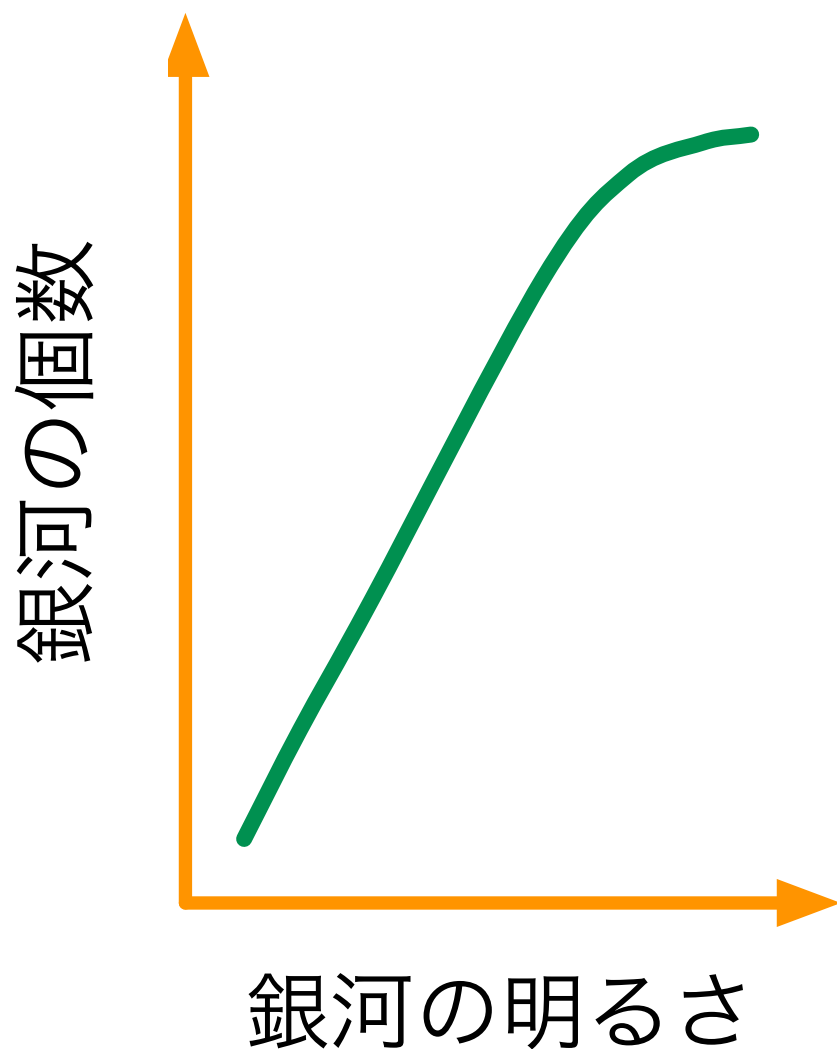
アイポータル	視力検査表			3m用
0.2				
0.3				
0.4				
0.5				
0.6				
0.7				
0.8				
0.9				
1.0				
1.2				
1.5				

視力1.0の人が分解
できる最小の角度



大望遠鏡で宇宙を観ると
銀河がたくさん写る

銀河数え



宇宙は有限の大きさ
だから、あるところ
で数の伸びが減る

宇宙全体の構造を調べ
る手段の一つだった

銀河の明るさや個数が時間ととも
に変化することが分かり、銀河数
えは宇宙構造を調べる手法として
は使われなくなった

HSCで観る宇宙

遠方銀河がたくさん見えます

銀河研究者は、この中から生まれたたての銀河を探したり、銀河のより集まり具合の変化を観察して楽しみます。

(銀河研究者:銀河がどのように生まれて、成長するかに興味がある人々)



銀河研究者は多い

月日	会場	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19											
9月21日 (火)								記者会見															
9月22日 (水)	A	受付		L. 太陽系	昼休み (理事会)	ポスター		Q. 星間	天文教育 フォーラム (E会場)														
	B			N. 恒星				N. 恒星															
	C			X. 銀河形成				X. 銀河形成															
	D			J. 高密度星				J. 高密度星															
	E			P. 星・惑星				P. 星・惑星															
	F			K. 超新星爆発				K. 超新星爆発															
	G			Y. 教育・他				V. 地上観															
	H			W. 飛翔観				W. 飛翔観															
9月23日 (木)	A	受付	Q. 星間	S. 銀河核	X. 銀河形成/R. 銀河	J. 高密度星	P. 星・惑星	M. 太陽	V. 地上観	W. 飛翔観	ポスター	昼休み (評議員会)	Q. 星間	S. 銀河核	R. 銀河	J. 高密度星	P. 星・惑星	M. 太陽	V. 地上観	W. 飛翔観	総会 出席者確認	総会 (E会場)	懇親会
	B																						
	C																						
	D																						
	E																						
	F																						
	G																						
	H																						
9月24日 (金)	A	受付	T. 銀河団	U. 宇宙論	R. 銀河	J. 高密度星	P. 星・惑星	M. 太陽	V. 地上観	W. 飛翔観	ポスター	昼休み		U. 宇宙論	R. 銀河	J. 高密度星							
	B																						
	C																						
	D																						
	E																						
	F																						
	G																						
	H																						
9月25日 (土)								公開講演会															
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19											



HSCでしか見えない宇宙

Dark Sectors of the Universe

大物実



2010年10月特別公開日

High Speed Suprime-Cam

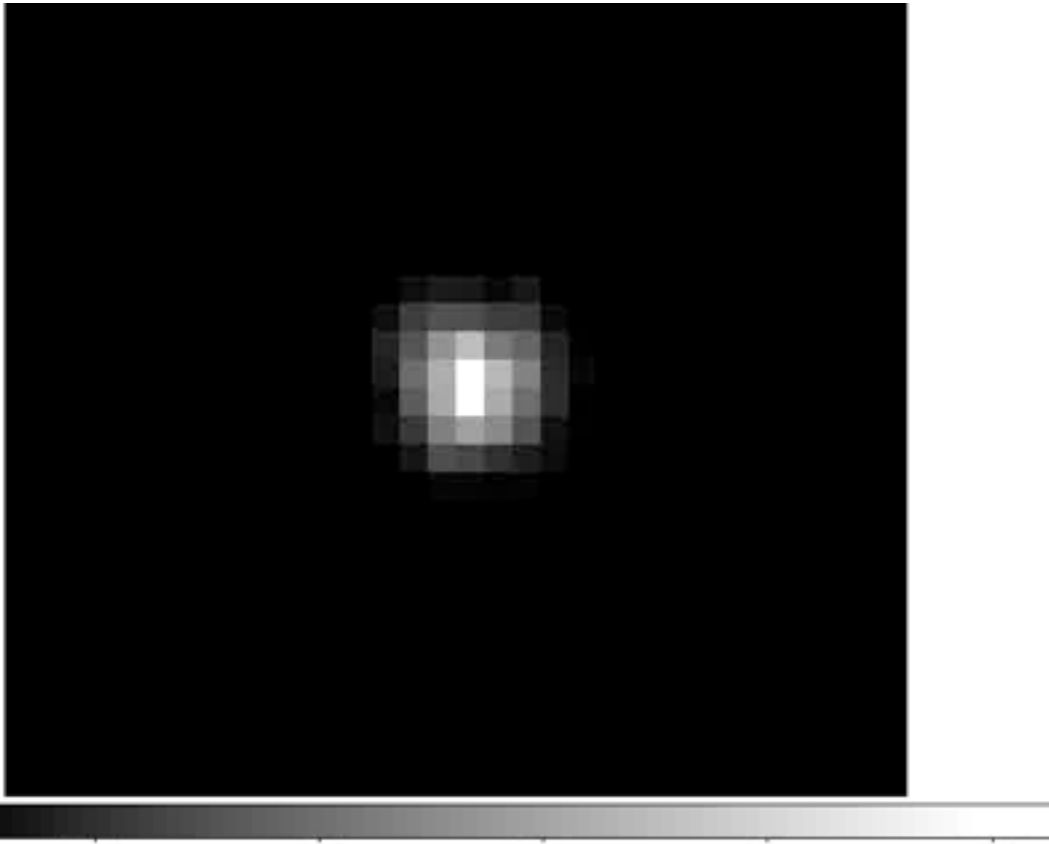
- Suprime-Camの機構部(PFU)再利用 (FOV 30')
- i' band だけで観測 (weak lensing)
- 0.1 arcsec/pix
- 10 % luckily good imageを使用するとSeeingが0.6秒角から0.3秒角に改善
- 15 Hz necessary
- isoplanatic patch ~ 1 arcmin
- Field coverage ~ 50 % of 30' FOV



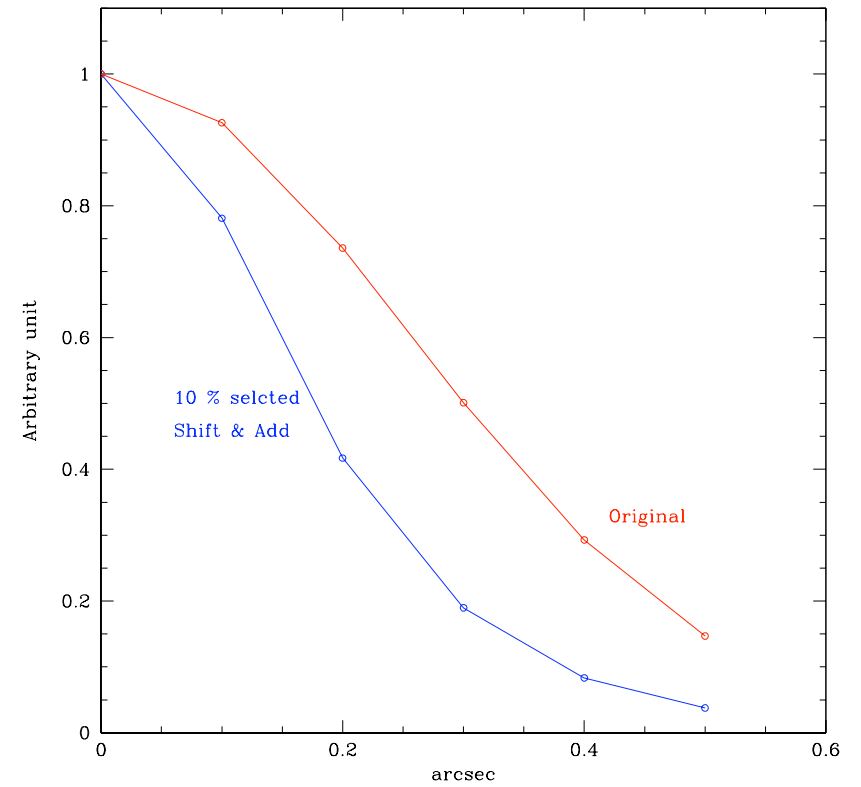
高速低ノイズCMOS

- 国内メーカーとの共同開発 (C社)
- 7.5 um pixel (0.1秒角 @ Subaru PF)
- Column ADC (~ 4000 ch)
- 読み出しノイズ <~ 2 e @ 15 Frame/sec
- 空乏層を厚くすること (50 micron以上) と裏面照射化は将来のオプション

Simulation

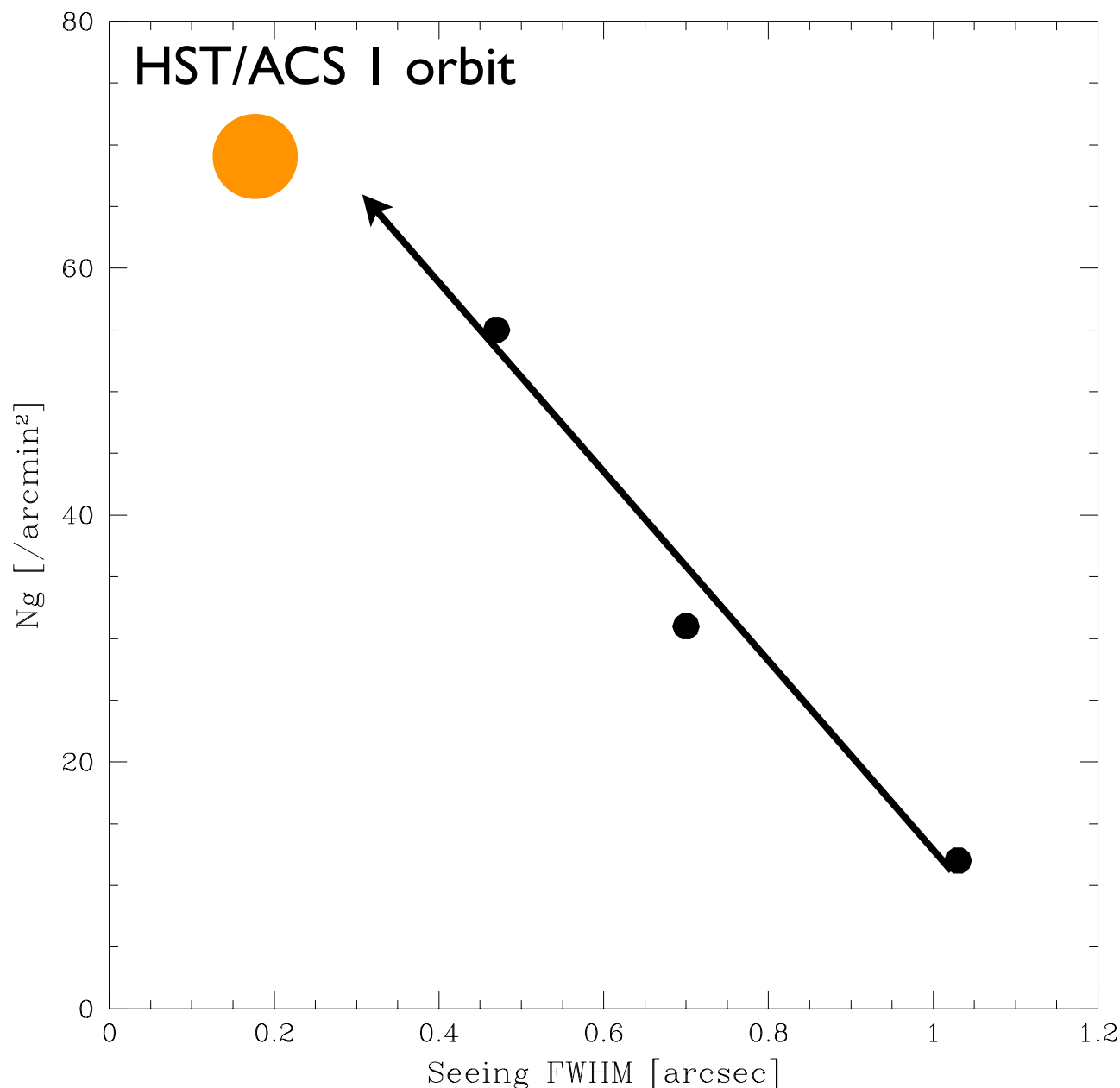


Guyon, Garrel, Miyazaki in prep.



Merit of better Seeing

Number of faint galaxies used for weak lensing analysis



Euclid vs Subaru

集光力

$$\frac{1.5^2}{8.2^2} \sim 3\%$$

カメラの視野

ほぼ同じ

(画像使用率) × (視野使用率)
が3%以上であれば、勝負になる



Conclusion

SC

2002

HSC

2012

HSSC

2012