



Guide for ASTRO-E2
X線観測の基礎

京都大学 鶴 剛
埼玉大学 田代 信

1. X線計測の原理

X線の波長

- X線 : $h\nu = 0.01\text{keV} \sim 1\text{MeV}$ あたり
 - $h\nu = 1\text{keV} \rightarrow \lambda = 12.4\text{\AA}$
 - $kT = 1\text{keV} \rightarrow T = 1.16 \times 10^7\text{ K}$
- 吸収: O~Feのイオン化度の小さい分子、原子による光電効果
 - 低エネルギー側が主に吸収される。
 - $NH = 2 \times 10^{21}\text{ cm}^{-2} \rightarrow A_{\nu} = 1$ 等級
 - の減光
- 輝線: O-K, Ne-K, Mg-K, Si-K, S-K, Fe-L, Fe-K など

X線と物質の相互作用

図は“Particle Physics Booklet”より

●光電吸収

-低エネルギーほど大きな散乱断面積 $\sigma \propto E^{-3}$

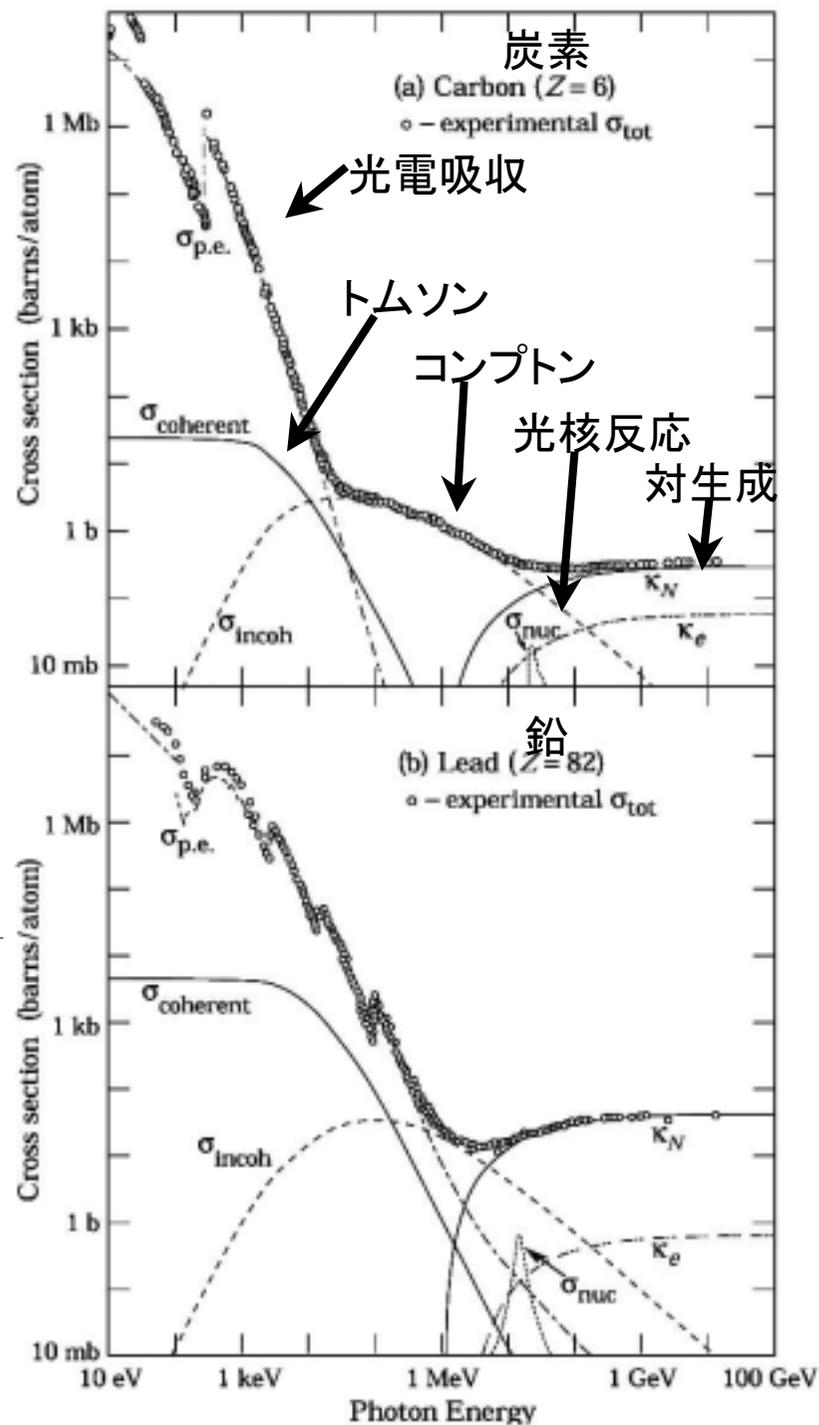
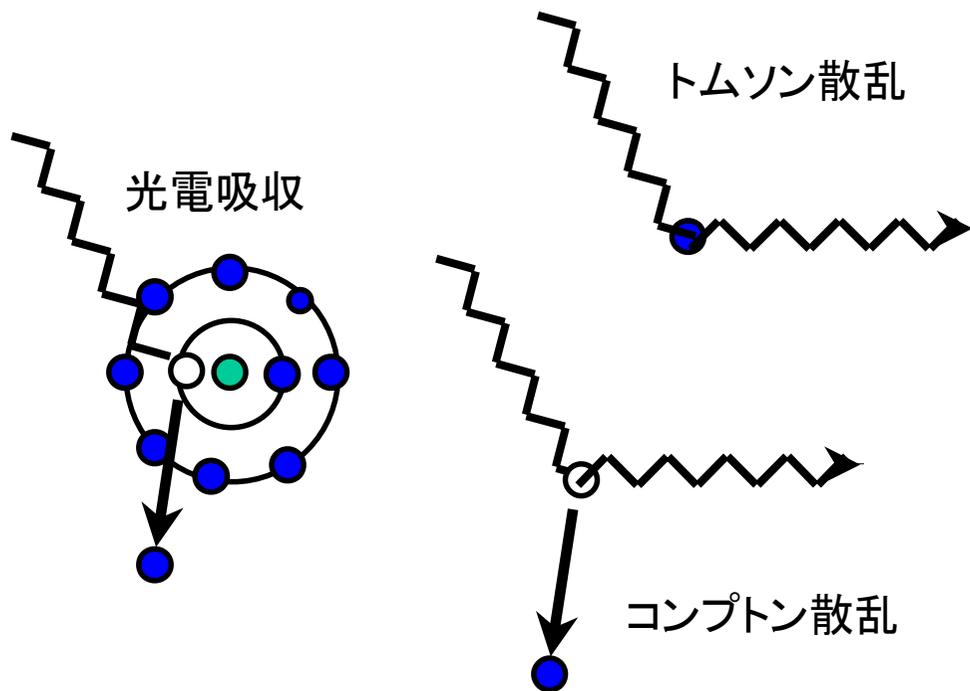
-Zの大きい元素ほど大きな散乱断面積 $\sigma \propto Z^4$

●トムソン散乱

-散乱前と後でX線エネルギーに変化無し

●コンプトン散乱

-入射X線エネルギーの一部を電子に与える



X線検出の原理

ほとんど場合、光電吸収を利用

•光電吸収

- 光電吸収で原子の内殻電子をたたき出す --- (1)
- ホットエレクトロンの生成 --- (2)

•電離損失

- ホットエレクトロンが周りの原子の再外殻電子をたたき出す --- (3)
- 入射X線エネルギーに比例した数の自由電子(または伝導帯電子)=電荷が作られる

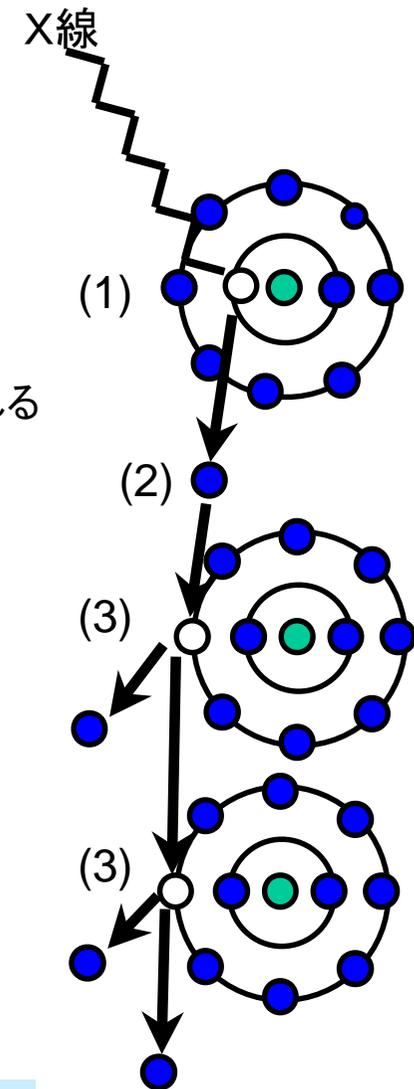
•電子の収集と測定

- パルスハイト \propto 電荷量 \propto 入射X線エネルギー

1光子で1電子@可視光 \longleftrightarrow 1光子で多数の電子@X線

- それぞれの光子に対して直接エネルギー計測が可能
- エネルギー分解能は、電子数の統計で決まる

シンチレータ(電離電子数を脱励起の光子数に置き換えている)
カロリメータ(吸収エネルギーをフォノンに置き換えている)



CCD画像

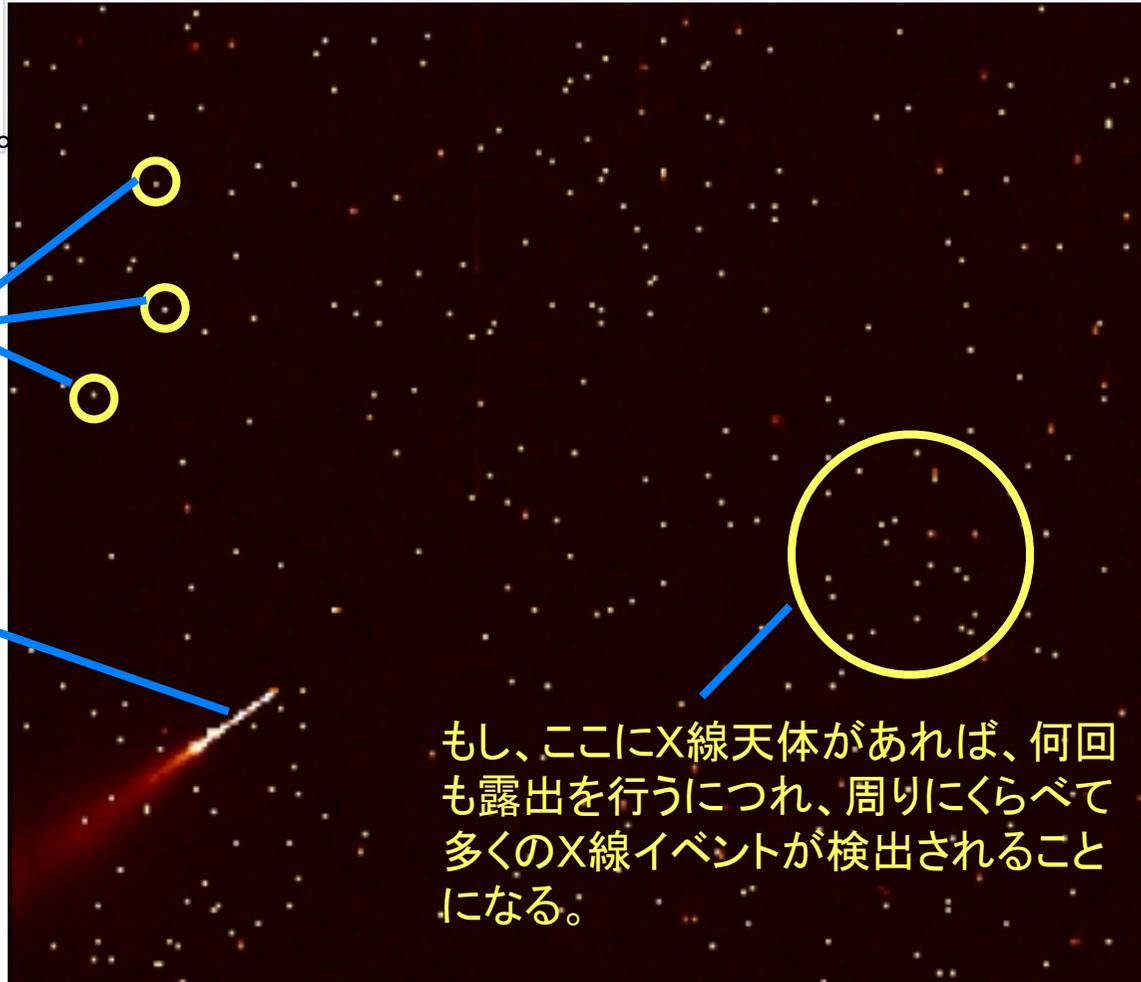
X線CCDカメラ(AstroE2 XIS) に
Cl(2.6/2.8keV)の蛍光X線を照射、
一回の露出で得られた生イメージ。
観測ではこのような露出を多数行う。

この一つ一つが
X線光子一つ一つに対応。

高エネルギー粒子が通った跡。
こんな「派手な」ものは容易に取り
除かれるが、中にはX線イベントと
区別できないものもある
(=Non X-ray BGD)。

もし、ここにX線天体があれば、何回
も露出を行うにつれ、周りにくらべて
多くのX線イベントが検出されること
になる。

- 可視光CCD: CCD上の明るさ = 光子の数 (波長はフィルターで決める)
- X線CCD: CCD上の明るさ = X線光子1個のエネルギー



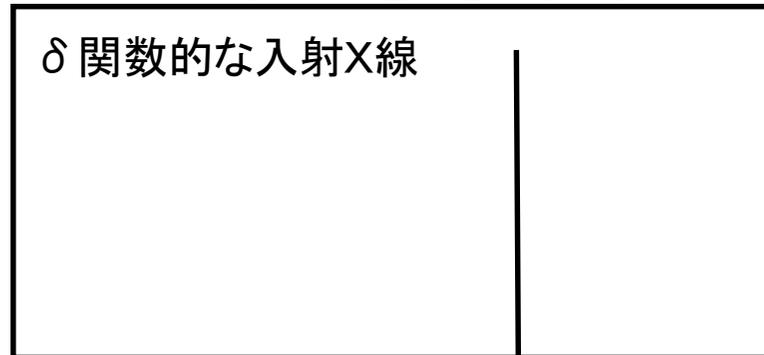
レスポンス関数

- X線エネルギーの一部が失われる場合がある

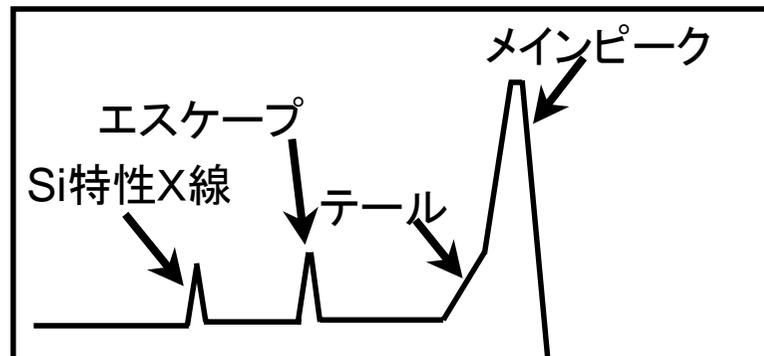
- 蛍光X線が発生し、CCDから逃げてしまう(エスケープ)

- 蛍光X線が発生し、別のピクセルで吸収される(たとえばSi特性X線)

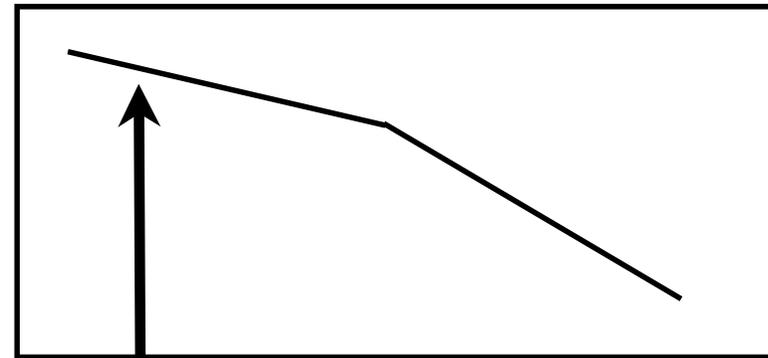
- その他、電離電子数の統計的ゆらぎなど



「メインピーク」のみならず、色々なチャンネルにばらける



例えば下の様なスペクトルが観測されたとして...



このイベントは、

- メインピークに相当する低エネルギーX線起源か、
 - もっと高いエネルギーのX線のエスケープなのか
- 区別できない。

観測(波高)スペクトルを

一意に元の(エネルギー)スペクトルに戻せない!

検出器の特性が掛かった形でスペクトルを表示、モデルと比較する

X線のSとN

•X線は光子数が少ない

–例: 3C273

–電波: 45Jy@1.4GHz → 5e+8 ph/m²/s/GHz

–可視光: $m_v=12.9$ → 4e+5 ph/m²/s/5000Å

–X線: 8.3×10^{-11} ergs/s/cm² (2-10keV) → 20 ph/m²/s/keV

•X線の個数に対する「ノイズ」

–基本的にX線の「個数」は間違えない: eg. 先ほどのCCD画像を参照

–観測したい天体以外のX線などが混入(バックグラウンド)

•宇宙背景X線放射 : 本当のX線

•銀河系のDiffuseX線 : 本当のX線

•荷電粒子イベント : X線に間違えてしまう偽物のイベント

•個々のX線エネルギーの測定に対する「ノイズ」

–色々な要因でノイズが乗る: eg. 先ほどのレスポンス関数を参照

–生成される自由電子、シンチレーション光、フォノンの個数の統計・系統誤差

•物理学で決まる原理的な誤差

–電氣的なノイズ

•検出器開発者の腕で決まる

バックグラウンド

• 宇宙背景X線放射 (Cosmic X-ray Background: CXB)

- 6×10^{-15} ergs/s/cm²/arcmin² (2-10keV)
- $\Gamma = 1.4$
- 点源の寄せ集め: 1.4×10^{-16} (ergs/s/cm²) @ 2-8keVまで分解されている
- ASCA 3×10^{-14} (ergs/s/cm²) @ 2-8keV: XRSでこんなソースは難しい
- 銀河面の天体を観測する場合は、銀河系内の吸収($N_H \sim 10^{22}$ cm⁻²)に注意

• GRXB

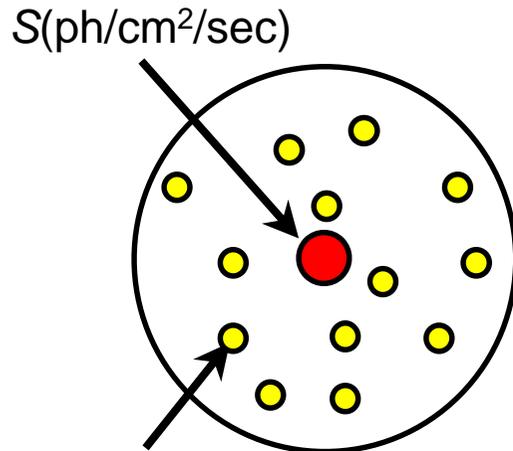
- $\sim 3 \times 10^{-14}$ ergs/s/cm²/arcmin² (2-10keV)
- 吸収を受けた $kT \sim 0.8$ keV, ~ 7 keV の2成分高温プラズマ
- 銀緯 ~ 3 度(低温成分)、 ~ 0.5 度(高温成分)の広がり
- Chandra... 2-10keV: 点源の寄与 $\sim 10\%$ 、残りは拡散成分

• Non X-ray BGD

- NXBは検出器の大きさに比例する、X-rayは集光力に比例する
- HXDは両者が同じなので、NXBは大問題
- XISとXRSは集光はミラーで行うので、NXBは比較的小さい

検出感度

点源の寄せ集め(=CXB)がBGDである場合
有効面積 $A(\text{cm}^2)$ の衛星で $T(\text{sec})$ 観測して検出できる天体の $S(\text{ph}/\text{cm}^2/\text{sec})$ は？

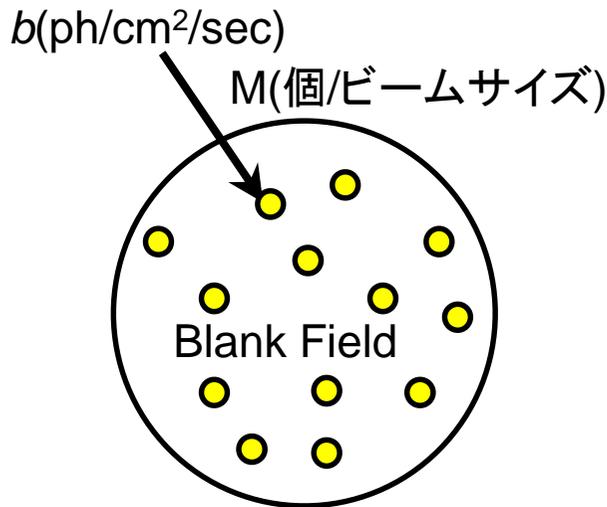


(観測値) > バックグラウンドの期待値 + あり得るゆらぎ

$$(S+Mb) \cdot AT > Mb \cdot AT + \text{ゆらぎ}$$

$$S \cdot AT > \text{ゆらぎ}$$

ゆらぎ バックグラウンドのポアソン統計
 混入点源の個数のゆらぎ

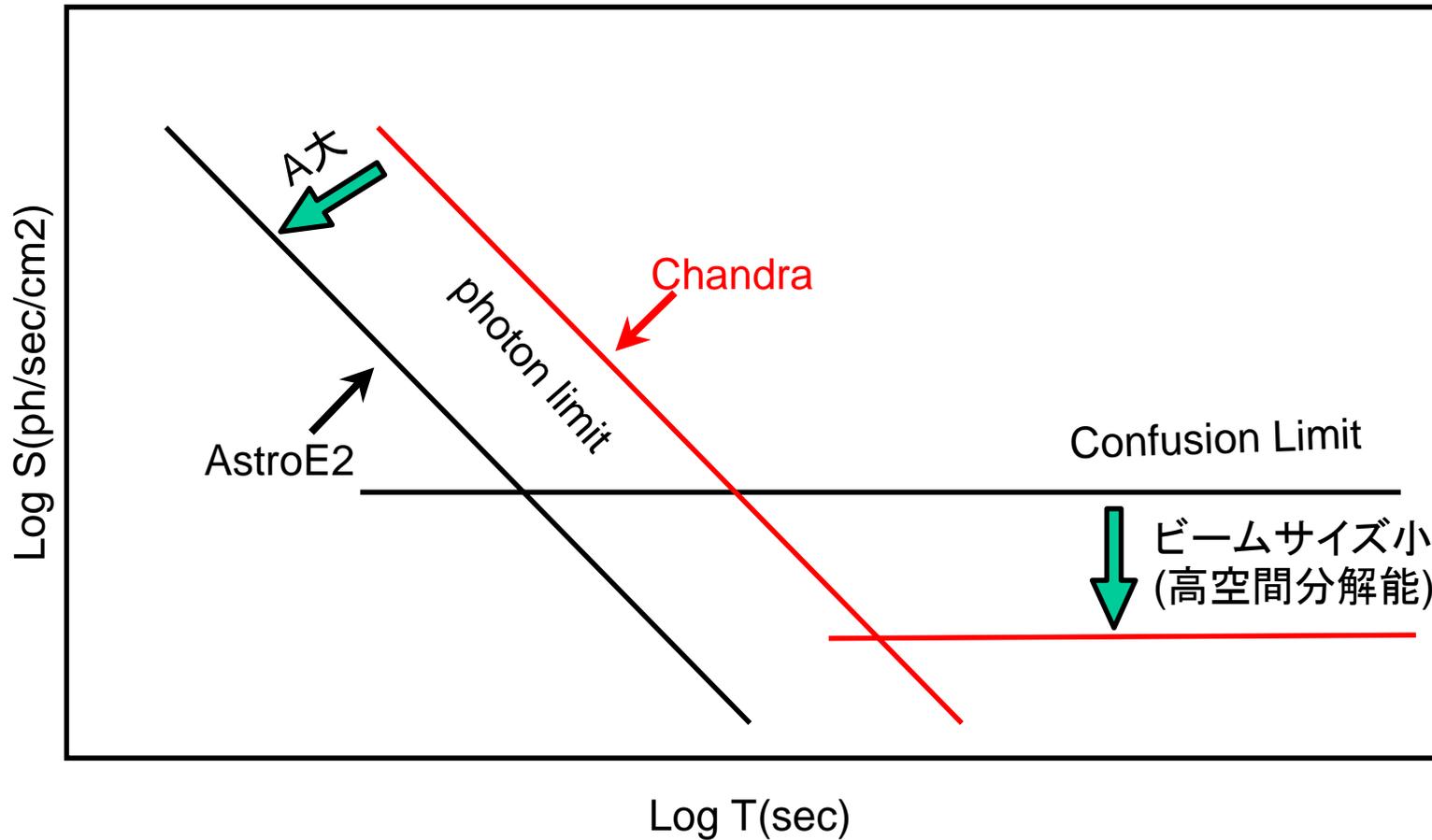


ゆらぎ = $(Mb \cdot AT)^{1/2}$ と $(b \cdot AT \cdot M^{1/2})$ の2乗和

$$S^2 > (Mb/A) \cdot (1/T) + M \cdot b^2$$

$M^{1/2} \cdot b$ より暗い天体は検出できない

Photon LimitとSource Confusion Limit



- AstroE2は暗いソースの検出には向かない
→ Chandraを使用すべき

有効面積と空間分解能

•有効面積と空間分解能は別物

ハッブルとすばるの関係に近い

•有効面積

- 単位時間に集められる光子の数
- どの波長でもミラーが大きいほど多く集められる
- Chandra衛星はAstroE2よりも有効面積が小さいので、単位観測時間に得られるX線イベント数は少ない→**分光には向かない**。

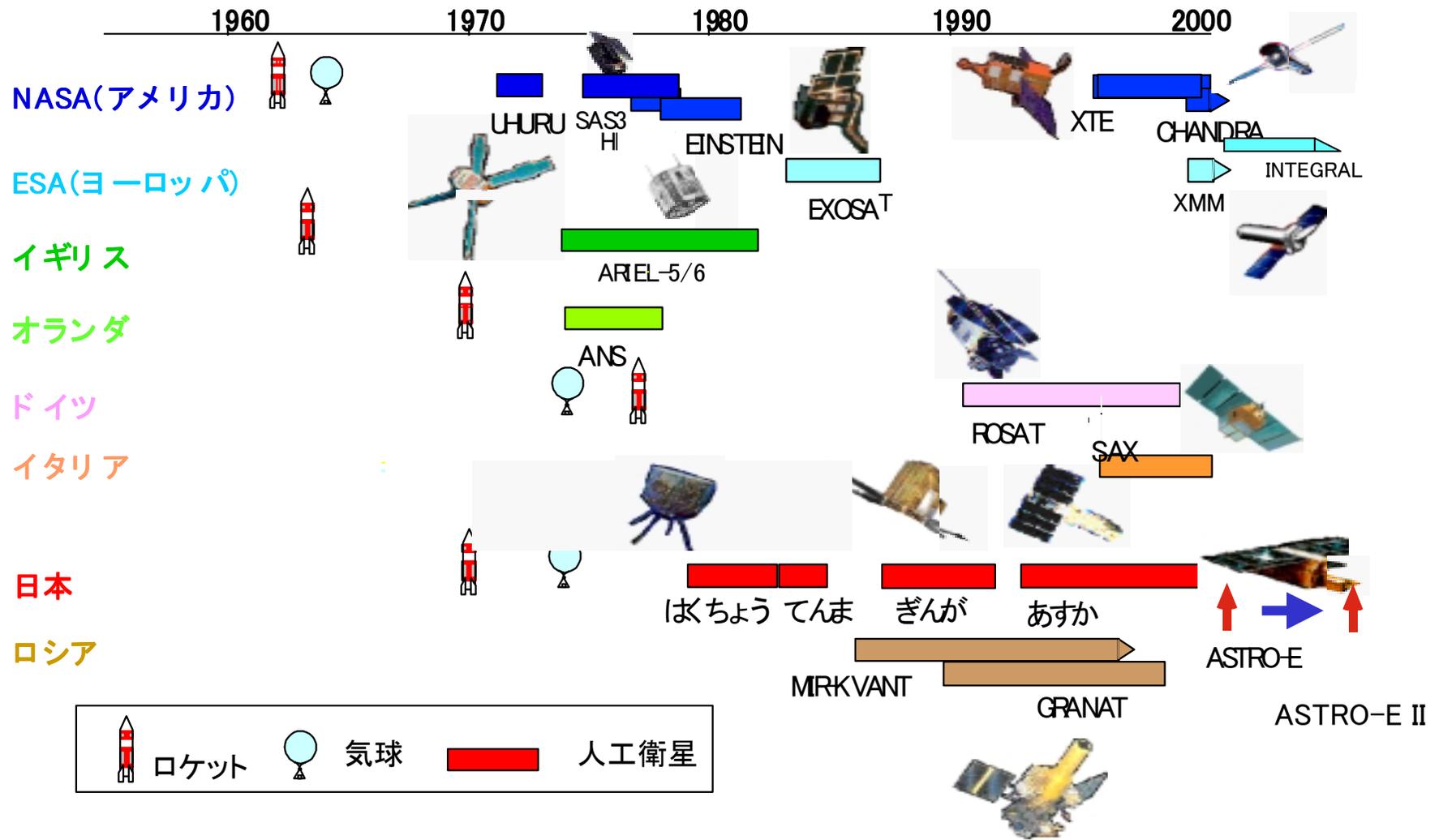
•空間分解能

- 電波:回折限界に到達→ミラーが大きいほど有利
- X線:回折限界には到達していない
- ミラー表面精度で決まる
- ミラーの大きさには無関係 = 有効面積とは無関係
- Chandra衛星はミラーの精度が高いので、空間分解能は優れている。**空間構造を調べるのには有利**。

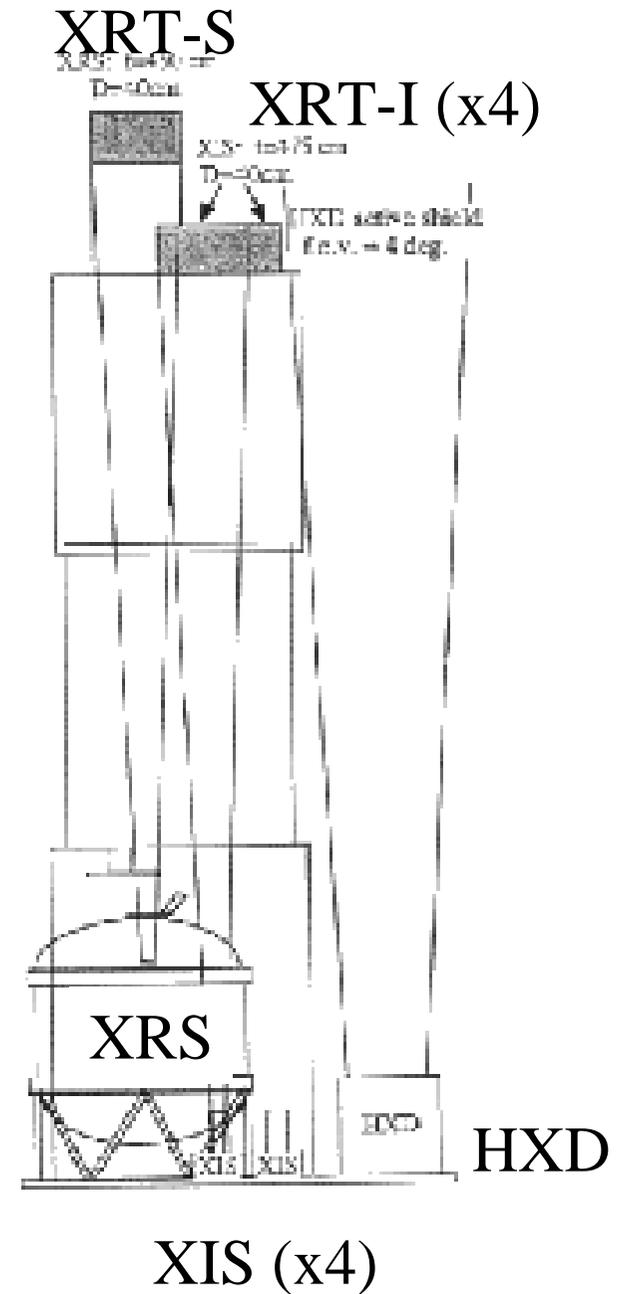
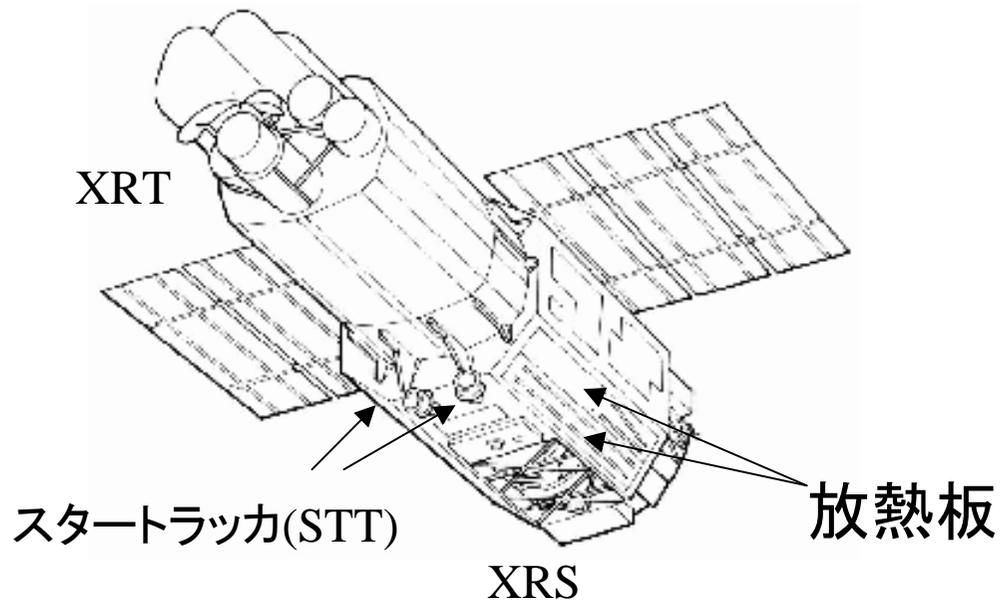
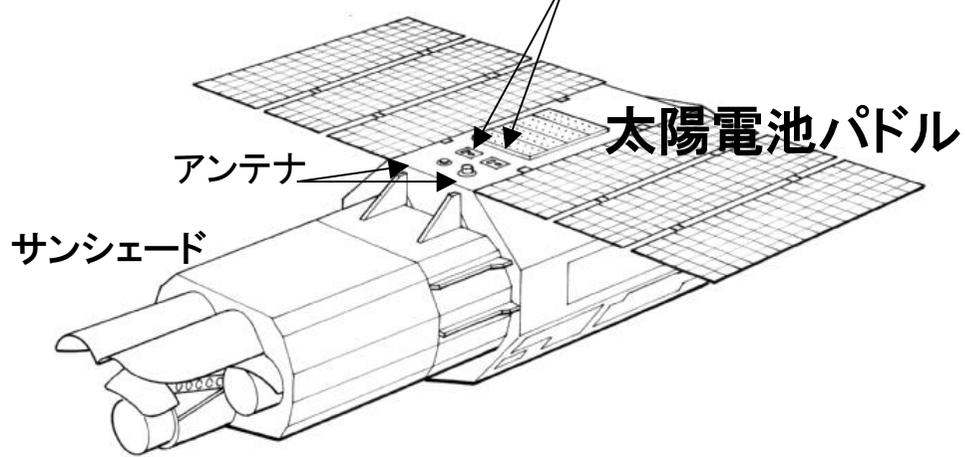
余談:ミラーの精度=ミラーの硬さ=衛星の重さ= お金

2.観測の実際

X線天文衛星の歴史とAstro-E2



Astro-E2 太陽センサー(NSAS)

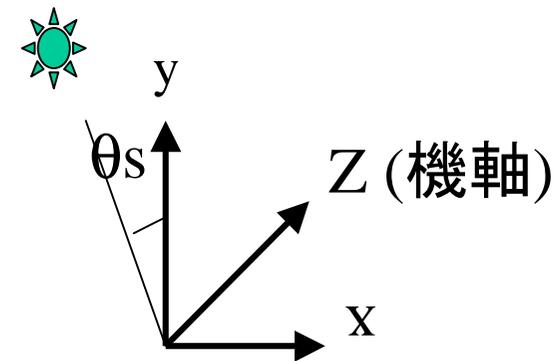
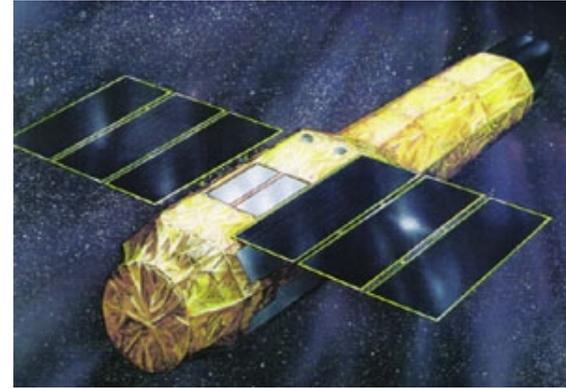


衛星の運用

- 太陽角制限
 - 太陽電池パドルと太陽方向の離角は25度以下
 - 太陽電池の法線方向と機軸(XRTの軸)は90度
 - よって、太陽からの離角が、65度～115度の範囲が観測可能領域になる
 - 目的の天体の観測可能時期を計算するWeb page

Viewing:

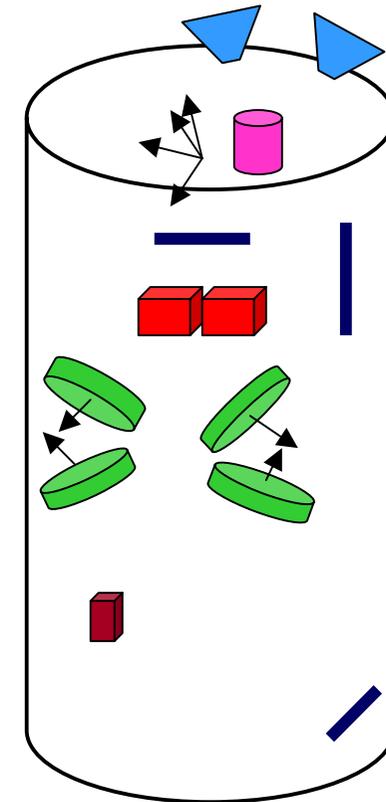
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/Tools/Viewing.html>



$$\theta_s < 25 \text{ degree}$$

共通系(姿勢制御)

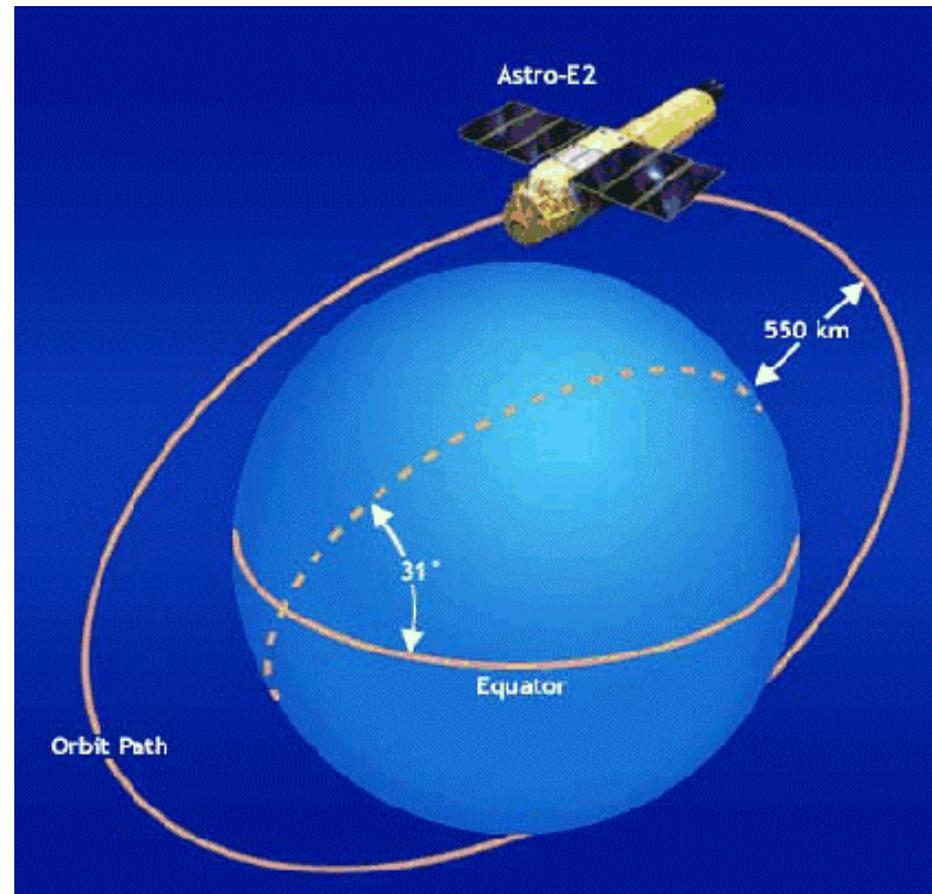
- 姿勢計測
 - 2台の星センサ(可視光CCD)で絶対姿勢計測
 - 太陽センサで絶対姿勢計測
 - 4軸のジャイロで角運動量計測
 - 地磁気センサ
- 姿勢制御
 - 4台のモーメントムホイール
 - 3台の磁気トルカ
 - (RCS 軌道制御スラスタ)



- 地上姿勢決定精度
 - X,Y軸まわり0.2分角、Z軸まわり2.0分角
- 姿勢制御精度(=姿勢制御安定度(/4秒))
 - X,Y軸まわり0.3分角、Z軸まわり3.0分角
- 姿勢変更速度
 - 0.2 度/秒

Astro-E2の軌道

- 軌道傾斜角=31度
- 高度=550km
- 軌道周期=96分
- (1日15周)



Ground Station

内之浦宇宙空間観測所



34m antenna



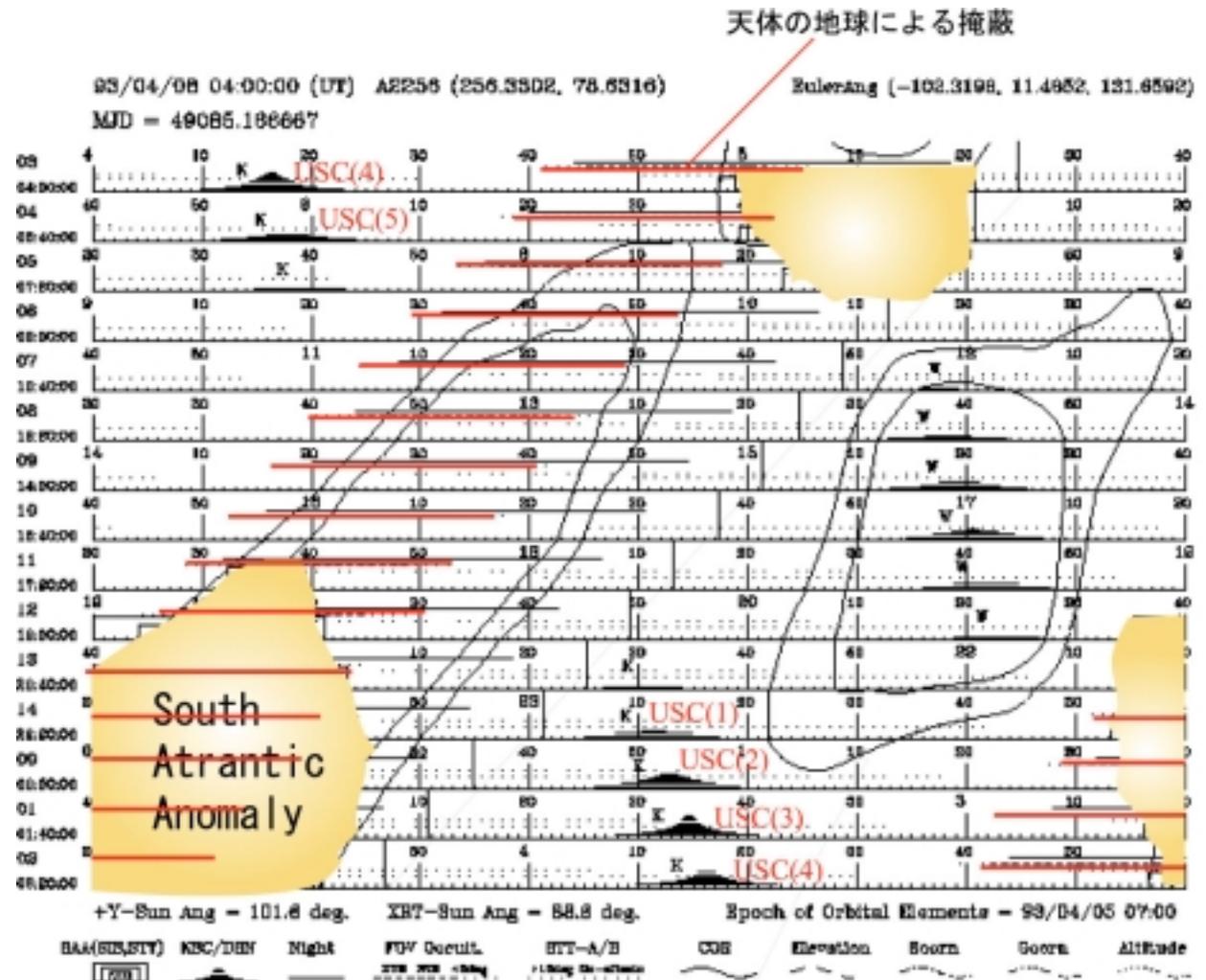
M台地

JAXA/宇宙基幹システム本部
内之浦宇宙空間観測所(USC)

運用計画

観測計画の制限

- 観測姿勢の確認
 - STT
 - 太陽センサ
- 観測できない時間
 - SAA
 - 地没
- DRの使用計画
 - USC可視時間
 - COR
 - 地球との離角

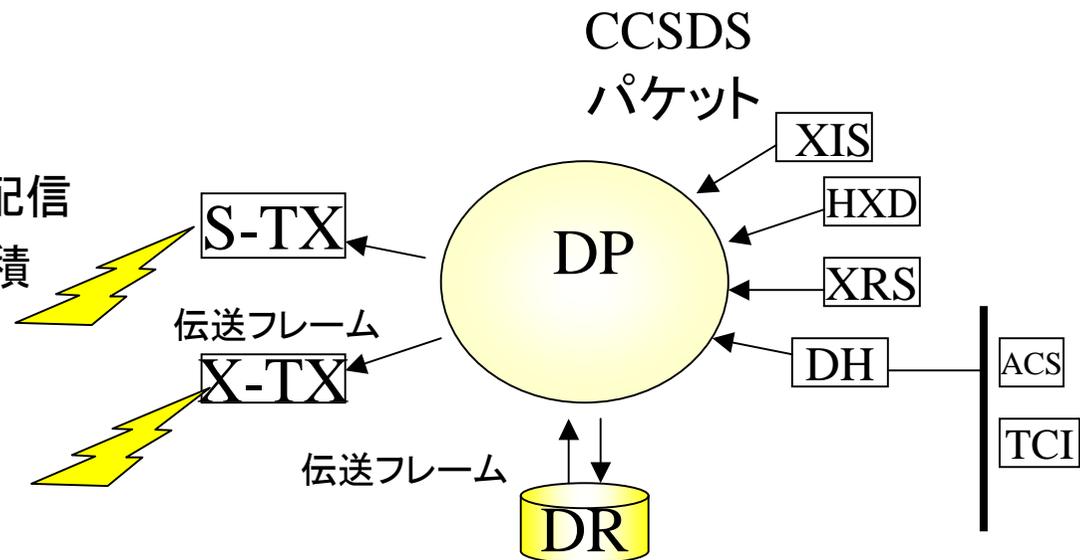


Cut off Rigidity
 (地磁気による宇宙線の遮蔽が弱い領域)

共通系(コマンド・テレメトリ)

- コマンド
 - 地上(orメモリー)から各機器
 - 電源制御
 - 動作モード
 - データレートなど

- テレメトリ
 - 各機器からDPにパケット配信
 - “フレーム”化してDRに蓄積
 - (DR→)DP→地上へ伝送



データ容量

- 記録Memory size: 6Gbits
 - 512Kbps (SH) x 12,288 s (3.4時間)
 - 128Kbps (M) x 49,152 s (13.6時間)
 - 通常の観測は data rate “Med”
 - データ価値の低いところはdata rate “Low”
 - “High”, “Super-High”は、とくに必要な時にのみ
- 再生(地上局への送信):
 - S-band (2.26GHz) 32K/256Kbps (realtime data &測距)
 - X-band (8.46GHz) 4Mbps

(データ再生:4Gbpsの再生に25.6分かかる)

観測の手順

- 姿勢当番 (in ISAS, ...) ←→観測提案者とコンタクト

- 観測姿勢決定
- 運用基本計画調整

- 運用当番 (in ISAS)

- コマンド計画策定
- コマンド計画送信(→USC)

- 追跡当番 (in USC)

- コマンド計画送信(→AstroE2)
- データ受信
- データ確認(quick look)
- 場合によっては観測者に連絡

すべて、
duty scientistが担当
衛星開発者グループ
のスタッフ、大学院生のボランティア

- データのパイプライン処理→観測提案者へ送付
– FITS化、calibrationデータをつかって物理量化