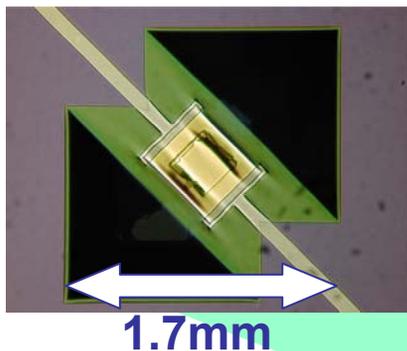


X-ray Study of Ground-Based Plasmas with TES Microcalorimeters

東京都立大学 大学院 理学研究科

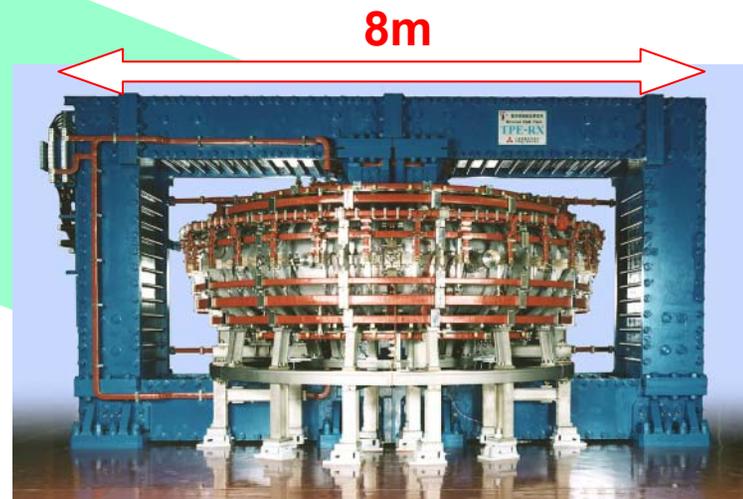
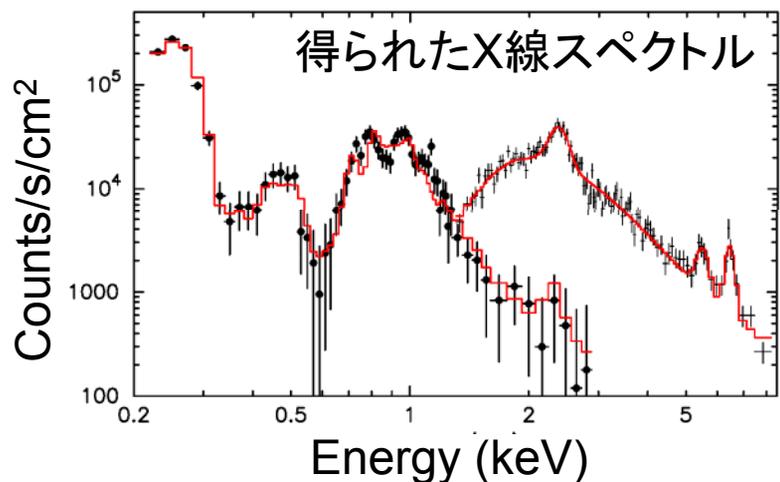
宇宙物理実験研究室

篠崎慶亮



TES Microcalorimeter
--- 0.1Kにて動作

逆磁場ピンチプラズマ装置
Toroidal pinch experiment RX
(TPERX) --- 7×10^6 K



- 目的

- 実験装置

TPE-RX, TES型カロリメータ、断熱消磁冷凍機

- 断熱消磁冷凍機 --- ADRを用いた
X線分光システムの構築

温度制御、X線入射窓

- 実験セットアップ

- 検出した信号の解析

波形のふるまい、エネルギー分解能

- X線スペクトル解析

はじめに

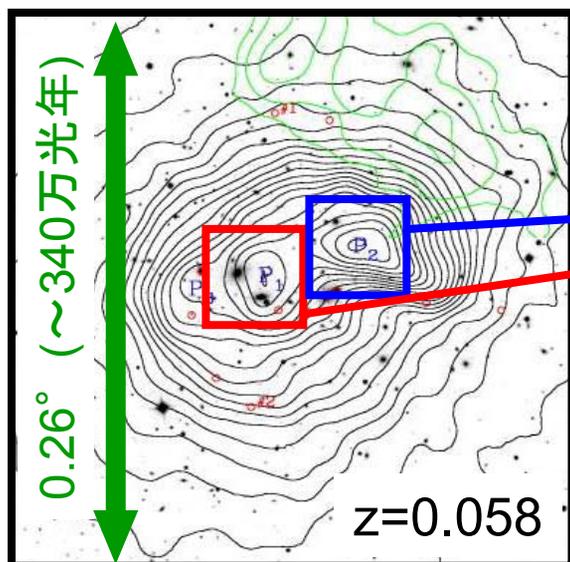
- X線カロリメータによる高精度分光観測



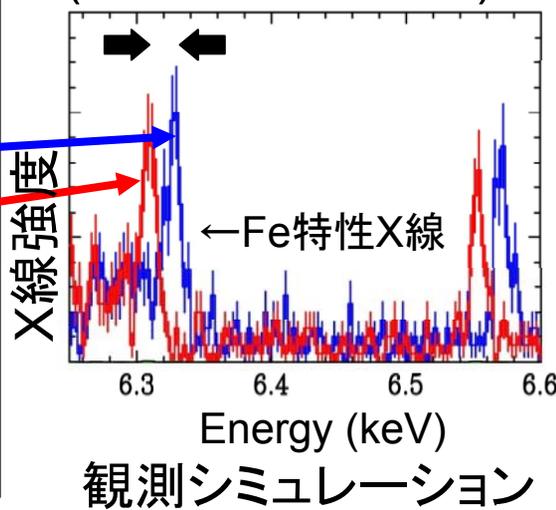
宇宙の高エネルギー現象 ダイナミックな運動を明らかに

衝突銀河団

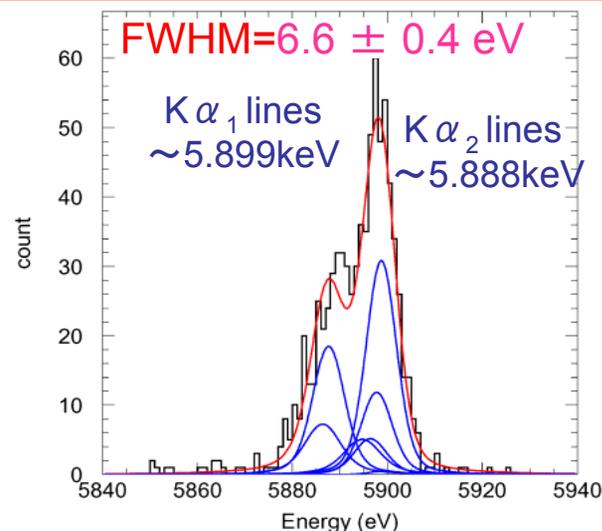
A2256のX線輝度分布(Sun et.al)



$\Delta E=20\text{eV}$
(1000 km/sに相当)



TES型マイクロカロリメータで得た
MnK α エネルギースペクトル



1. 目的

X線マイクロカロリメータの実用試験：
核融合を目指したプラズマ装置 TPE-RXの
作り出す重水素プラズマの軟X線分光

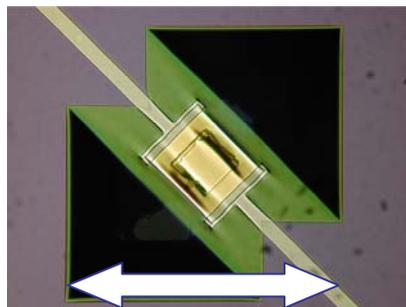
- ・ 軟X線領域、高カウントレート、
磁場 / 振動によるノイズの影響など
- ・ 温度プロファイル、輻射損失、不純物量

8m



TPE-RX (産業技術総合研究所)

TES型
マイクロカロリメータ



1.7mm

断熱消磁冷凍機



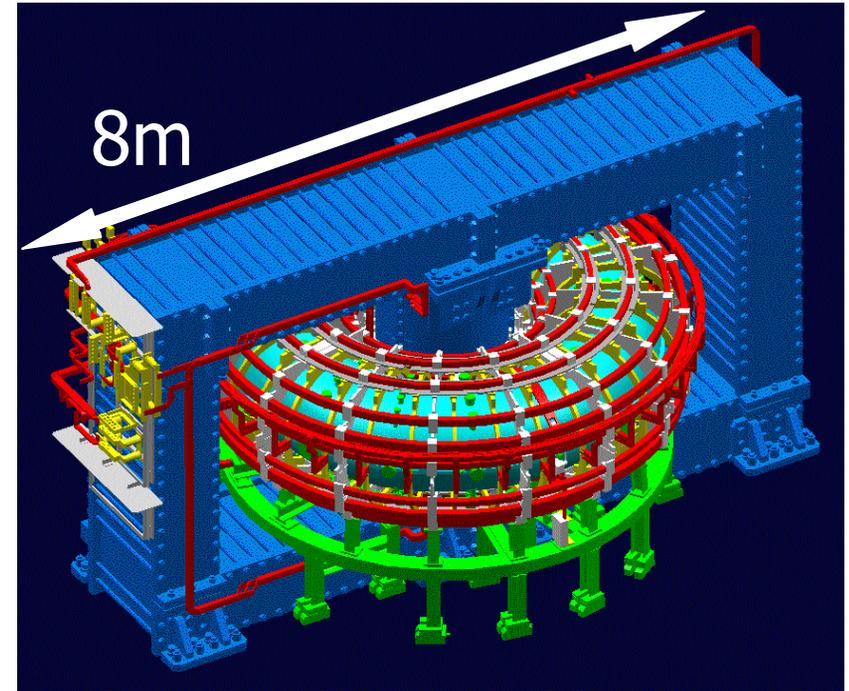
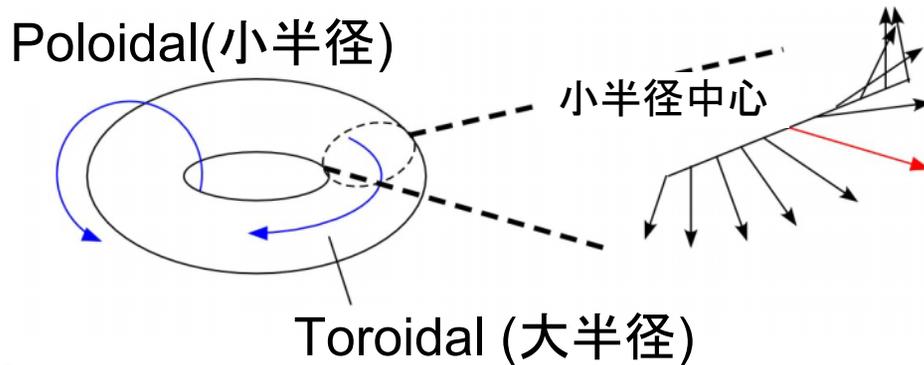
50cm

2. 逆磁場ピンチ型プラズマ装置 TPE-RX

ドーナツ状のトーラス内に
重水素プラズマを生成

大半径/小半径 = 1.72/0.45 m

5分に1回、~80 ミリ秒間、
プラズマを生成 ジュール加熱



● 予想plasma parameter (TES 測定時)

プラズマ電流 $I_p = 220 \text{ kA}$
電子密度 $n_e = 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
電子温度 $T_e = 600 \text{ eV}$
イオン温度 $T_i = 300 \text{ eV}$
磁気圧比 $\beta = 0.07$

● 考えられる不純物

C	ポンプ油など
O	水
Fe, Cr, Ni	ステンレス真空槽 (66%, 17%, 14%) (SUS 316L)
Mo	侵食防止リミッタ

不純物量、電子温度、その空間分布など

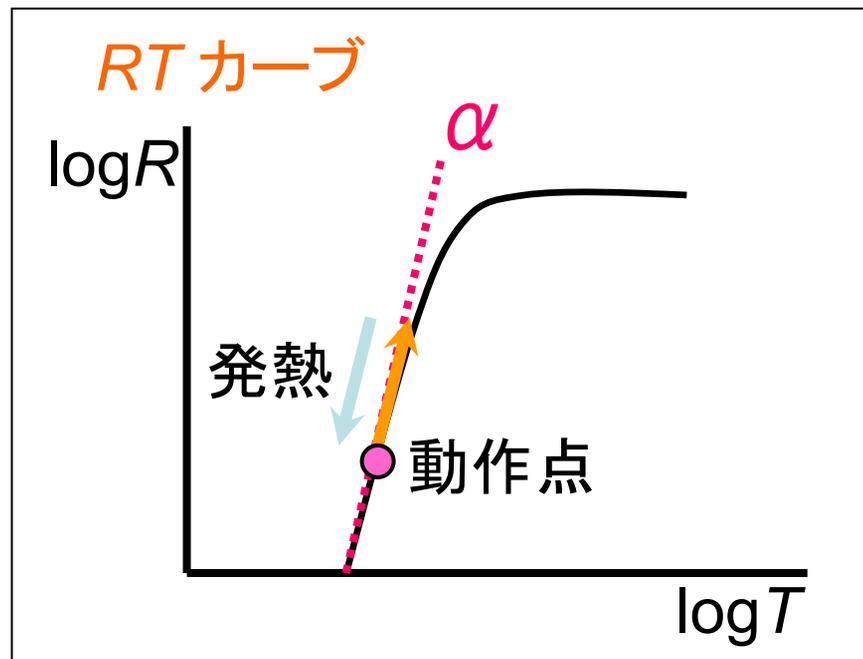
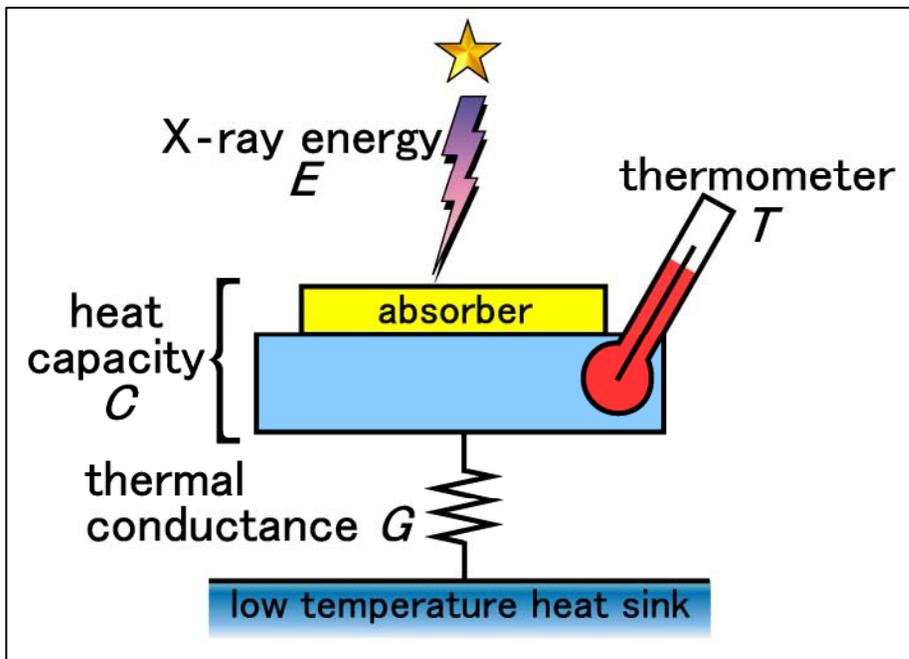
3. TES型X線マイクロカロリメータ

X線マイクロカロリメータ

X線光子のエネルギーを
素子の温度上昇として検出

TES 温度計 (Transition Edge Sensor)
超伝導転移端を温度計として利用

$$\text{温度計の感度 } \alpha = \frac{d \log R}{d \log T}$$

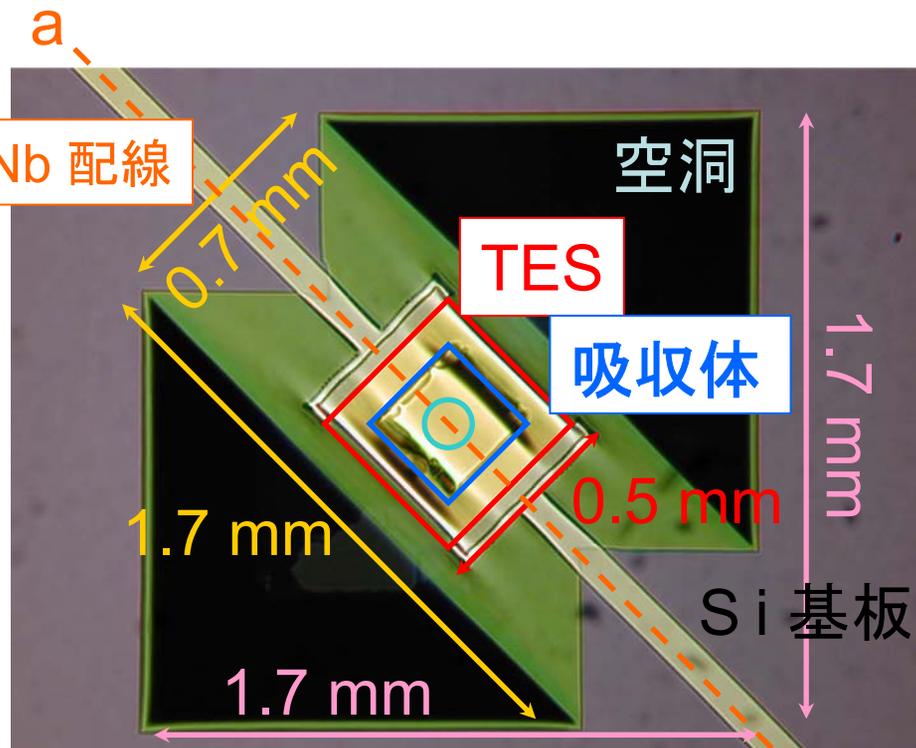


エネルギー分解能

$$\Delta E \propto \sqrt{k_B T^2 C / \alpha}$$

Energy band 0.1- 10keV
極低温 (~ 100 mK) で優れた分解能
電熱フィードバックにより応答が速い

4. SII-14b TES カロリメータ



● TES Ti - Au 二層薄膜

0.5 mm × 0.5 mm

厚さ : Au 110 nm, Ti 40 nm

● X線吸収体 Au

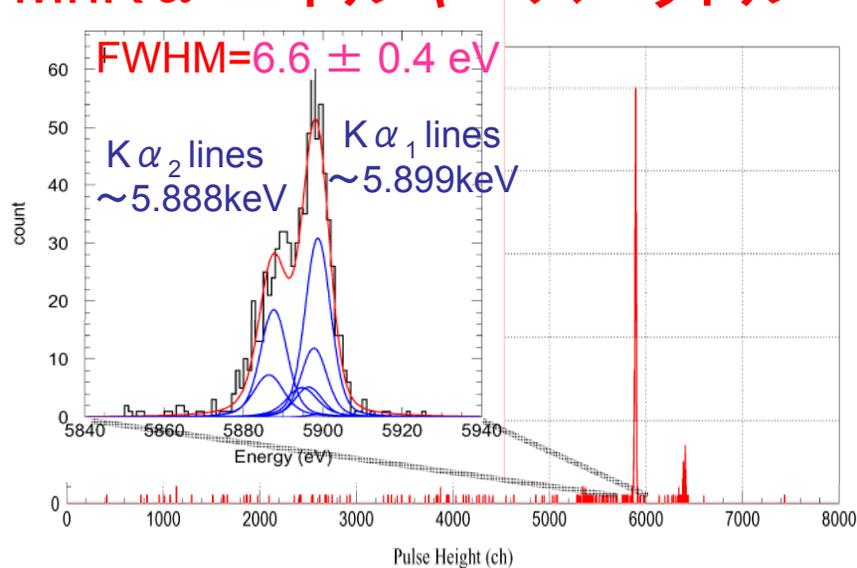
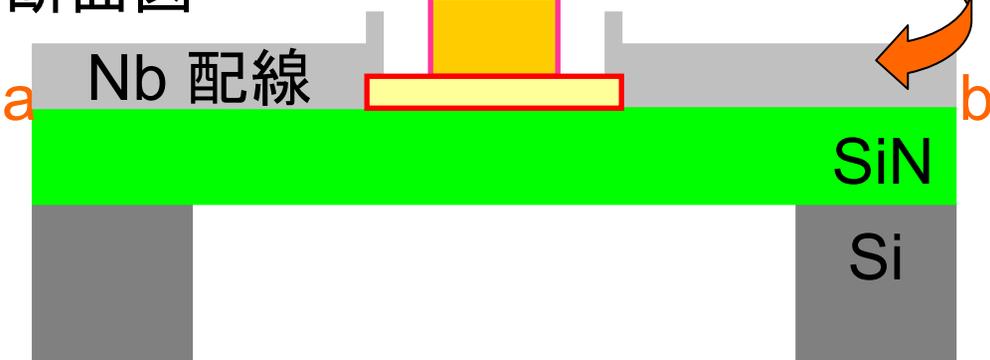
0.3 mm × 0.3 mm × 300 nm

● サファイアカロリメータ

0.2 mm ϕ

MnK α エネルギースペクトル

断面図



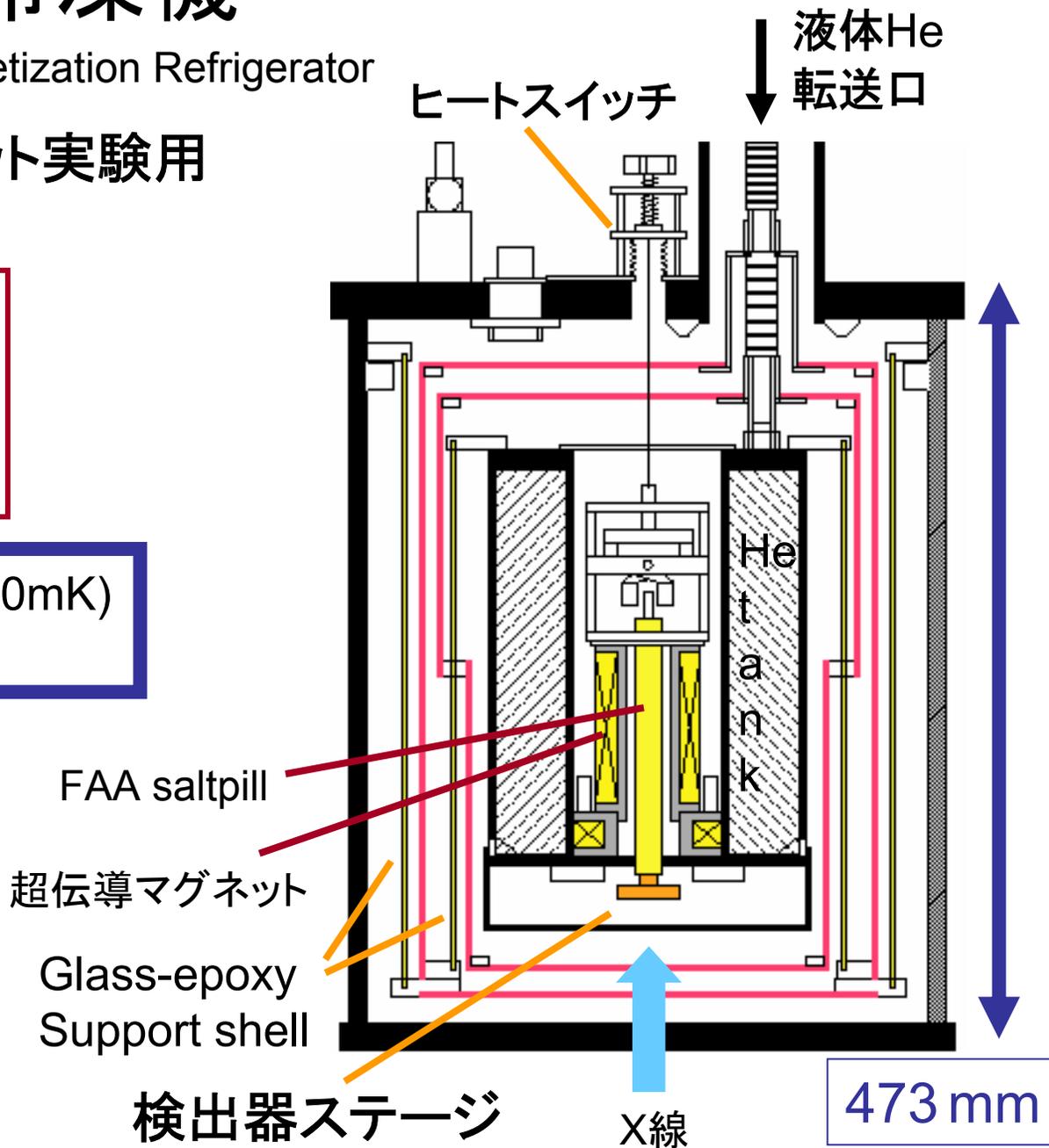
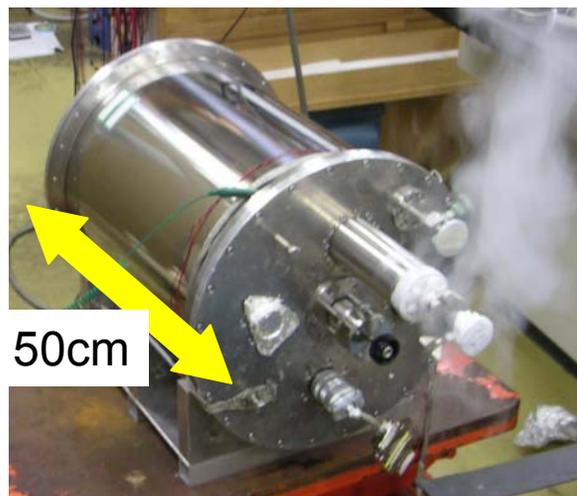
5.1 断熱消磁冷凍機

ADR – Adiabatic Demagnetization Refrigerator

Wisconsin大学のロケット実験用
ADRを再設計

- コンパクト性,
Heタンクのみ、蒸気冷却
- 減圧液体He ~1.7K
- 横置きで冷却可能

- 保持時間 >10時間(100mK)
- 温度安定度 < 10 μ K



5.2 温度安定性の高い温度制御

要求される安定性 $\Delta T/T < 10^{-4}$
 10 μ K rms. (at 100 mK) 以下

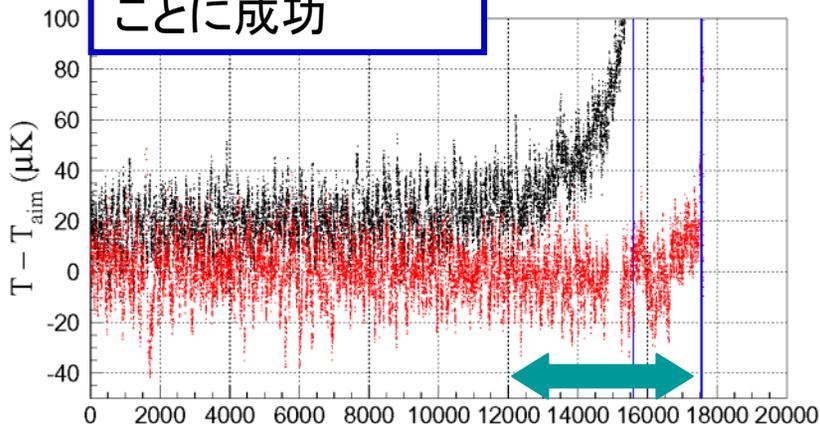
● 温度制御のシステムを独自に構築
 温度計測し、設定温度にするために
 マグネット電流を自動制御

● 改良型温度制御を考案

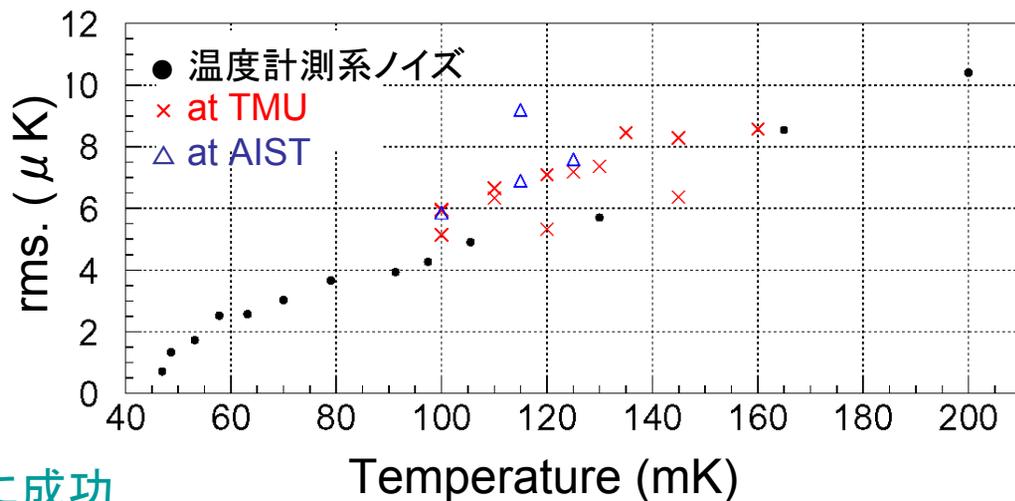
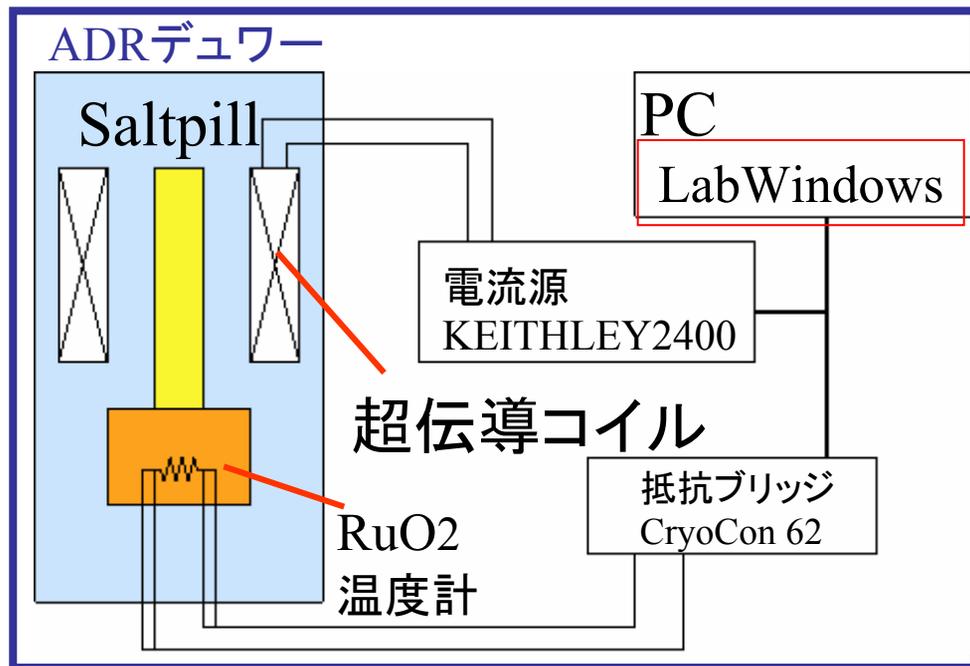
◇ 100mK control

Red : improved
 Black : standard

温度上昇をなくす
 ことに成功



約2時間延長に成功



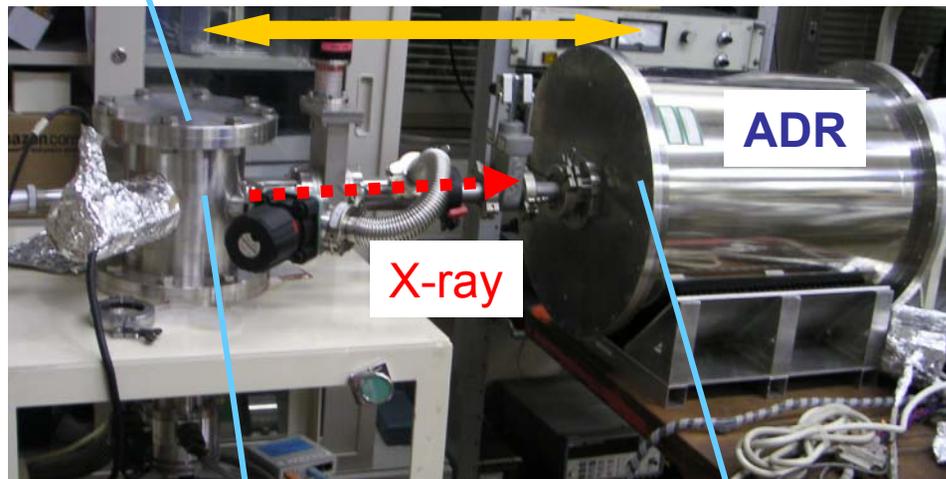
5.3 精密X線分光システムの構築

● Manson軟X線発生装置と真空接続

高カウントレート
軟X線信号応答

軟X線発生装置

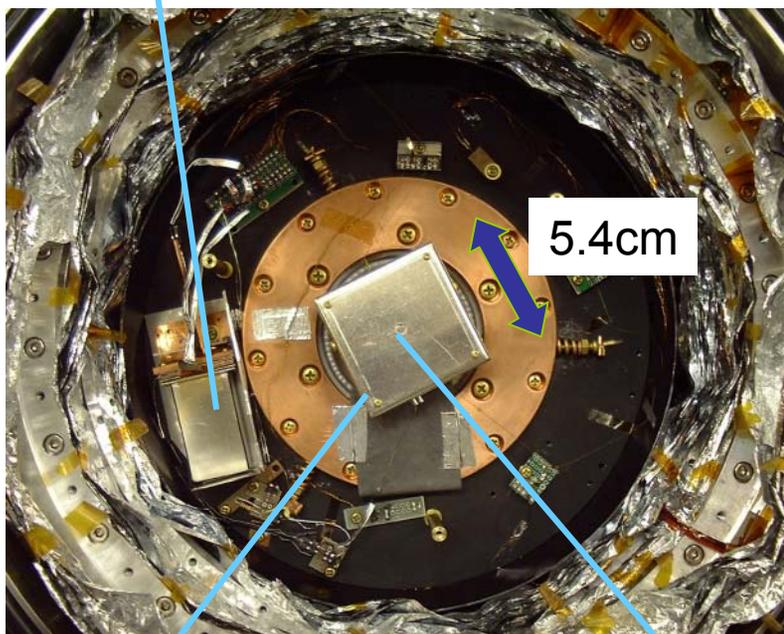
40cm



ターゲット(AI)

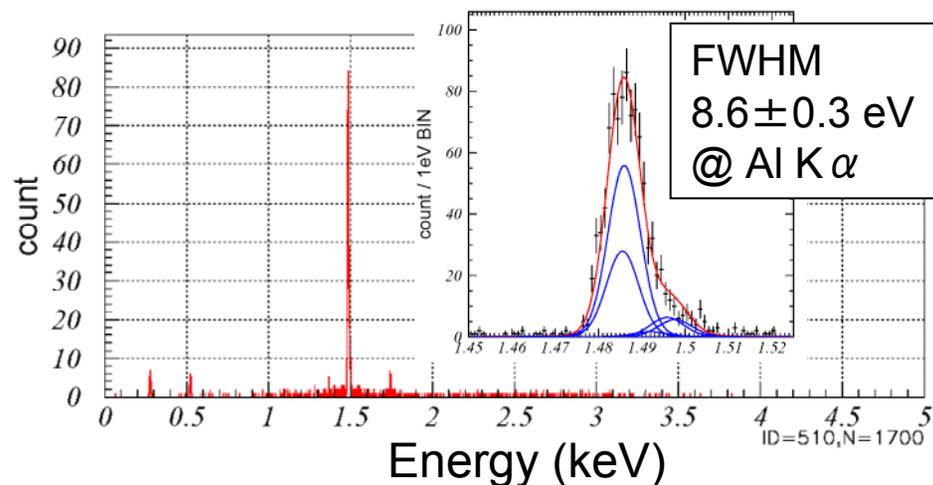
カロリメータ

SQUID(信号読み出し)

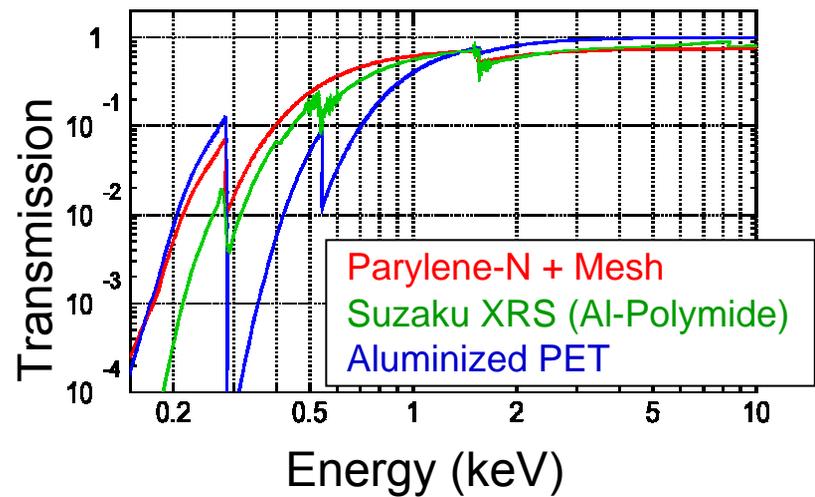
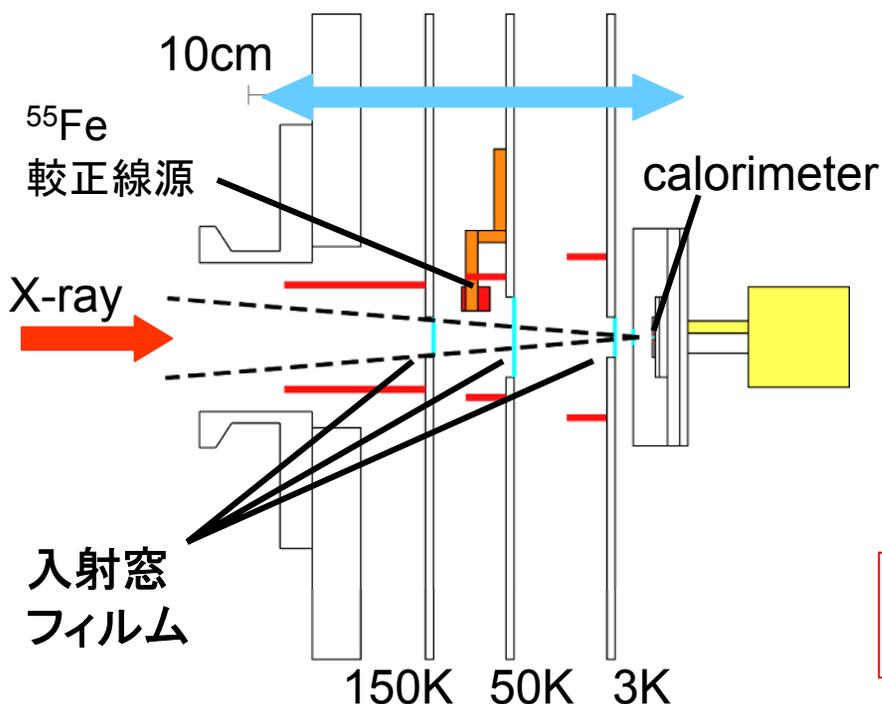


検出器ステージ
(磁気shield)

カロリメータ



5.4 X線入射窓

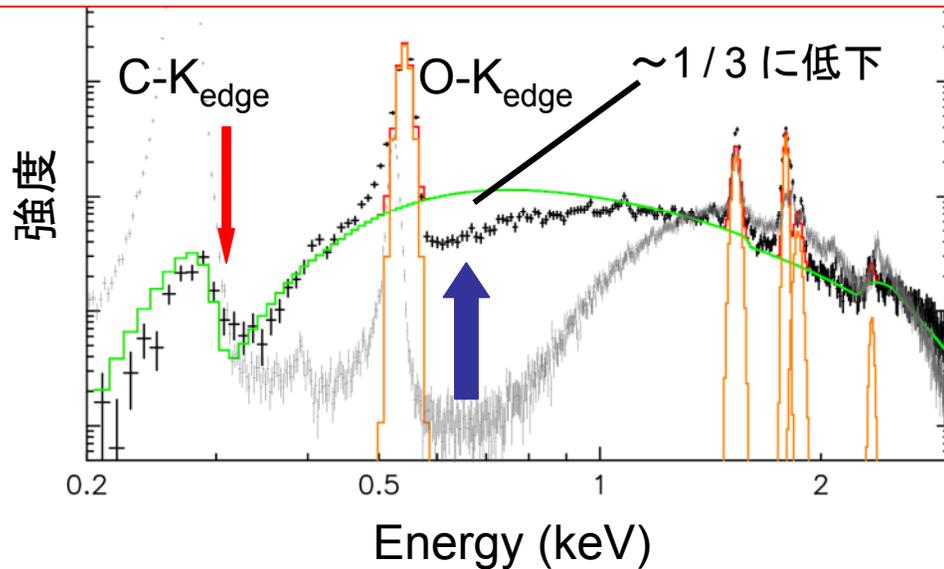


●外部X線入射可能なX線入射窓の構築

- 軟X線に対し高い検出効率を得るため、Parylene-Nを用いた入射フィルムの提案
霜の付着が問題(約 $1 \mu\text{m}$ 厚)

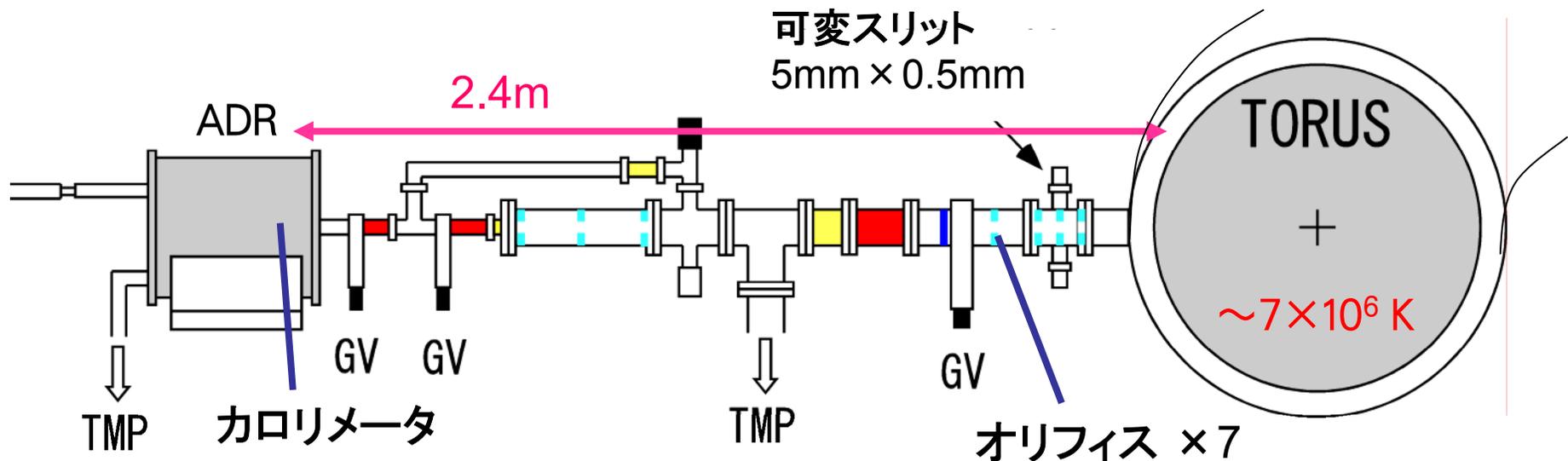
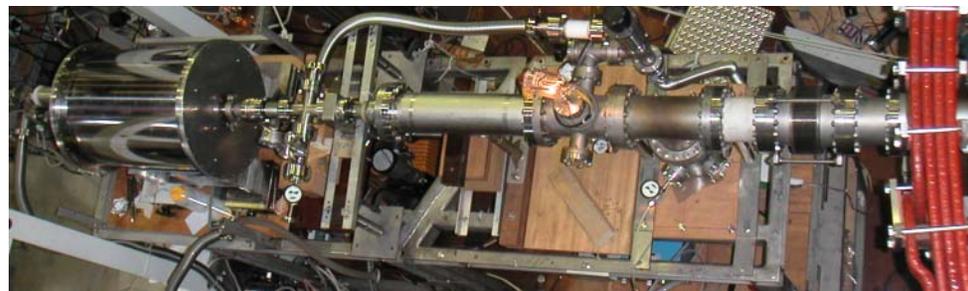
●入射窓評価試験

- Parylene-N : $0.64 \times 10^4 \text{ cts} / 0.32 \times 10^4 \text{ sec}$
- PET : $5.83 \times 10^4 \text{ cts} / 1.6 \times 10^4 \text{ sec}$



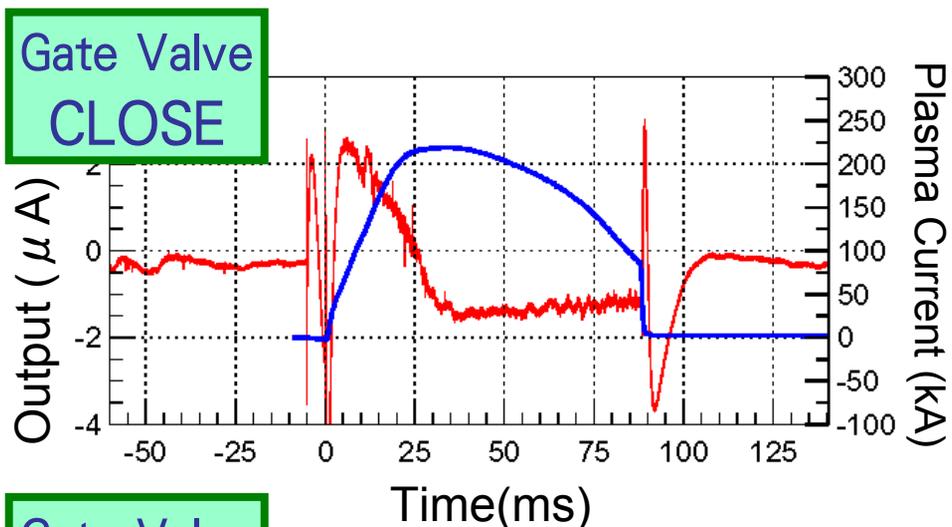
6. 実験セットアップ

- ADR と TPE-RX を真空接続
($\sim 5 \times 10^{-8}$ Torr)



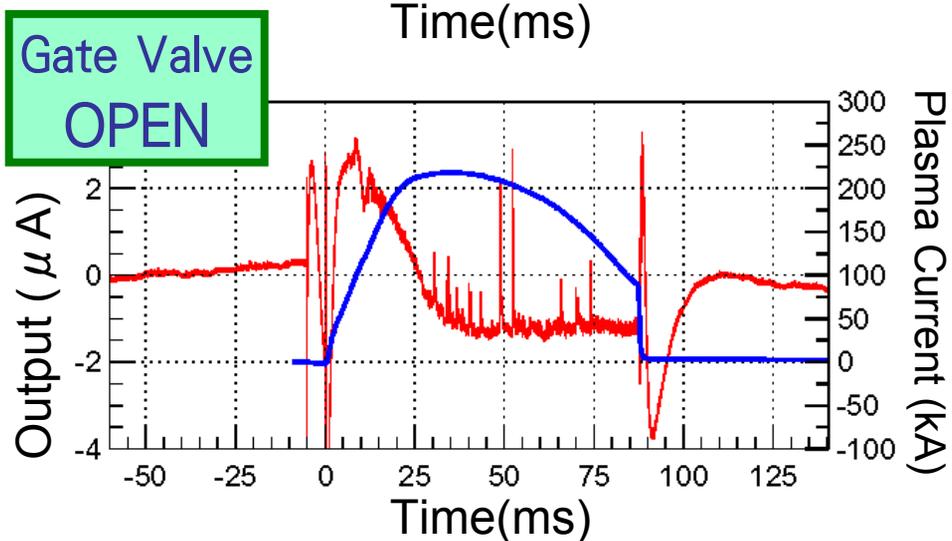
2004年8月 (214 shot)
2005年3月 (273 shot)

7. プラズマ1 shotあたりの検出波形

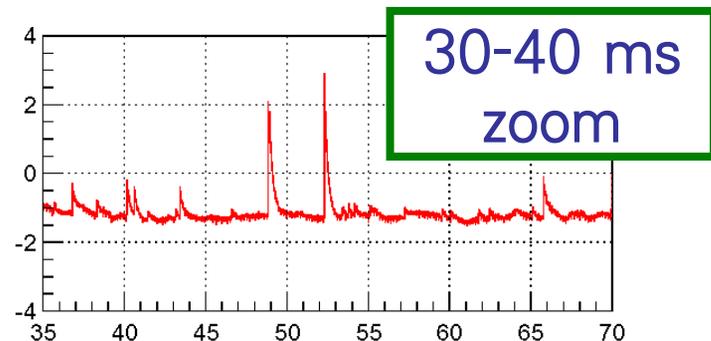


Gate Valve OPEN/CLOSE
で明確な差

カロリメータの典型的なX線
信号とほぼ同じ時定数
 $\propto \exp(-t/\tau_{\text{eff}})$



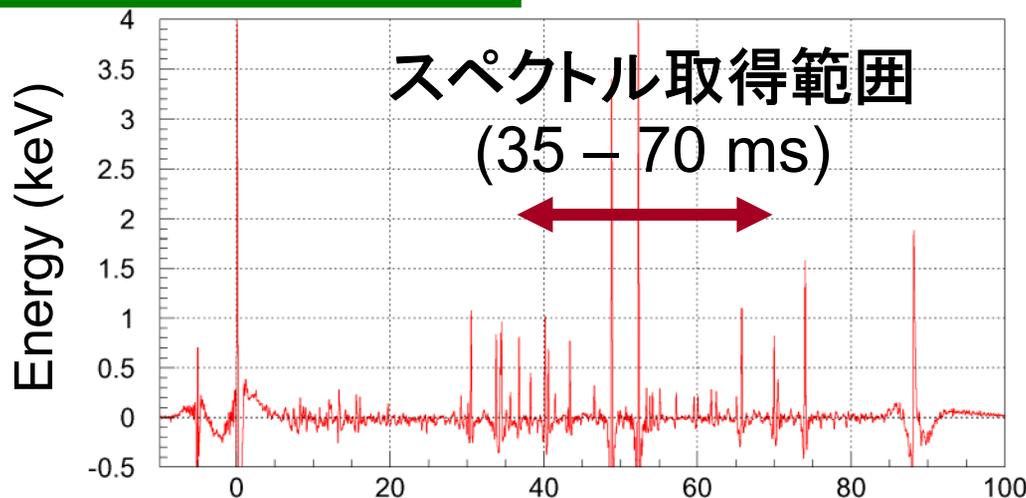
プラズマからの
X線光子を検出



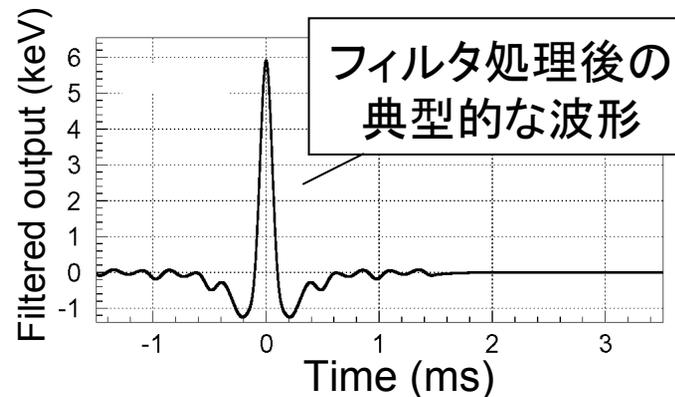
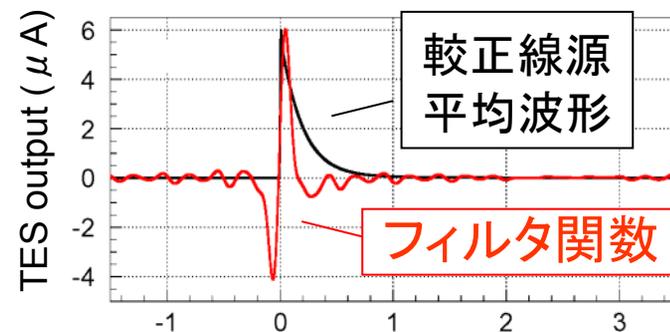
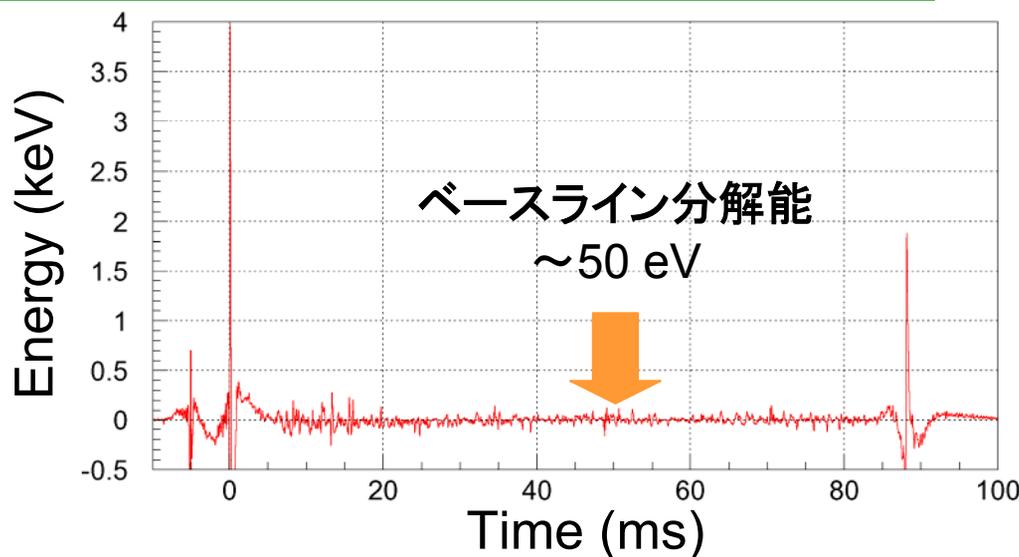
— TES検出波形
— Plasma current

8. X線信号処理

最適フィルタ処理後



信号検出→除去を繰り返した後



最適フィルタ処理により、
縦軸をエネルギーに変換、
大きなSignalから順に除去。

取得Signal数 (0.2-3.0keV)
 17.4 ± 4.0 cts/shot

Count rate $500 \sim 800$ c/s
~15% が Pile-up ($\tau_{\text{eff}} = 200 \mu\text{s}$)

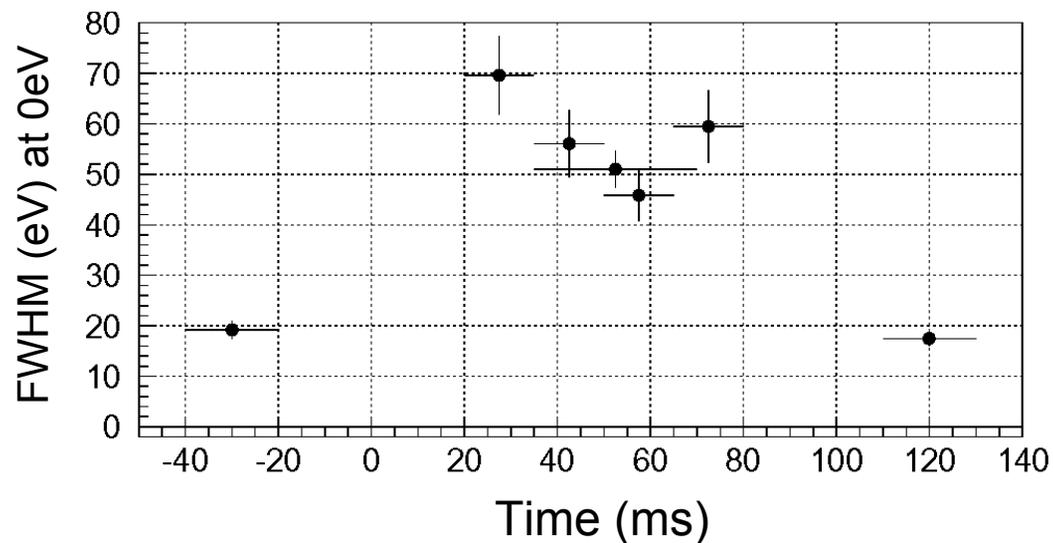
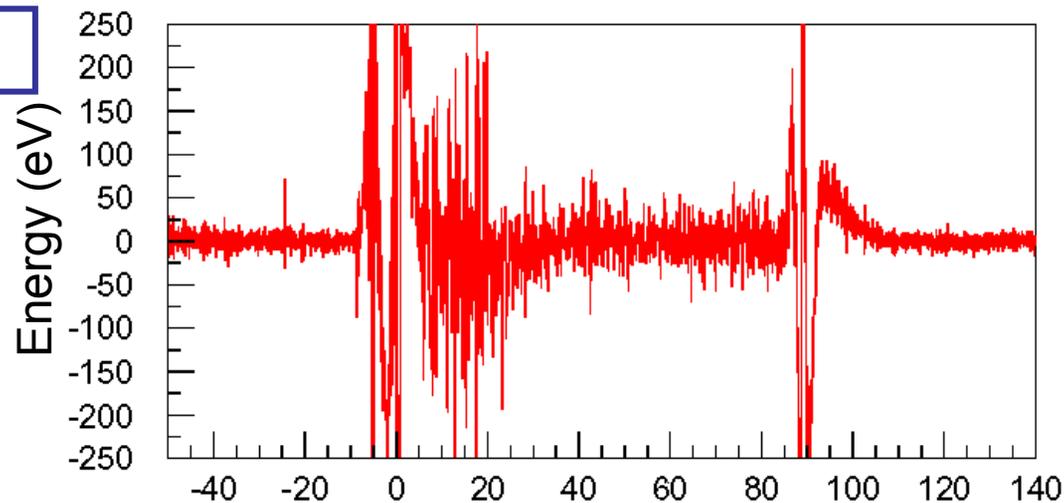
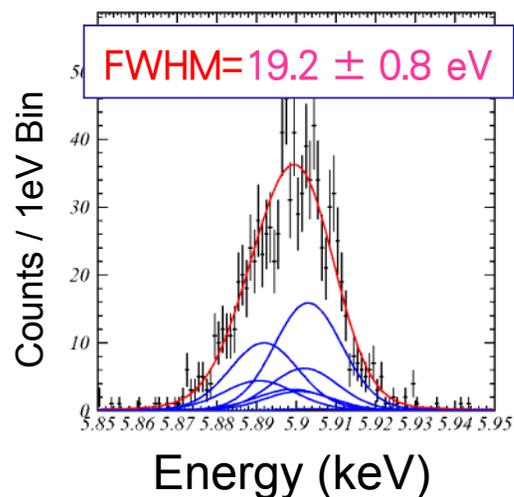
9. カロリメータのエネルギー分解能

信号除去後のベースラインの揺らぎより
エネルギー分解能を導出

FWHM $\sim 50\text{eV}$ に劣化 (35-70ms)

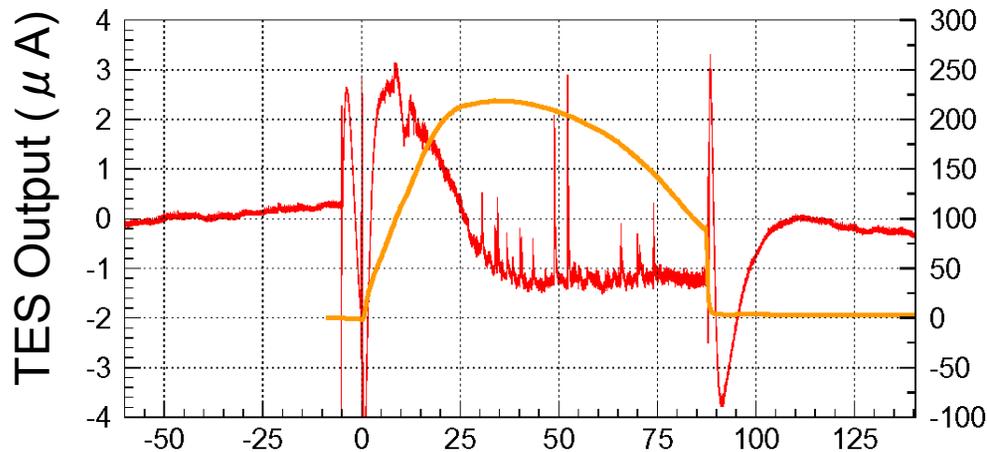
0.2-3.0keV ではさらに
悪化している可能性大

^{55}Fe 較正線源の典型的な
エネルギースペクトル
(プラズマ非生成時)
パルスハイトが 1/2

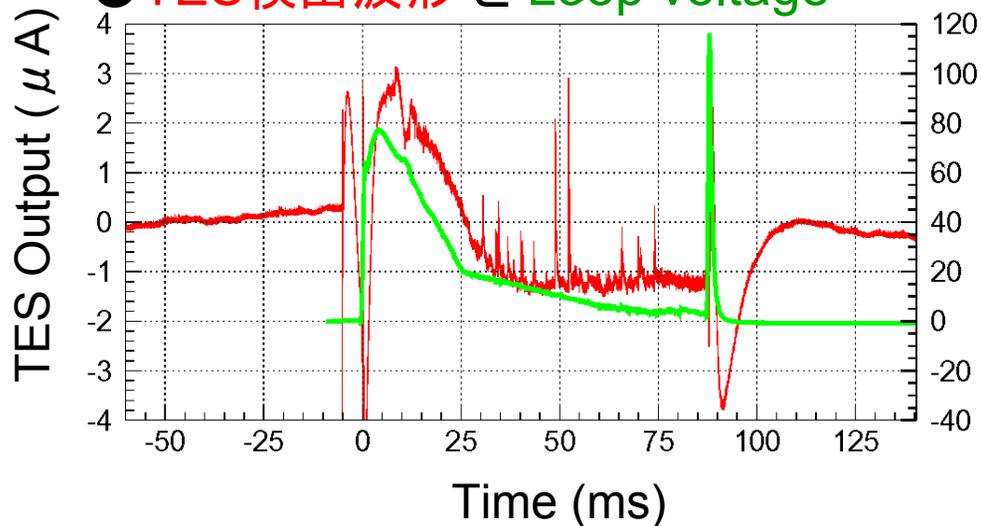


10. DC levelの変動

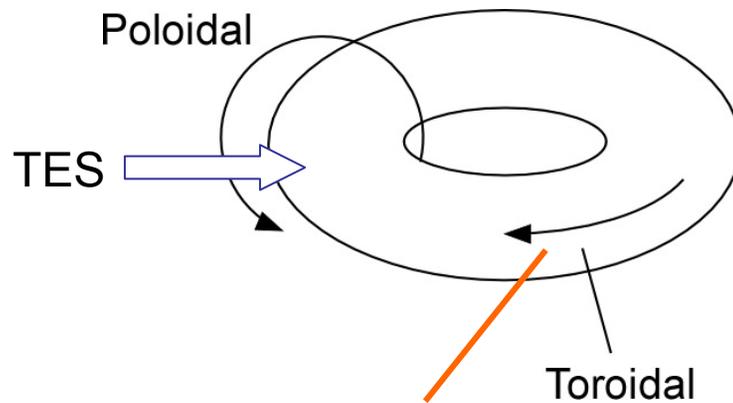
● TES検出波形と Plasma current



● TES検出波形と Loop voltage

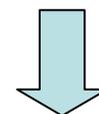


Plasma current (kA)



Plasma current方向

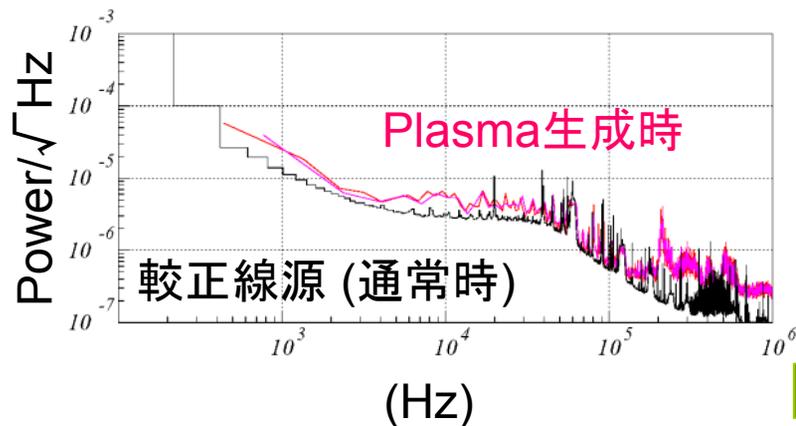
Loop voltage
 \propto Poloidal 磁場変化の
波形によく似ている



プラズマが作る磁場の
誘導電流をひろってる

11. 分解能劣化の原因

●ノイズレベルの増加

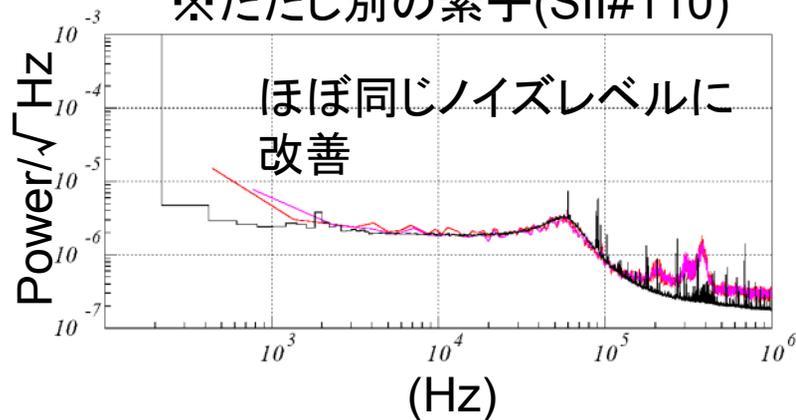


●磁気shield (10mm厚)をテスト

$$t_* \approx 7\text{msec}$$



※ただし別の素子(SII#110)



Al 金属shield
導入

12. まとめ1

- TES型X線マイクロカロリメータの動作環境を自作の断熱消磁冷凍機を用いて構築

エネルギー分解能
8.6 eV (at 1.5 keV)

- 産業総合技術研究所のプラズマ装置TPE-RXに接続しX線信号取得に成功

3258 counts / 214 shot (7.5 sec)

- プラズマ生成時にDC level が変動

プラズマ電流による磁場変化の影響

- エネルギー分解能が $\sim 50\text{eV}$ (at 0 keV) に劣化 (プラズマ生成時)

誘導電流によるノイズの増加

磁気shieldの導入で解消

パルス波高が1/2に低下

校正線源で $\sim 20\text{eV}$ に劣化 ---

- ・ 配線系統の不具合で動作点が最適でなかったため
- ・ 磁気トラップ

13. X線放射の素過程

● 光学的に薄い衝突電離プラズマ(重水素)

密度 n 、温度 T 、磁場 B

不純物の量 [Fe/D]、電離度

- 熱制動放射 荷電粒子(電子)がクーロン場による力を受ける
 - …連続X線 強度 $\propto n_e n_i \sqrt{T} V$
- 不純物からの電離特性X線
 - 物質、電離度により決まったエネルギーの輝線
 - …物質を特定 電離度、温度
- サイクロトロン放射 (X線領域では無視できる)

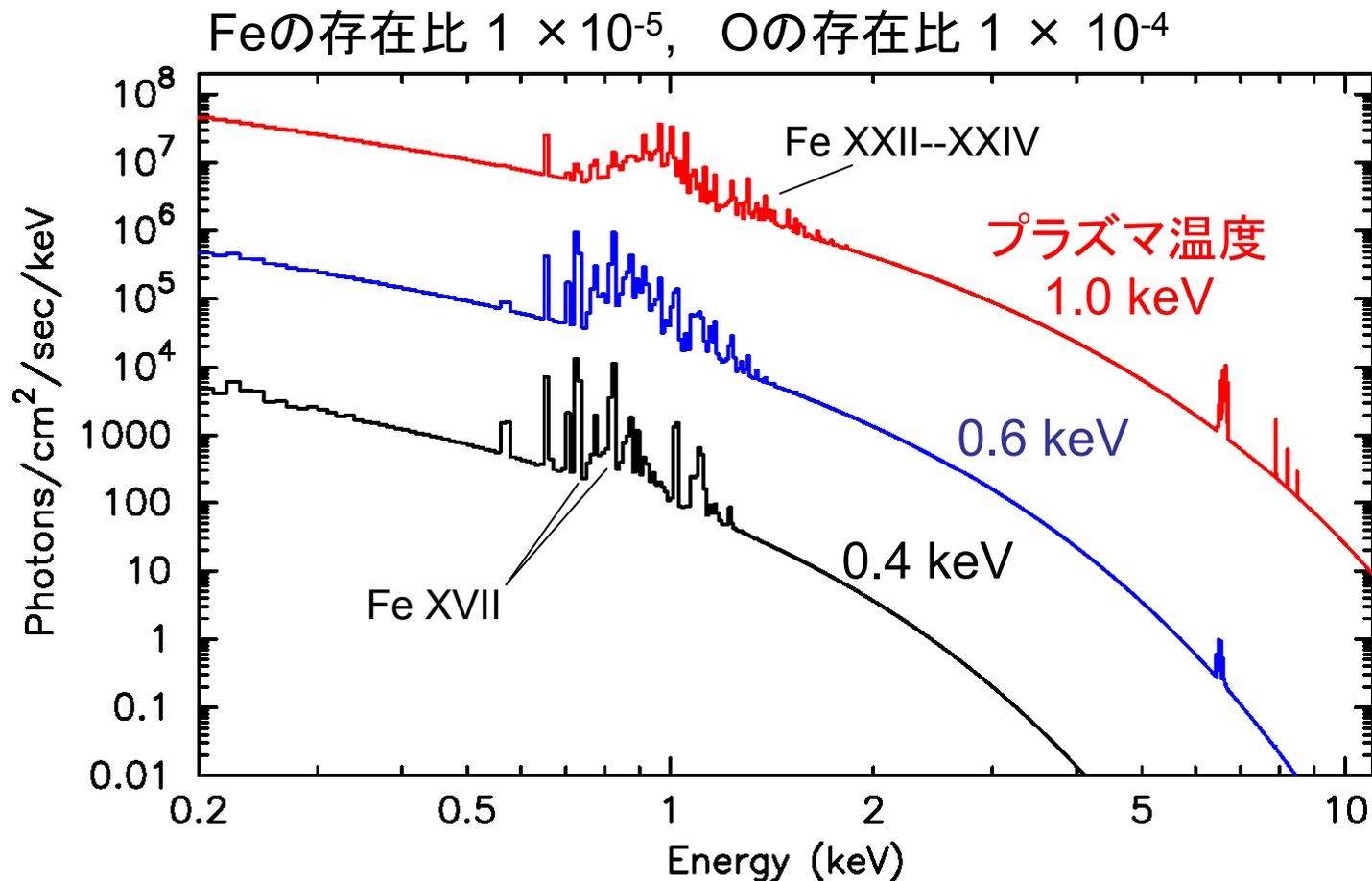
● プラズマ以外からの放射

- 真空槽の壁における制動放射、中性特性X線
- 壁におけるX線の反射、散乱 (低エネルギー側で顕著)

14. プラズマのX線スペクトルの例

XSPEC v11.3

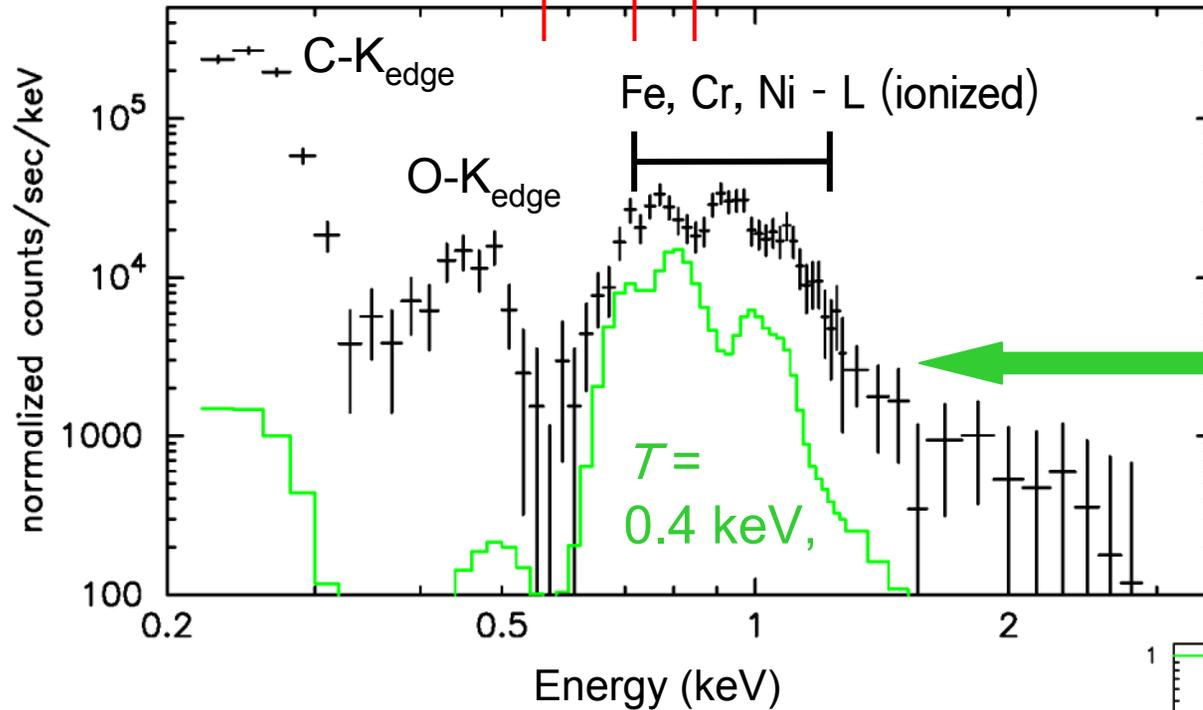
光学的に薄い電離平衡のプラズマ放射モデル ... MEKAL model



15. 得られたX線スペクトル

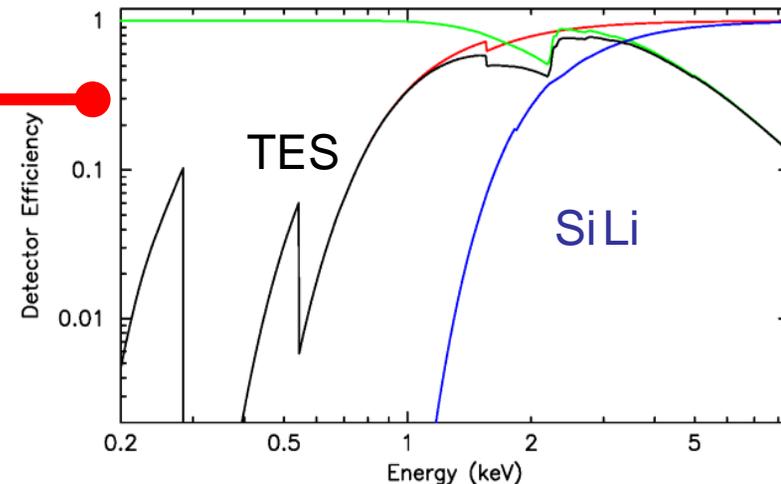
中性Cr-L α 573 eV, Fe-L α 705 eV, Ni-L α 852 eV,

SUS 316L :
Fe 62-70%
Cr 16-18%
Ni 10-14%
Mo 2-3%
Mn <2%
Si <1%



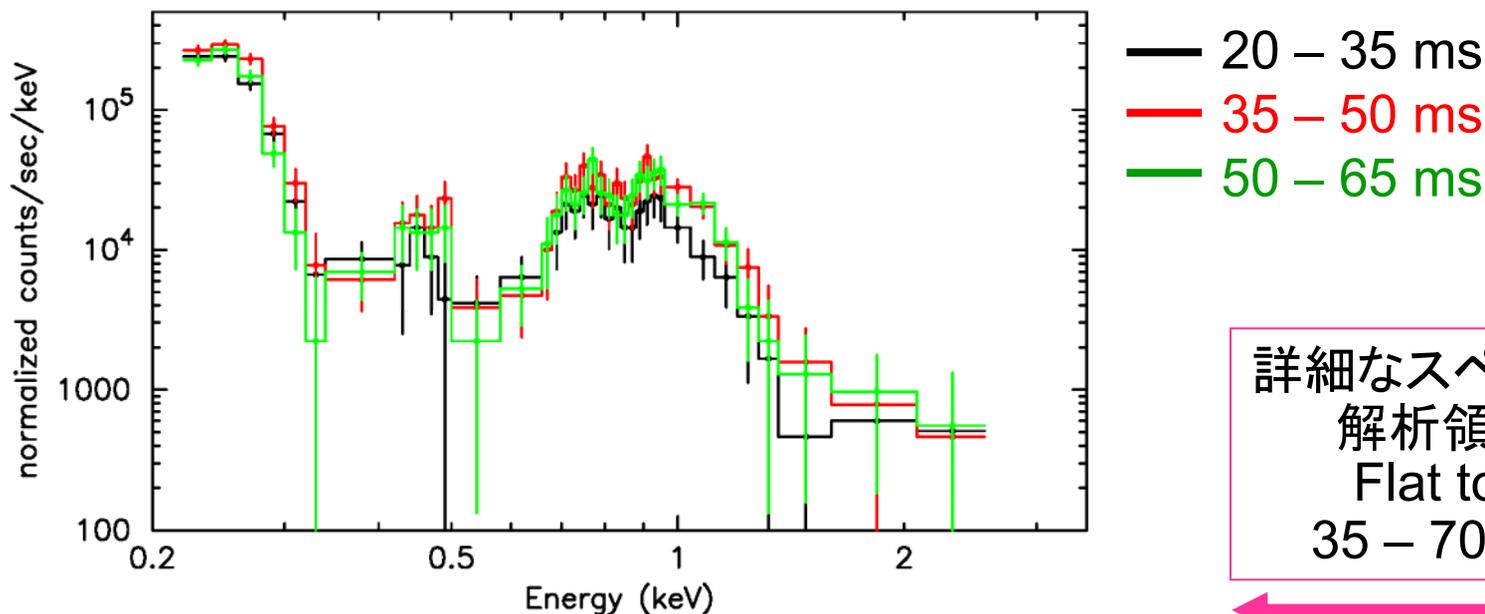
$T = 0.4 \text{ keV}$,
 $[\text{Fe}/\text{D}] = 3 \times 10^{-5}$

● TES (0.2 – 3 keV)
3258 counts
/ (214 shot = 7.49 s)



16. X線スペクトルの時間変化

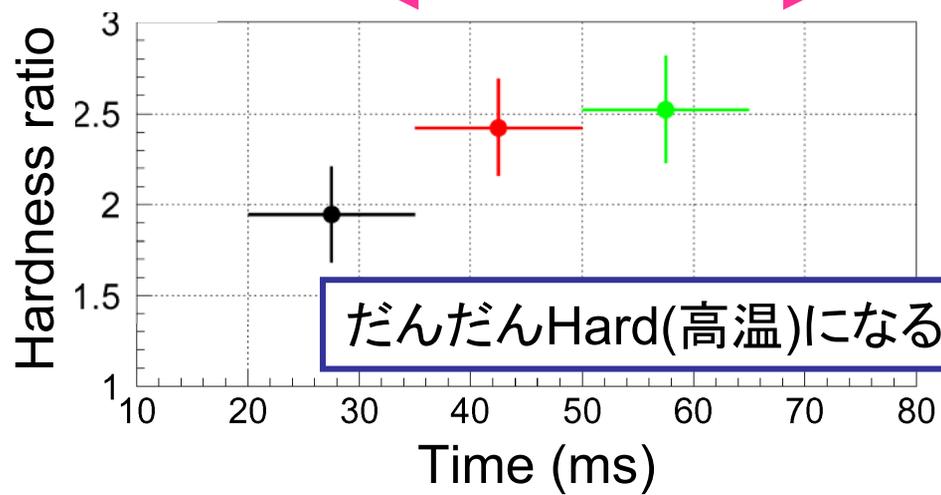
- 取得した時間ごとにスペクトルを分割



詳細なスペクトル
解析領域
Flat top
35 – 70 ms

- Hardness Ratio

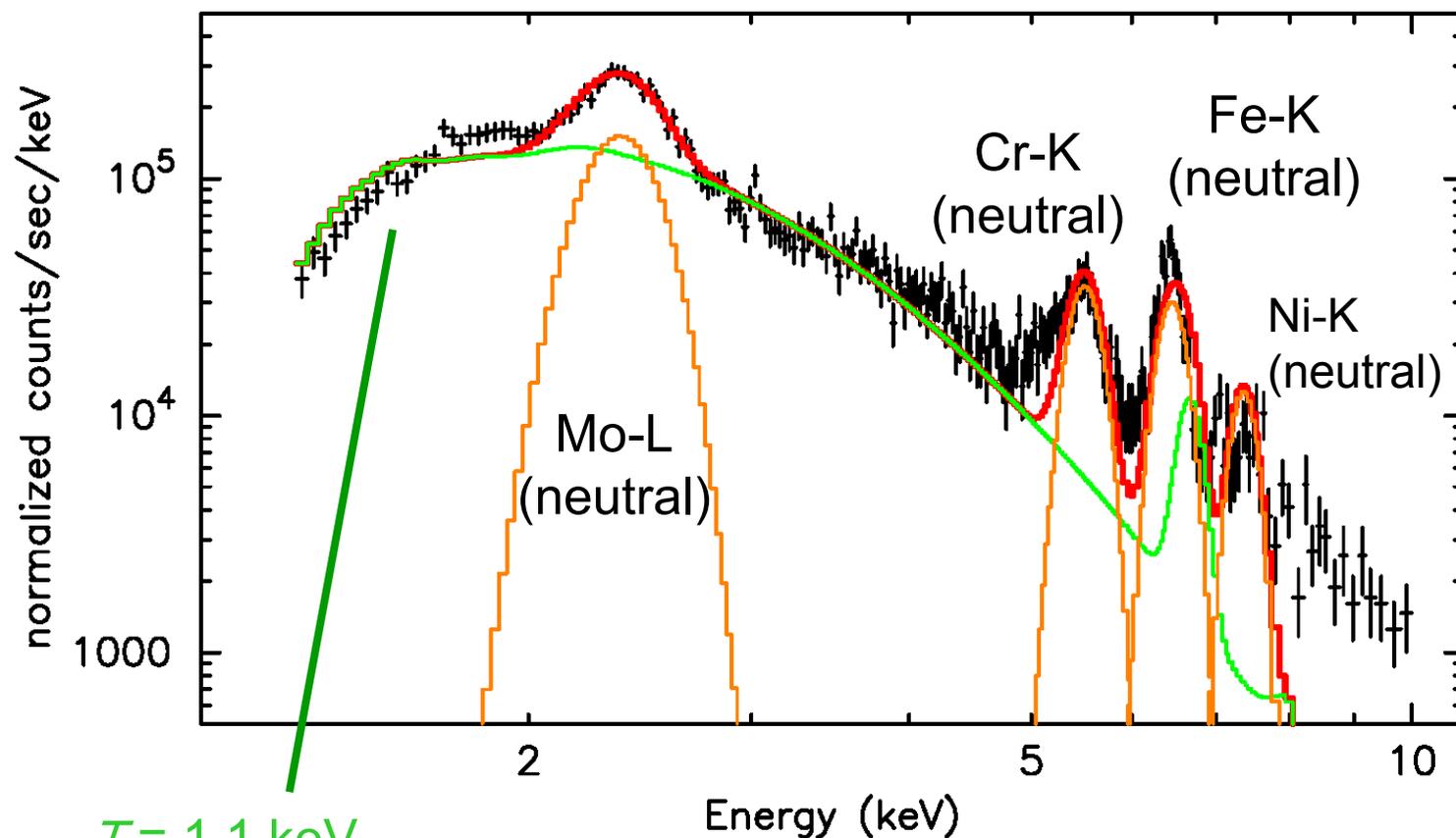
$$\frac{\text{Counts}(0.8-3.0 \text{ keV})}{\text{Counts}(0.5-0.8 \text{ keV})} \quad \text{を計算}$$



17. SiLi検出器のX線スペクトル

同じポートライン(同時ではない)で計測

SiLi (1.3 – 10 keV)
13,394 counts
(25 shot = 0.875 s)



$T = 1.1 \text{ keV}$,
 $[\text{Fe}/\text{D}] = 3 \times 10^{-5}$

Mo-L, Cr-K, Fe-K, Ni-Kは
中性特性輝線エネルギーと合う

18. まとめ2 スペクトルから示唆されること

● Cr, Fe, NiのL殻電離輝線の存在

プラズマからのX線放射であることは間違いない
重水素以外の不純物が有意に存在
プラズマが真空槽をけずっている

● 電離輝線が低電離から高電離のものまで混在 (0.7 – 1.2 keV) 連続成分も1温度ではあわない

多温度 / プラズマが熱平衡ではない
連続成分にプラズマ以外の放射成分の可能性

● Cr, Fe, Ni, Moの中性輝線、スペクトルにハードテールの兆候

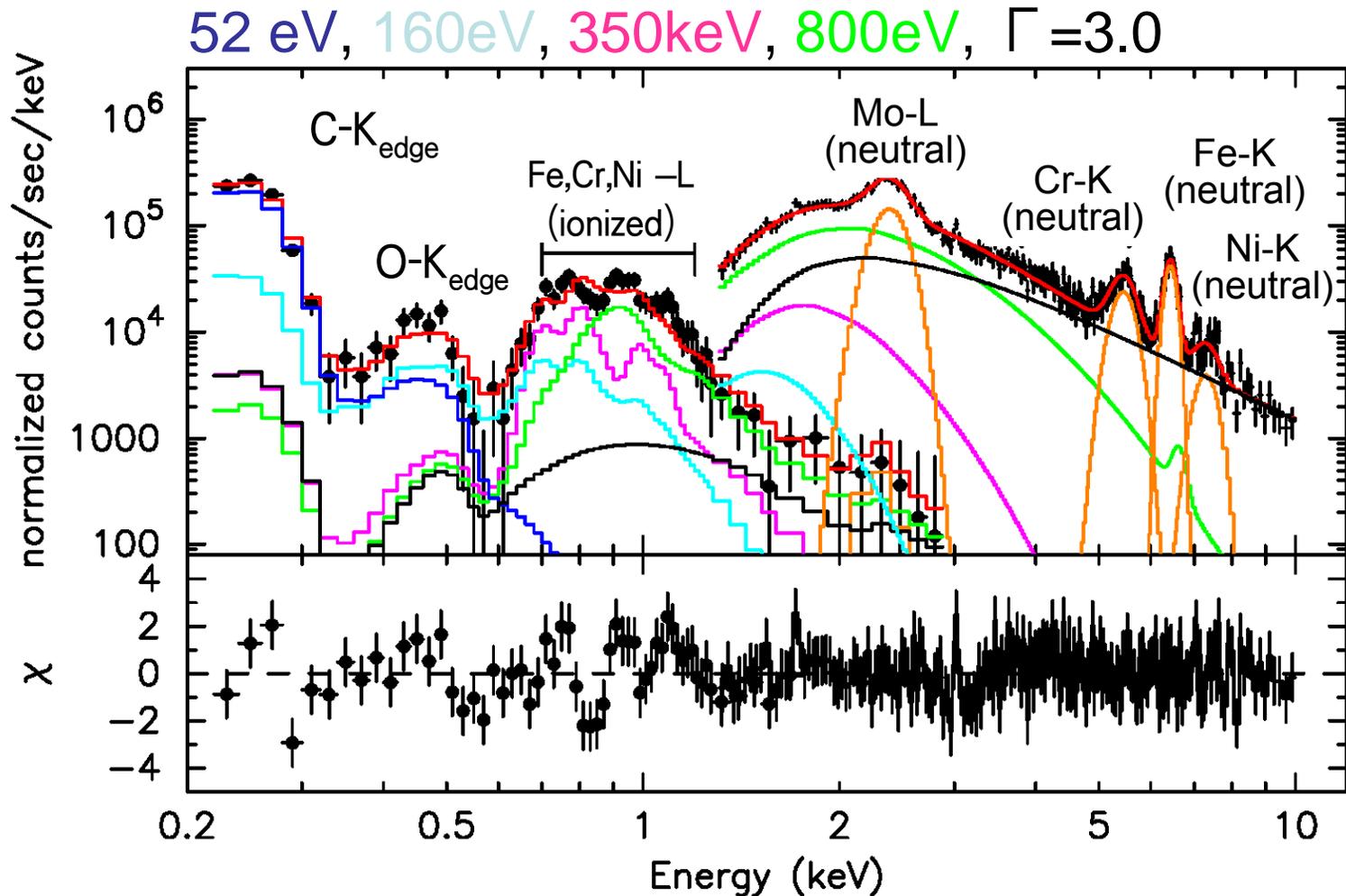
~5keV以上の粒子・X線が壁をたたいたことによる蛍光X線
高エネルギー電子の存在を示唆

… 以降、定量的に考察をおこなう

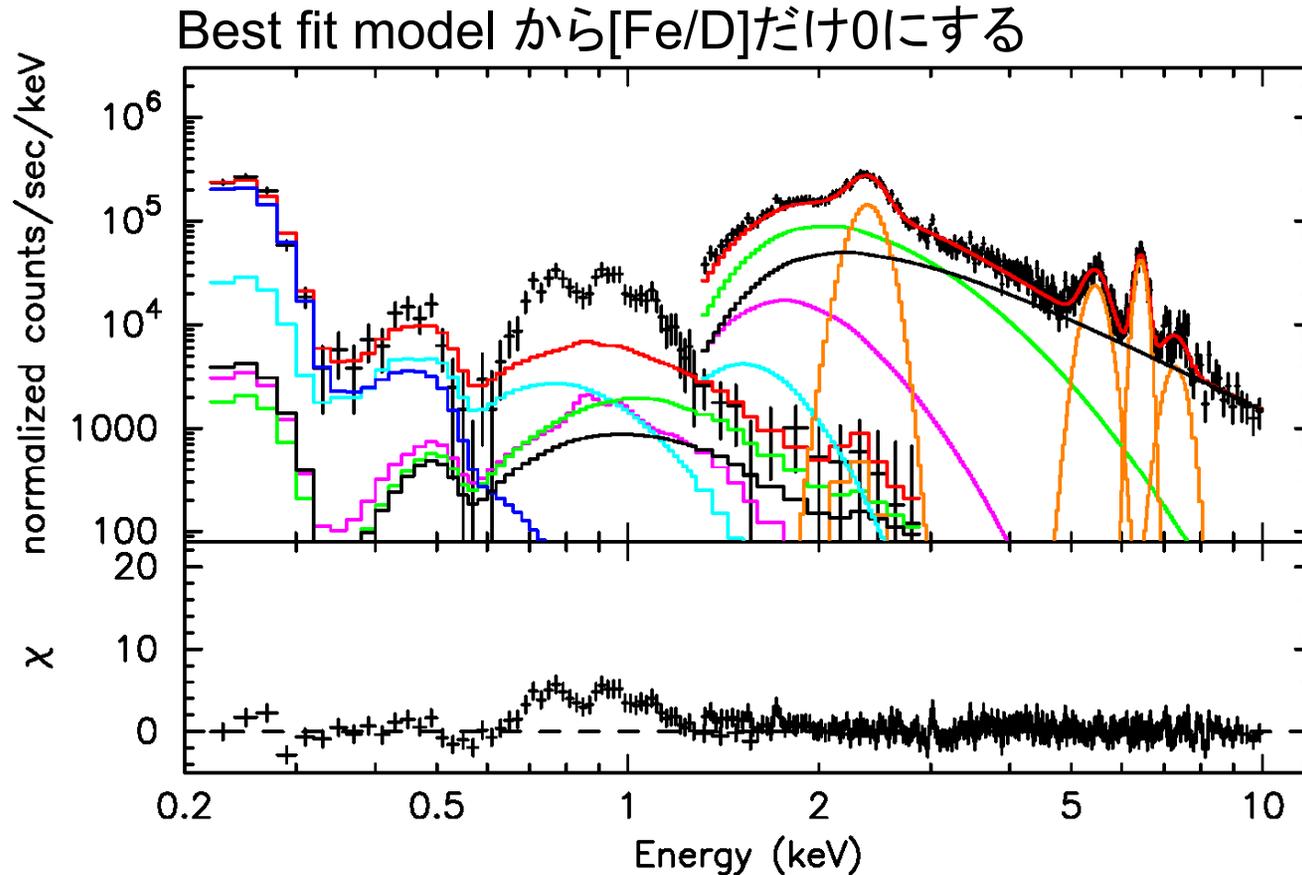
19. Best fit スペクトル

$\chi^2/\text{dof} = 282/265$ with 26 fit parameters

4 x (MEKAL: T, norm) + (power-law: norm, Γ) + 4 x (gauss: norm, E, σ)
+ (abundance: C, O, Fe) + (TES/SiLi ratio)



20. 不純物の影響



Fe, Cr, Niの輝線成分の全輻射に対する割合 2 % (0.2 – 10 keV)
(Soft成分を抜いた場合) 16 % (0.2 – 10 keV)

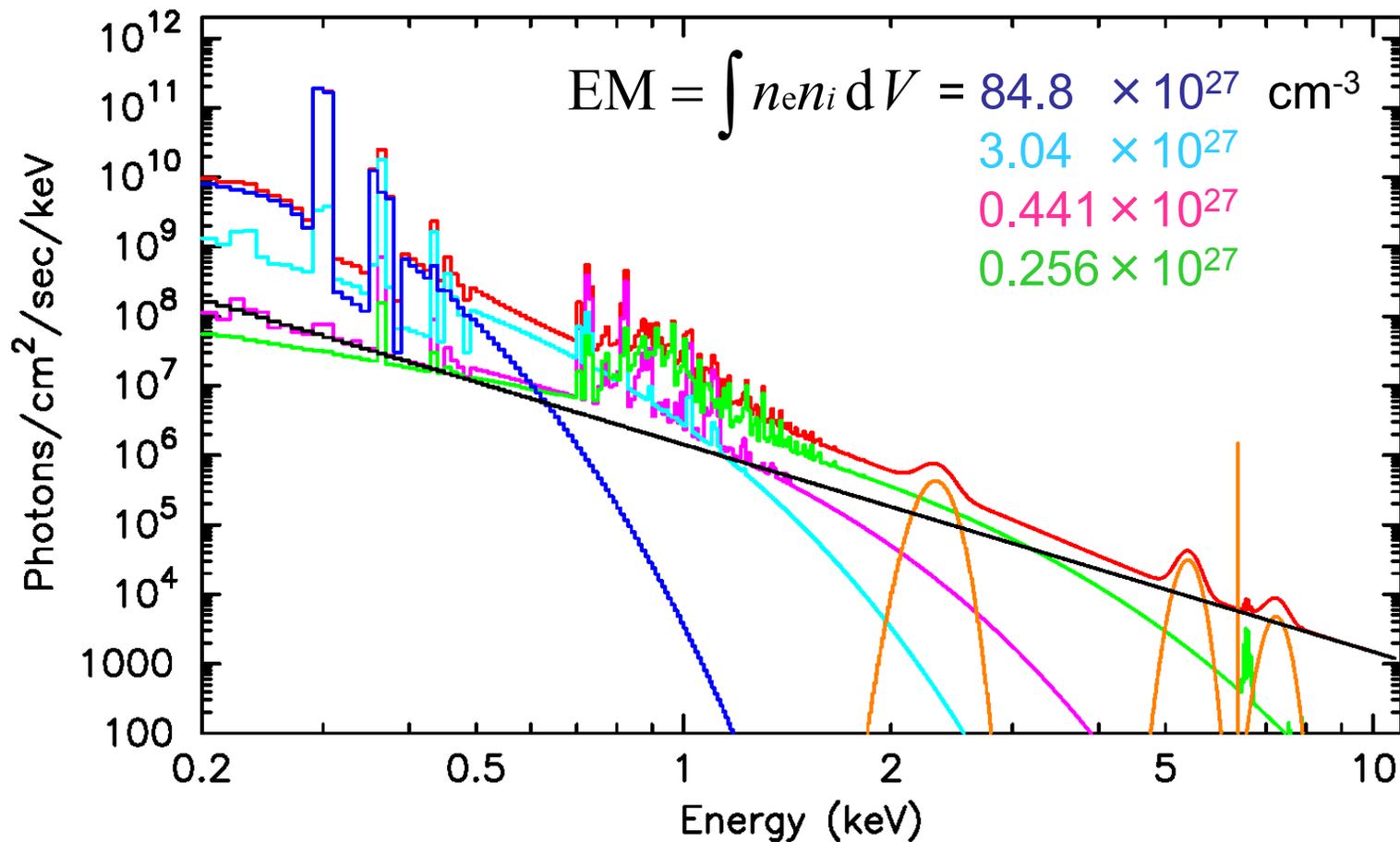
[Fe/D] $\sim 1-6 \times 10^{-5}$ 真空壁が削られる量 1 shot あたり $1 \mu\text{g}$ 以下

21. Best fit スペクトルモデル

$\chi^2/\text{dof} = 282/265$ with 26 fit parameters

4 x (MEKAL: T, norm) + (power-law: norm, Γ) + 4 x (gauss: norm, E, σ)
+ (abundance: C, O, Fe) + (TES/SiLi ratio)

52 eV, 160eV, 350 keV, 800eV, $\Gamma = 3.0$



22. プラズマ放射で説明可能かどうかの検討

・ 重水素の充填量

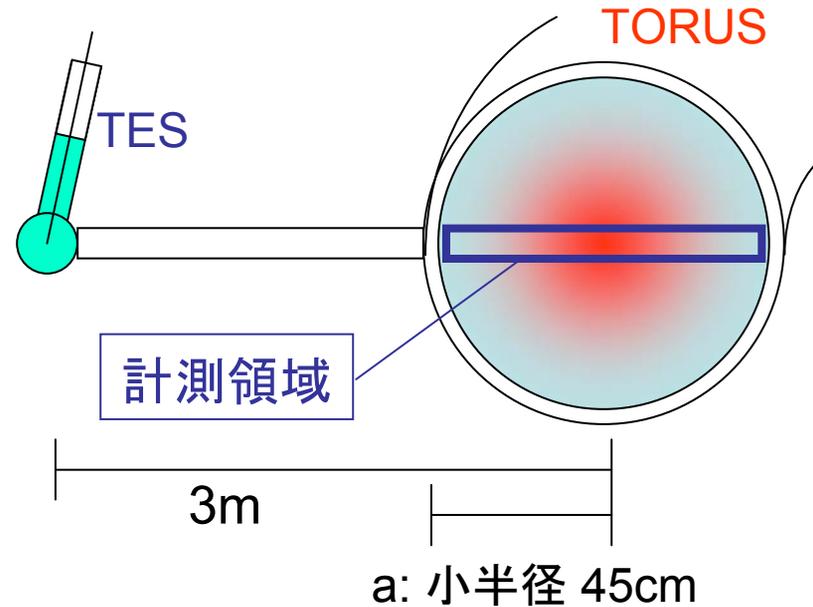
$$0.4\text{mTorr} = 2.56 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

これがすべてプラズマ化したとすれば

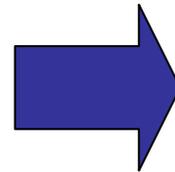
$$EM_{\text{MAX}} = 2.9 \times 10^{27} \text{ cm}^{-3}$$

またスペクトルフィットより

温度	EM	EM / EM _{MAX}
52 eV	$84.8_{-29}^{+21} \times 10^{27} \text{ cm}^{-3}$	$29.2_{-10}^{+7.2}$
160 eV	$3.04_{-0.76}^{+0.60} \times 10^{27} \text{ cm}^{-3}$	$1.05_{-0.26}^{+0.2}$
350 eV	$0.44_{-0.3}^{+1.1} \times 10^{27} \text{ cm}^{-3}$	$0.15_{-0.10}^{+0.38}$
800 eV	$0.26_{-0.05}^{+0.05} \times 10^{27} \text{ cm}^{-3}$	$0.09_{-0.02}^{+0.02}$



52 eV成分はプラズマからの放射とは考えにくい



壁面からの制動放射
乱反射など

他はプラズマからと考えて矛盾はない
ただし高温になっているのは10%程度

23. このような温度分布が存在可能かの検討

TPE-RXは磁場閉じ込め
磁場の存在を考慮する必要あり

TPE-RXのトーラス
大半径 / 小半径 = 1.72 / 0.45 m

$$\text{Larmor 半径 : } r_L \sim 5.3 \times 10^{-2} \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{1/2} \left(\frac{B_{\text{center}}}{0.2\text{T}} \right)^{-1} \text{ cm}$$

$$\text{電子のmean free path : } \lambda_e \sim 1.4 \times 10^5 \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_e}{1.28 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \text{ cm}$$

単純には衝突緩和時間で $\min(\lambda_e, r_L)$ 程度のサイズの温度差はなくなってしまう

$$\text{衝突緩和時間 : } \tau_{ee} \sim 6 \times 10^{-2} \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{3/2} \left(\frac{n_e}{1.28 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{\ln \Lambda}{20} \right)^{-1} \text{ msec}$$

$$\tau_{ei} \sim 230 \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{3/2} \left(\frac{n_i}{1.28 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{\ln \Lambda}{20} \right)^{-1} \text{ msec}$$

我々がみているプラズマの継続時間は ~ 50 ms

$$\text{熱伝導 : } \tau_{\text{cond}} \sim 50 \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{-5/2} \left(\frac{n_i}{1.28 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{\ln \Lambda}{20} \right)^{-1} \left(\frac{T / \Delta T}{45\text{cm}} \right)^2 \text{ sec}$$

24. 考察のまとめ

- 重水素以外の不純物が影響

[Fe/D] $\sim 1-6 \times 10^{-5}$,

真空壁が削られる量 1 shot あたり $1 \mu\text{g}$ 以下

- プラズマ輻射とは考えにくい成分が低エネルギー側に存在

壁面からの制動放射、乱反射など

- プラズマからの異なる温度成分を計測

300eV以上の高温な成分は10~20%の空間に局在
存在可能かを検討

プラズマの継続時間 $\sim 50 \text{ ms}$ では可能ではないか

25. 全体のまとめ

- TES型X線マイクロカロリメータの動作環境を
自作の断熱消磁冷凍機を用いて構築 (FWHM 8.6eV at 1.5keV)
- TES型マイクロカロリメータで地上プラズマ(TPE-RX)の
X線計測に初めて成功 --- FWHM 50eV at 0 keV

得られたX線スペクトルから示唆されること

- Cr, Fe, NiのL殻電離輝線の存在
- 電離輝線が低電離から高電離のものまで混在 (0.7 – 1.2 keV)
多温度 / プラズマが熱平衡ではない
- Cr, Fe, Ni, Moの中性輝線、hard tail
~5keV以上の粒子・X線が壁をたたいたことによる蛍光X線

スペクトル解析結果

- 重水素以外の不純物
[Fe/D] ~ $1-6 \times 10^{-5}$, 真空壁が削られる量 1 shot あたり $1 \mu\text{g} / \text{shot}$
- 壁面からの制動放射、乱反射などの成分が低エネルギー側に存在
- 異なる温度成分が存在 300eV以上の高温な成分は10~20%の空間に局在

25. 全体のまとめ

- TES型マイクロカロリメータで地上プラズマを計測した初の実用試験

今後の素子開発や検討されている実用試験に対して課題提起

- TPE-RXの作り出すプラズマからのX線を解析

不純物量や温度分布など、TPE-RXに対して新しい情報

エネルギー分解能は大きく劣化したものの
TESカロリメータを用いたプラズマ計測の足がかり

23. このような温度分布が存在可能かの検討

$$\text{電子のmean free path} \quad \lambda_e \sim 1.4 \times 10^5 \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_e}{1.28 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \text{cm}$$

$$\text{衝突緩和時間:} \quad \tau_{ee} \sim 6 \times 10^{-2} \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{3/2} \left(\frac{n_e}{1.28 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{\ln \Lambda}{20} \right)^{-1} \text{msec}$$

$$\tau_{ei} \sim 230 \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{3/2} \left(\frac{n_i}{1.28 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{\ln \Lambda}{20} \right)^{-1} \text{msec}$$

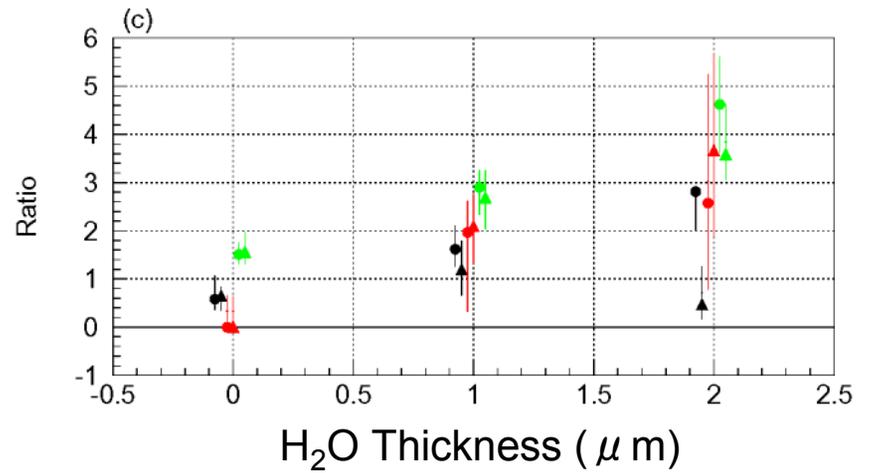
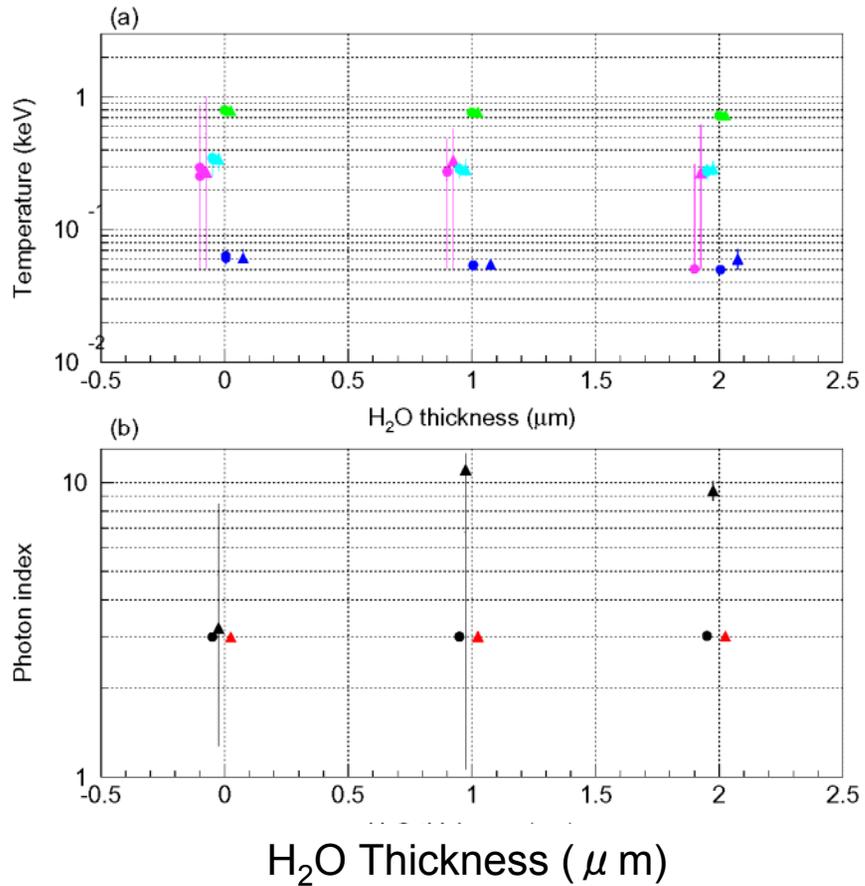
通常は衝突緩和時間で λ_e 程度のサイズの温度差はなくなってしまう
磁場の存在を考慮する必要あり

古典的にはLarmor半径程度しかなまされない

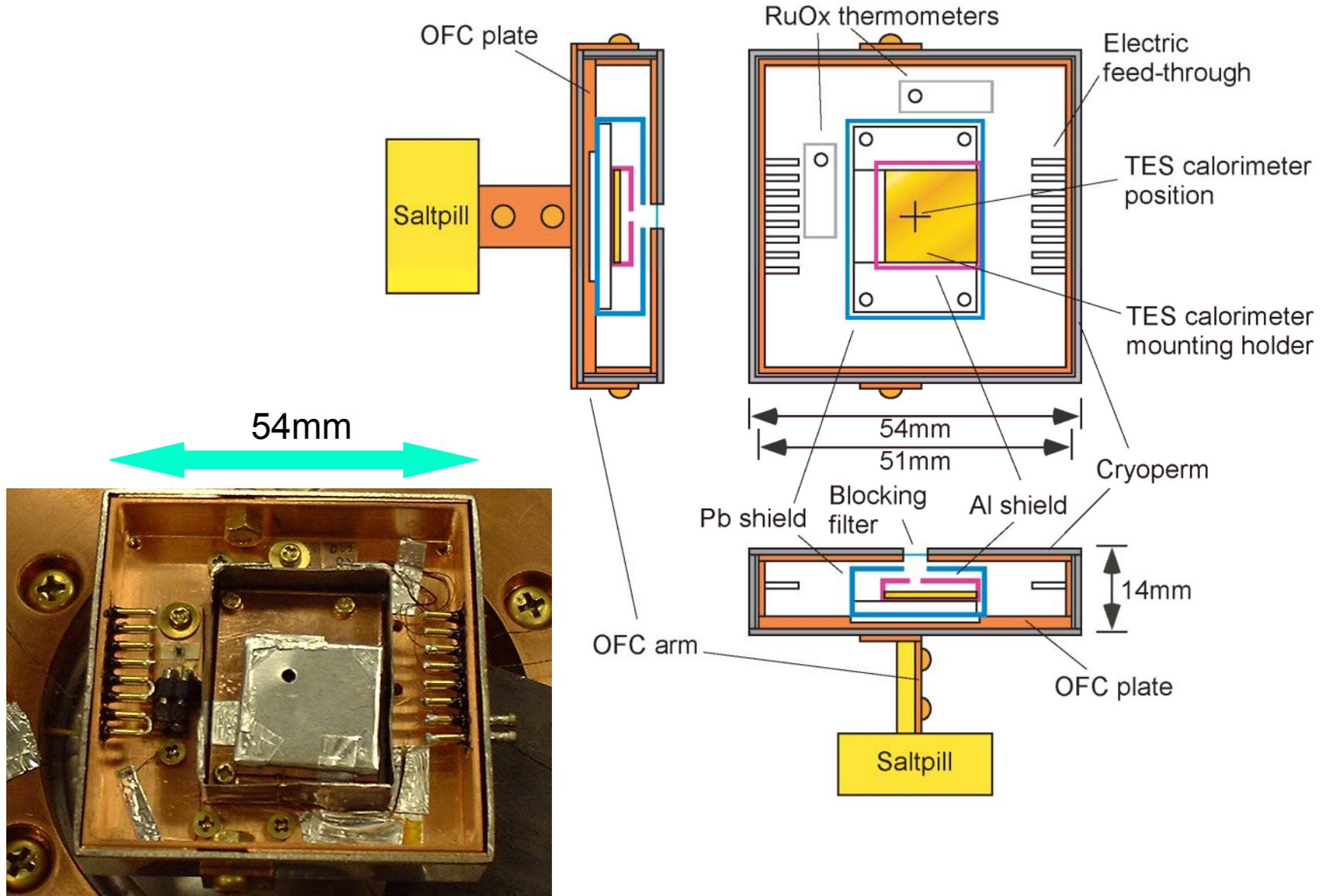
$$\text{Larmor 半径:} \quad r_L \sim 5.3 \times 10^{-2} \left(\frac{T_e}{1\text{keV}} \right)^{1/2} \left(\frac{B_{\text{center}}}{0.2\text{T}} \right)^{-1} \text{cm}$$

我々がみているプラズマの継続時間は $\sim 50 \text{ms}$
したがって温度平滑化の進行は τ_{ee} を考えた場合 44cm 、 τ_{ei} では 0.01cm

入射窓透過率の影響

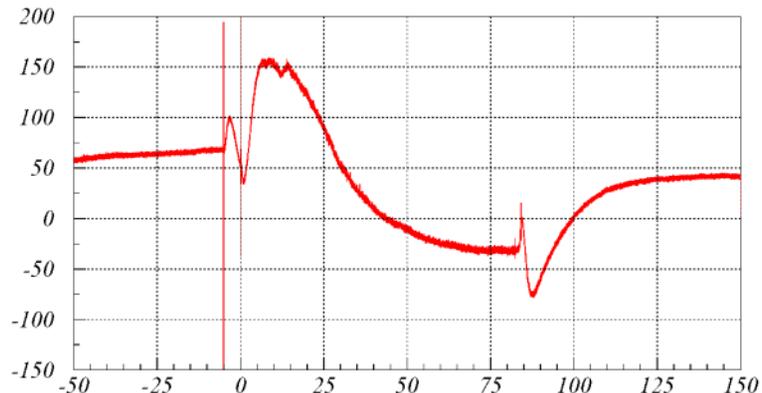


Design of the Detector table

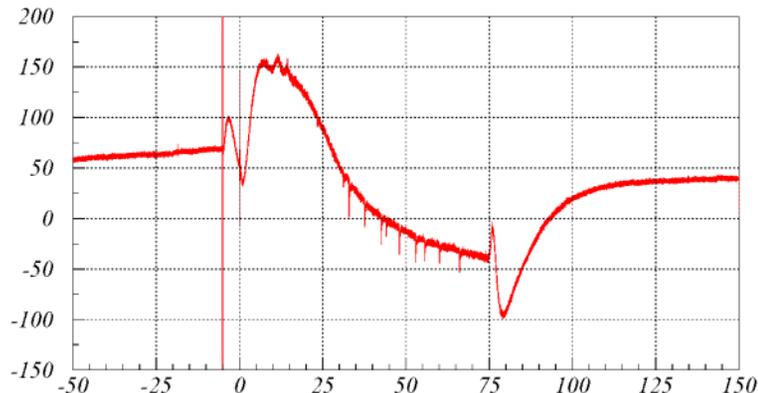


DC levelの振る舞い

※ Mar 2005 in AIST



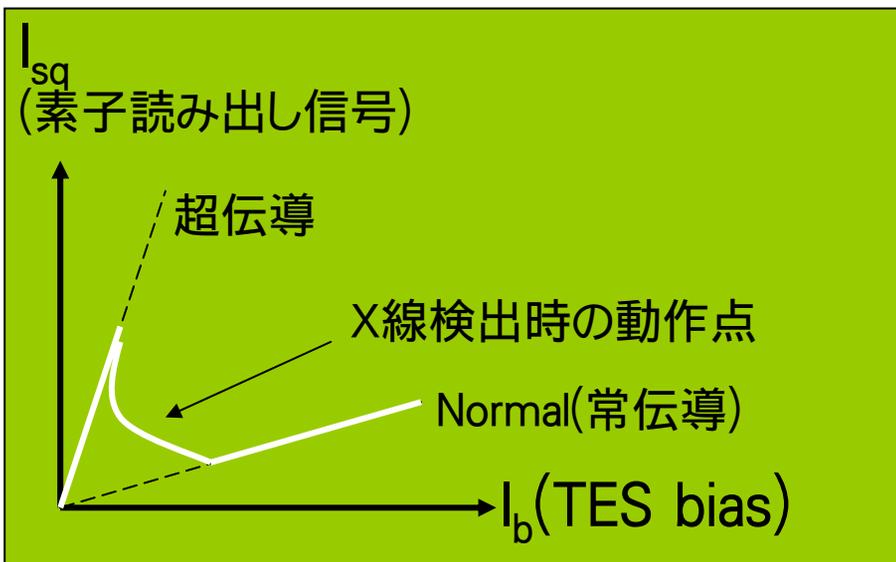
TES bias -5.4V GV close



TES bias -5.4V GV open
X線信号は逆

- TESにかける電流方向を逆にする
X線信号は逆転するがDC levelの
振る舞いは変わらない

DC level変動は熱輻射が
原因ではない



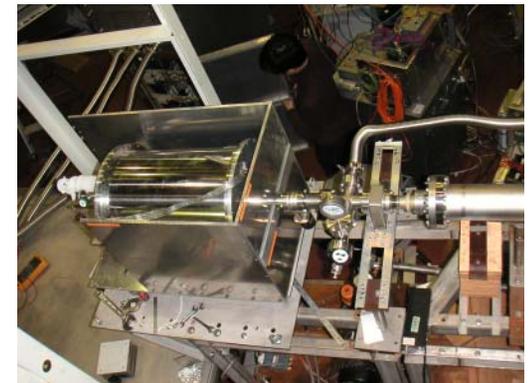
Magnetic shield on Mar 2005

◇ Saturation time

$$B_{\text{in}} = B_{\text{ext}} \{1 - \exp(-t / t_*)\}$$

$$t_* = \frac{1}{2\pi} \mu_0 \sigma D^2 \sim \frac{1}{2\pi} \mu_0 \sigma D x \sim 7 \text{ m sec}$$

◇ Al sheet 10mmt

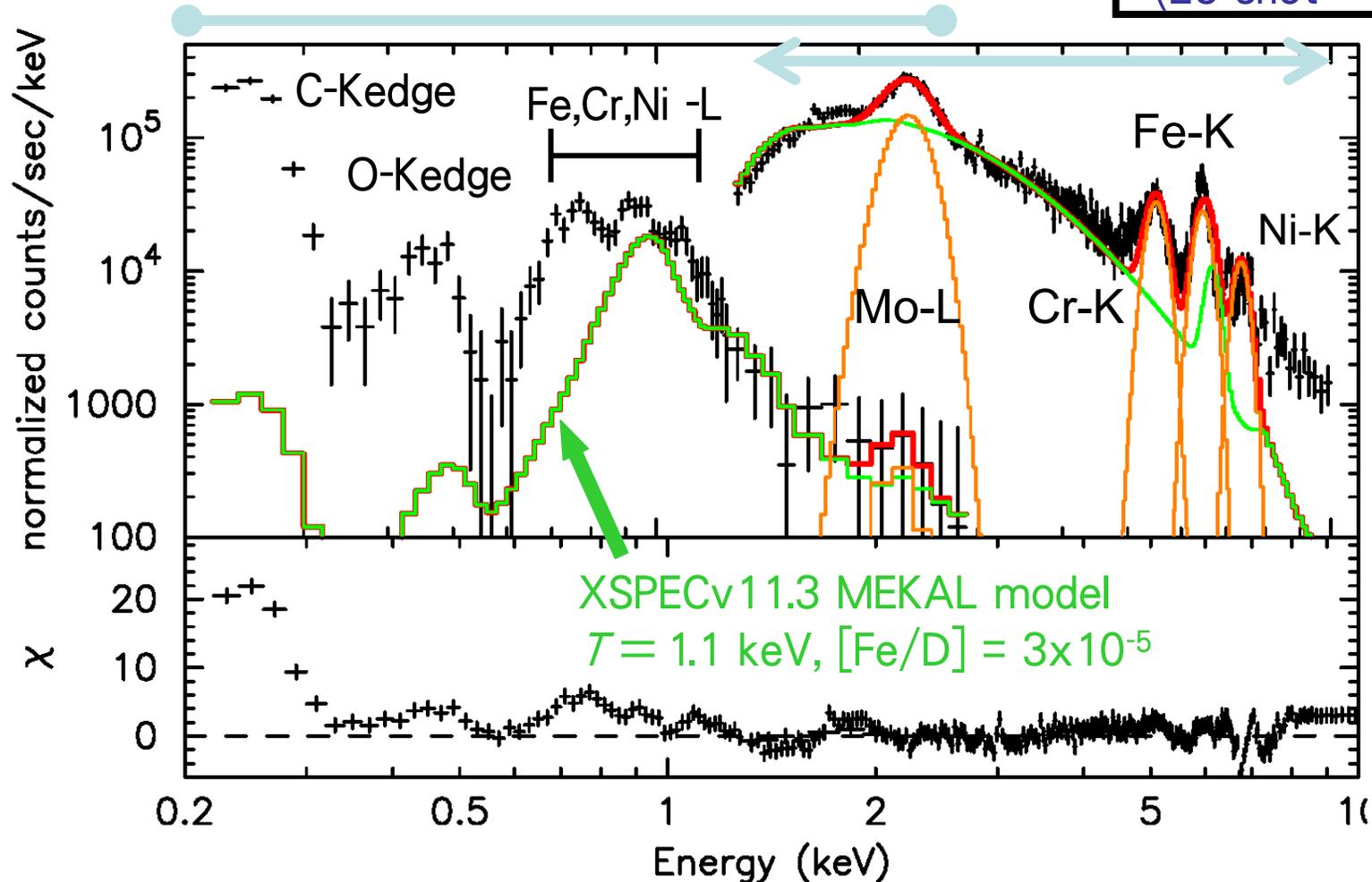


13. X-ray spectrum (1 temp and lines)

● TES (0.2 – 3 keV)

3258 counts / (214 shot = 7.49 s)

SiLi (1.3 – 10 keV)
13,394 counts
(25 shot = 0.875 s)



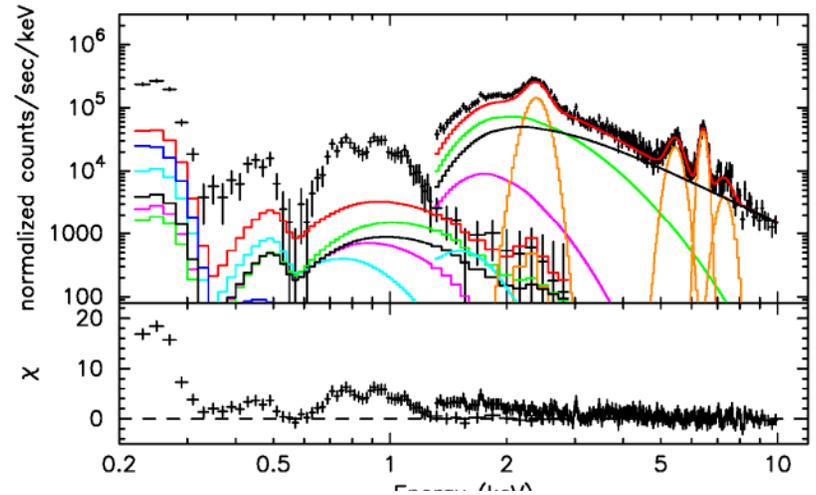
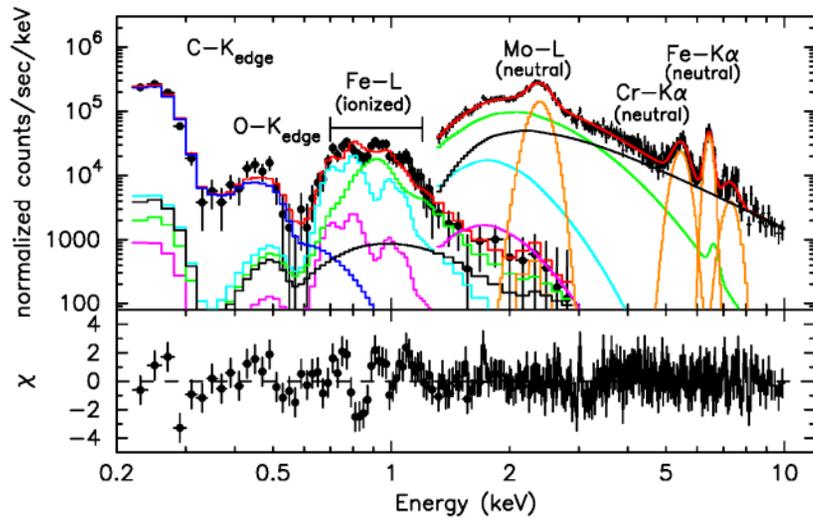
- Spectral fit with XSPEC

- MEKAL : optically thin thermal plasma model (convolved with detector response).

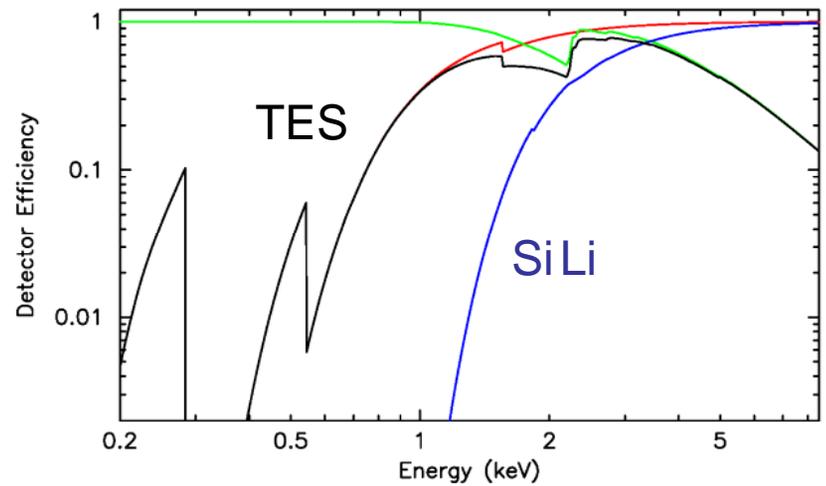
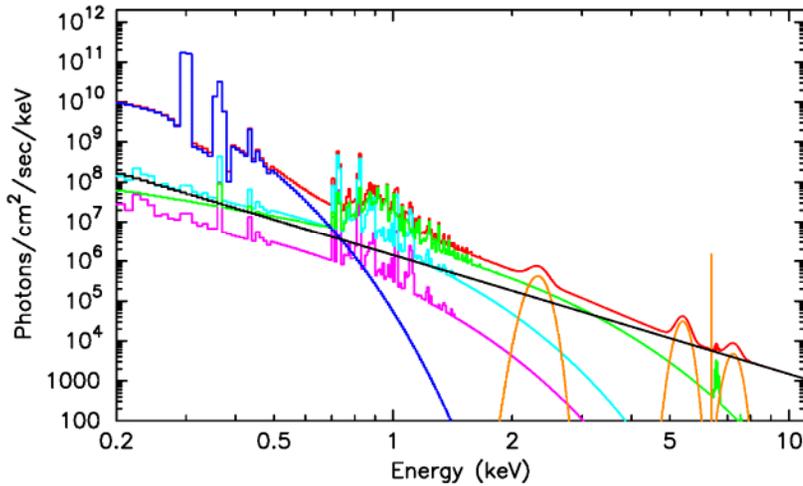
18. スペクトル解析結果

$[C/D] = 1.3 \times 10^{-3}$, $[O/D] < 10^{-5}$, $[Fe/D] = 1.5 \times 10^{-5}$

When $[C/D] = [O/D] = [Fe/D] = 0$



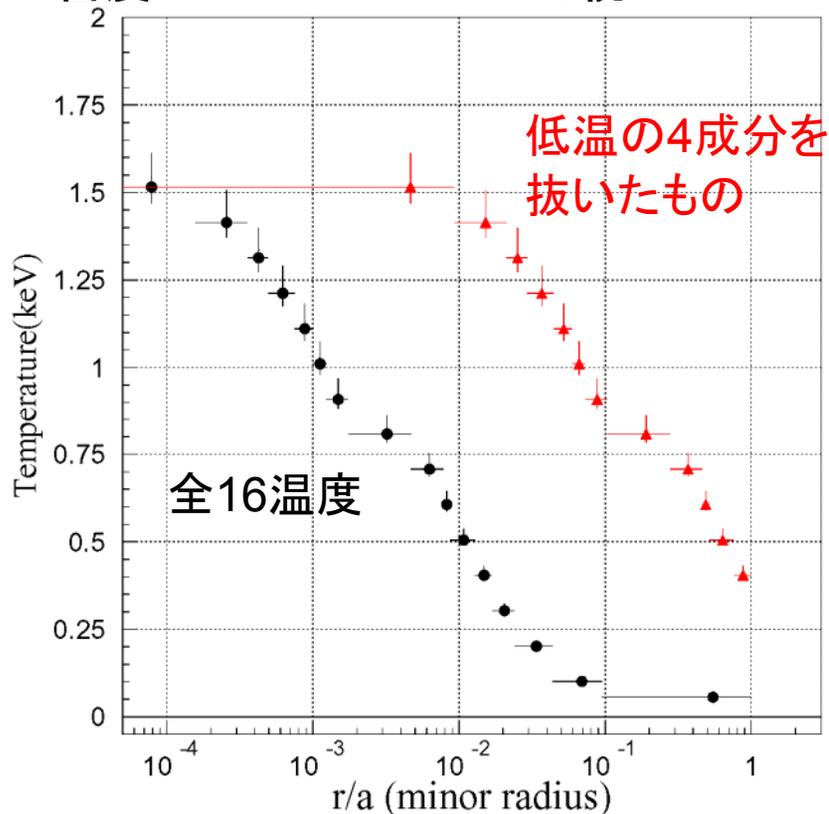
52 eV, 160eV, 350 keV, 800eV, $\Gamma = 3.0$



17. 多温度の半径分布

● スペクトルモデルを
16 MEKAL + 1 power-law + 4 gauss
にして解析 (15個の温度は連動)

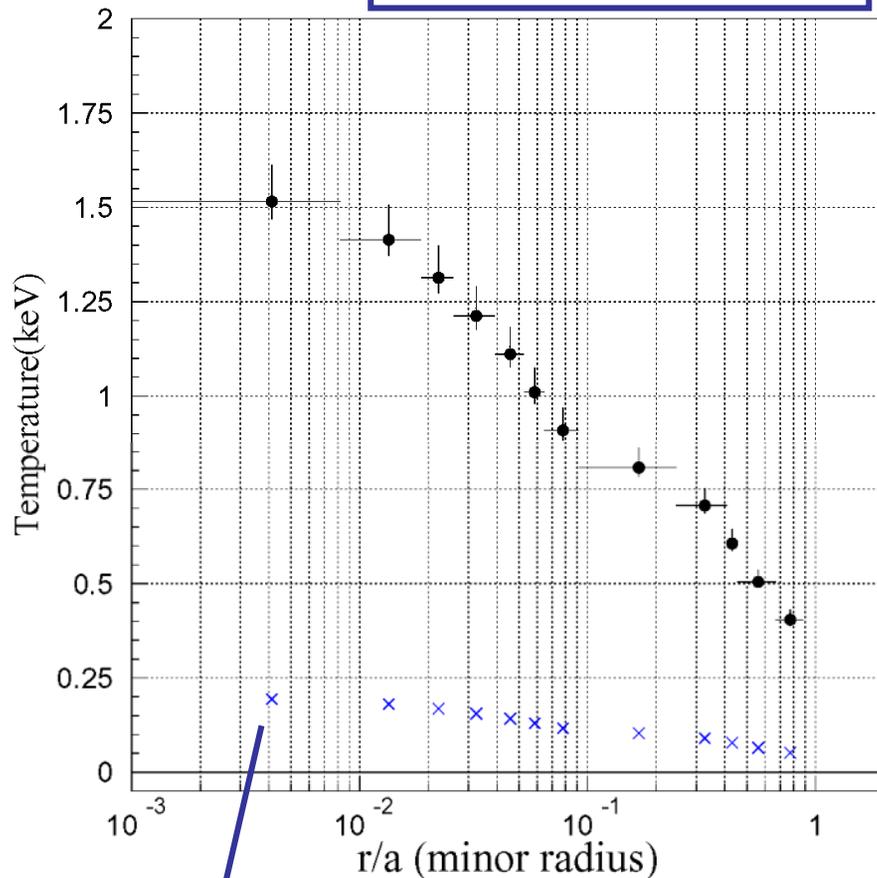
小半径中心の温度が高いと仮定
密度 = $1.28 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ で統一



EMの比で導出した場合

a: 小半径 45cm

密度より絶対値で導出

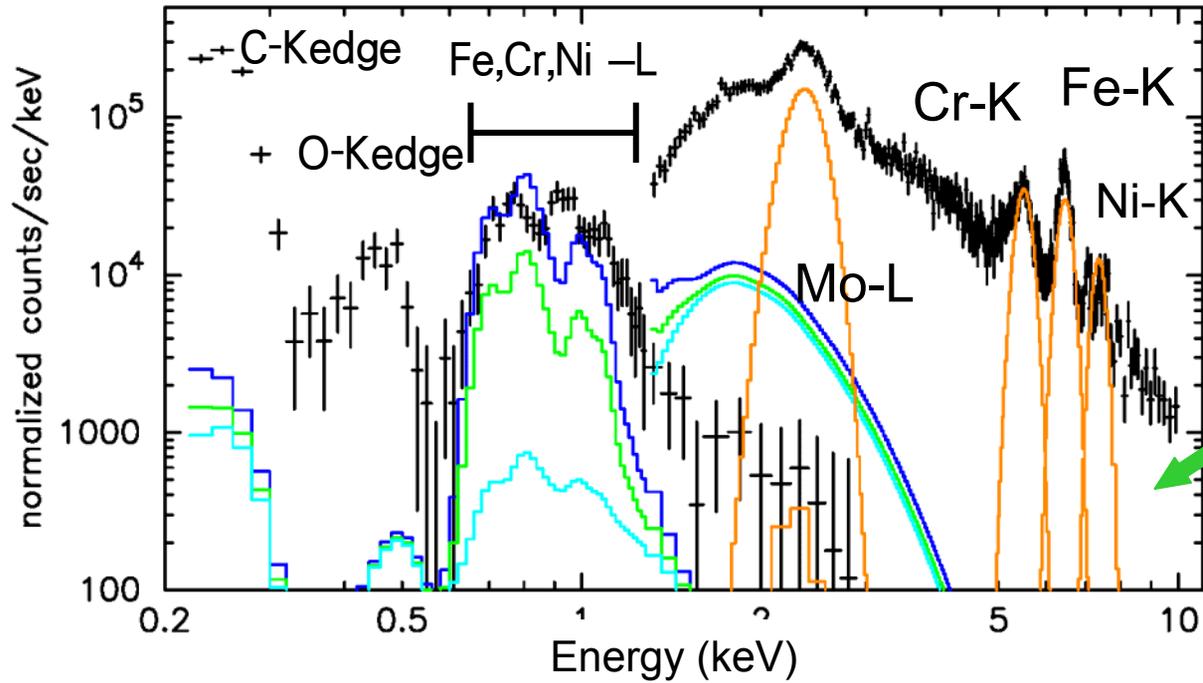


$\beta = \text{ガス圧} / \text{磁気圧} < 1$
どの半径でも1以下は成立

14. 得られたX線スペクトル

SUS 316L :
 Fe 62-70%
 Cr 16-18%
 Ni 10-14%
 Mo 2-3%
 Mn <2%
 Si <1%

Cr-L 572.8 eV, Fe-L 705.0 eV, Ni-L 851.5 eV,

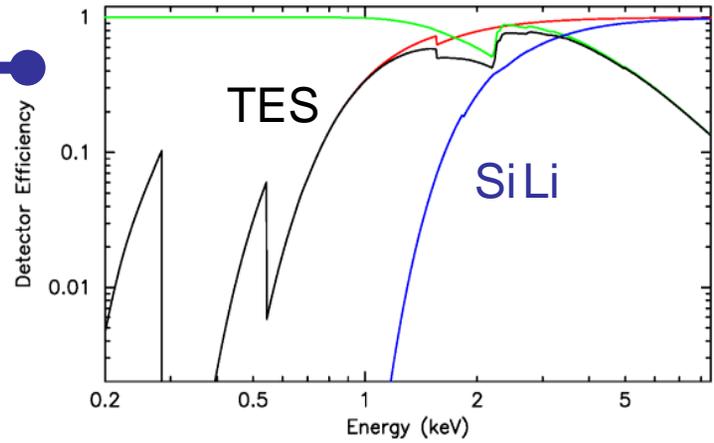


$T = 0.4$ keV,
 $[Fe/D] = 0.1, 3, 10 \times 10^{-5}$
 $\tau = 0.4$ keV,
 $[Fe/D] = 3 \times 10^{-5}$

● TES (0.2 – 3 keV)
 3258 counts
 / (214 shot = 7.49 s)

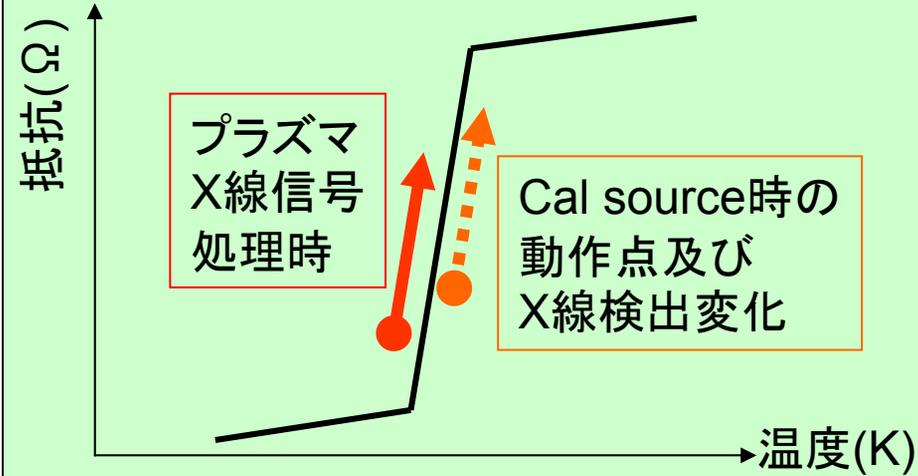
● SiLi (1.3 – 10 keV)
 13,394 counts
 (25 shot = 0.875 s)

• MEKAL : optically thin thermal plasma model
 (convolved with detector response).



11. 分解能劣化の原因

- プラズマ生成時に動作点変化している



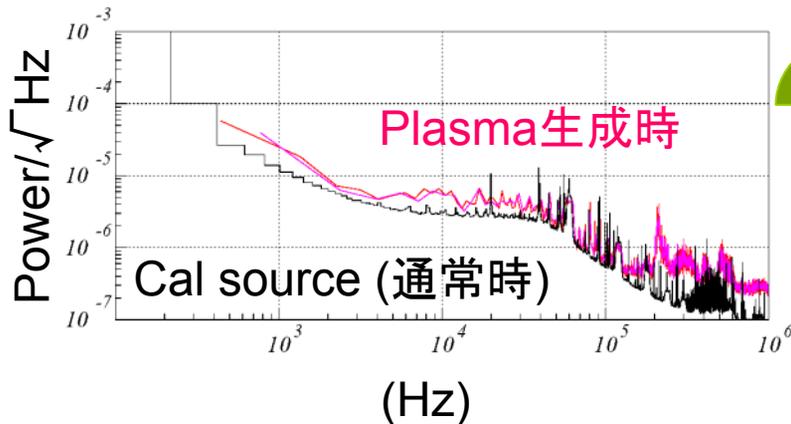
Cal Sourceの検出dataで得られた最適フィルタでは正確ではない

- 磁気shield (10mm厚)をテスト

$$t_* \approx 7 \text{ msec}$$



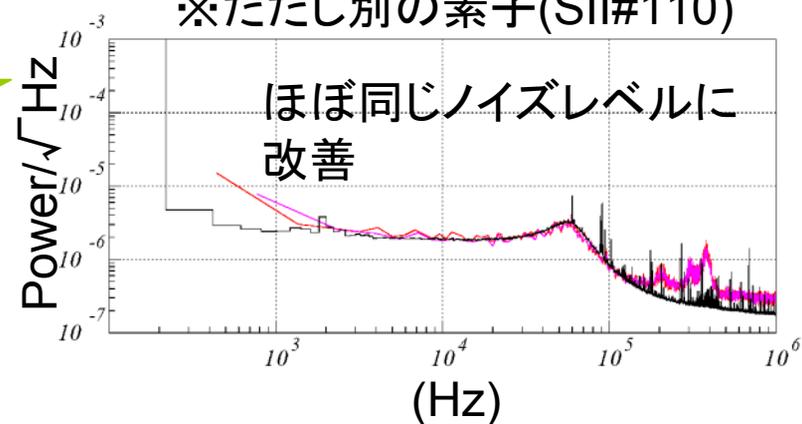
- ノイズレベルの増加



Al 金属shield 導入



※ただし別の素子(SII#110)



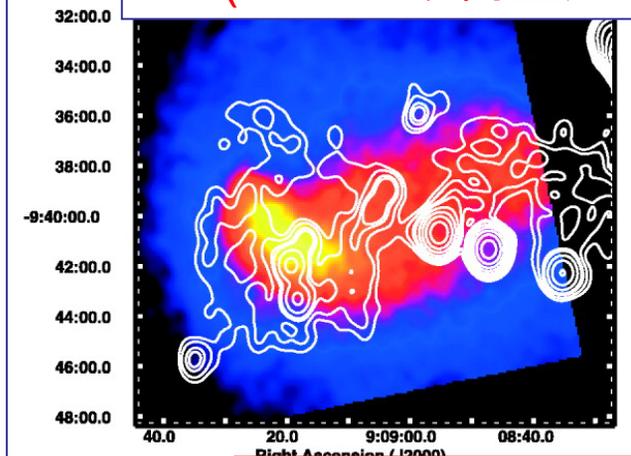
はじめに

- X線カロリメータによる高精度分光観測



宇宙の高エネルギー現象 ダイナミックな運動を明らかに

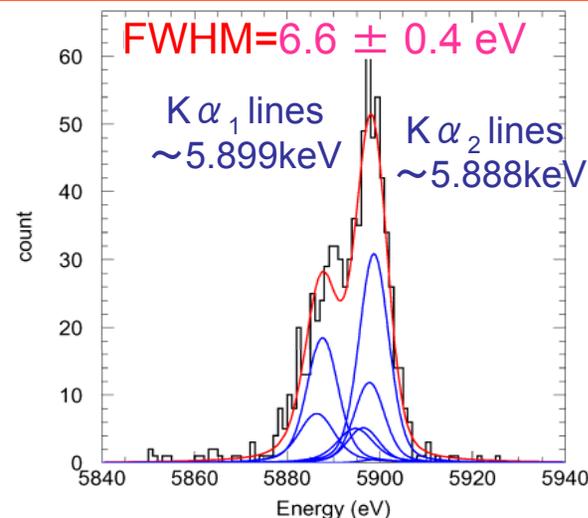
A754マージング銀河団
銀河団衝突の様子
(チャンドラ衛星)



Color : X-ray
Contour : radio

輝線のエネルギーシフトをみる
ガスの相対論的運動を直接観測

TES型マイクロカロリメータで得た
MnK α エネルギースペクトル



温度制御 PID

$$w(t) = \frac{I}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t w(t') dt' - P\{T(t) - T_{\text{aim}}\} - D \frac{dT}{dt}(t)$$

平均出力

設定温度との差

温度変化

加える

$$F(t) = \left(\frac{\Delta t}{2}\right) \frac{di}{dt}(t) \propto \frac{1}{i}$$

●ヒーター出力の場合

ヒーター出力 $w(t)$

流入熱 $w_{in}(t)$

実験ステージ

熱伝導
 $w_{out}(t)$

熱浴

$$\overline{w(t)} + \overline{w_{in}(t)} = \overline{w_{out}(t)}$$

●ADRの場合

流入熱 $w_{in}(t)$

実験ステージ
(カロリメータ)

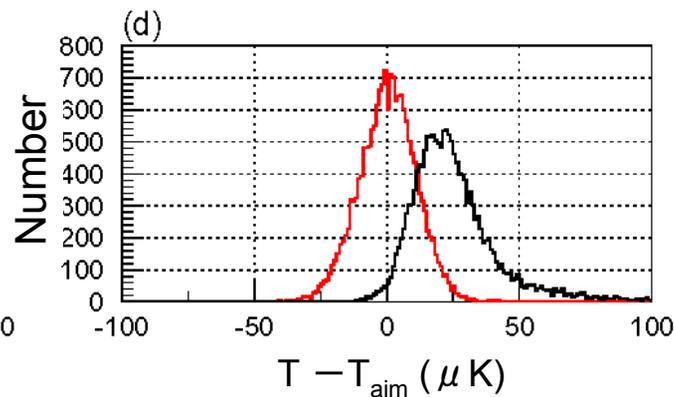
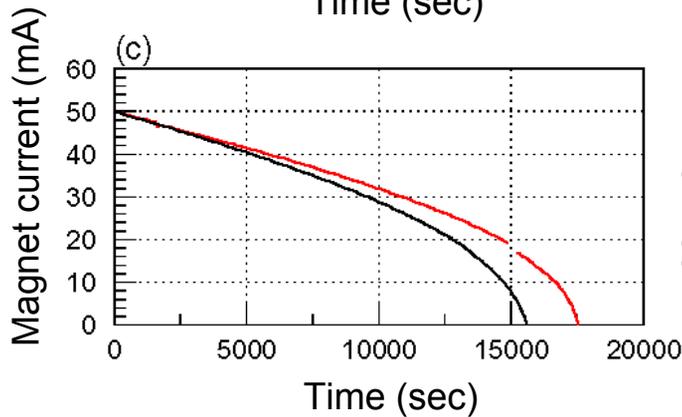
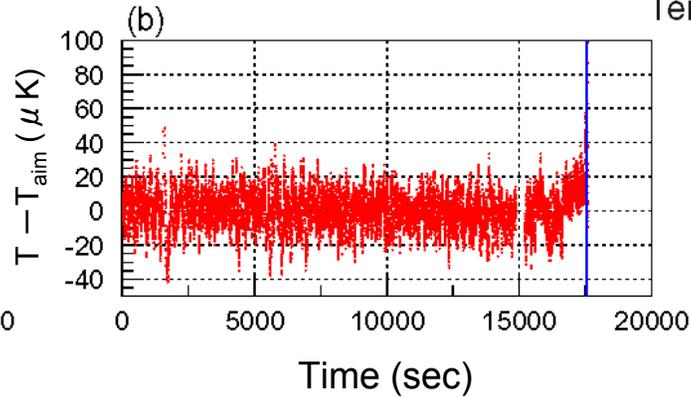
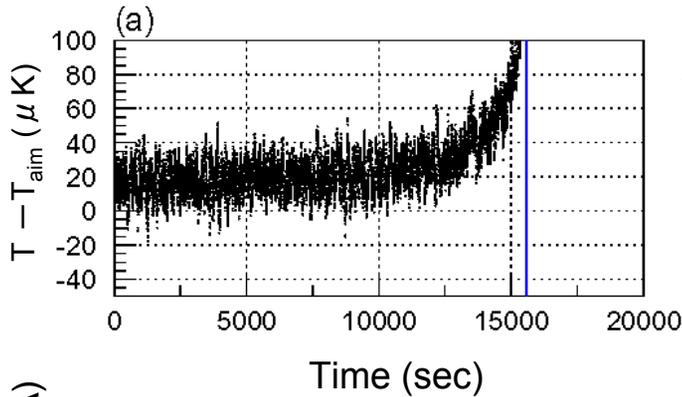
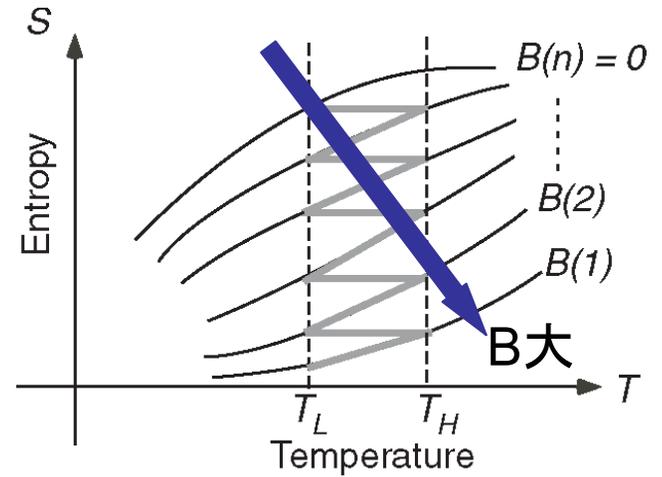
超伝導
マグネット

saltpill

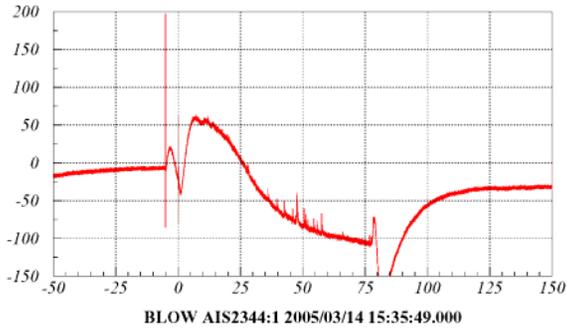
$$\overline{w_{in}(t)} = T \delta S$$

温度制御 制御結果

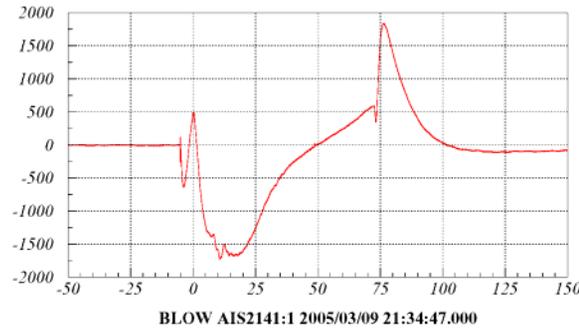
通常のPID
改良型PID



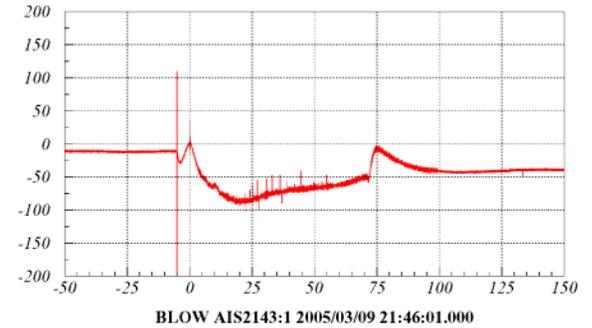
11. 誘導電流の検知箇所



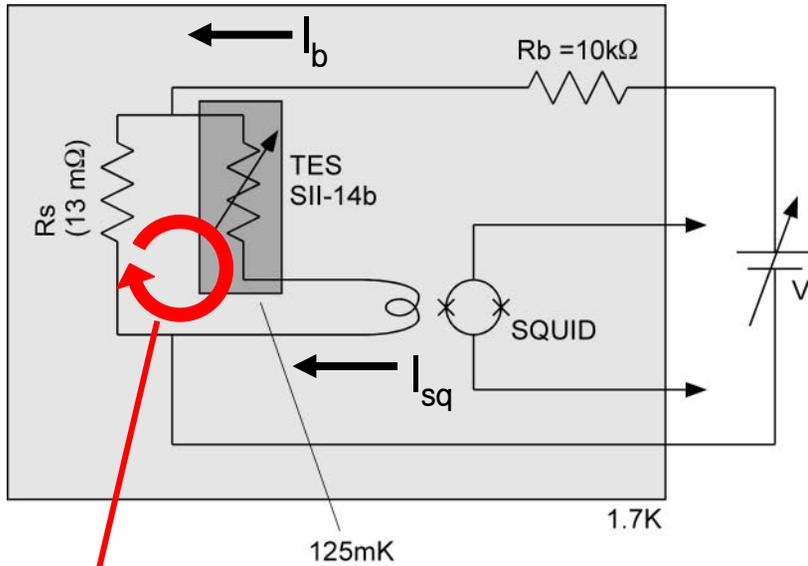
X線検出時(動作点)



素子(TES)が超伝導のとき

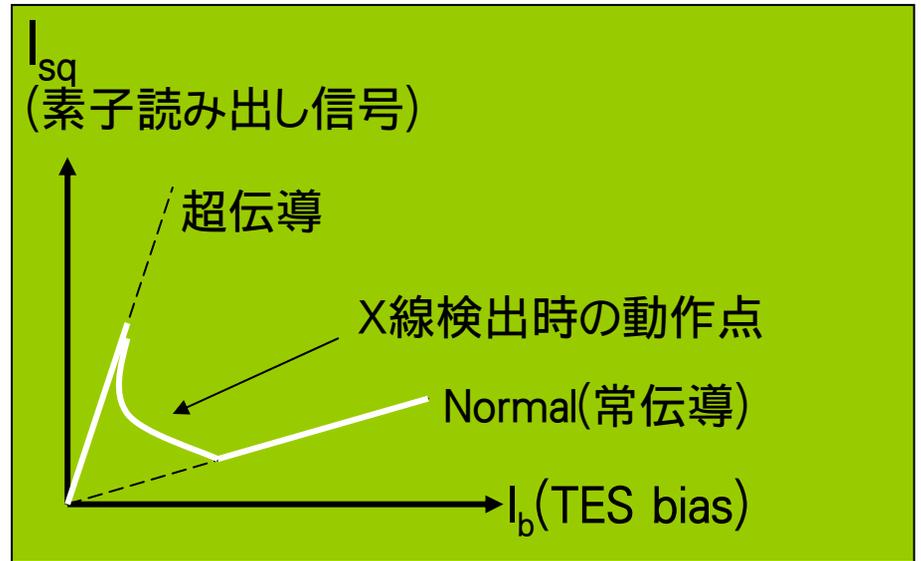


素子がnormal
(常伝導)のとき



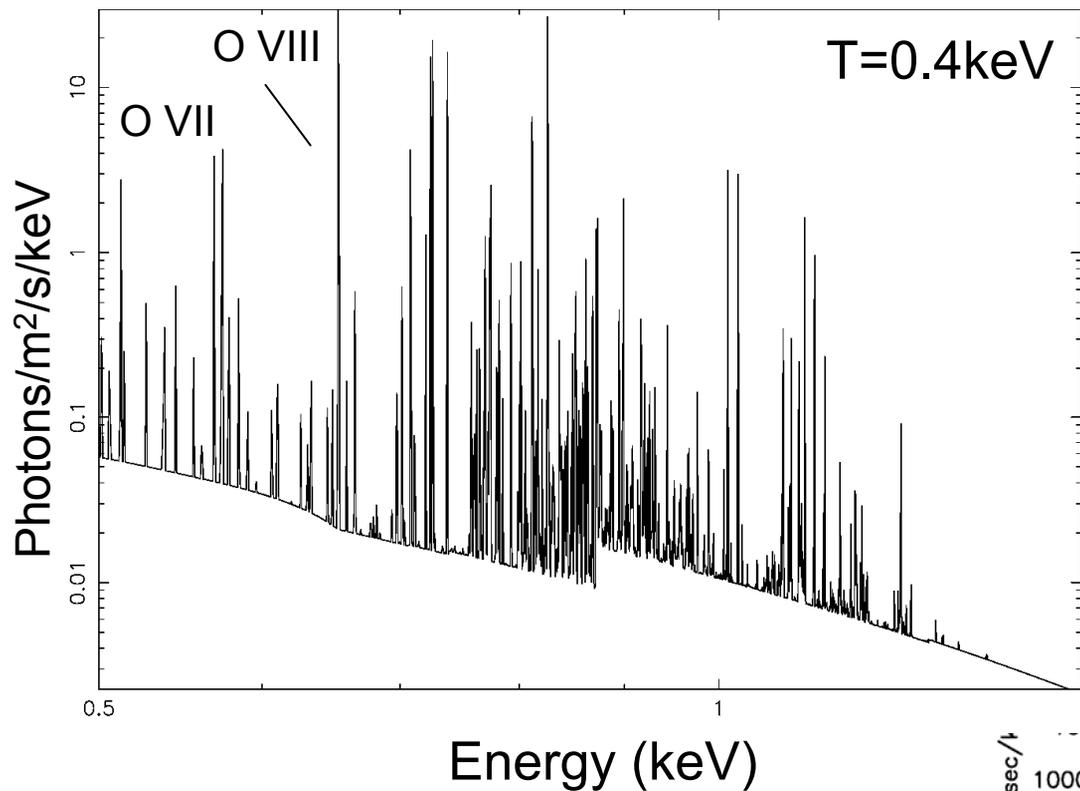
誘導電流

・ カロリメータ
動作回路図

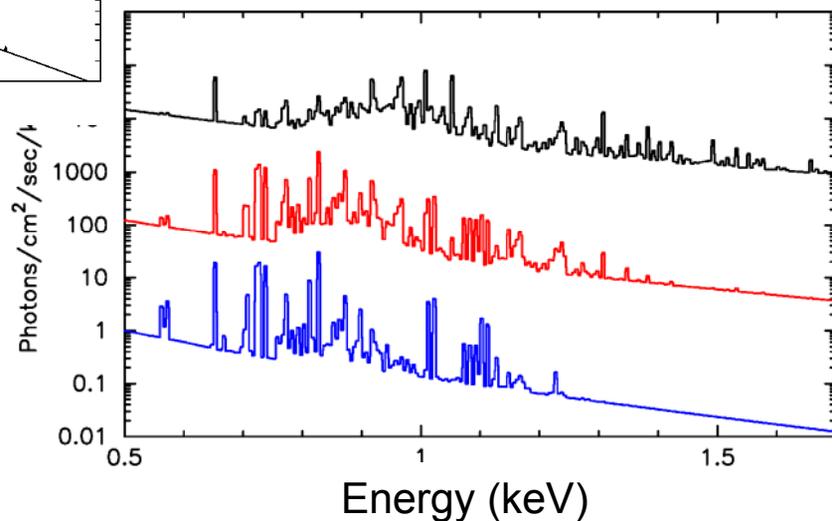


SPEXを用いたスペクトルモデル

Feの存在比 1×10^{-5} , Oの存在比 1×10^{-4}



1.0 keV
0.6 keV
0.4 keV



TPE-RXにおけるプラズマ計測系

● 電子温度 --- トムソン散乱計測装置

自由電子による光散乱

電子の運動によって散乱光波長が変化

波長分布を測定

小半径中心の一点計測

● 電子密度 --- 干渉計

レーザーの見かけ上の光路長の変化で

密度を測定

レーザーの通り道の線平均密度計測

● イオン温度 --- 中性粒子エネルギー分析器

荷電交換による高速中性粒子のエネルギーを測定

検出されるエネルギー分布がプラズマイオンの

エネルギー分布を反映

小半径中心部分にしぼって計測

● その他 --- bolometer, VUV検出器など

