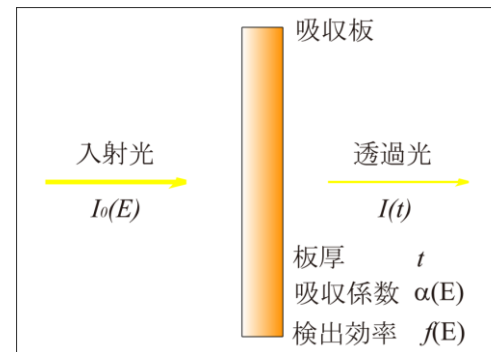
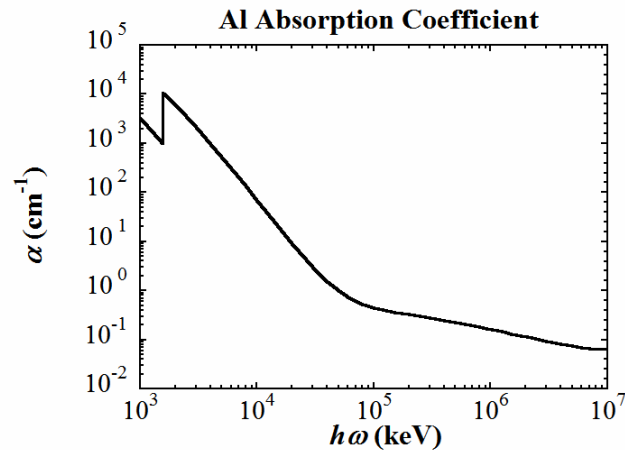


# 物質の吸収係数のエネルギー依存性を利用した 高計数率X線スペクトルイメージング測定法の基礎研究

核融合科学研究所・武藤貞嗣



- I. プラズマ物理学に於けるX線測定 of 役割と課題
- II. 吸収係数を利用するスペクトル測定 of 基礎研究

H.24.11.05 東大

# I. プラズマ物理学に於けるX線測定 of 役割と課題

## 0. 核融合科学研究所

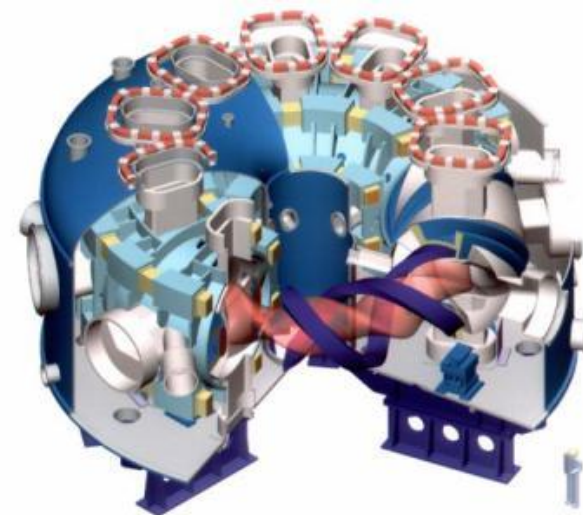


岐阜県 土岐市  
名古屋から中央本線快速約45分。

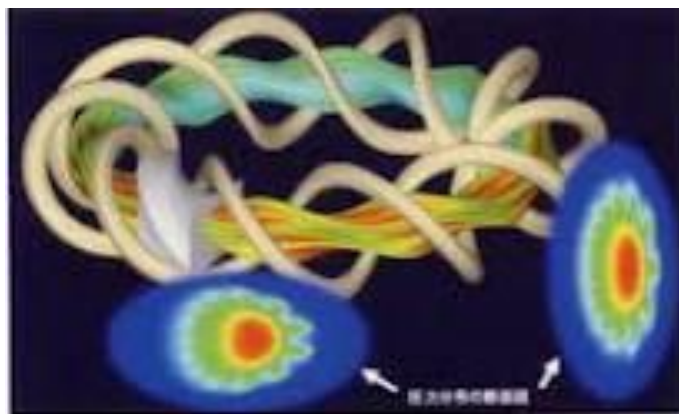
研究教育職員：126  
技術職員：45  
事務職員：42  
総研大在学生：17  
(5月入学者説明会)



核融合科学研究所  
大型ヘリカル実験棟



大型ヘリカル装置  
(LHD : Large Helical Device)



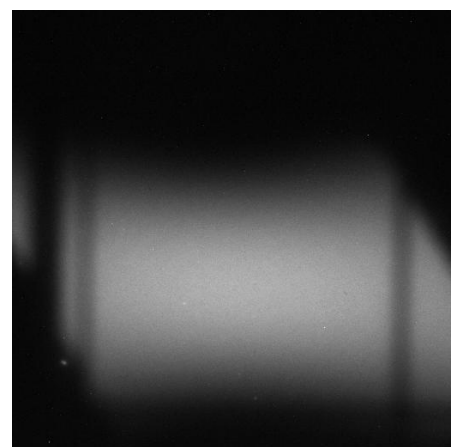
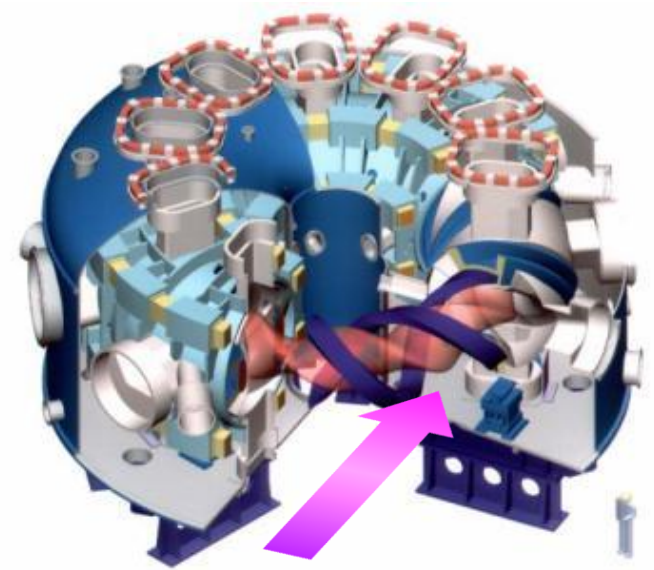
研究目的：プラズマ閉じ込め。

温度：1 keV order  
密度： $10^{19} \text{ m}^{-3}$  order  
体積：30  $\text{m}^3$   
磁場：3 T



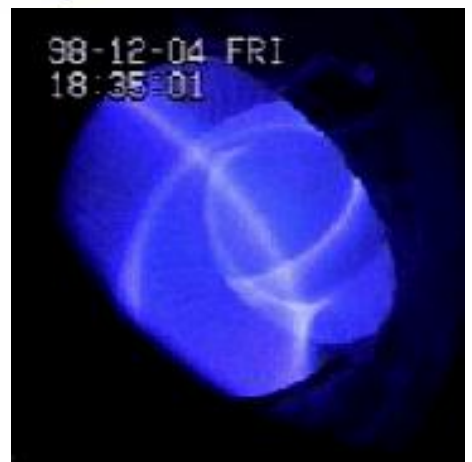
# I. プラズマ物理学に於けるX線測定 of 役割と課題

## 2. LHDプラズマを見る

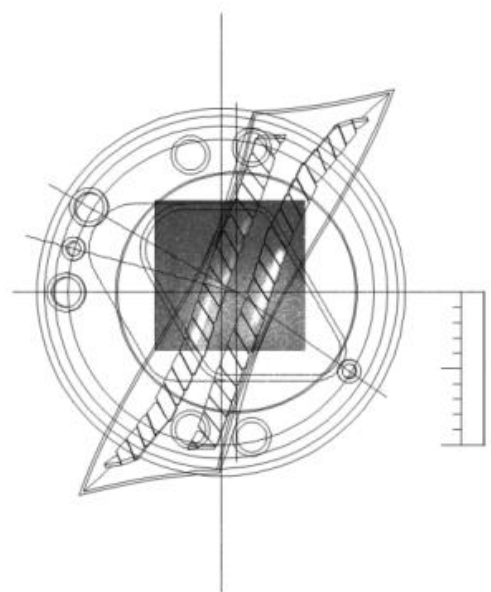


1 m

硬X線カメラの画像



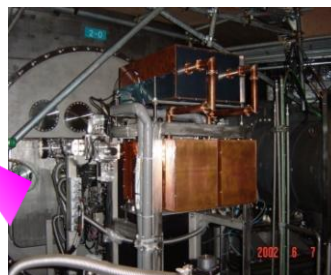
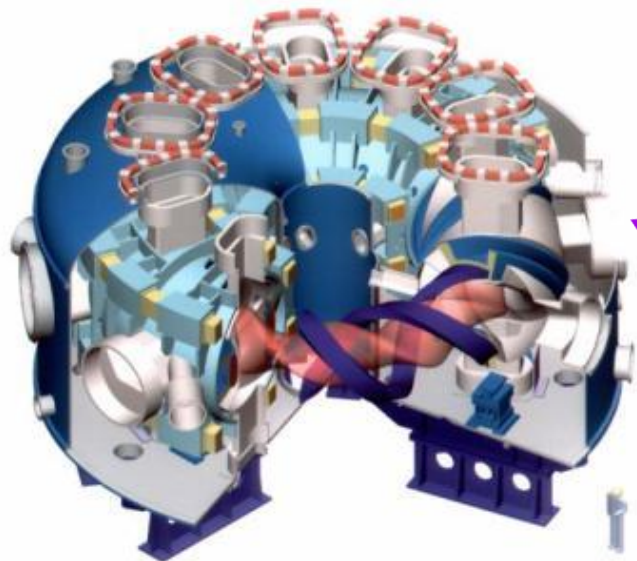
プラズマの映像 (可視光)



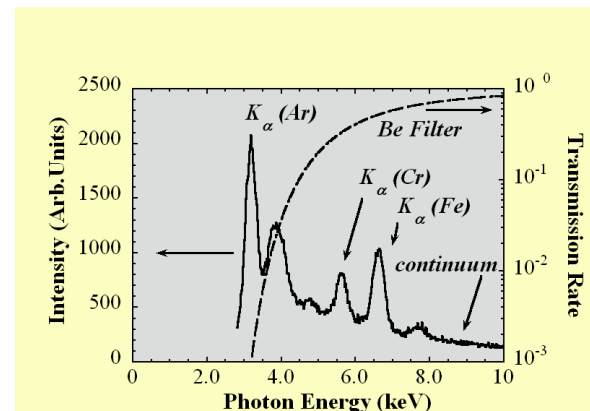
1 m

# I. プラズマ物理学に於けるX線測定 of 役割と課題

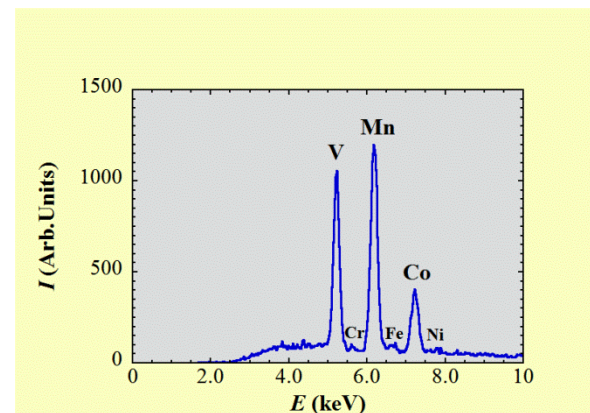
## 3. 大型ヘリカル装置に於けるX線スペクトル計測



水平ポート据付  
パルス波高分析器



1 keVから10 keVまでのX線スペクトル

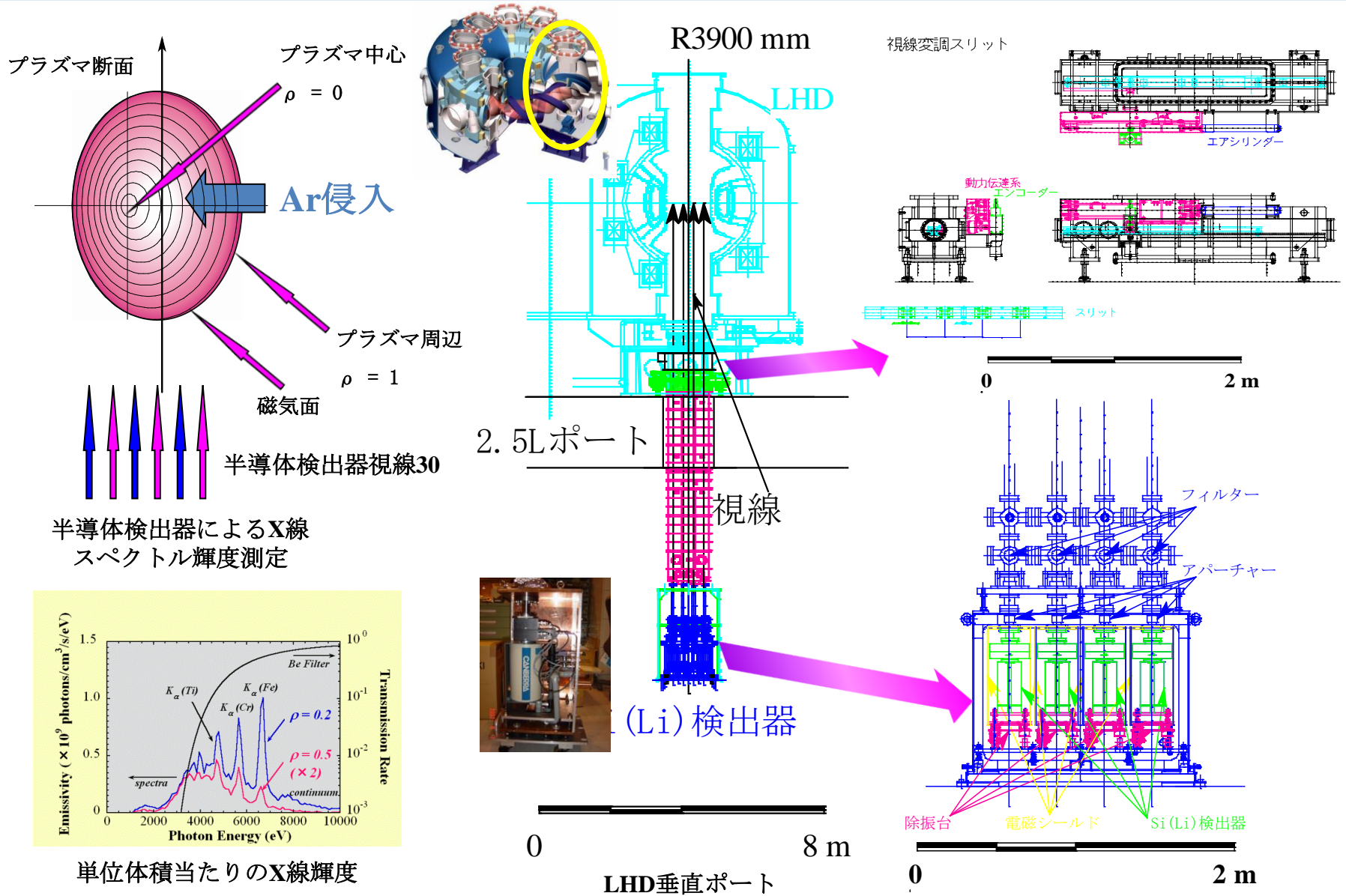


固体ペレット入射によるV、Mn、Co  
特性X線測定実験

元素を識別するためスペクトルを測定したい。

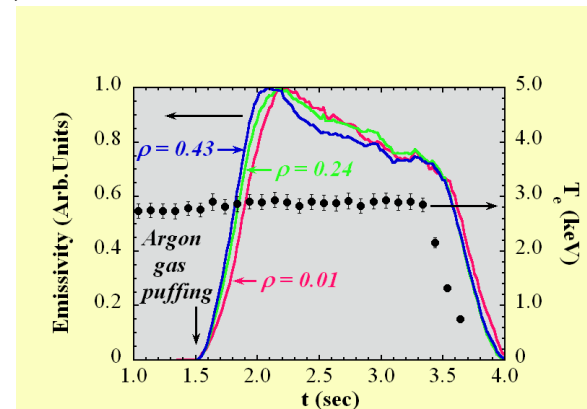
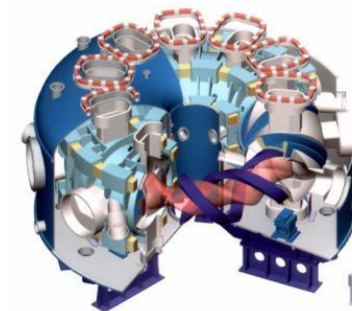
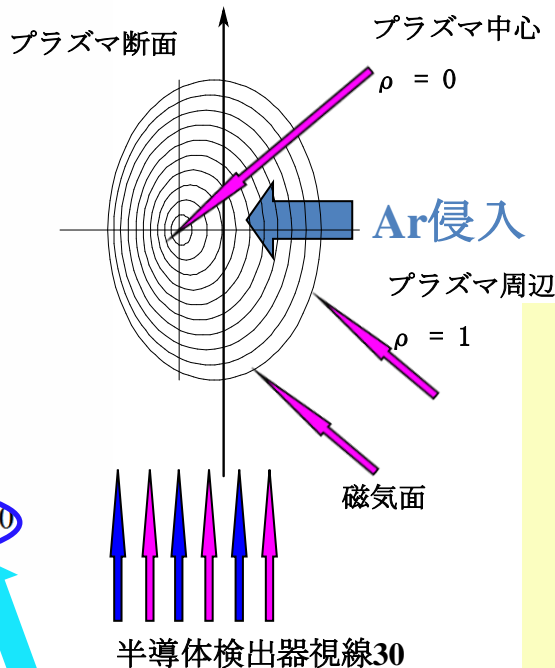
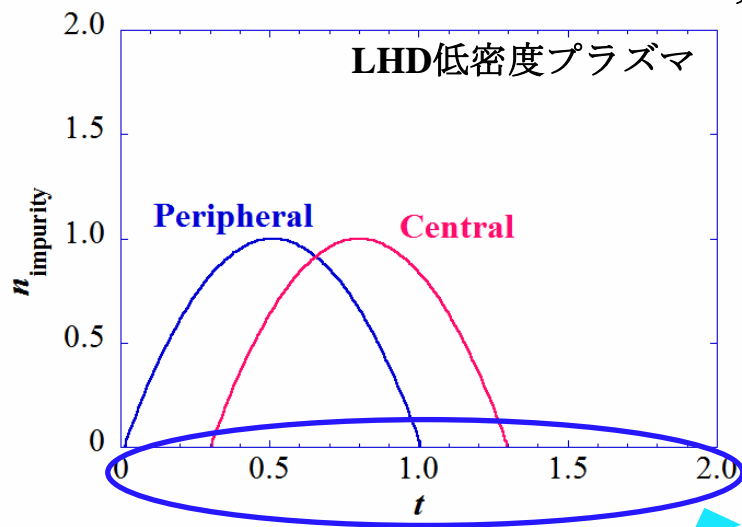
# I. プラズマ物理学に於けるX線測定 of 役割と課題

## 4. 大型ヘリカル装置に於けるX線スペクトル輝度計測



# I. プラズマ物理学に於けるX線測定の実験と課題

## 5. X線スペクトル計測の従来の目的



### 輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) = \nabla \cdot \vec{\Gamma}(\vec{r}, t) + s(\vec{r}, t)$$

密度

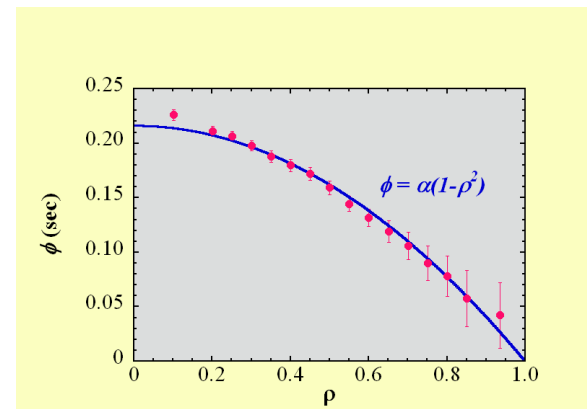
流れ

粒子源

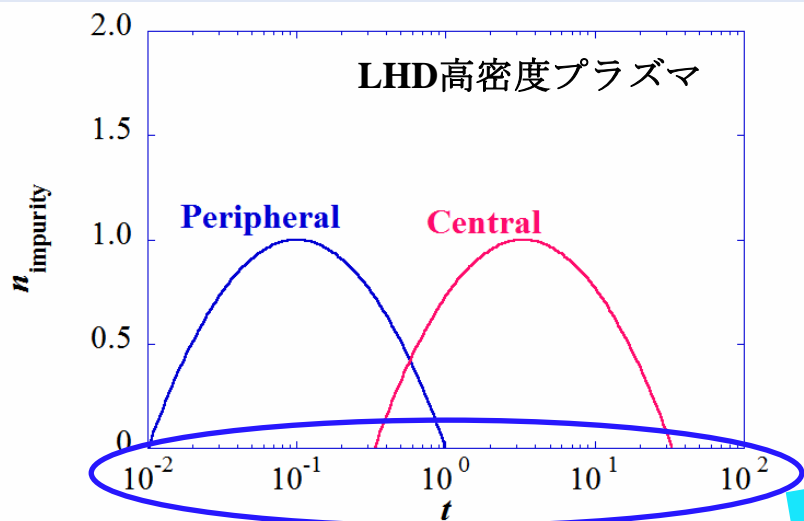
この演算子は時間軸がリニアスケールであること教える。

輸送計測 (質量保存則適合型輸送)

- ① 拡散係数の径分布
- ② 対流速度の径分布



# 6. X線スペクトル計測による最近の実験結果



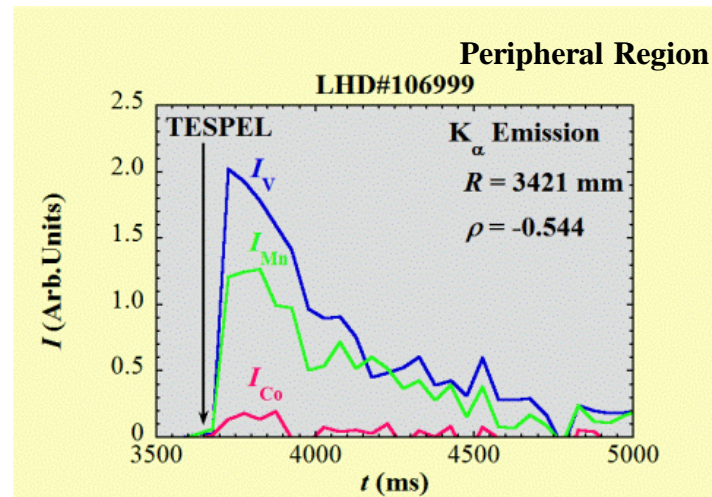
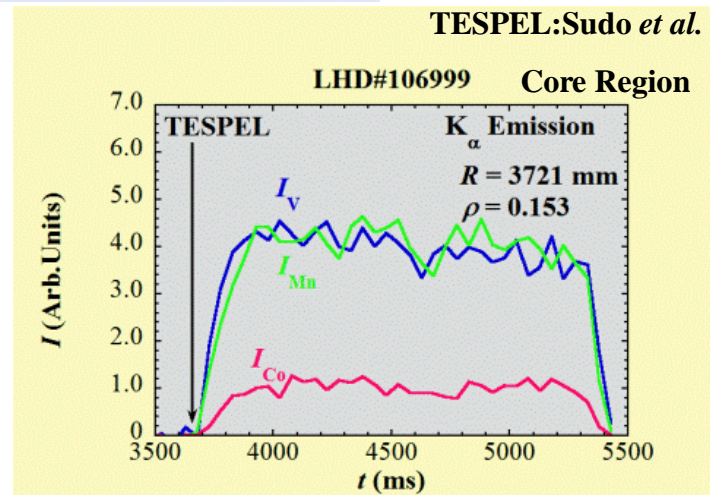
$$t \frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) = \hat{f}(\vec{r}, \nabla) \cdot \vec{\Gamma}(\vec{r}, t) + s(\vec{r}, t)$$

時間スケールの微分から輸送方程式のこの部分が求まる。

## 非リニアスケールの発見

プラズマ中心に近いほど不純物閉じ込め時間が長い。  
時間の演算子が従来の輸送方程式とは異なる。

従来の輸送方程式では理解できない現象。



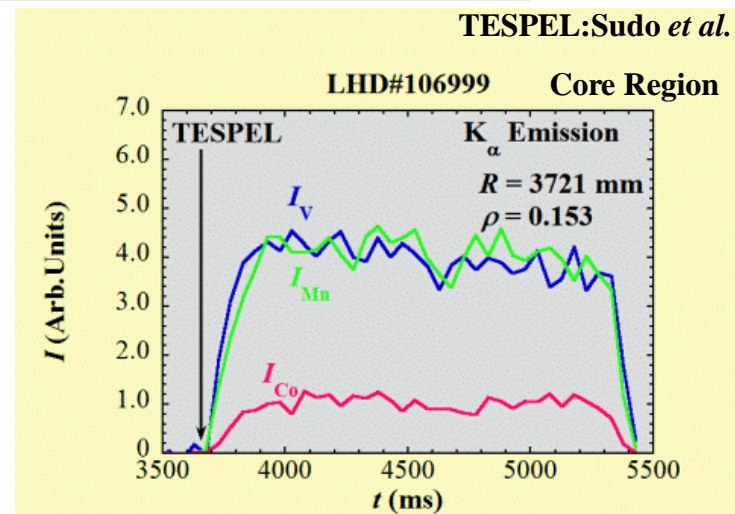
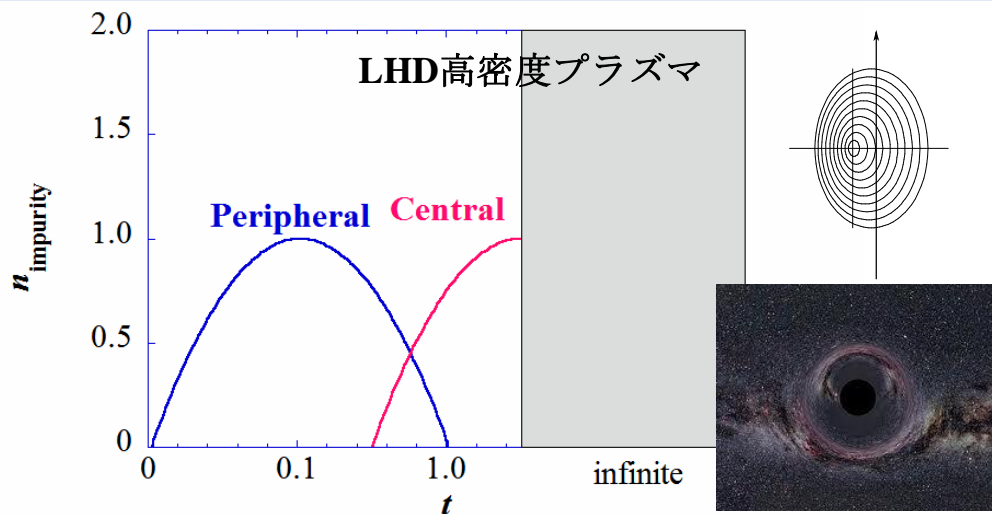
## 急務の課題

密度を放電毎に変えることが必要。放電1回で輸送を測定したい。視線数を増やす。



# I. プラズマ物理学に於けるX線測定 of 役割と課題

## 7. 最も興味深い重要な可能性<<輸送の地平線>>



一般化輸送方程式<< $g(t) \neq 1$ >>

$$g(t) \frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) = \hat{f}(\vec{r}, \nabla) \cdot \vec{\Gamma}(\vec{r}, t) + s(\vec{r}, t)$$

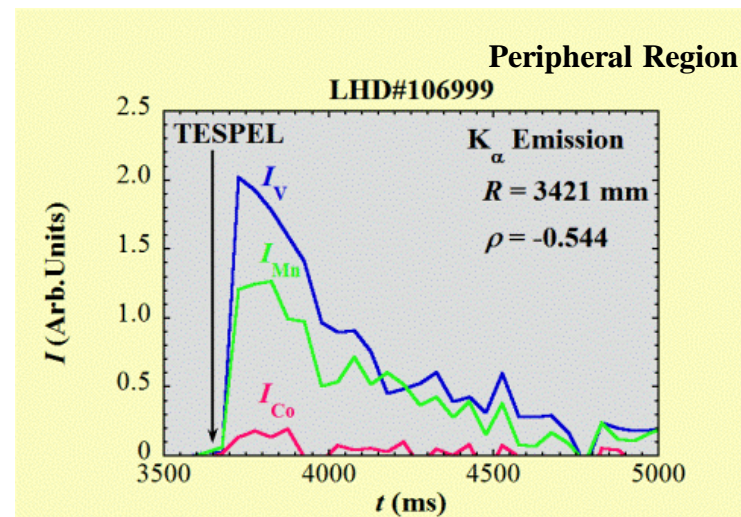
$$\frac{\partial}{\partial s} n(\vec{q}, s) = \nabla \cdot \vec{\Gamma}(\vec{q}, s) + s(\vec{q}, s)$$

$(\mathbf{r}, t) \leftrightarrow (\mathbf{q}, s)$   
輸送方程式を不変にする時空変換があるかも知れない。

特徴 (学術的に重要な発見)

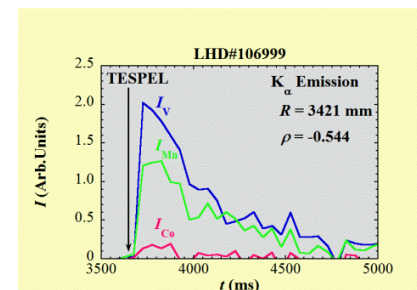
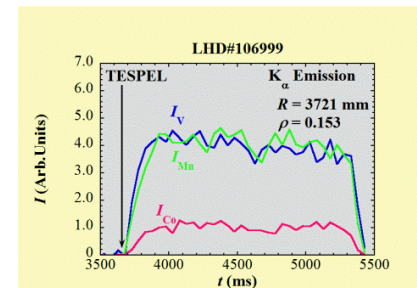
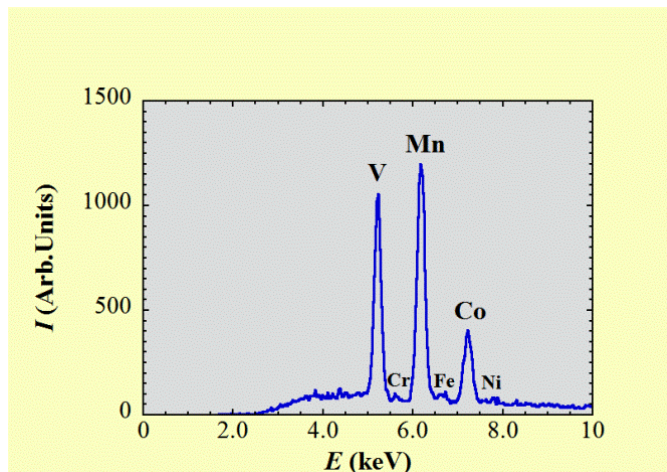
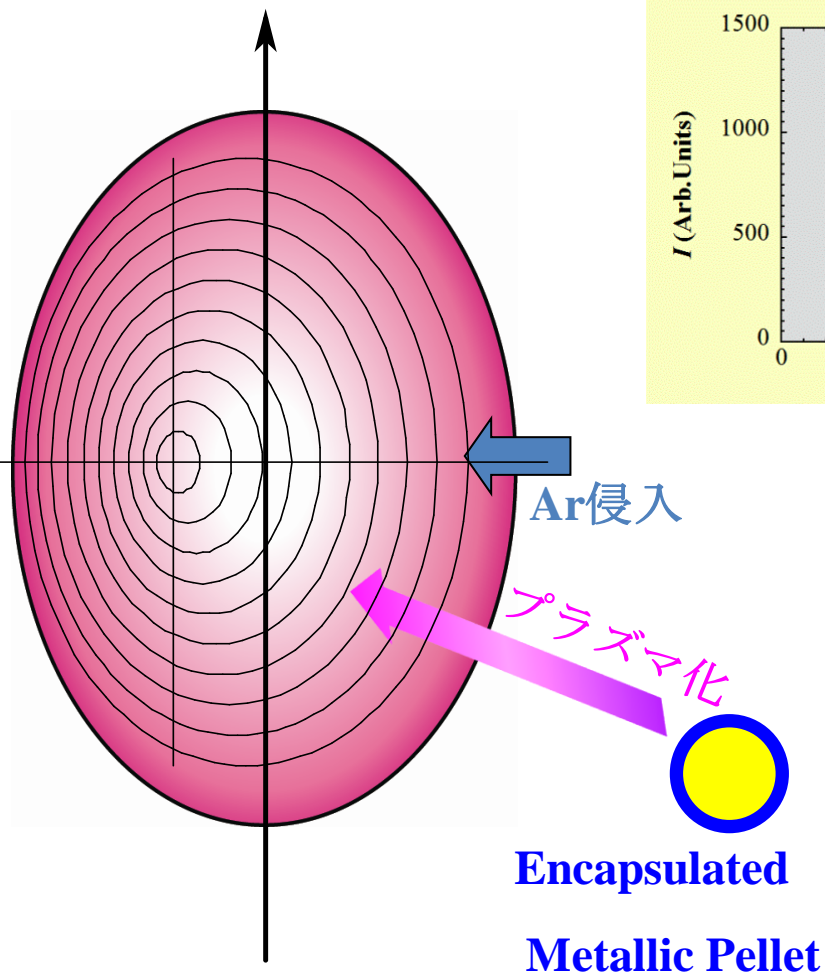
不純物輸送に地平線が存在する場合、その地平線を越えた領域に一度入った不純物は二度と出てこられない。

輸送方程式で追えるのは地平線まで。地平線を越えた領域は測定実験の独壇場となる。測定器を整備すべき。



# I. プラズマ物理学に於けるX線測定 of 役割と課題

## 8. 最新の実験結果



### 輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) = \nabla \cdot \vec{\Gamma}(\vec{r}, t) + s(\vec{r}, t)$$

### LHD高密度プラズマ

$$t \frac{\partial}{\partial t} n(\vec{r}, t) = \hat{f}(\vec{r}, \nabla) \cdot \vec{\Gamma}(\vec{r}, t) + s(\vec{r}, t)$$

## 8. まとめ<<プラズマ物理学に於けるX線スペクトル測定 of 必要性>>

### 1. X線計測器開発 of 目的

- ①輸送に地平線が存在すれば明らかにできる。
- ②輸送に関わる時空の歪みを定量的に解析する。

### 2. 計測器に必要 of 性能

- ①X線領域で時間、空間、エネルギー分解能同時両立。  
<<10 ms、30本（視線数）、250 eV>>
- ②SN比の良好なスペクトルが測定できる。  
<<輝度が高いほどSN比が良くなる。>>
- ③中性子が発生する重水素実験にも対応できる。  
<<中性子をカウントしない検出器の開発はできないか。>>
- ④冷却ではなく常温でエネルギー分解能を得たい。

## 8. 補足<<現行半導体X線検出器 of 中性子脆弱性と実行中の重水素実験対応策>>

### I. 中性子脆弱性

#### 1. n型半導体 of 中性子照射によるp型化。

(Neutron Flux  $10^9$  N/cm<sup>2</sup>/s 10秒放電 100 shot PHAは、初日で故障。)

#### 2. 液体窒素冷却器保守点検作業毎日必要。

### II. 重水素実験対応策<<新鋭機開発>>

#### 1. Silicon on Insulator (p-type LHD customized)

性能目標：エネルギー分解能PHA程度、1 frame/1 ms、128×128 pixels、  
耐中性子性能3桁向上

予算：LHD計画共同研究 (H.24 - 26) KEK Prof. ARAI

#### 2. 自己開発

予算：科研費 基盤研究C (H.23 -25)、自然科学研究機構イメージングサイエンス

## <<本題>>

# 物質の吸収係数のエネルギー依存性を利用した 高計数率X線スペクトルイメージング測定法の基礎研究

### 1. 科研費 基盤研究 (C) (H.23 - 25)

プラズマ計測のためのエックス線検出器の高計数率化とノイズ耐性強化の研究

### 2. 自然科学研究機構 イメージングサイエンスプロジェクト

X線スペクトル動画測定用高速イメージング技術の開発

## 0. 概要

### 1. 動作原理と特徴

### 2. 開発状況と今後の予定

### 3. まとめ

# 0. 概要

## 1. 開発目的

- ① X線領域でのエネルギー、時間、空間分解能両立。偏光弁別も可能。
- ② X線のみを選択的に測定する。<<中性子を数えない>>
- ③ 計数率無限化。
- ④ 室温でPHAと同程度のエネルギー分解能を得たい。
- ⑤ 現場保守作業不要。

## 2. 性能目標<<初期目標>>

- ① 時間分解能：10 ms
- ② 素子数：linear array 30 pixels
- ③ エネルギー分解能：PHAと同程度

## 3. 準備状況と現状

- ① 試験機完成。
- ② 校正実験（核融合研特性X線源）
- ③ スペクトル解析ソフトはPCベースでは既に完成。汎用FFT導入へ。

## 4. 今後の予定

- ① データ収集システムを含めた立上。
- ② エネルギー分解能評価試験1月開始。  
<<KEK・PF BL-14C (6 – 30 keV) >>
- ③ 高速検出器の紹介、VDECで作成できないか。 (*Open IT*)

# 1. 動作原理と特徴

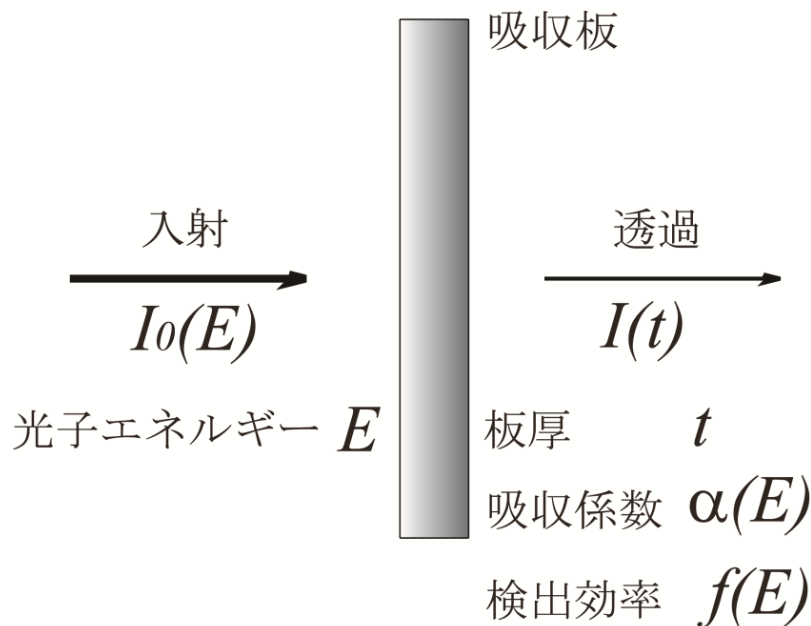
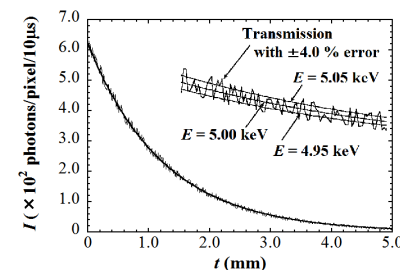
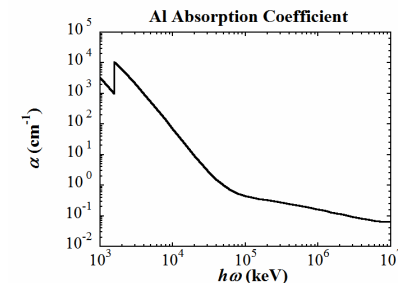
## 1. 動作原理の内訳

### ① 物理学的原理

物質の吸収係数のエネルギー依存性

### ② 数学的原理

Mellin変換によるスペクトル解析。



### 単色光の透過光強度

$$I(t) = I_0(E) f(E) e^{-\alpha(E)t} \quad \text{式 (1)}$$

### 任意のスペクトルの透過光強度

$$I(t) = \int_0^{\infty} dE I_0(E) f(E) e^{-\alpha(E)t} \quad \text{式 (2)}$$

# 1. 動作原理と特徴

## 2. 何を測定するのか

式 (2) の数学的厳密解

$$I_0(E) = -\frac{1}{2\pi i f(E)} \beta(E) \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} ds \frac{g(s)}{G(s)} \quad \text{式 (3)}$$

$$\therefore \beta(E) \equiv \frac{d}{dE} \ln \alpha(E)$$

$$\therefore g(s) \equiv \int_0^{\infty} dt I(t) t^{s-1}$$

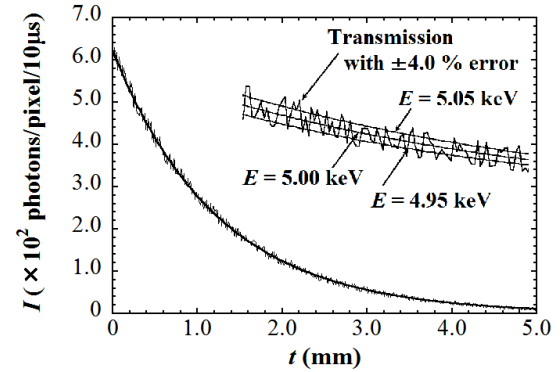
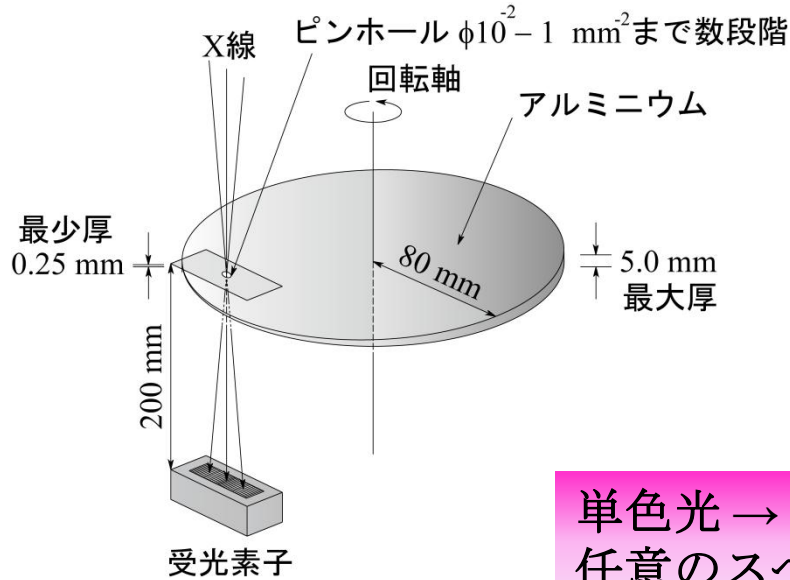
吸収体の厚さを連続的に変えて透過光強度を測定すれば良い。

$$\therefore G(s) \equiv \alpha(E)^{-s} \Gamma(s) = \int_0^{\infty} dt e^{-\alpha(E)t} t^{s-1}$$

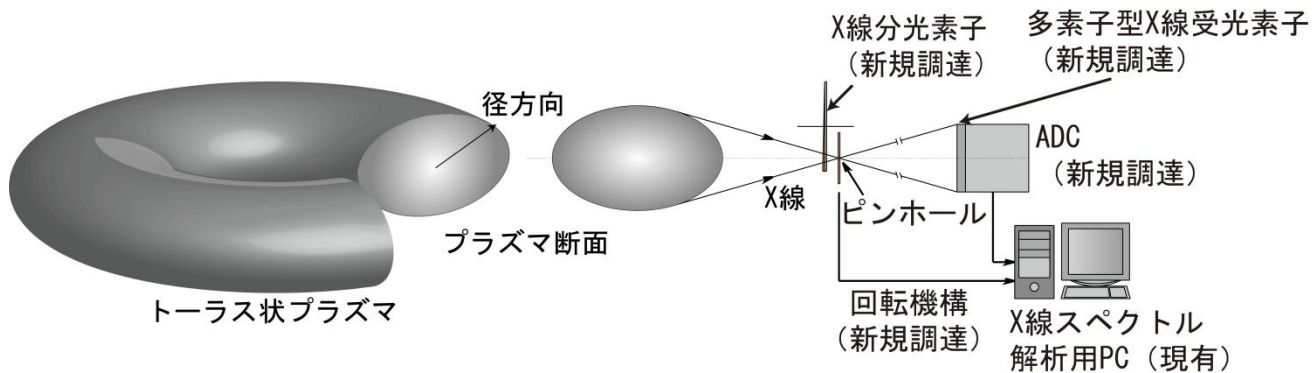


# 1. 動作原理と特徴

## 3. 光学系<<ピンホールカメラの原理>>



単色光 → 指数関数に変換  
任意のスペクトル → 指数関数の重ね合わせに変換



# 1. 動作原理と特徴

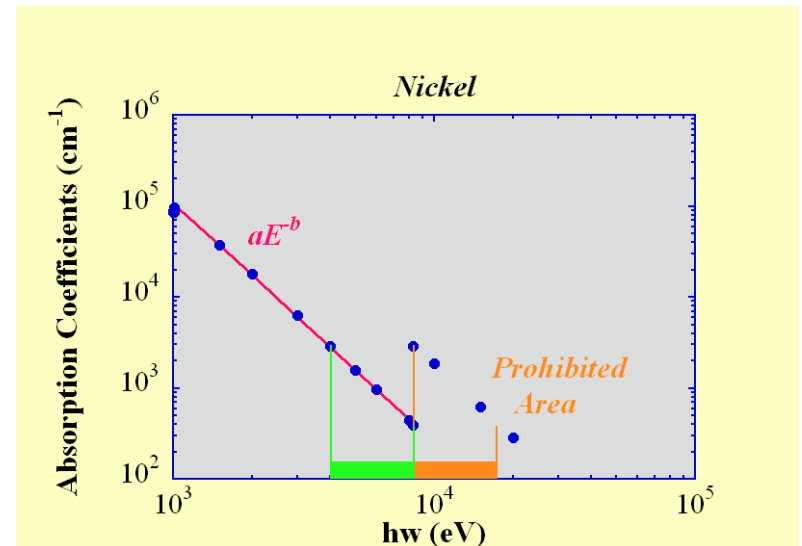
## 4. 理論的エネルギー分解能

$$I_0(E) = -\frac{1}{2\pi i f(E)} \beta(E) \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} ds \frac{g(s)}{G(s)}$$

$$I_0(E) = \delta(E - E_0) \quad \text{式 (5)}$$

$$I_0(E) = \delta(X) \frac{dX}{dE} \quad \text{式 (6)}$$

$$(\because X \equiv \ln \alpha(E) - \ln \alpha(E_0))$$



但し、吸収スペクトルが単調に変化していることが条件。

# 1. 動作原理と特徴

## 5. 数値演算のテクニックと エネルギー分解能の評価

### 数学的厳密解

$$I_0(E) = -\frac{1}{2\pi i f(E)} \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} ds \frac{g(s)}{G(s)}$$

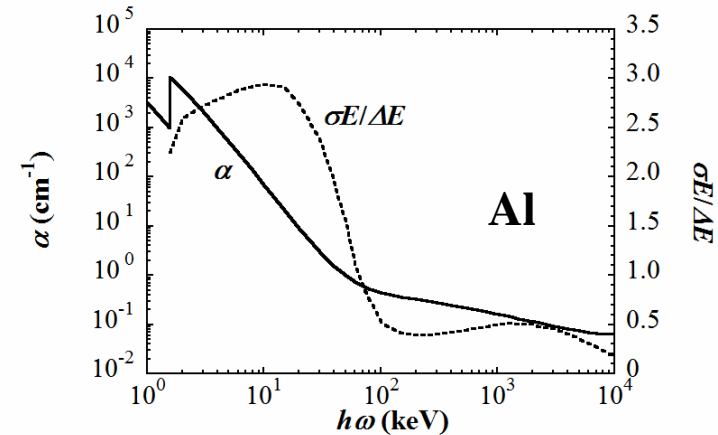
### 解析用実用式（非厳密解）

$$I_0(E) = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \left[ -\frac{1}{2\pi i f(E)} \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} ds e^{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 (s-c)^2} \frac{g(s)}{G(s)} \right] \quad \text{式 (7)}$$

被積分関数にガウス関数をかける。

積分領域を無限から有限幅へ。

ガウス関数の幅 $2\sigma^{-1}$ は、計算機の演算桁数と測定誤差に相当。



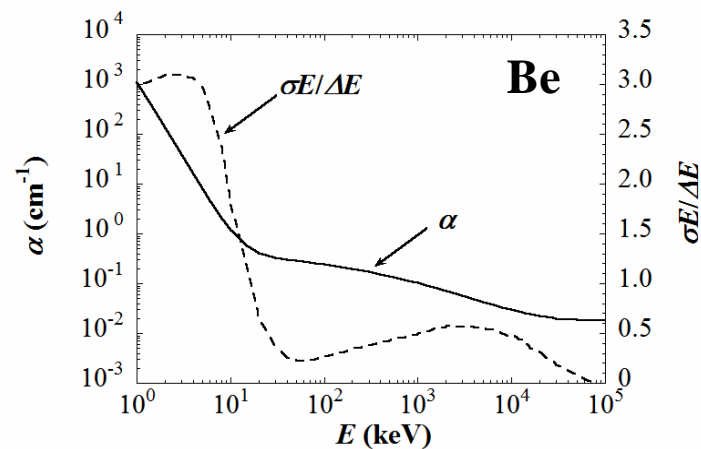
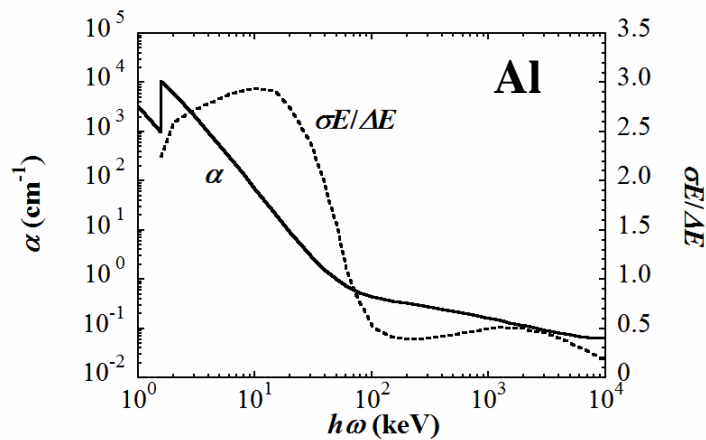
$$\sigma \frac{E}{\Delta E} \approx E \left| \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \right| \quad \text{式 (8)}$$

演算桁数が大きいほど測定誤差が小さいほどエネルギー分解能は限界無く良くなる。

# 1. 動作原理と特徴

## 6. 測定範囲とエネルギー分解能

吸収係数で決まる測定範囲とエネルギー分解能



$$\sigma \frac{E}{\Delta E} \approx E \left| \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \right| \quad \text{式 (8)}$$

基本的に測定範囲とエネルギー分解能は吸収係数のみで決まる。  
物質のバルク成分比と密度で決まる。表面状態、結晶状態に依存しない。  
液体、気体も使用可能。強制冷却不要。蒸着、切削加工で製作できる。

## 2. 開発状況と今後の予定

### 1. 試験器の仕様

- ① 超高真空槽内封入アルミニウム吸収体（測定範囲：6.0 – 30 keV）
- ② モーター回転数（最高時間分解能：3 ms/spectrum）
- ③ 受光素子として線形30素子は確保したい。（耐中性子p型半導体）

### 2. 今後の予定

- ① 1月からKEK・PF BL-14C（6.0 – 30 keV）でエネルギー分解能検証。
- ② 高速検出器（検出素子、高速収集回路）を探す。
- ③ FFT用汎用DSP

## 3. まとめ

1. エネルギー分解能は受光光子数の対数に比例する。
2. 計数率上限なし。
3. 強制冷却不要。保守不要の可能性。蒸着・切削可能。

### 今後の予定

1. 実験を開始する。
2. 高速2次元検出器を探す。
3. 汎用FFTをこれから勉強する。

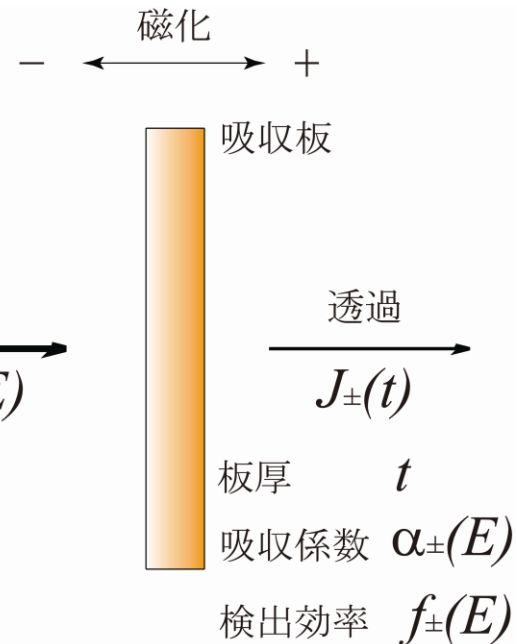
# 付録. 偏光弁別

$$J_{\pm}(t) = \int_0^{\infty} dE I_{+}(E) f_{+}(E) e^{-\alpha_{\pm}(E)t} + \int_0^{\infty} dE I_{-}(E) f_{-}(E) e^{-\alpha_{\mp}(E)t} \quad \text{式 (9)}$$

$$I_{\pm}(E) = -\frac{1}{4\pi i f_{\pm}(E)} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} ds \left[ \frac{g_{+}(s) + g_{-}(s)}{G_{+}(s) + G_{-}(s)} \pm \frac{g_{+}(s) - g_{-}(s)}{G_{+}(s) - G_{-}(s)} \right]$$

$$\because g_{\pm}(s) \equiv \int_0^{\infty} dt J_{\pm}(t) t^{s-1}$$

$$\because G_{\pm}^{-1}(s) \equiv \alpha_{\pm}^s(E) \Gamma^{-1}(s) \frac{d}{dE} \ln \alpha_{\pm}(E) \xrightarrow[\text{入射 } I_{\pm}(E)]{\text{透過 } J_{\pm}(t)}$$



# I. 動作原理と特徴

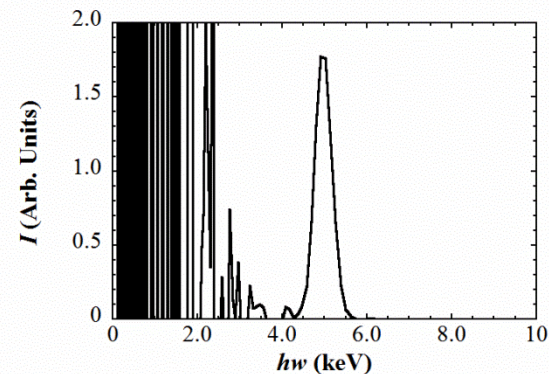
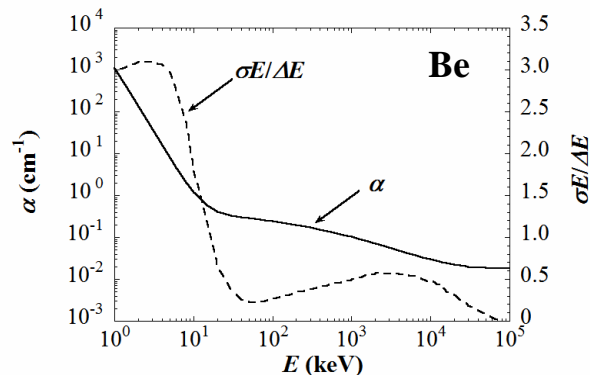
## 8. 経験上の習得II

### エネルギー分解能と測定誤差

$$I_0(E) = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \left[ -\frac{1}{2\pi i f(E)} \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} ds e^{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 (s-c)^2} \frac{g(s)}{G(s)} \right] \quad \text{式 (7)}$$

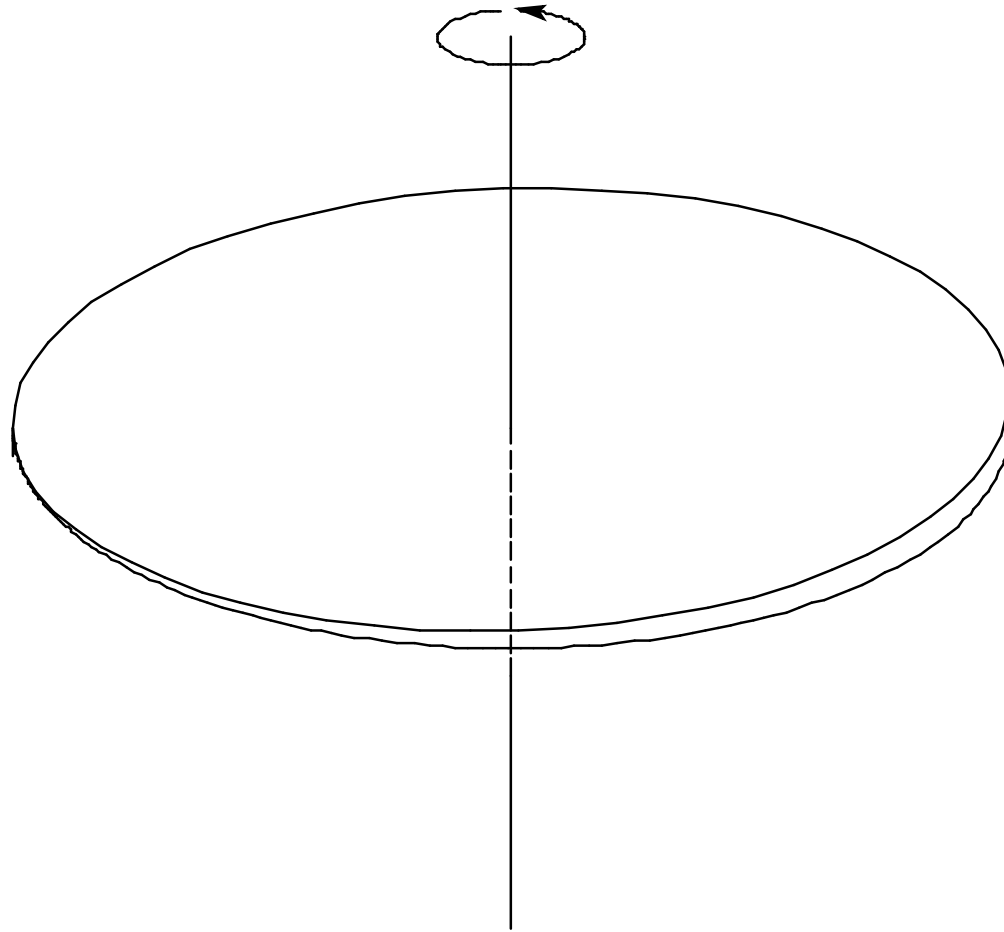
$$\sigma \frac{E}{\Delta E} \approx E \left| \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \right| \quad \text{式 (8)}$$

$2\sigma^{-1} =$  (誤差が現れる桁)  
(受光光子数の対数に比例)





## 付録. 斜め切り半導体基盤



斜め切りのSiウエフアーに画素を形成できないか。

# I. 動作原理と特徴

## 7. 経験上の習得I

### エネルギー分解能と測定誤差

$$I_0(E) = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \left[ -\frac{1}{2\pi i f(E)} \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} ds e^{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 (s-c)^2} \frac{g(s)}{G(s)} \right] \quad \text{式 (7)}$$

$$\sigma \frac{E}{\Delta E} \approx E \left| \frac{d}{dE} \ln \alpha(E) \right| \quad \text{式 (8)}$$

$2\sigma^{-1} =$  (誤差が現れる桁)  
(受光光子数の対数に比例)

