



# 原子過程を使った ニュートリノ質量分光

京都大学・理学研究科・物理  
笹尾 登

SPAN group  
(吉村、中野、南條、福見、中嶋)



# 内容

---

- 物理の目的・意義
- マクロ・コヒーランス増幅機構とは？
  - 超放射現象の理論と現状
- 二光子および一光子＋ニュートリノ対超放射
  - 新しい原理・手法によるニュートリノ分光の提案
- 具体的準備状況
  - Rb よりのカスケード超放射
  - Xe in Ne マトリック
- まとめと展望



## 物理の目的・意義

---

- ニュートリノ物理の現状・課題
- 原子を利用したニュートリノ質量分光へ  
(SPAN=**S**pectroscopy by **A**tom**N**eutrino)

# ニュートリノ物理の現状

## ■ 振動実験

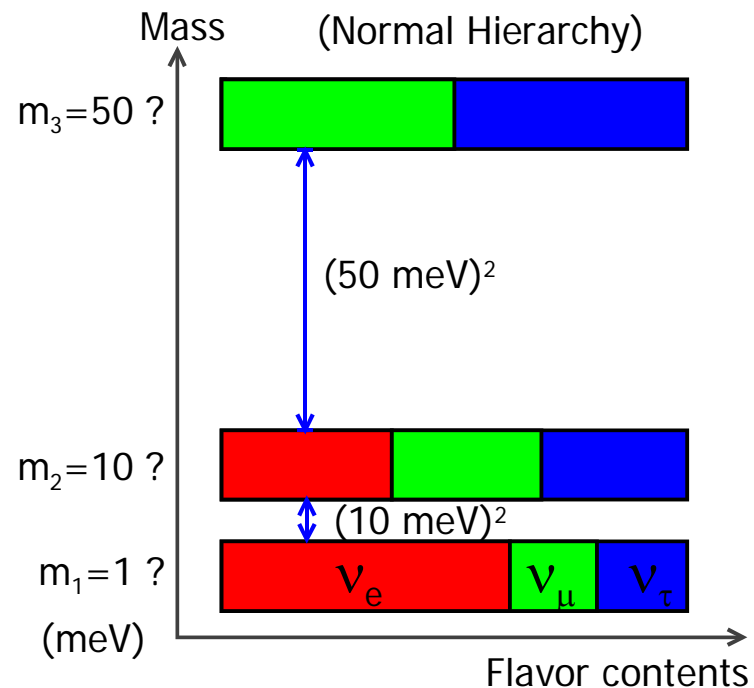
- 有限の質量を持つ。
- Flavor 固有状態と質量固有状態は異なり、互いに混合している。
- 質量(二乗差)は、他の荷電レプトン(の二乗)に比較し、極端に小さい。

## ■ 他の実験・宇宙論

- 絶対質量も小さい。(m < 1 eV)



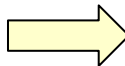
如何なる実験がニュートリノ物理が提起する課題に答えを提示しうるか？





# ニュートリノ物理の課題

- Majorana vs Dirac?
  - 中性フェルミオンはディラック方程式に従うか、マヨラナ方程式に従うか?
- 質量絶対値とヒエラルキー
  - シーソー機構により小さな質量値を理解できるか?
- 混合角と位相
  - 大統一理論構築に向けた大きなステップになりうるか?
  - レプトン数保存を破り、宇宙の物質・反物質不均衡に関わるか?



我々は、こうした課題に新しい原理・手法、「原子過程を用いたニュートリノ質量分光」をもって答えたい。

# 原子を利用したニュートリノ質量分光 —その長所と短所—

## ■ 長所

- 原子状態エネルギー準位が多様 ( $\mu\text{eV}$ — $\text{eV}$ )である。
  - 目標とするエネルギースケールに一致
- ニュートリノ対は電子と結合
  - 全ての質量( $m_1, m_2, m_3$ )及び混合角が関与
  - マヨナラ vs ディラックの区別
    - 同種粒子効果によるスペクトルの変形

$$\Delta E = 13.6 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \text{eV}$$

時間が許せば説明する

Yoshimura hep-ph/0611362  
PRD75, 113007(2007)

## ■ 短所

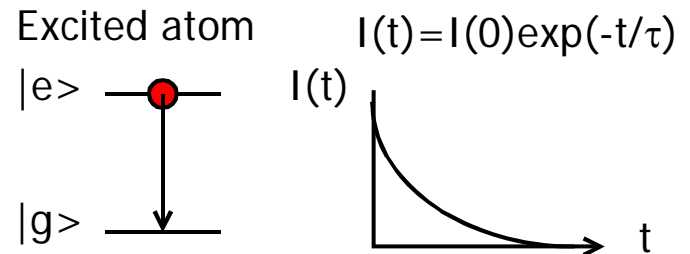
- 弱い相互作用は $\Delta^5$ に比例する
  - 相互作用頻度が極端に小さい
- 相互作用頻度の増幅機構が必要
  - マクロコヒーレンス増幅機構
  - 準位間共鳴

$$\frac{G_F^2 \Delta^5}{15\pi^3} \approx 3.3 \times 10^{-34} \left( \frac{\Delta}{\text{eV}} \right)^5 \text{sec}^{-1}$$

# マクロ・コヒーランス増幅機構とは？

## ■ 超放射現象の理論と実験

励起された原子(分子)があり、光放射などで基底状態に戻るとき、放射強度の時間依存性は指数関数により表される。だが、原子集団が多数の場合は、これとは異なる現象が起こりうる。



# 超放射とは？

- 理論的予言
  - R.H.Dicke (PR93,99(1954))
- 特徴
  - 放射強度
    - $N^2$  に比例 (Nは励起原子数)
    - もし自然放射ならばNに比例
  - 量子コヒーランス状態の実現。
  - 誘導放出とは異なる非線形現象。
- 実験的検証
  - Skiribanowitz et.al. (PRL30,309(1973))
  - 以後多数

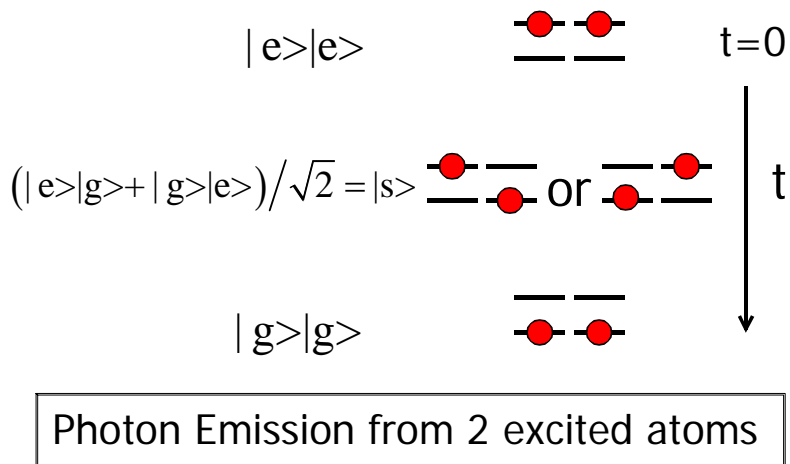


*Bob Dicke*

1916 — 1997

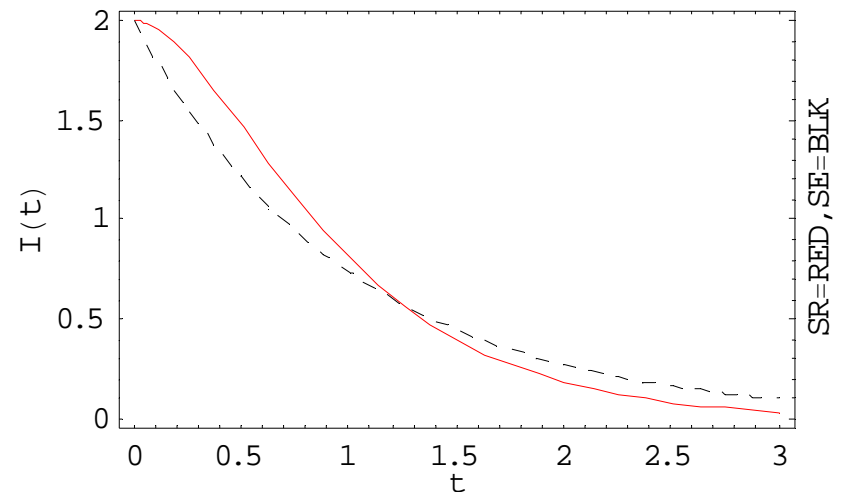


# Dickeによる初等的説明



- 同一の2準位原子が2個存在。
- 1個の光子を放射するとき、どちらの原子から放射したか不明の場合、コヒーラントな状態が実現する。

SR vs Spontaneous Emission



- この場合、崩壊の行列要素は  $\langle s|H_2|ee\rangle = 2^{1/2}\langle g|H_1|e\rangle$
- 放射強度を計算すると単純な指数関数の崩壊とは異なり、強度は初期により集中する。

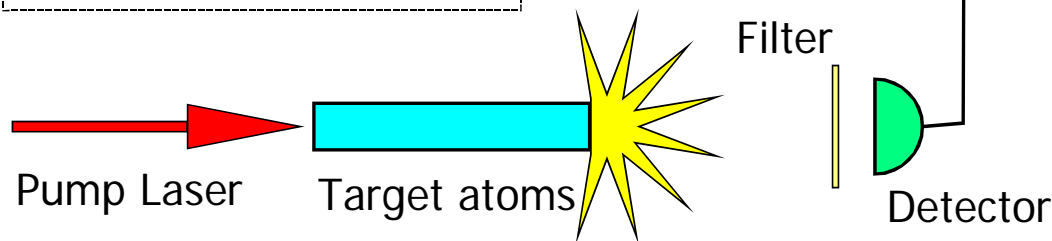
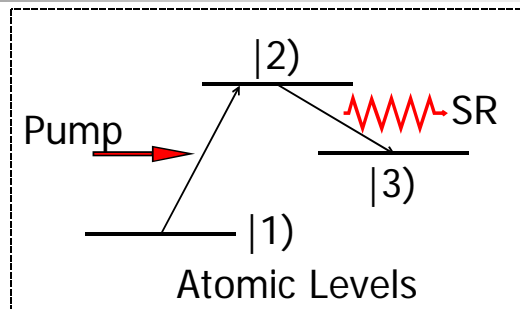
# 超放射の実験的特長(強度)

## ■ 装置(典型例)

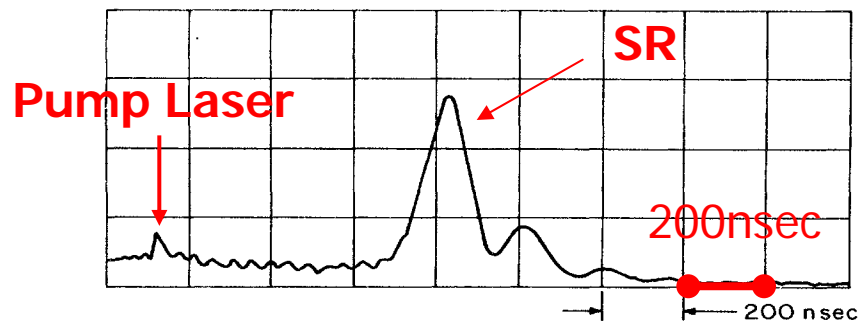
- Laserにより標的原子を基底状態より励起状態に。

## ■ 放射強度

- $N^2$ に比例
  - 右図の例(フッ化水素分子利用)
  - $10^{10}$ 倍の強度(自然寿命=1-10秒)
  - Ringingの存在(理論的に予想)

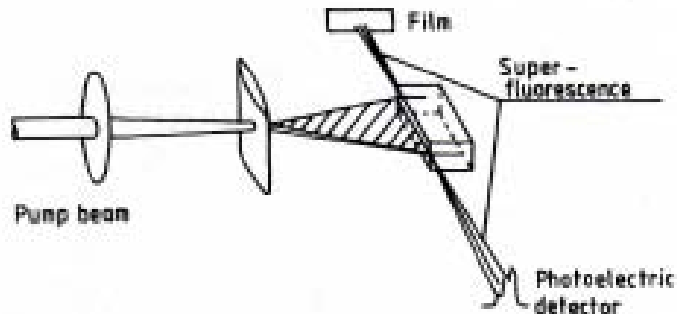


(PRL30(1973)309)



# 超放射の実験的特長(角分布)

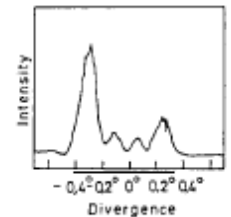
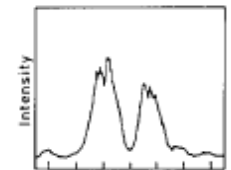
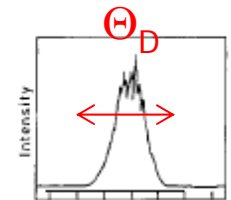
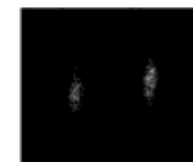
- 超前(後)方への集中
  - 回折角内:  $\Theta_D = \lambda/D$ 
    - 実際にはフレネル数 ( $F = A/\lambda D$ ) にも依存
    - 実験的にも確認されている。



Exp't: JL40(1988)541

KCl(O<sub>2</sub><sup>-</sup>) w/  $\lambda_{\text{pump}} = 266\text{nm}$

2009/2/16-18



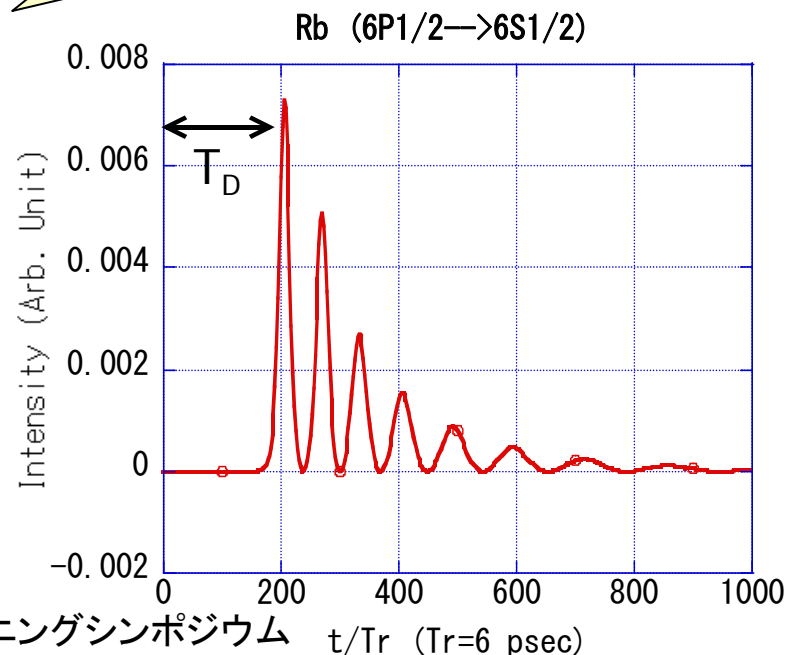
# 超放射の実験的特長(遅延時間)

- 超放射の生成は入力より遅れる(遅延時間)
  - $T_R$ (超放射の特徴的時間)
    - 回折角内に、一個の光子が自然放射されるに必要な時間。
  - $T_D = T_R [\text{Log}(\theta_0/2\pi)]^2/4$ 
    - Initial tipping angle:  $\theta_0$
    - 量子揺らぎに起因:  $1/N^{1/2}$
    - レーザーパワーに逆比例
- 適当な波長のレーザーを「呼び水」として入力し、SRをTriggerすることも可能。

$$\left(\frac{N}{\tau_n}\right) \left(\frac{\lambda^2/A}{4\pi}\right) T_R \ll 1 \rightarrow T_R = \frac{8\pi}{3} \frac{\tau_n}{n_0 \lambda^2 L}$$

$\tau_n$ : (natural) life time

$N = n_0 AL$   $\lambda$ : wavelength





# 二光子及び一光子ニュートリノ対超放射

---

ニュートリノ質量分光実験の基本原理  
質量分光の測定量(目標)  
鍵を握る課題

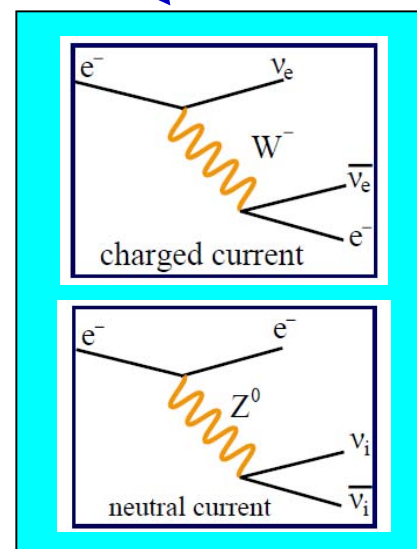
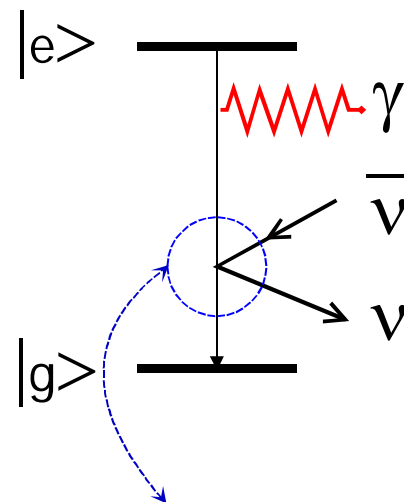
# ニュートリノ質量分光実験の基本原理

## ■ 基本実験原理

- 励起した原子からの、一光子とニュートリノ対を伴う過程に注目。
- このとき標的原子について巨視的量子コヒーレント状態を実現し、反応を促進する。
- ニュートリノに関する情報は、付随して放射される光子のスペクトルに含まれる。

## ■ 鍵を握る課題

- 巨視的量子コヒーレント状態を実現できるか？
- BGとなる二光子(一光子)超放射を制御できるか？



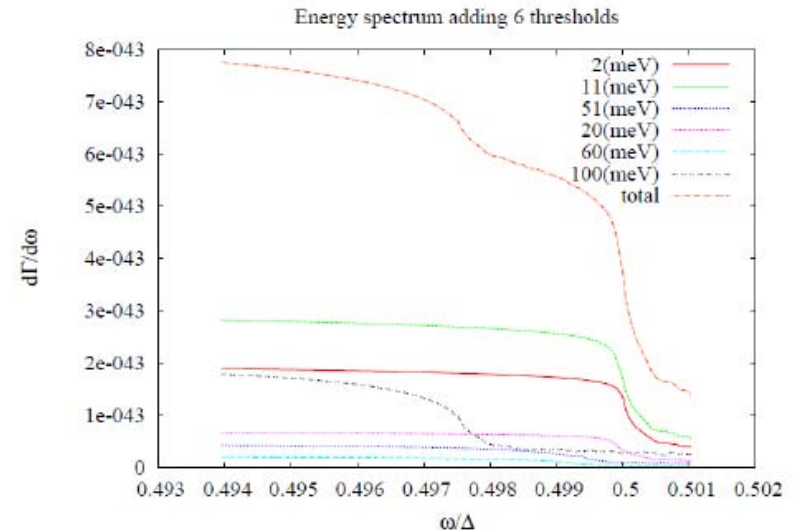
# 質量分光の測定量(期待)

## ■ 質量及び混合角

- 放射光子のエネルギースペクトルに閾値が存在する。これより質量を
- スペクトルの相対的大きさは混合角に依存。

## ■ マヨナラ vs ディラック

- 同種粒子効果によりスペクトルが変形。



$$\sum_{h_1 h_2} |j_M \cdot j^e|^2 = \sum_{h_1 h_2} |j_D \cdot j^e|^2 + \frac{m_1 m_2}{2E_1 E_2} \left( j_0^e (j_0^e)^\dagger - \vec{j}^e \cdot (\vec{j}^e)^\dagger \right)$$

M. Yoshimura; PRD75(2007)113007

# マクロ・コヒーラント標的

## ■ 要求

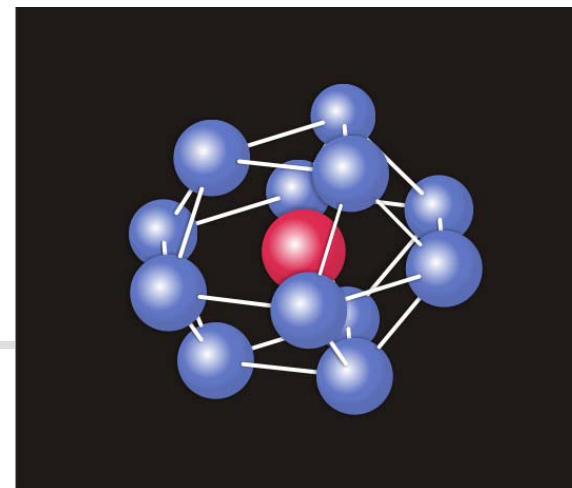
- 標的数  $N=10^{18}$
- コヒーランス・タイムが十分長い

## ■ 候補

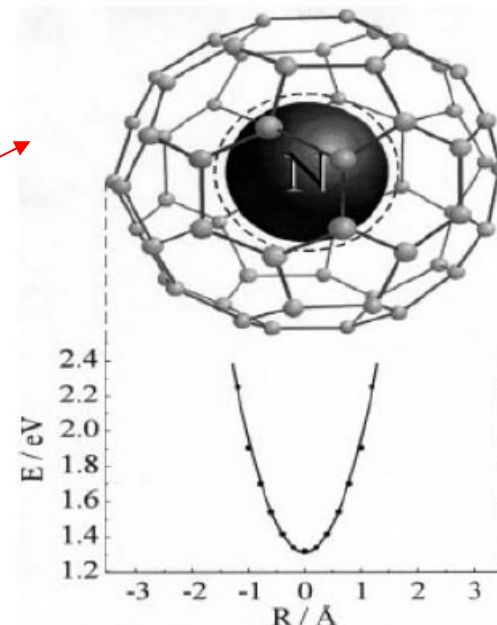
- 希ガス(水素)マトリックス
  - 具体的進展については後述。
- (原子・分子内包)  $C_{60}$  fullerene
  - 水素分子や窒素原子、希ガスなどは内包され、孤立状態を保つことが、実験的に確立されている。

## ■ 新しい挑戦的課題

- 過去にマクロ・コヒーランスを証明する実験例なし！



固体水素マトリックス

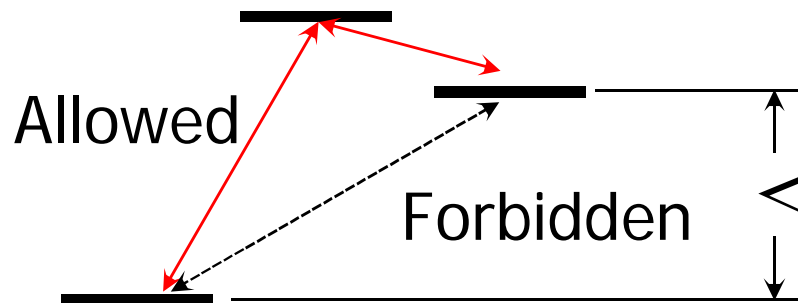


窒素内包フラーレン

Fig. 6. Schematic view of nitrogen inside  $C_{60}$ . The size of the sphere corresponds to the van der Waals radius of nitrogen [12]. The dashed line marks the border of the inner cavity of the  $C_{60}$  shell if van der Waals radii are assumed for the carbon atoms [12]. In the lower part of the figure the calculated potential energy of nitrogen in  $C_{60}$  is shown as a function of the displacement from the center [4]. In the calculation, no relaxation of the cage atoms is assumed. The energy scale is relative to the energy of nitrogen at infinity



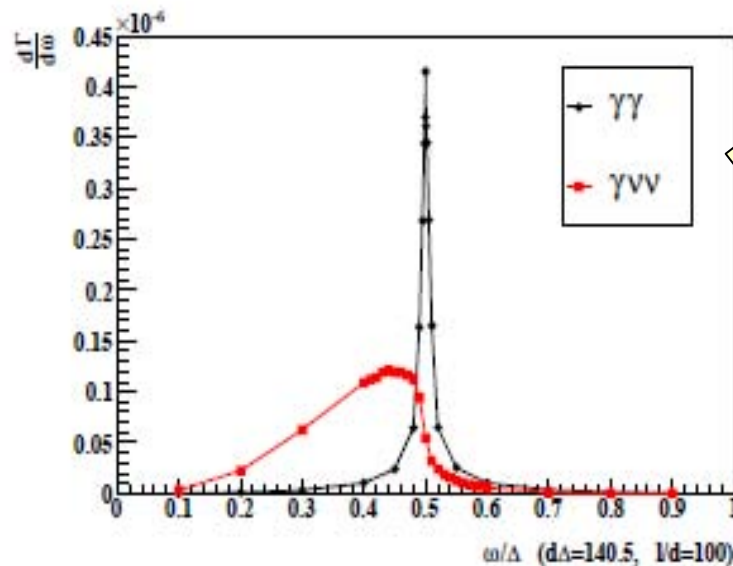
# 二光子超放射



- 二光子超放射
  - 二光子超放射とは？
  - 目的・意義
    - マクロコヒーランス増幅機構のProof of Principle 実験
    - 一光子+ニュートリノ対放射に対するBG過程。

## その特徴

- エネルギーと角度相関
  - $\Delta/2$ に鋭いピーク
  - 互いに反対方向
- 直感的理解は、
- **新しい挑戦的課題**
  - 過去に二光子超放射を観測した実験例なし！



より精密な計算に変更中

$$\left| \sum_{i=1}^N \exp\{i(\vec{k}_1 + \vec{k}_2) \cdot \vec{r}_i\} \right|^2 \Rightarrow N^2 \text{ if } \vec{k}_1 + \vec{k}_2 = 0$$

# 一光子＋ニュートリノ対超放射

- 二光子超放射との分離
  - 二光子過程も禁止
  - エネルギースペクトルの差を利用
  - 角度分布
  - Triggerにより積極的に信号を誘発

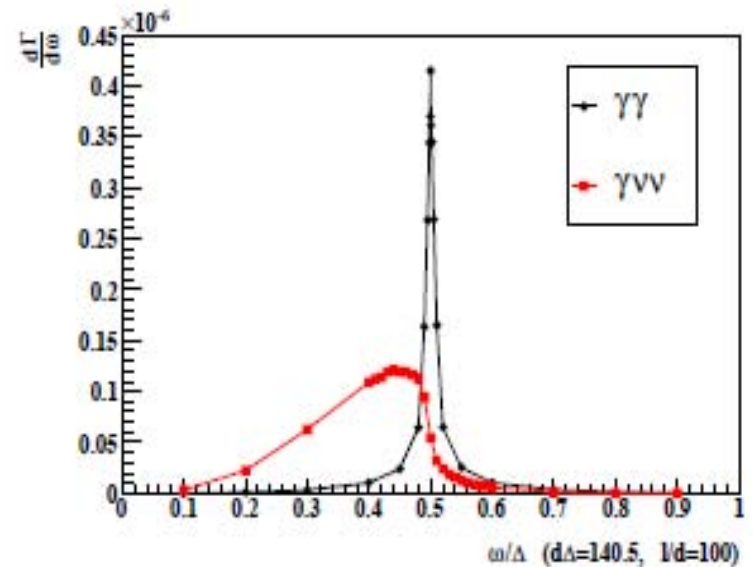
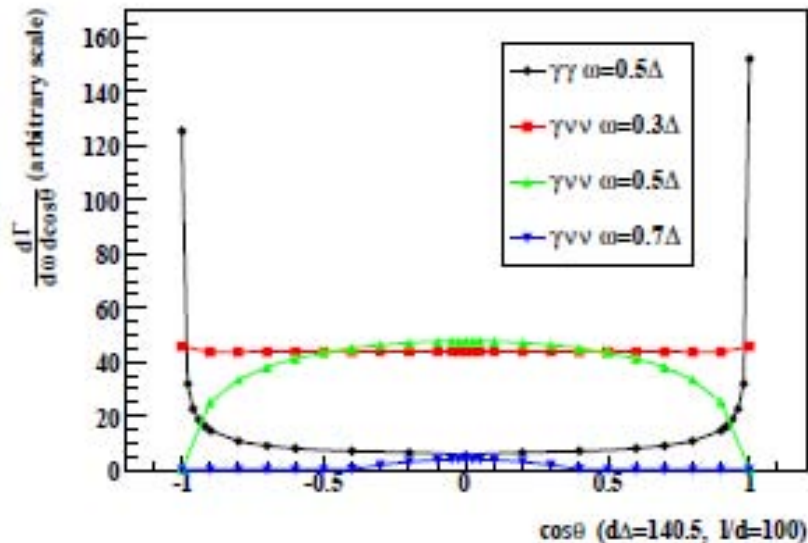


FIG. 2: Energy spectrum of MCTPE and radiative neutrino pair emission. The rate of radiative neutrino pair emission is rescaled up with a factor  $1.0 \times 10^{41}$ . The size factors assumed are  $d = 100\text{eV}^{-1} \sim 20\mu\text{m}$  and  $l/d = 100$ . A single neutrino species of mass  $50\text{ meV}$  is assumed for  $\gamma\nu\nu$ .

より精密な計算に変更中！



## 具体的準備の状況

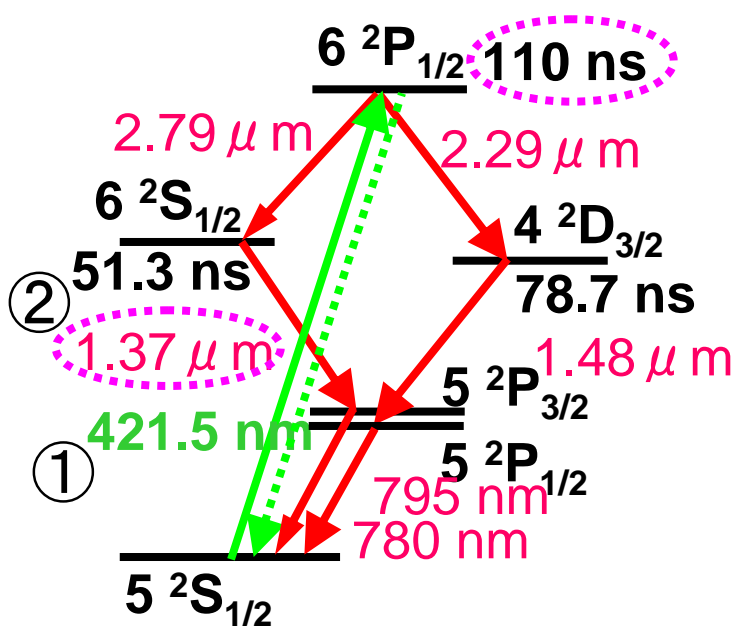
---

- (1) Rbよりのカスケード超放射
- (2) Baよりのラマン超放射
- (3) Baよりの二光子超放射
- (4) 希ガスマトリックの作成と巨大量子状態の確認  
(近畿大学、若林氏との共同研究)
- (5) パラ水素マトリックの作成と巨大量子状態の確認  
(UBC、Prof.Momose との共同研究)

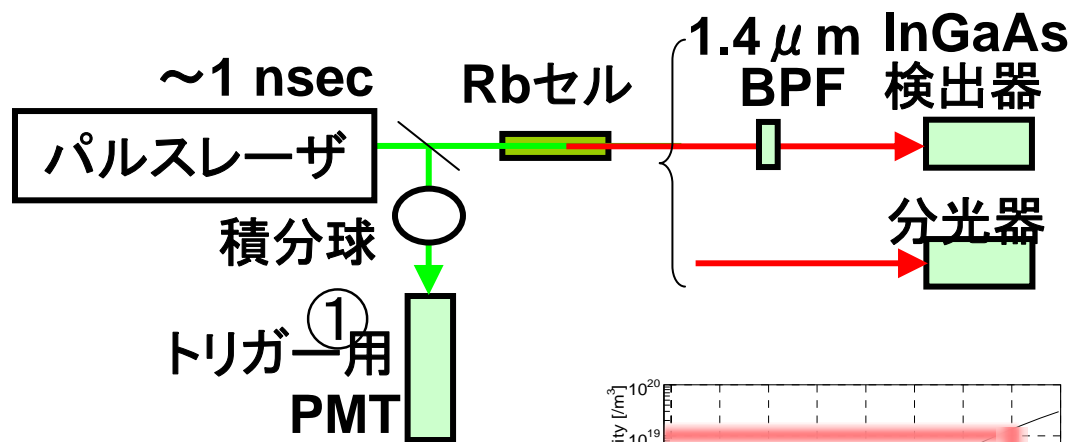
# Rb 原子を用いたカスケード超放射測定

- 目的: 超放射の理解と関連技術習得、カスケード超放射の理論構築とその実験的検証

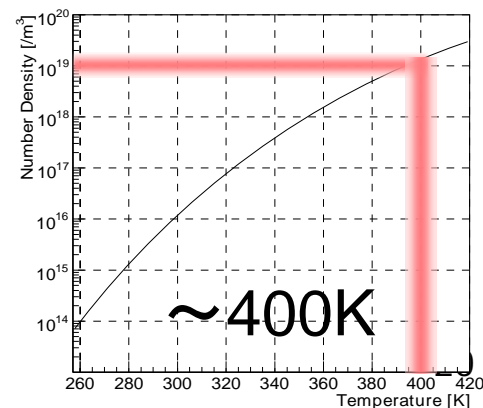
## Level Diagrams



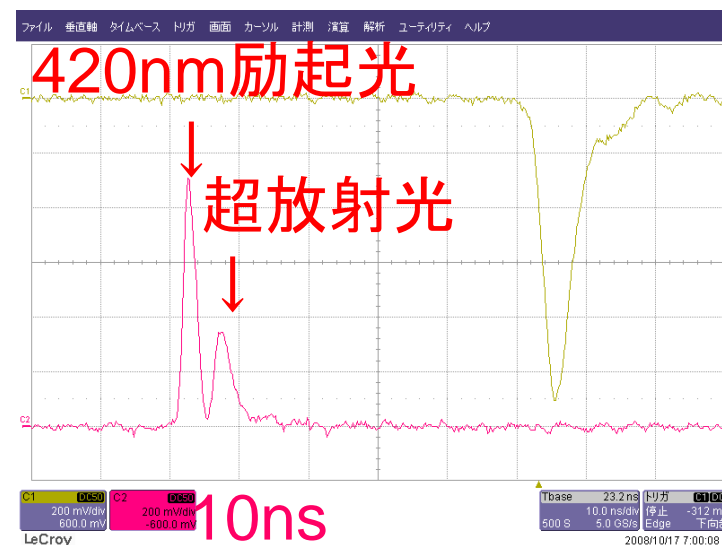
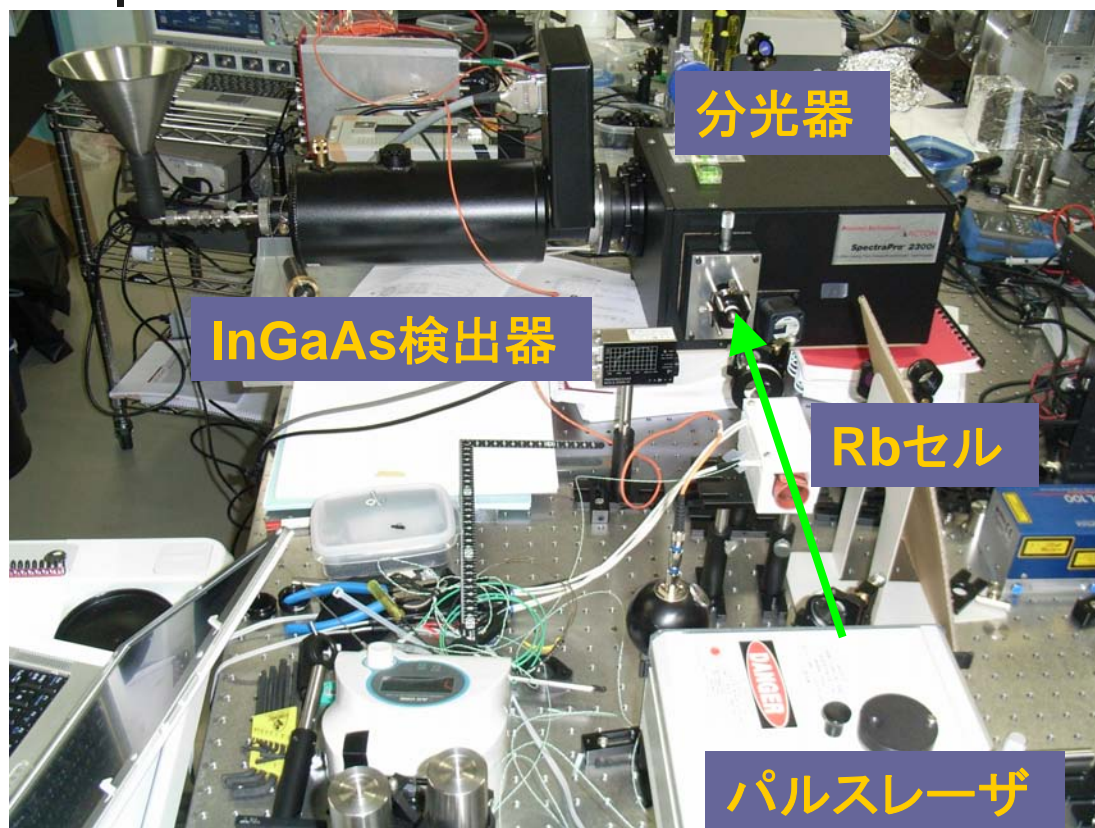
2009/2/16-18



gCOEオープニングシンポジウム

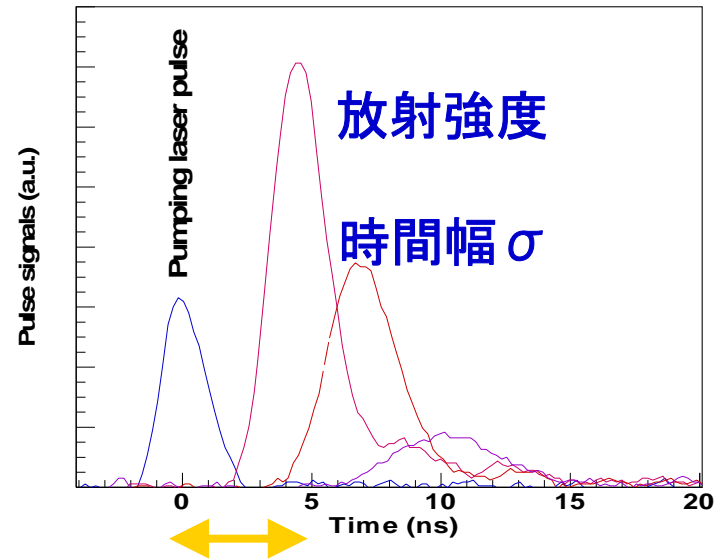
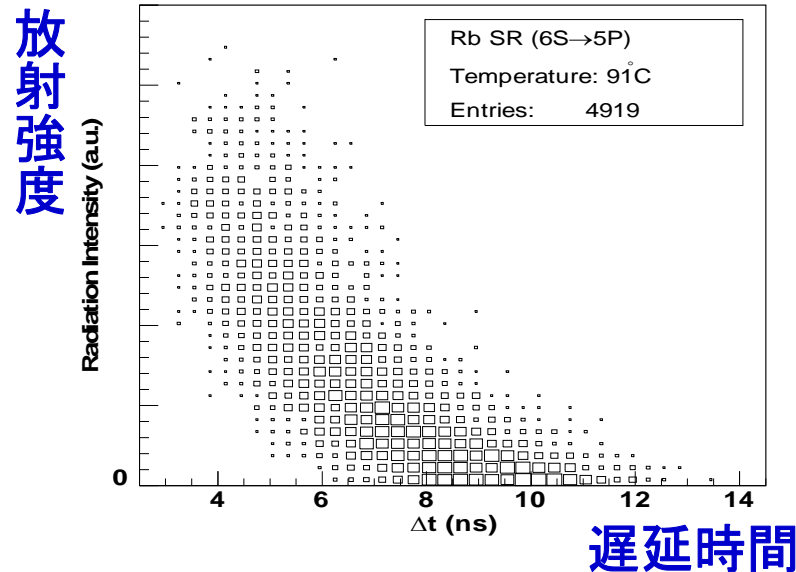


# Rb超放射測定セットアップ



- （上図）励起レーザー光と超放射光を共に検出した場合。（自然寿命は110+51 nsec。）

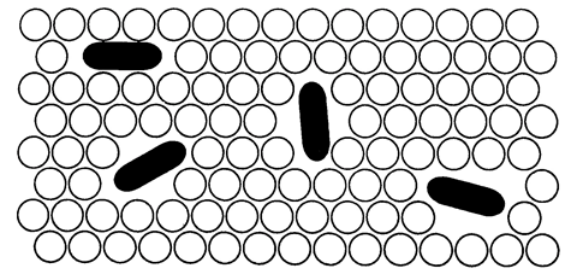
# 超放射の波形パラメータ相関



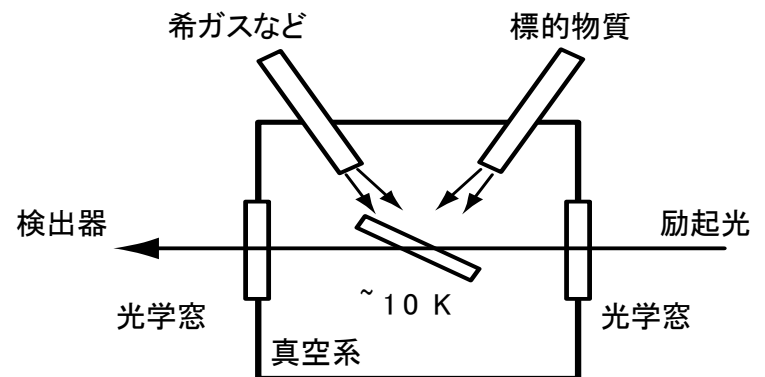
- 超放射の特性と一致  
放射強度が大きいほど遅延時間が短い

# マトリックスとは？

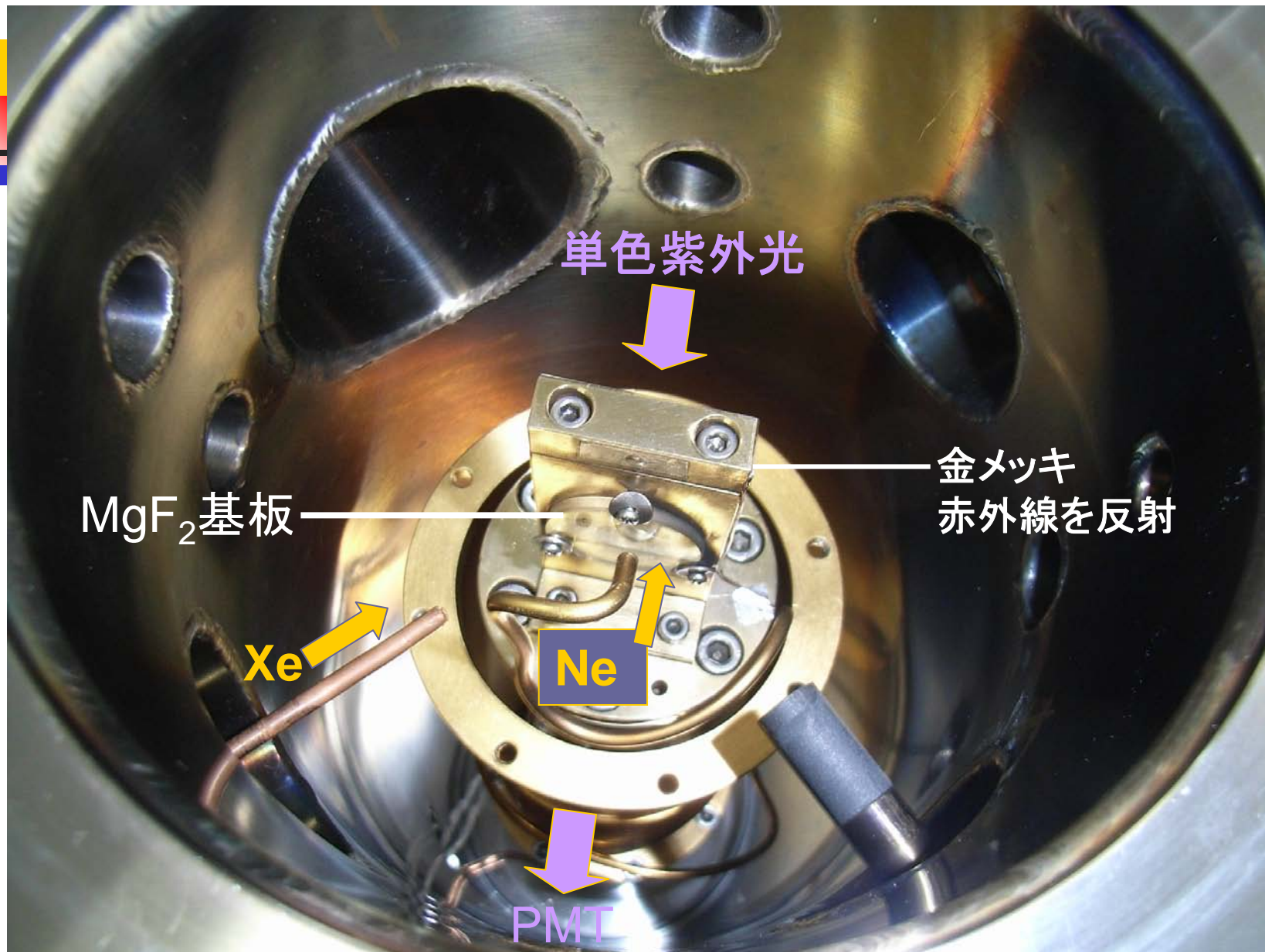
- 希ガスなどの低温( $\sim 10\text{K}$ )に凍結した媒体中にゲスト原子・分子を封じ込めたもの。
  - 原子分子の回転を抑制できる。
  - 相互作用が弱く気体ガスの状態に近い。
  - 貯蔵数は水素でのマトリックスの場合  $10^{18}/\text{cm}^3 \dots$   
↓  
コヒーレンス状態の利用に適した条件。



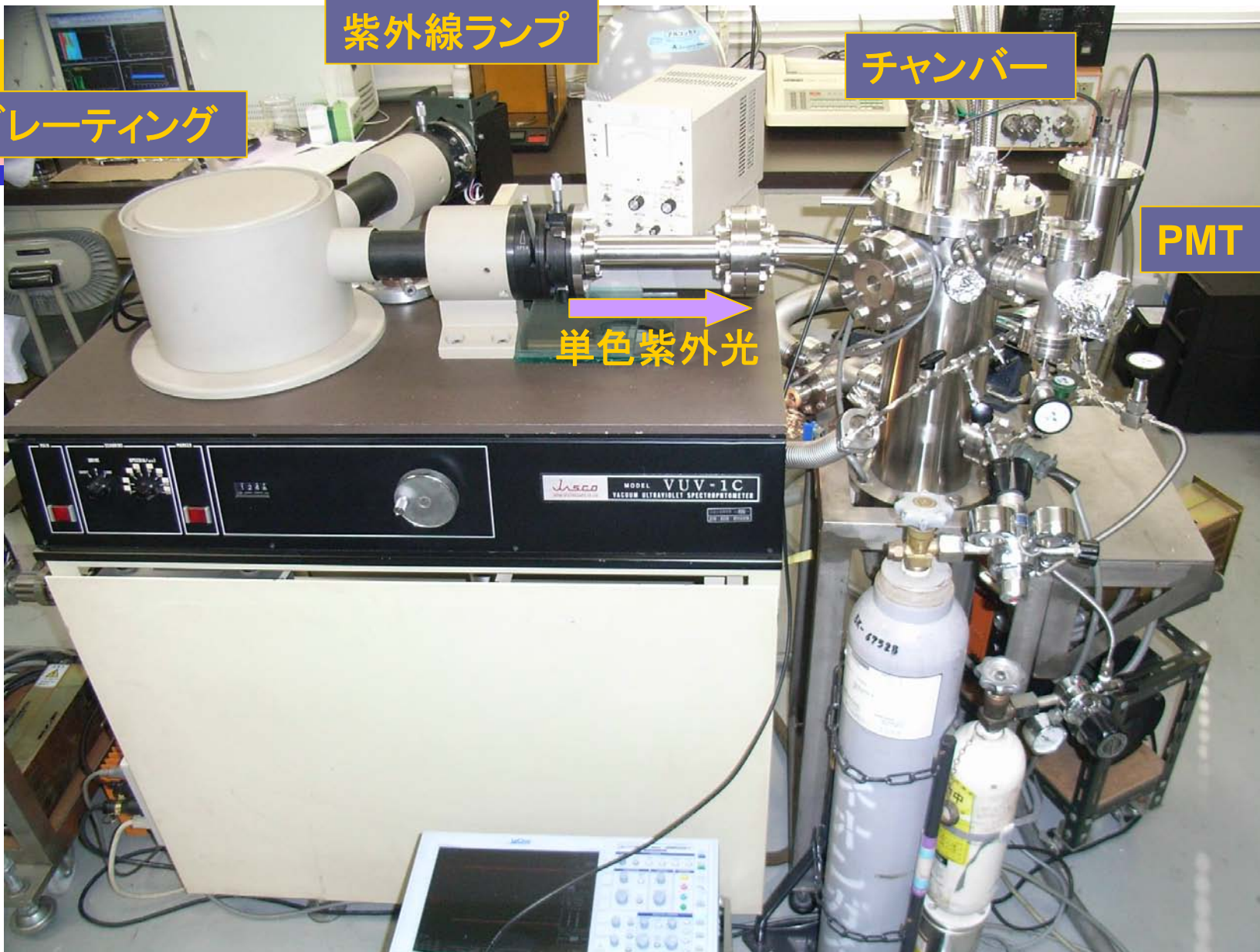
IAN R. DUNKIN  
Matrix-Isolation Techniques











紫外線ランプ

グレーティング

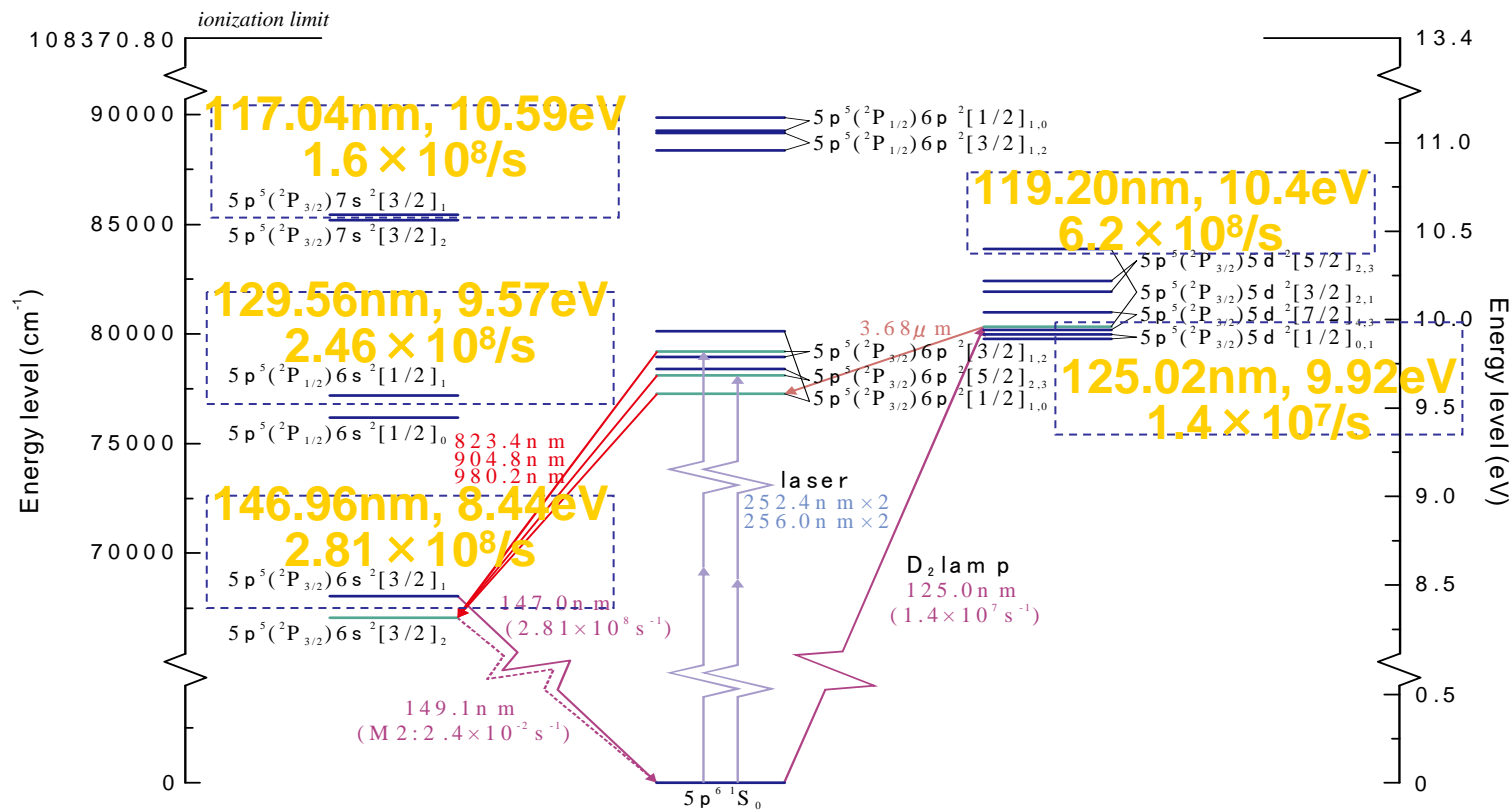
チャンバー

PMT

単色紫外光

# Xe in Ne Matrix 実験状況

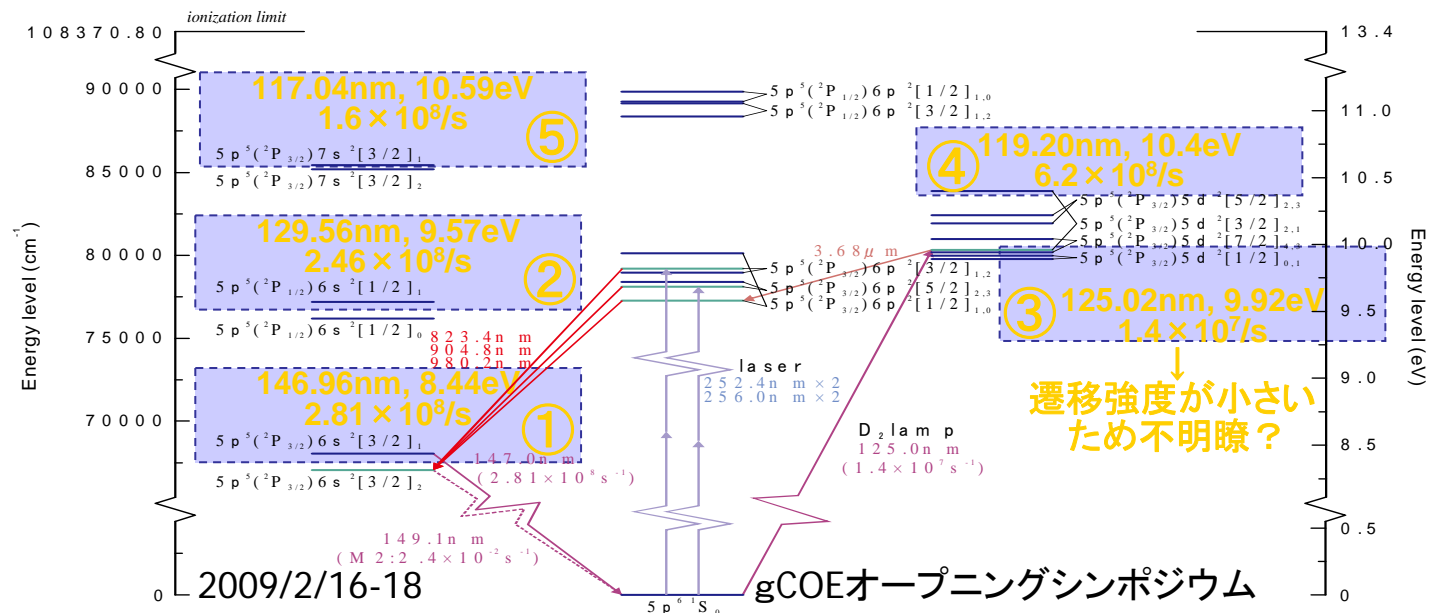
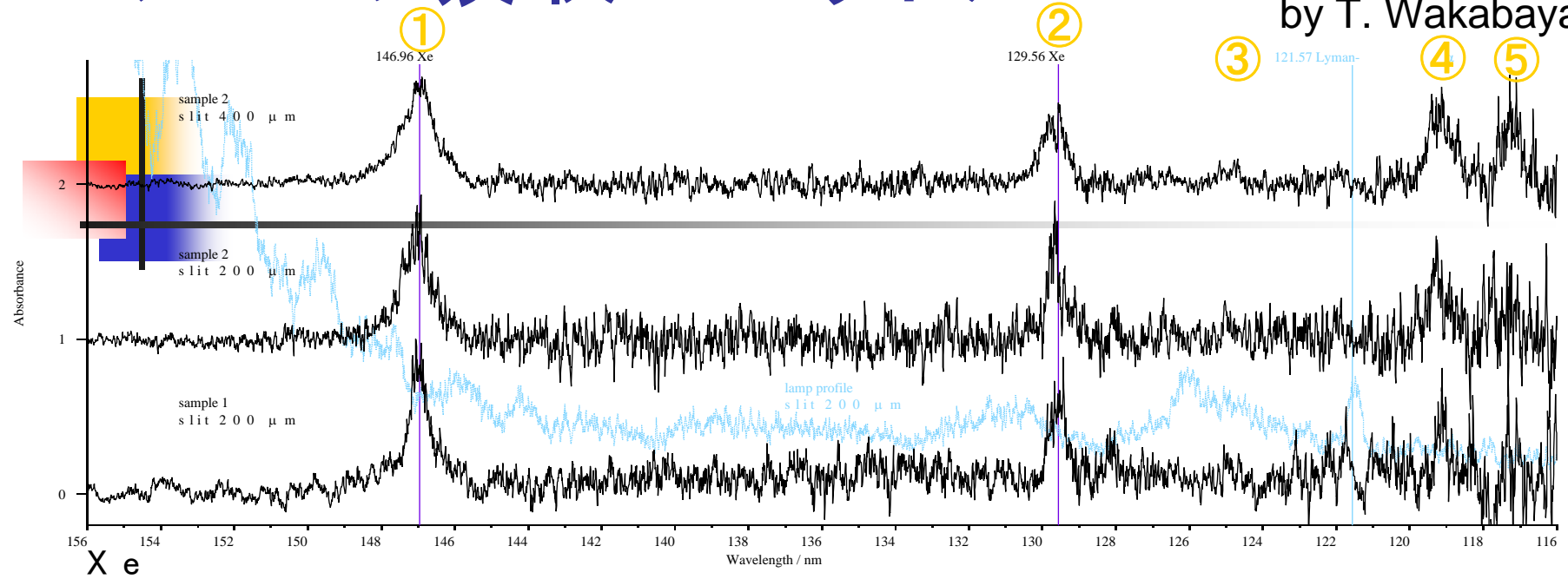
Xe



# Xeガスの吸収スペクトル

2009.01.17

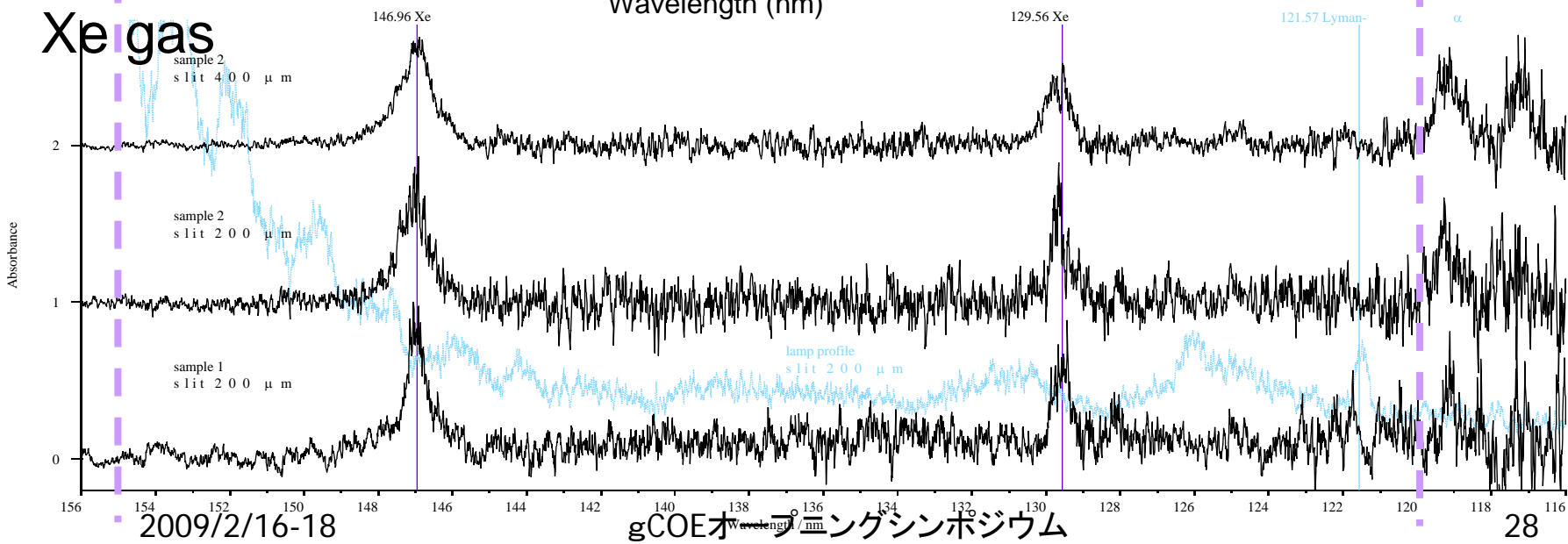
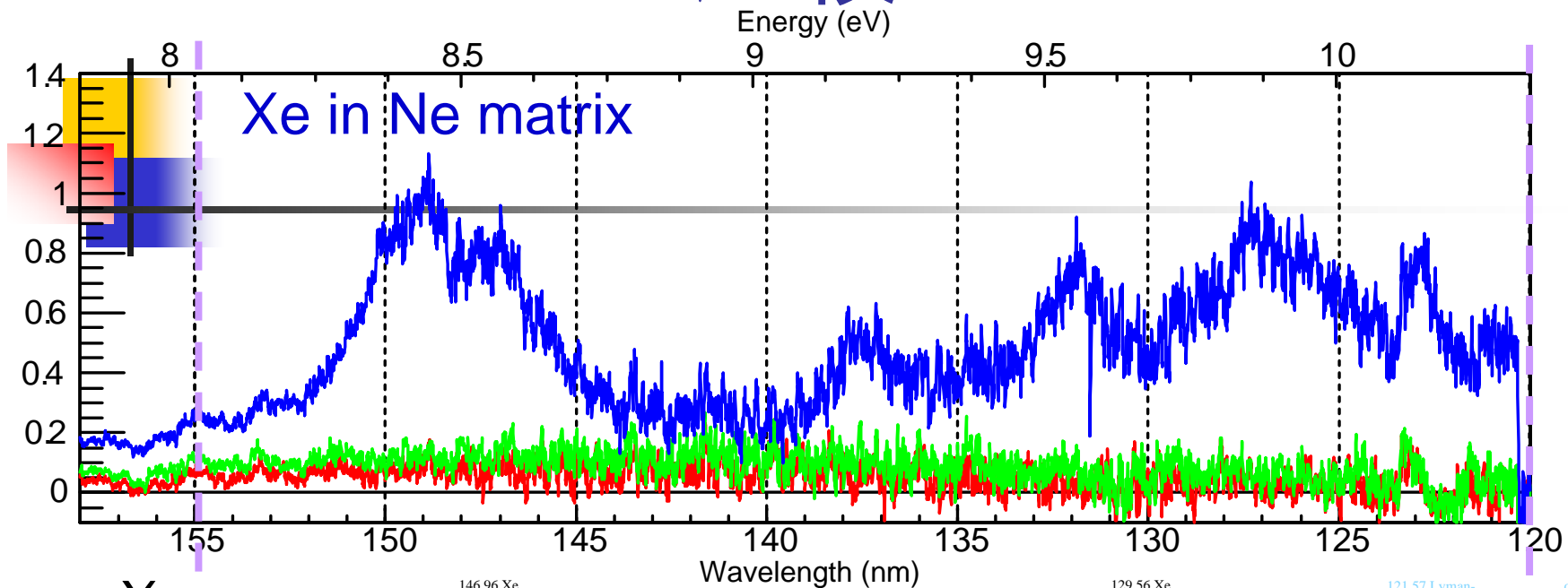
by T. Wakabayashi



2009/2/16-18

gCOEオープニングシンポジウム

# Matrix-Gasの比較





# まとめと展望

---

- **新しい原理・手法によるニュートリノ分光を提案**
  - 原子過程からの光子＋ニュートリノ対を検出。
    - Majorana-Diracの区別
    - 質量絶対値の測定
    - 混合角の測定
  - マクロ・コヒーラント状態を創出し、反応を促進。
- **展望**
  - 二光子超放射は起こるのか？
  - マクロ・コヒーラント標的は実現できるか？
    - 理論の整備とそれに基づく数値計算。
    - 上記2つの実験は進行中。
  - これらを実現し、ニュートリノ質量分光や宇宙背景ニュートリノの観測に繋げたい。