

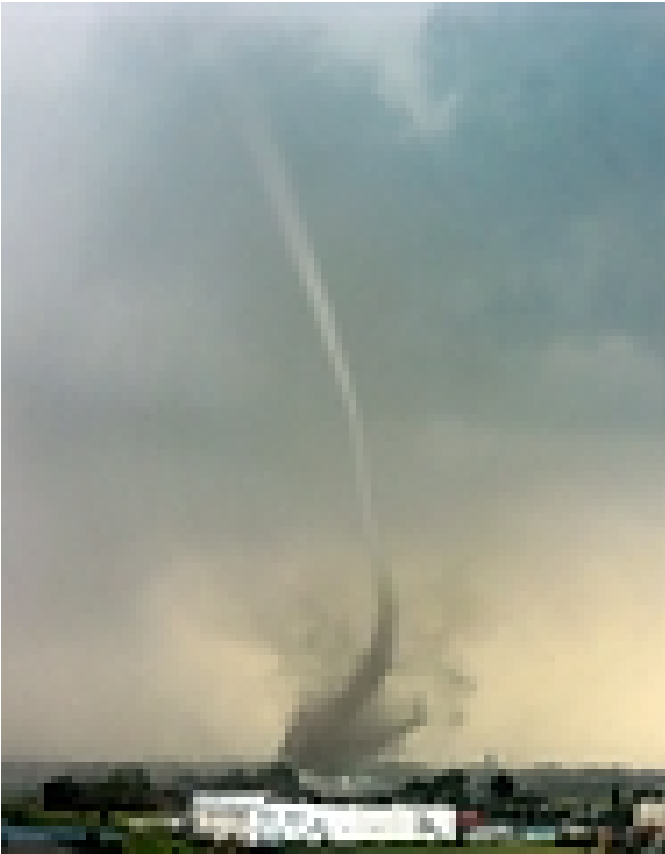
中性子を用いた量子渦可視化の試み

辻 義之 名古屋大学工学研究科

松下 琢, 国立 将真^A, 久保 涉^A, 鈴木 颯^A, Volker
Sonnenschein^A, 篠原 武尚^B, 林田 洋寿^C, Wei Guo^E,
富田 英生^A, 井口 哲夫^A, 和田 信雄, 広田 克也,
北口 雅暁, 鬼柳 善明^A, 清水 裕彦,
伊藤 大介^F, 齊藤 泰司^F
名大理, 名大工^A, J-PARCセ^B, CROSS^C,
米国高磁場研^E, 京大炉^F

乱流中の渦

竜巻



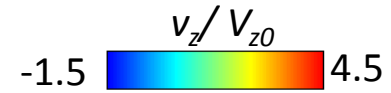
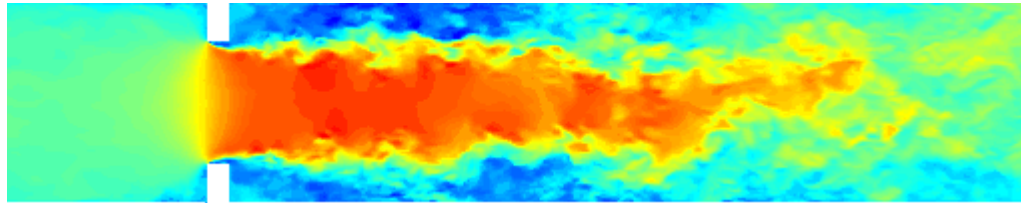
ペットボトルの中の渦

<http://www.asahi.com/topics/word/%E7%AB%9C%E5%B7%BB.html>

<http://www.ny.airnet.ne.jp/satoh/expmkidsM0.htm>

複雑な流動場

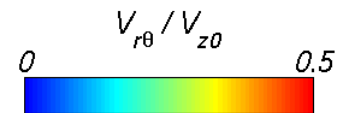
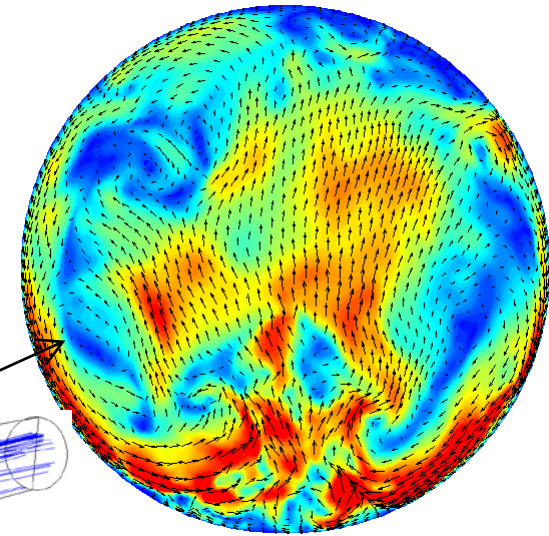
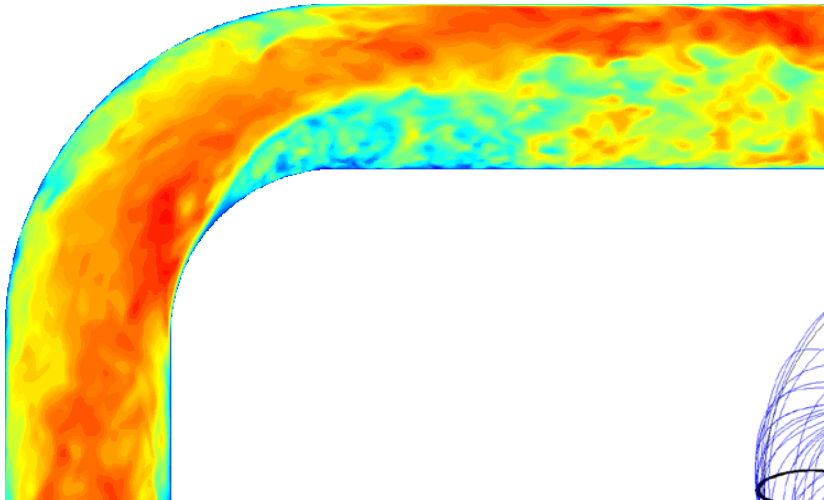
オリフィス下流の速度時間変化



○断面内の2次流れ

Re=15000

エルボ内の剥離流れ (x20 slow motion)



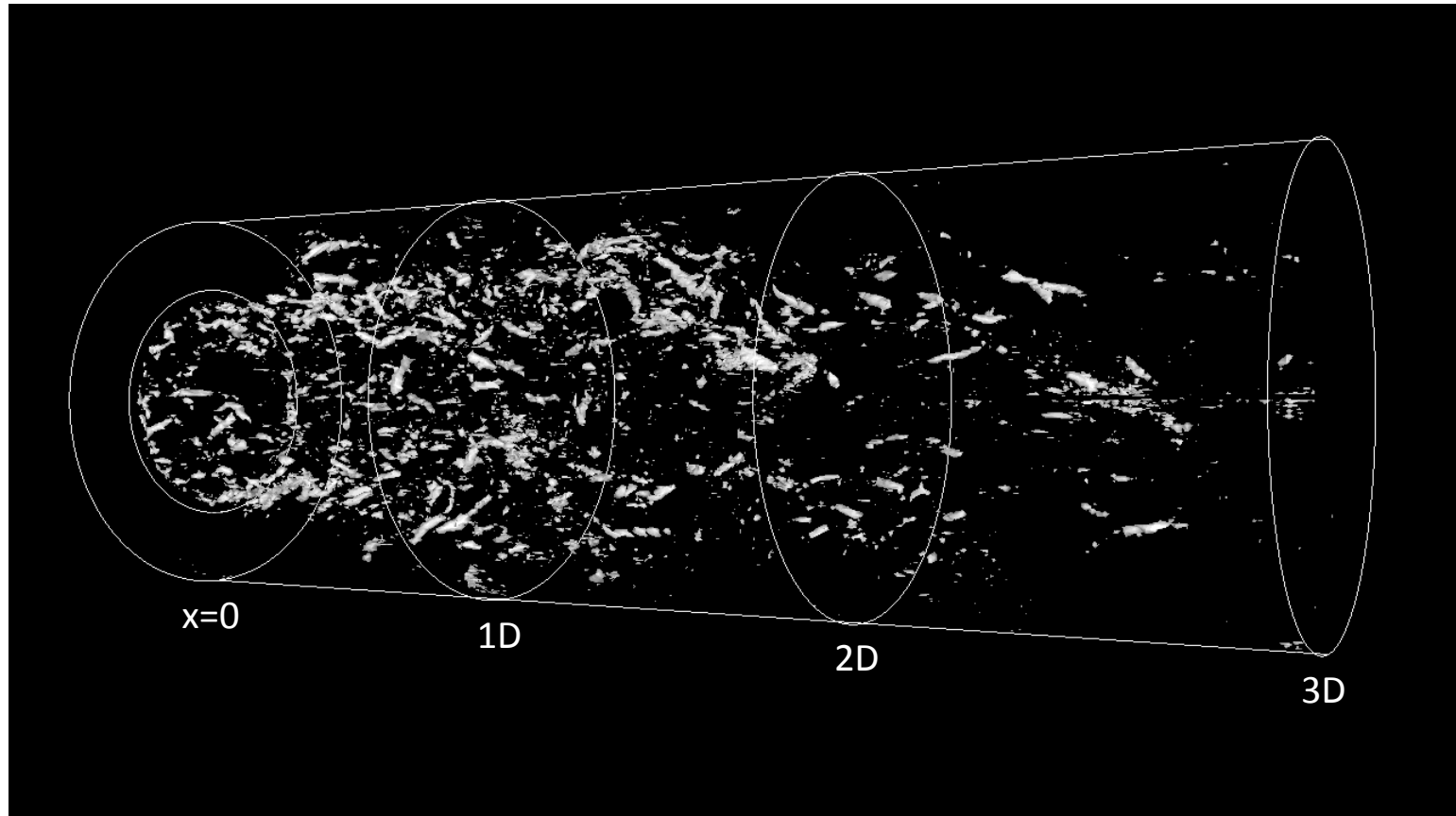
エルボ出口断面 (V_{z0} : 断面平均流速)

オリフィス下流の渦構造

速度勾配テンソルの第二不変量(Q値)による渦の可視化

Q値の等値面 $Q=6 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$

(x50 slow motion)

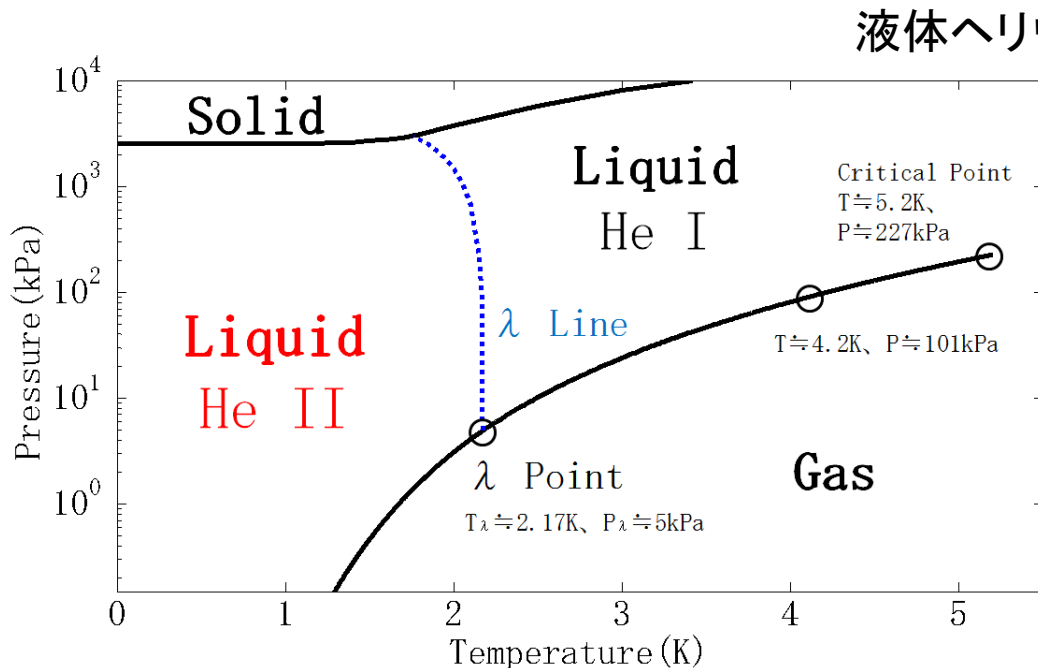


- オリフィスエッジからの流れの剥離によって渦が発生
- $x/D=1$ の周辺で間欠的に渦が壁面方向に拡散

どうして ${}^4\text{He}$ をつかうのか？

大気圧下での沸点は4.2K、液体ヘリウムは極低温下でのみ存在する

- ・液体ヘリウム温度 4.2K、 $P=101\text{kPa}$
- ・ラムダ点温度 2.17K、 $P=5\text{kPa}$



${}^4\text{He}$ (液体ヘリウム)相図

$$Re = (\text{速度}) \times (\text{長さ}) / (\text{粘性})$$

He II : 超流動 (粘性が極めて小さい)



高レイノルズ数乱流の普遍性

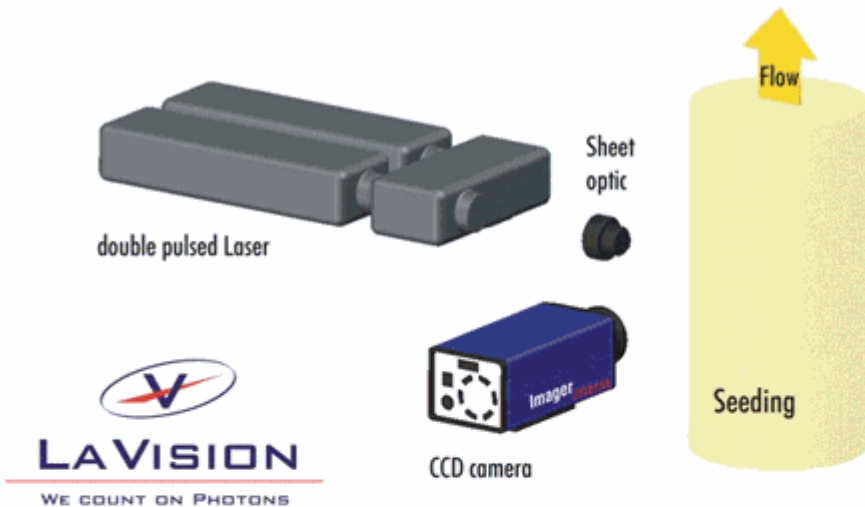
台風の物理を室内実験で実現できる

PIV (Particle image velocimetry)

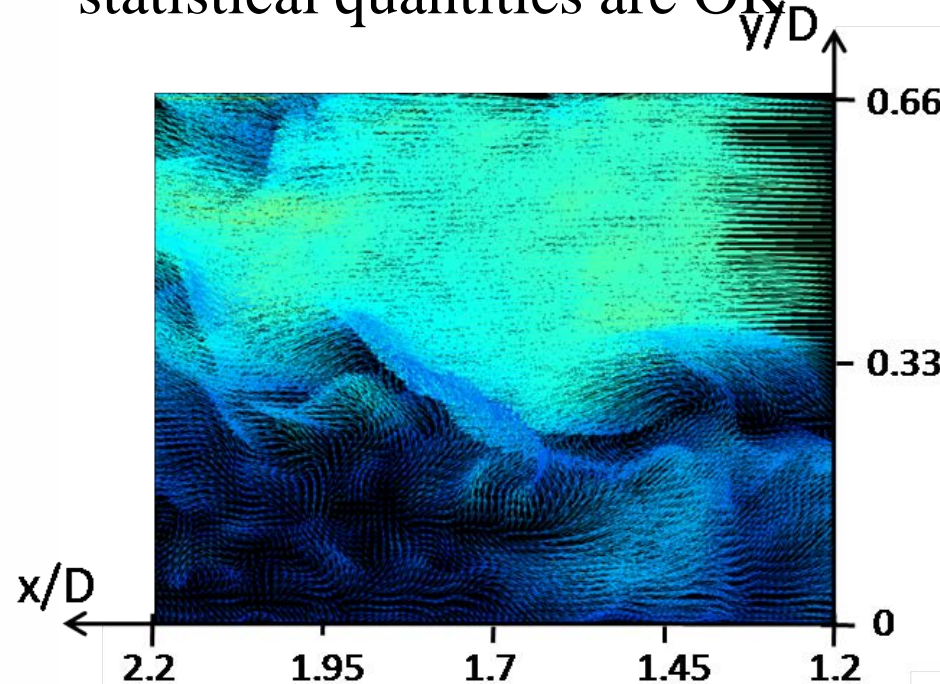
Instantaneous velocity fluctuations are measured.

1-Camera: 2-component velocity in 2-dimensional

2-Camera: 3-component velocity in 3-dimensional



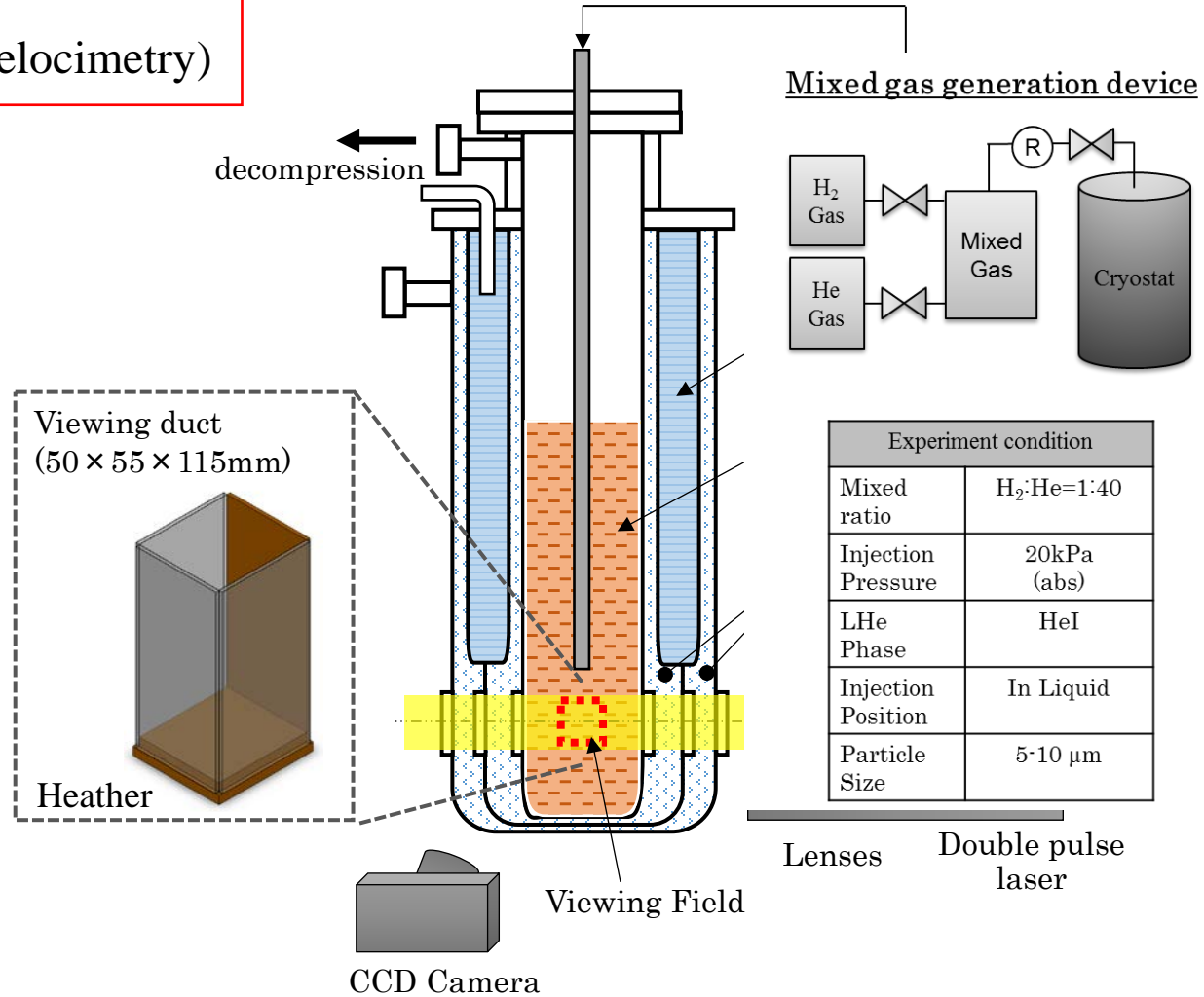
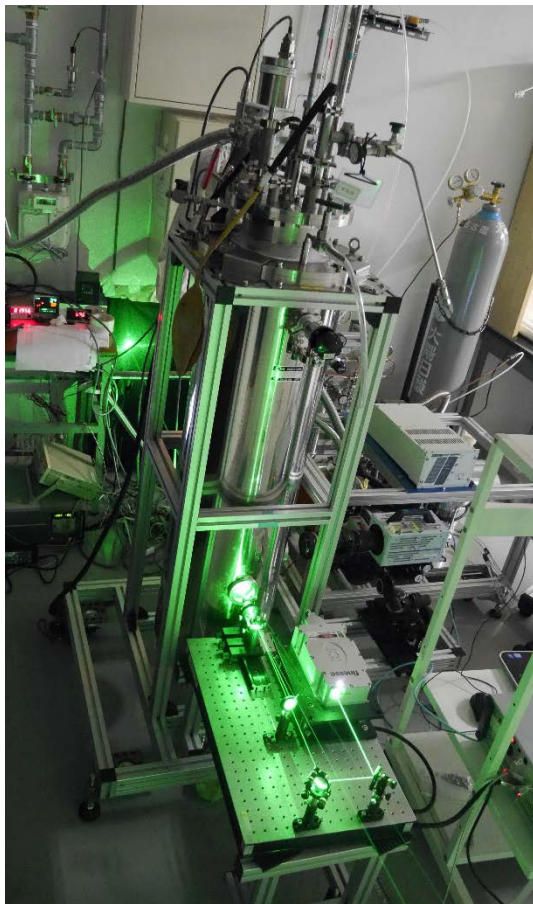
Particle size, particle density,
space & time resolution of camera,
*statistical quantities are OK



Experimental Set-up

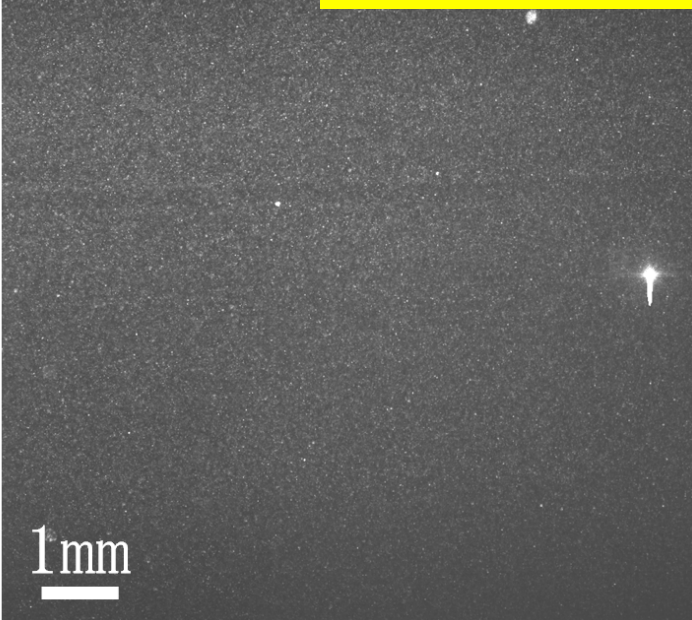


- ✓ Solid hydrogen particles as tracer
- ✓ PTV(Particle Trajectory Velocimetry)

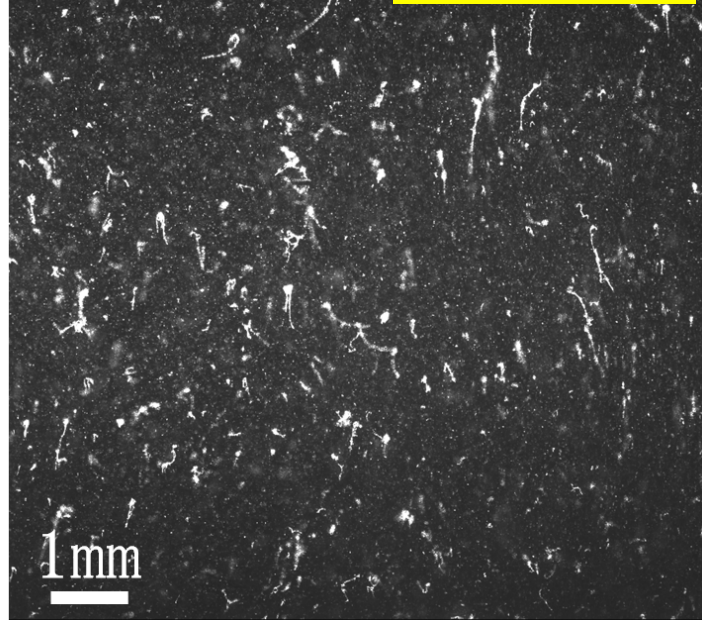




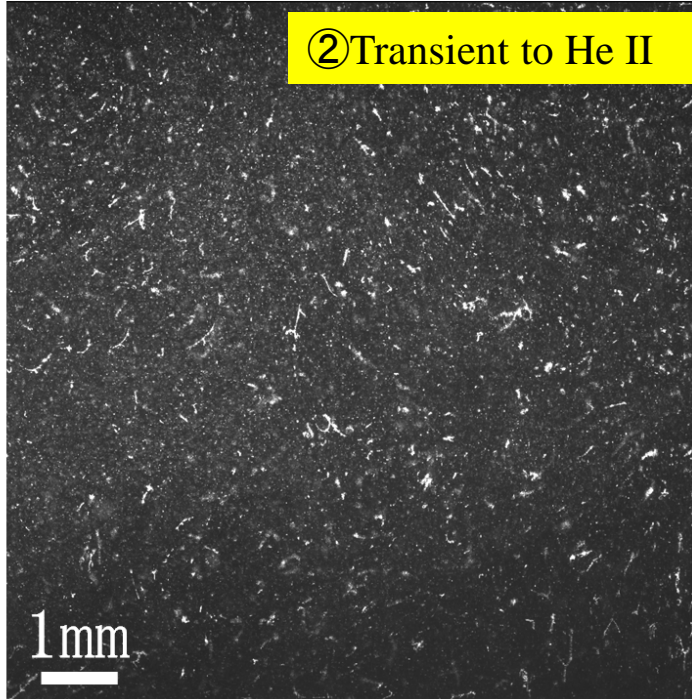
① Injection in He I



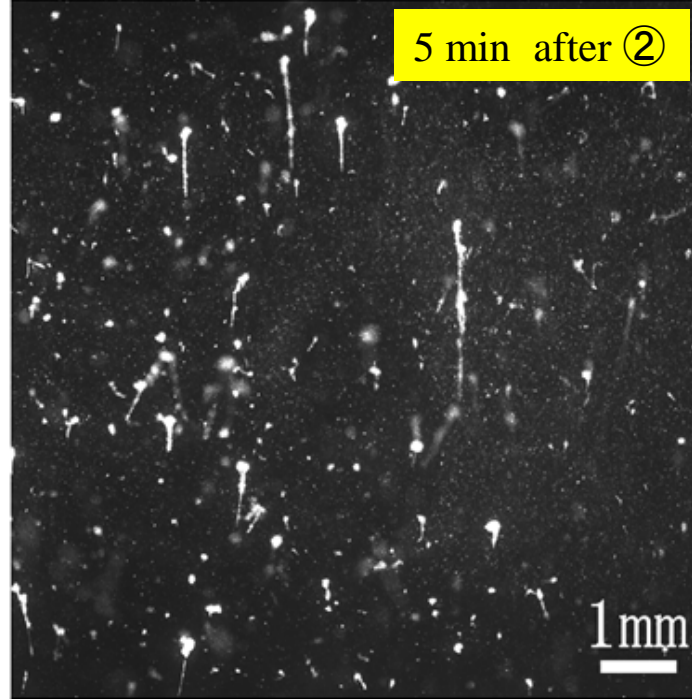
1 min after ②



② Transient to He II



5 min after ②



量子渦

・超流動流体中に存在する位相欠陥

・循環が量子化された渦

循環.....渦芯を囲む閉曲線Cに沿って

速度場 $v(r)$ の周回積分をとった量

$$\Gamma = \oint_C v_s(r) \cdot dr = \frac{\hbar}{m} \oint_C \nabla\theta \cdot dr = \frac{h}{m} n$$

・粘性による減衰, 消滅がなく, 安定して存在

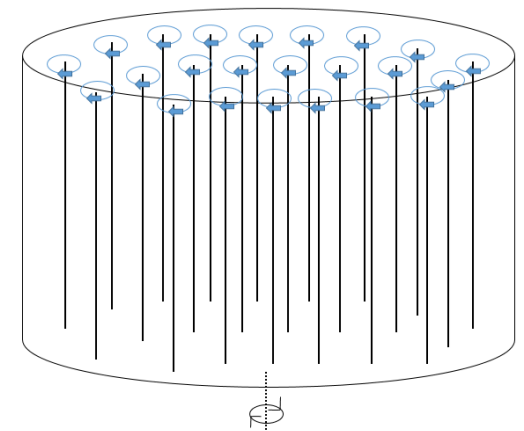
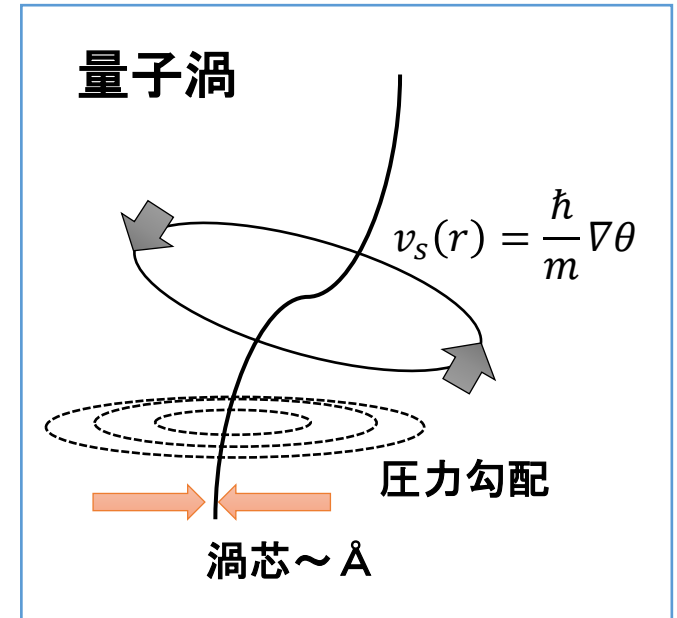
・同一の循環

・量子渦のエネルギー

$$E = \int \frac{1}{2} \rho_s v_s^2 dr = \frac{\rho_s \Gamma^2}{4\pi} \ln\left(\frac{R}{a}\right)$$

$E \propto n^2$ なので

$n=2,3\dots$ の渦は、 n 本の $n=1$ の渦に分かれて、
格子構造をとる



回転する円筒容器内の超流動ヘリウムの渦

微細粒子で可視化できる渦構造



量子化渦に追従するトレーサー粒子の
運動方程式 (Chagovets)

$$m a_{-z} = F_{\text{stokes}} - F_{\text{trap}}$$

m : トレーサー粒子質量 a_{-z} : z 負方向加速度
 F_{stokes} : ストークス抗力 F_{trap} : トラッピング力

量子化渦近傍の圧力勾配
(Sergeev)

$$\nabla p = \frac{\rho_s \kappa^2}{8 \pi^2} \nabla \left(\frac{1}{r^2} \right) = - \frac{\rho_s \kappa^2}{4 \pi^2} \frac{1}{r^3}$$

ρ_s : 超流動成分の密度 κ : 循環量子
 r : 渦芯からの距離

ストークス抗力

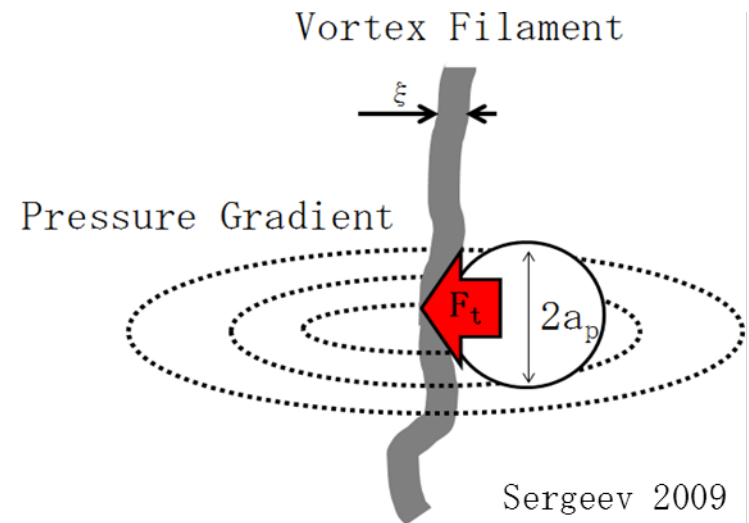
$$F_{\text{stokes}} = 6 \pi \eta a_p v_p$$

η : 粘度
 a_p : トレーサー粒子半径
 v_p : トレーサー粒子速度

Frequency of response

Deposition velocity

Centrifugal force

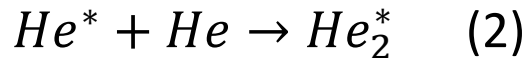
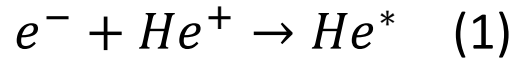


Sergeev 2009

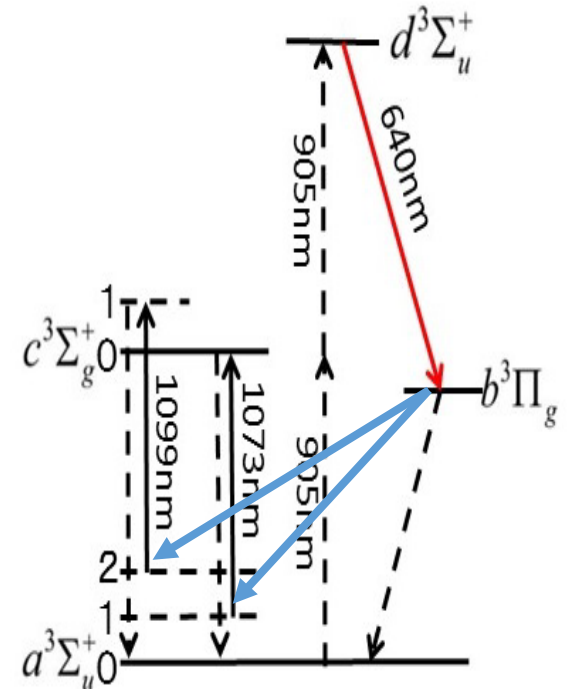
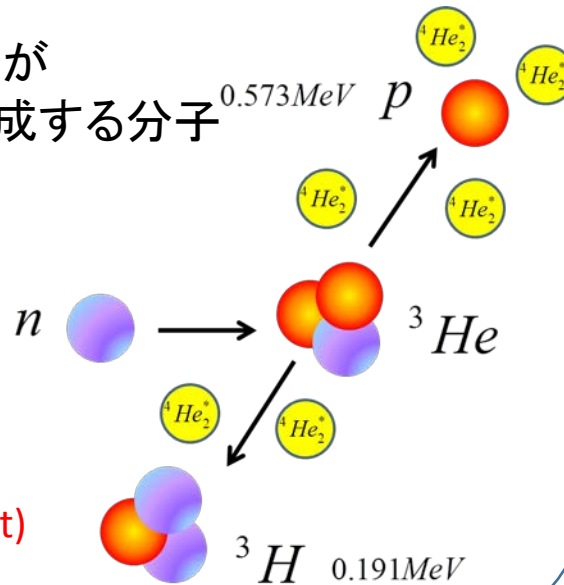
ヘリウム・エキシマ:なぜ中性子を利用するのか？

エキシマ(励起二量体)

電子励起状態の原子分子が
基底状態の原子分子と形成する分子



一重項(singlet) 三重項(triplet)
~10ns ~13s



He₂* の誘起蛍光^[3]

He₂* の生成手法

- ³He の中性子吸収による生成
- フェムト秒レーザーによる生成
- 放電による生成

905nmレーザーの
2光子吸収により励起される。
準位が落ちる際に640nmの
発光が観測できる。

[4] W. Guo et al., J Low Temp Phys, 158 (2010), pp.346-352.

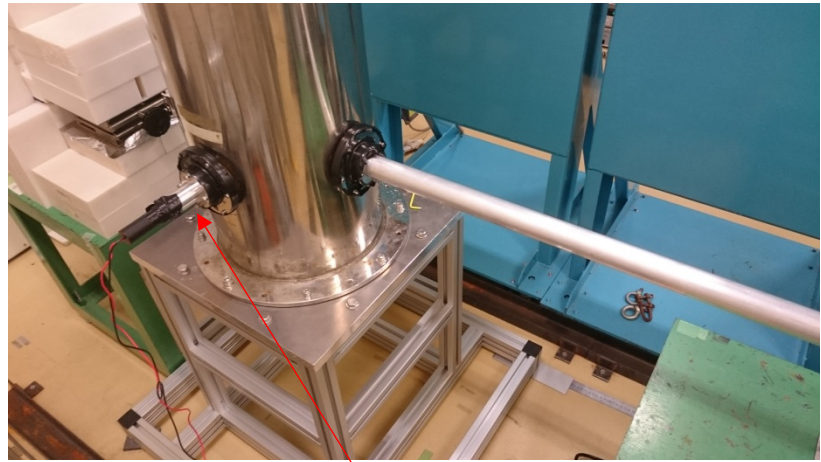
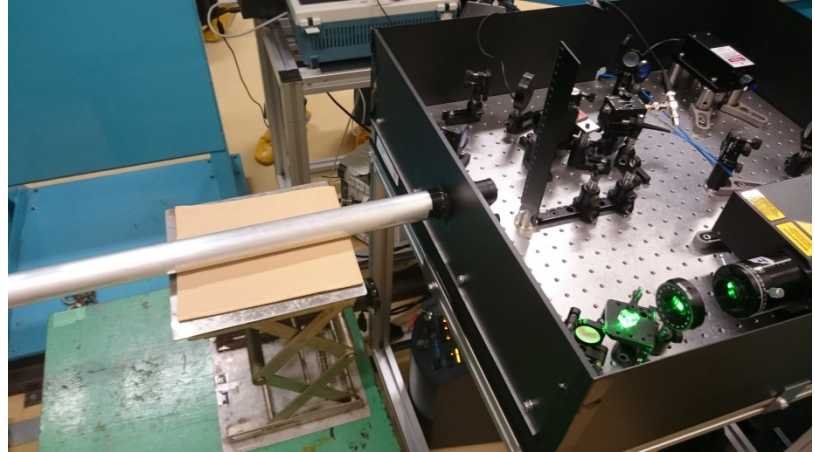
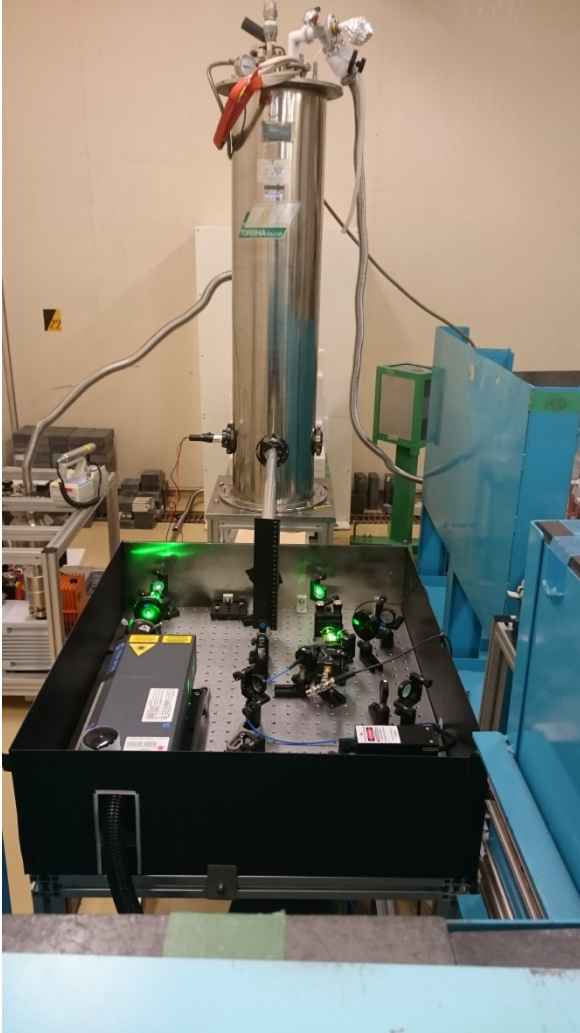
KUR- experiments

November 14-November 16, 2017

Nov.15 : 1MW operation

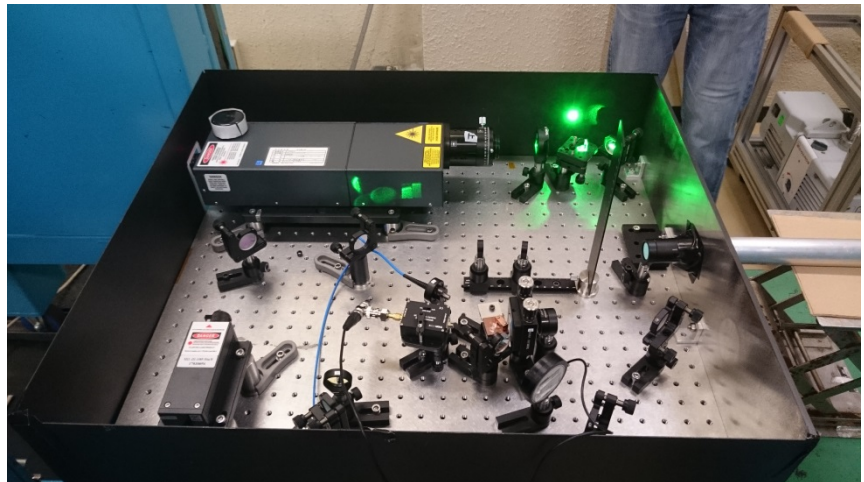
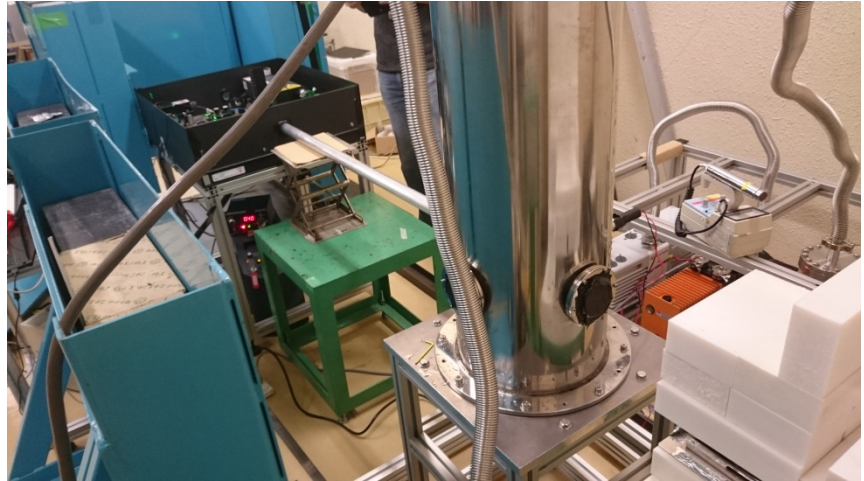
Nov.16 : 5MW operation

Experimental setting

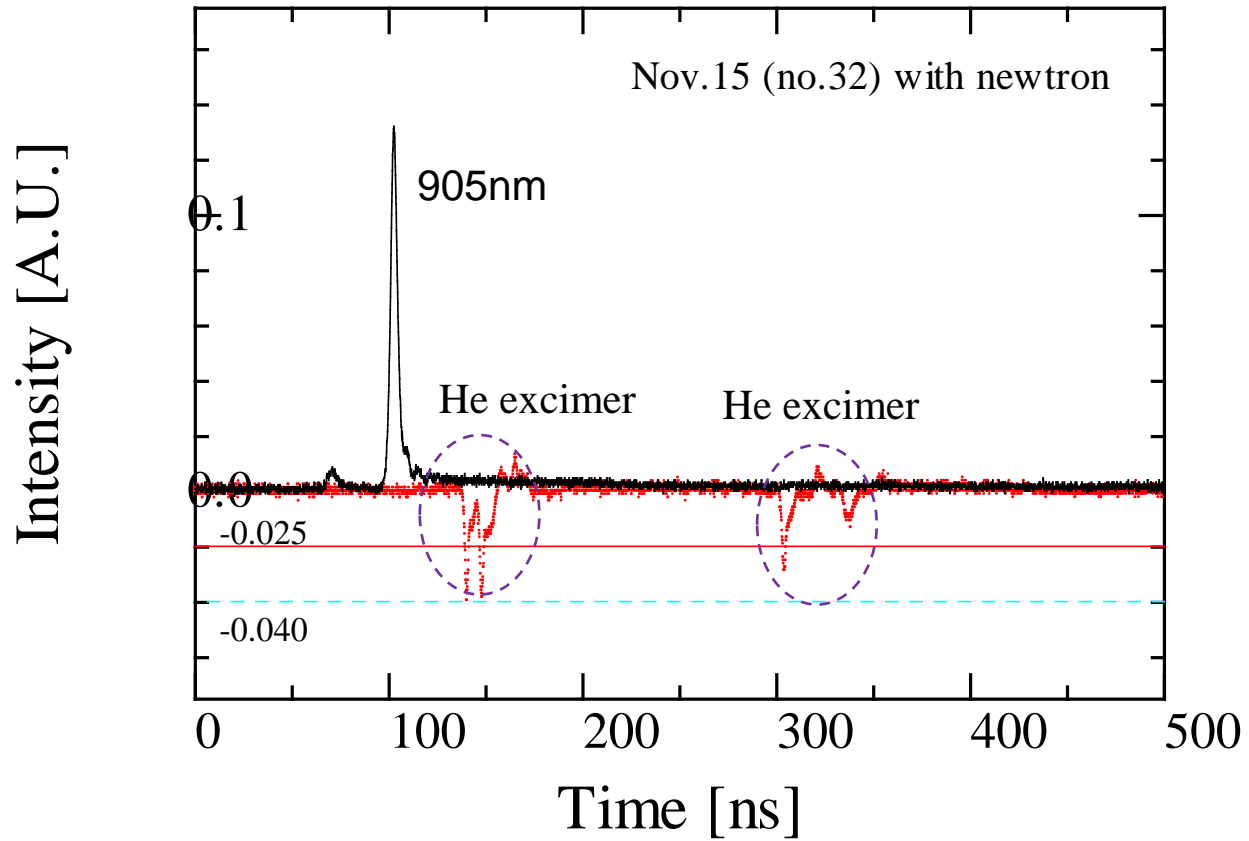


PMT

Experimental setting

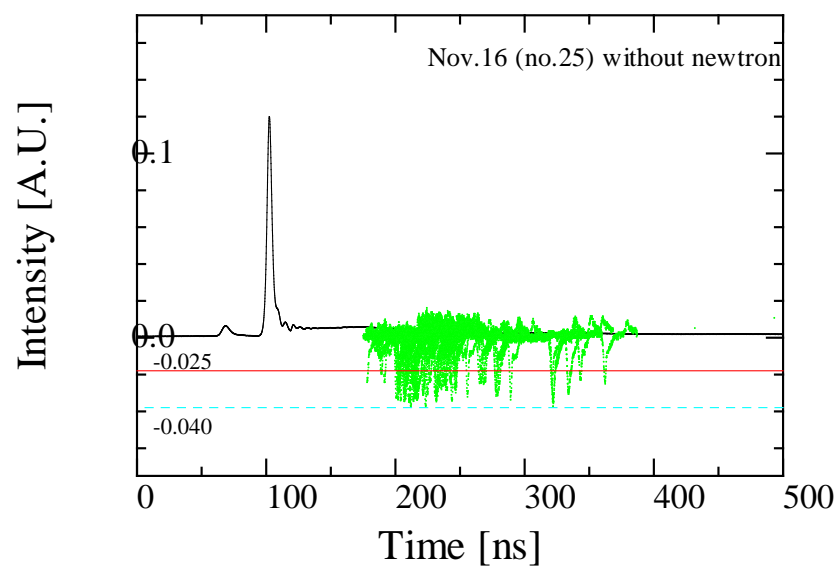
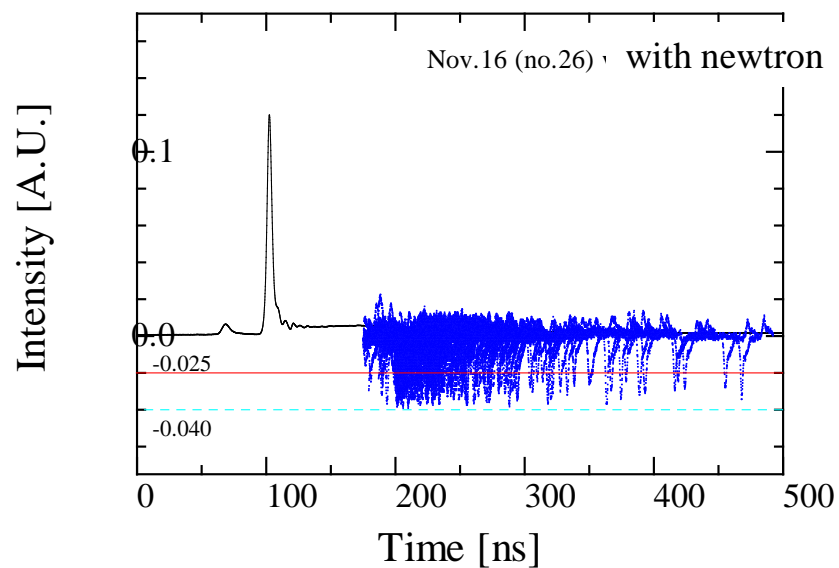


Experiment on November.15



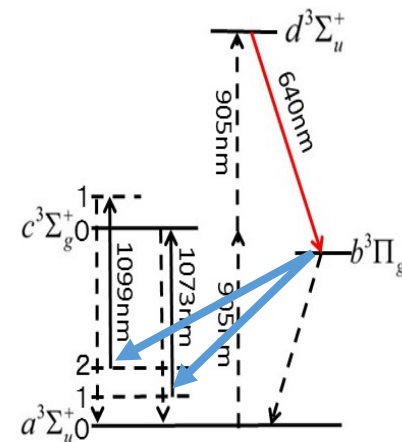
Experiment on November.16

中性子照射のある場合とない場合の比較

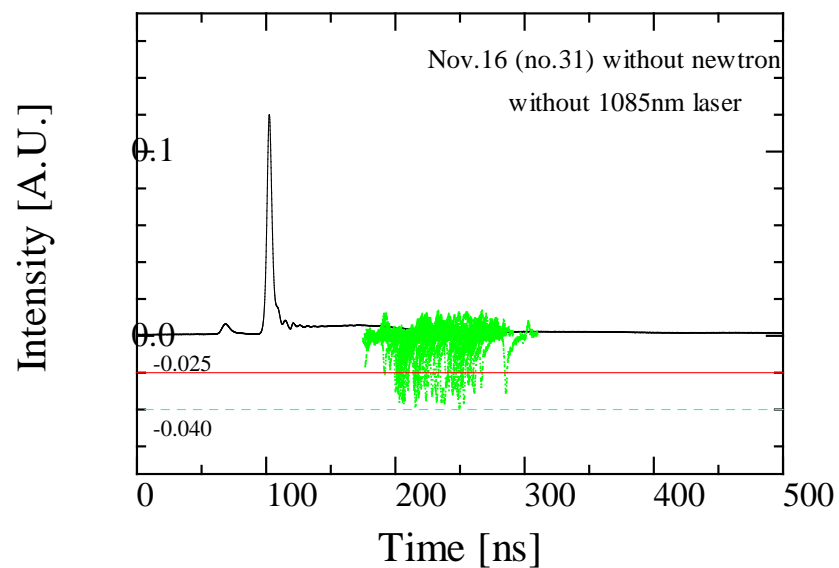
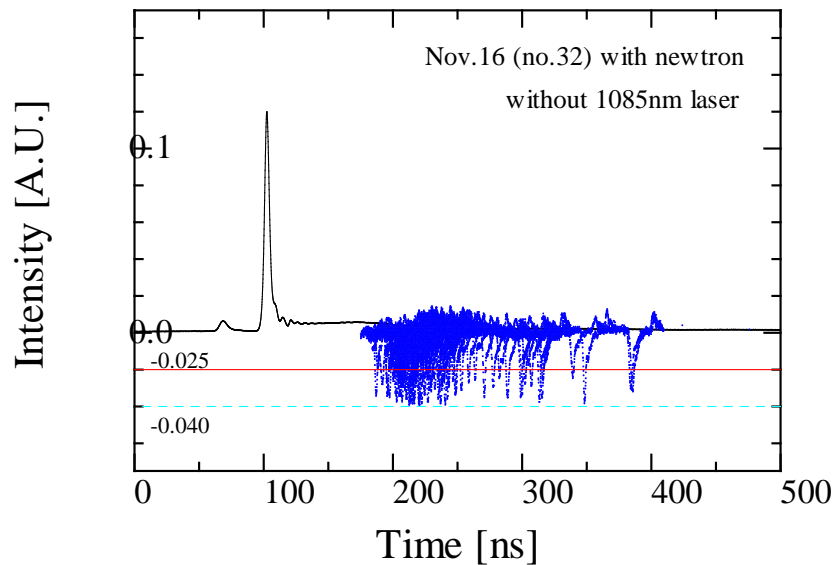


Experiment on November.16

脱励起レーザー（1085nm）のあるなしの比較

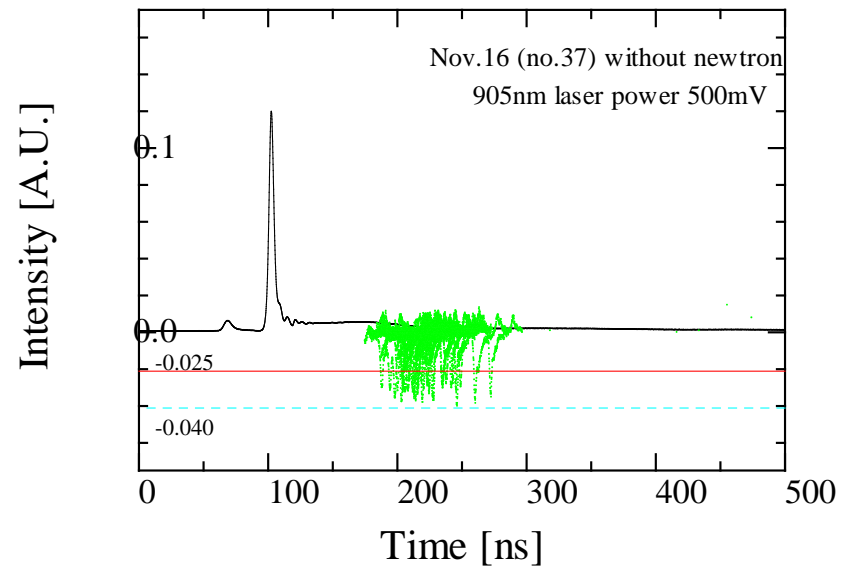
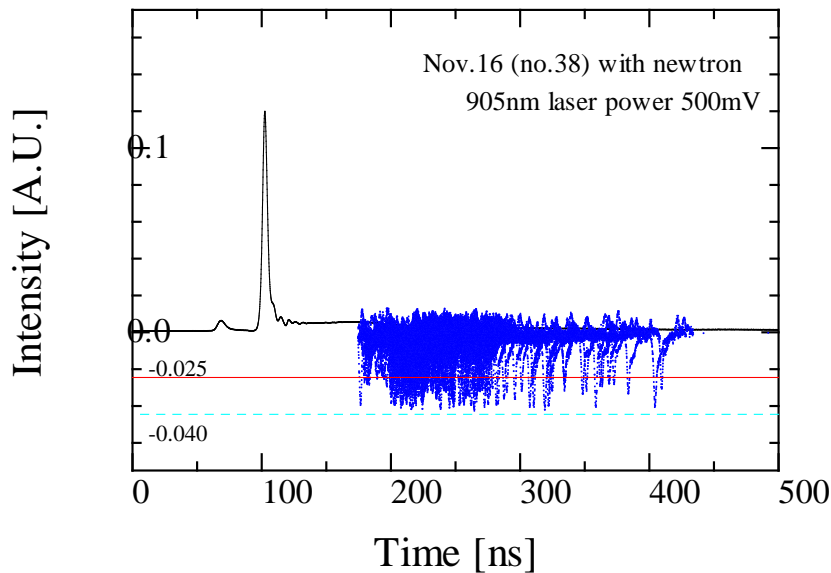


He_2^* の誘起蛍光
[3]

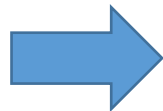


Experiment on November.16

励起レーザー（905nm）のパワーを上げた場合



PMの計測の
定量化



CCDによる可視化