

# Rebuncher 実験

京都大学原子炉実験所 北口雅暁

九大理 吉岡瑞樹

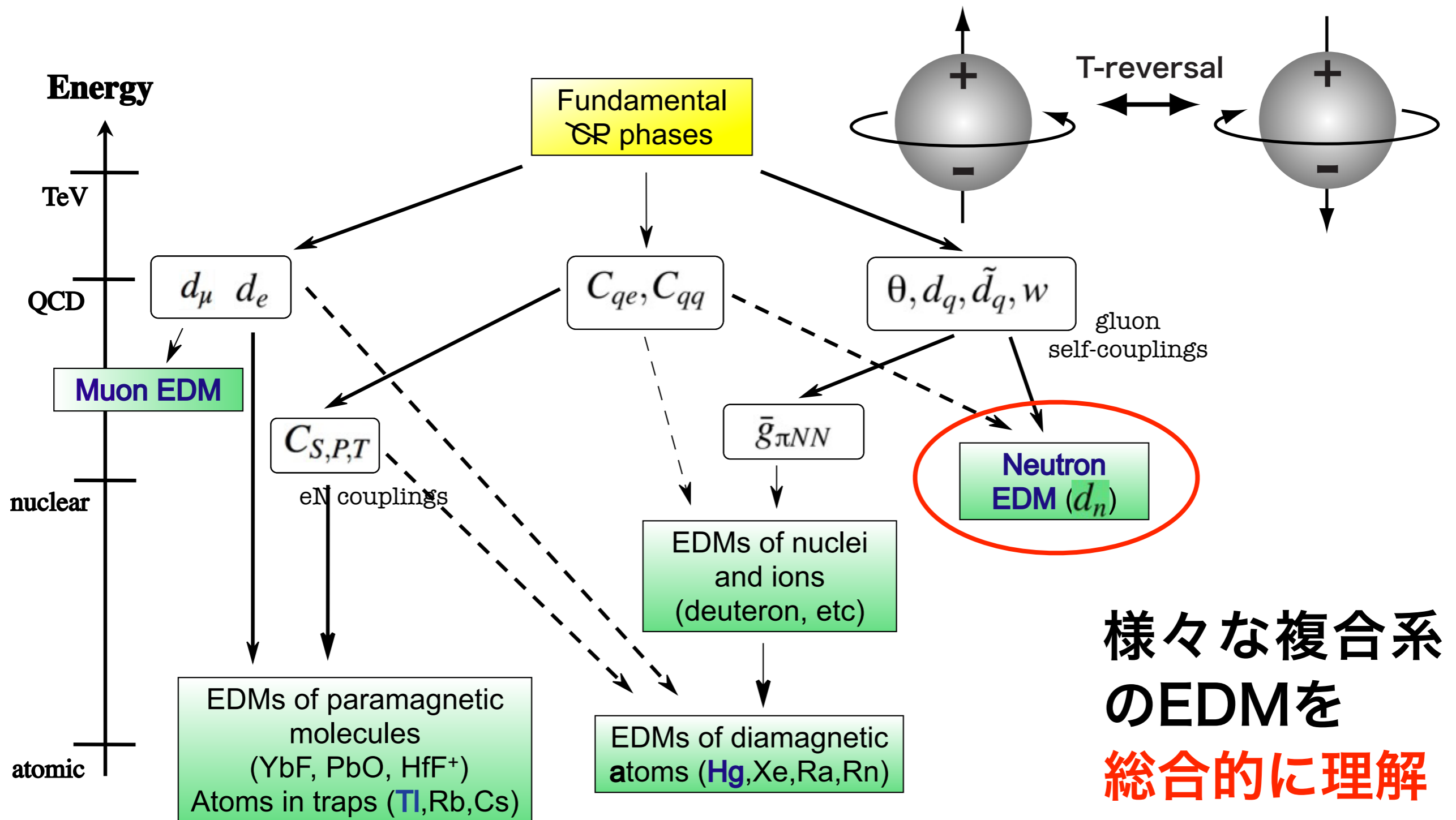
名大理 清水裕彦、KEK 有本靖

京大理 今城想平 京大化研 岩下芳久

東大素粒子国際センター 三島賢二、山下 了

and NOP collaboration

# 中性子電気双極子モーメント

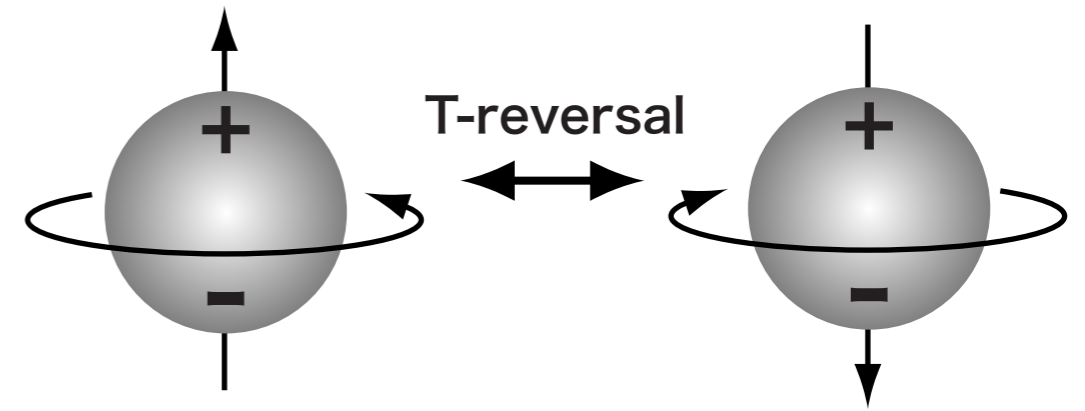
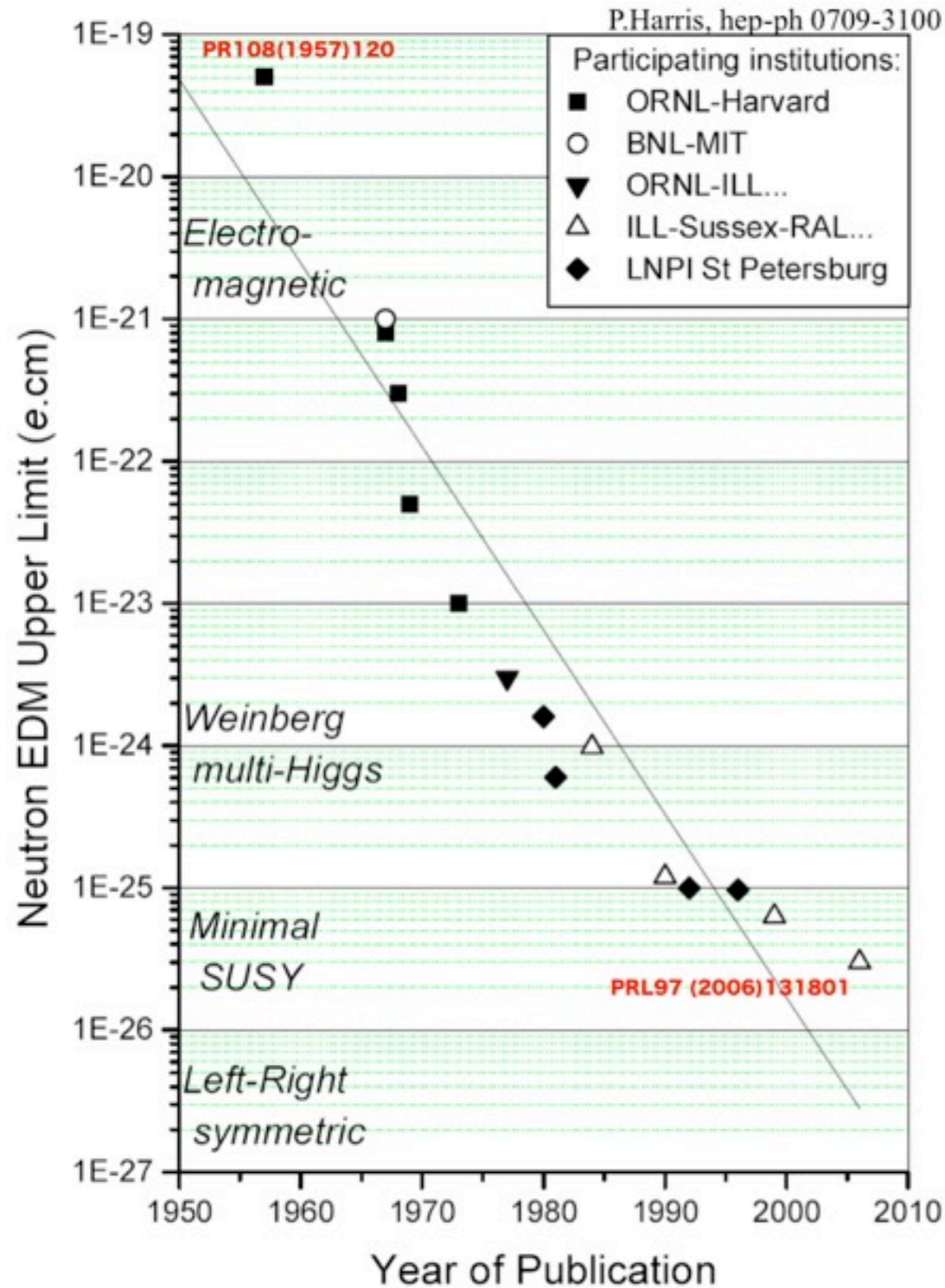


様々な複合系のEDMを  
総合的に理解

Pospelov Ritz, Ann Phys 318 (05) 119



# 中性子電気双極子モーメント



標準模型では  $10^{-32} \text{ e} \cdot \text{cm}$  と観測できないほど小さいが、例えば **SUSY** を仮定すると  $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$  に値を取りうる

現在の上限値は  
 $2.9 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$  と  
**あと一歩！**

(Baker et al., PRL97 (2006) 131801)

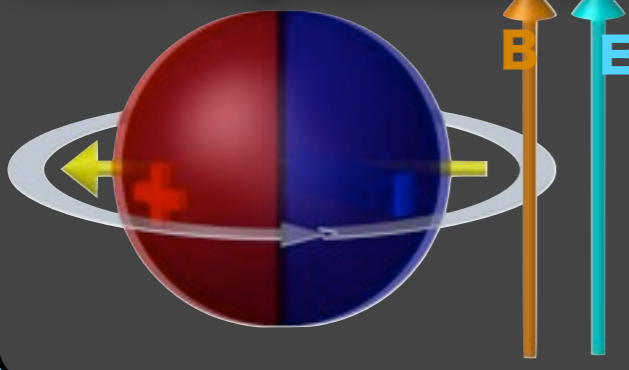


# 中性子電気双極子モーメント

スピンをそろえた**超冷中性子**を容器に貯蔵し、電場と磁場を印可し  
**スピン歳差回転**を蓄積し、電場の向きによる回転数の変化を見る。

$$d_n = (+0.2 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})) \times 10^{-26} \text{e} \cdot \text{cm}$$

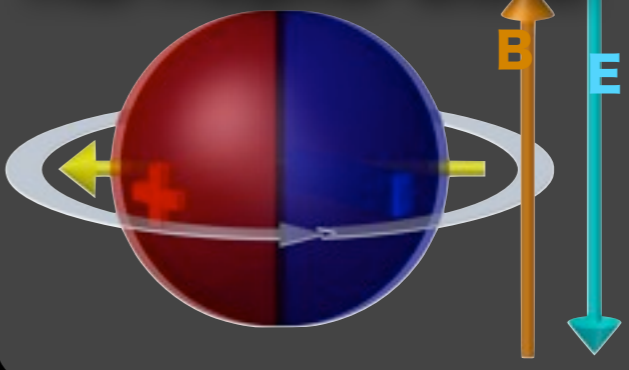
$\hbar\omega_+ = 2\mu_n B + 2d_n E$



$\Delta\phi = \int (\omega_+ - \omega_-) dt = \frac{2d_n E T}{\hbar}$

$B = 1 \mu\text{T}$   
 $E = 10^4 \text{ V/cm}$   
 $T = 100 \text{ s}$

$\hbar\omega_- = 2\mu_n B - 2d_n E$



$$\frac{\omega_{\pm}}{2\pi} = 3 \times 10^1 \frac{B}{1 \mu\text{T}} \pm 5 \times 10^{-8} \frac{d_n}{10^{-26} \text{e} \cdot \text{cm}} \frac{E}{10 \text{ kV/cm}}$$

magnetic

30 Hz

1  $\mu\text{T}$

electric

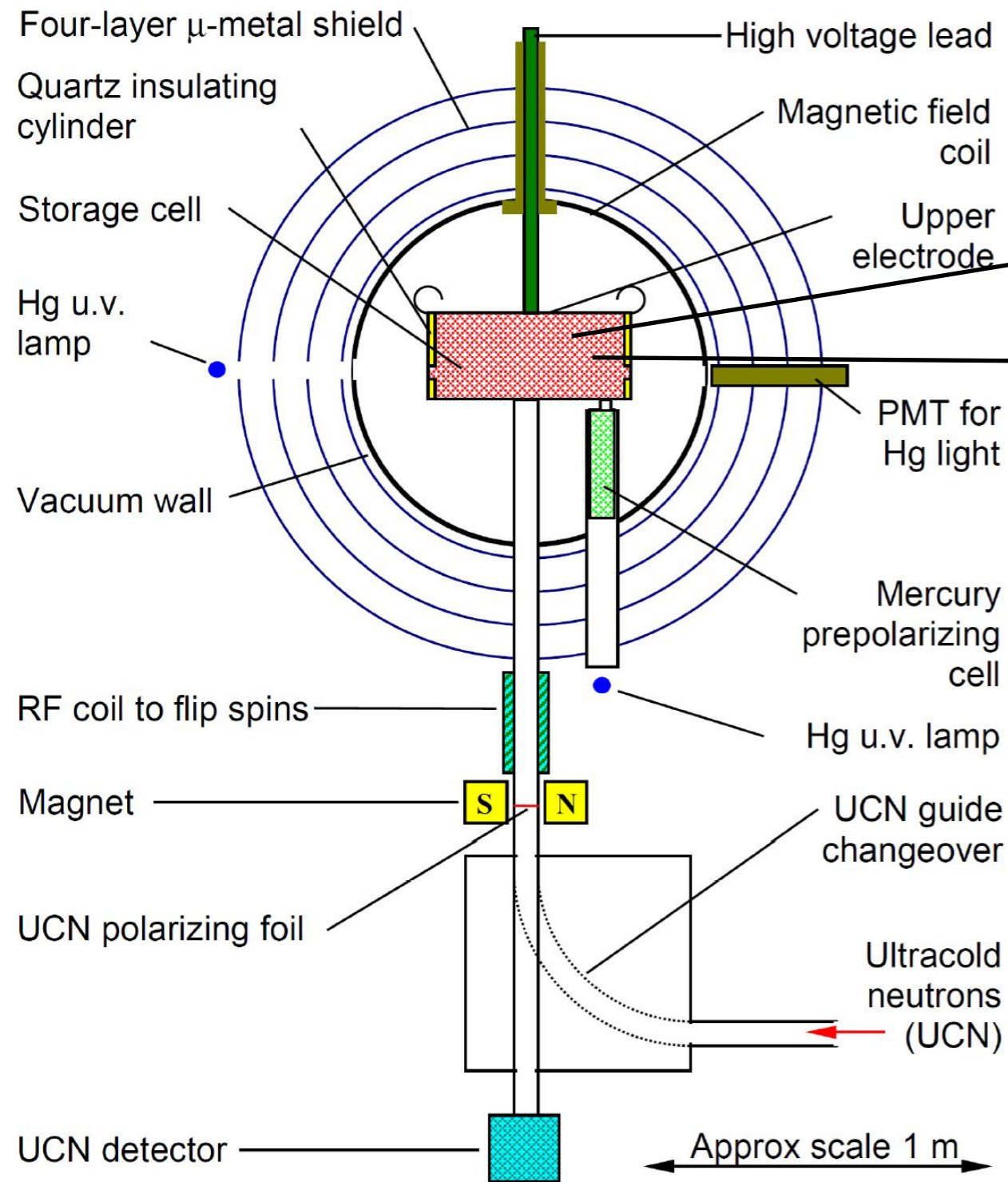
50 nHz

1 fT equiv.

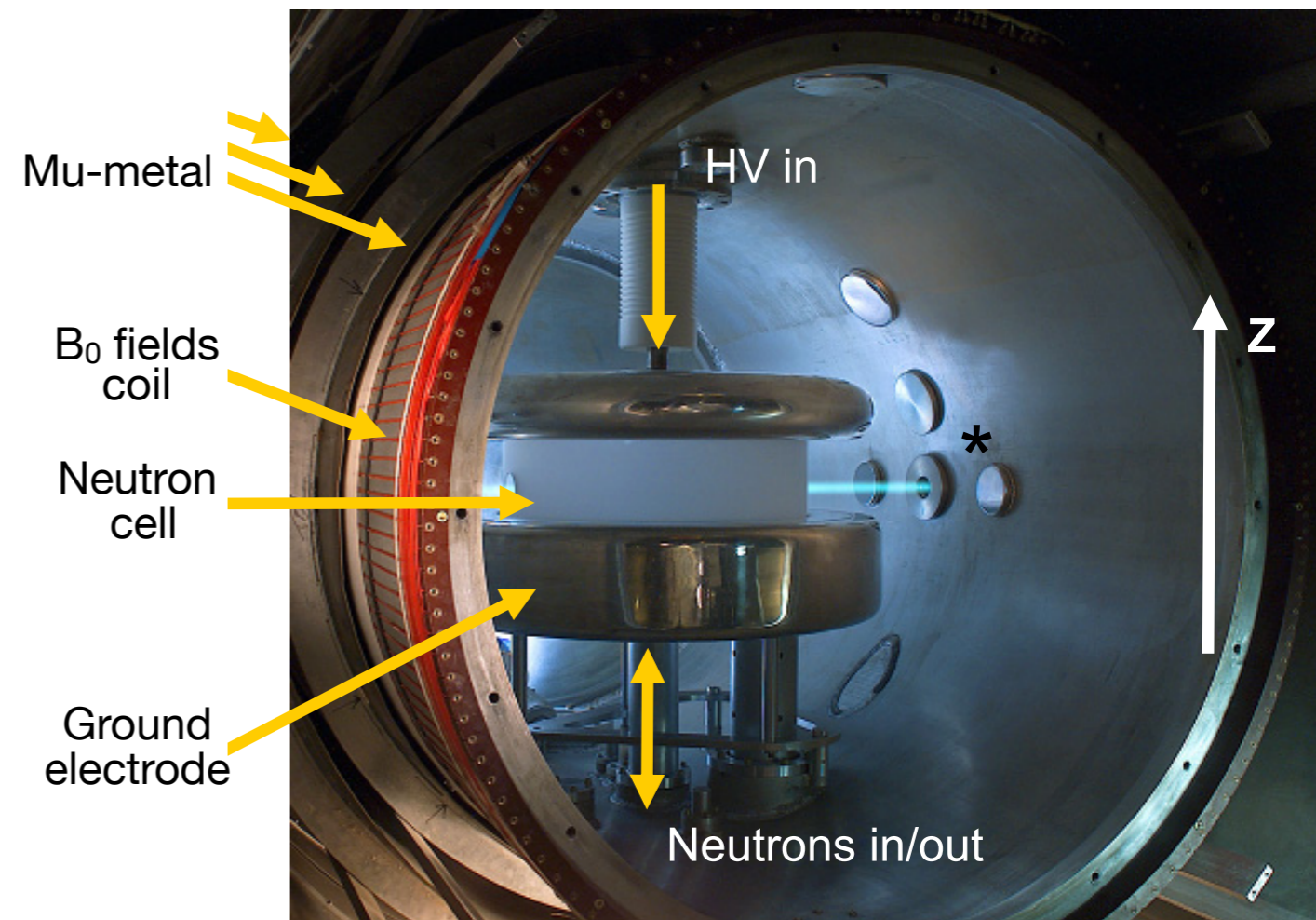
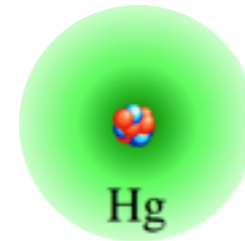


# 中性子電気双極子モーメント

ILL実験



内部の磁場を測定するために  
Hg ガスを入れている



2012年2月27日 KURRI  
中性子制御デバイスとその応用V



# 中性子電気双極子モーメント

これまでの測定の上限

$< 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$

## 系統誤差の大きな原因

← 電場磁場の精度  
(測定精度)

	Effect	Shift	$\sigma$ at ILL	$\sigma$ at PSI	$\sigma$ at J-PARC (storage volume 1000 cm <sup>3</sup> )
a	Door cavity dipole	-5.6	2.0	0.10	0.036
b	Other dipole fields	0.0	6.0	0.40	0.144
c	Quadrupole difference	-1.3	2.0	0.60	0.216
d	Uncompensated B drift	0.0	2.4	0.90	0.324
e	Leakage currents	0.0	0.1	0.10	0.036
f	$v \times E$ (translational)	0.0	0.03	0.03	0.03
g	$v \times E$ (rotational)	0.0	1.00	0.10	0.10
h	Second-order $v \times E$	0.0	0.02	0.02	0.02
i	$\nu_{\text{Hg}}$ light shift (geo phase)	3.5	0.8	0.40	0.20
j	$\nu_{\text{Hg}}$ light shift (direct)	0.0	0.2	0.20	0.072
k	Hg atom EDM	-0.4	0.3	0.06	0.06
l	Electric forces	0.0	0.4	0.40	0.14
m	ac fields	0.0	0.01	0.01	0.01
Total		-3.8	7.2	1.31	0.67

Table 1: Summary of systematic errors ( $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$ ).

磁場測定のための磁束計が UCN 蓄積領域に入れない (近づけてない)

UCN 蓄積領域をなるべく小さくして、なるべく近くで測定する

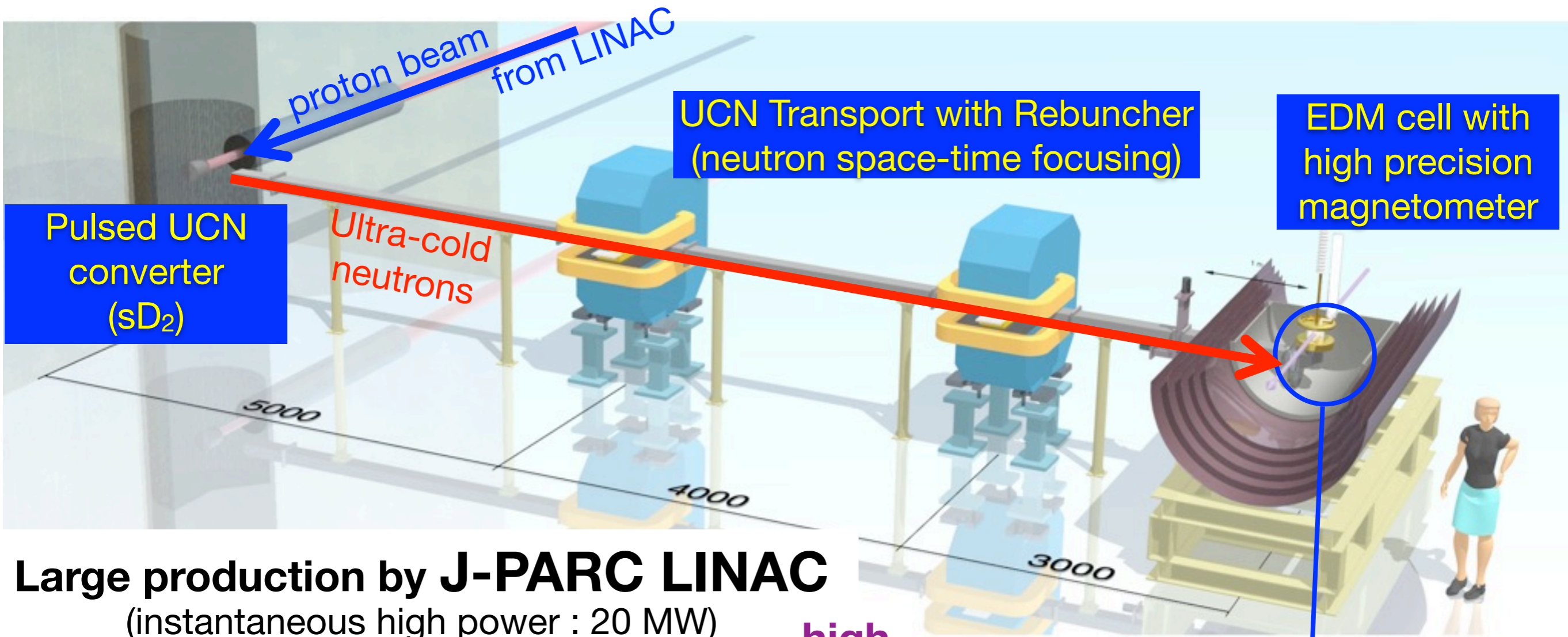
幾何的な効果を小さくする

統計をあげるためには、**UCN の密度**を向上する必要がある

## J-PARC に高密度UCN源を



# nEDM at J-PARC



**Large production by J-PARC LINAC**  
(instantaneous high power : 20 MW)

+  
**Transport optics**  
(focusing with pulsed neutron decelerator)

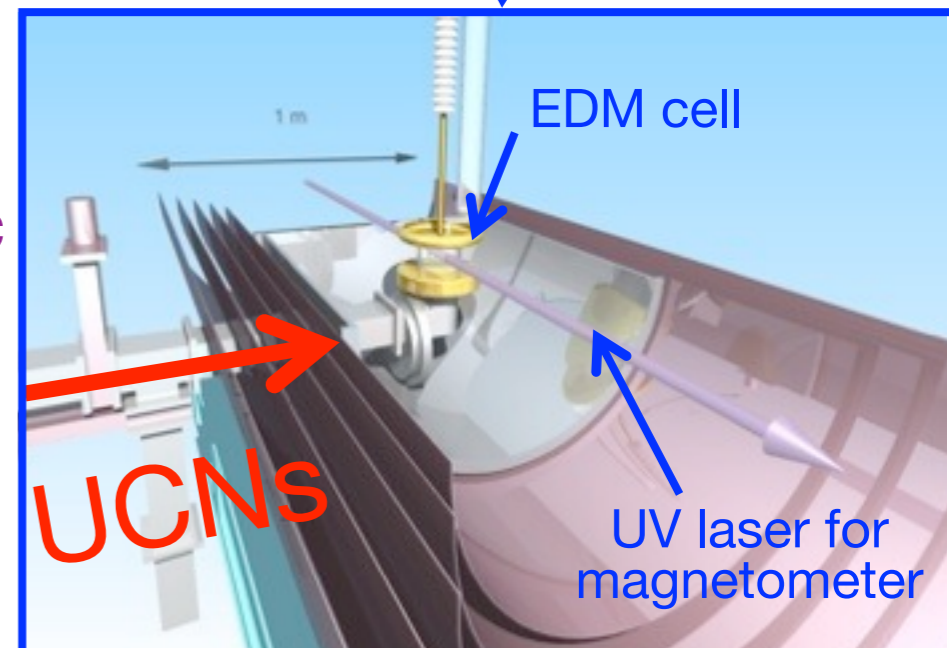
+  
**High precision measurement**  
(magnetometer using UV laser)

➔  $10^{-27}$  e cm (phase1, 5 years)

➔  $10^{-28}$  e cm (phase2)

high density

small systematic errors

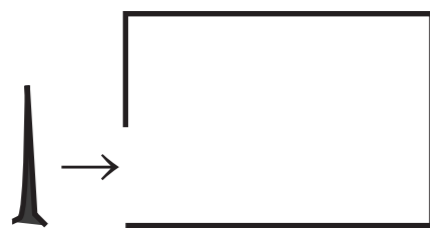
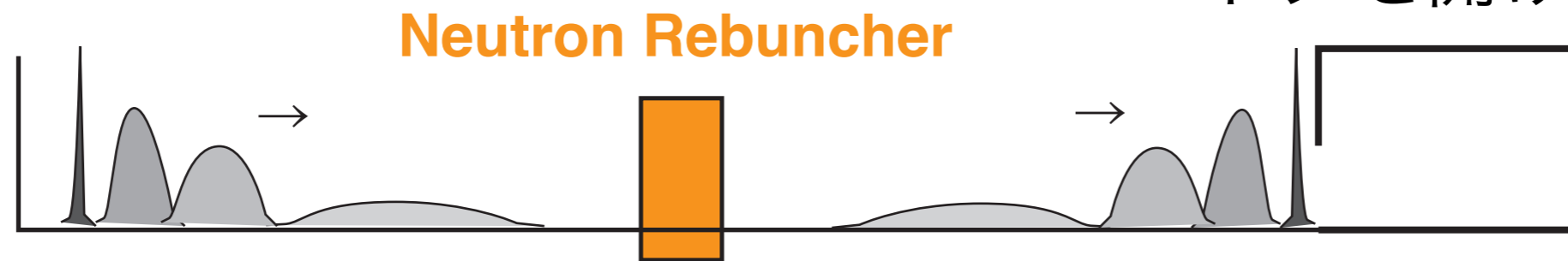


# UCN Rebuncher

## 中性子を時間的に集束させるデバイス

パルス状に発生するが、単純に取り出すと輸送の間に広がってしまう

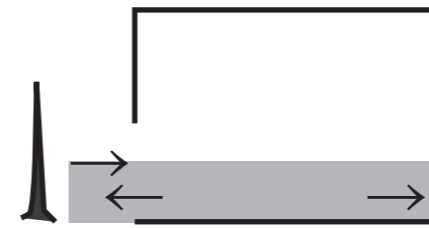
パルスが来たときだけ  
ドアを開ける



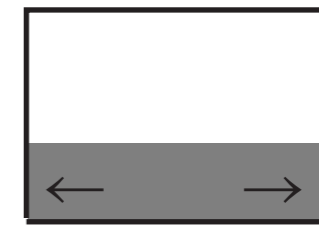
take in pulsed UCN while door is open



the door closes, UCNs broaden in the bottle



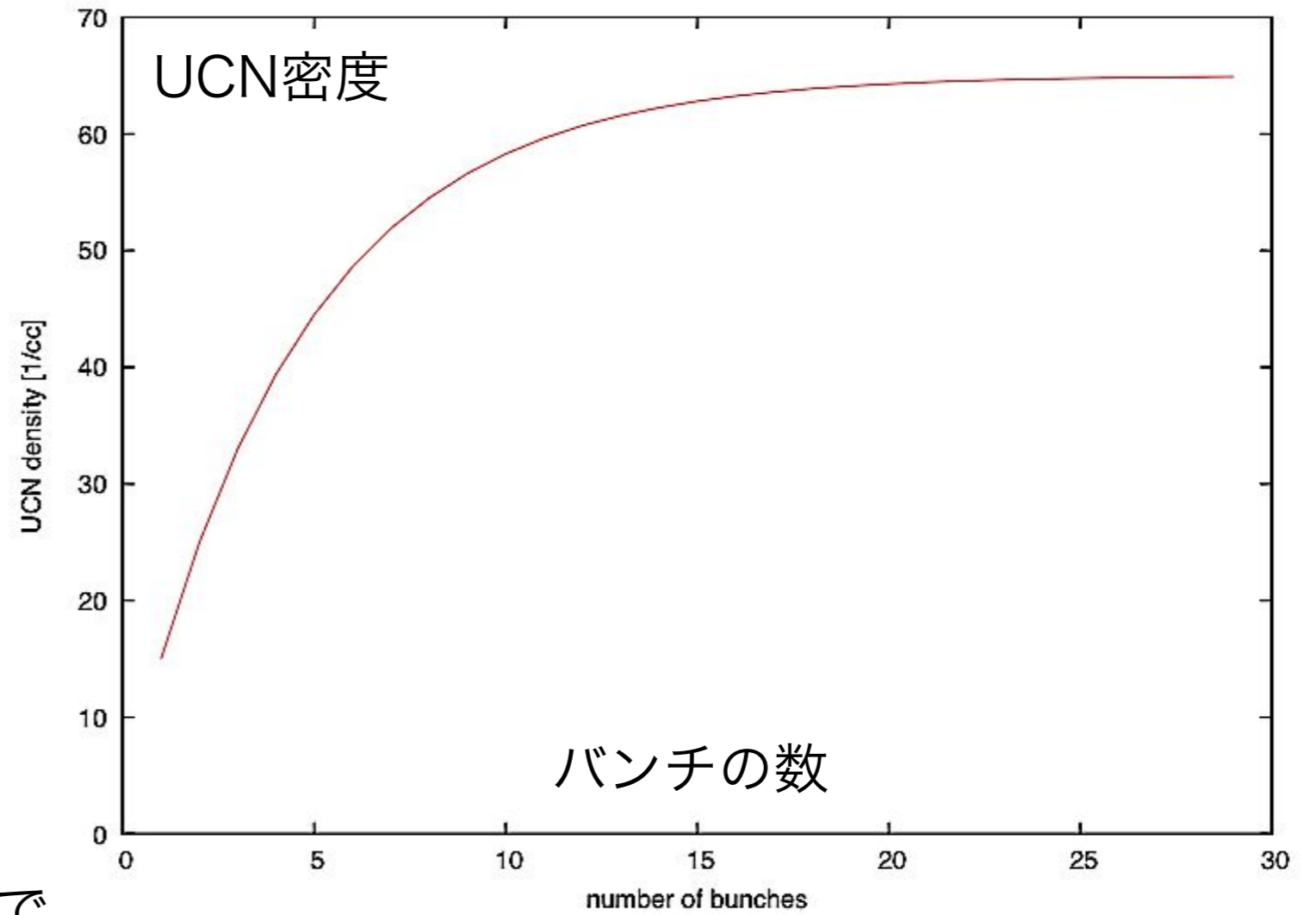
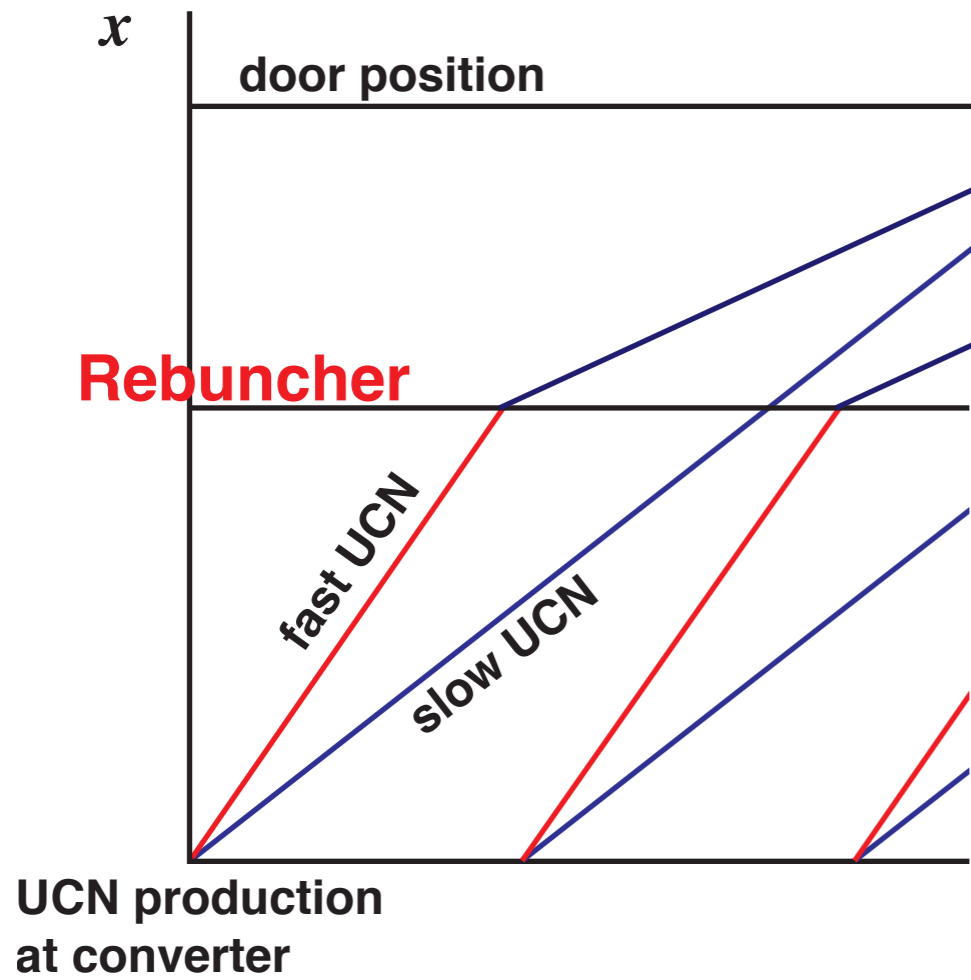
take in next pulsed UCN. some UCNs overflow, the others stay.



the door closes, the density increases by the pulse



# UCN Rebuncher



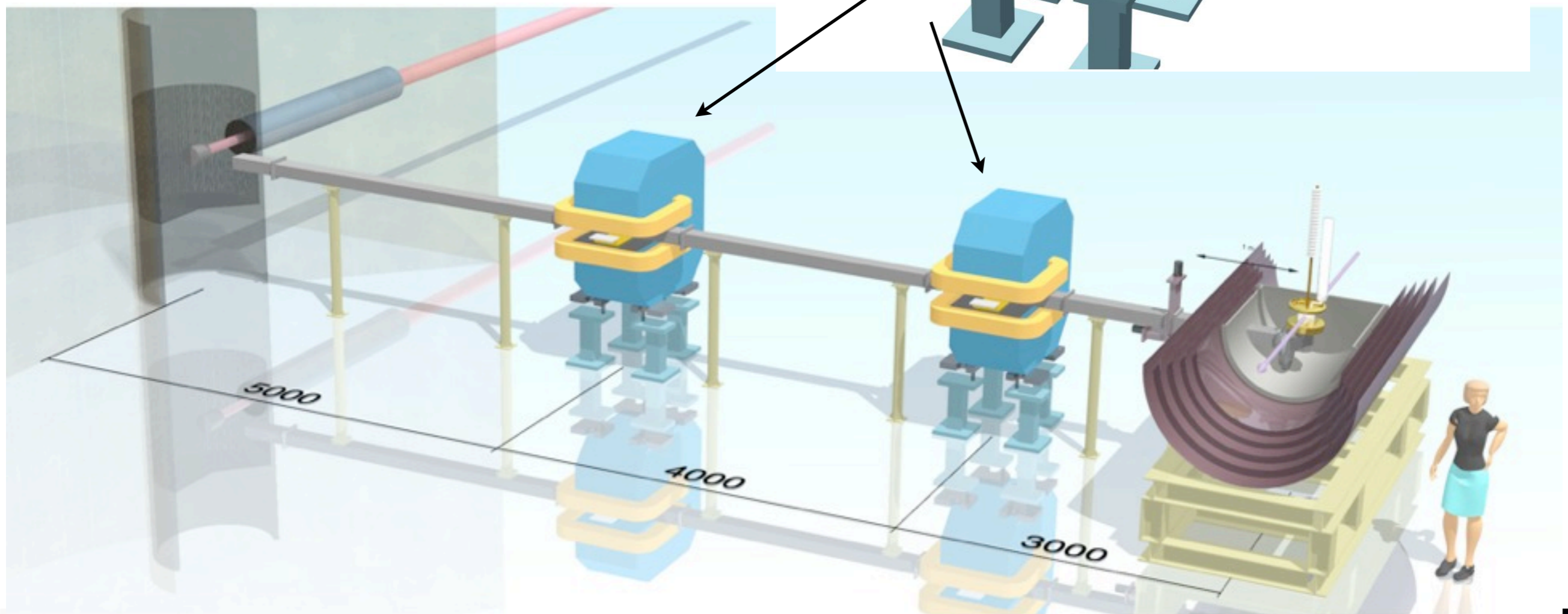
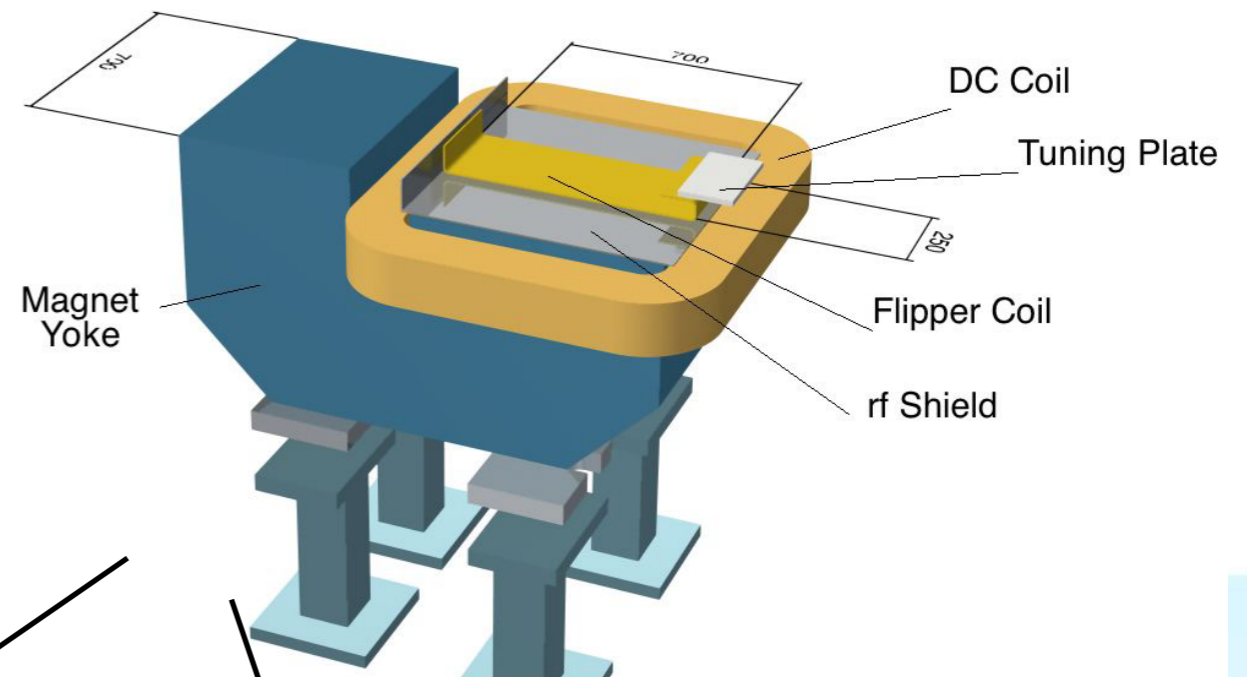
バンチ入射ごとに密度向上  
こぼれ出る量が等しくなるまで



# UCN Rebuncher

## AFP spin flipper

静磁場と共鳴条件を満たすRF磁場を通過すると、スピンの反転し、エネルギーを交換する

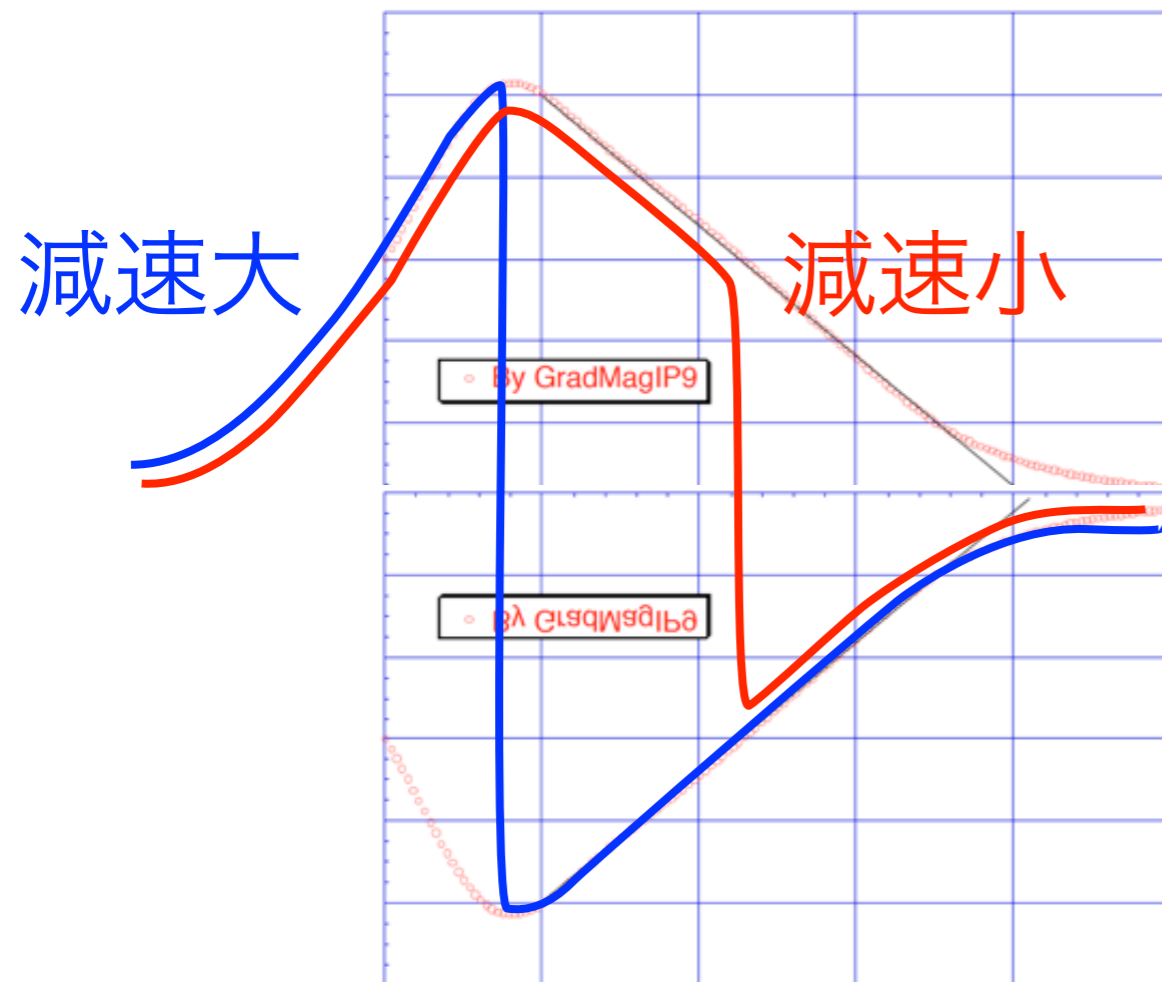


# UCN Rebuncher

## AFP spin flipper

静磁場と共鳴条件を満たすRF磁場を通過すると、スピンの反転し、エネルギーを交換する

交換されるエネルギーは周波数に比例



速い中性子は先にrebuncherに到達

減速量大 = 高周波

遅い中性子は遅れてrebuncherに到達

減速量小 = 低周波

時間に応じて

周波数を変化させる



# UCN Rebuncher

$$\phi = 1.2 \text{ cm}^{-3} (\text{m/s})^{-3} (2\text{Hz})$$



30% rebuncher design was finished in Jun. 2010

**prototype rebuncher**

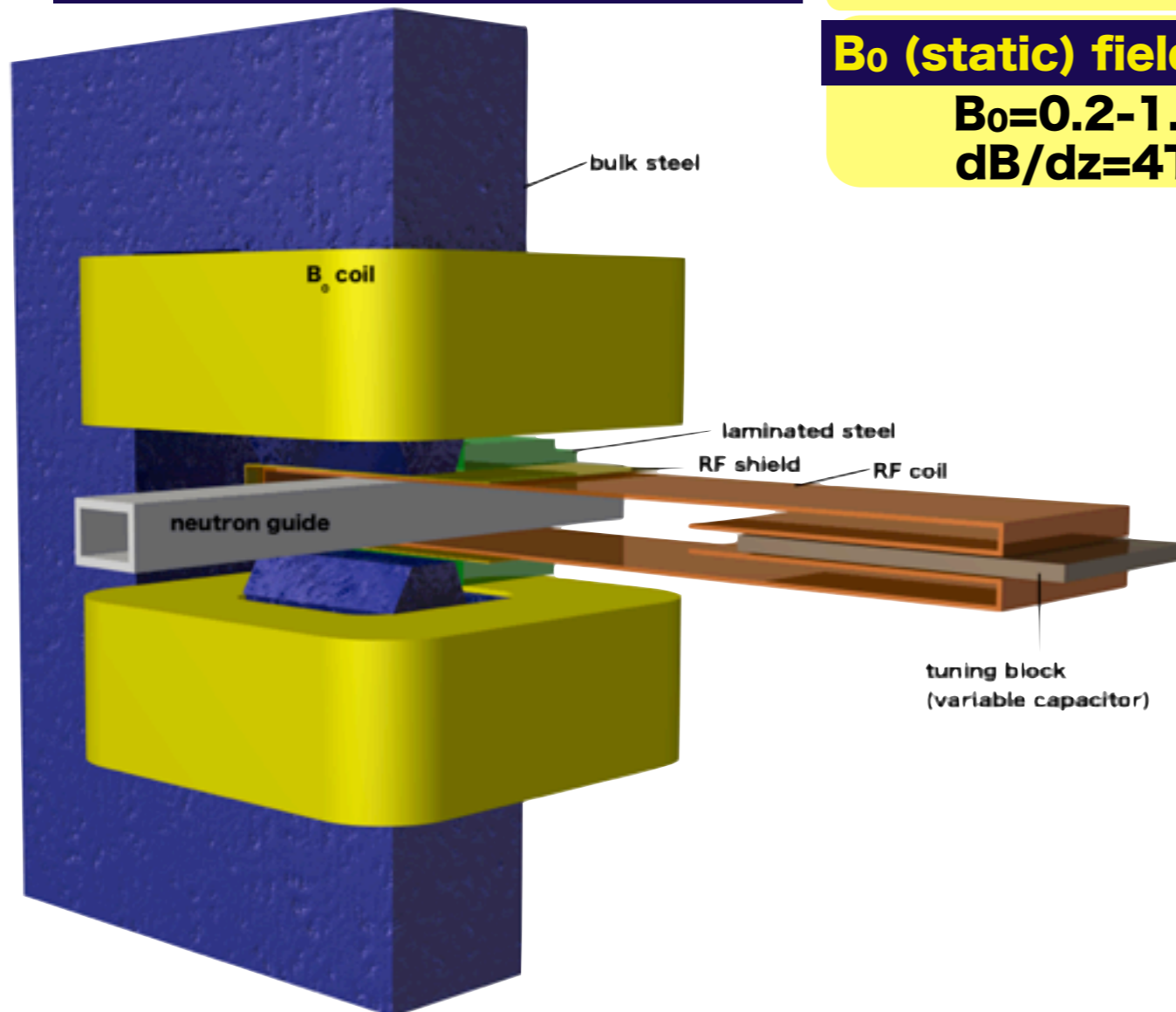
$4 < v < 7.2 \text{ m/s}$ ,  $L_{\text{focus}} = 12\text{m}$  repetition = 2Hz

**$B_0$  (static) field**

$B_0 = 0.2 - 1.0\text{T}$  ( $0 < z < 0.25\text{m}$ )  
 $dB/dz = 4\text{T/m}$

**$B_1$  (RF) field**

$\omega/2\pi = 6 - 30\text{MHz}$   
 $B_1 = 1\text{mT}$



**Adiabaticity**

$$K^2 = \frac{\omega_{\text{Larmor}}}{\omega_B} = \frac{\gamma_n B_1^2}{v_n (\partial B / \partial z)} \geq 6.5 \quad (v_n \leq 7.2\text{m/s})$$

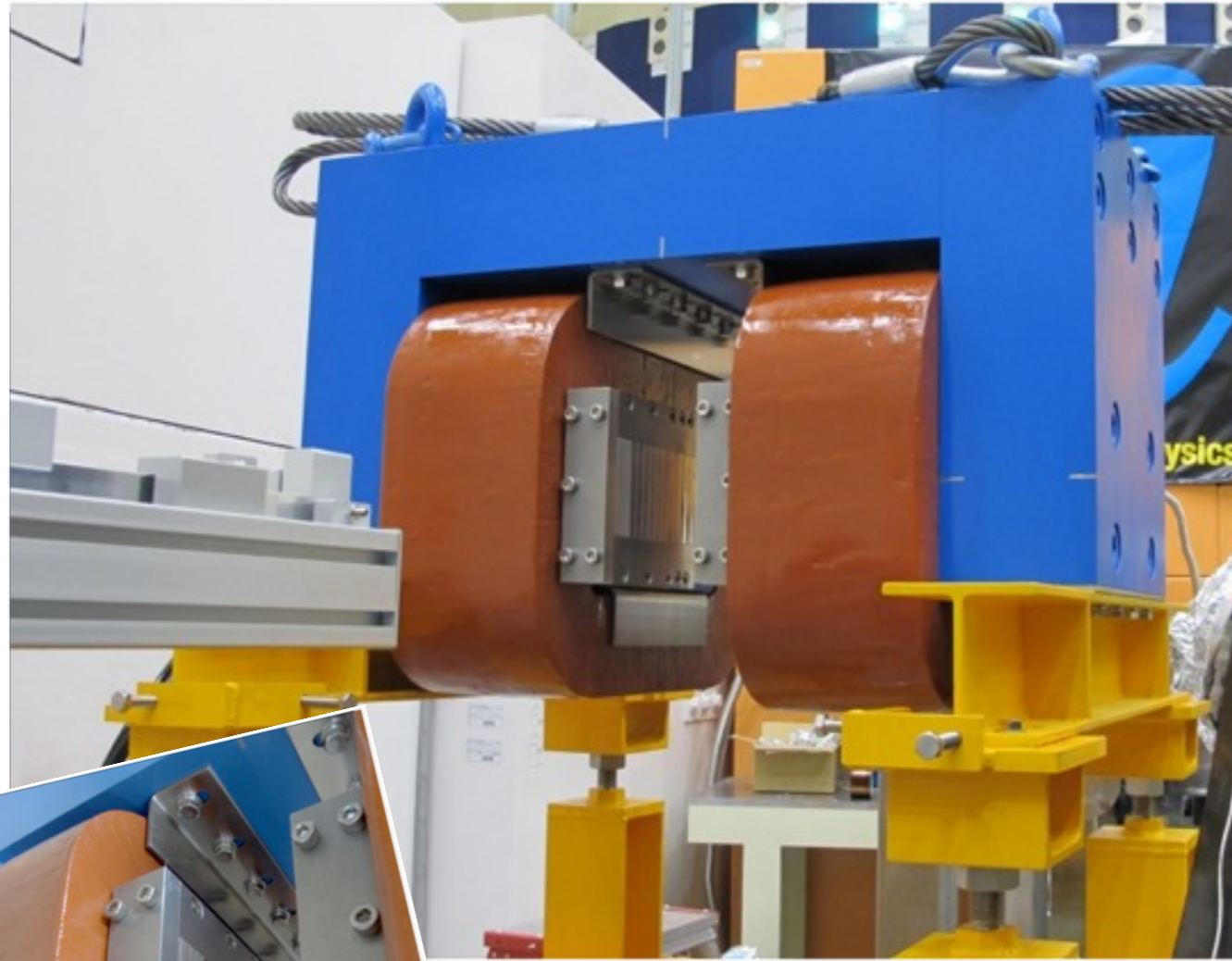
adiabatic condition is sufficiently fulfilled to deliver the spin flip efficiency of 0.99 (NIMA369(1996)195)

improved version is under study



# UCN Rebuncher

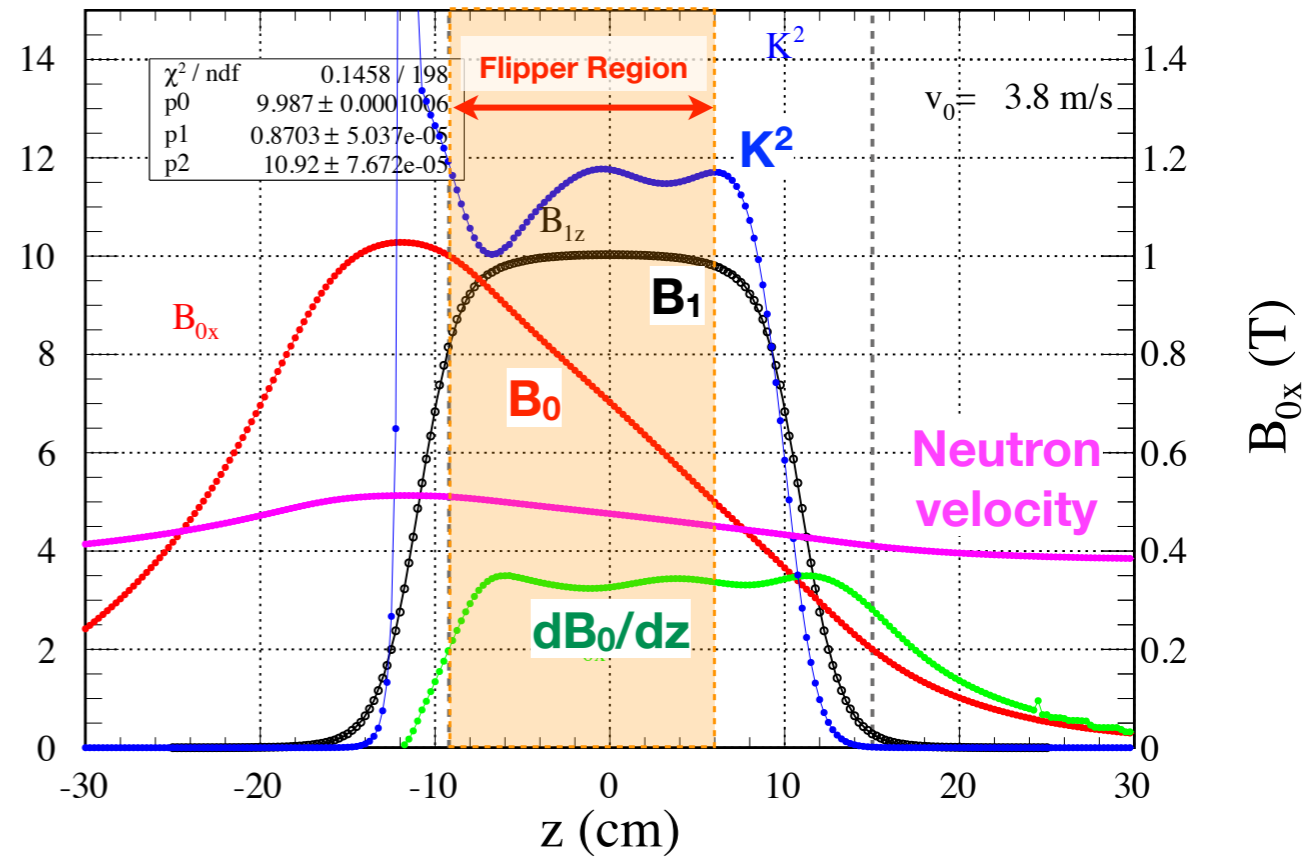
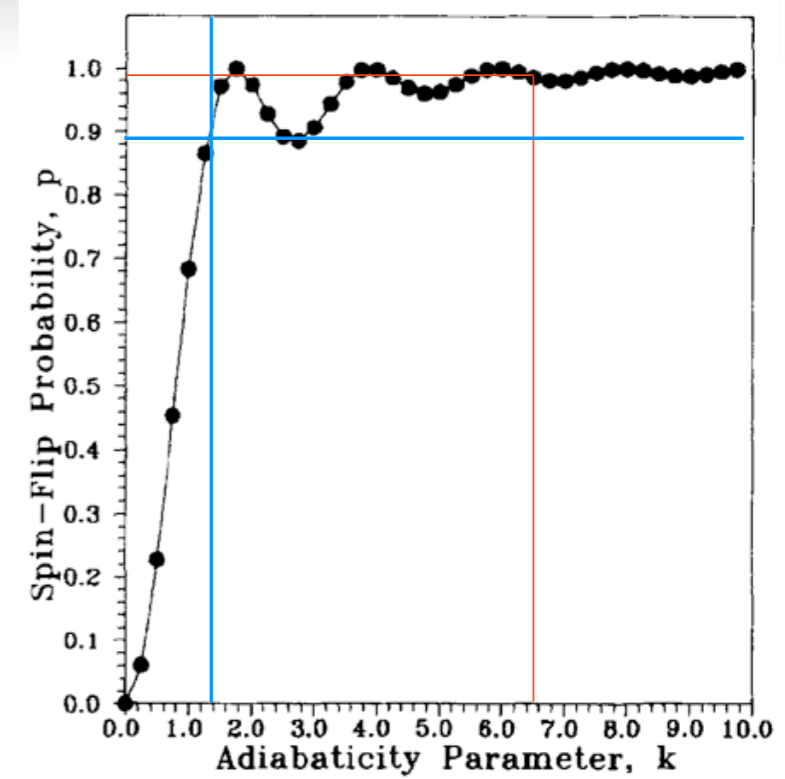
## 実証機



所定の精度の磁場を確認

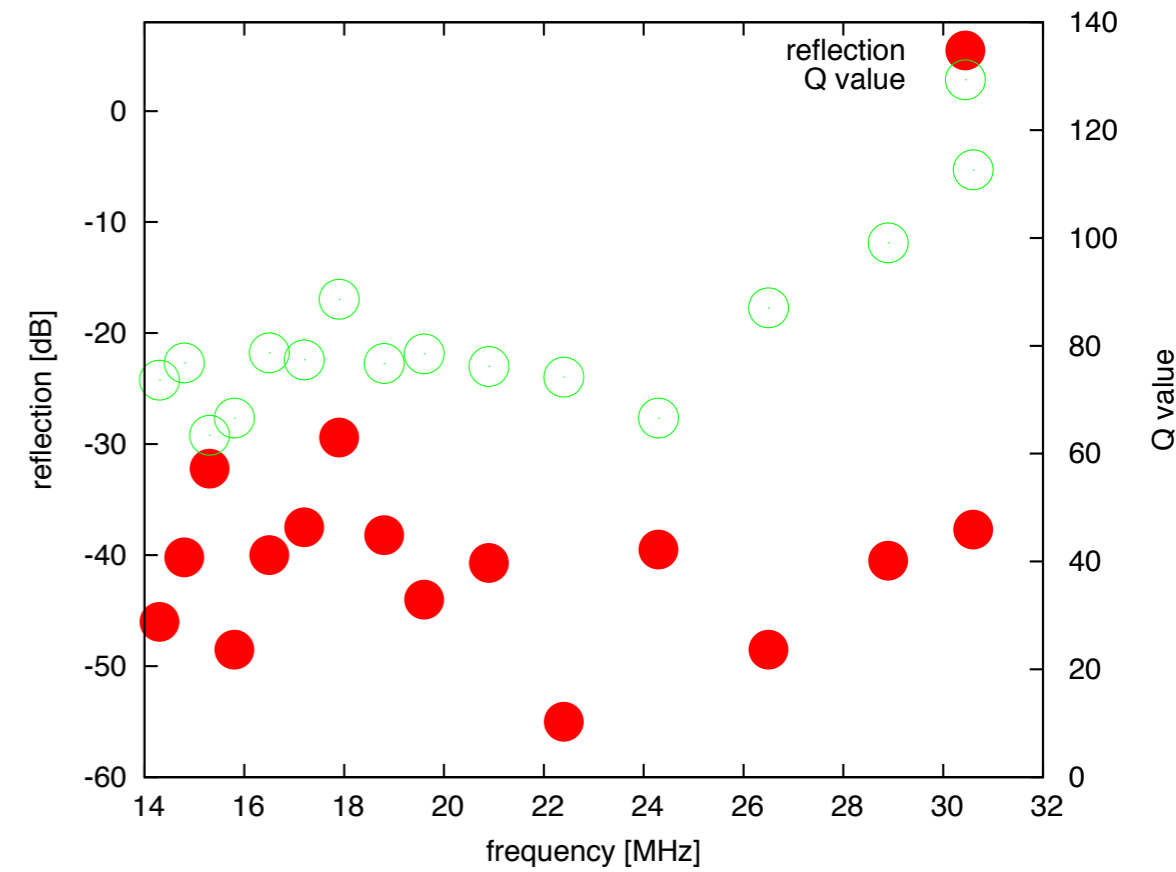
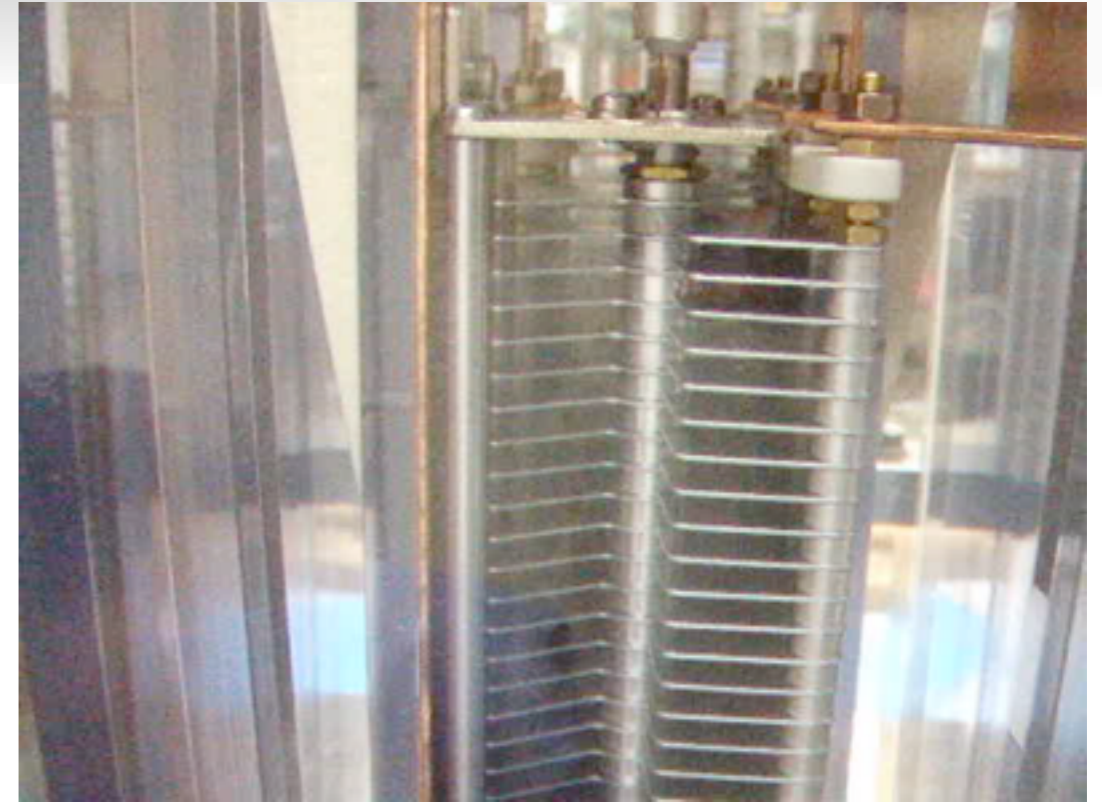
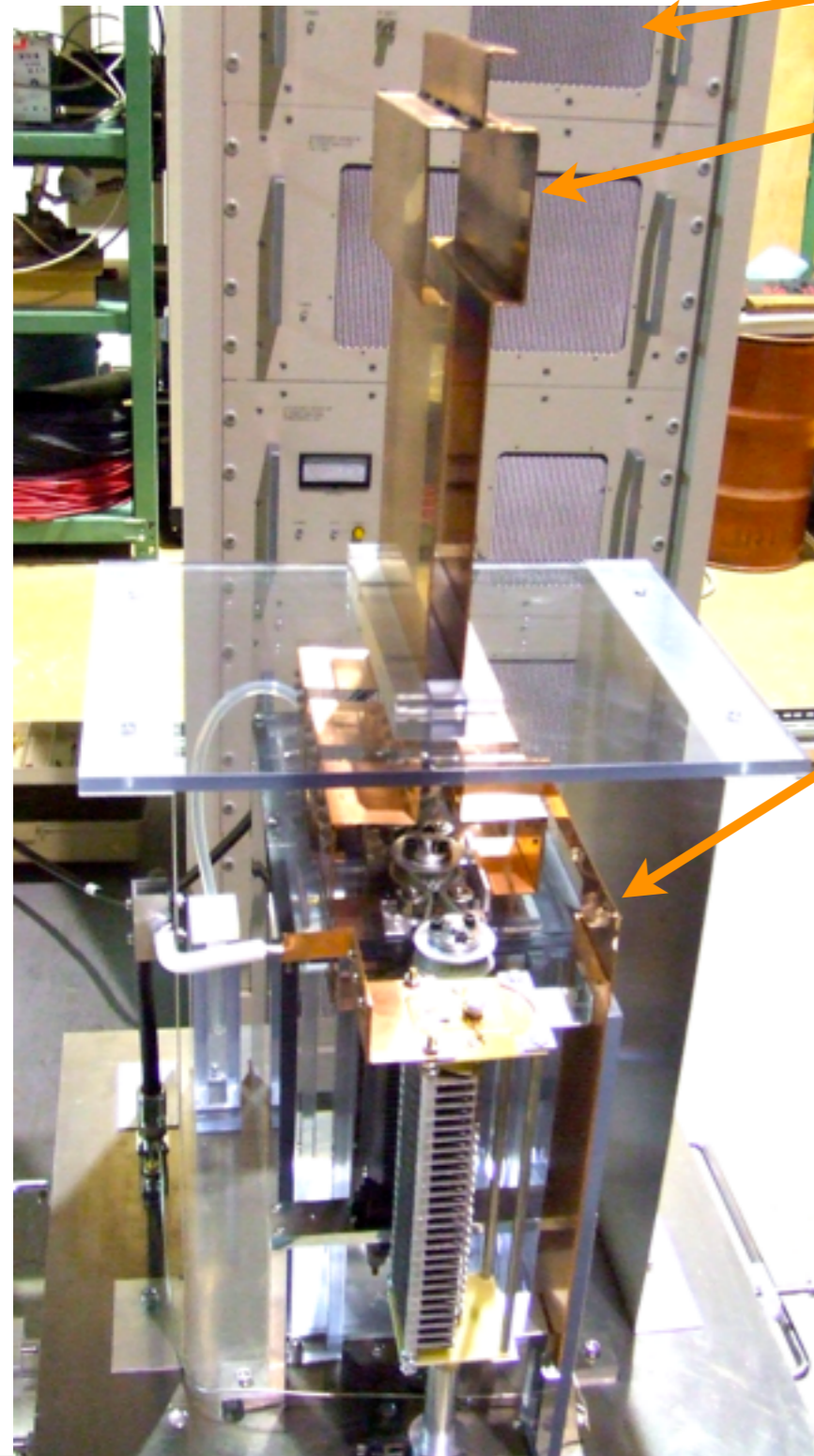
異方性中間磁極

$$K^2 = \frac{\omega_{\text{Larmo}}}{\omega_B} = \frac{\gamma_n B_1^2}{v_n \partial B_0 / \partial z}$$



# UCN Rebuncher

## 実証機



# UCN Rebuncher

## 実証機

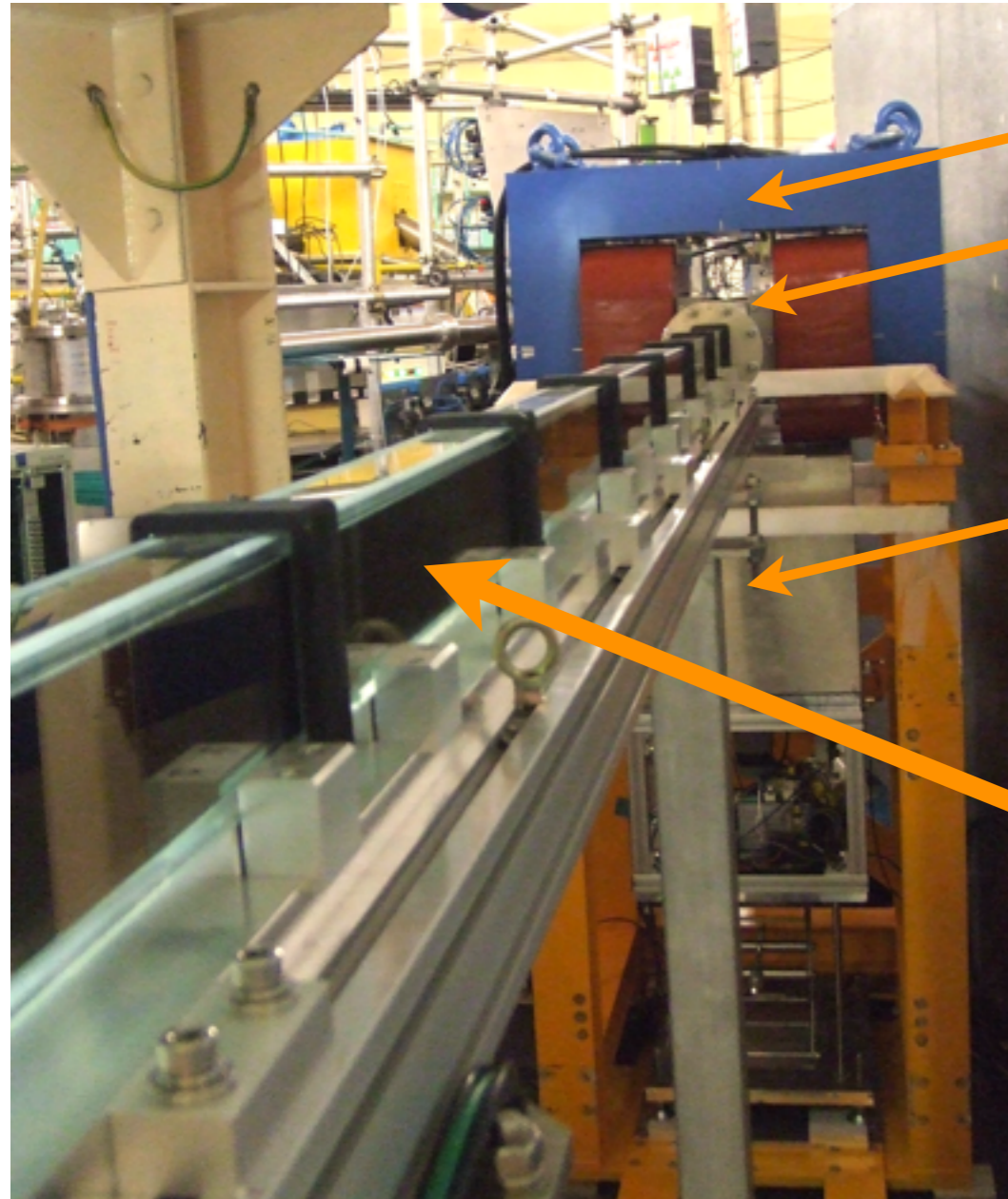
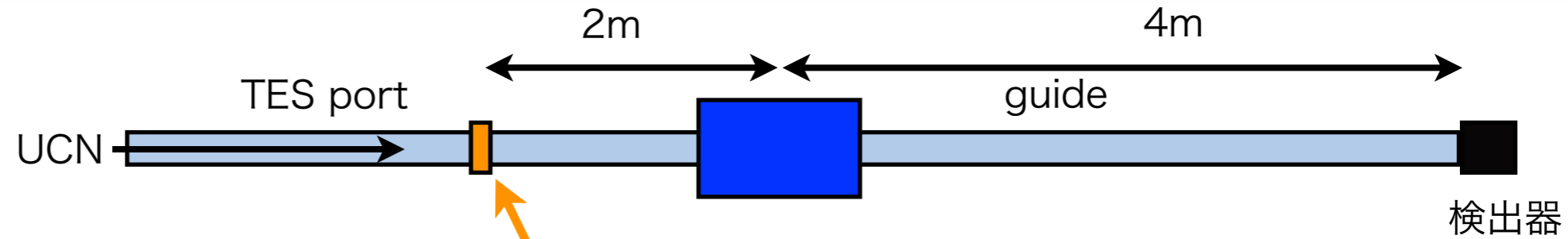


400W投入、15MHz-31MHzにわたって連続的にパワーが入っている

# UCN Rebuncher

実証実験

@ILL



シャッター  
0.2秒open  
(開閉時間 0.1秒)

電磁石

RF コイル

共振回路

Ni ガイド管

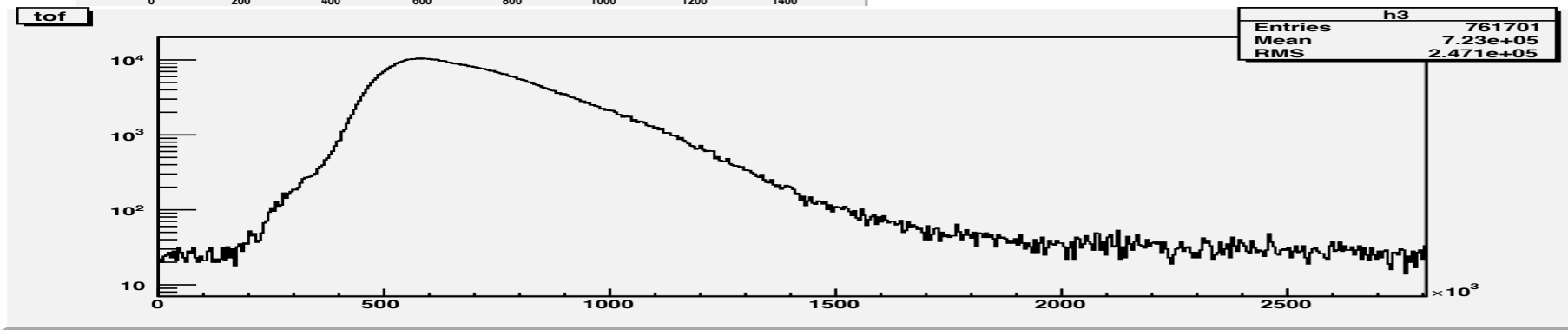
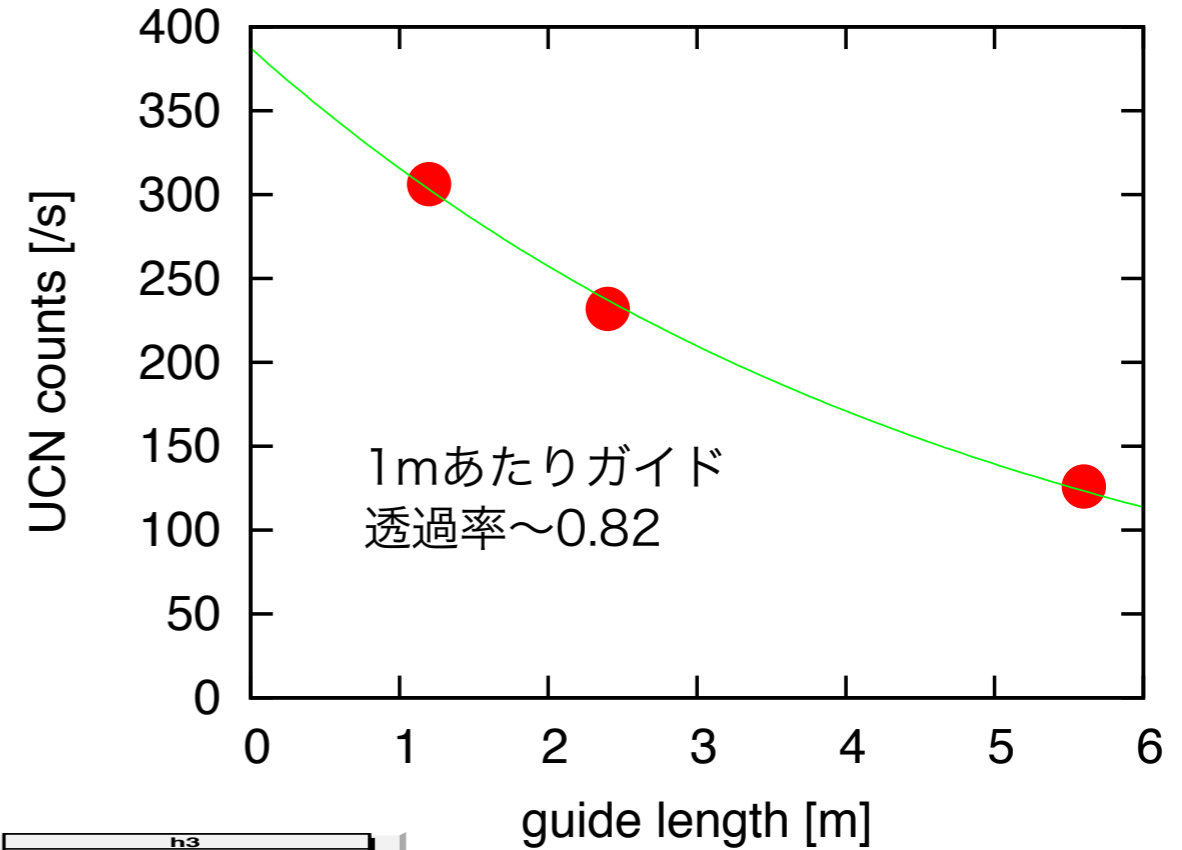
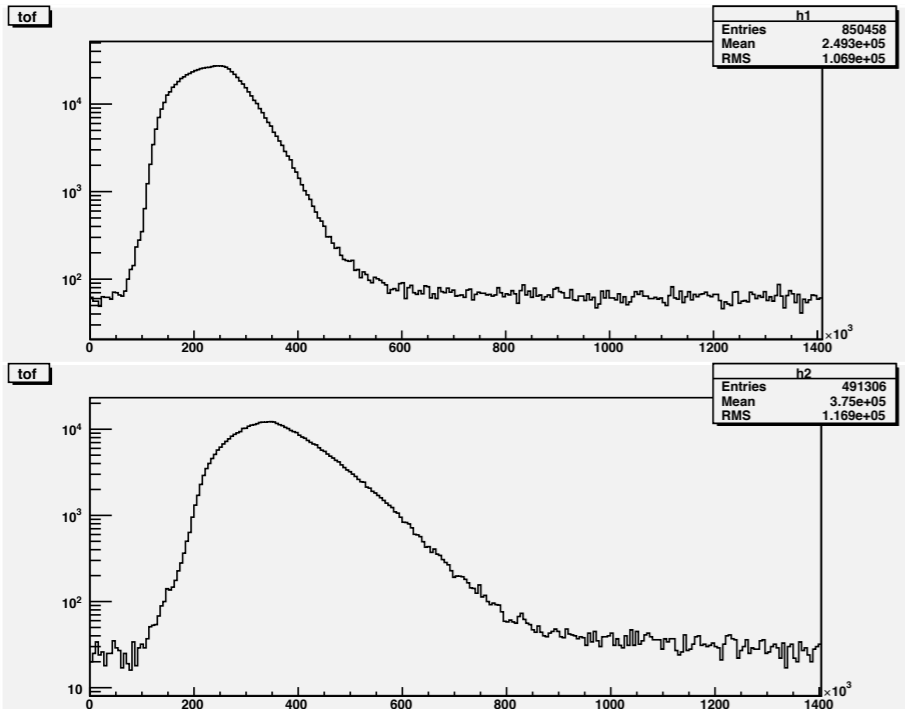
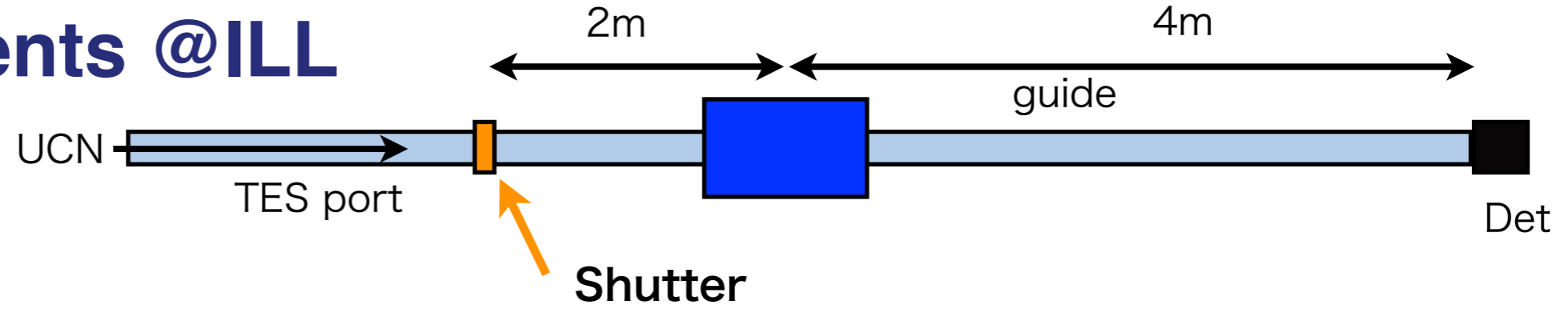
ILL原子炉から得られるUCNを  
シャッターでパルス化し、  
導管の透過特性、Rebuncherの  
加減速性能を確認する





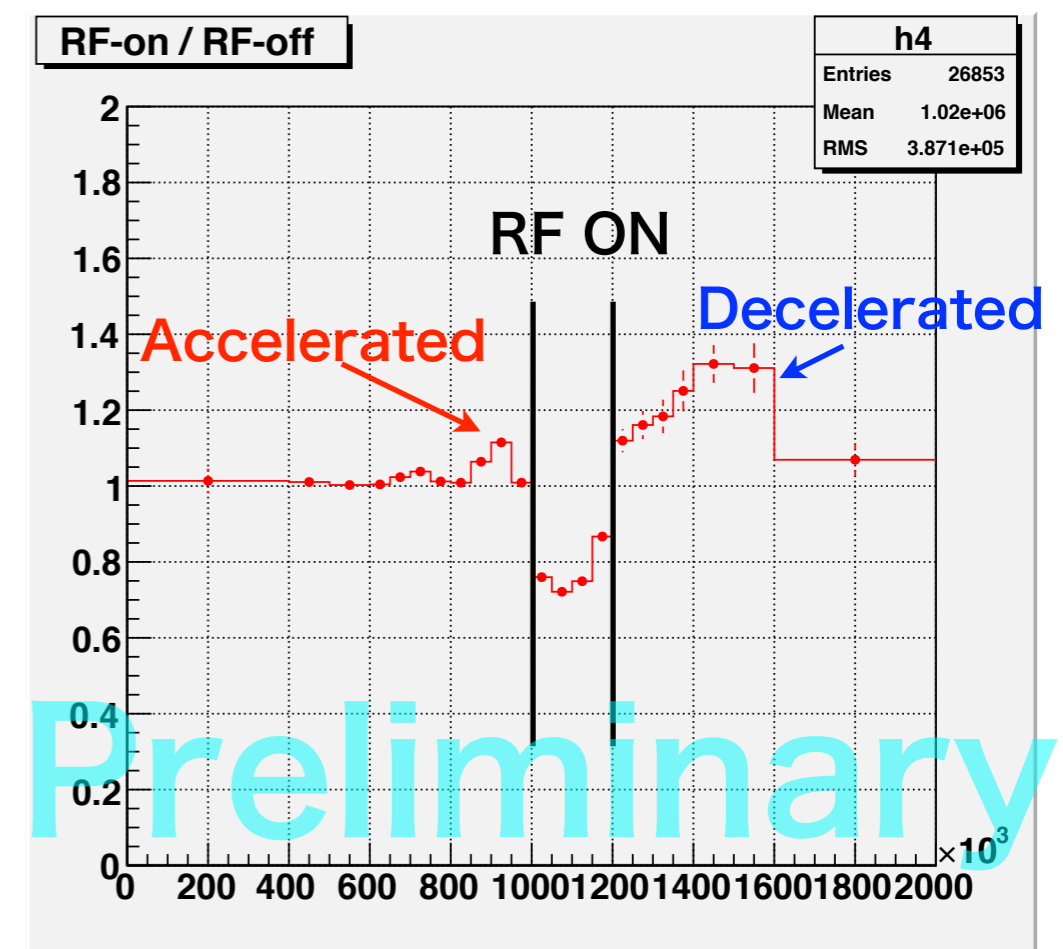
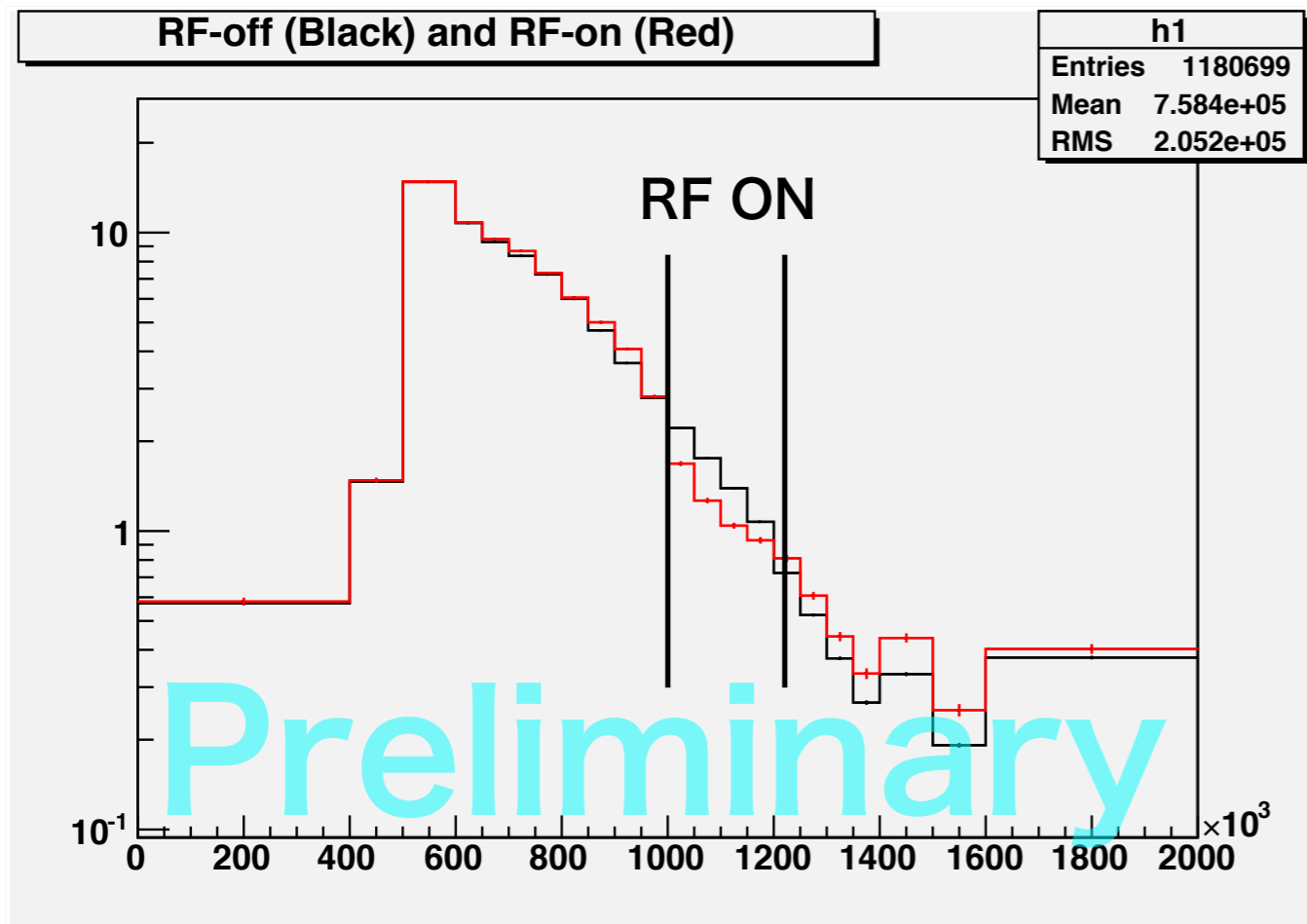
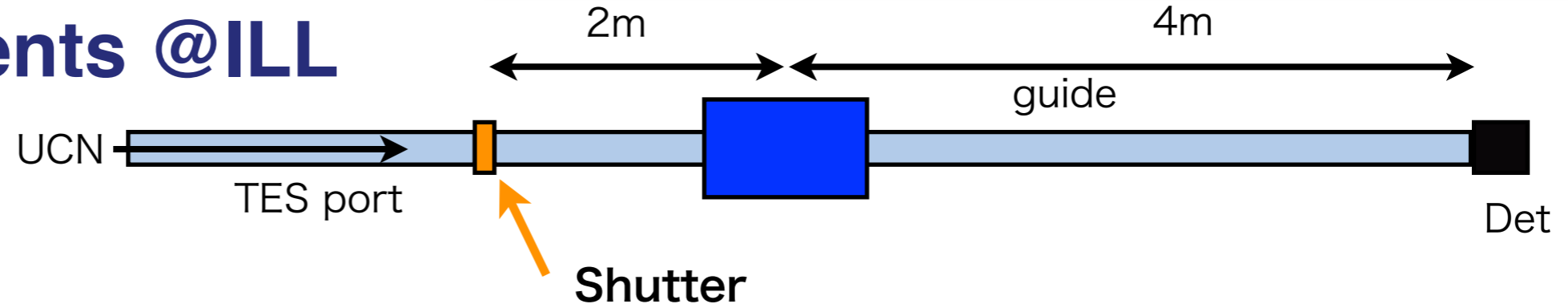
# UCN Rebuncher

## Test experiments @ILL



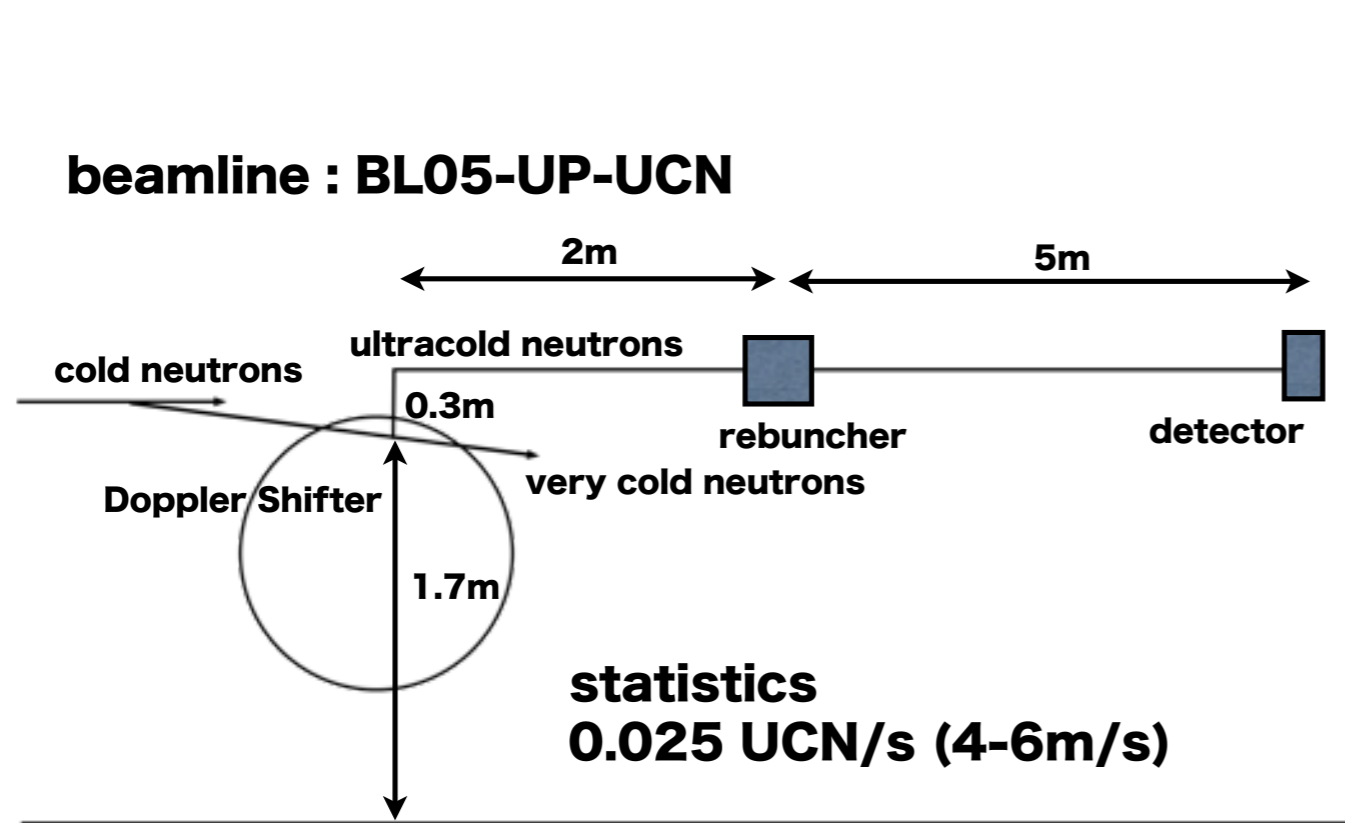
# UCN Rebuncher

## Test experiments @ILL

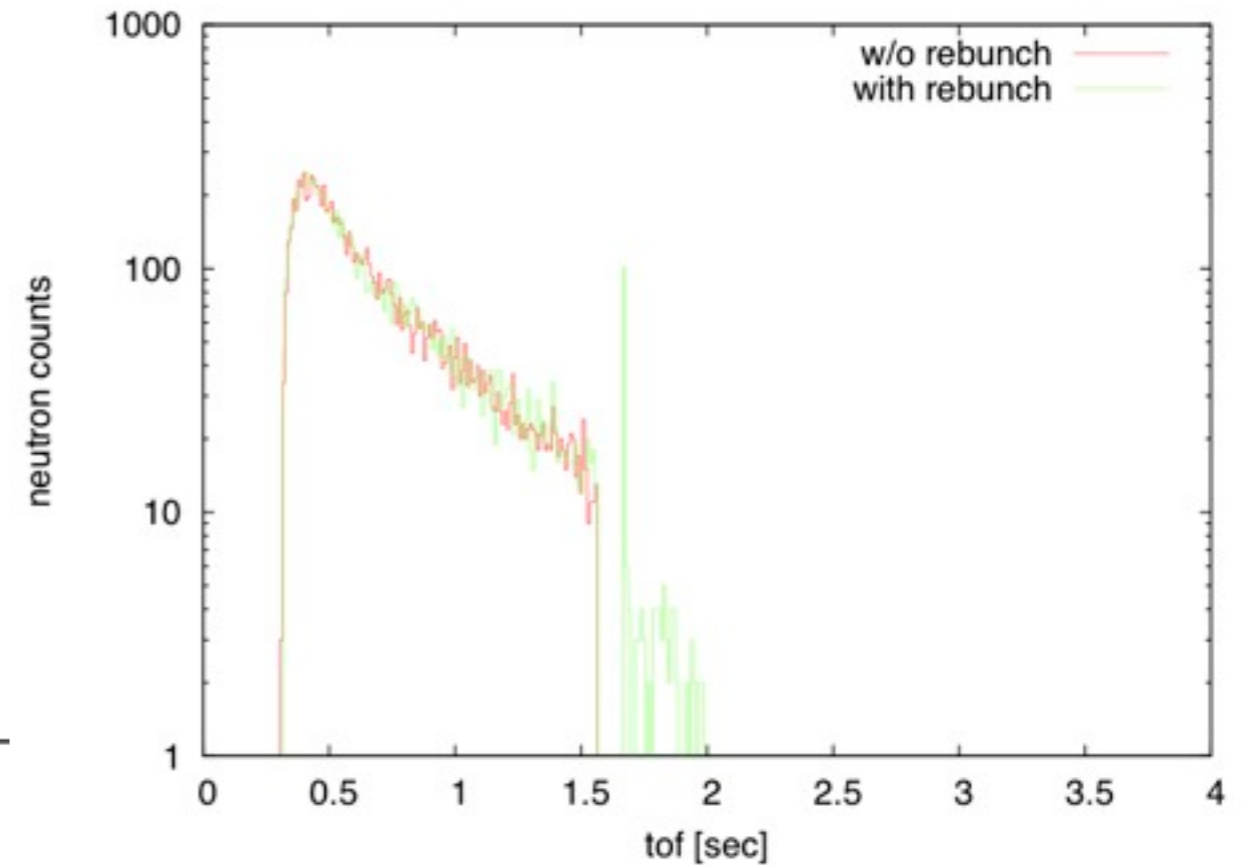


# UCN Rebuncher

RF振幅増大 (3kW アンプ使用、RF表皮効果利用)  
シャッターをドップラーシフター直上に



**simulation (3hours)**

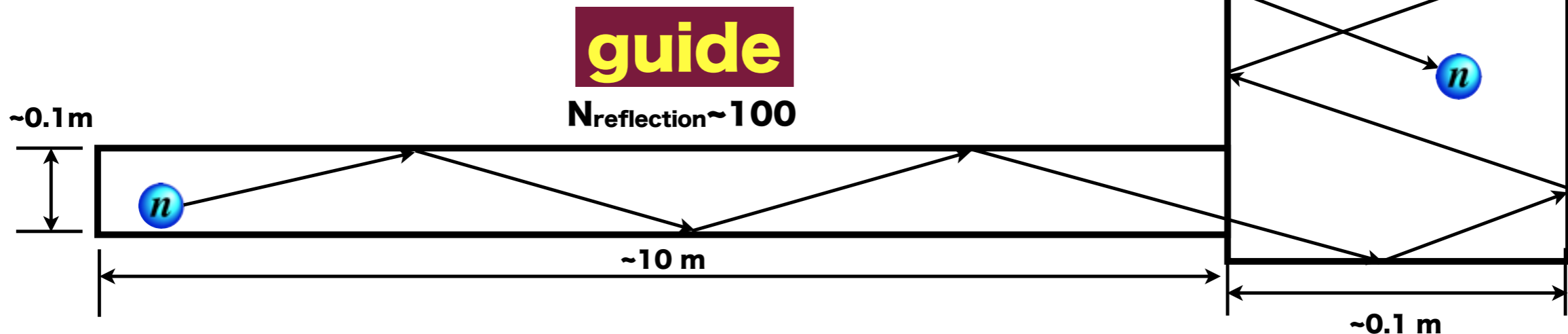


表面精度の制御が重要

確認開発進行中

**measurement cell**

$T=100\text{s}$  ( $\tau \sim 50\text{s}$ )  $\longrightarrow$   $N_{\text{reflection}} \sim 30 \times 50$



low reflection loss preferred

**for larger transmission**

$$1 - R < 10^{-3}$$

“specular” reflection preferred

**for smoother transmission**

$$R_{\text{non-specular}} < 10^{-3}$$

low reflection loss preferred

**for longer storage time**

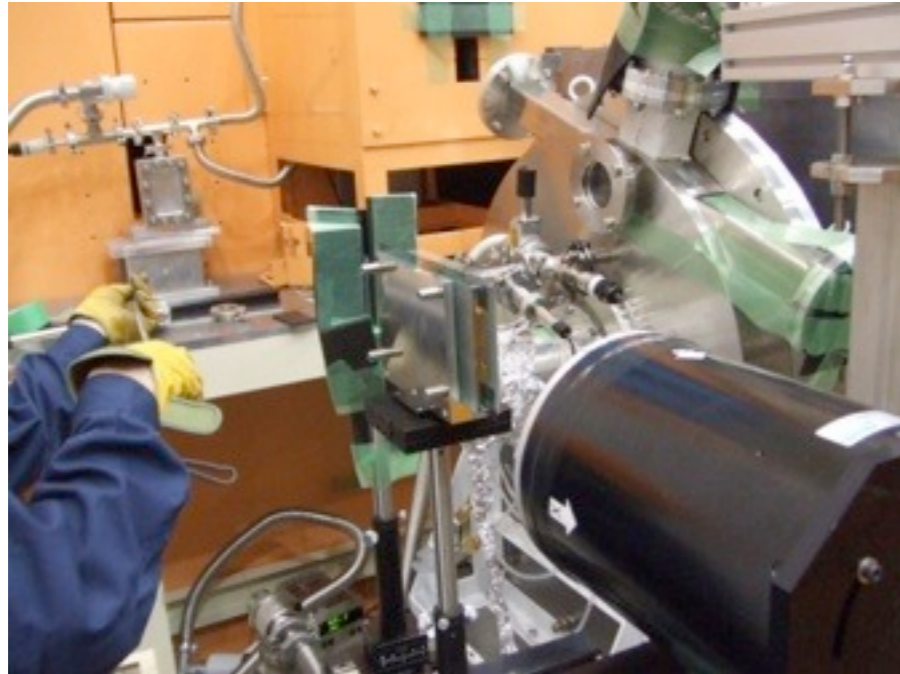
$$1 - R < 10^{-3}$$

“non-specular” reflection preferred

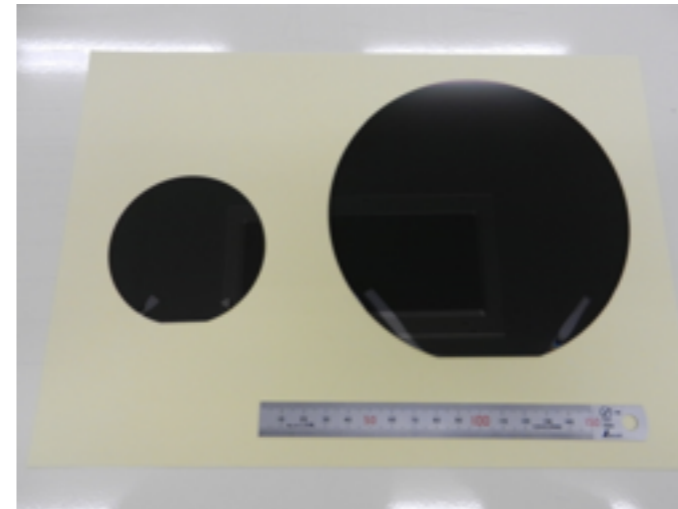
**for suppressing collective motion**

$$R_{\text{non-specular}} \sim 10^{-1}$$

## UCN導管及び蓄積容器材料選定の ための物質表面の研究



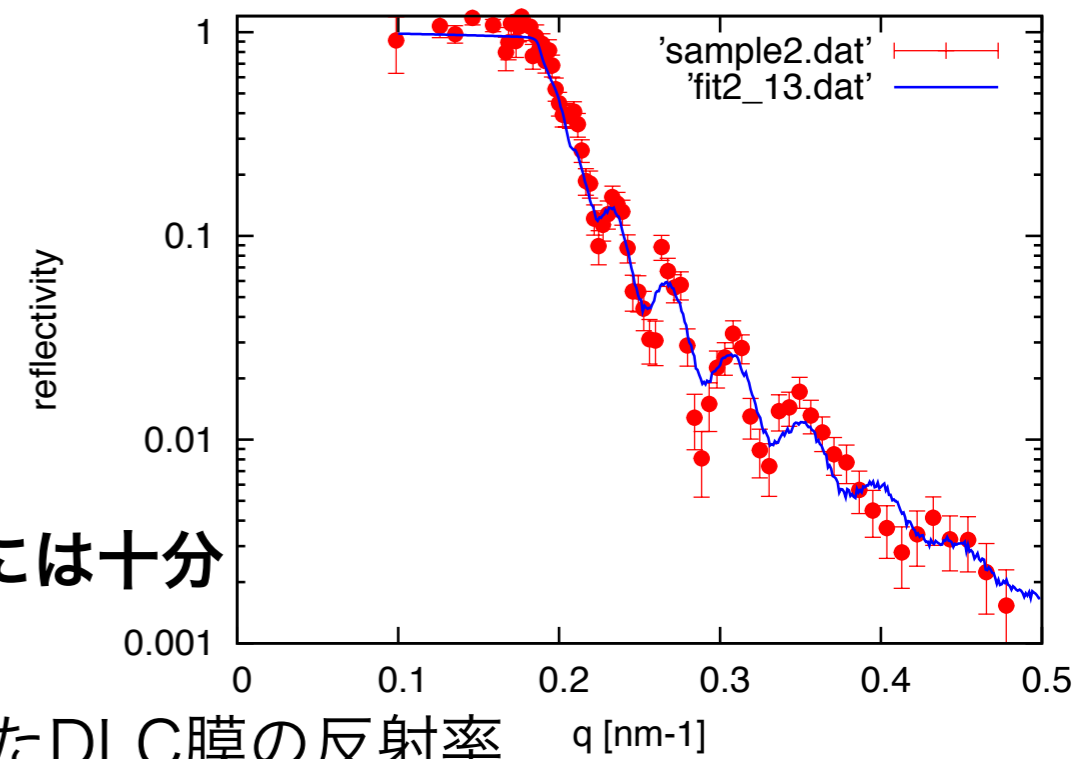
J-PARC MLF BL05に測定法を確率



DLC製膜装置(左)及び  
作製したDLC試料片



中性子に対するポテンシャル $\sim 190$  neV  
EDM測定に利用されるUCNを反射するには十分

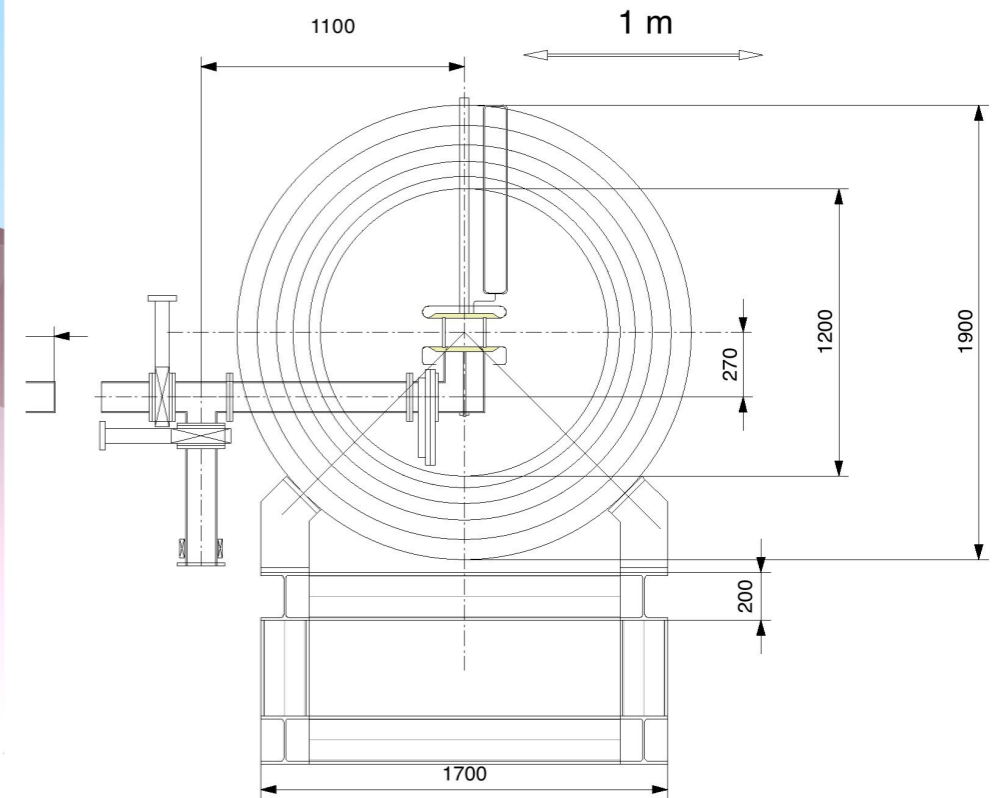
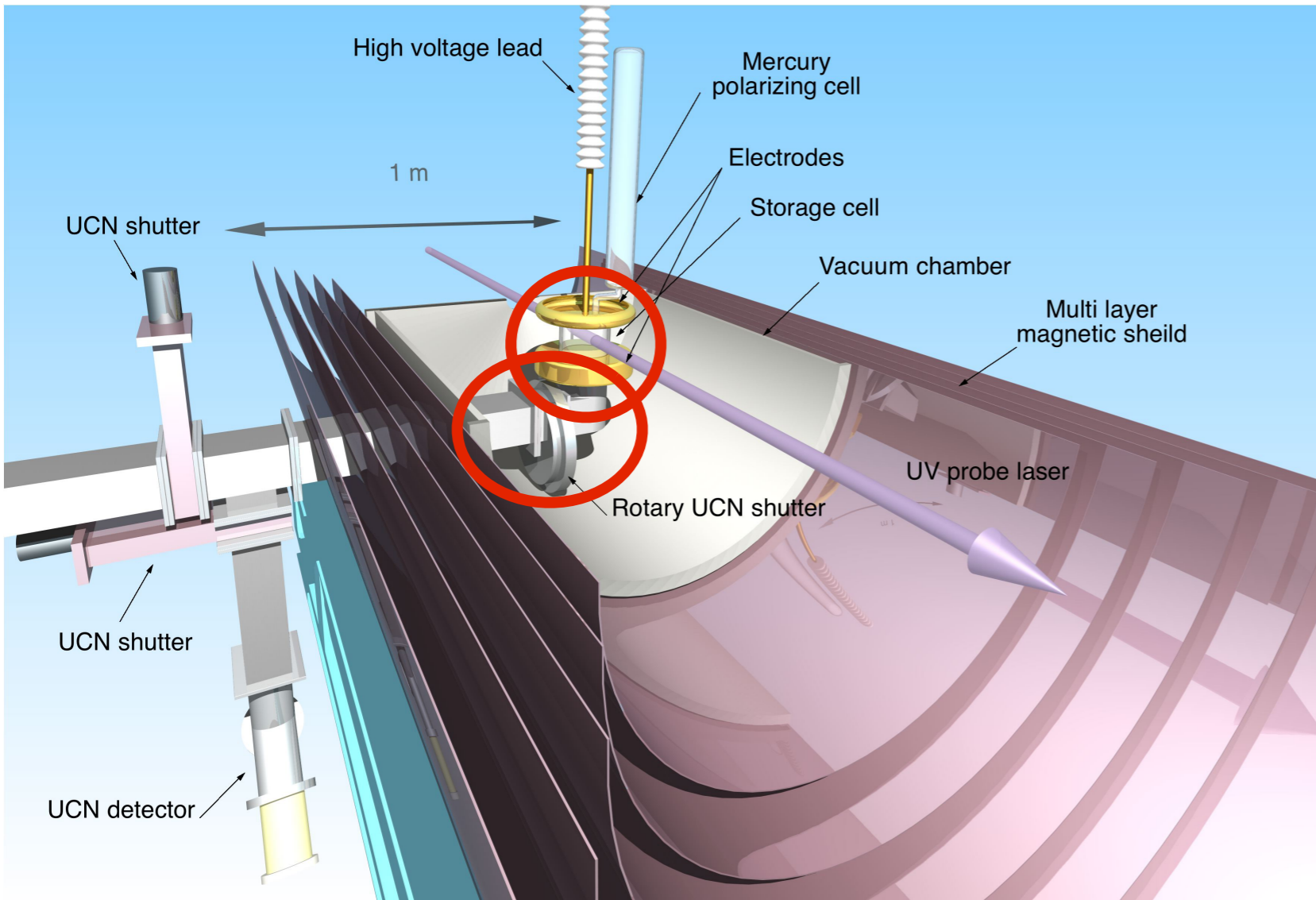


KURで測定したDLC膜の反射率

## 測定セル

## Rebuncher ドアの開発が必要

測定計自身は  
基本的には ILL と同じ



# 磁束計

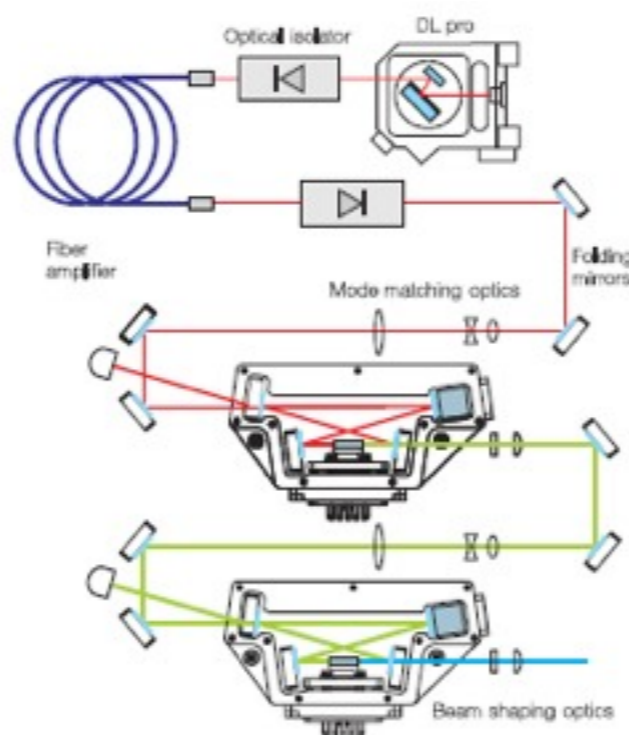
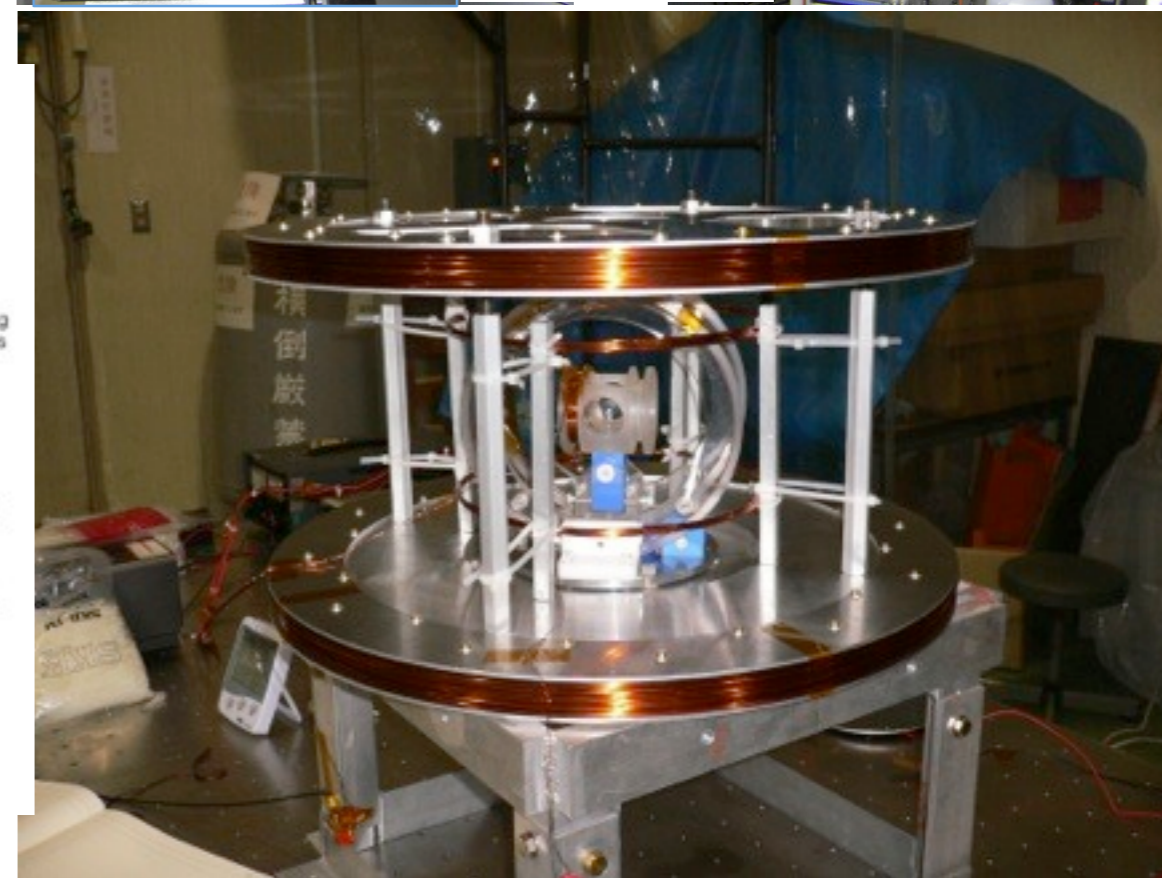
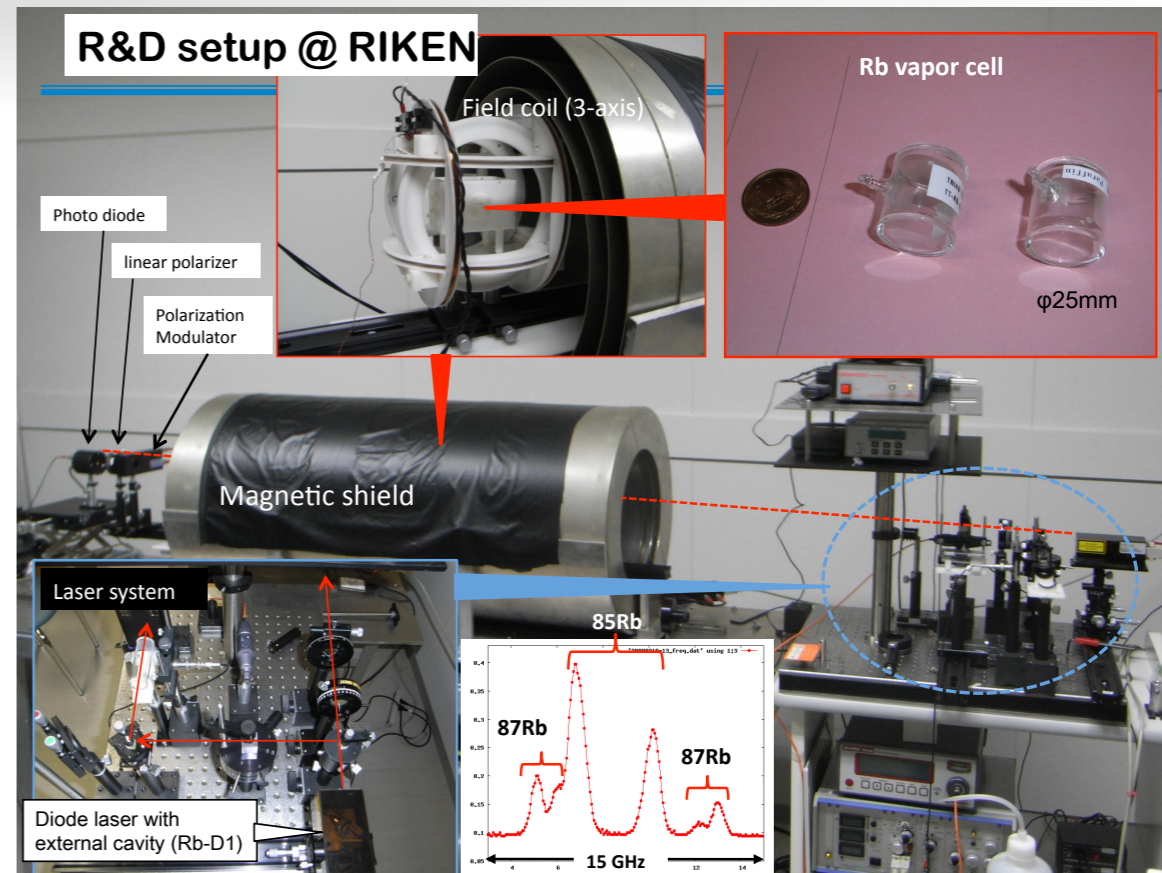
## Rb NMOR magnetometer

東工大、理研→岡山大で研究開発

Goal sensitivity = 100 aT (=0.1 fT)

## Hg Co-magnetometer

UVレーザーによる高性能化



# まとめ

Rebuncher 実証機を ILL でテストした

動作は期待通り、反転率が悪い→RF振幅が小さい

集束を確認した

利用率（反転率）向上のテストを BL05で行う

