

nEDM実験のための水銀磁束計開発

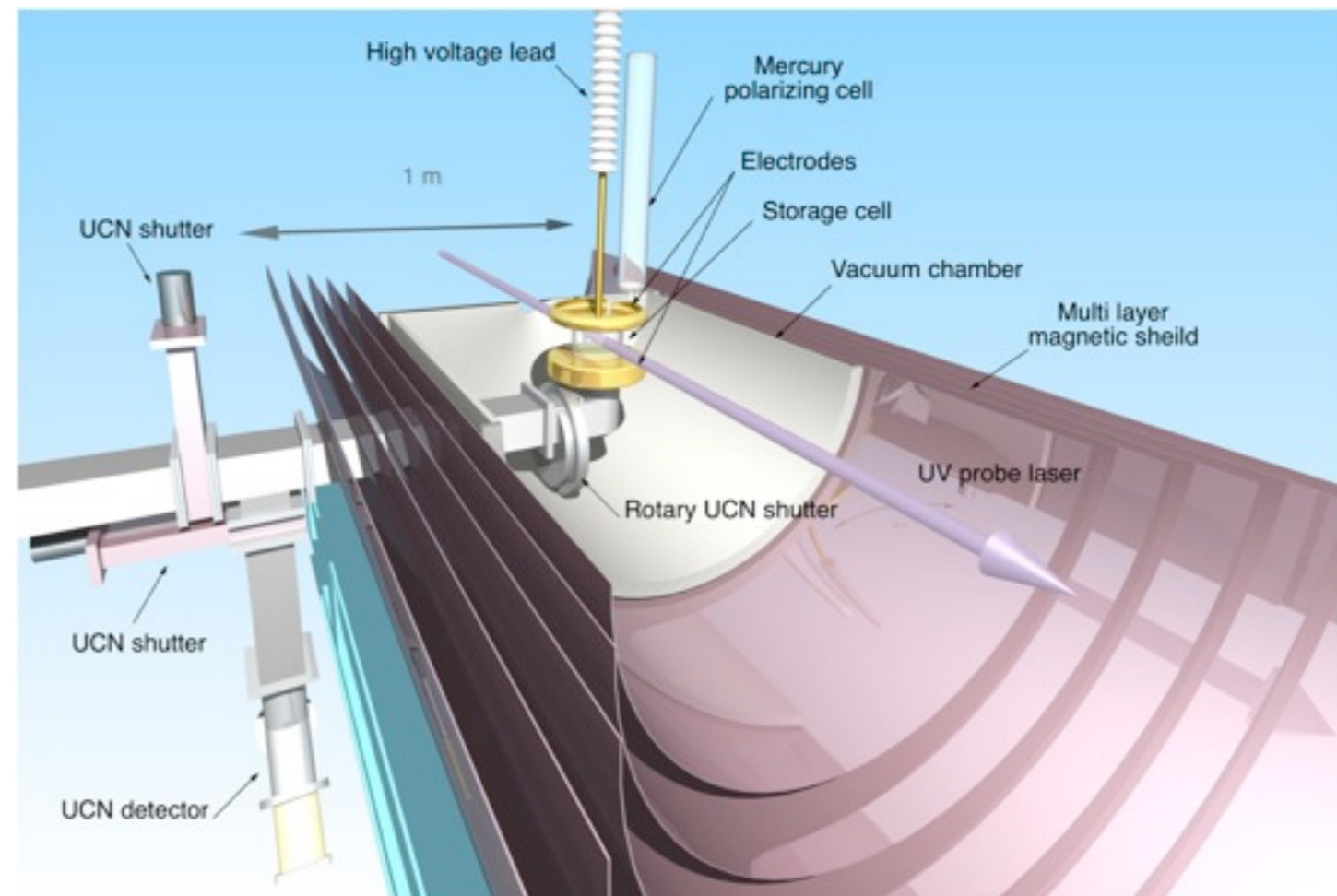
有本靖

高エネルギー加速器研究機構

中性子制御デバイスとその応用V

2012年2月29日

於京都大学原子炉実験所

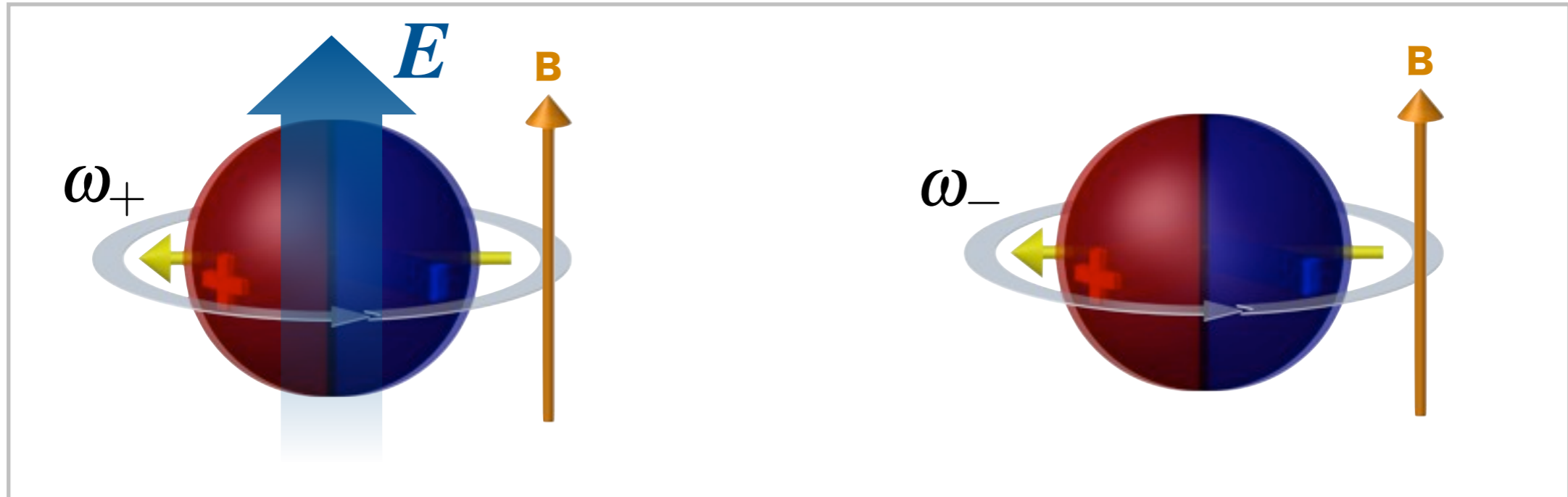


目次

- 導入
- 水銀磁束計
- 精度の見積り
- 現状
- 今後の開発項目

中性子電気双極子能率測定概略

静磁場中で電場を反転し、中性子のラーマール歳差運動周波数の差より求める



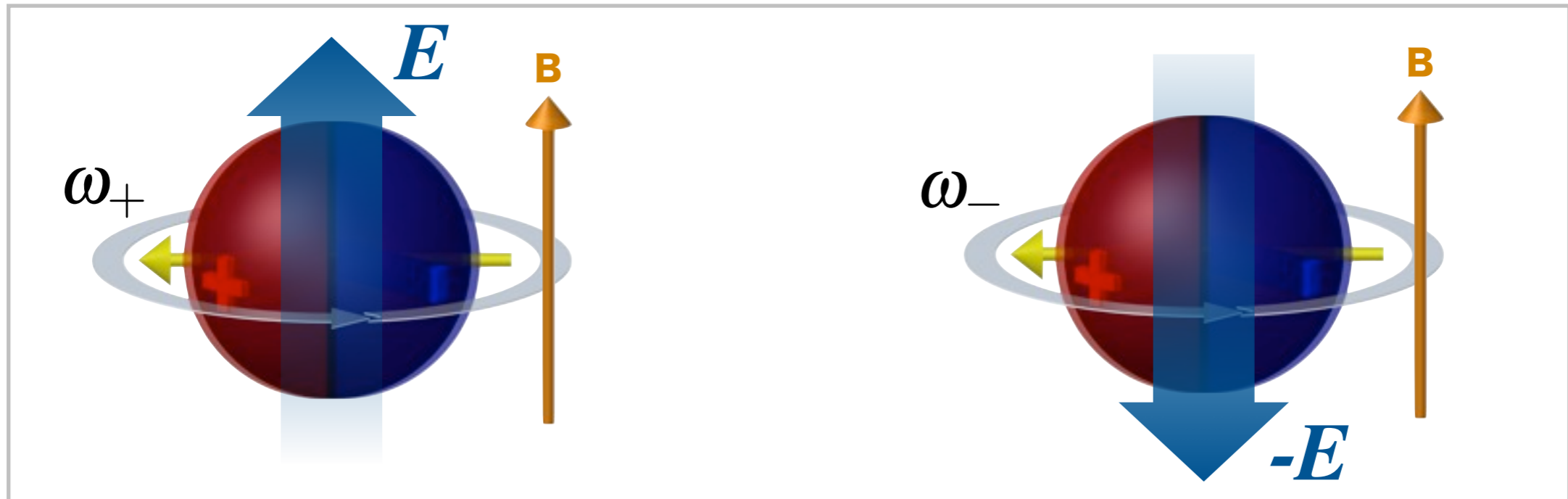
$$\omega_{\pm} = \frac{\mu_n B \pm d_n E}{\hbar}$$

$$\Delta\phi = \int_0^T (\omega_+ - \omega_-) dt = \frac{2d_n E T}{\hbar}$$

中性子電気双極子能率

中性子電気双極子能率測定概略

静磁場中で電場を反転し、中性子のラーマール歳差運動周波数の差より求める



$$\omega_{\pm} = \frac{\mu_n B \pm d_n E}{\hbar}$$

$$\Delta\phi = \int_0^T (\omega_+ - \omega_-) dt = \frac{2d_n ET}{\hbar}$$

中性子電気双極子能率

中性子電気双極子能率測定概略 (cont.)

$$\Delta\phi = \int_0^T (\omega_+ - \omega_-) dt = \frac{2d_n ET}{\hbar}$$

$$\omega_{\pm} = \frac{\mu_n B \pm d_n E}{\hbar}$$

$$d_n = \frac{\hbar \Delta\phi}{2ET}$$

実際は**B**にはふらつきがあるので

$$\Delta\phi = \frac{2d_n ET}{\hbar} + \frac{\mu_n T}{\hbar} \boxed{\delta B}$$

となり**B**のふらつきはEDM値の誤差に反映される

高感度でnEDMを測定するために

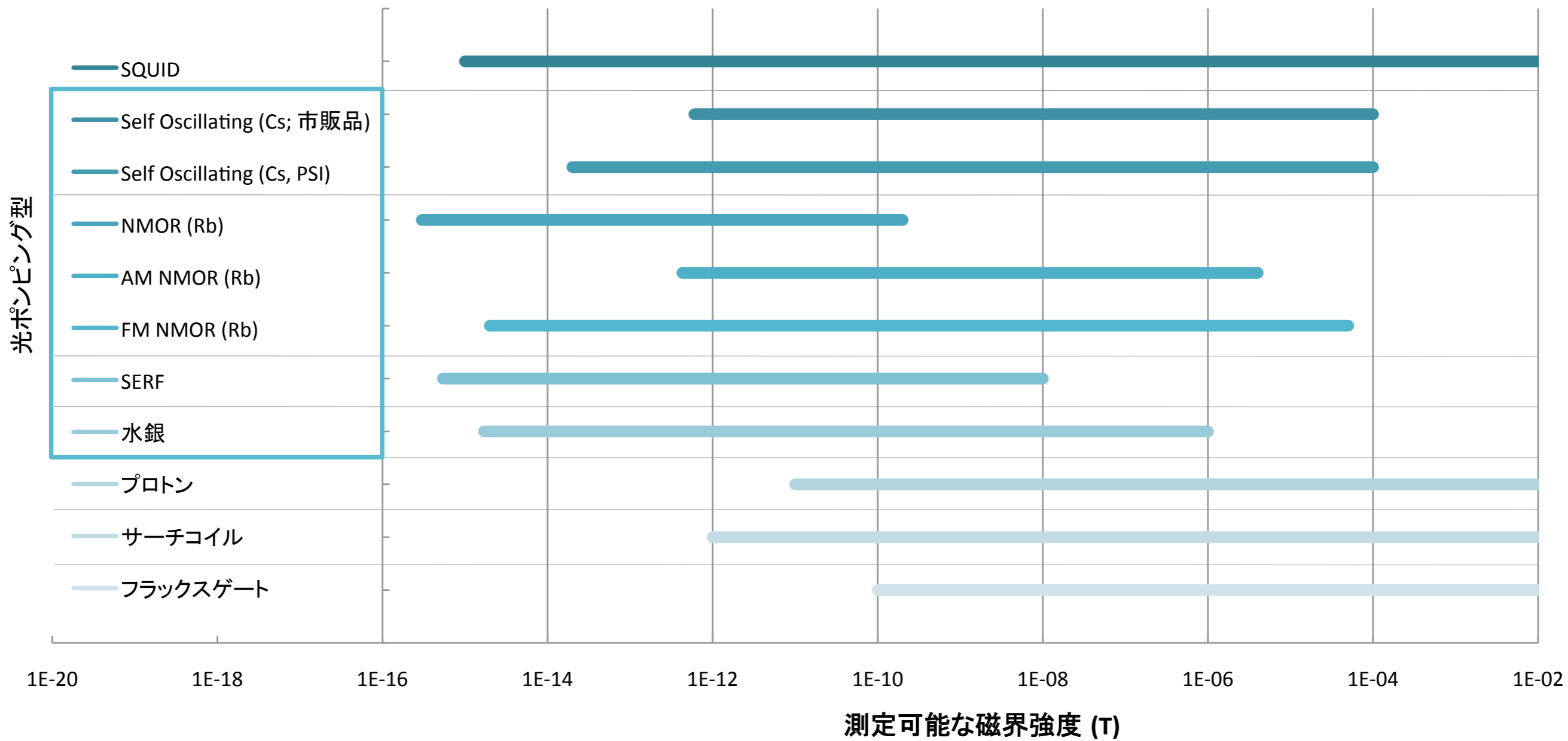
Bのバタツキを小さくする

磁気シールドを用いる

Bのバタツキを精度良く測定する

高感度磁束計

測定精度 0.1 fT



磁束計感度

nEDM magnetometer

Co-magnetometer (このTalk)

Cell 内部の磁場

UCNが感じる磁場を測定

水銀磁束計を採用

Magnetometer (吉見さんのTalk)

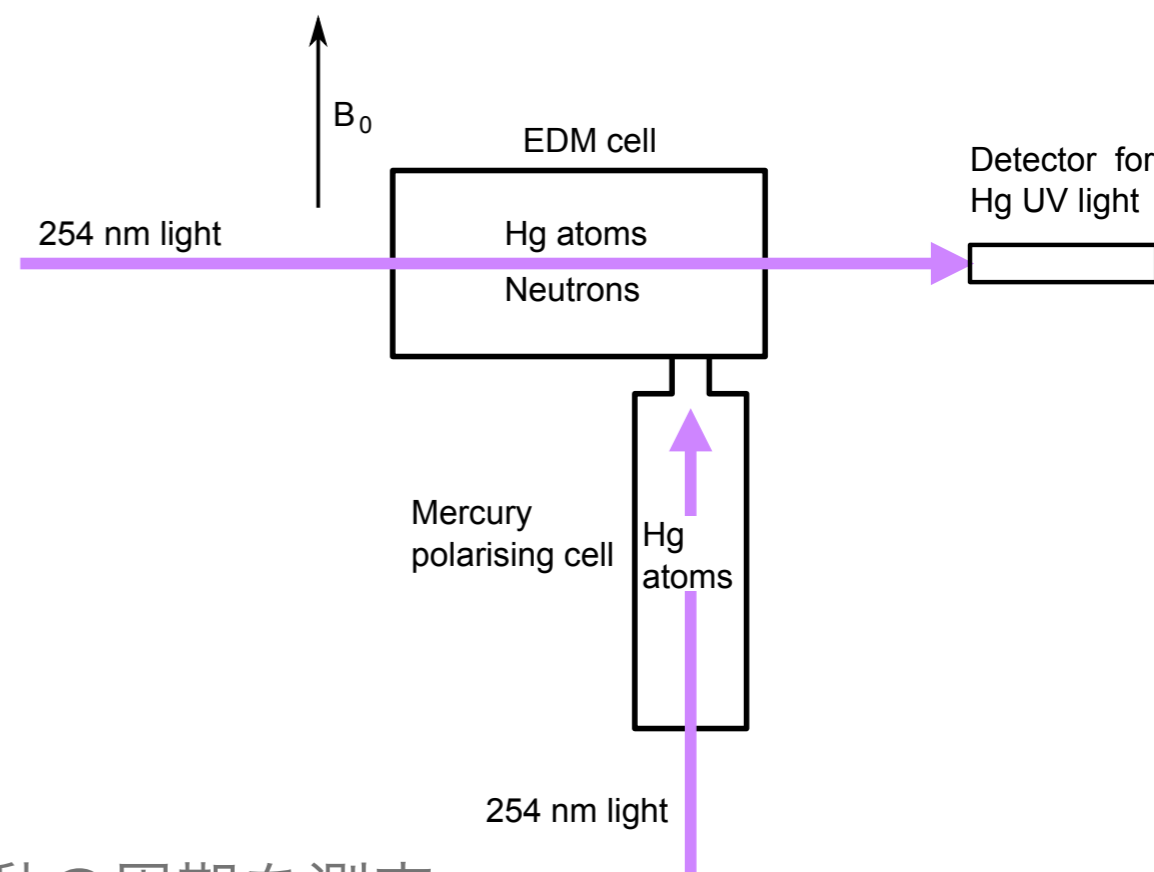
Cell 外部の磁場

水銀磁束計

概略

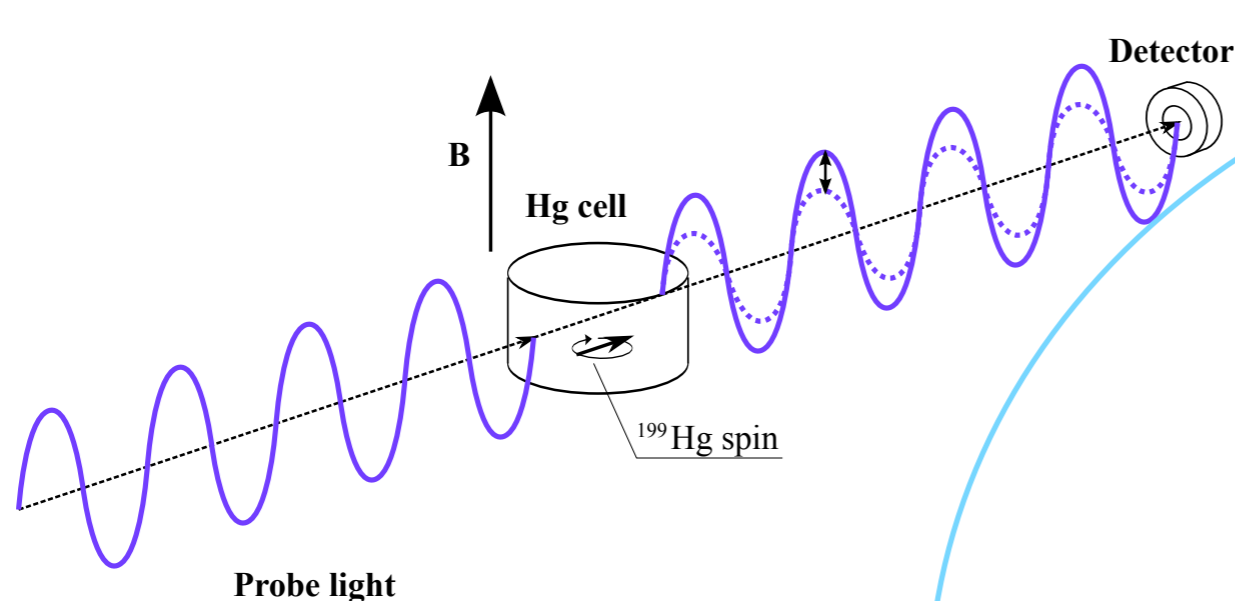
- ^{199}Hg 原子を偏極させる
 - 円偏光 UV ランプ または UV レーザ
- UCNと水銀原子をEDMセルに導入
- スピンを B_0 に対して $\pi/2$ 倒す
 - フリッパーRFコイル
- 254 nmの直線偏光を入射、透過光偏光面変動の周期を測定
 - この周期はラーマー歳差運動の周期と一致。
 - 以下の式より B_0 が求まる。

$$B_0 = \frac{\nu_{\text{Hg}}}{\gamma_{\text{Hg}}}$$



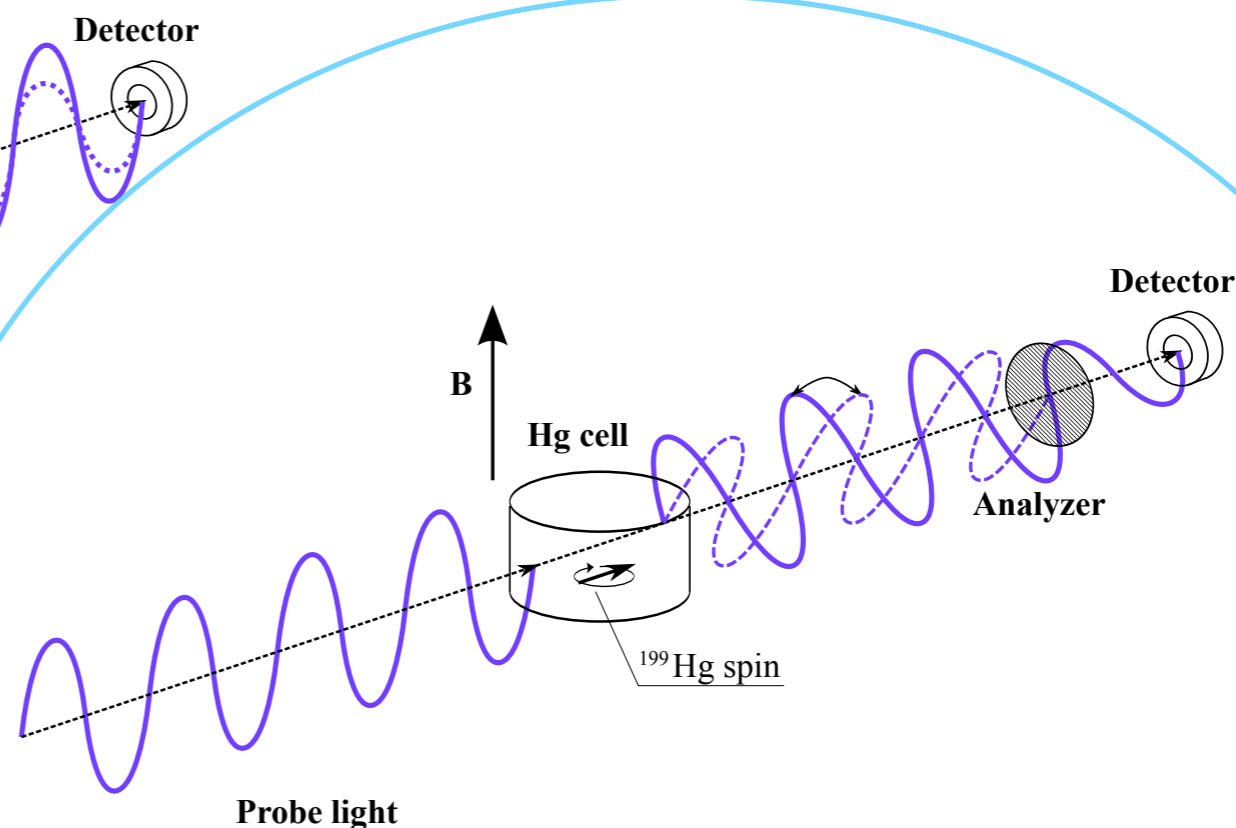
水銀ラーマー歳差運動測定方法

水銀原子のラーマー周波数の測定には2通りの方法がある



強度変調

$$\delta B = 5 \times 10^{-14} \text{ T}$$



ファラデー回転

$$\delta B = 3 \times 10^{-15} \text{ T}$$

使用例：中性子EDM (強度変調法)

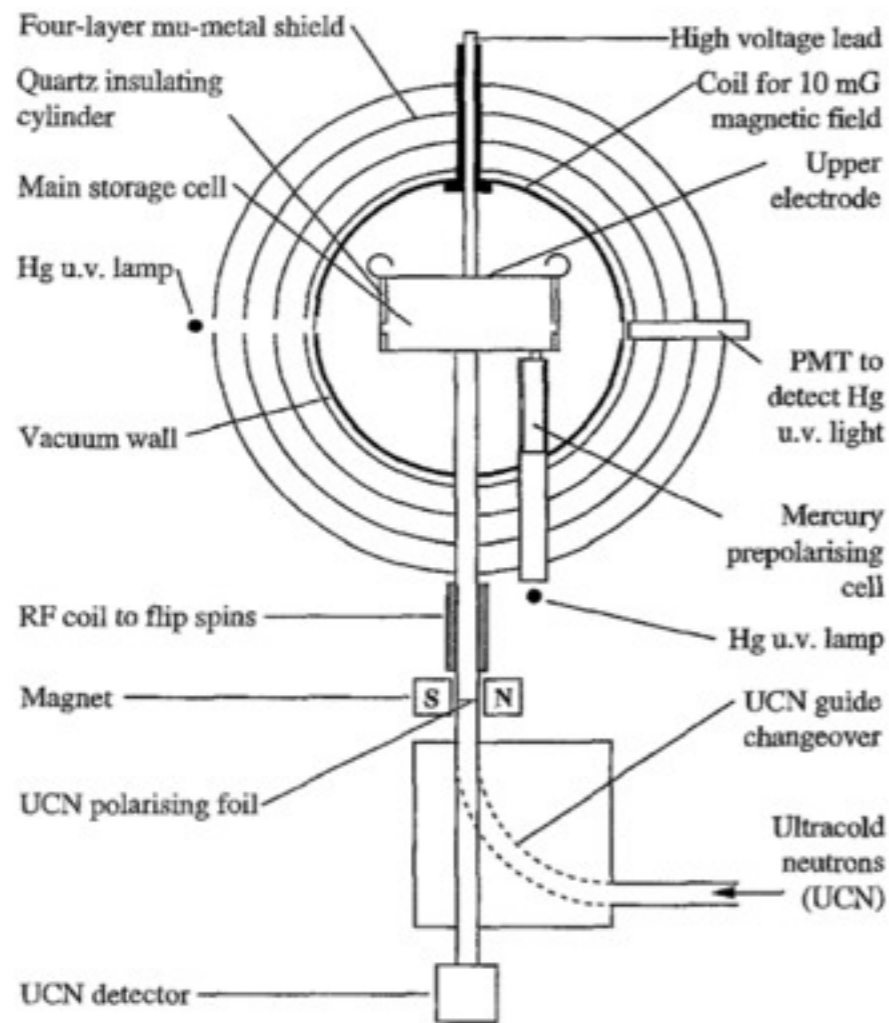


Fig. 2. The neutron EDM experimental apparatus.

K. Green, et al. Nucl. Instrum. Meth. A 404 (1997) 381.

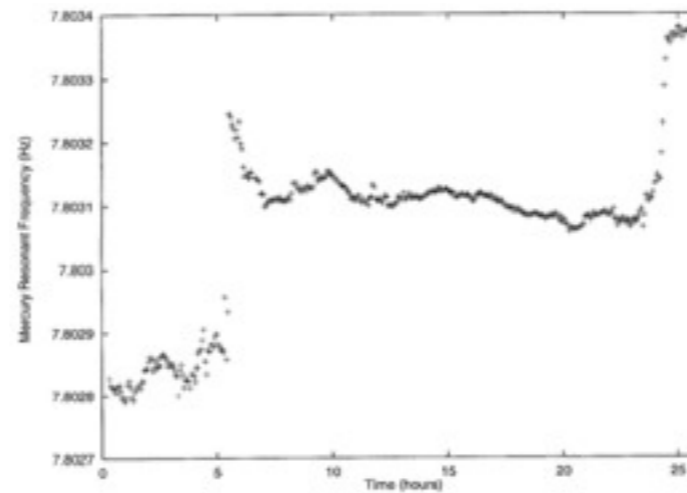


Fig. 7. Mercury resonant frequency, measured repeatedly over a 26-hour period.

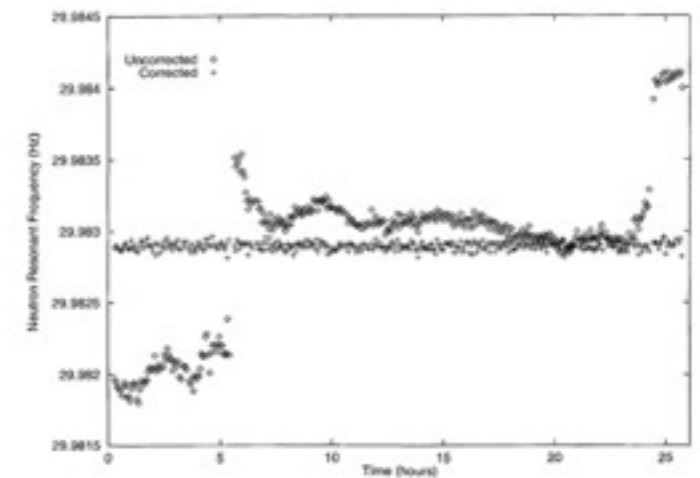


Fig. 8. Neutron resonant frequency, measured over the same 26-hour period, before and after correction of the effect of the drifting magnetic field by normalisation to the measurements of the mercury magnetometer.

K. Green, et al. Nucl. Instrum. Meth. A 404 (1997) 381.

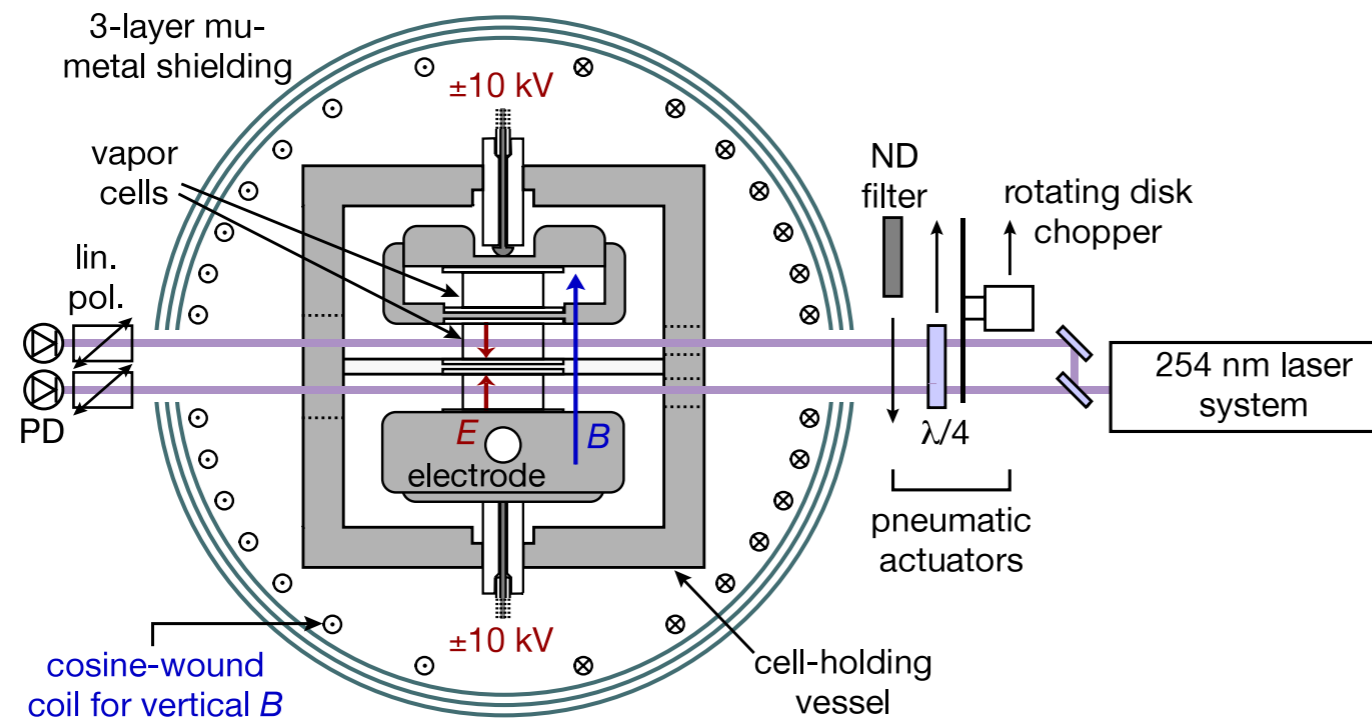
水銀 (^{204}Hg) ランプを使用

$N_{\text{ph}} = 10^{12}$ photons/sec

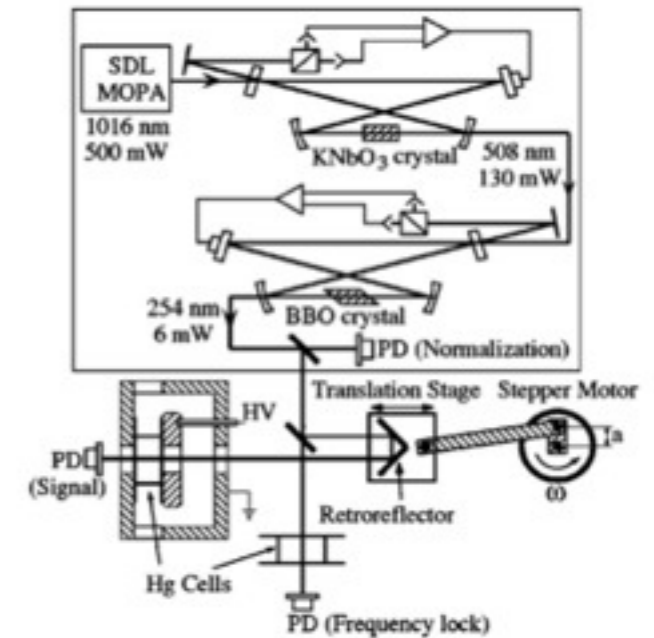
$\Delta B \sim 100$ fT

透過光強度の変動周期を測定

使用例：水銀EDM (ファラデー回転法)



W.C. Griffith et al. Phys. Rev. Lett. 102 (2009)101601



D. M. Harber, et al. Phys. Rev A 63 (2000)013402

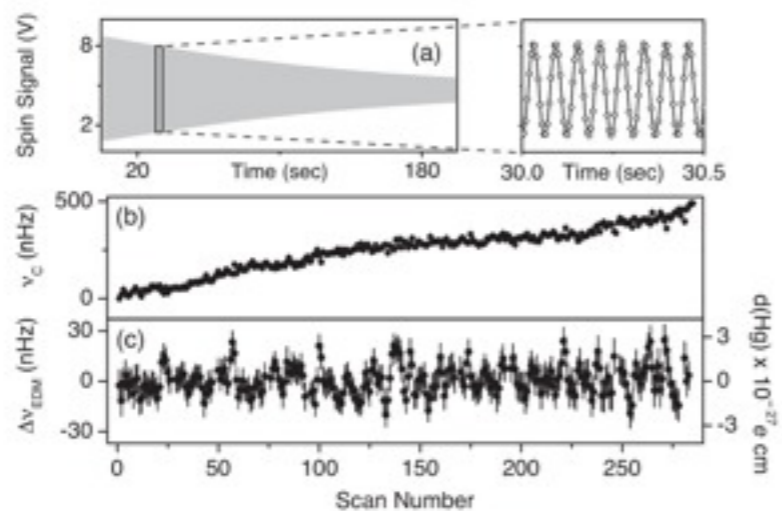


FIG. 2. (a) Typical single-cell precession signal with an expanded 0.5 sec segment. (b),(c) ν_c and $\Delta\nu_{\text{EDM}}$ for a typical run. In (c) the reduced χ^2 is 1.2 and the run-averaged statistical error is 0.85 nHz after scaling by $\sqrt{\chi^2}$.

W.C. Griffith et al. Phys. Rev. Lett. 102 (2009)101601

UV レーザ を使用

$P = 6 \text{ mW}$

$\Delta B \sim 1 \text{ fT}$

透過光偏光面の変動周期を測定

ポンピング光とプローブ光で周波数を変えている。

ファラデー回転測定装置(概略)

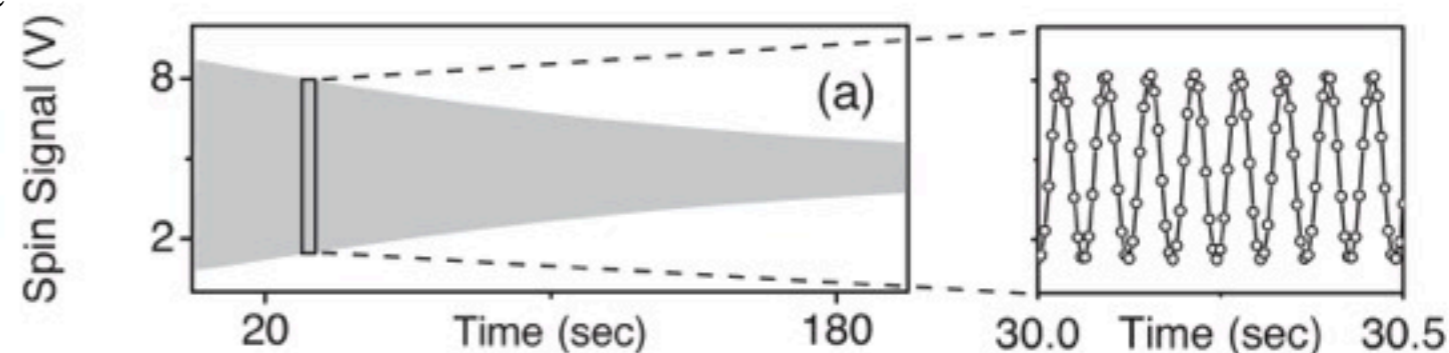
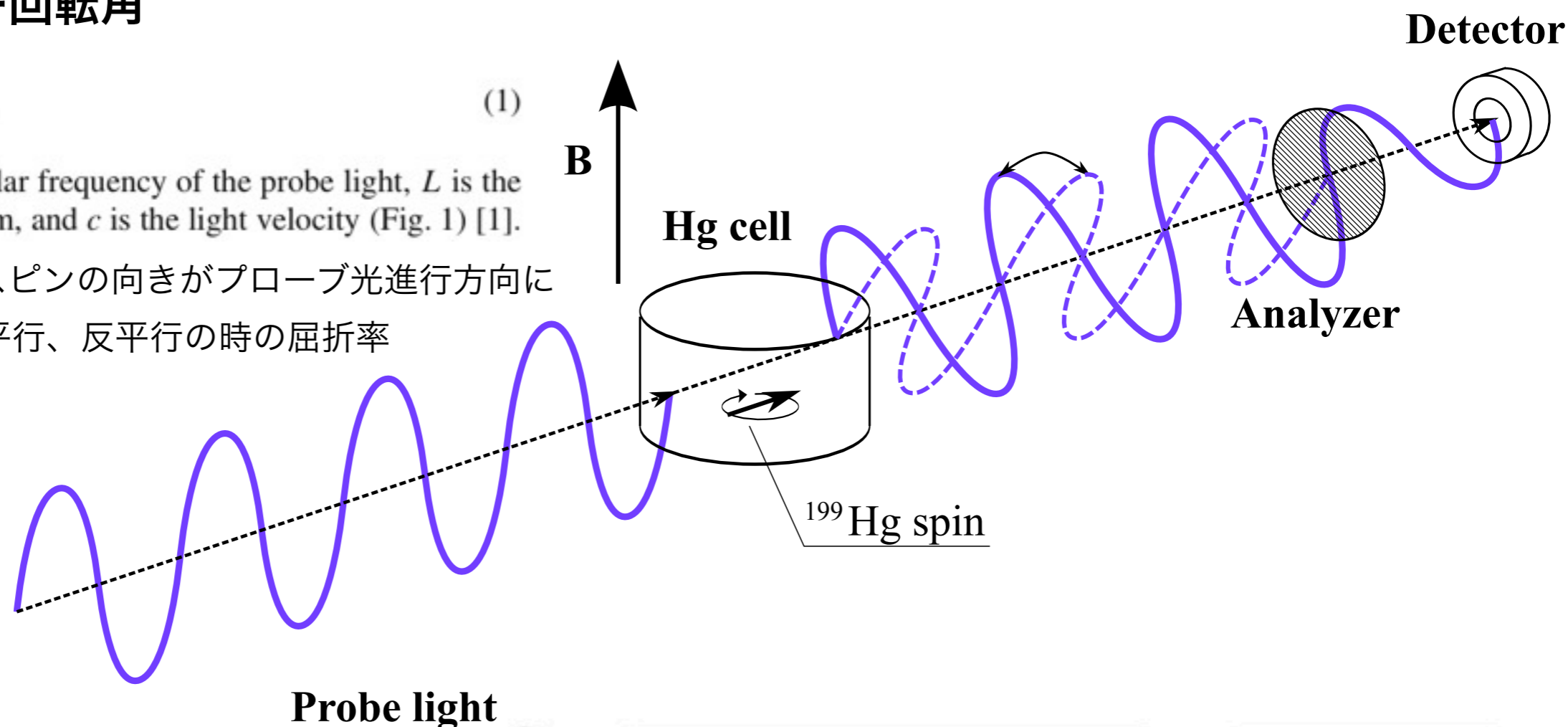
^{199}Hg 原子核偏極方向に直線偏光を入射するとその偏光面の角度が回転する

ファラデー回転角

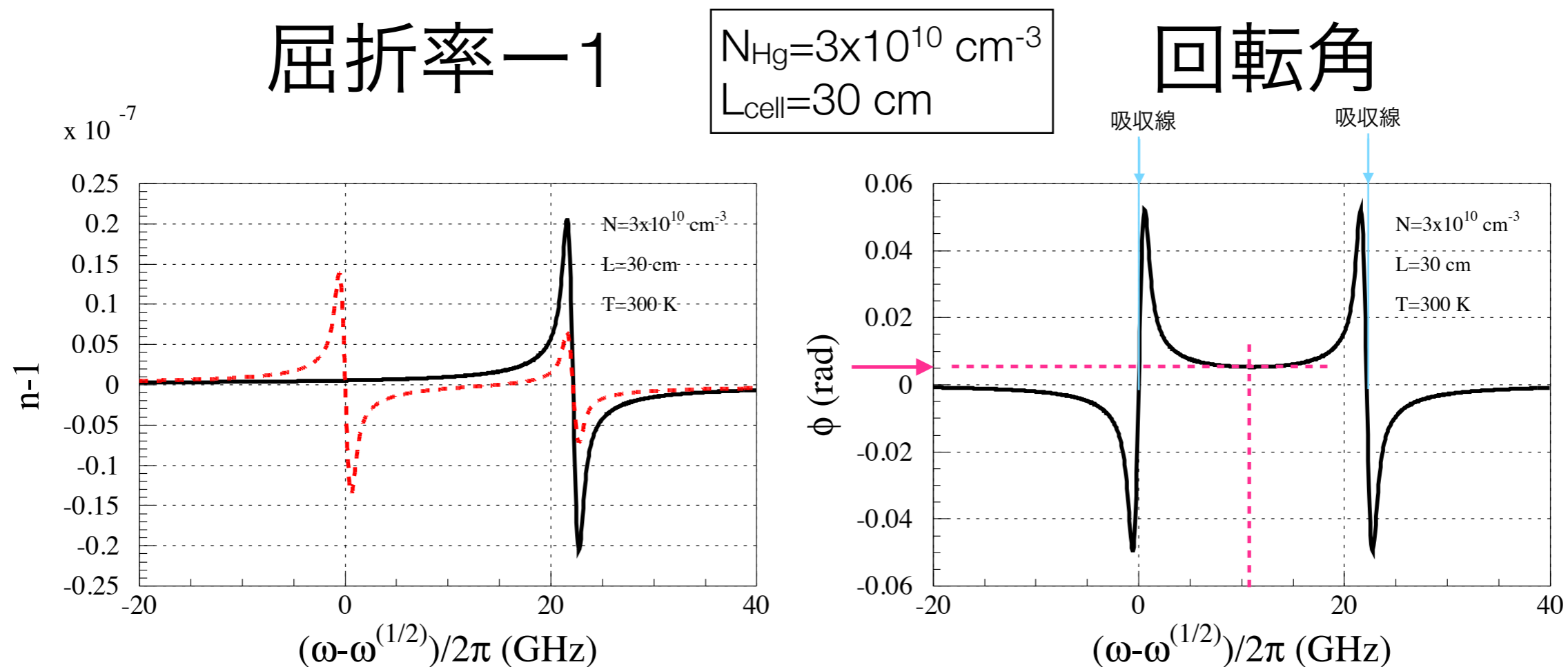
$$\varphi = \frac{\omega L}{2c}(n_+ - n_-), \quad (1)$$

where ω is the angular frequency of the probe light, L is the length of the medium, and c is the light velocity (Fig. 1) [1].

n_+ , n_- は媒質のスピンの向きがプローブ光進行方向に対し、それぞれ平行、反平行の時の屈折率



nEDMにおけるFaraday 回転角

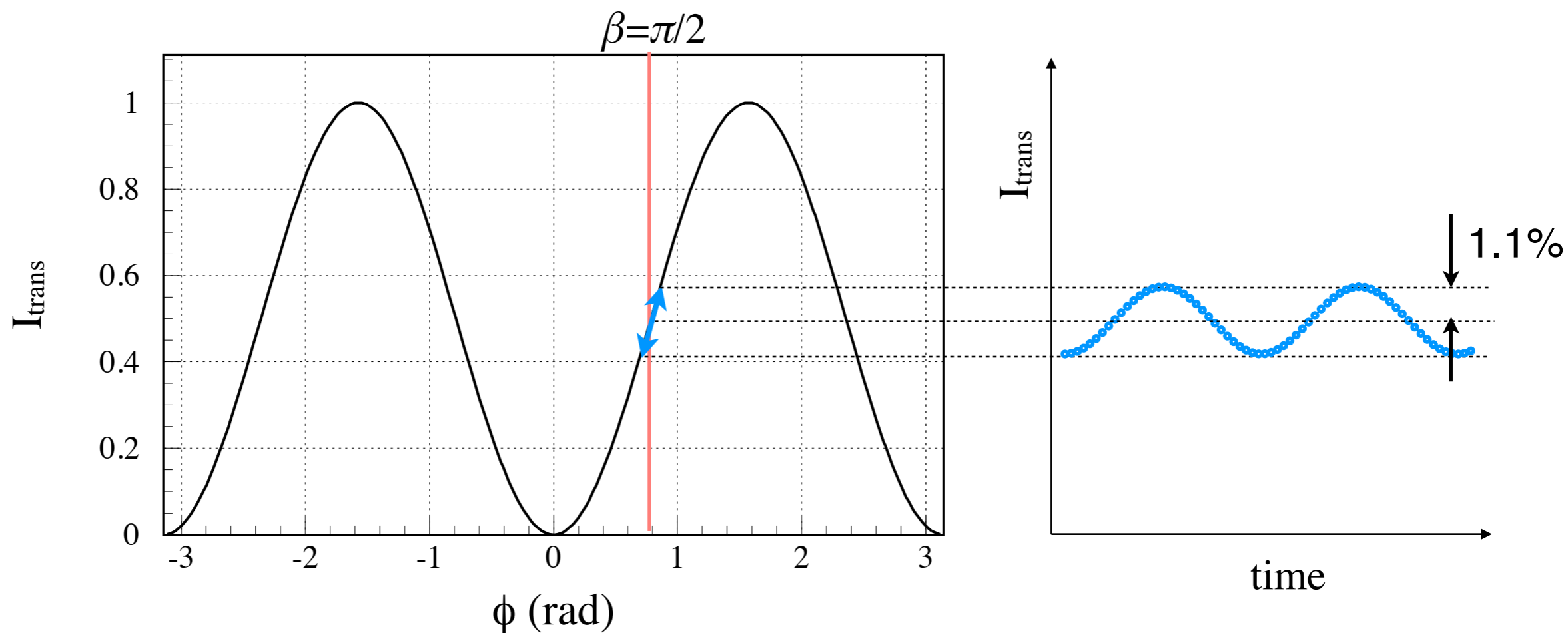


Faraday 回転角

$$\Phi_{\text{rot}} = \pm 0.0053 \text{ rad}$$

偏光子の角度設定

偏光面と検光子の相対角度と透過光強度の関係



$$\Delta I_{\text{T}}/I_0 = 2\Phi_{\text{rot}} \sin(2\beta)$$

$$\Delta I_{\text{T}}/I_0 = 2 \times 0.0053 \times 1 = 0.0106$$

透過光は振幅 $\pm 1.1\%$ で振動する。

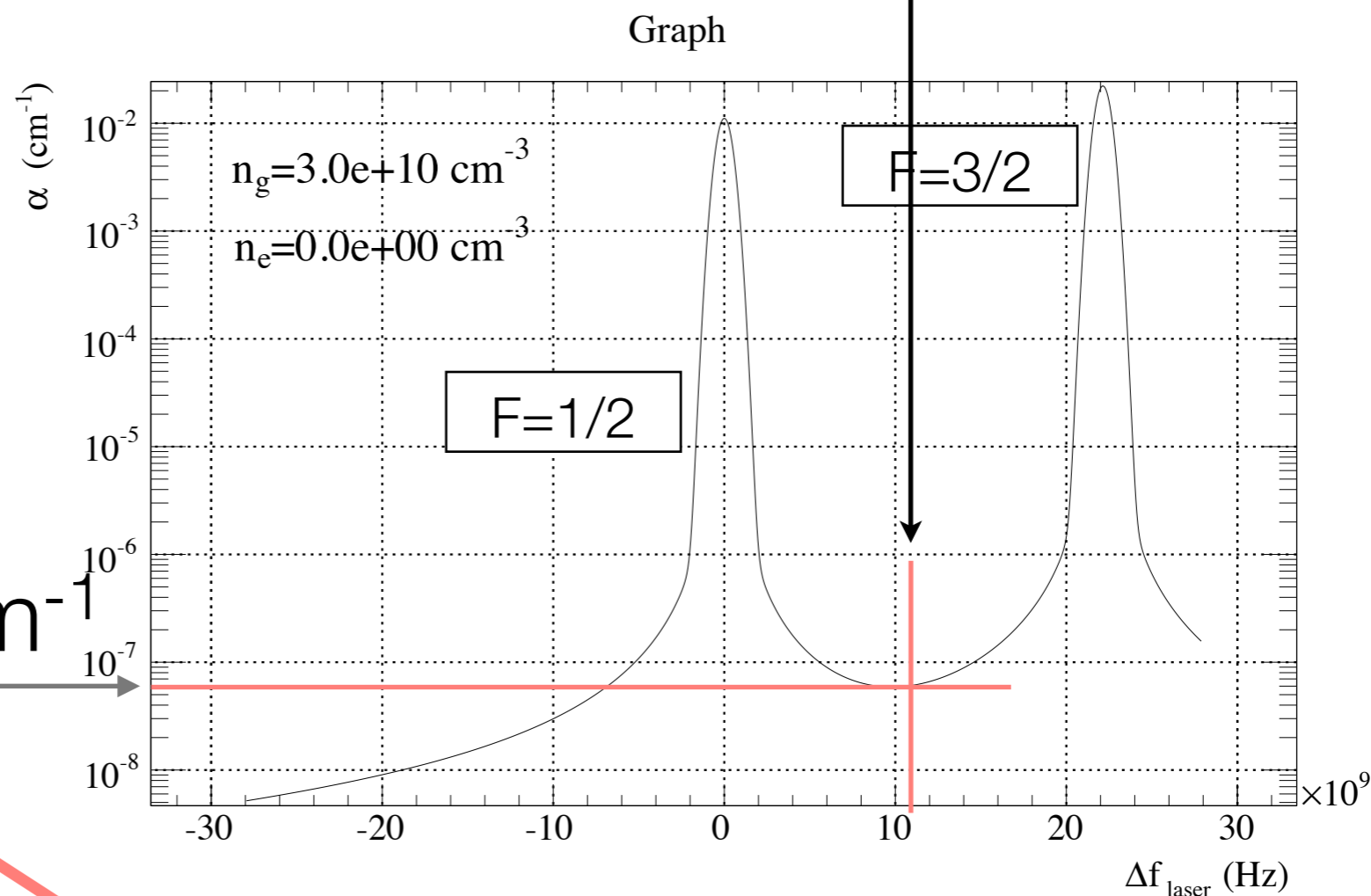
吸収長

UV Laser

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha L)$$

UV Laser

$$\alpha = 0.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$$



吸収が少ない

大強度のプローブ光を入射可能

精度の見積り

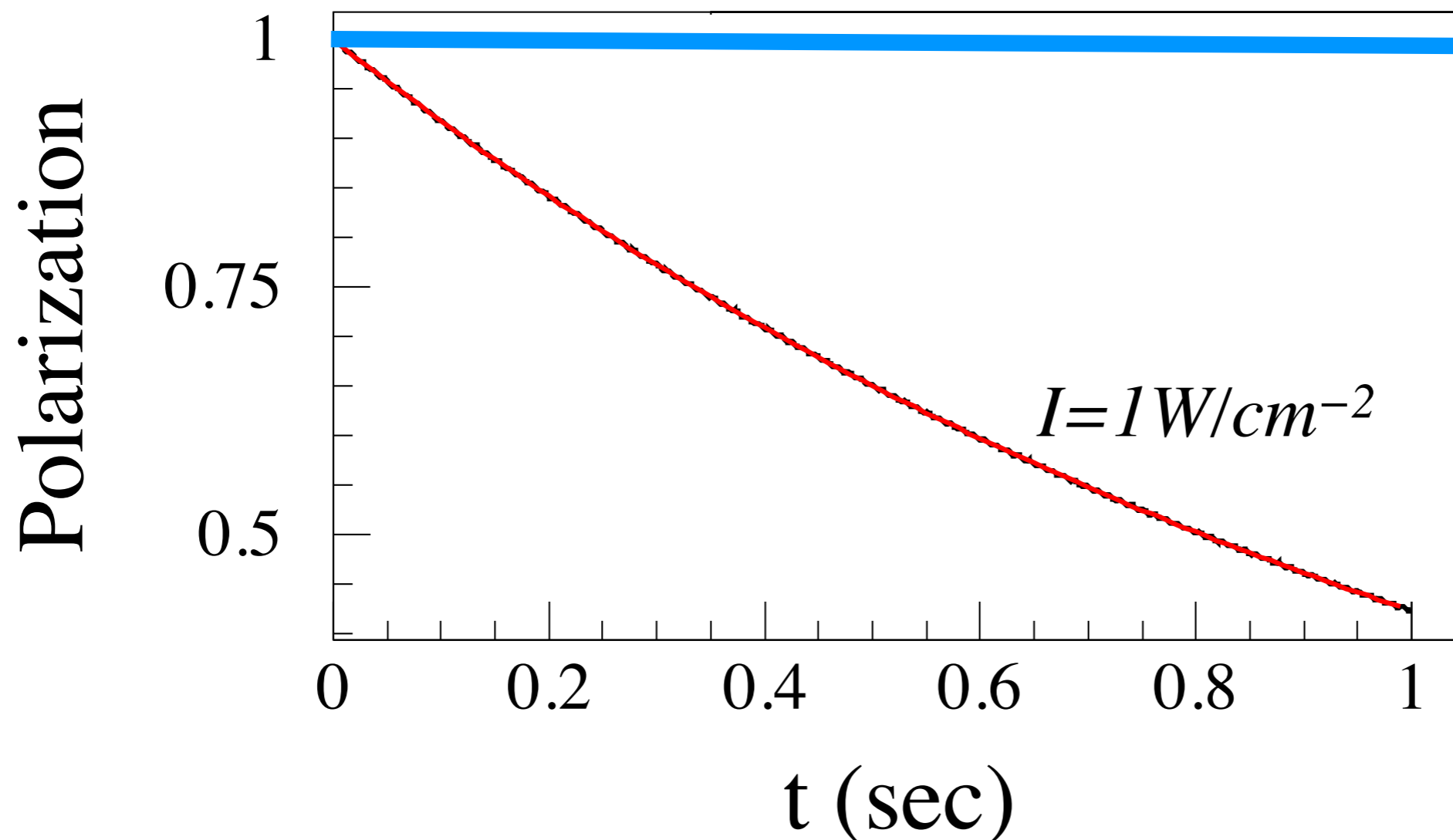
誤差の要因

- 統計誤差
 - ショットノイズ
- 系統誤差
 - ライトシフト

統計誤差

プローブ光を入射した時の偏極度の緩和

$$I=1 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^{-2}$$

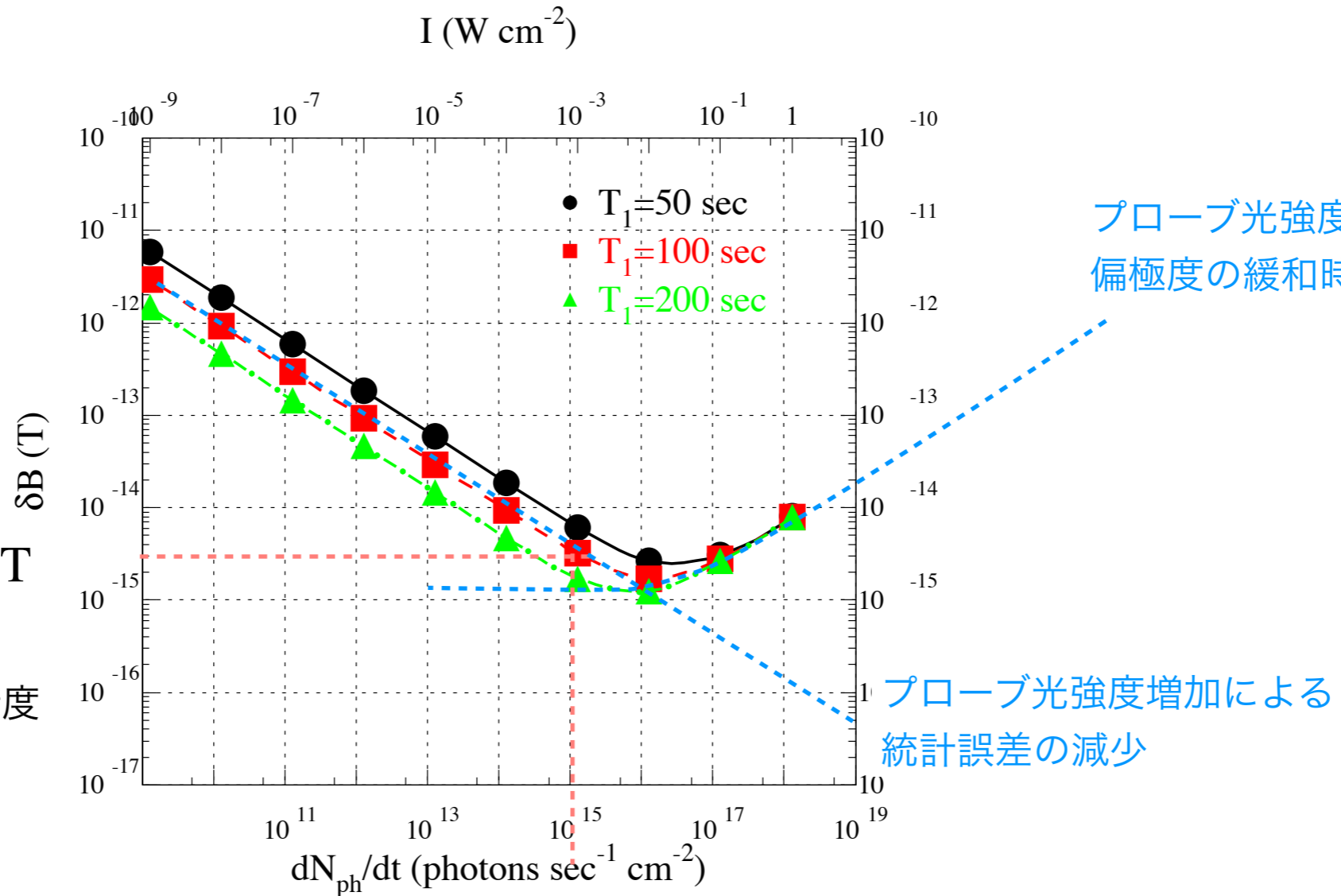


プローブ光が強くなると緩和時間が短くなる

統計誤差(ショットノイズリミット)

ショットノイズリミットは
プローブ光の強度増加による緩和時間の減少と強度増加による統計誤差の減少の競合となる。

$\delta B = 3 \times 10^{-15} \text{ T}$
↑
1ラムゼイ測定での精度



強度変調法より1以上桁良い

ただしレーザ強度は1 mW/cm² 以上必要

ショットノイズリミット

$$\delta B = 2\pi\sigma_f/\gamma \quad (53)$$

$$= \frac{2}{\alpha\gamma} \sqrt{\frac{\omega_L}{\pi n_{\text{cycl}} \dot{N}_{\text{ph}}}} \frac{1}{T_0} \quad (54)$$

$$\alpha = 0.011$$

$$= 1.1 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{1}{\dot{N}_{\text{ph}} T_0^2}}$$

$$\dot{N}_{\text{ph}} = 1 \times 10^{15} \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$$

$$T_0 = 100 \text{ sec}$$

$$\delta B \sim 3 \text{ fT}$$

7.5 daysで0.1 fT以下になる

系統誤差

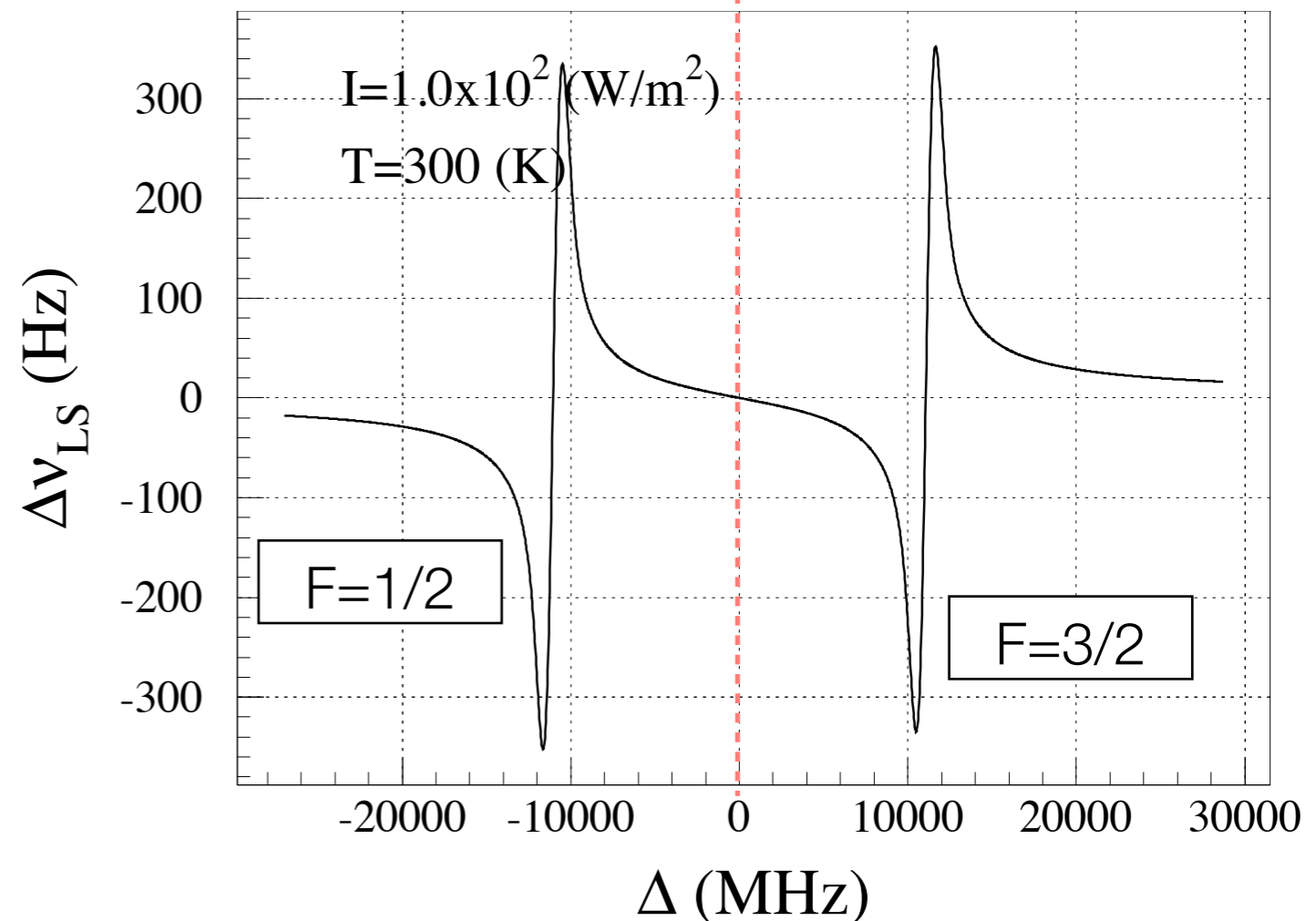
系統誤差 (ライトシフト)

AC電場があると水銀の
エネルギー準位がずれる

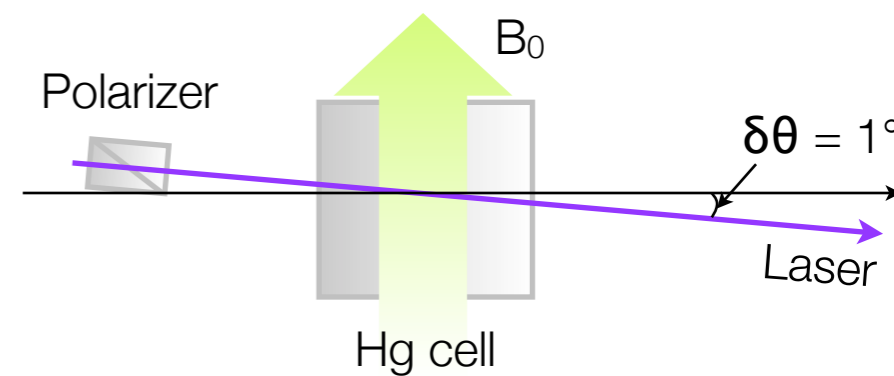
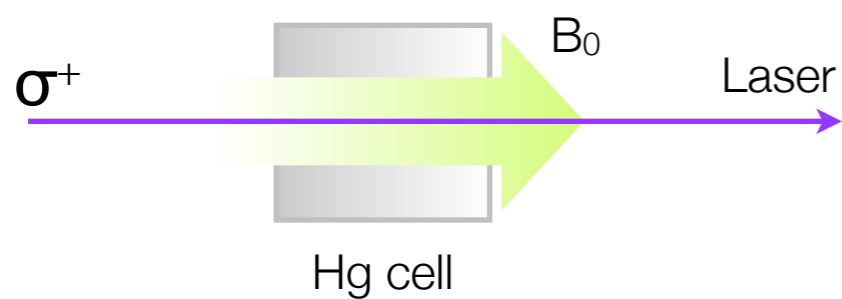
$^1S_0 - ^3P_1$

プローブ光波長

- プローブ光波長を $F=1/2$ と $F=3/2$ の中間にセットする。
- 利点
 - 吸収が小さくなる。
 - ライトシフトが小さくなる。



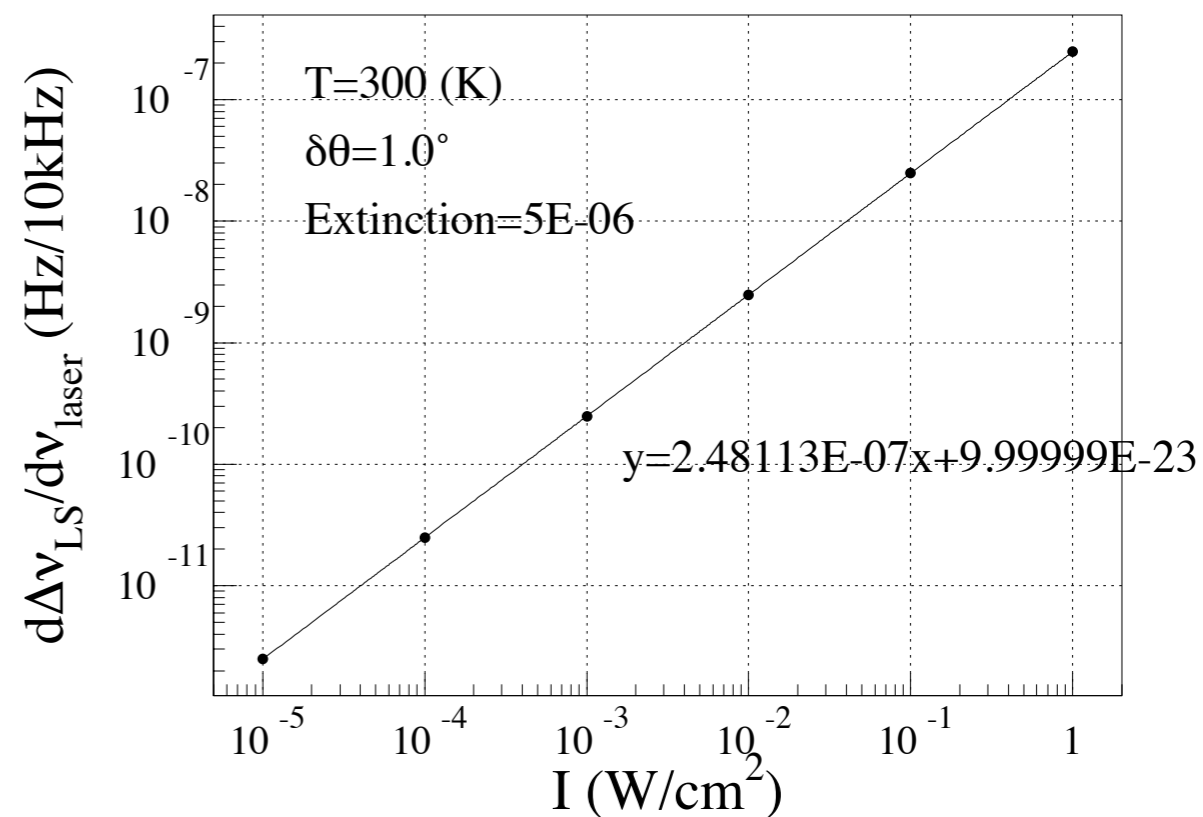
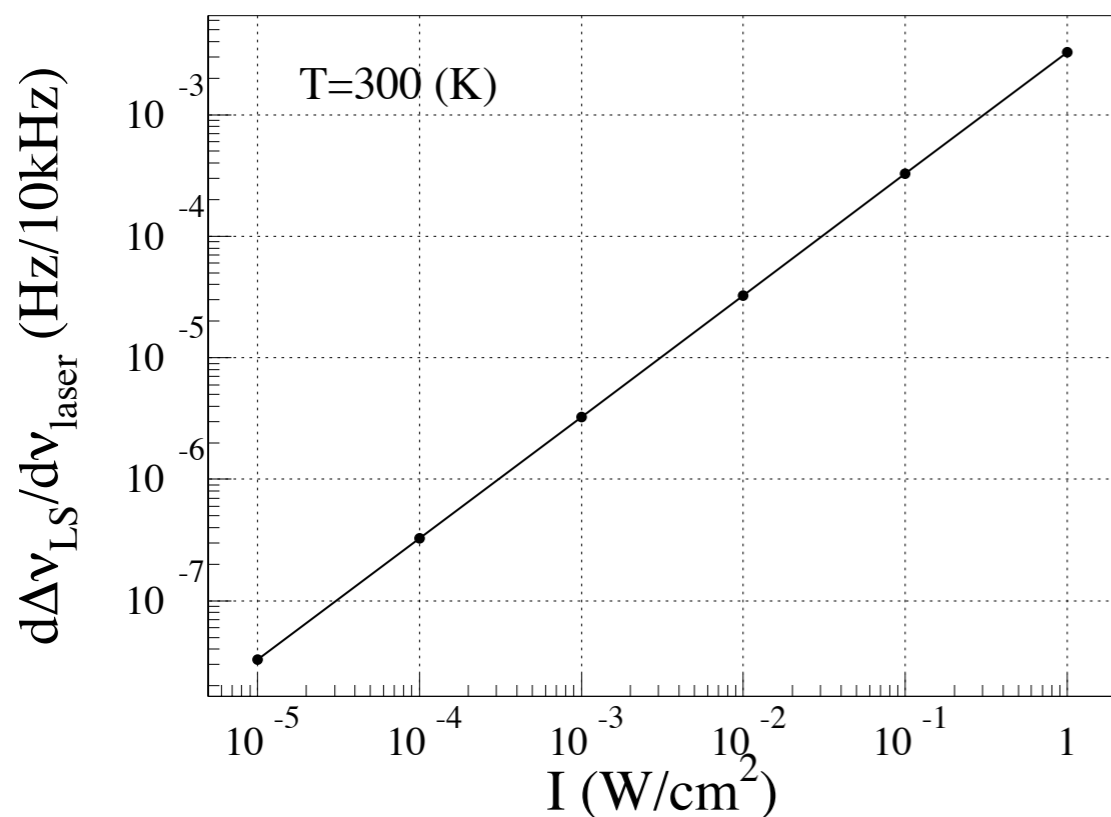
ライトシフトの大きさ



$$\delta\nu_{LS} = 2\sqrt{\xi} \cdot \delta\theta \cdot \Delta\nu_{LS0}$$

ξ : 偏光子の消光比

$\delta\theta$: 入射角のずれ



許容レーザー周波数変動

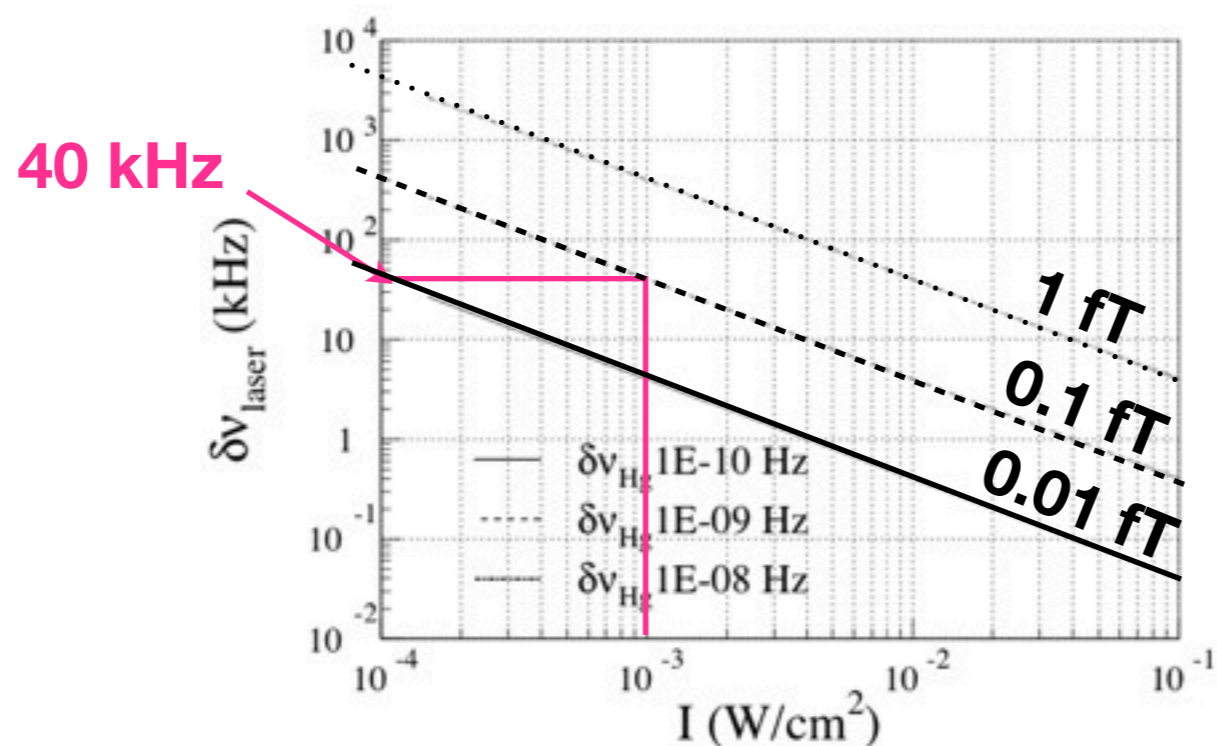


Fig. 11. 入射レーザー強度 (I) と許容強度変動量 ($\delta\nu_{\text{laser}}$) の関係. 各直線はそれぞれ目標とする ^{199}Hg ラーマー周波数測定精度 ($\delta\nu_{\text{Hg}}$) が異なる.

周波数変動は40 kHz以下に抑えられなければならない
レーザー強度: 1 mW/cm²

周波数絶対精度と強度変動

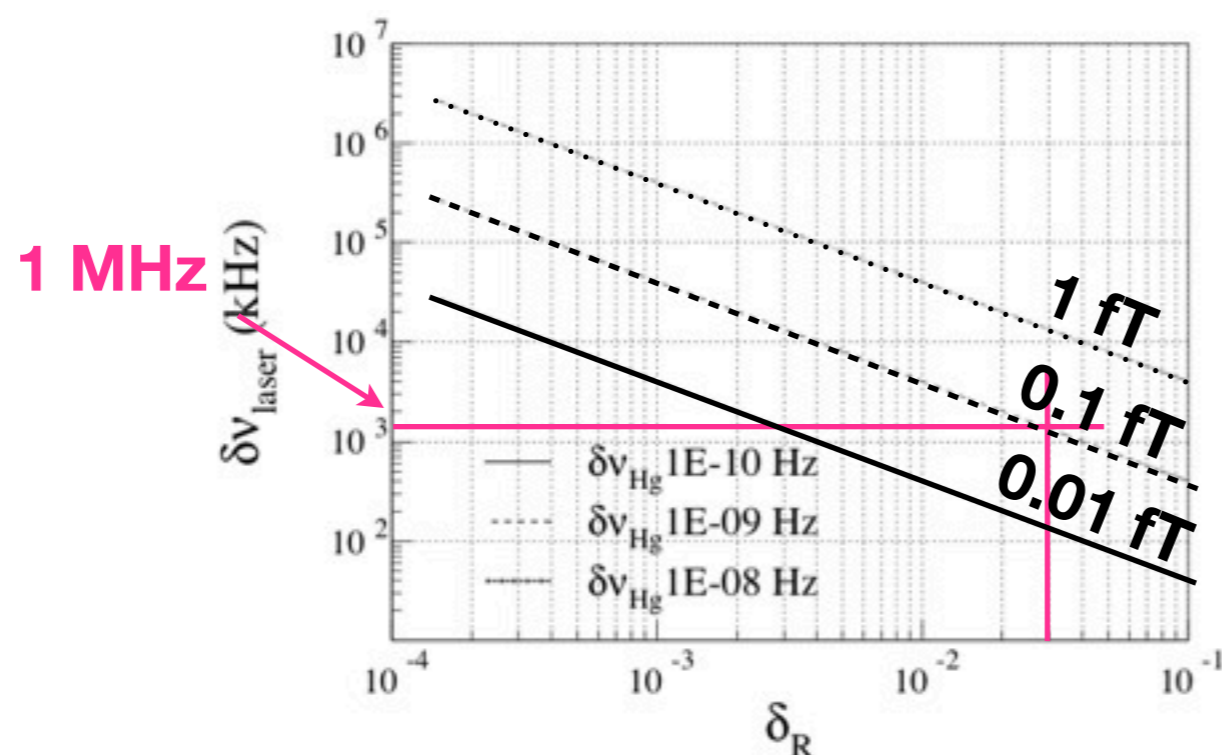


Fig. 13. 強度変動量 (δ_R) と周波数絶対精度 ($\delta\nu_{\text{laser}}$) の関係。各直線はそれぞれ目標とする ^{199}Hg ラーマー周波数測定精度 ($\delta\nu_{\text{Hg}}$) が異なる。

周波数絶対精度は1 MHz必要

ただし強度変動は3%以下であることが必要

ファラディ法統計誤差まとめ

- 水銀原子核ラーマー周波数測定精度 ~ 1 nHz
- 必要なパワー: 1 mW/cm²
- 周波数変動: 40 kHz以下
 - レーザー強度: 1 mW/cm²
- 周波数絶対精度: 1 MHz以下
 - ただし強度変動が3%以下であることが必要

ファラディ回転法まとめ

- 水銀原子核ラーマ一周波数測定精度 ~ 1 nHz (0.1 fTに相当)

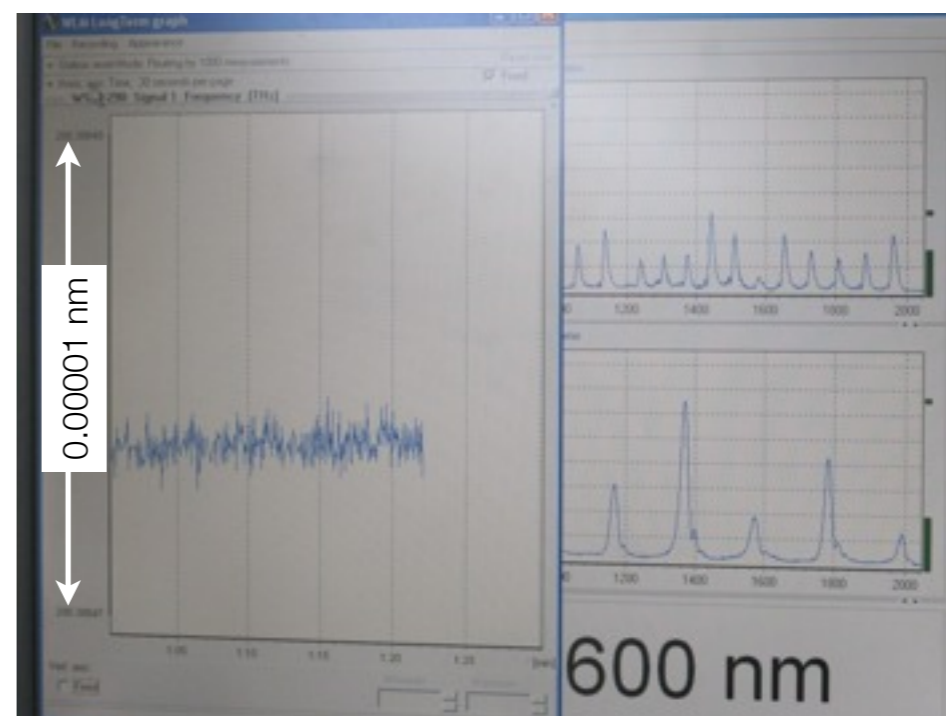
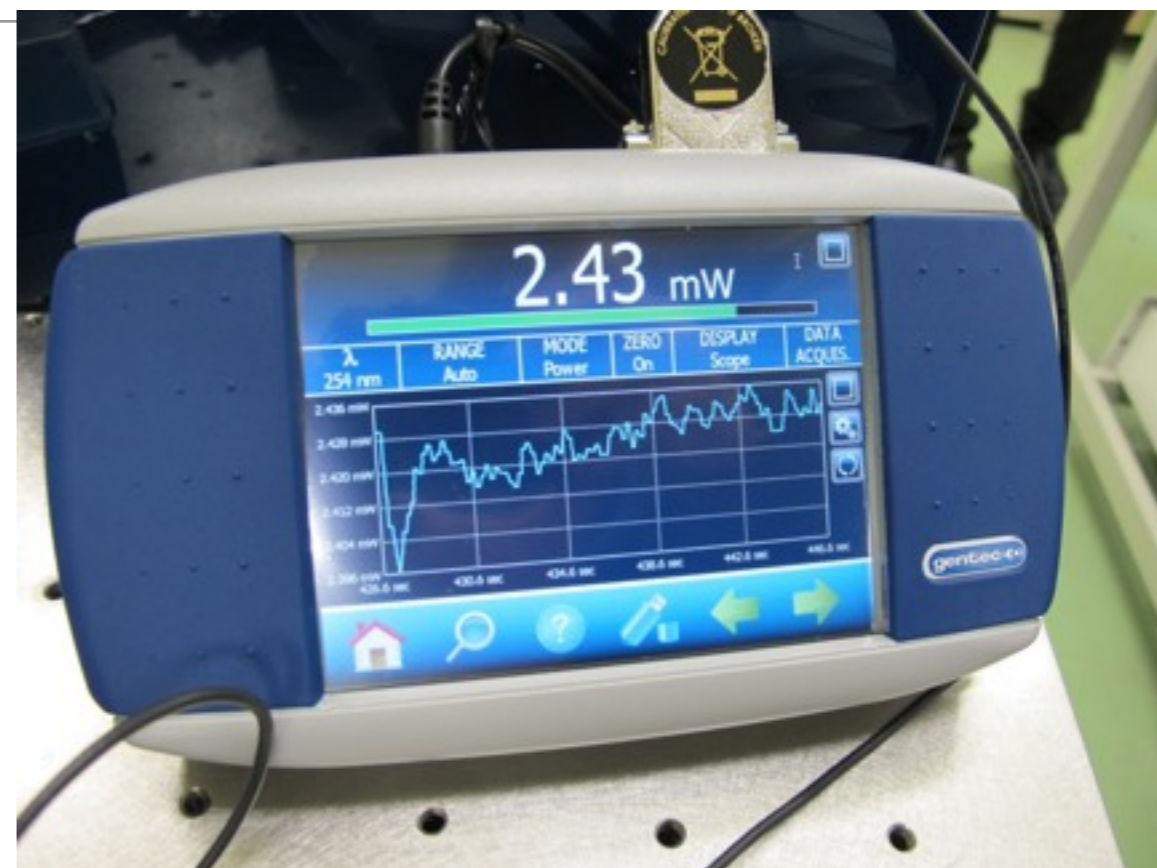
- 必要なパワー: 1 mW/cm²

- 周波数変動: 40 kHz以下
 - レーザー強度: 1 mW/cm²

- 周波数絶対精度: 1 MHz以下
 - ただし強度変動が3%以下であることが必要

現状

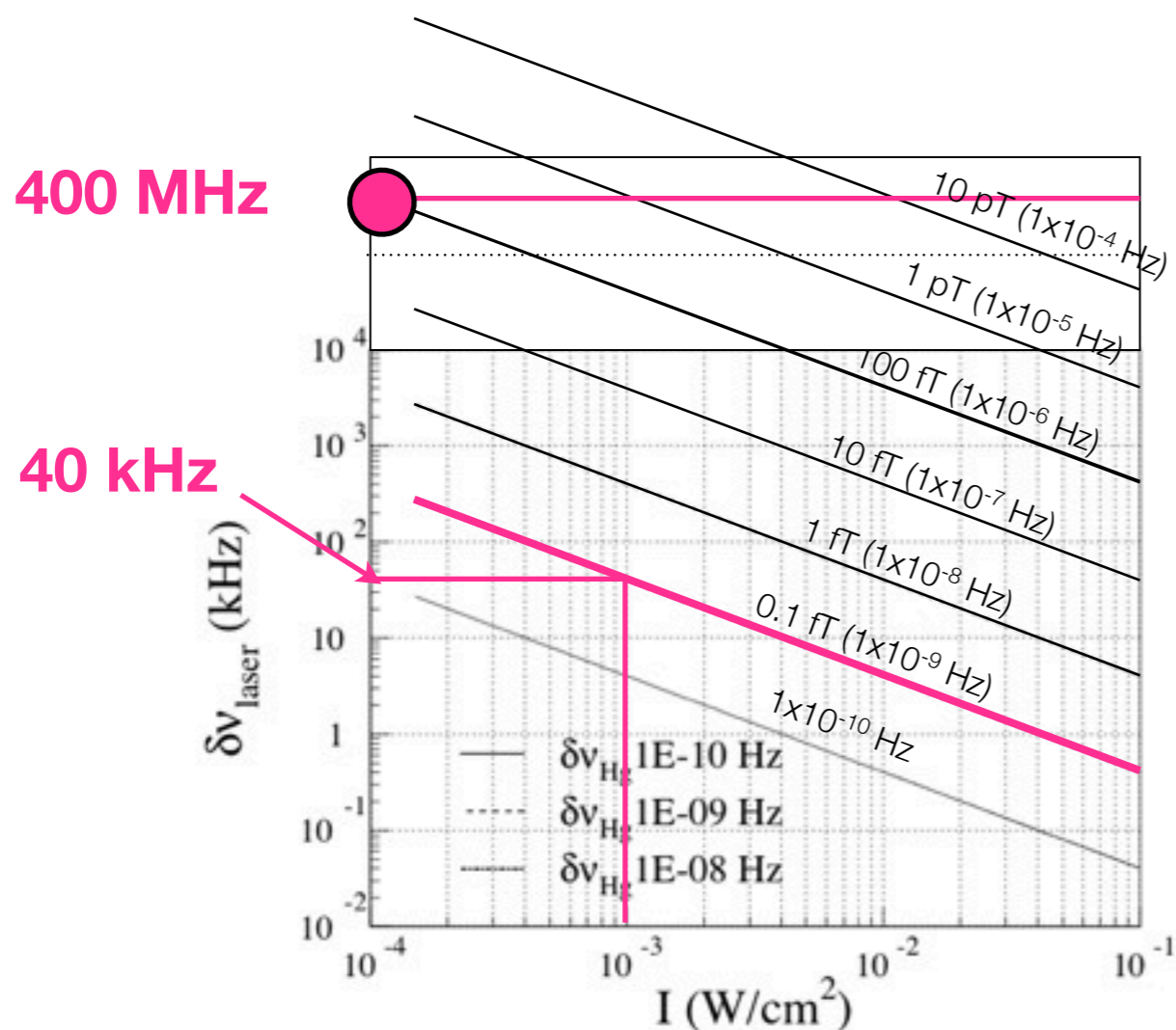
UVレーザー納品



納品されたレーザー仕様

- 中心波長 : 253.729 nm
- 出力 : 1 mW 以上
- 波長可変範囲 : 中心波長から ± 0.003 nm 以上
- モードホップフリー可変幅 : 40 GHz (最大値)
- 線幅 (時間幅5 μ s) : 1 MHz未満
- 出力安定度 : 3%以下
- 波長安定度 : 400 MHz/K 未満
- 発振モード : CW

許容レーザー周波数変動



レーザーパワー密度
0.1 mW/cm²に抑えれば
400 MHzで
磁場測定精度100 fTとなる

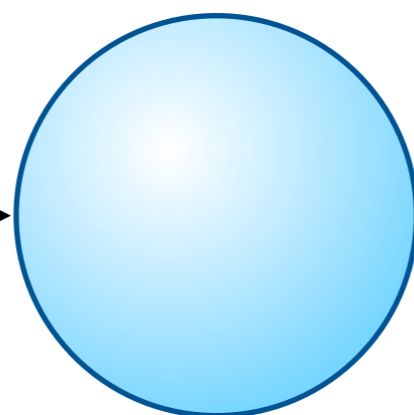
Fig. 11. 入射レーザー強度 (I) と許容強度変動量 ($\delta\nu_{\text{laser}}$) の関係. 各直線はそれぞれ目標とする ^{199}Hg ラーマー周波数測定精度 ($\delta\nu_{\text{Hg}}$) が異なる.

レーザー波長絶対精度

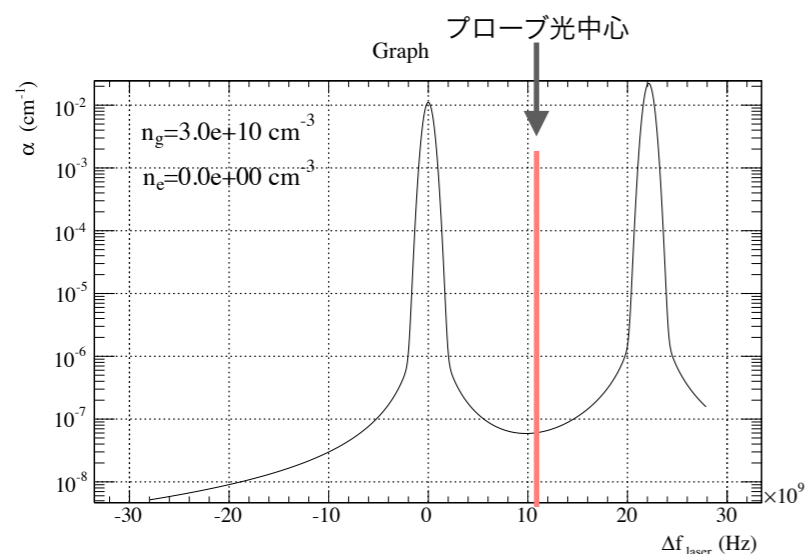
レーザー波長の絶対精度はHgの吸収スペクトルを用いる

水銀リファレンスセル

UVレーザー



検出器



水銀の同位体

$$\begin{aligned}
 (1/\lambda_A + 1/\lambda_B)/2 &= 39412.3155 \text{ cm}^{-1} \\
 &= 1.18155149 \times 10^{15} \text{ Hz} \\
 &= 253.727797 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

Isotope	Abundance	Frequency (cm ⁻¹)	F_g	F_e
196	0.15%	39 412.597 3	0	1
198	10.10%	39 412.460 3	0	1
199A	17.0%	39 411.946 3	1/2	1/2
199B		39 412.684 7	1/2	3/2
200	23.1%	39 412.3	0	1
201a	13.2%	39 411.971 3	3/2	5/2
201b		39 412.437 7	3/2	3/2
201c		39 412.689 5	3/2	1/2
202	29.65%	39 412.123 3	0	1
204	6.85%	39 411.949 5	0	1

$\Delta=470 \text{ MHz}$

TABLE 1 Isotopic abundance and line positions for atomic mercury isotopes used in theoretical absorption calculations. Total angular momentum quantum numbers for the ground (F_g) and excited (F_e) states are also given

周波数絶対精度と強度変動

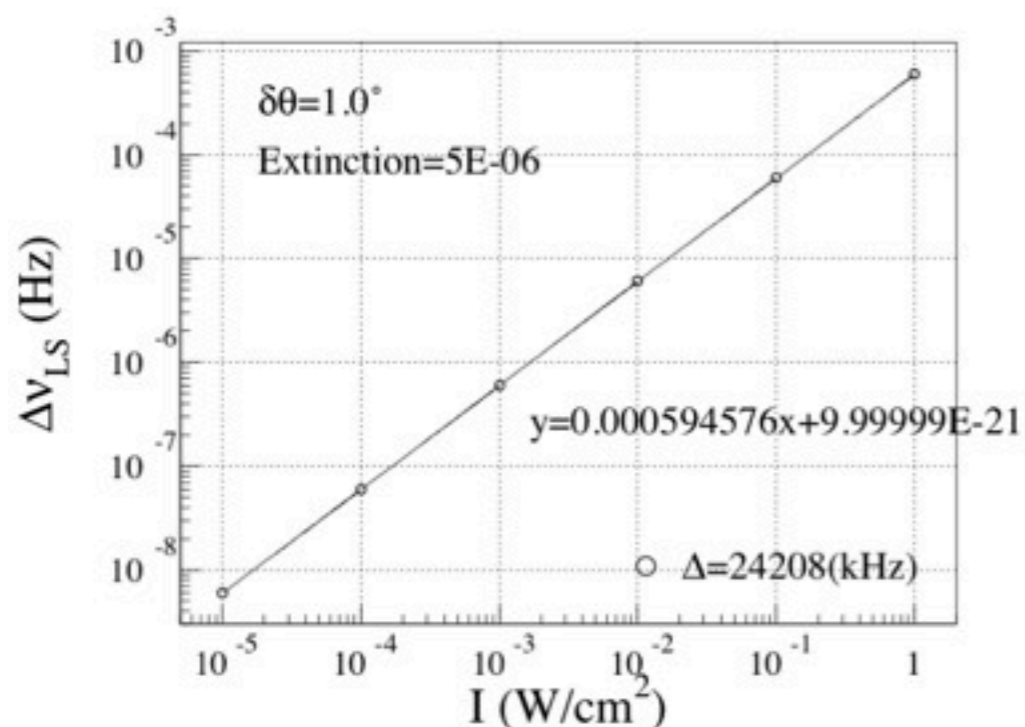


Fig. 12. $\Delta = 24$ MHz における入射光強度とライトシフトの関係

水銀リファレンス
セル

1 MHz

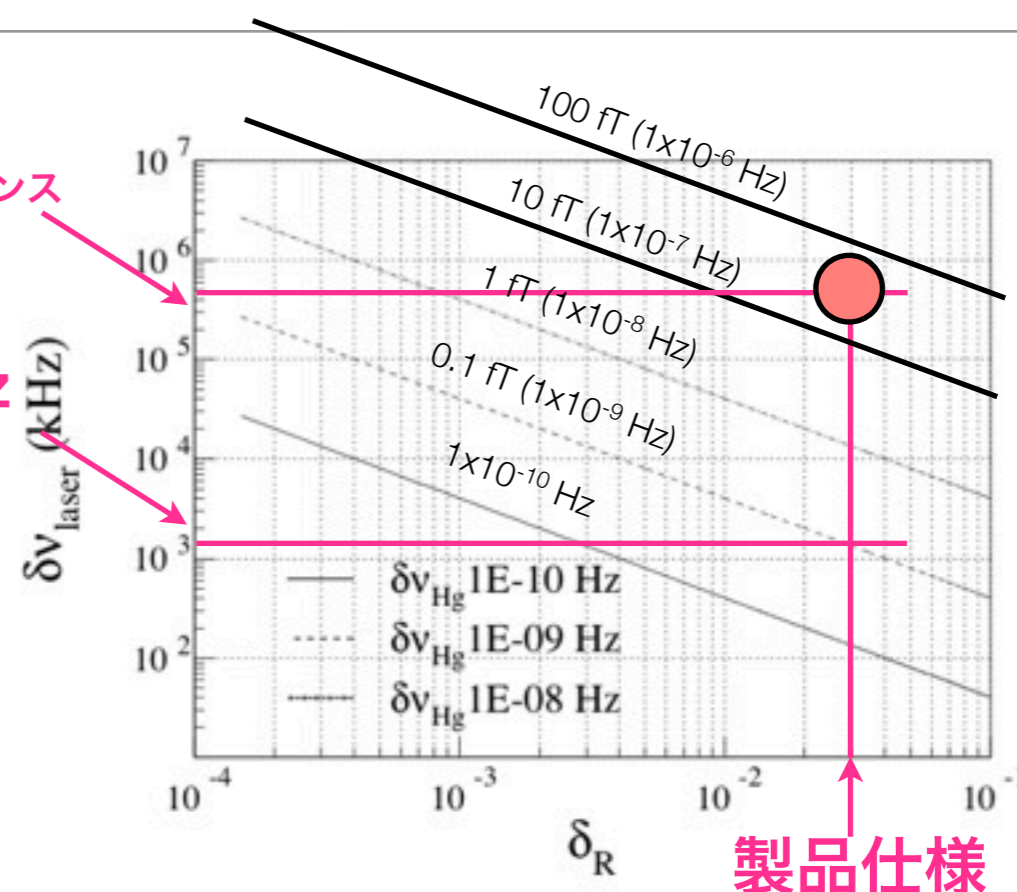
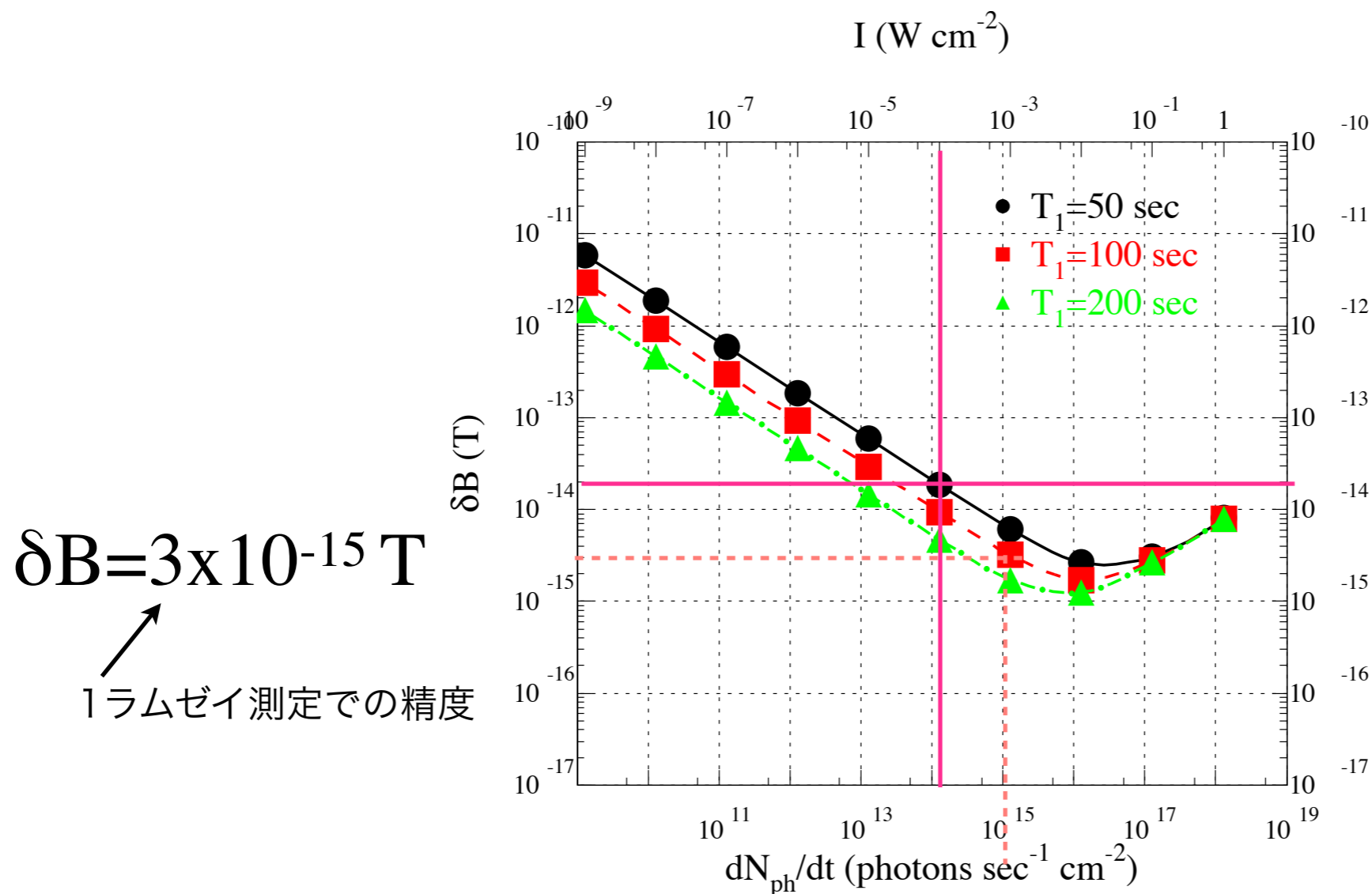


Fig. 13. 強度変動量 (δ_R) と周波数絶対精度 ($\delta\nu_{laser}$) の関係。各直線はそれぞれ目標とする ^{199}Hg ラーマー周波数測定精度 ($\delta\nu_{\text{Hg}}$) が異なる。

水銀リファレンスセルを用いて周波数を合わせた時
そのずれは500 MHz程度であり、
50 fT程度の磁場精度が達成可能

ショットノイズリミット (Faraday Rotation 法)



レーザーパワー密度 $0.1\ mW/cm^2$ 以上、 $T_1 = 50$ の場合、 $20\ fT$ の磁場精度を達成可能

開発項目

まずは磁場測定精度 100 fT を目指す.

100 fT ~ 1 pT/√Hz.

磁気シールド

周波数安定化

絶対周波数測定

検出器

セルのコーティング