



# 電子EDM探索の現状と展望

---

2022.08.31

平本 綾美 (岡山大学)

for the ACME collaboration

# テーブルトップ素粒子実験

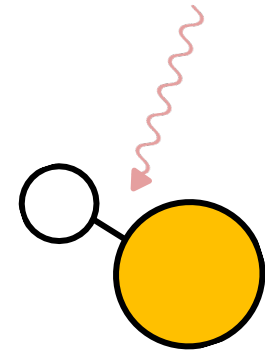
## 加速器実験



## テーブルトップ

AMO

- Atomic
- Molecular
- Optical



JPSだと量エレに近い

❖ 近年のeEDMの結果はすでに~30TeV程度までの新粒子に制限を与えている

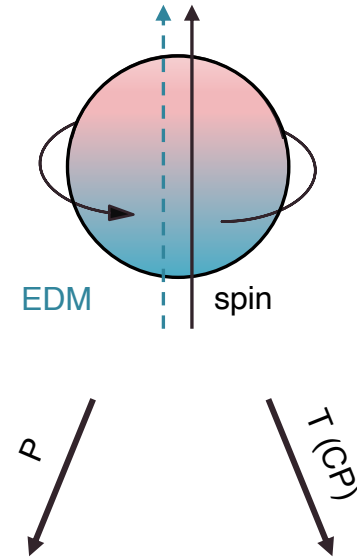
## 本日のトーク

- ▷ ACME実験: eEDMをどう測る? どのところが難しい?
- ▷ 現行・将来計画eEDM: 今後どんな実験をするべきか?

# Electron Electric Dipole Moment (eEDM)

EDM (d) :

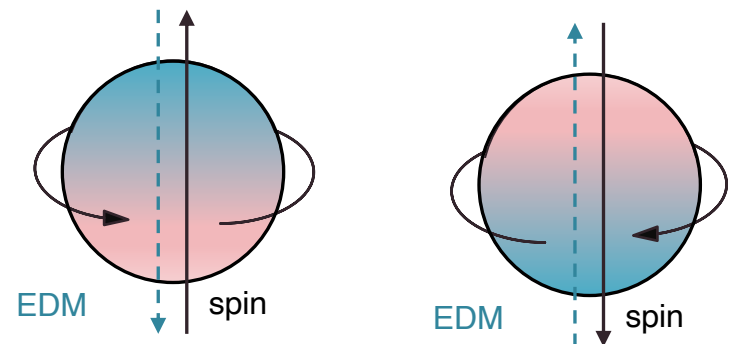
- ❖ 空間的な電荷の偏り
- ❖ 存在するならスピンの並行or反並行
- ❖ EDMが存在すると、PとTを破る  
=> CPT保存の元でCP対称性の破れ



SMから予測されるeEDM:  $5.8 \times 10^{-40} \text{ e cm}$

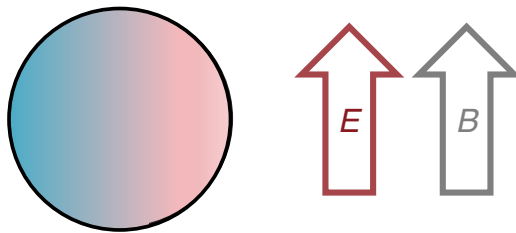
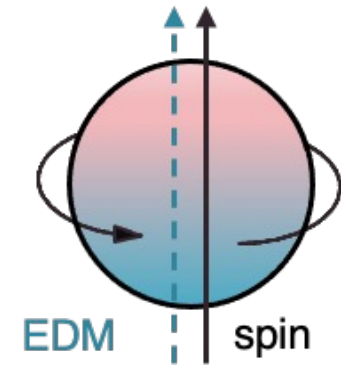
Phys. Rev. Lett. **125**, 241802 (2020).

eEDMは新物理のプローブ！

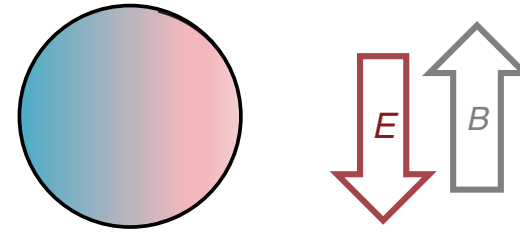


# EDM測定原理

- ❖ スピン歳差運動を測定することでEDM ( $d$ ) を探す
- ❖ EDMが存在すると、歳差運動の周波数が変わる  
=> 電場を反転させることで周波数の違いをみる



$$\omega_+ = 2 \frac{\mu B + dE}{\hbar}$$



$$\omega_- = 2 \frac{\mu B - dE}{\hbar}$$

大きな信号を得るためには、強い電場のもとでの測定が必要

# これまでのeEDM測定

原子や分子は非常に大きな内部電場を持つ

ACME II result (2018):

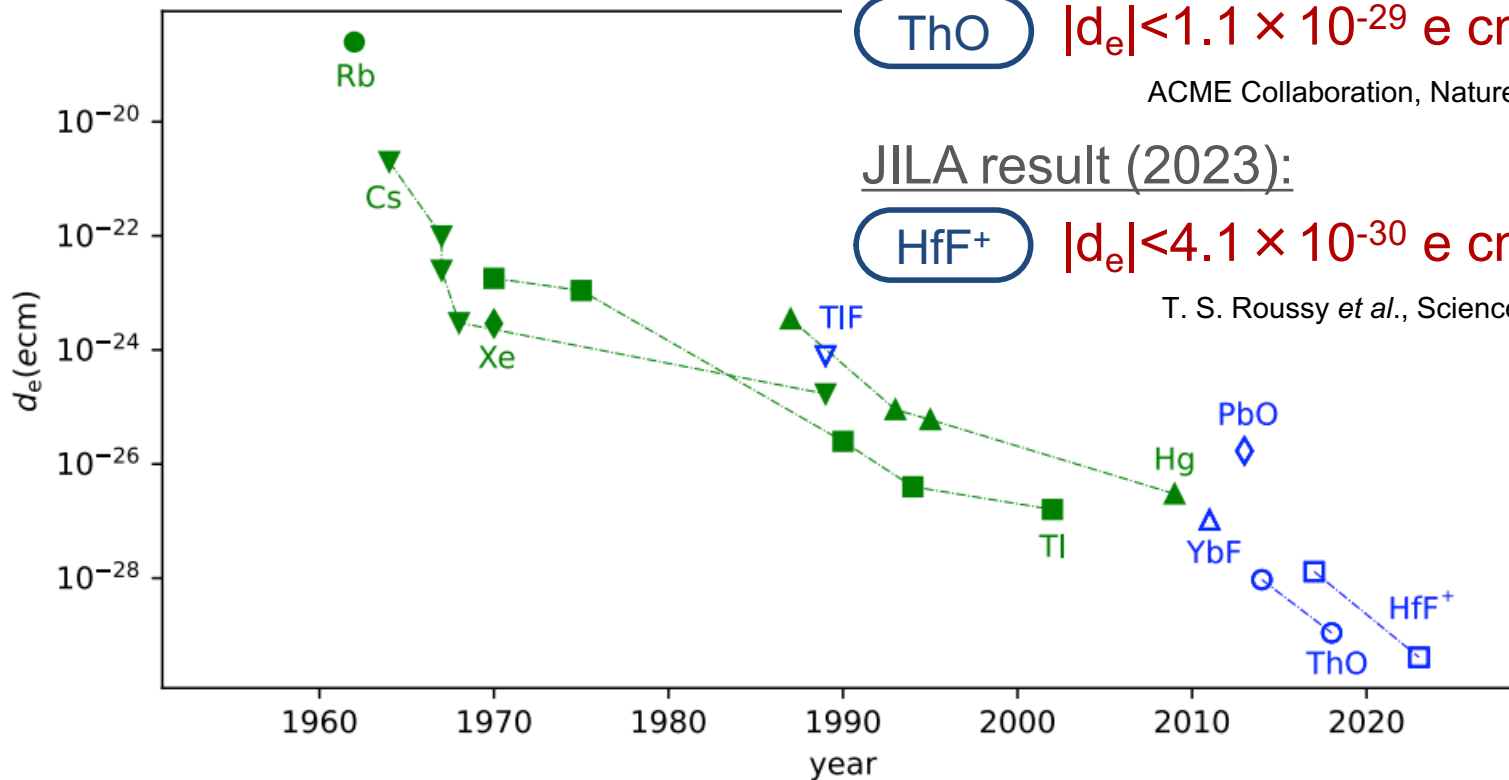
**ThO**  $|d_e| < 1.1 \times 10^{-29} \text{ e cm (90\%C.L.)}$

ACME Collaboration, Nature 562, 355-360 (2018).

JILA result (2023):

**HfF<sup>+</sup>**  $|d_e| < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e cm (90\%C.L.)}$

T. S. Roussy et al., Science 381, 46-50 (2023).



**ThO**  
理論

$$d_e^{eq} = d_e + C_s \times 1.5 \times 10^{-20} \sim 1.0 \times 10^{-35} \text{ e cm} \quad \text{Phys. Rev. Lett. 129, 231801 (2022).}$$

$$\uparrow \sim 1.0 \times 10^{-40} \text{ e cm}$$

# eEDMと新物理

ACME II result (2018):

$$\text{ThO} \quad |d_e| < 1.1 \times 10^{-29} \text{ e cm (90\% C.L.)}$$

ACME Collaboration, Nature 562, 355-360 (2018).

JILA result (2023):

$$\text{HfF}^+ \quad |d_e| < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e cm (90\% C.L.)}$$

T. S. Roussy *et al.*, Science 381, 46-50 (2023).

$$\frac{d_e}{e} \sim \kappa \left( \frac{\alpha_{\text{eff}}}{2\pi} \right)^n \left( \frac{m_e c^2}{\Lambda^2} \right) \sin(\phi_T) (\hbar c)$$

$\Lambda$ : rest-mass energy of a new particle

$\kappa$ : 0.1~1 depending on models

$\phi_T$ : T-violating phase

$n$ : the number of loops in an Feynman diagram

$\sin(\phi_T) \sim 1, \Lambda = 1 \sim 100 \text{ TeV} \Rightarrow 10^{-28} \sim 10^{-30} \text{ e cm}$

❖ ACME, JILAの結果はすでに~40TeV程度までのSUSYに制限を与えている

# ACME experiment

---



# ACME Collaboration



OKAYAMA UNIV.



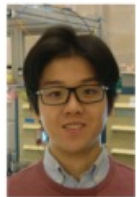
David DeMille



John Doyle



Gerald Gabrielse



Zhen Han



Xing Wu



Xing Fan



Siyuan Liu



Collin Diver



Koji Yoshimura



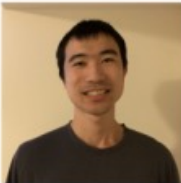
Satoshi Uetake



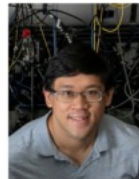
Naboru Sasao



Nick Hutzler



Peiran Hu



Daniel Ang



Cole Meisenhelder



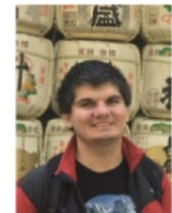
Maya Watts



Takahiko Masuda



Ayami Hiramoto



Cris Panda



GORDON AND BETTY  
**MOORE**  
FOUNDATION



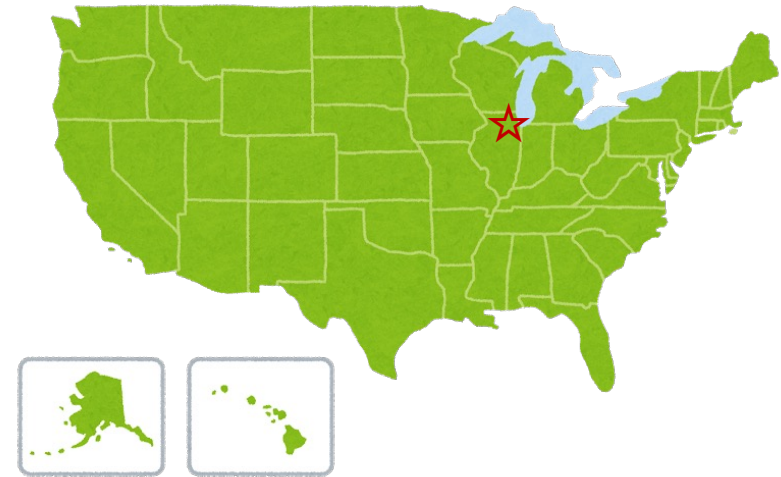
Alfred P. Sloan  
FOUNDATION

科研費  
KAKENHI

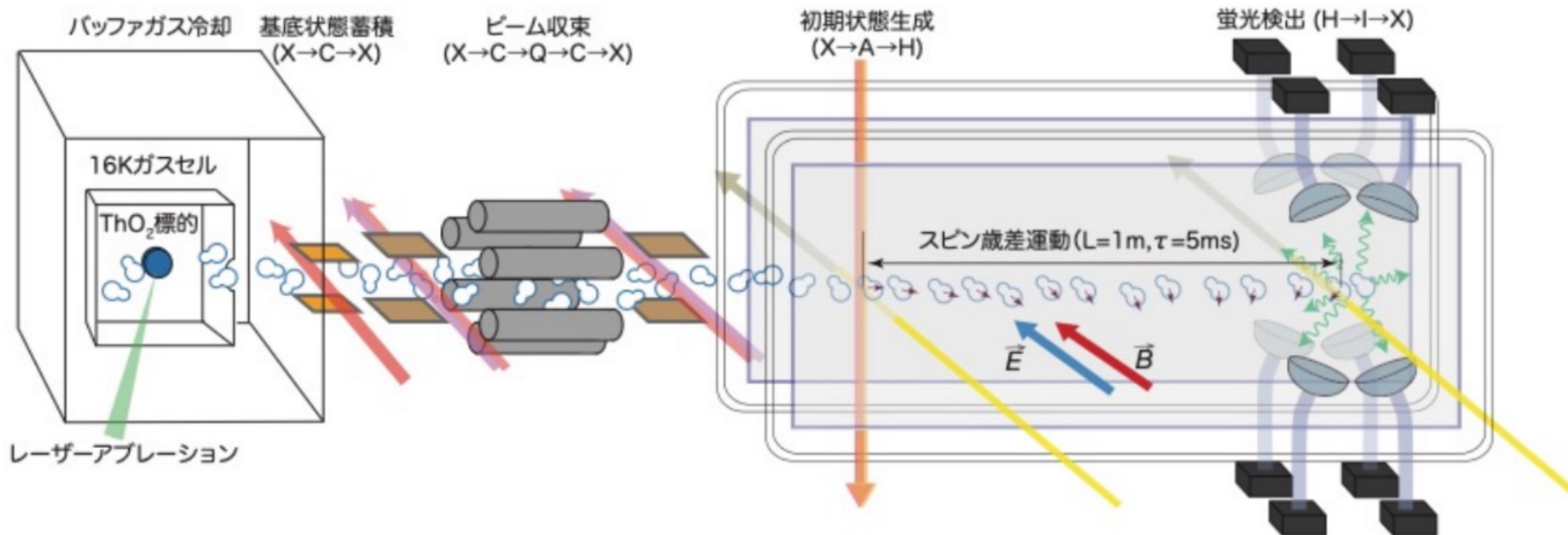


# ACME実験

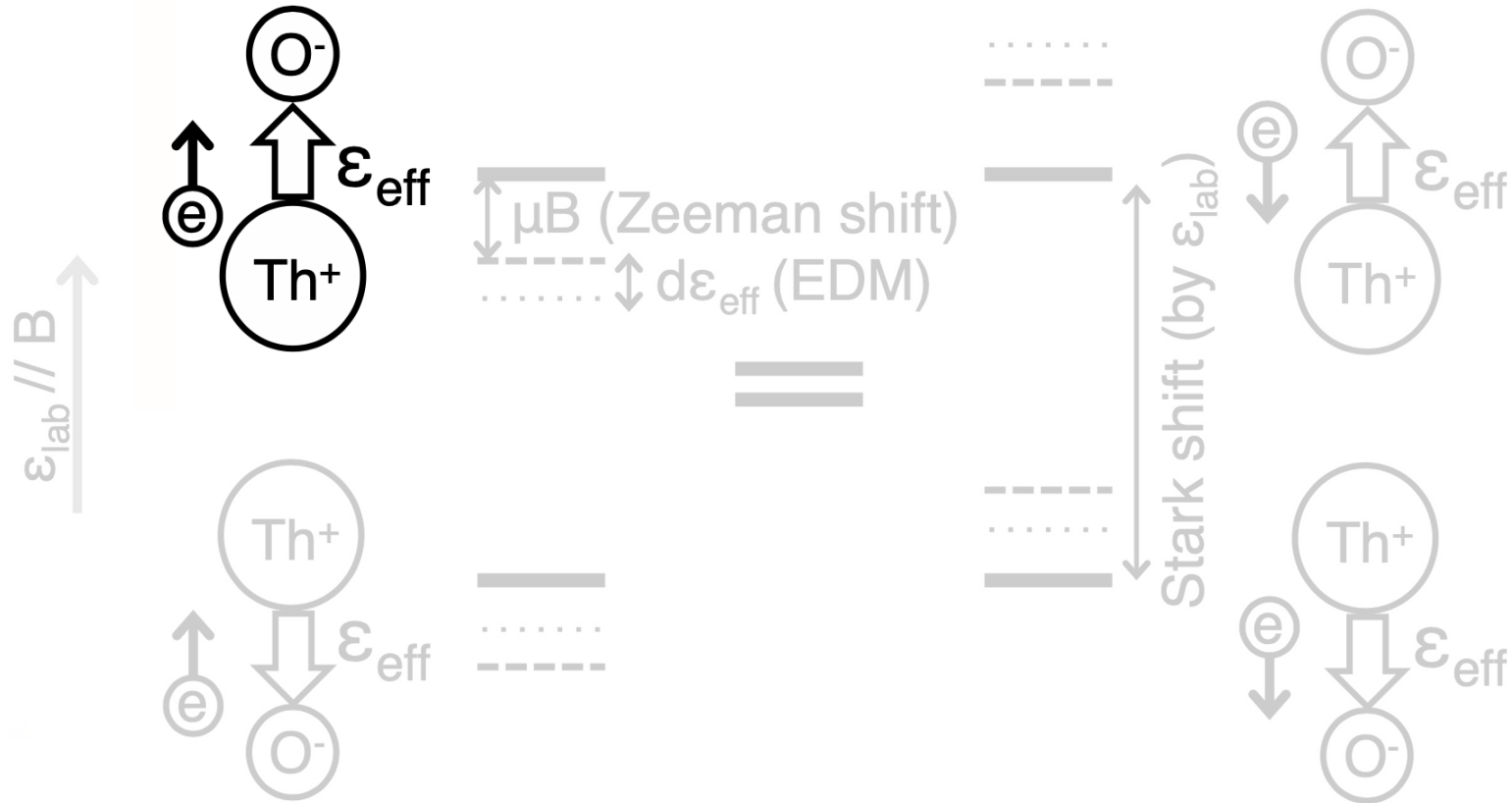
- ❖ 場所: Northwestern University (ACME I, II はHarvard)
- ❖ ACME III (感度30倍) に向けてアップグレード中



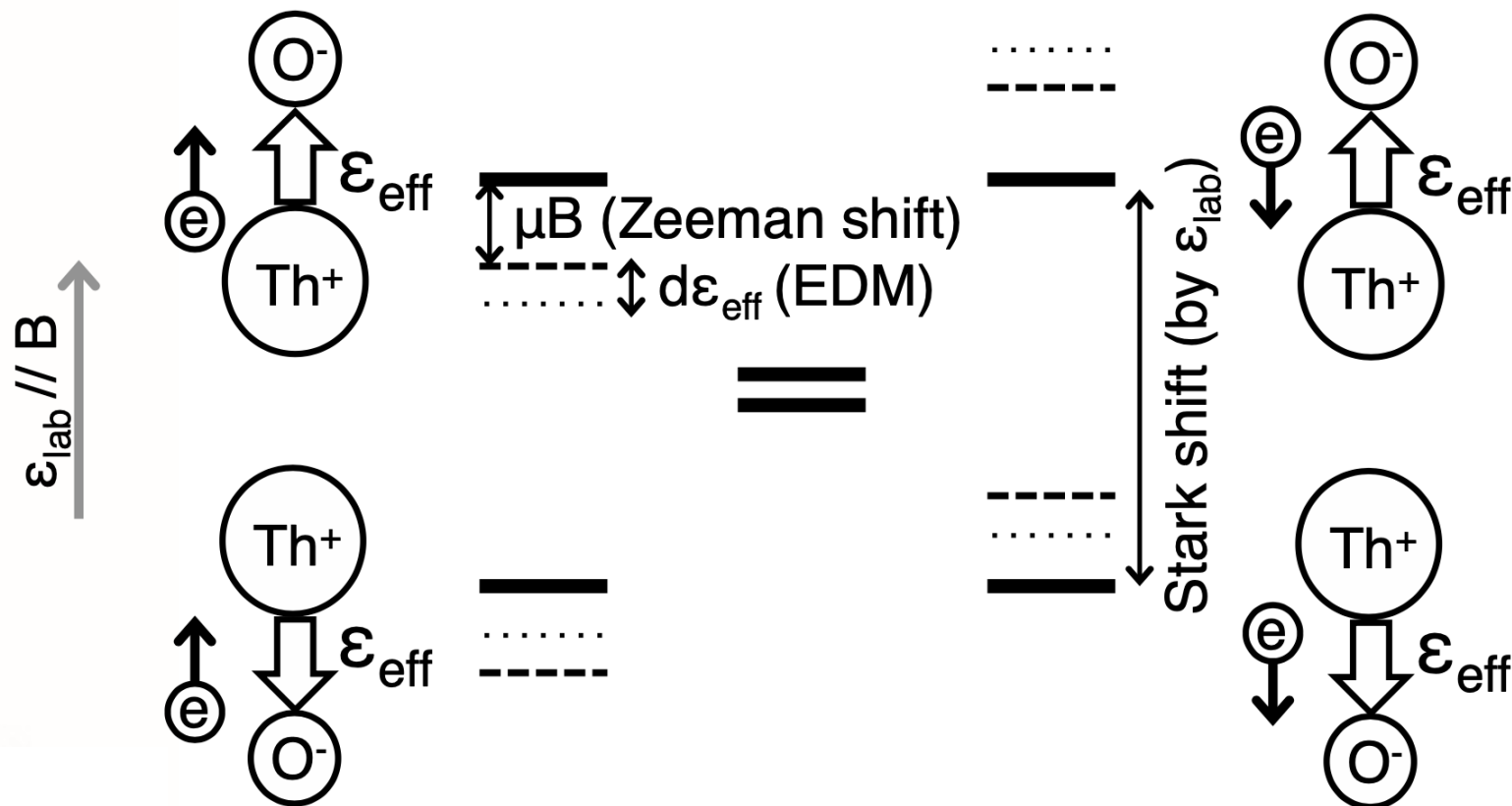
## 実験装置概要



# 2原子極性分子 ThO



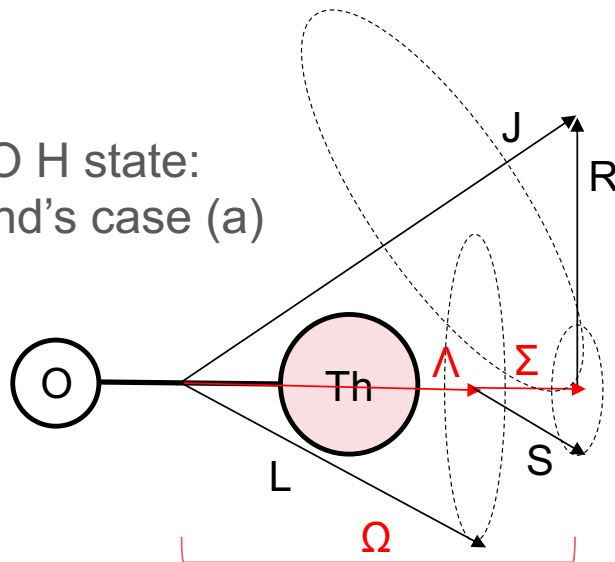
# 2原子極性分子 ThO



# Why ThO, H state?

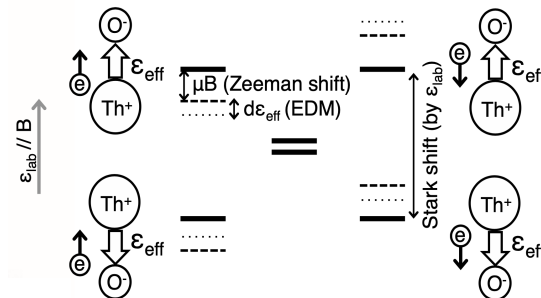
- ① 大きな内部電場:  $\epsilon_{\text{eff}} = 78 \text{ GV/cm}$  L.V.Skripnikov, J.Chem. Phys. **145** 214307 (2016).  
M.Denis and T.Fleig, J.Chem. Phys. **145** 214307 (2016).
- ②  $\epsilon_{\text{lab}} \sim$  数十V/cmで完全分極 (80, 140 V/cm)
- ③ 小さな磁気モーメント:  $\mu = 0.0044 \mu_B$  L.V.Skripnikov *et al.*, J. Chem. Phys. **139** 221103 (2013).
- ④ 寿命が長い:  $\tau_H \sim 4.2 \text{ ms}$  D.G.Ang *et al.*, Phys. Rev. A **106**, 022808 (2022).
- ⑤ 作りやすい(ThO<sub>2</sub>からのレーザーアブレーション) etc...

ThO H state:  
Hund's case (a)



## $\Omega$ -doublet

$\Omega$ : 電子の全角運動量の分子軸射影

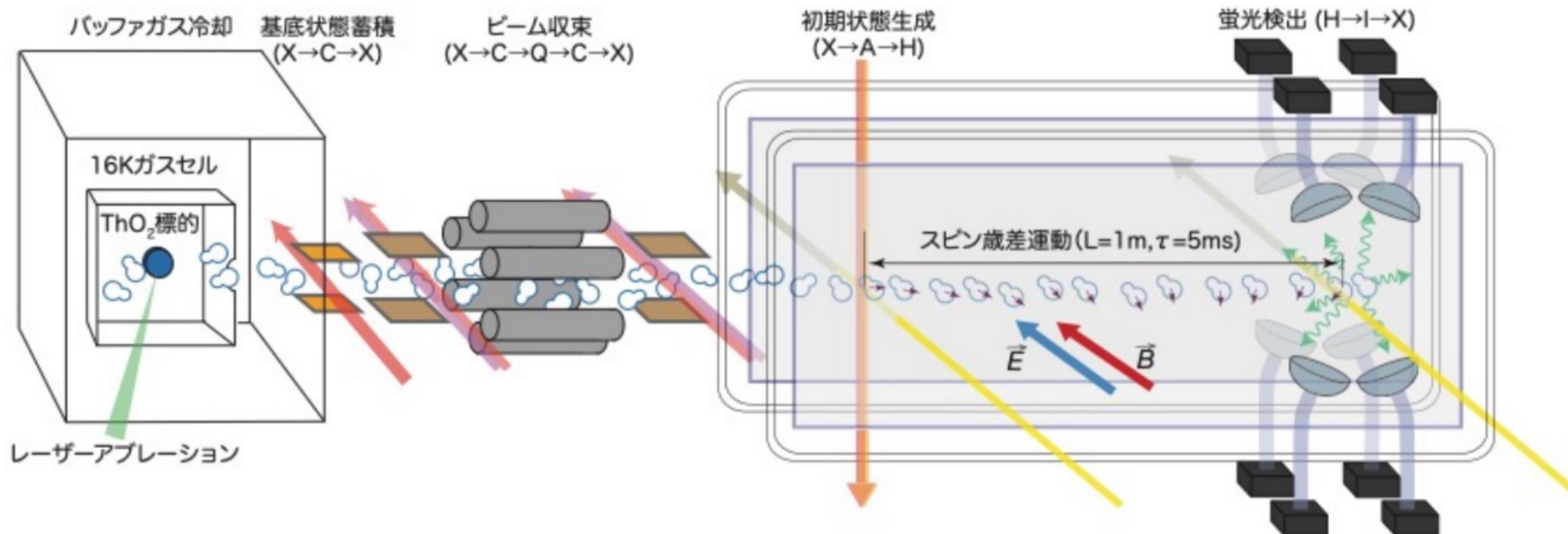
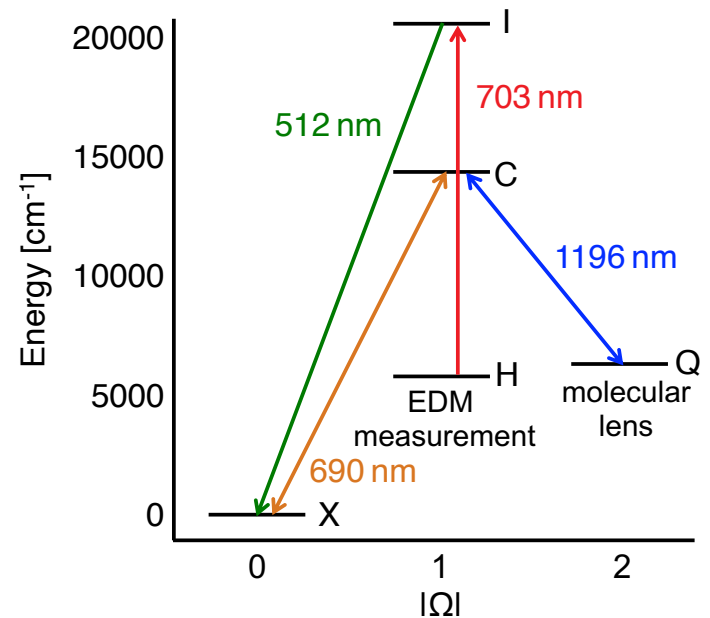


# 実験装置

## ❖ ACME III アップグレード

...ほとんどすべてのパーツをリニューアル

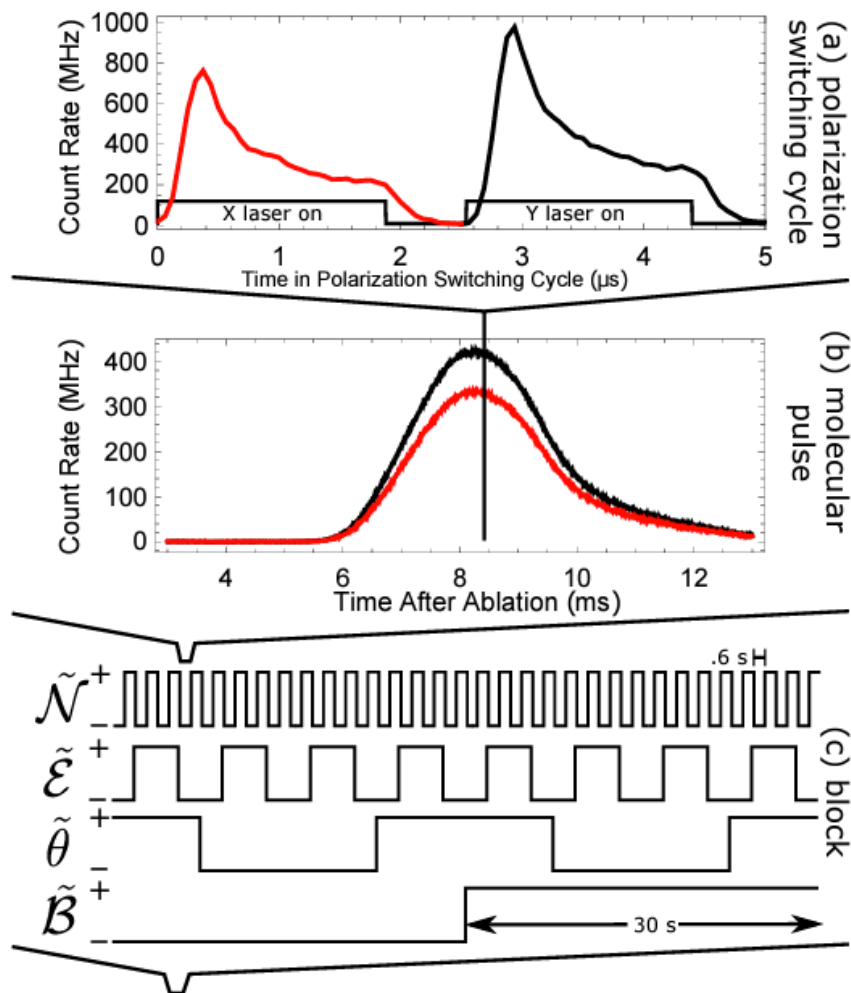
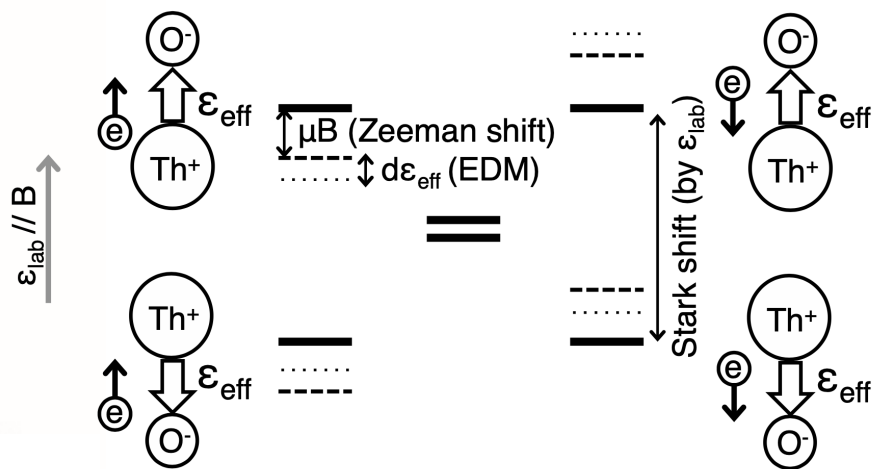
## ❖ 2018年の結果より30倍良い感度を目指す



# Switching

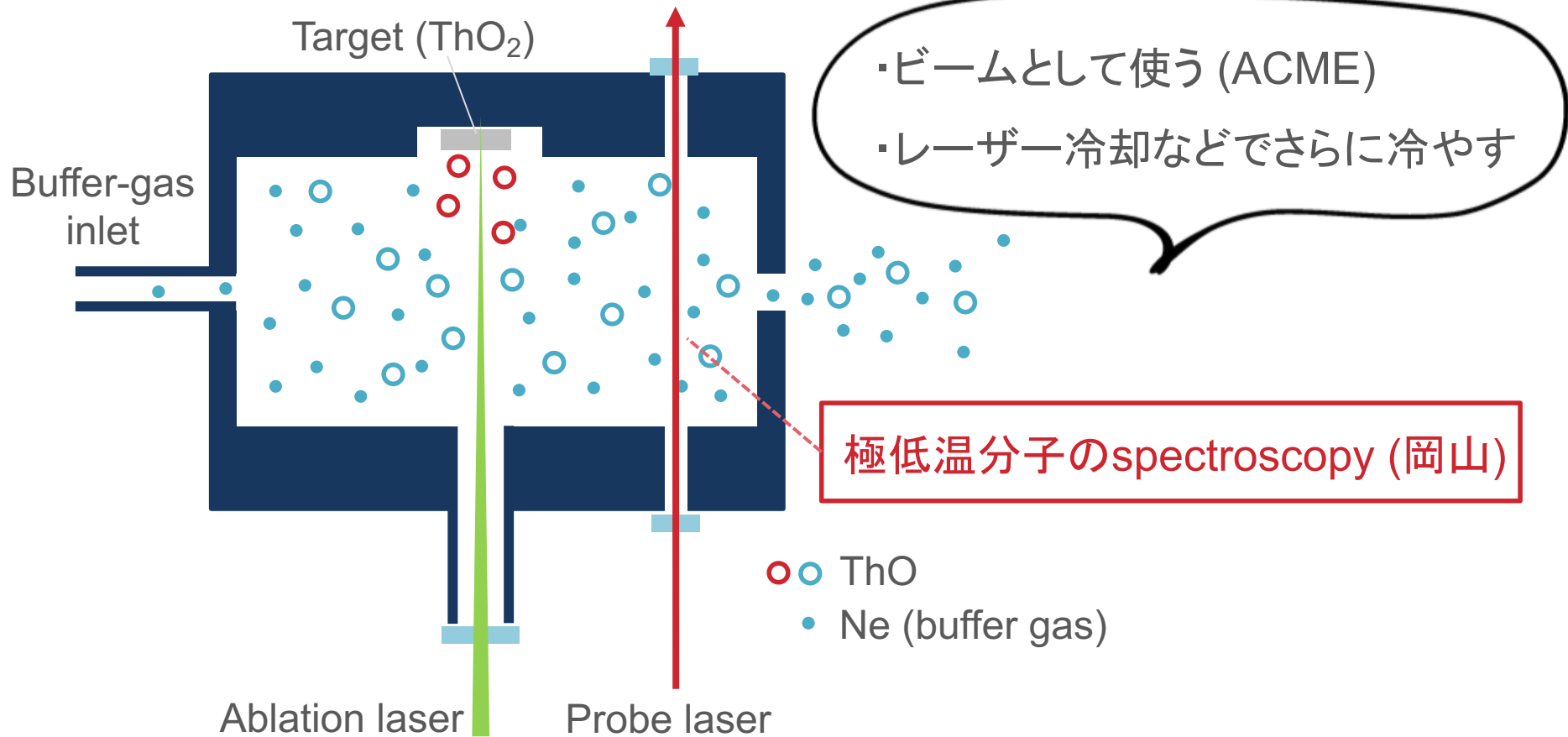
❖ スイッチングによる系統誤差削減

(分子準位、外部電場の向き、  
XYレーザー偏光、磁場の向き...)



# バッファガス冷却

冷却原子・分子の実験を支える重要な技術

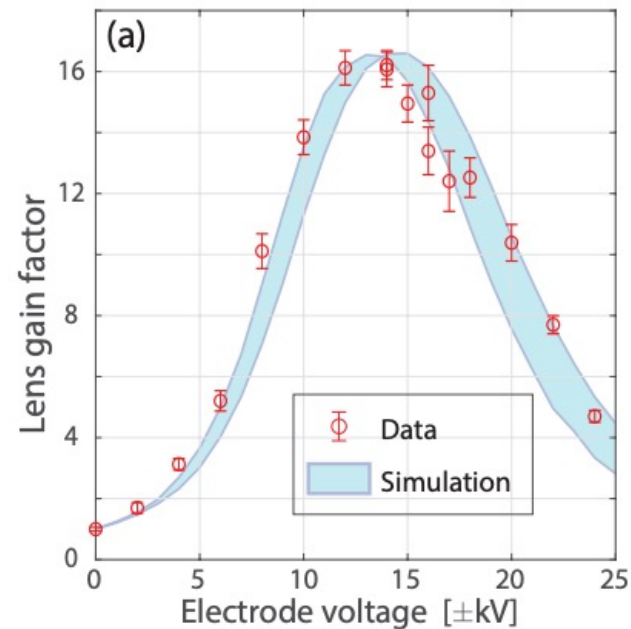
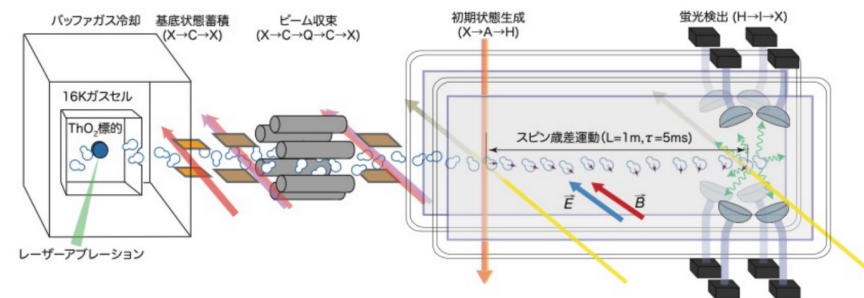


# 収束レンズ

## ❖ Electrostatic hexapole lens

- ビームの広がりを収束
- State preparationの段階で使える分子数自体を増やせる

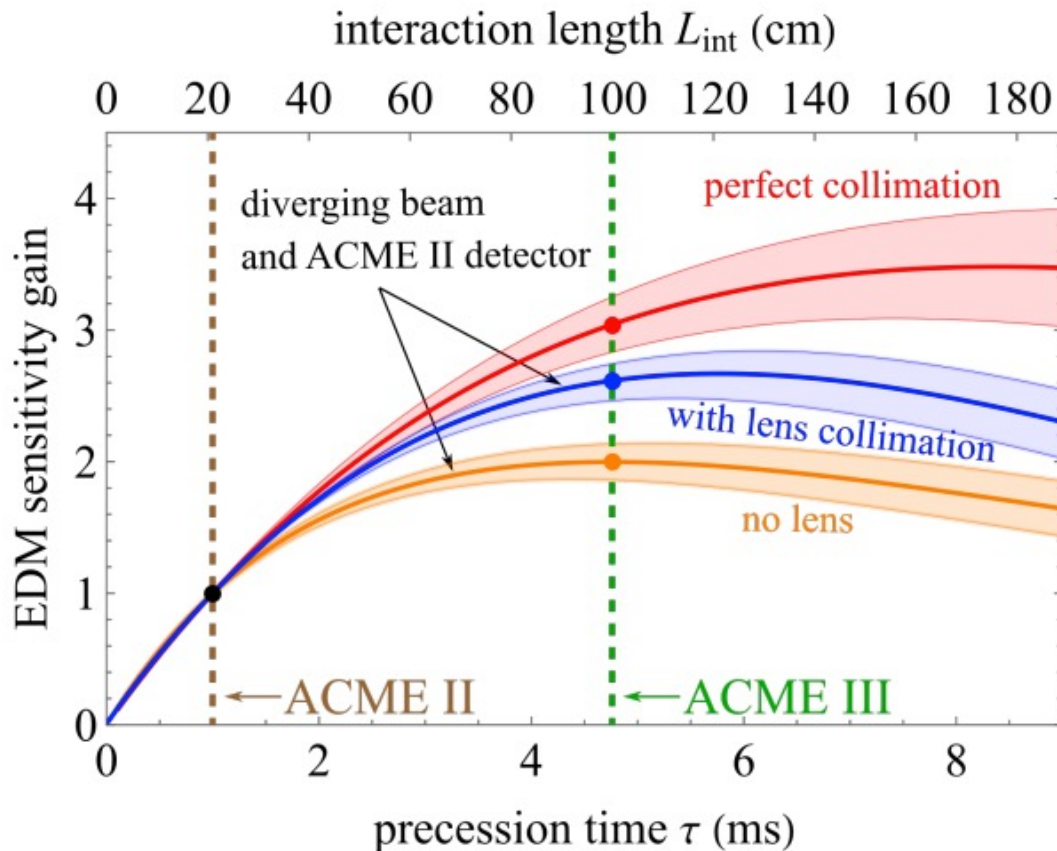
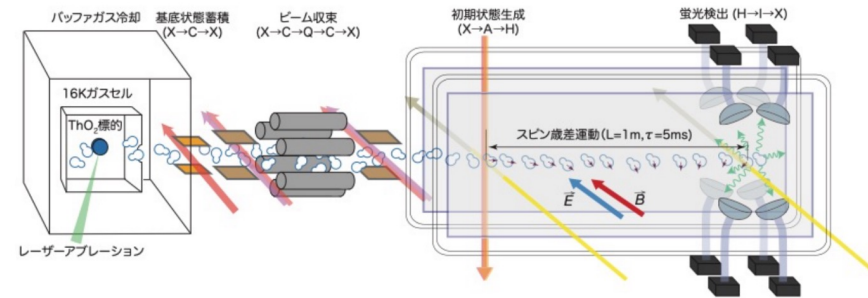
## ❖ ACME II のビームラインで $\times 16$ flux を実証





# H state寿命

- ❖ H-state lifetime:  $4.2 \pm 0.5$  ms
- ❖ スピン歳差運動時間:  $1$  ms  $\Rightarrow$   $5$  ms

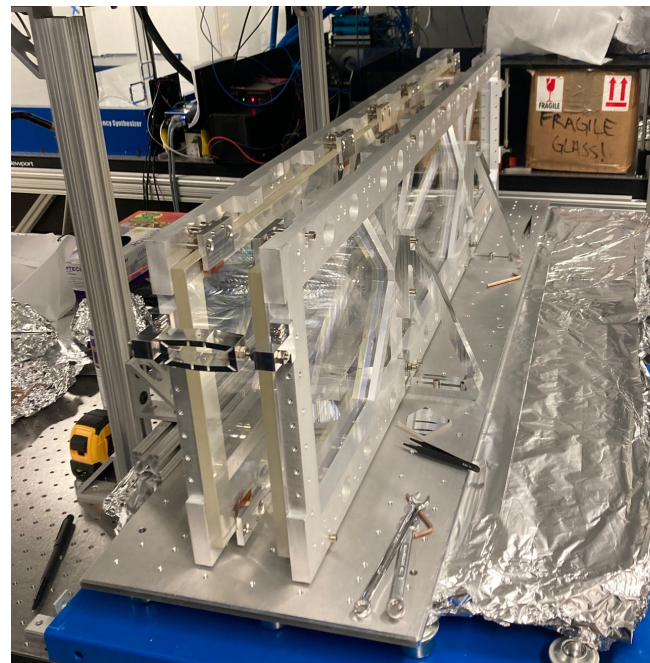
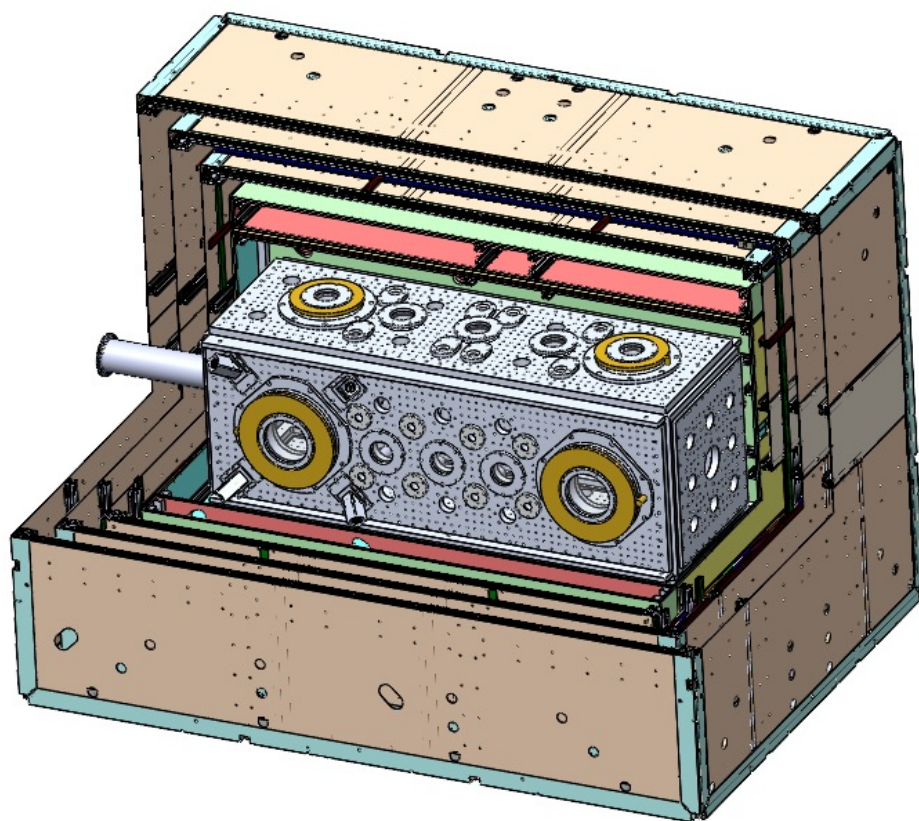


$$\Delta d_e \sim \frac{\hbar}{E_{\text{eff}} \tau} \frac{1}{\sqrt{\dot{n}_{\text{mol}} T}} \sqrt{\frac{F}{\epsilon_{\text{det}}}}$$

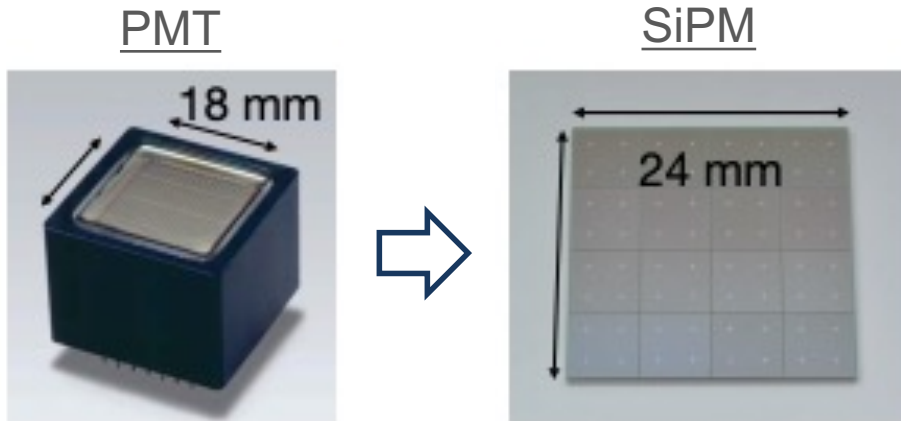
〇〇 レンズによる収束が重要!

# 電場・磁場

- ❖ ITOコーティング ガラス電極
- ❖ self shielding  $\cos\theta$  coil



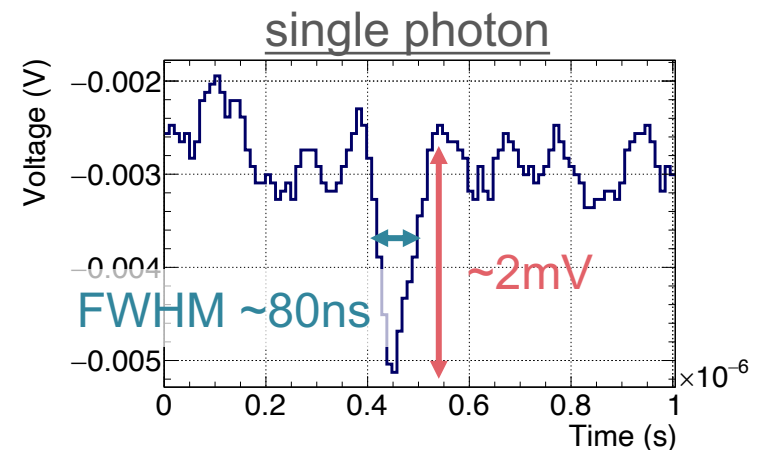
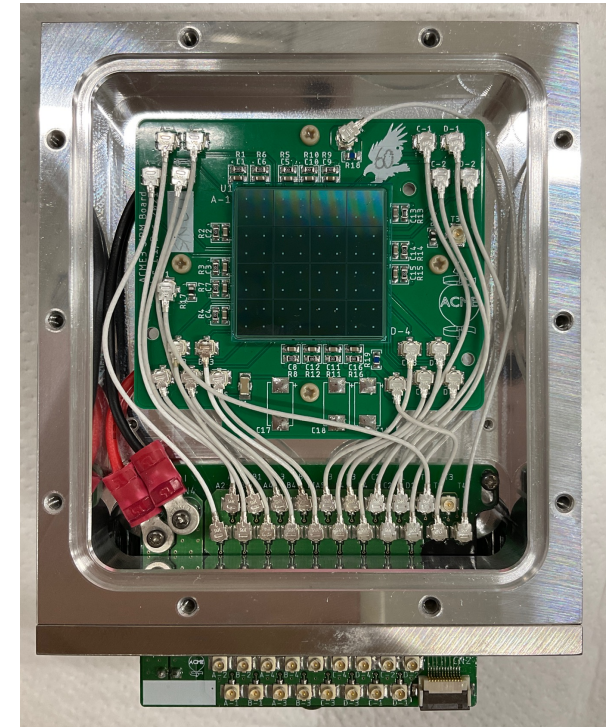
# Photodetector upgrade



Q.E.@512nm (signal): 25% => 45%

Q.E.@703nm (background): 0.6% → 20%  
=> 3枚のバンドパスフィルターを採用

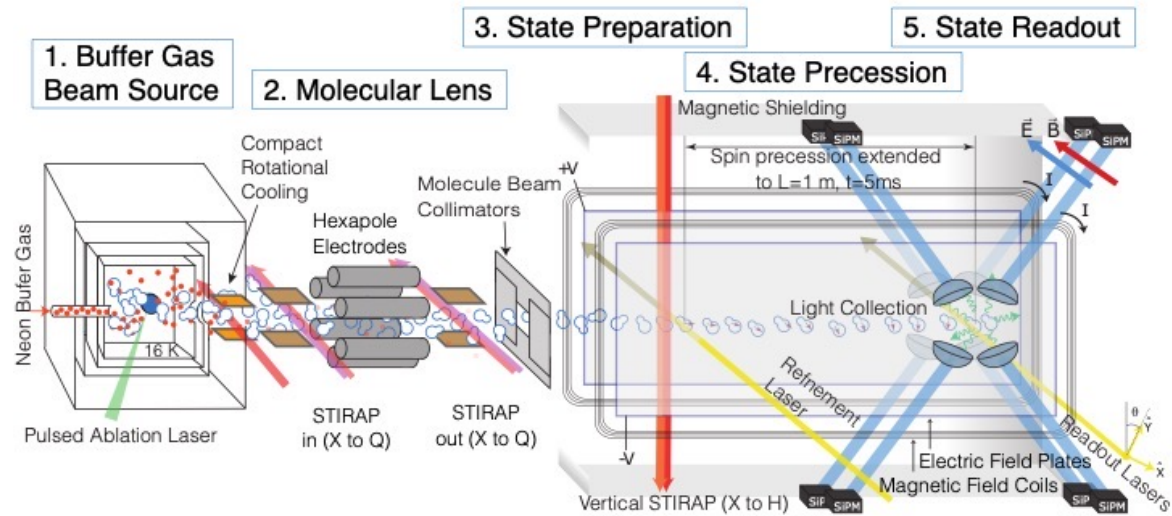
Dark count rate: 3kcps → 2Mcps/ch  
(requirement: 80kcps/ch)  
=> TECで-15°Cまで冷却



# Improvements

Sensitivity

$$\Delta d_e \sim \frac{\hbar}{E_{\text{eff}} \tau} \frac{1}{\sqrt{\dot{n}_{\text{mol}} T}} \sqrt{\frac{F}{\epsilon_{\text{det}}}}$$



Projected Improvement	Signal gain	EDM sensitivity
New beam source	1.5	1.2
Molecular lens	12	3.5
Longer precession time	0.3	2.6
Photodetector upgrade	2.7	1.6
Collection optics	1.7	1.3
Timing jitter reduction	1	1.7
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>39</b>

# 系統誤差

$$d_e = (4.3 \pm 3.1_{stat} \pm 2.6_{syst}) \times 10^{-30} ecm \quad (\text{ACME II})$$

**Table 1 | Systematic shifts for  $\omega^{N\mathcal{E}}$  and their statistical uncertainties**

Parameter	Shift	Uncertainty
$\partial B_z / \partial z$ and $\partial B_z / \partial y$	7	59
$\omega_{ST}^{N\mathcal{E}}$ (via $\theta_{ST}^{H-C}$ )	0	1
$P_{ref}^{N\mathcal{E}}$	–	109
$\mathcal{E}^{nr}$	–56	140
$ C ^{N\mathcal{E}}$ and $ C ^{N\mathcal{E}B}$	77	125
$\omega^{\mathcal{E}}$ (via $B_z^{\mathcal{E}}$ )	1	1
Other magnetic-field gradients (4)	–	134
Non-reversing magnetic field, $B_z^{nr}$	–	106
Transverse magnetic fields, $B_x^{nr}, B_y^{nr}$	–	92
Refinement- and readout-laser detunings	–	76
$\tilde{N}$ -correlated laser detuning, $\Delta^N$	–	48
Total systematic	29	310
Statistical uncertainty		373
Total uncertainty		486

Values are shown in  $\mu\text{rad s}^{-1}$ . All uncertainties are added in quadrature. For  $\mathcal{E}_{\text{eff}} = 78 \text{ GV cm}^{-1}$ ,  $d_e = 10^{-30} e \text{ cm}$  corresponds to  $|\omega^{N\mathcal{E}}| = \mathcal{E}_{\text{eff}} d_e / \hbar = 119 \mu\text{rad s}^{-1}$ .

系統誤差の主な要因は...

❖ レーザー偏光

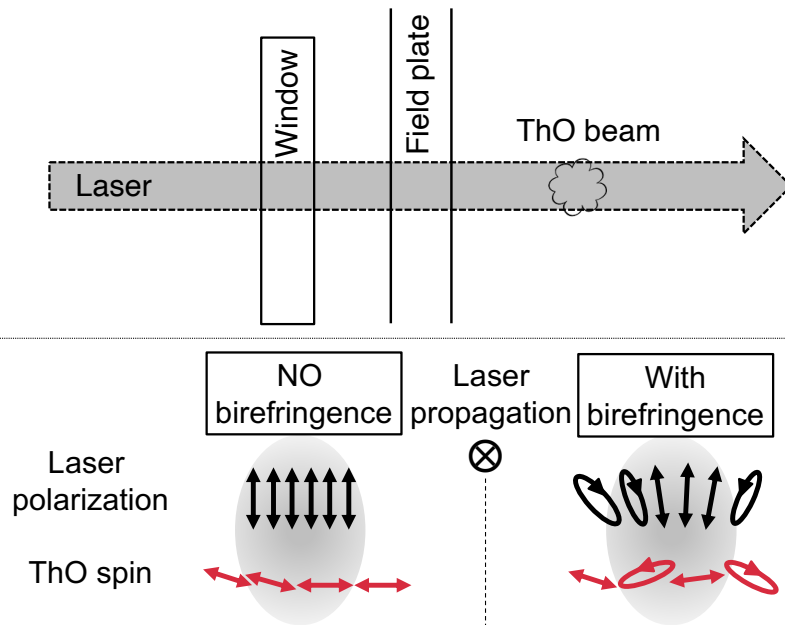
❖ 磁場

の不均一性

# レーザー・磁場の系統誤差

## ❖ 真空窓・ガラス電極での複屈折

- ・ ガラス素材の選定
- ・ 応力による複屈折の軽減



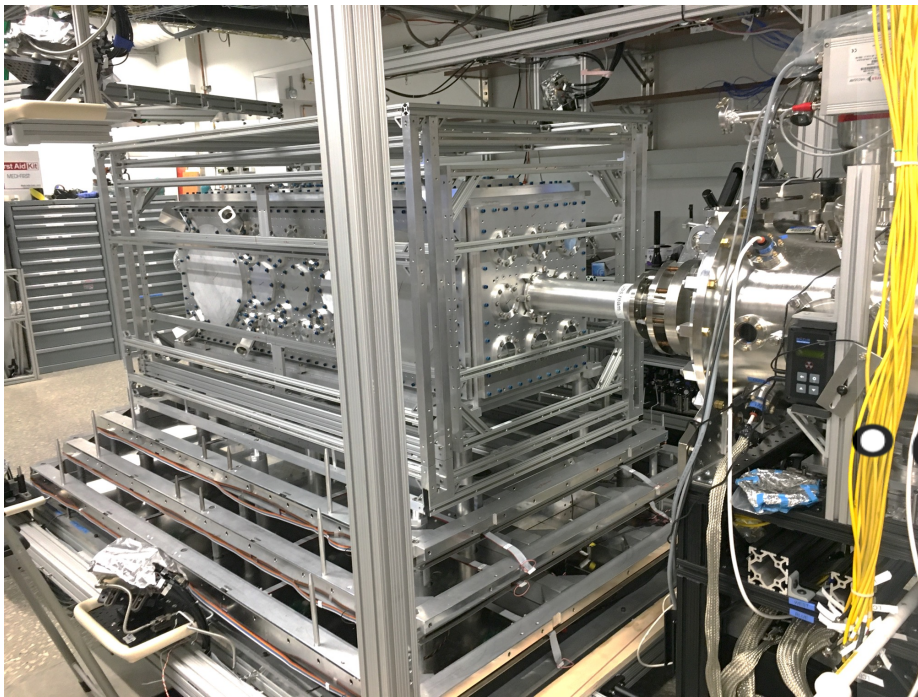
## ❖ 磁場の一様性

- ・ <10 uG shielding
- ・ 200 uG印加で<1 uGの一様性



# ACMEのまとめ、展望

- ❖ 極性分子ThOを用いたテーブルトップ実験
- ❖ ACME IIの結果  $|d_e| < 1.1 \times 10^{-29} \text{ e cm}$  (90% C.L.)
- ❖ ↑ を30倍良くするためのアップグレード遂行中 (ACME III)



テーブルトップと言いつつ、  
実験室ひとつぶんくらい...

## Other/Future eEDM experiments



# JILA

Sensitivity

$$\Delta d_e \sim \frac{\hbar}{E_{\text{eff}} \tau} \frac{1}{\sqrt{\dot{n}_{\text{mol}} T}} \sqrt{\frac{F}{\epsilon_{\text{det}}}}$$

ACME:

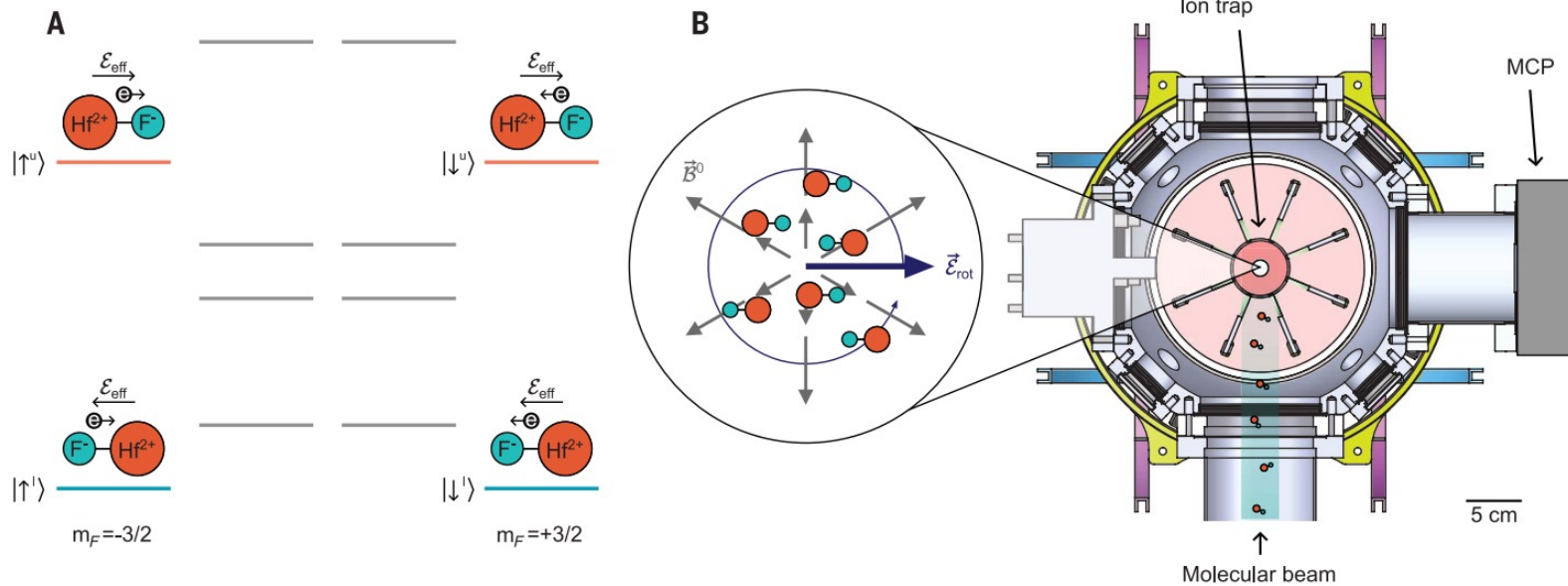
ThO, ビーム

⇔

JILA:

HfF<sup>+</sup>, イオントラップ

❖ 分子数を増やす代わりに、 $\tau$  を長くすることで感度を上げる



T. S. Roussy *et al.*, Science 381, 46 (2023)

# 次世代EDM?

$$\Delta d_e \sim \frac{\hbar}{E_{\text{eff}}\tau} \frac{1}{\sqrt{\dot{n}_{\text{mol}}T}} \sqrt{\frac{F}{\epsilon_{\text{det}}}}$$

ビーム

トラップ

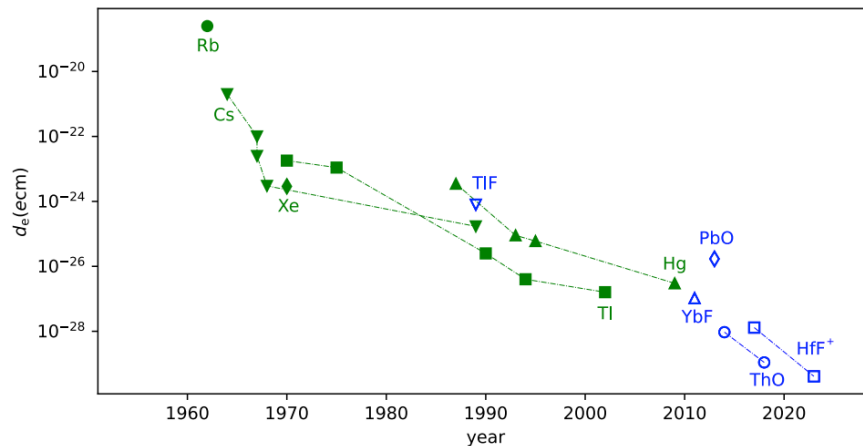
Past

- YbF, Imperial collage London
- PbO, Yale

Now

- ThO, ACME

- **HfF<sup>+</sup>, ThF<sup>+</sup>** JILA



Future

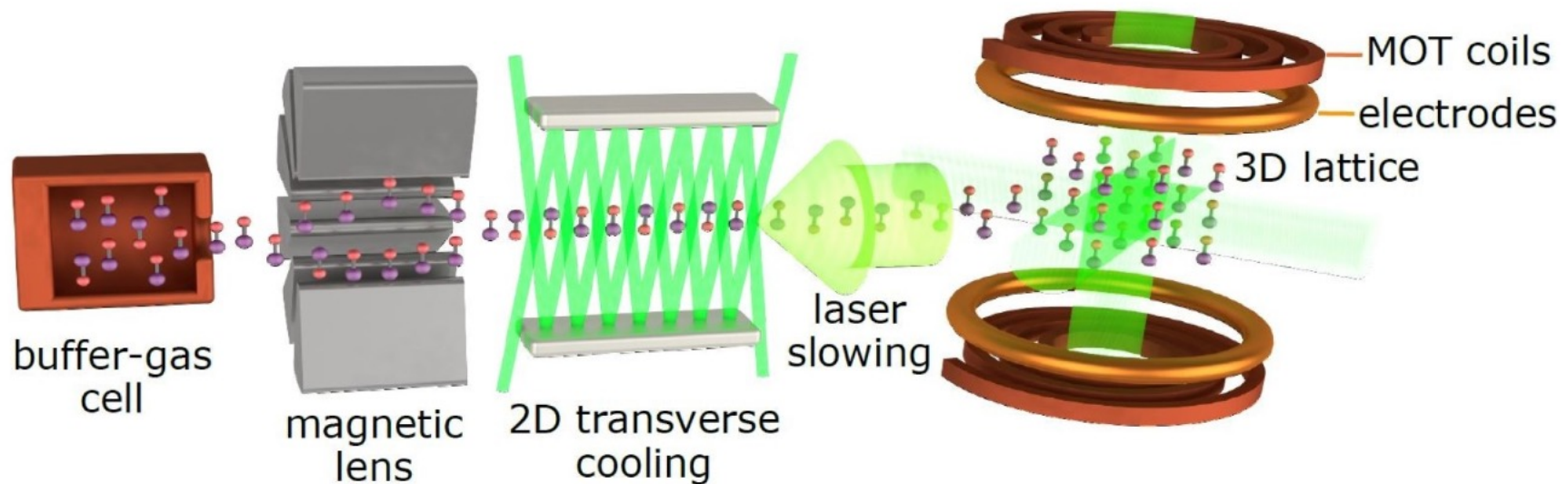
- Fr, Japan
- YbF, Imperial
- BaF, EDM<sup>3</sup>
- YbOH, SrOH, PolyEDM

高密度トラップを目指す時代

# 中性分子のトラップ

	$\tau$	粒子数
ビーム	数ms	$>10^7$
イオントラップ	1~10s	$1\sim 10^2$
中性トラップ	1~10s	$\sim 10^6$

中性粒子のトラップは  
手間がかかる...!



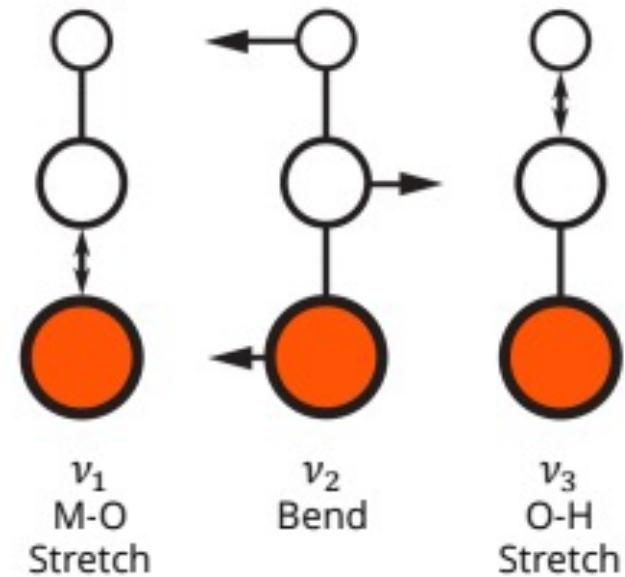
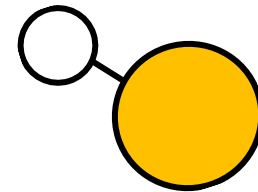
# 多原子分子をつかう

❖ eEDM測定に適している分子は？

- ① レーザー冷却できる
- ② Parity doubletsがある(系統誤差スイッチ)
- ③ EDM感度が高い(重い原子核)

これらをすべて満たす  
2原子分子の候補は  
存在しない...

3原子以上の分子を使うことで候補が増える



# 次世代EDM?

$$\Delta d_e \sim \frac{\hbar}{E_{\text{eff}} \tau} \frac{1}{\sqrt{\dot{n}_{\text{mol}} T}} \sqrt{\frac{F}{\epsilon_{\text{det}}}}$$

ビーム

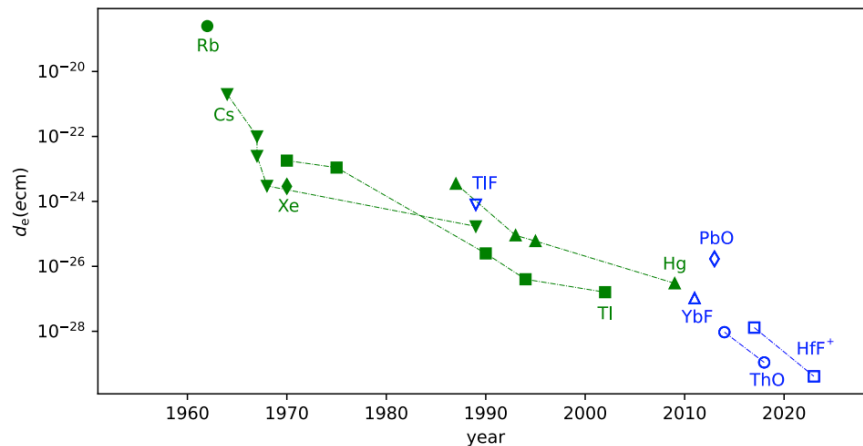
トラップ

Past

- YbF, Imperial collage London
- PbO, Yale

Now

- ThO, ACME
- **HfF<sup>+</sup>, ThF<sup>+</sup>** JILA



Future

- Fr, Japan
- YbF, Imperial
- BaF, EDM<sup>3</sup>
- YbOH, SrOH, PolyEDM

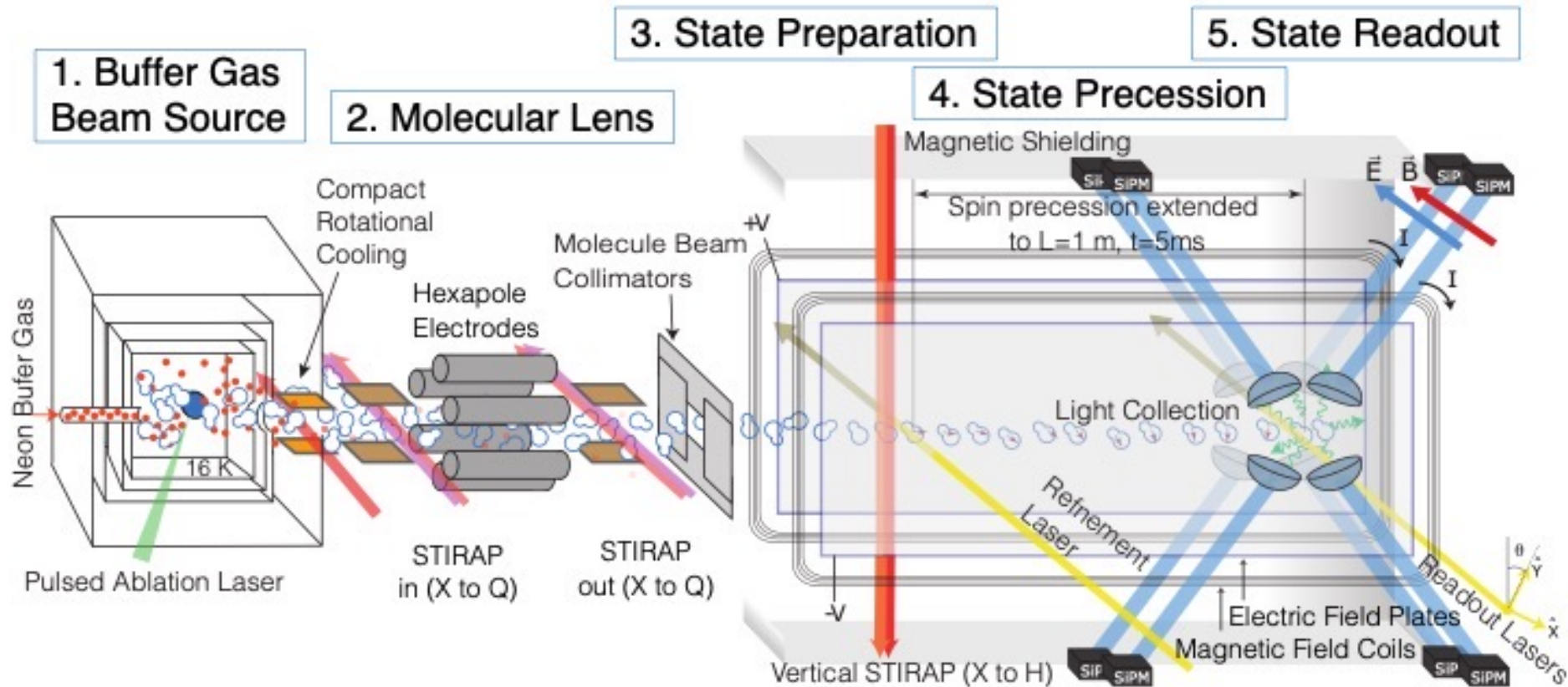
高密度トラップを目指す時代

# Summary

- ❖ eEDMは新物理の良いプローブ
- ❖ 実際に、すでにそこそこ強い制限を与えている (SMまであと5桁)
- ❖ 冷却分子を使って測るのが主流
- ❖ これまで分子ビームで測られてきたが、今後は高密度トラップを目指す実験がいろいろ提案、R&Dされている



# ACME III apparatus

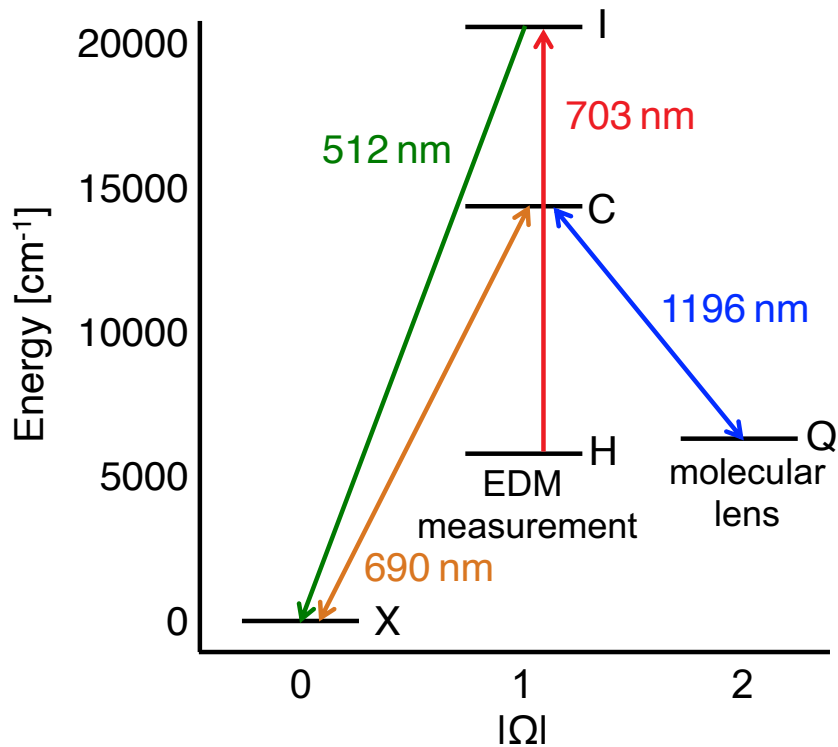
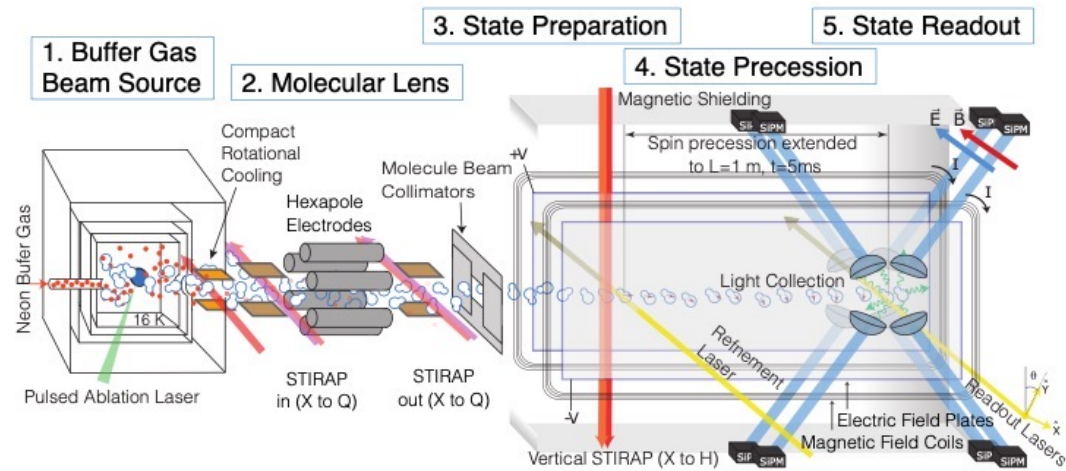


❖ Experimental site: Harvard (ACME II) -> Northwestern University

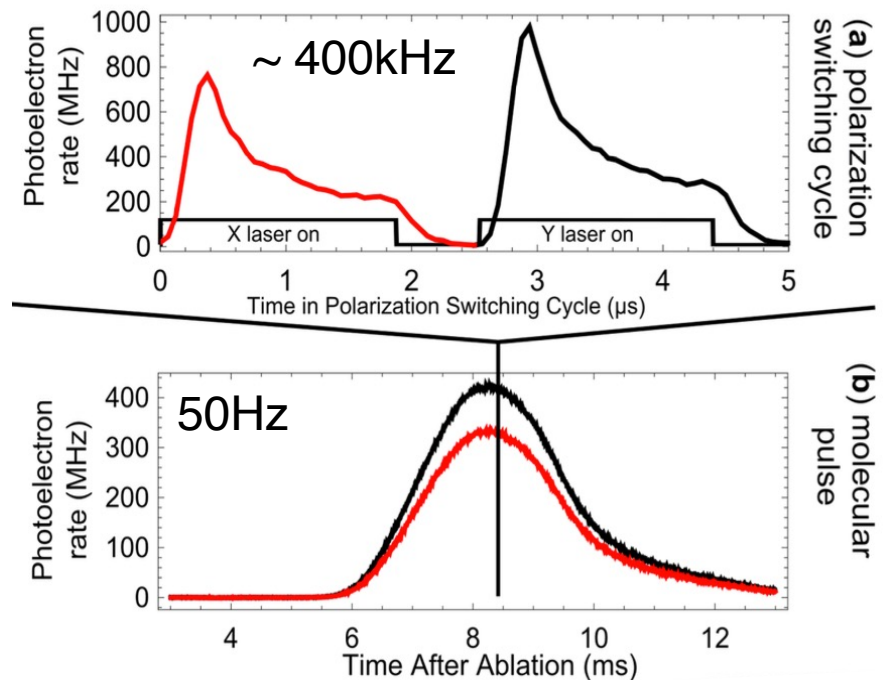


# ACME signal

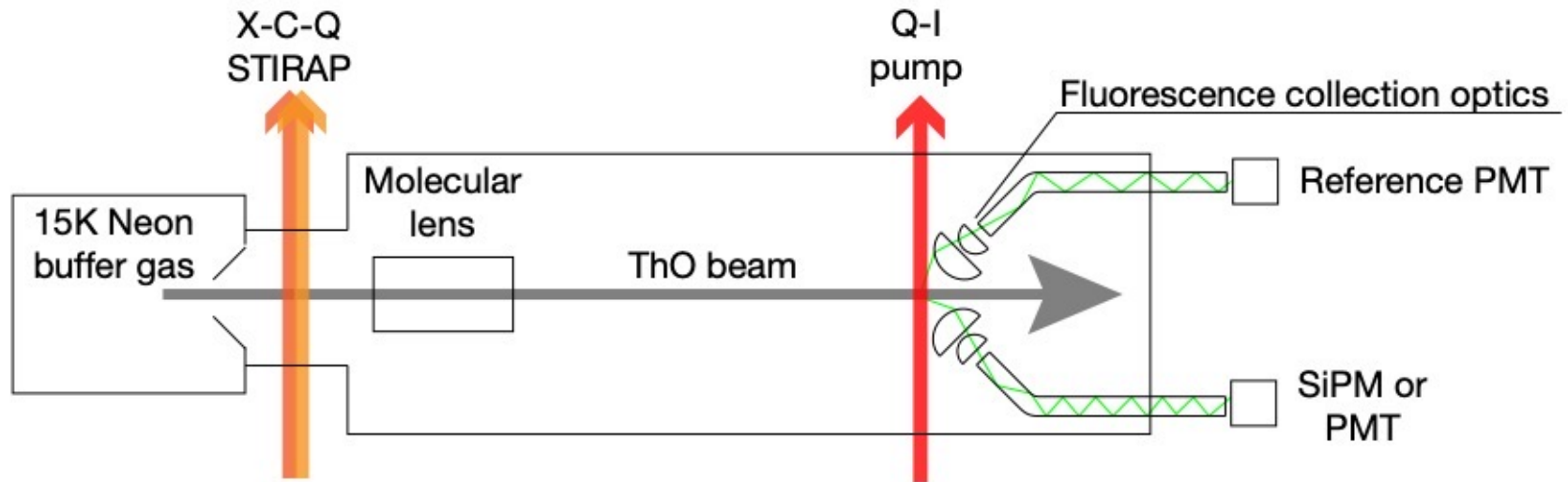
- ❖ 50 Hz cold ThO beam
- ❖ 512 nm fluorescence light



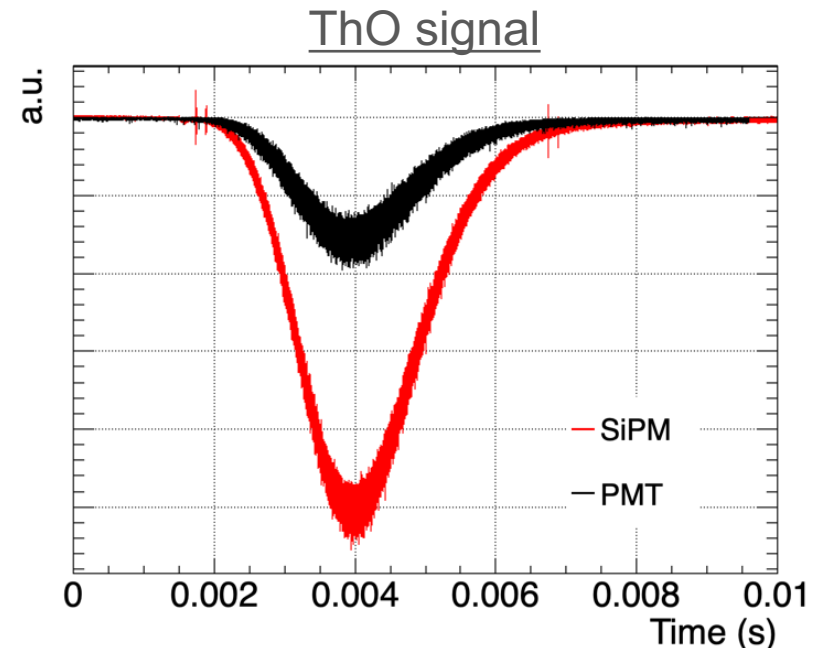
## ACME signal & molecular pulse



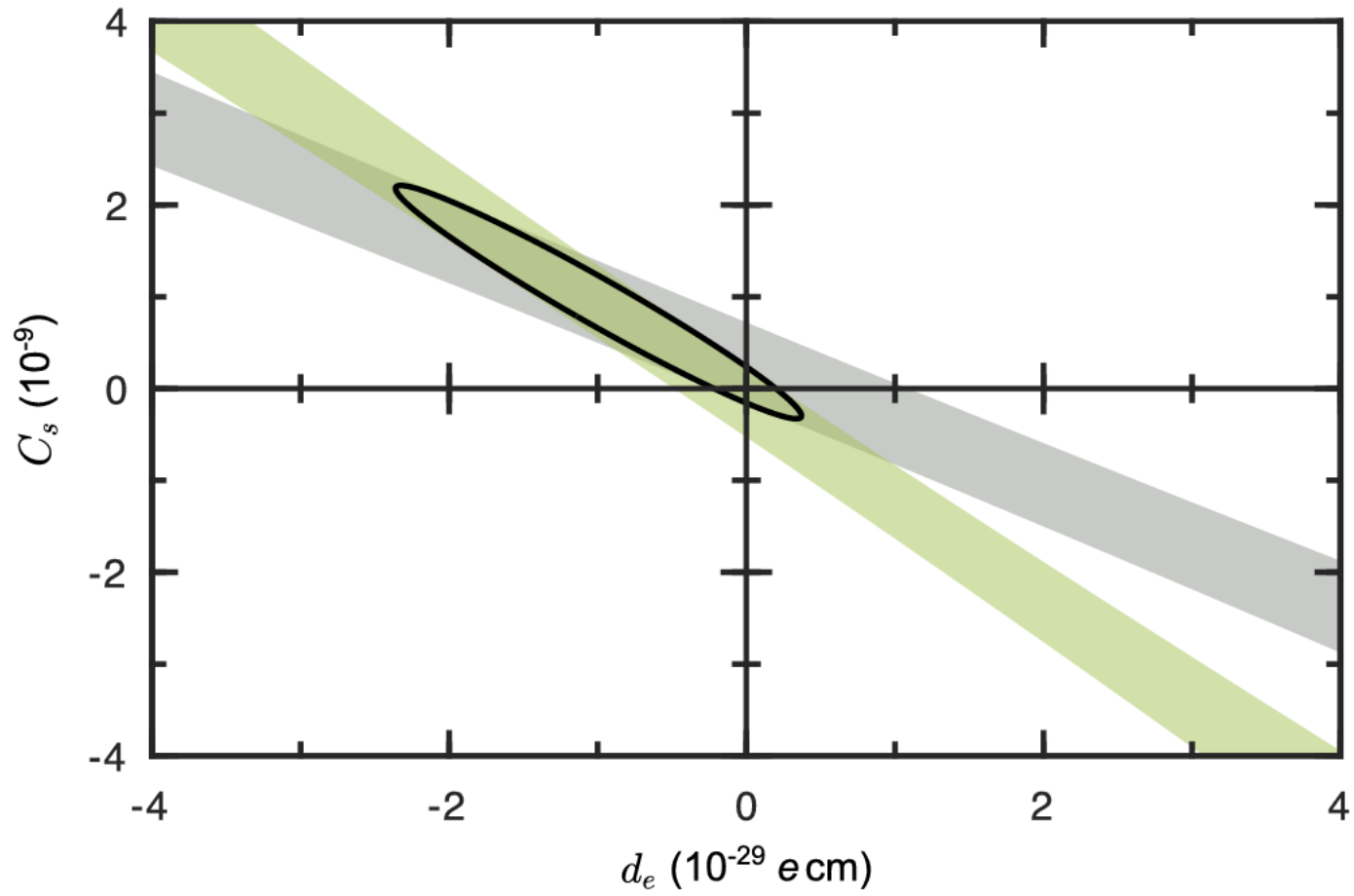
# Test with ThO beam @Harvard



- ❖ SiPMをつかって初のThOビーム観測
- ❖ PMTと比べて3倍程度のphoton counting rateを実現
- ❖ collection opticsを新しくすることでさらに $\times 1.6$



$C_s$



# 周期表

族 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	<b>1H</b> 水素 1.008																	<b>2He</b> ヘリウム 4.003
2	<b>3Li</b> リチウム 6.941	<b>4Be</b> ベリリウム 9.012											<b>5B</b> ホウ素 10.81	<b>6C</b> 炭素 12.01	<b>7N</b> 窒素 14.01	<b>8O</b> 酸素 16.00	<b>9F</b> フッ素 19.00	<b>10Ne</b> ネオン 20.18
3	<b>11Na</b> ナトリウム 22.99	<b>12Mg</b> マグネシウム 24.31											<b>13Al</b> アルミニウム 26.98	<b>14Si</b> ケイ素 28.09	<b>15P</b> リン 30.97	<b>16S</b> 硫黄 32.07	<b>17Cl</b> 塩素 35.45	<b>18Ar</b> アルゴン 39.95
4	<b>19K</b> カリウム 39.10	<b>20Ca</b> カルシウム 40.08	<b>21Sc</b> スカンジウム 44.96	<b>22Ti</b> チタン 47.87	<b>23V</b> バナジウム 50.94	<b>24Cr</b> クロム 52.00	<b>25Mn</b> マンガン 54.94	<b>26Fe</b> 鉄 55.85	<b>27Co</b> コバルト 58.93	<b>28Ni</b> ニッケル 58.69	<b>29Cu</b> 銅 63.55	<b>30Zn</b> 亜鉛 65.38	<b>31Ga</b> ガリウム 69.72	<b>32Ge</b> ゲルマニウム 72.63	<b>33As</b> ヒ素 74.92	<b>34Se</b> セレン 78.97	<b>35Br</b> 臭素 79.90	<b>36Kr</b> クリプトン 83.80
5	<b>37Rb</b> ルビジウム 85.47	<b>38Sr</b> ストロンチウム 87.62	<b>39Y</b> イットリウム 88.91	<b>40Zr</b> ジルコニウム 91.22	<b>41Nb</b> ニオブ 92.91	<b>42Mo</b> モリブデン 95.95	<b>43Tc</b> テクネチウム (99)	<b>44Ru</b> ルテチウム 101.1	<b>45Rh</b> ロジウム 102.9	<b>46Pd</b> パラジウム 106.4	<b>47Ag</b> 銀 107.9	<b>48Cd</b> カドミウム 112.4	<b>49In</b> インジウム 114.8	<b>50Sn</b> スズ 118.7	<b>51Sb</b> アンチモン 121.8	<b>52Te</b> テルル 127.6	<b>53I</b> ヨウ素 126.9	<b>54Xe</b> キセノン 131.3
6	<b>55Cs</b> セシウム 132.9	<b>56Ba</b> バリウム 137.3	<b>57~71</b> ランタノイド	<b>72Hf</b> ハフニウム 178.5	<b>73Ta</b> タンタル 180.9	<b>74W</b> タングステン 183.8	<b>75Re</b> レニウム 186.2	<b>76Os</b> オスミウム 190.2	<b>77Ir</b> イリジウム 192.2	<b>78Pt</b> 白金 195.1	<b>79Au</b> 金 197.0	<b>80Hg</b> 水銀 200.6	<b>81Tl</b> タリウム 204.4	<b>82Pb</b> 鉛 207.2	<b>83Bi</b> ビスマス 209.0	<b>84Po</b> ポロニウム (210)	<b>85At</b> アスタチン (210)	<b>86Rn</b> ラドン (222)
7	<b>87Fr</b> フランシウム (223)	<b>88Ra</b> ラジウム (226)	<b>89~103</b> アクチノイド	<b>104Rf</b> ラザホージウム (267)	<b>105Db</b> ドブニウム (268)	<b>106Sg</b> シーボーギウム (271)	<b>107Bh</b> ボーリウム (272)	<b>108Hs</b> ハッシュウム (277)	<b>109Mt</b> マイトネリウム (276)	<b>110Ds</b> ダームスタチウム (281)	<b>111Rg</b> レントゲニウム (280)	<b>112Cn</b> コペルニシウム (285)	<b>113Nh</b> ニホニウム (278)	<b>114Fl</b> フレロビウム (289)	<b>115Mc</b> モスコビウム (289)	<b>116Lv</b> リバモリウム (293)	<b>117Ts</b> テネシン (293)	<b>118Og</b> オガネソン (294)

非金属  
 金属  
 くわしいことがわからない

● 気体    💧 液体  
◆ 固体

20°C, 1気圧での単体の状態

元素記号 元素名 原子量	ランタノイド	<b>57La</b> ランタン 138.9	<b>58Ce</b> セリウム 140.1	<b>59Pr</b> プラセオジム 140.9	<b>60Nd</b> ネオジム 144.2	<b>61Pm</b> プロメチウム (145)	<b>62Sm</b> サマリウム 150.4	<b>63Eu</b> ユウロピウム 152.0	<b>64Gd</b> ガドリニウム 157.3	<b>65Tb</b> テルビウム 158.9	<b>66Dy</b> ジスプロシウム 162.5	<b>67Ho</b> ホルミウム 164.9	<b>68Er</b> エルビウム 167.3	<b>69Tm</b> ツリウム 168.9	<b>70Yb</b> イットリビウム 173.0	<b>71Lu</b> ルテチウム 175.0
	アクチノイド	<b>89Ac</b> アクチニウム (227)	<b>90Th</b> トリウム 232.0	<b>91Pa</b> プロトアクチニウム 231.0	<b>92U</b> ウラン 238.0	<b>93Np</b> ネプツニウム (237)	<b>94Pu</b> プルトニウム (239)	<b>95Am</b> アメリシウム (243)	<b>96Cm</b> キュリウム (247)	<b>97Bk</b> バークリウム (247)	<b>98Cf</b> カリホルニウム (252)	<b>99Es</b> アインスタイニウム (252)	<b>100Fm</b> フェルミウム (257)	<b>101Md</b> メンデレビウム (258)	<b>102No</b> ノーベリウム (259)	<b>103Lr</b> ローレンシウム (262)

※原子量は、質量数 12 の炭素 (<sup>12</sup>C) を 12 とし、これに対する相対値とする。  
 ※この表に示した 4 桁の原子量は、日本化学会原子量専門委員会が 2017 年に発表した 4 桁の原子量表に基づいている。  
 ※安定同位体がなく、天然で特定の同位体組成を示さない元素については、その元素の放射性同位体の質量数の一例を ( ) 内に示した。