

高精度反ニュートリノ観測の ための有機液体TPCの開発

中島 康博 (東大宇宙線研)

ynakajim@icrr.u-tokyo.ac.jp

2019年12月6日

マイクロパターンガス検出器 (MPGD) & アクティブ媒質TPC

合同研究会

JSPS科研費(若手)18K1356の
補助を受けて行っています



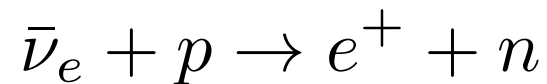
Outline

- 有機液体TPC
 - コンセプト
 - 物理目標
- 実現に向けた課題
- 原理検証のための測定
 - セットアップ
 - 電離電荷量の測定

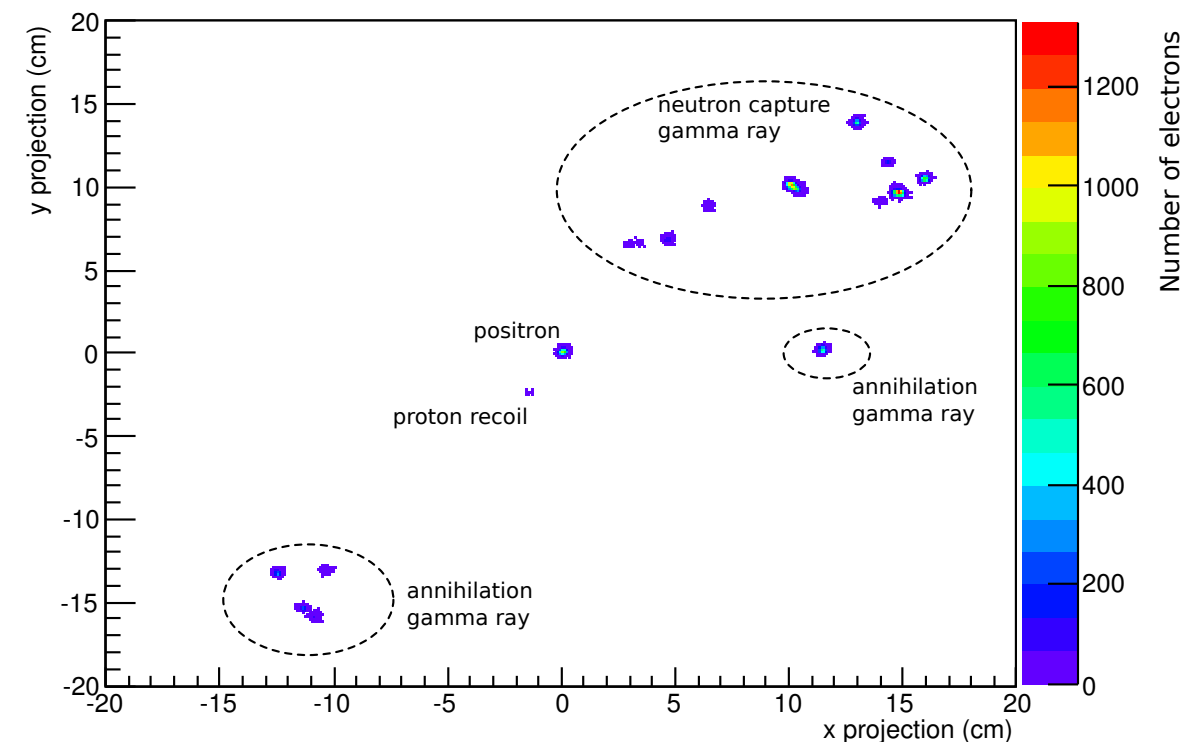
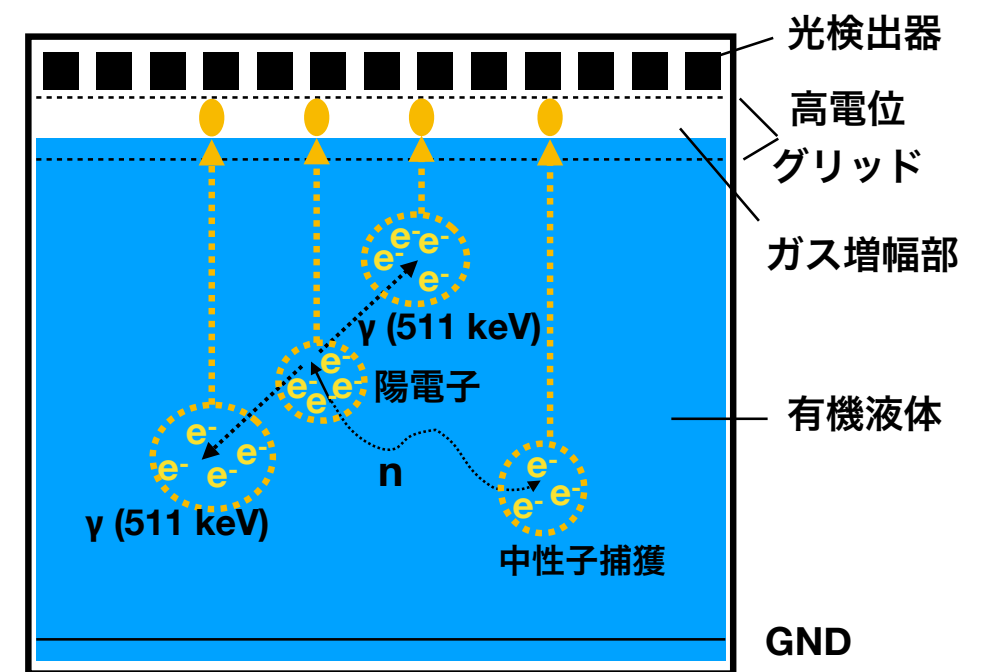
有機液体TPC

- O(1) - O(10) MeVの反電子ニュートリノを従来よりも高精度で観測するための装置として、有機液体を媒質としたTPCを検討中。

主な反応過程：逆ベータ崩壊(Inverse Beta Decay, IBD)



- 逆β崩壊のターゲットとなるfree proton(水素原子)が豊富に存在
- 無極性の有機物を使うことで、電子に媒質中をドリフトさせられる
- **J. V. Dawson and D. Kryn, arXiv: 1405.1308** などで提案されている
- 逆β崩壊で生じた、positron, positronの対消滅γ, 中性子捕獲をそれぞれ空間的に分離して測定
- 電離電子を比例増幅して高エネルギー分解能化
- 室温・大気圧で運用可能



J. V. Dawson and D. Kryn, arXiv: 1405.1308

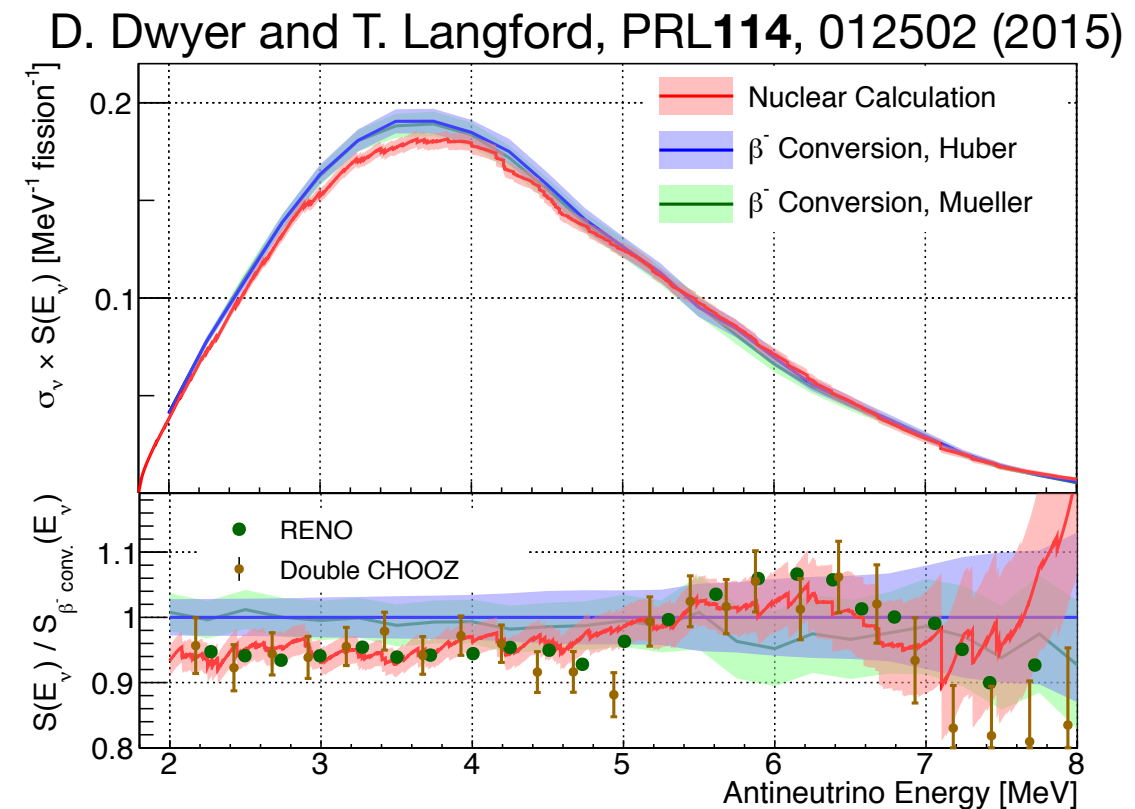
物理目的1: 原子炉ニュートリノの精密測定

- 原子炉ニュートリノのスペクトラムの問題点：
 - 従来のモデルではよく記述出来ていない
 - 理論的には細かい構造が予想される
- JUNO実験における質量階層性測定への影響が懸念される
 - より精密な原子炉ニュートリノスペクトラム情報が必要
- 有機液体TPC:
 - 1MeVあたりO(1000)-O(10000)個のイオン化電子を、比例増幅して計測する
 - 原理的には1-2%@1MeVのエネルギー分解能が実現可能

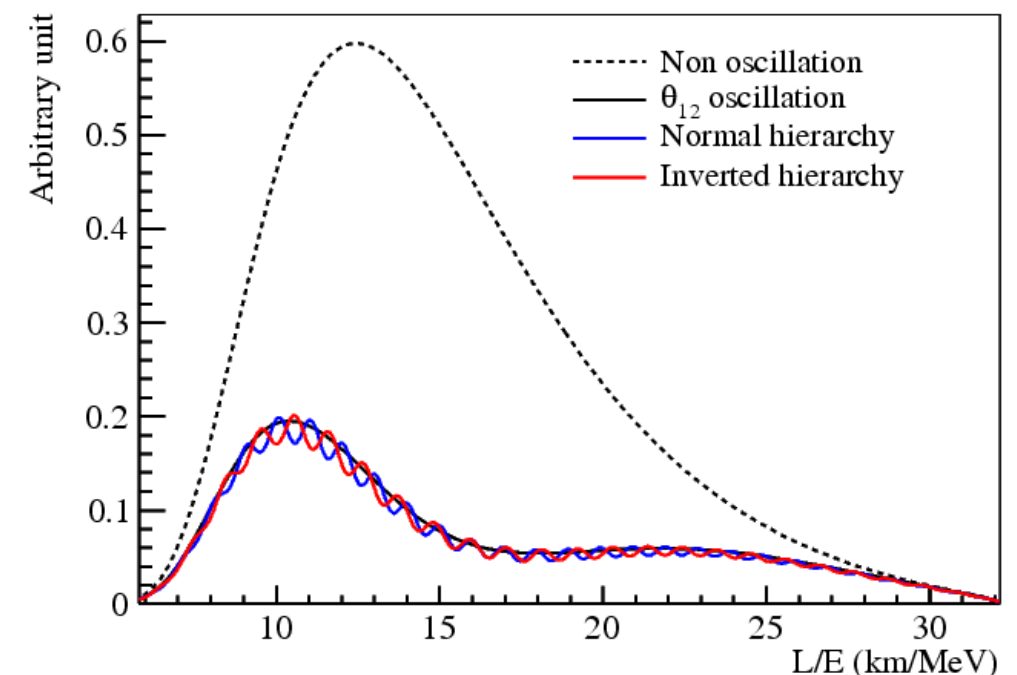
cf: 現行の原子炉ニュートリノ実験: 6-8%@1MeV

JUNO goal: 3%@1MeV

- 目標：
 - ~tonスケールの検出器を原子炉近傍に設置し、原子炉ニュートリノの精密測定
 - + ステライルニュートリノの探索も

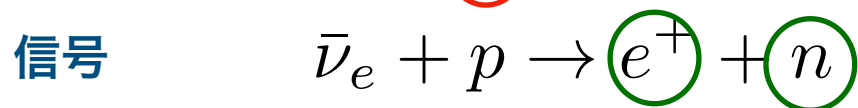
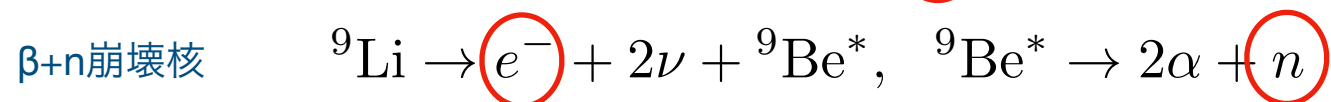
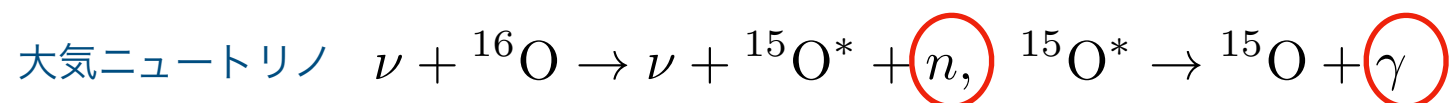


Oscillation probability for JUNO (arXiv:1507.05613)



物理目的2: 超新星背景ニュートリノ観測

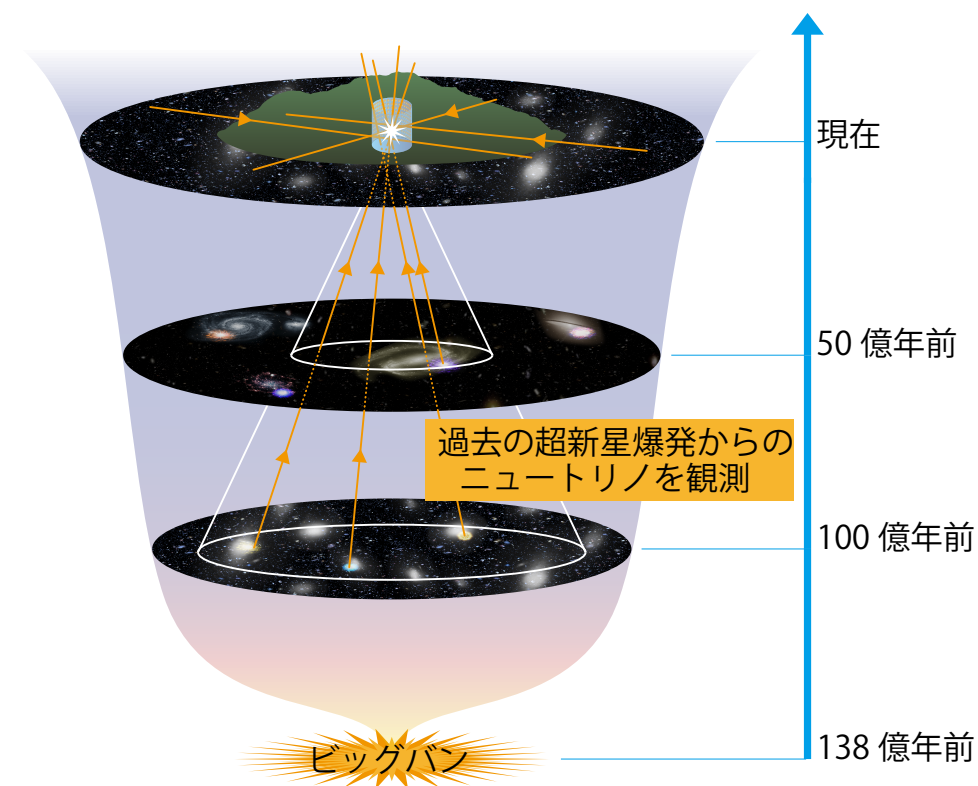
- 超新星背景ニュートリノ：過去の超新星爆発で生成され、現在の宇宙に蓄積しているニュートリノ
- SK-Gdでの初観測を目指しているが、シグナルと同程度のバックグラウンドがまだ残る見込み



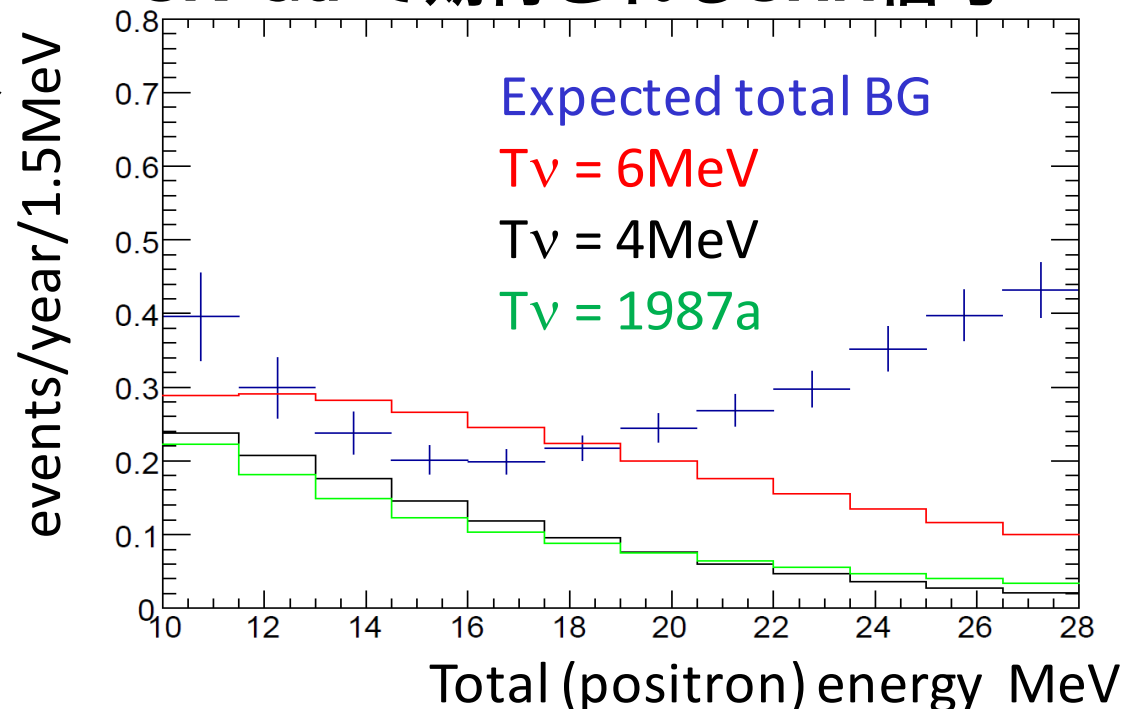
- 有機液体TPC:

- 陽電子自身のエネルギー損失と対消滅による γ 線を分離して観測することで、 $e^+/e^-/\gamma$ を弁別
- 中性子の飛行距離で、大気ニュートリノと信号を弁別

- 夢：バックグラウンドフリーの超新星背景ニュートリノ測定 (数10kton スケール)



SK-Gd で期待されるSRN信号



SRN flux prediction from Horiuchi, Beacom and Dwek, PRD, 79, 083013 (2009)

実現に向けての課題

- 電子がドリフトするか
 - 過去にイオンチェンバーとしての応用を目指して、いくつかの液体が研究されている。(次ページ)
- 液相から気相への電子の抽出が可能か
 - 不明
- ガス増幅が出来るか
 - 不明。希ガス(Xe等)を導入？
- シンチレーション発光するか
 - イオンチェンバーとして使われていた液体の発光性能は不明
 - 液体シンチレーターとして一般に使われる液体(LAB, Pseudocumene等)は極性を持っており、電子をドリフトさせるには(おそらく)適さない

**適した液体の調査および原理検証を行うため、
これらの特性の測定実験を行おうとしている。**

TPC用有機液体の候補

J. V. Dawson and D. Kryn, arXiv: 1405.1308

R. A. Holroyd, Electrons in NonPolar Liquids BNL-69404 (2002)
より抜粋

	化学式	Electrons/ 100eV	Mobility (cm ² /V/s)	沸点 (°C)	蒸気圧 (kPa) 20°C	
テトラメチルシラン (Tetramethylsilane)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{Si} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	0.7	100	27	80	\$\$
テトラメチルゲルマニウム (Tetramethylgermanium)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 - \text{Ge} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	0.63	90	43	46	\$\$\$
2,2,4,4-テトラメチルペンタン (2,2,4,4-Tetramethylpentane)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$	0.74	26	121	~3	\$\$\$
2,2,4-トリメチルペンタン (2,2,4-Trimethylpentane)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$	0.33	6.6	99	5.1	\$

- 構造が対照的で、無極性の分子がドリフト性能に優れている。
- 比較的取扱が容易で、かつ安価な2,2,4-トリメチルペンタンを用いて、テスト測定を開始する。

2,2,4-トリメチルペンタン(イソオクタン)

Wikipediaより

イソオクタン

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

イソオクタン (isooctane) は**オクタン**の**構造異性体**のひとつである。分子式はC₈H₁₈、**IUPAC名**は**2,2,4-トリメチルペンタン**である。安定して燃焼するためオクタン価の基準となる。常温では無色透明な液体。消防法に定める**第4類危険物 第1石油類**に該当する^[1]。

脚注 [編集]

- [↑] [法規情報](#) (東京化成工業株式会社)

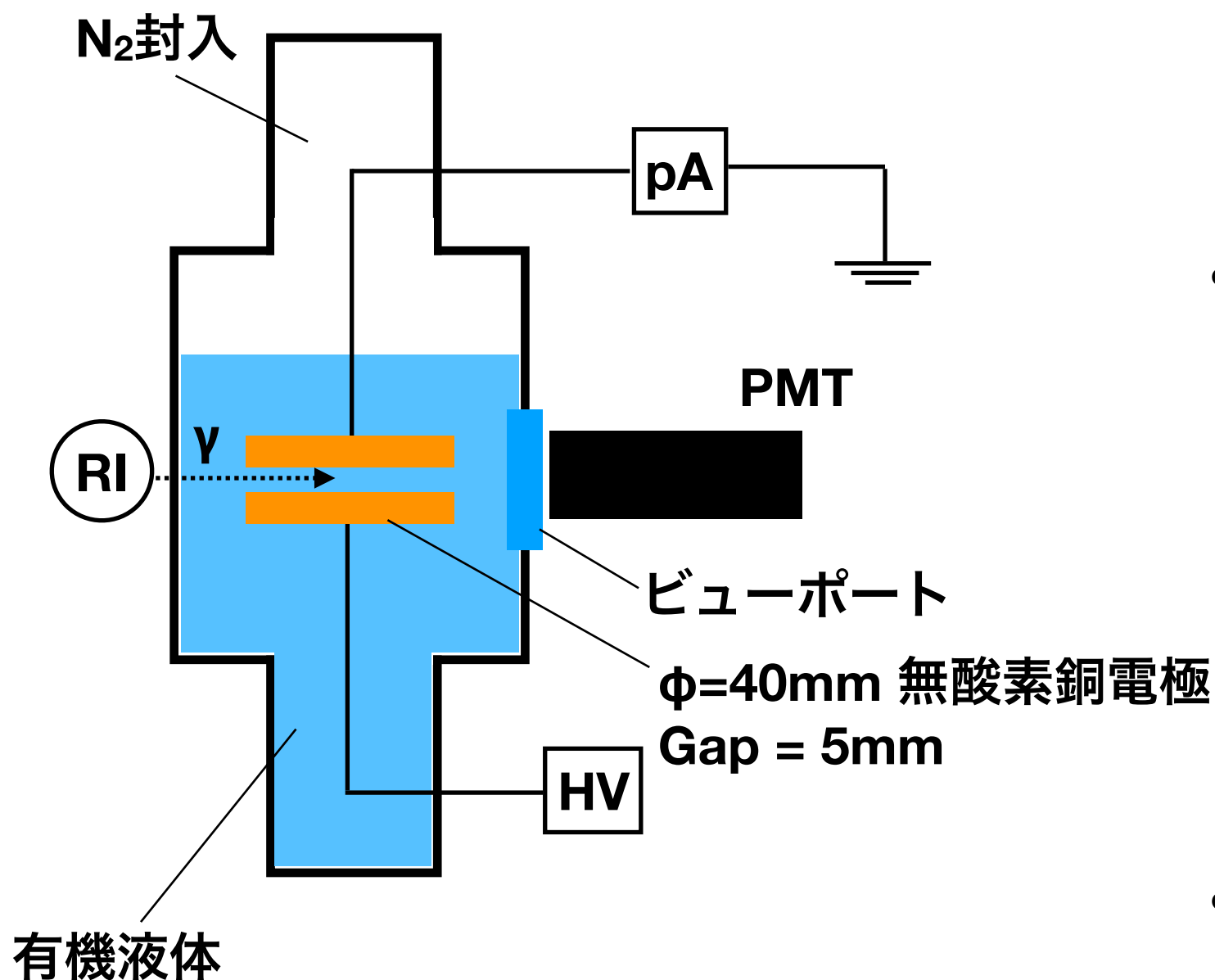
関連項目 [編集]

- アルカン
- オクタン価
- 高オクタン価ガソリン

イソオクタン	
	
IUPAC名	2,2,4-トリメチルペンタン
分子式	C ₈ H ₁₈
分子量	114.23
CAS登録番号	540-84-1
形状	無色液体
密度と相	0.69 g/cm ³ , 液体
相対蒸気密度	3.9 (空気 = 1)
融点	-107 °C
沸点	99 °C
SMILES	CC(CC(C)C)(C)C
出典	ICSC

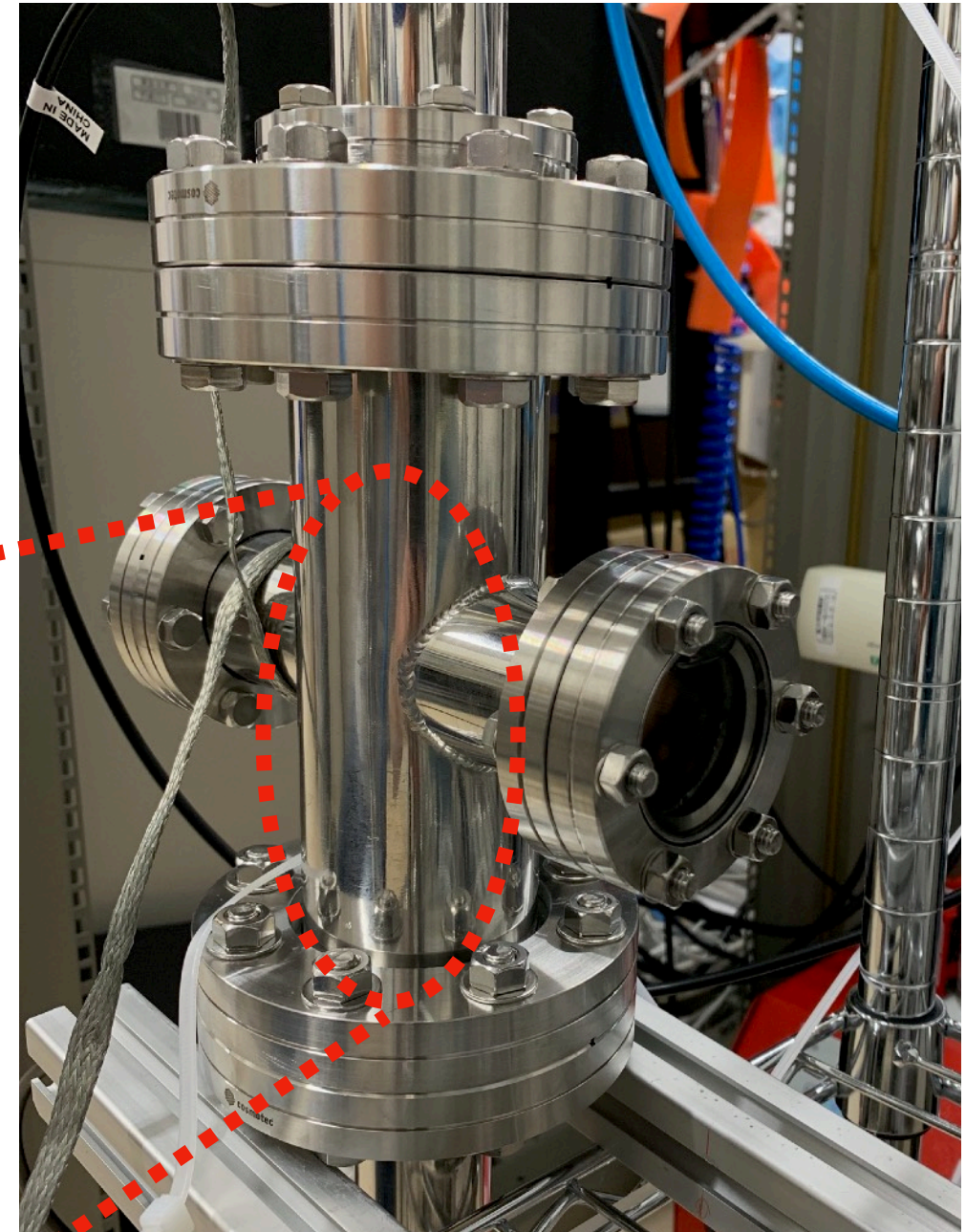
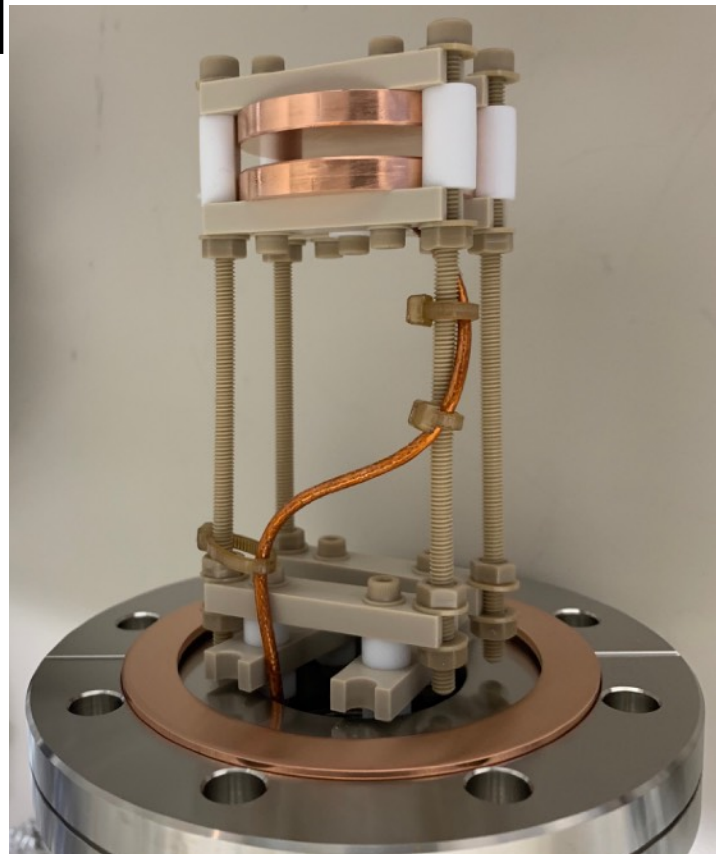
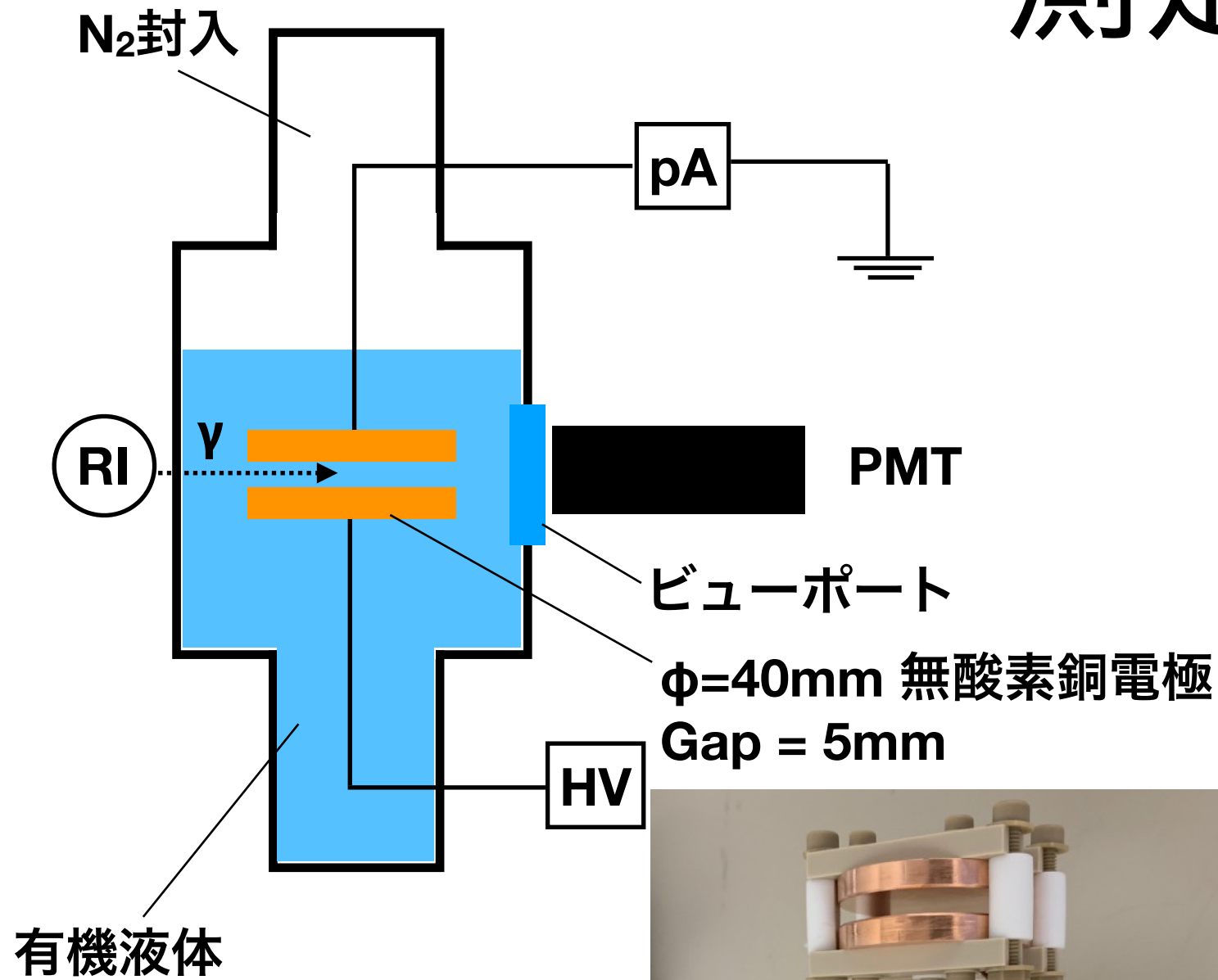
大型検出器を作る際には、可燃性が問題になるかも知れない

測定セットアップ



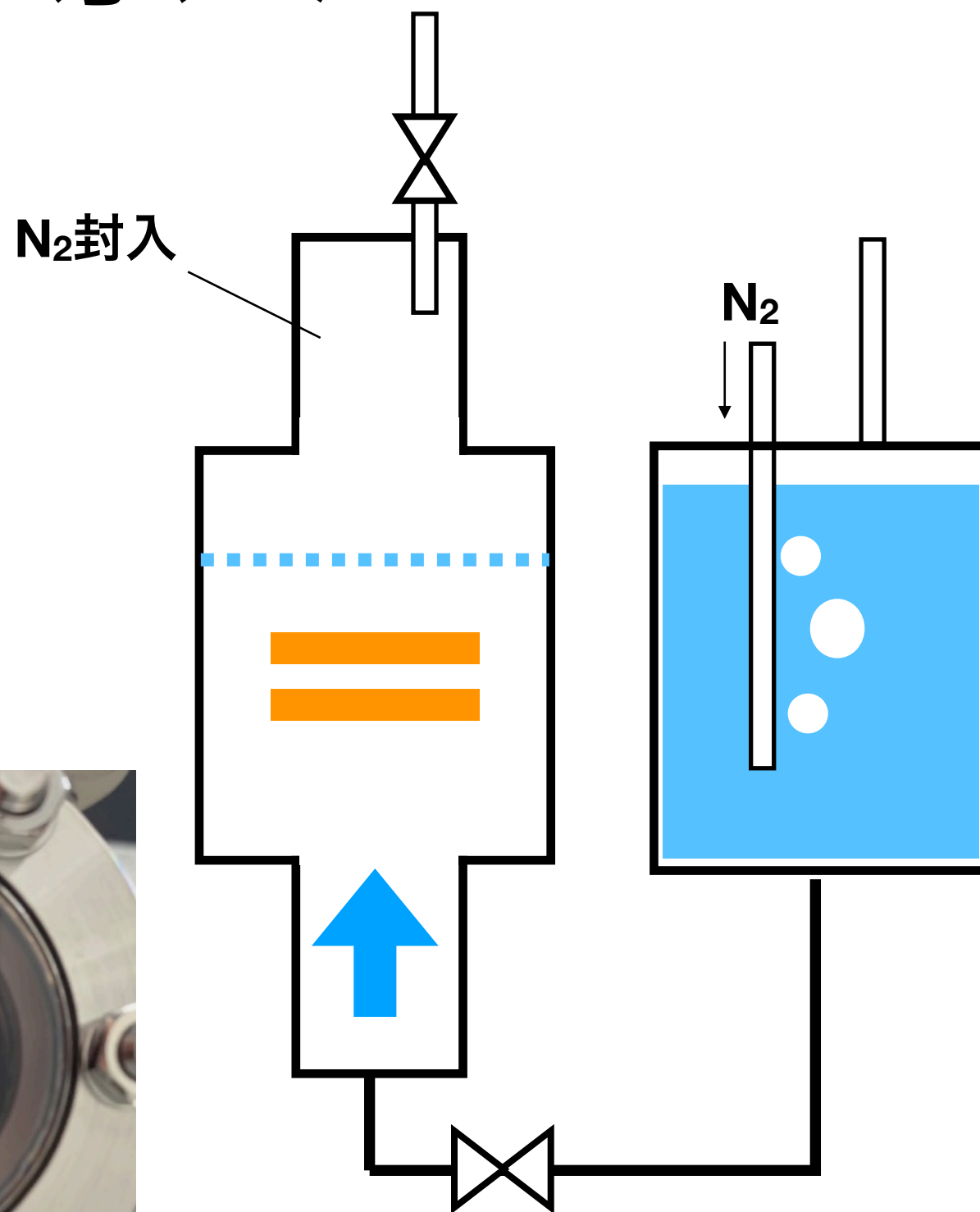
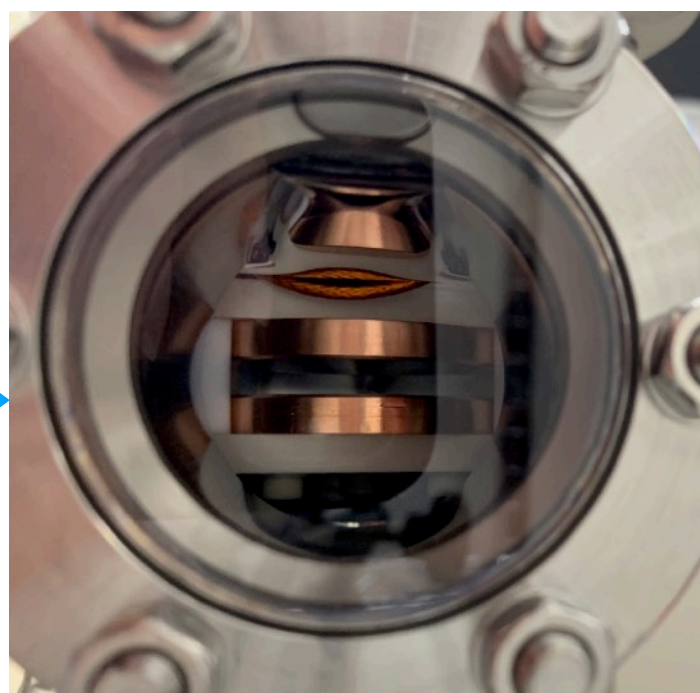
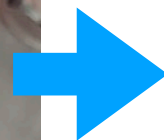
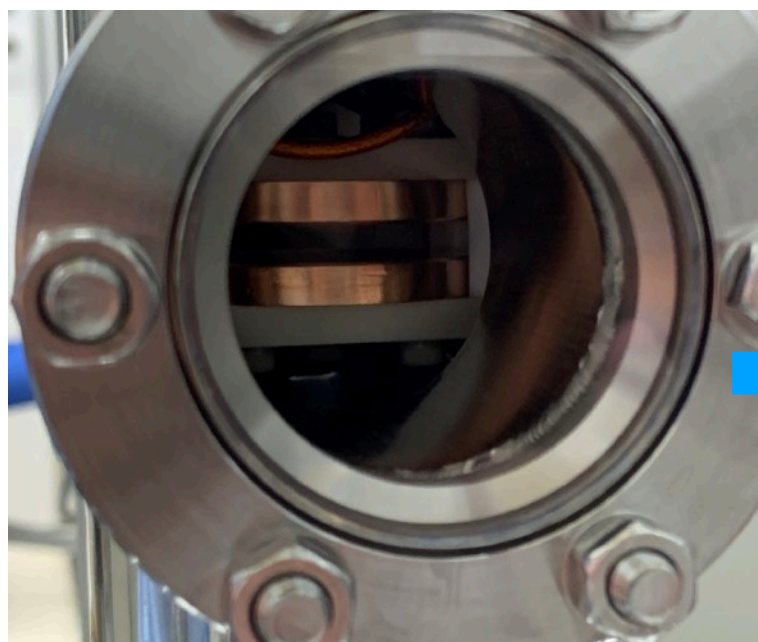
- 候補となる有機液体の基礎特性を測定するため、小型イオンチェンバーを制作
- 測定項目
 - イオン化電子量
 - 発光量
 - 液相から気相への電子の抽出効率
- TPCの媒質として使用でき（うる）液体を見つけることを目指す

測定セットアップ



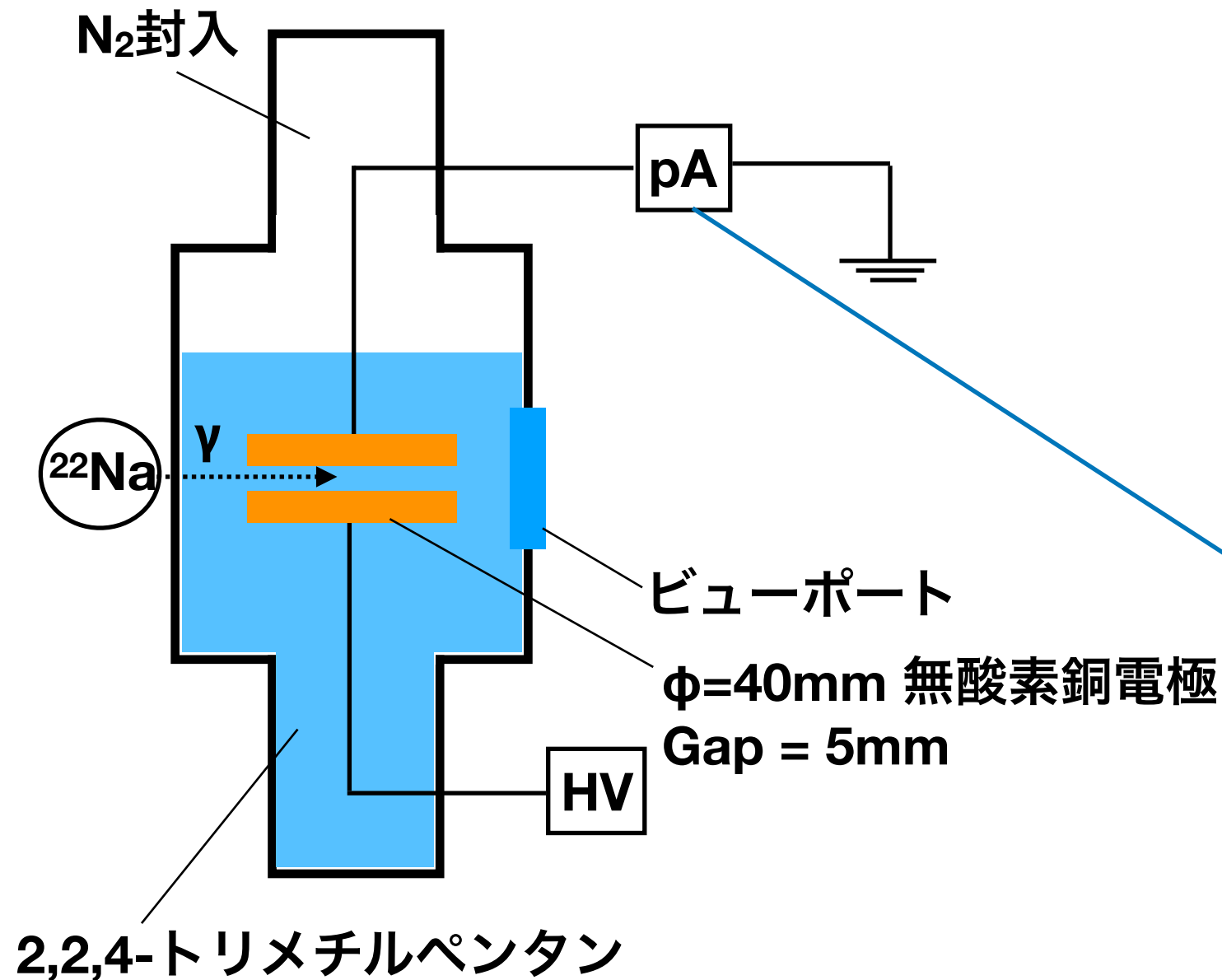
液体の導入

- 2,2,4-トリメチルペンタン (Capillary GC, > 99.7%)を使用
- 導入前にN₂バブリング
- 電極入りチェンバーを純窒素で満たし、その後チェンバー内の窒素を置換する形で液体を下から導入



(前回の報告後、内部を汚染してしまったため、一度全て解体・洗浄後、組み直した)

電離電荷量の測定



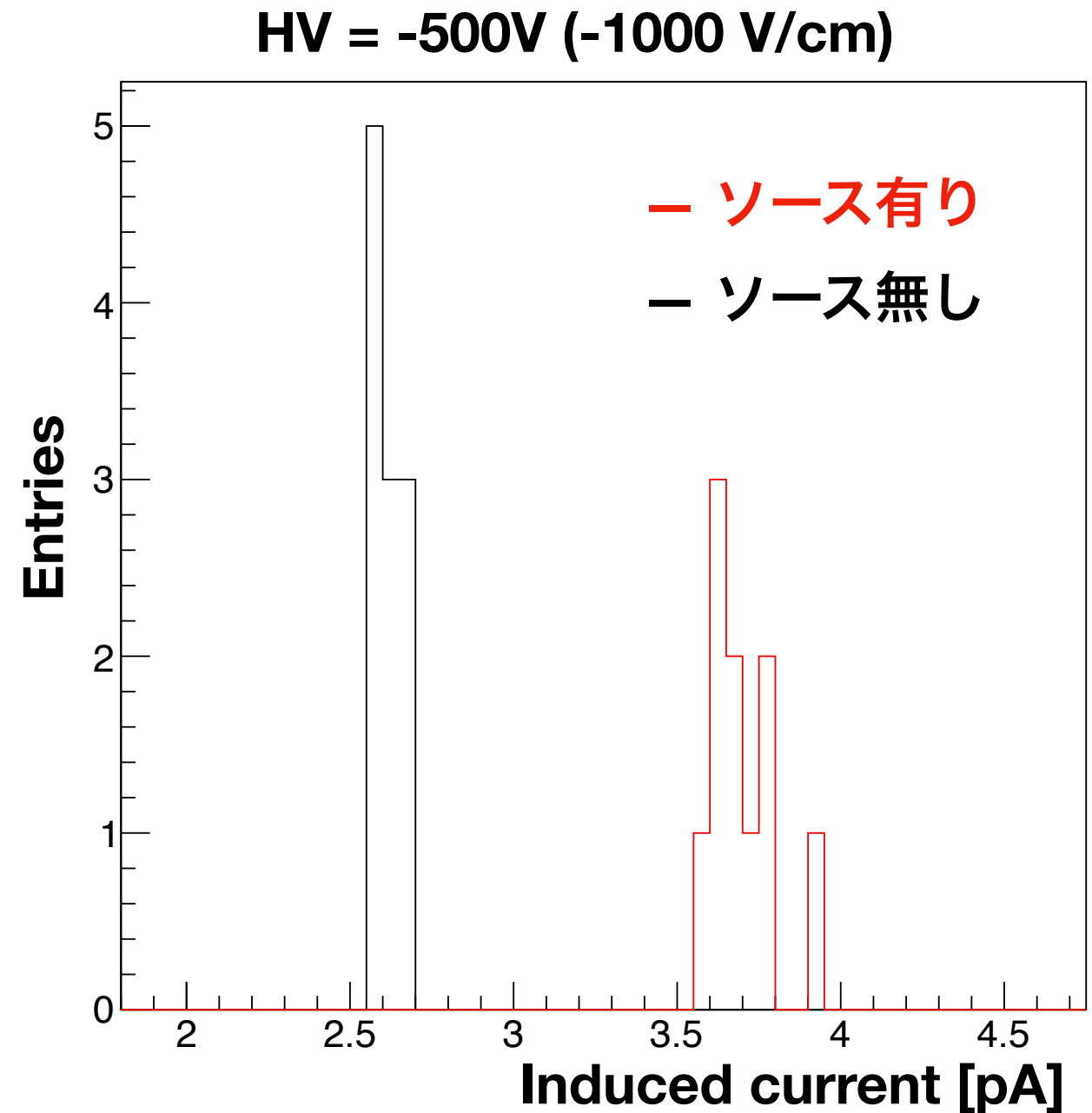
- 1 MBq ²²Na 線源をチェンバー外側に設置
- 平均電荷量(DC電流)をピコアンメーターを用いて測定

Keythley 6485 picoammeter



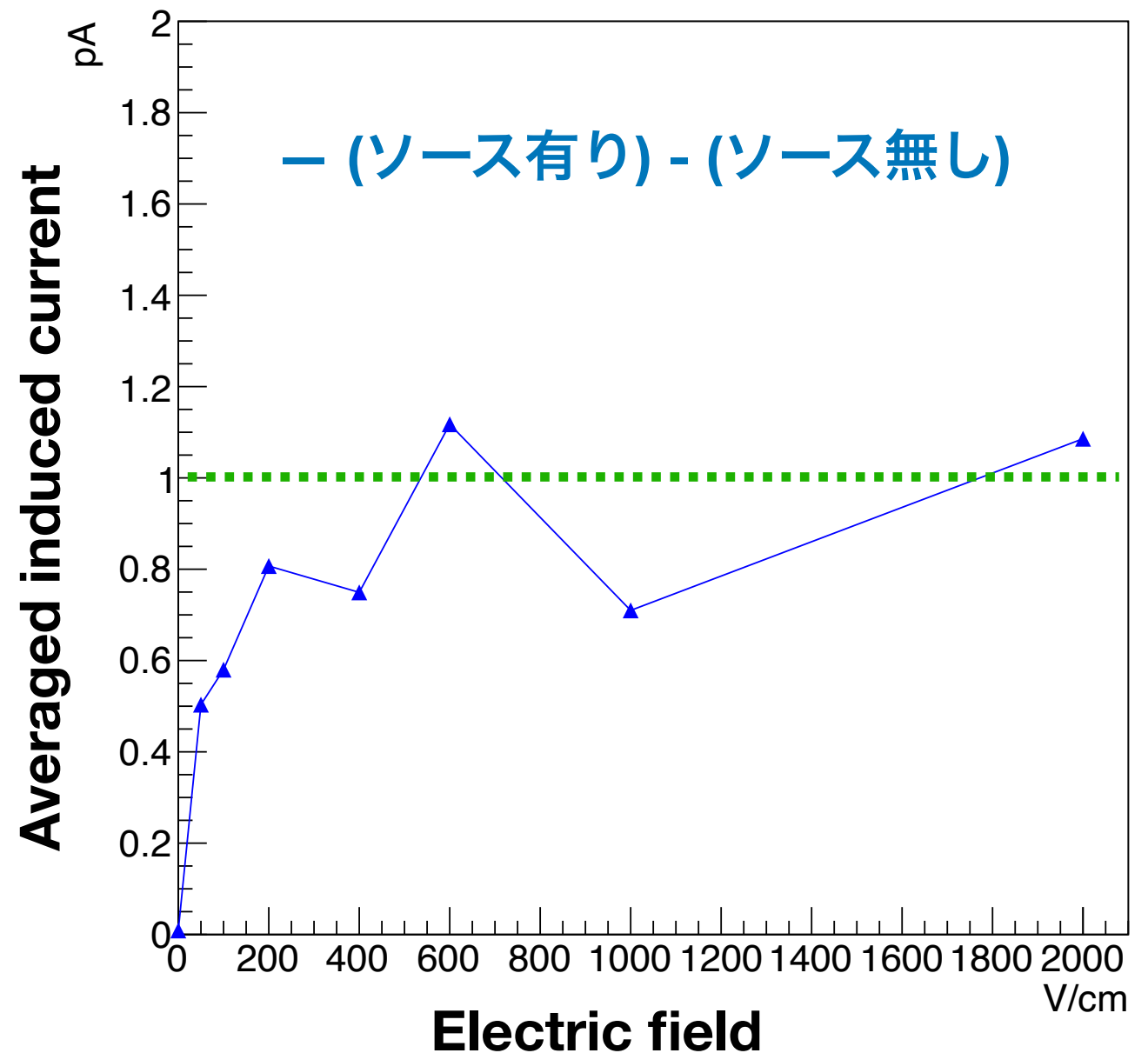
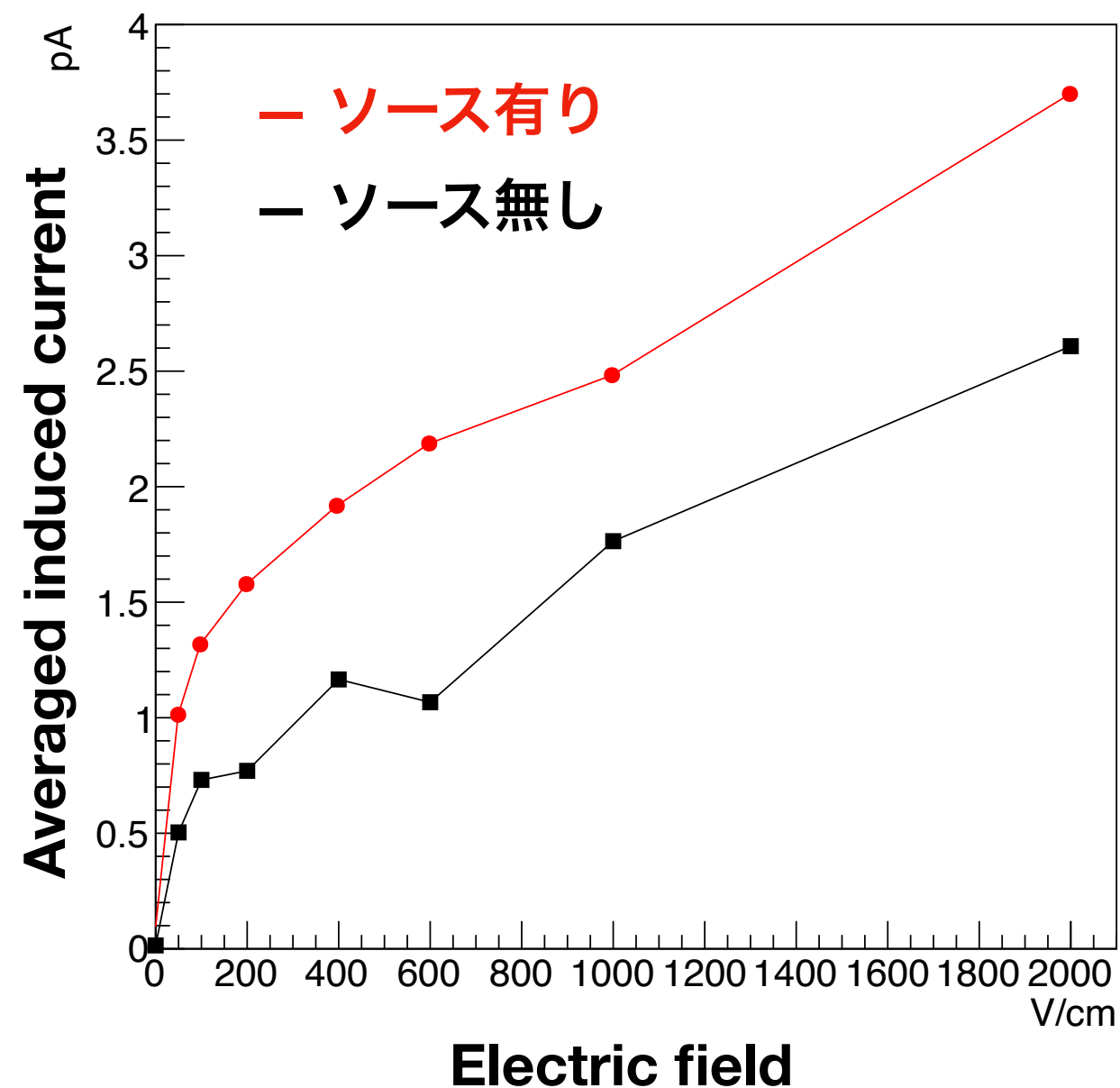
電離電荷量測定結果(1)

- ピコアンメーターの読みを複数回記録し、ソースの有無による電流値の変化を測定
- ソースからの γ 線による信号を確認出来た
- 電流量を電場強度を変えながら測定

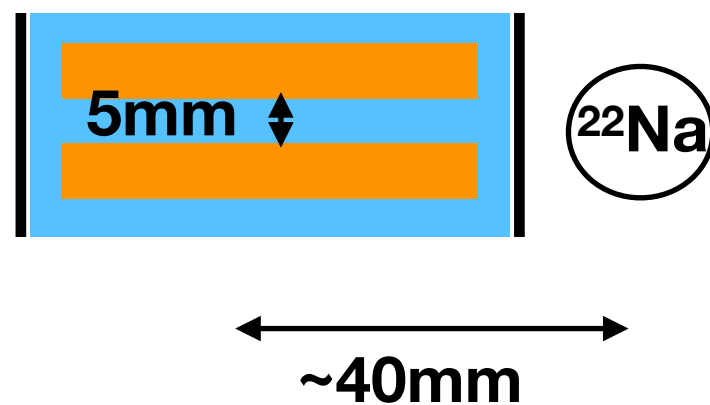
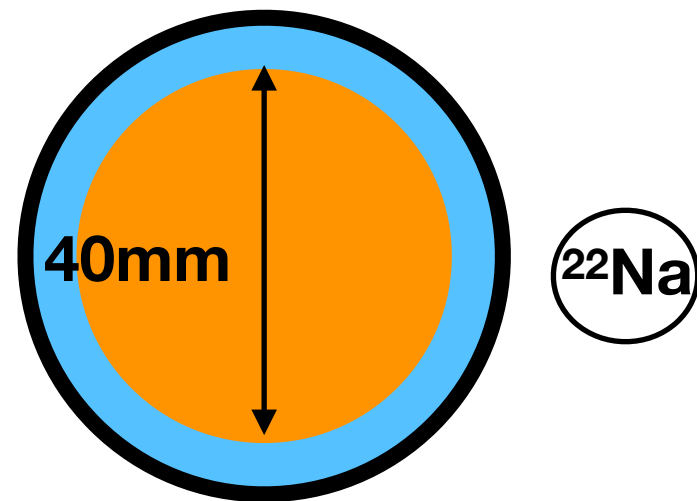


電離電荷量測定結果(2)

- >200 V/cmの領域で、安定して1pA前後の電流を確認



期待される電流値



- ソースの強度：1MBq
- 電極間の領域が見込む立体角：~1%
- 電極間に飛んだ511 keV gammaが電極間で反応する割合：O(10%)?
- 511 keVが一回Compton散乱した際に落とすエネルギー：~300 keV
- 電離電子の数：0.33 / 100 eV

$$2 \times 10^6 \text{ Bq} \times 0.01 \times 0.1 \times 3 \times 10^5 \text{ eV} \times 0.33 / 100 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 3 \times 10^{-13} \text{ C/s} = \mathbf{0.3 \text{ pA}}$$

測定値：~1 pA

- 測定値はソース強度・見込む立体角・知られている電離電子量(Wi)からの予想とオーダーはコンシステント→シミュレーションによる詳細な比較を進めている

今後の計画

- 得られたデータのシミュレーションとの比較
- パルスデータ（宇宙線 or α 線源）を取得し、mobilityの評価
- 発光量の測定
- 液面を電極間に調整し、液相から気相への抽出の評価
- 純化方法の検討
- 他の液体の評価

まとめ

- 超高精度・低バックグラウンドでの反電子ニュートリノ測定を目指し、有機液体を媒質として用いたTPCを検討している
- 期待される（可能性のある）性能
 - $e^+/e^-/\gamma$ の弁別
 - 高エネルギー分解能（1-2% @ 1MeV）
 - 反ニュートリノ到来方向の測定
- 一方、実現のためにはまだまだ課題や不確定要素が大きい
- 適した液体の調査と原理検証を目的とした測定を行っている
- イオンチェンバーを製作し、2,2,4-トリメチルペンタンでのイオン化の信号を確認した
- 今後、より詳細な測定および、他の液体の試験を行っていく

興味がある方、ご連絡ください