

課題研究P2

# 真空槽を用いた泡箱の作製

2020年3月13日

高橋 樹

# 目的

物理学の発展に大きな貢献をした泡箱を、身の回りにあるもので自作する

## 霧箱



課題研究P2 2012年度  
課題研究P2 2016年度

## スパークチェンバー



課題研究P1 2015年度

## 泡箱



(KEK 1 m水素泡箱)

# 飛跡検出器の原理と歴史

---

- 霧箱 (cloud chamber)
- 泡箱 (bubble chamber)

# 霧箱の原理

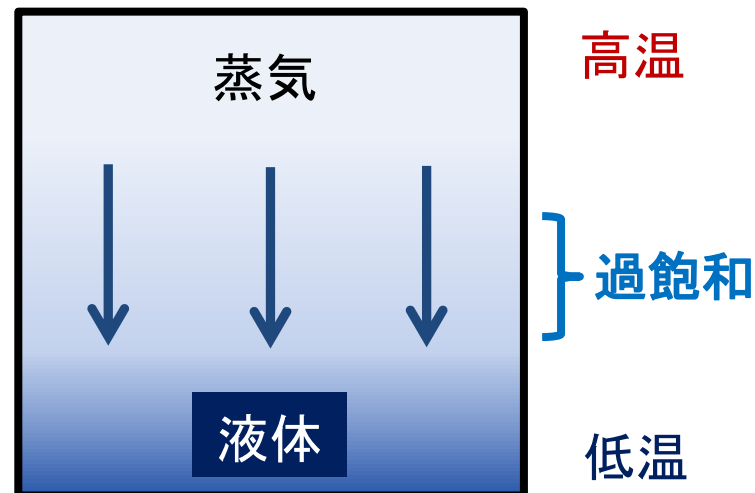
過飽和 …… 飽和蒸気圧よりも多くの蒸気を含む状態  
(supersaturation)

放射線の電離作用によって、軌跡に沿ってイオンが生じる。  
イオンが凝結核の役割を果たし、線状の霧が現れる。

膨張型：断熱膨張



拡散型：温度勾配



# 霧箱の歴史

1896年頃 原型が完成

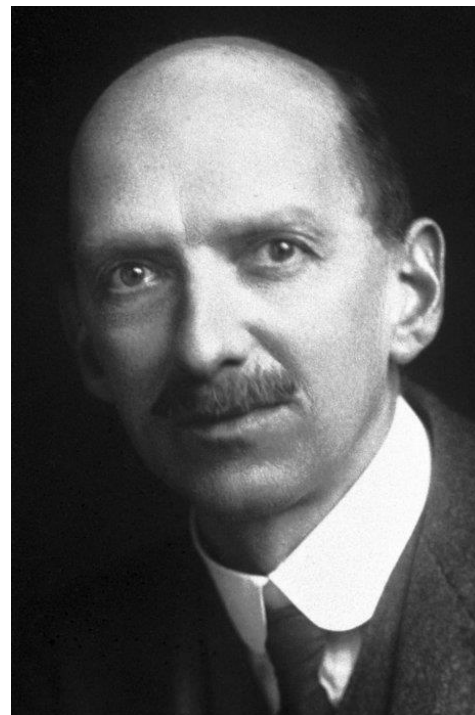
1911年  $\alpha$ 線・ $\beta$ 線の軌跡を撮影

1923年 Compton散乱の実証

1927年 Wilsonにノーベル物理学賞

1932年 **陽電子の発見**

1947年 K中間子の発見



C. T. R. Wilson (英)

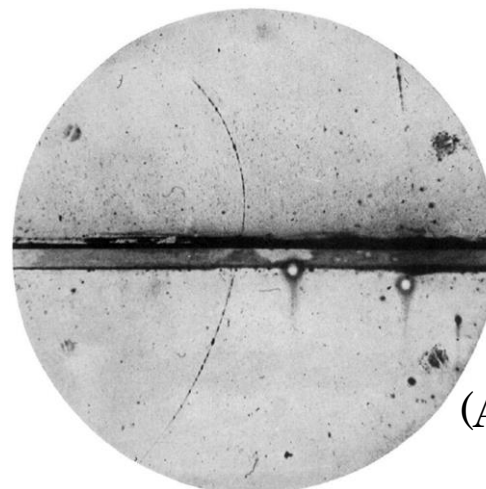


←  $\beta$ 線

←  $\beta$ 線

←  $\alpha$ 線

(Wilson, 1912)



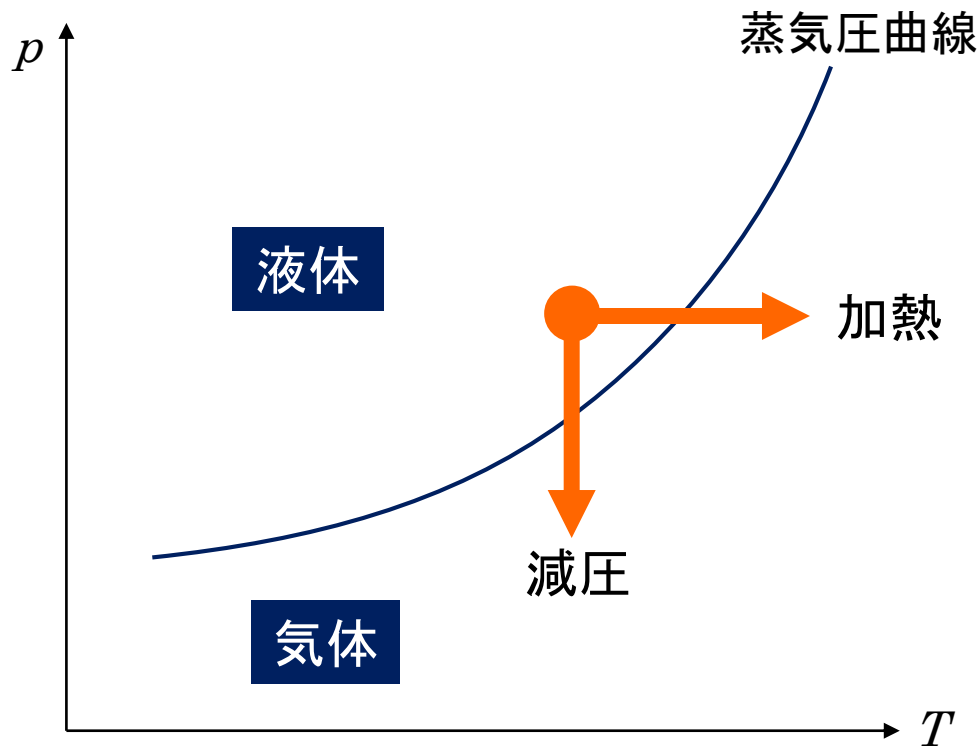
陽電子

(Anderson, 1933)

# 泡箱の原理

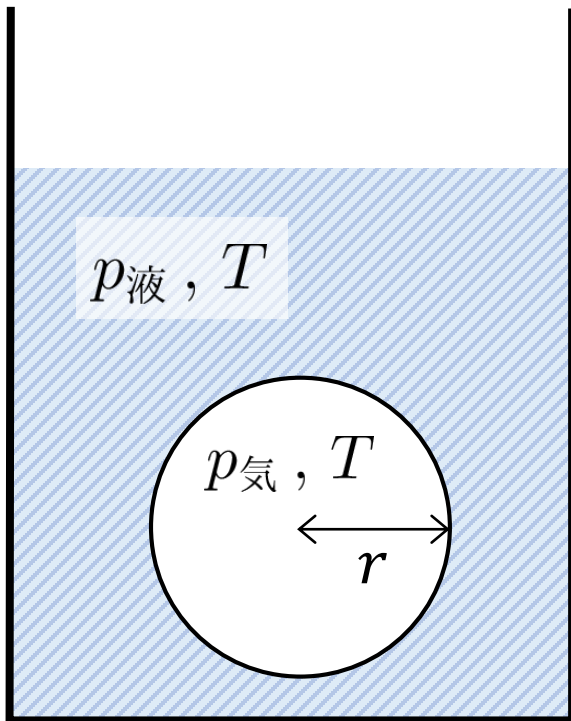
**過熱** …… 沸点を超えて加熱しても液相を保つ状態  
(superheating)

入射した荷電粒子のエネルギーが蒸発を引き起こし、軌跡に沿って泡が発生する。



# 泡箱の原理

過熱が実現するのは、**表面張力  $\gamma$  [J/m<sup>2</sup>]** のおかげ



$p_{\infty}$  : 系の温度における  
飽和蒸気圧

Laplace方程式とKelvin方程式を用いる.

$$\text{平衡時} \left\{ \begin{array}{l} p_{\infty} - p_{\text{気}} \simeq \frac{\rho_{\text{気}}}{\rho_{\text{液}}} \frac{2\gamma}{r_c} \\ p_{\text{気}} - p_{\text{液}} = \frac{2\gamma}{r_c} \\ p_{\infty} - p_{\text{液}} \simeq \left( 1 + \frac{\rho_{\text{気}}}{\rho_{\text{液}}} \right) \frac{2\gamma}{r_c} \end{array} \right.$$

$r$  : 発生した気泡の核の半径 とする.

$r < r_c$  のとき, 気泡は  $r \rightarrow 0$  に収縮 (過熱が保持)

$r > r_c$  のとき, 気泡は  $r \rightarrow \infty$  に膨張 (沸騰)

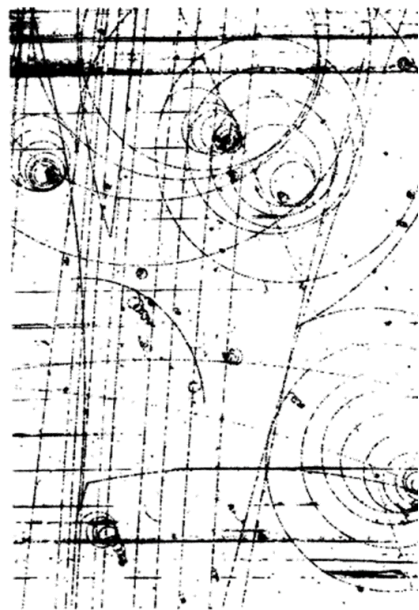


# 泡箱の歴史

- 1952年 原型が完成
- 1953年 宇宙線ミューオンの軌跡を撮影
- 1960年 Glaserにノーベル物理学賞
- 1964年  **$\Omega^-$ 粒子の発見**
- 1973年 **中性カレントの発見**



D. A. Glaser (米)



(左)  $\Omega^-$ 粒子(sss)の崩壊

(右)  $e^- \nu_e$  散乱の中性カレント



# 泡箱を自作したい

## 実用化されている泡箱の特徴

- ・低温・高圧で作動
  - 高温・低圧でも過熱状態にできるはず
- ・液体水素を用いることが多い
  - 陽子1個なので余計な反応を起こさないため
- ・大型 (1 m前後)
  - 高エネルギー粒子の一連の反応を収めるため

---

欲を出さなければ, 身近なもので泡箱を作製できるのでは？

(感度・分解能など)

---

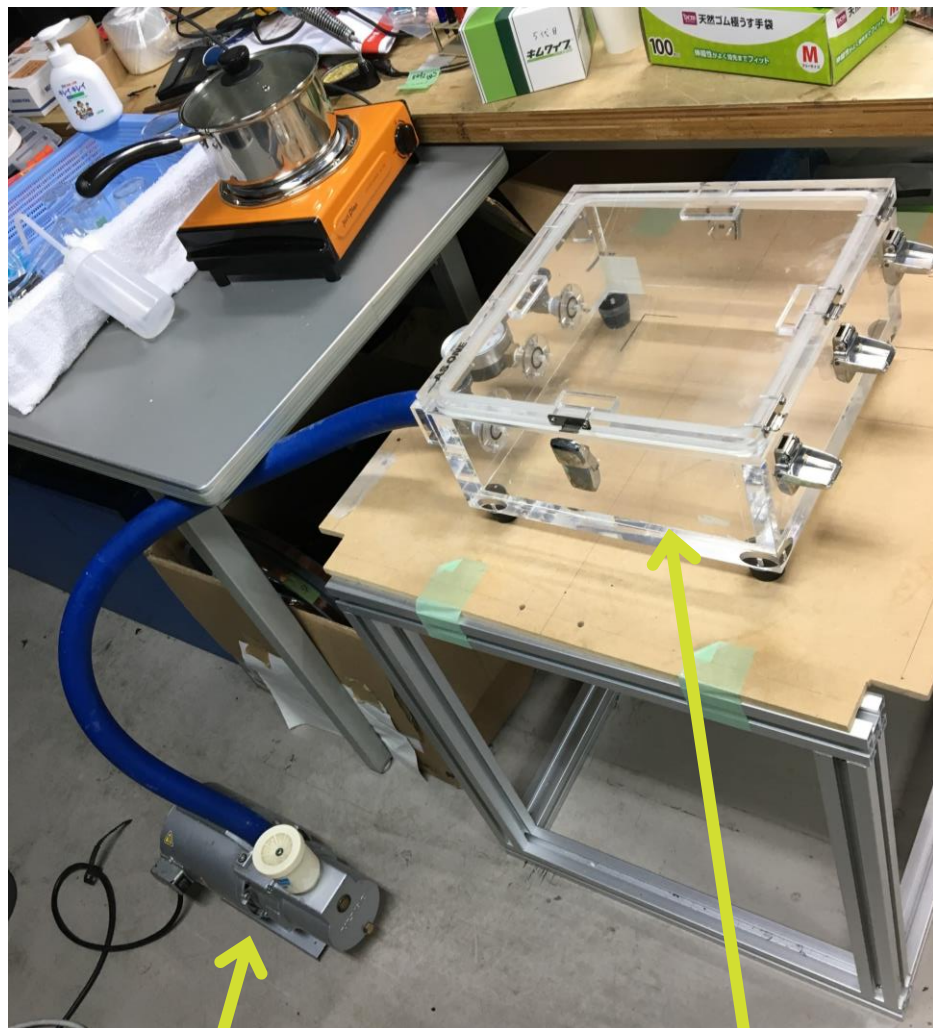
# 実験の流れ

第Ⅰ部：過熱状態を作る

第Ⅱ部： $\alpha$ 線との反応を調べる

第Ⅲ部：宇宙線ミューオンとの反応を調べる

# 実験装置



油回転真空ポンプ

真空槽



放射温度計



蒸留水

# 実験装置



ビーカー類

圧力計

バルブ



電気コンロ

湯せん用鍋

# 単位に注意

## 温度

$$T [^{\circ}\text{C}] \equiv T [\text{K}] - 273.15$$

## 圧力

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$$

$$1 \text{ bar} \equiv 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} \equiv 101325 \text{ Pa}$$

$$760 \text{ mmHg} \equiv 760 \text{ Torr} \equiv 1 \text{ atm}$$

$$p [\text{PaG}] = p [\text{Pa}] - 101325$$



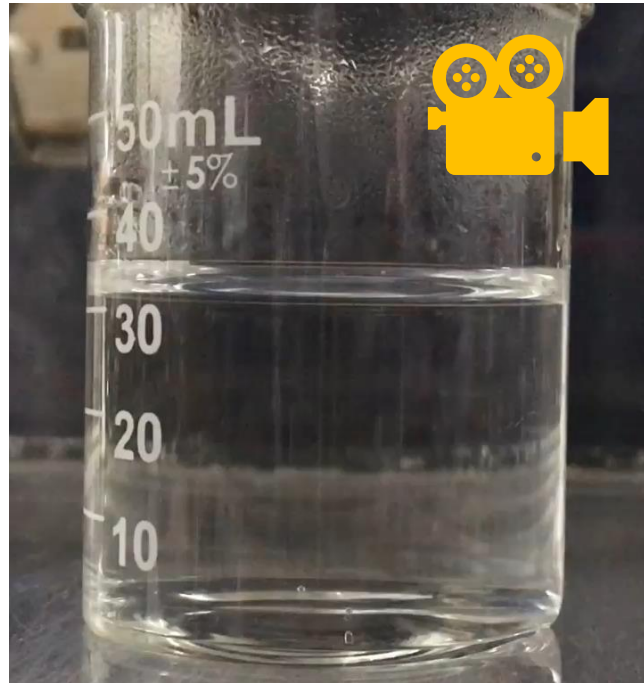
← ゲージ圧  
減圧したら負の値

# 第 I 部：過熱状態を作る



# とりあえず減圧してみる

汲んだばかりの蒸留水30 mLを65 °Cに加熱し、減圧する。



途中で必ず沸騰し、過熱状態にならない。

( $-0.076$  MPaG ~  $-0.084$  MPaG の間)

↑ 水中に空気が溶けているから？



# 脱泡の手順

1. 100 mLビーカーに水80 mLを入れ, 湯せんで65 °Cに加熱する.
2. ビーカーに磁石1個を加える。
3. 養生テープでビーカーに蓋をして, ボールペン先で穴を開ける.
4. 真空槽で減圧する. 自然に沸騰が始まる。
5. 磁石で刺激して十分に沸騰させる.
6. 沸騰が収まったら常圧に戻す。
7. 液体が約40 mL残る. 50 mLビーカーに移す。

上記の手順で,  
事前に水中の空気を抜いておく



# 脱泡後の水を使用

脱泡した蒸留水30 mLを65 °Cに再加熱し, 減圧する.

→ 最大まで減圧しても沸騰しない

減圧中の液体に磁石を投下.

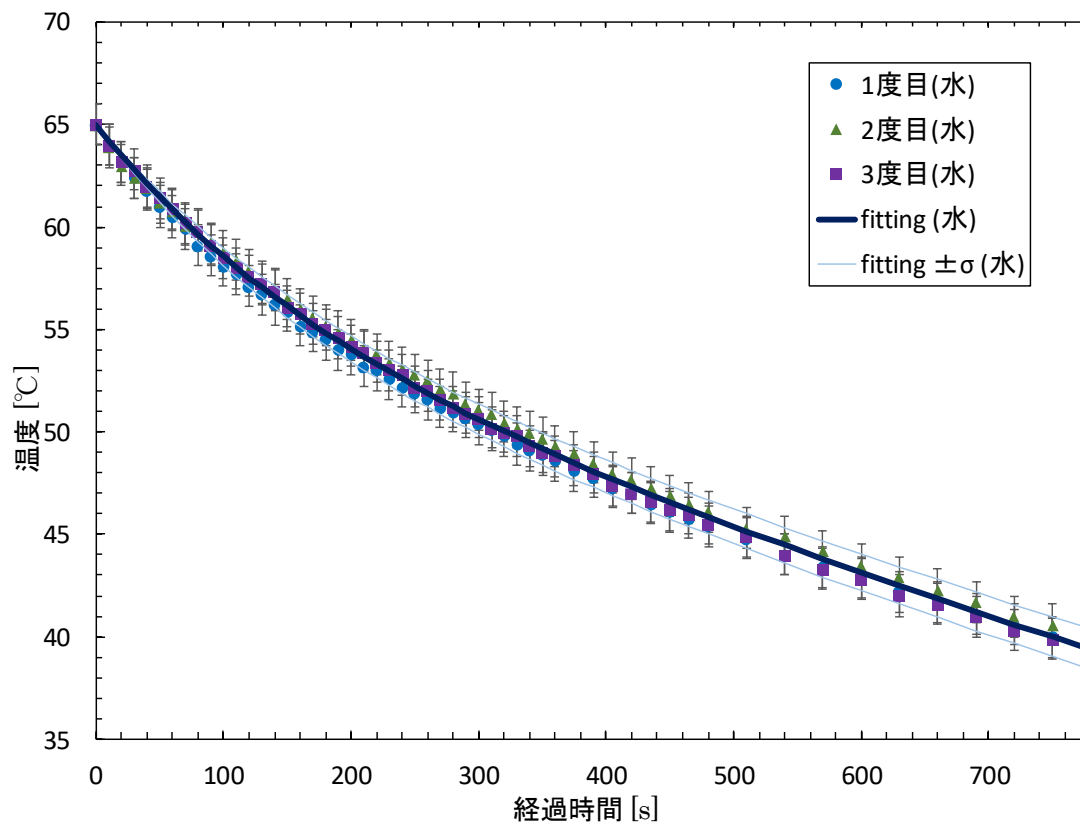


- ・激しく液体が飛び出る
- ・投下後に沸騰が継続

過熱に成功 !?

# 水温の時間変化を推定

水道水30 mLを65 °Cに加熱, 常圧で放置. 10 秒~30 秒おきに温度を記録.

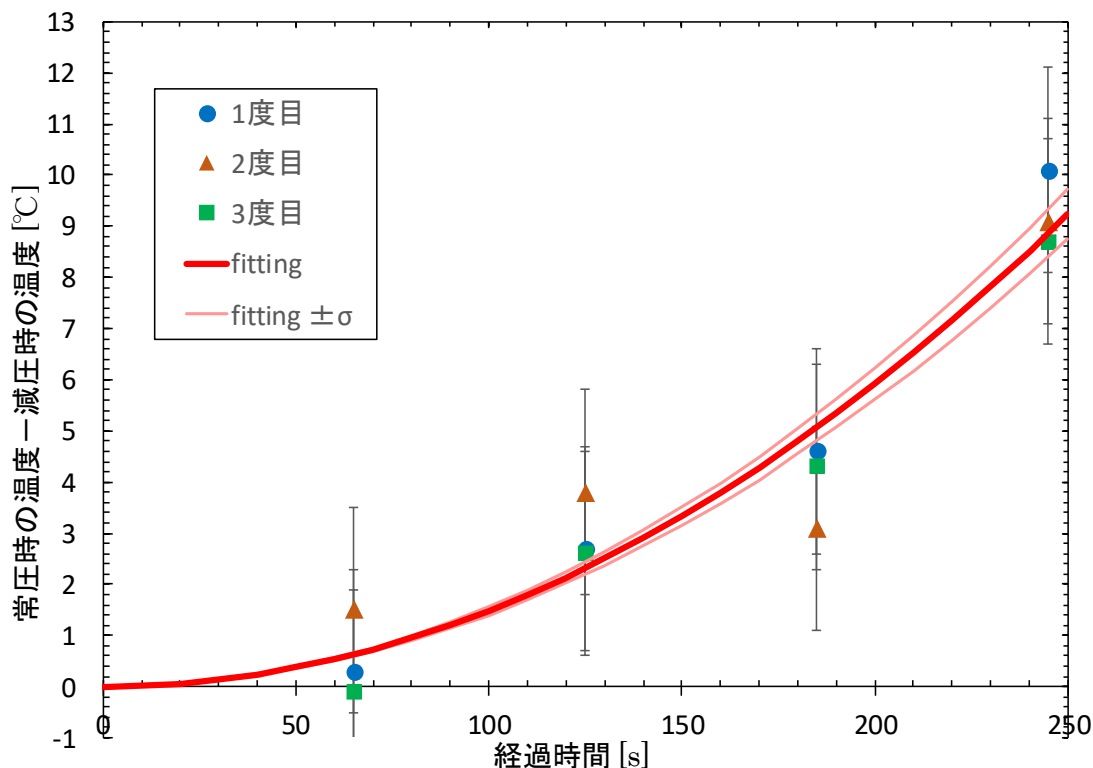


フィッティング:  $T(\text{常圧}) [^{\circ}\text{C}] = a(e^{-b \cdot t [\text{s}]} - 1) + 65 - c \cdot t [\text{s}]$

$a = 10.47 \pm 0.46$  ,  $b = 0.00558 \pm 0.00028$  ,  $c = 0.0196 \pm 0.0006$

# 水温の時間変化を推定

脱泡水道水30 mLを65 °Cに加熱して減圧. 途中で減圧をやめ, 温度を記録.



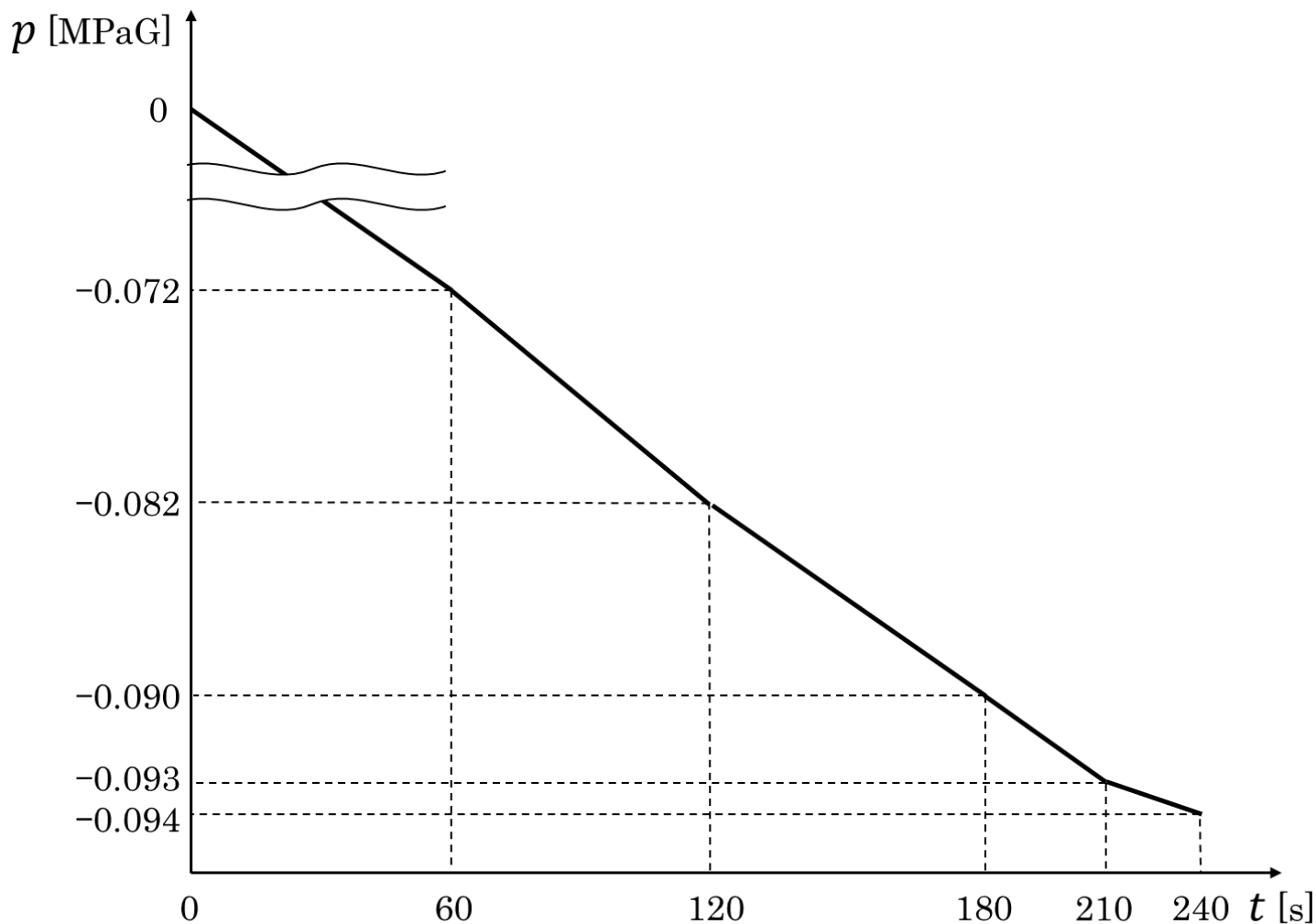
減圧中の水温

$$T(\text{減圧}) [^{\circ}\text{C}] = \underbrace{a(e^{-b \cdot t [\text{s}]} - 1) + 65 - c \cdot t [\text{s}]}_{\text{常圧の温度}} - \underbrace{d \cdot (t [\text{s}])^2}_{\text{余分な蒸発熱}}$$

$$d = (1.48 \pm 0.08) \times 10^{-4}$$

# 減圧速度を揃える

毎回同じ速さで減圧する.



# 過熱であることの理論的な確認

推定した温度における飽和蒸気圧の文献値を, その時点の圧力と比較する.  
液体にかかる圧力が, 飽和蒸気圧を下回っていれば過熱.

圧力 [MPaG]	圧力 [kPa]	経過時間 [分:秒]	推定温度 [°C]	飽和蒸気圧 [kPa]
-0.084	17.3	2:15	54.12	15.123
-0.085	16.3	2:23	53.42	14.619
-0.086	15.3	2:30	52.80	14.175
-0.087	14.3	2:37	52.17	13.757
-0.088	13.3	2:45	51.44	13.273
-0.089	12.3	2:52	50.80	12.852
-0.090	11.3	3:00	50.05	12.395
-0.091	10.3	3:10	49.10	11.816
-0.092	9.3	3:20	48.13	11.262

過熱が実現

# 脱泡の効果

- ・「脱泡」の作業を行うことにより、  
過熱状態を安定して作ることができる。

水道水 ..... 36 回中 35 回成功 (97%)

蒸留水 ..... 59 回中 56 回成功 (95%)

- ・異物や不純物を含んでいても過熱にできる。



銅線 (3cm)



ボルト (全長2.5cm)

脱泡時に磁石と  
一緒に入れる。



## 第Ⅱ部： $\alpha$ 線との反応を調べる

# $\alpha$ 線源

トリタン棒 を3 cm, 5 cmに切断して使用.

$\alpha$  崩壊する  $^{232}\text{Th}$  (4.02 MeV, 3.96 MeV) を含む.



$\alpha$  線の飛程は, 空気中で4 cm程度, 水中で30  $\mu\text{m}$ 程度.

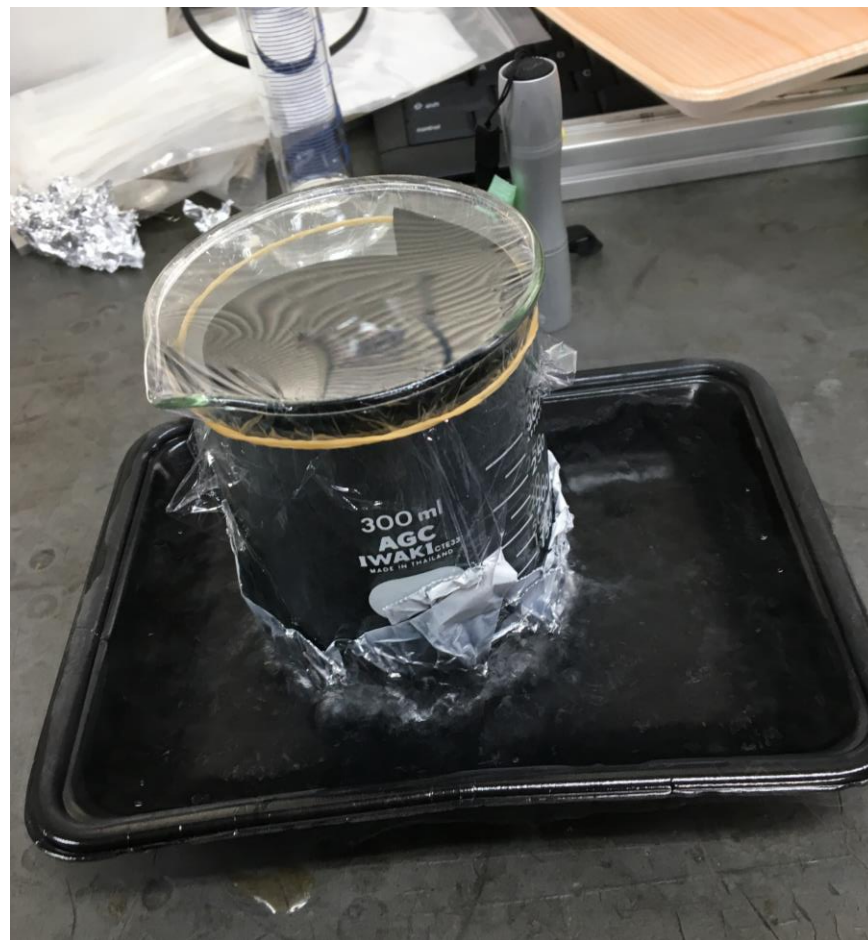
過熱液体中に入れると, 自発的に泡が発生し, 沸騰が始まると予想.  
(軌跡は見えない)

# 霧箱で $\alpha$ 線を観測

拡散型霧箱を自作し,トリタン棒を入れた.

## 作り方

1. 300 mLビーカーの内側に黒い植毛紙を巻く.
2. 紙全体に無水エタノールを吹きかける.
3. 線源を入れる.
4. ラップで蓋をする.
5. 底を液体窒素で冷やす.



自作した霧箱

# 霧箱で $\alpha$ 線を観測

トリタン棒の $\alpha$ 線



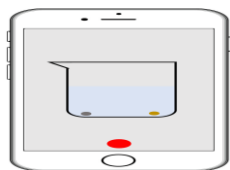
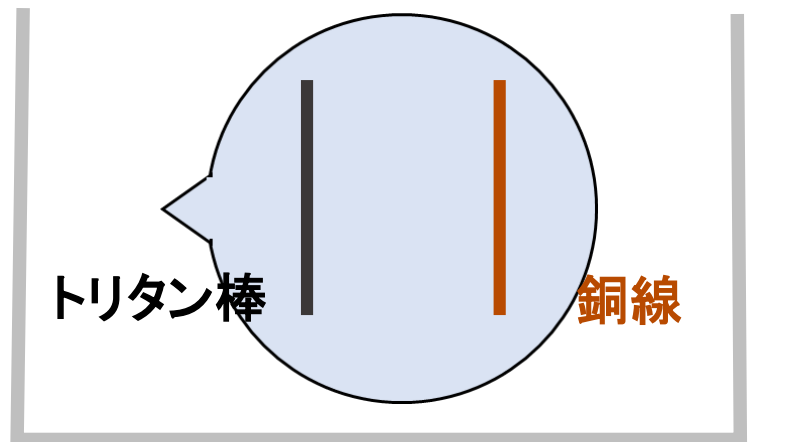
宇宙線ミュオン



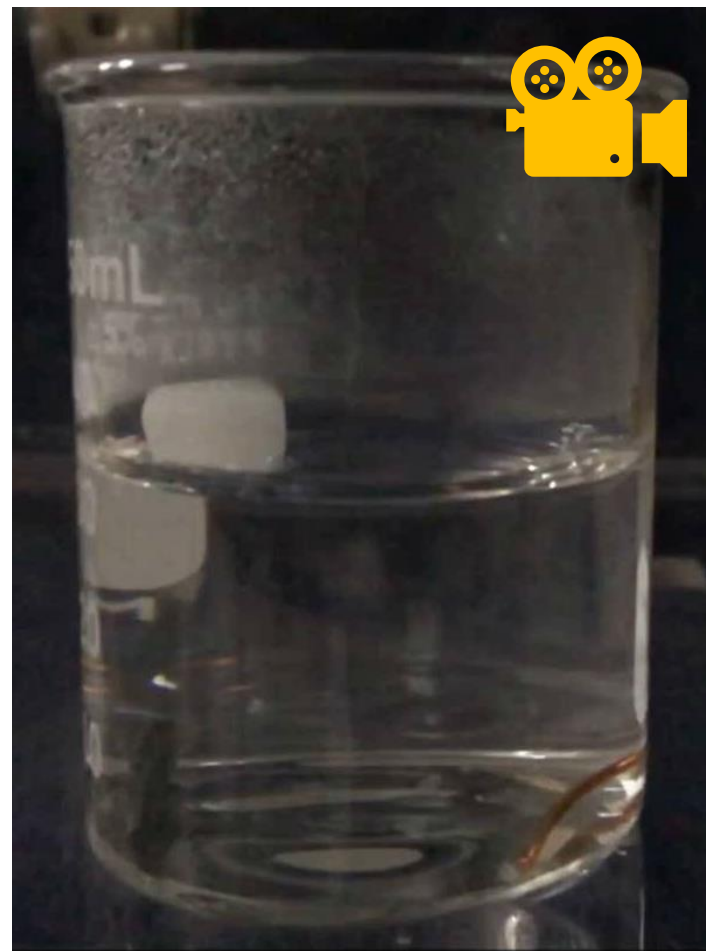
# トリタン棒と銅線の同時減圧

トリタン棒・銅線を入れて、水道水を脱泡した。  
脱泡後30 mLを65 °Cに加熱し、減圧した。

(上から見た図)



iPhone 6s  
スロー撮影 (240 fps)



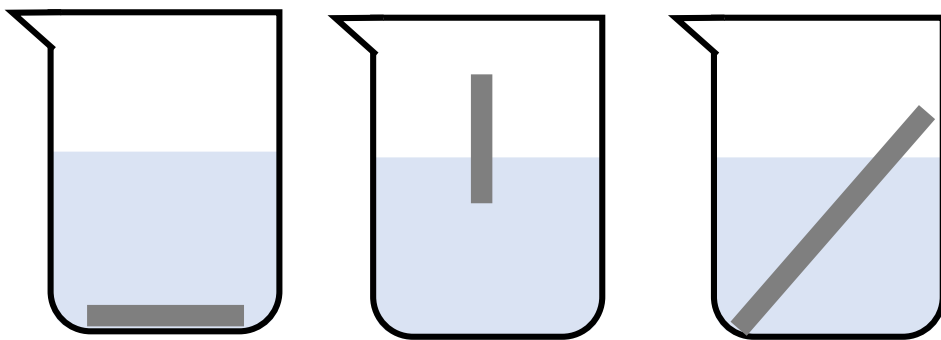
2:56, -0.087 MPaG (1/8倍速)

# トリタン棒の沸騰場所

トリタン棒を入れて、水道水を脱泡した。  
脱泡後30 mLを65 °Cに加熱し、減圧した。

様々な入れ方を試した。

(横から見た図)



3:13, -0.092 MPaG (1/8倍速)



# $\alpha$ 線が沸騰の原因か？

## 結果

- ・異物だけを入れた過熱は安定.
- ・トリタン棒と銅線を同時に減圧すると、トリタン棒を起点に突沸した.
- ・3本すべてのトリタン棒で突沸を確認.



➡ トリタン棒からの  $\alpha$ 線が沸騰を引き起こした可能性

## 疑問点

- ・泡の発生場所が決まっていた (1本につき2~3か所).
- ・突沸する時としない時があった.

➡ 形状要因, 熱的な揺らぎによる沸騰の可能性もある



## 第Ⅲ部：宇宙線ミュオンとの 反応を調べる

# 軌跡を観測しよう

## 宇宙線ミュオン



(Glaser, 1954)

地上では毎秒1個/60 cm<sup>2</sup> の割合で飛来.

高エネルギー(数 GeV)なので, 建物も貫通する.

水中でのエネルギー損失: 1.9 MeV/cm

これまでに作成した過熱状態は安定. 過熱を不安定化させる.

半径  $r_c$  の気泡を作るのに必要なエネルギー:

$$E(r_c) = \frac{16\pi\gamma^3}{3(p_{\text{気}} - p_{\text{液}})^2} \left[ 1 + \frac{2\Delta_{\text{vap}}H_m}{RT} \frac{p_{\text{気}}}{p_{\text{気}} - p_{\text{液}}} \right]$$

$p_{\text{液}}$  を下げる,  $\gamma$  を下げる,  $T$  を上げる

# 過熱を不安定化

- 液体の圧力  $P_{液}$

減圧速度を速める.

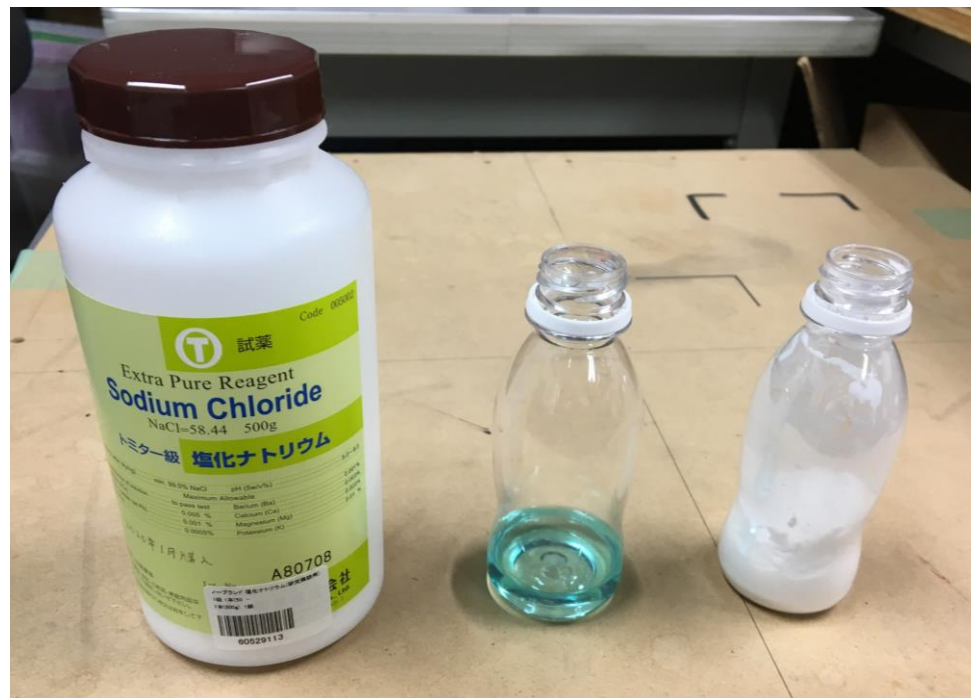
- 表面張力  $\gamma$

洗剤(界面活性剤)を加える.

- 温度  $T$

減圧前の加熱を65 °C → 80 °C に変更.

保温効果がある片栗粉を加える.



食塩  
(イオン性溶質 代表)

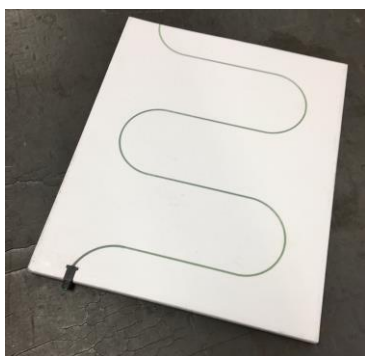
洗剤

片栗粉

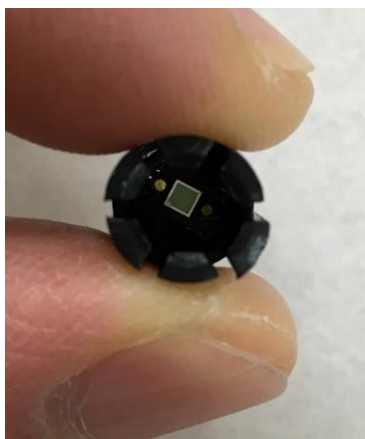
各種の条件で繰り返し実験した.

# 宇宙線ミュオン検出装置

シンチレーターとMPPCを真空槽の上下に設置し, オシロスコープに接続.  
(トリガーは上側)



シンチ  
レーター  
× 2 個



MPPC  
× 2 個

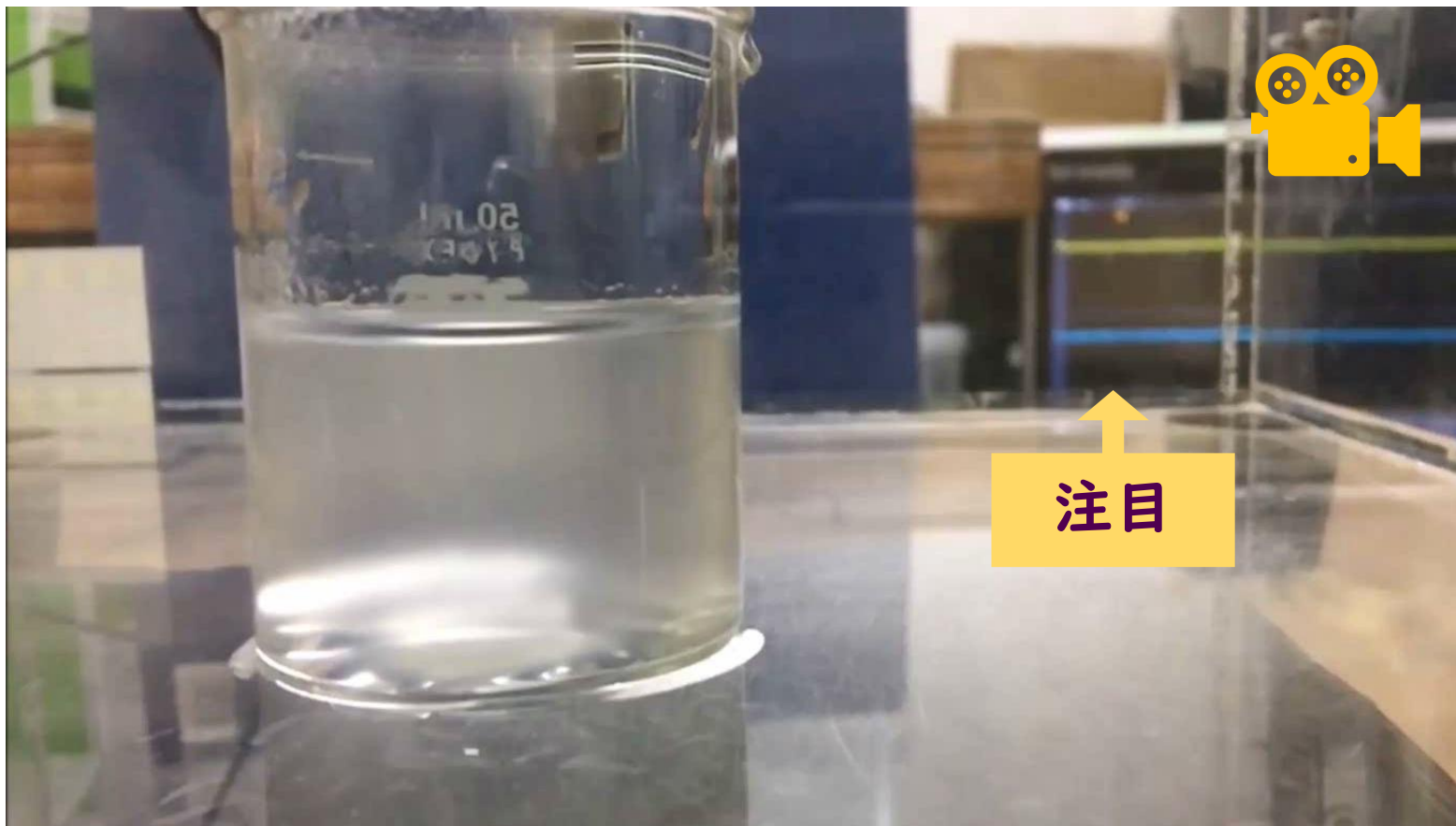


真空槽

オシロスコープ

# 宇宙線ミュオン検出装置

ビーカーとオシロスコープを同時にスロー撮影して解析する。  
沸騰と信号検出に相関を調べる。



(1/8倍速)

# 減圧結果

(溶媒は蒸留水 30 mL とする)

- ・水道水 / 蒸留水 / 食塩 0.75 g / 洗剤 1滴

沸騰も泡発生もなし. 安定な過熱のまま.

- ・洗剤 0.5 mL

途中で水面に泡が発生し, 沸騰が開始.

↑ 空気の混入が原因

- ・片栗粉 0.24 g

水面に泡が発生するが, 沸騰せず.

↑ 粘性の効果で保持. 泡は空気の混入による  
前兆なく自発的に突沸.

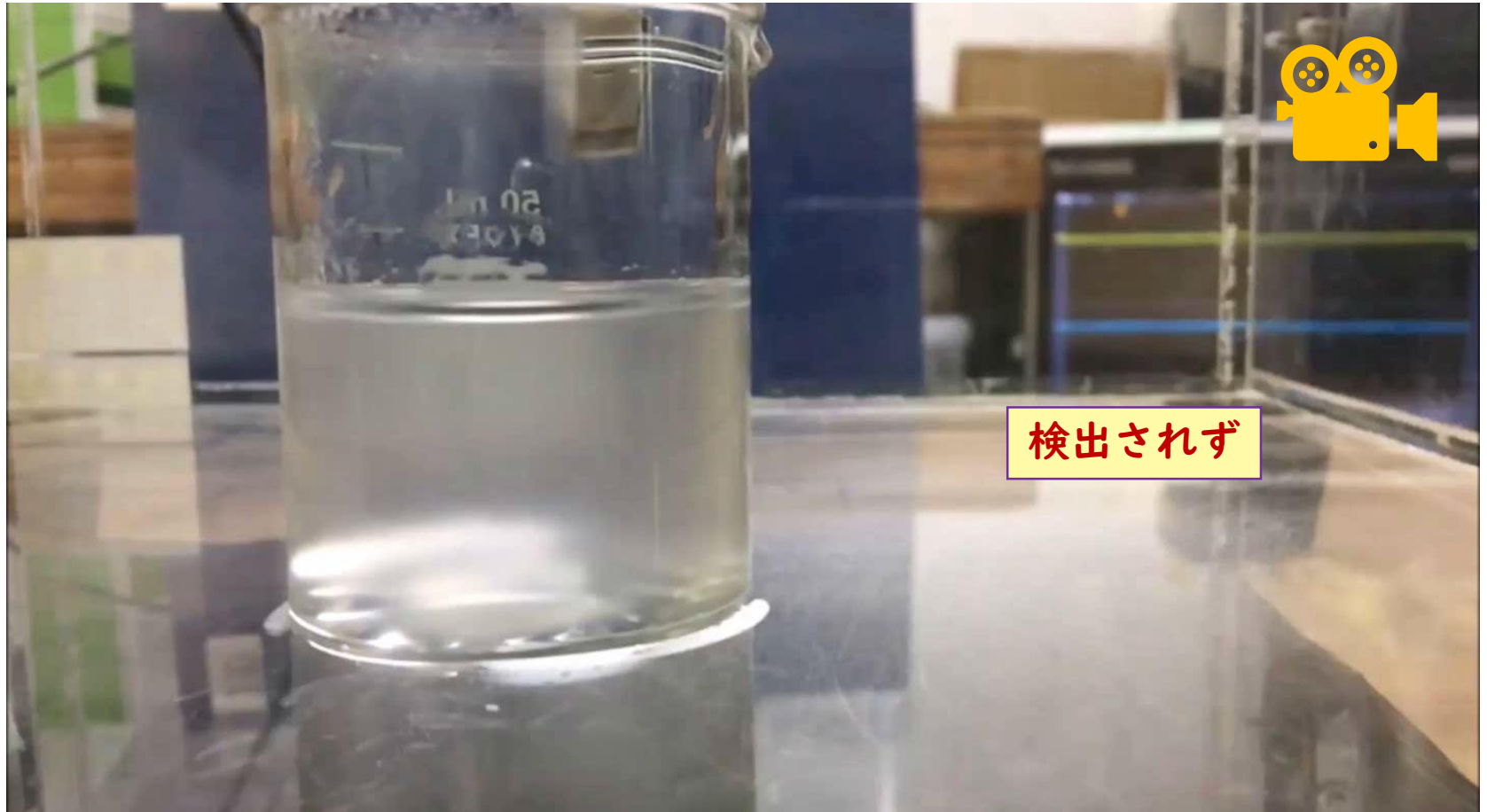
↑ ??





# 片栗粉溶液 突沸の瞬間

宇宙線との相関なし. 熱的な揺らぎによる突沸だと思われる.



80 °Cに加熱, 1:10, -0.074 MPaG

(1/8倍速)



# 結論

## 第Ⅰ部

「脱泡」の手順を踏むことで、安定した過熱状態を作ることができる。

## 第Ⅱ部

トリタン棒が突沸を引き起こすことを確認した。  
 $\alpha$ 線に反応した可能性がある。

## 第Ⅲ部

泡の発生は空気の混入か熱揺らぎによるもので、宇宙線ミュオンとは反応しなかった。

# 謝辞

高エネルギー物理学研究室

中家剛 教授, 隅田土詞 助教

TA 森正光さん, 辻川吉明さん

課題研究P2

ニュートリノ班, hidden photon班の皆さん

ご指導・ご協力ありがとうございました

# お知らせ

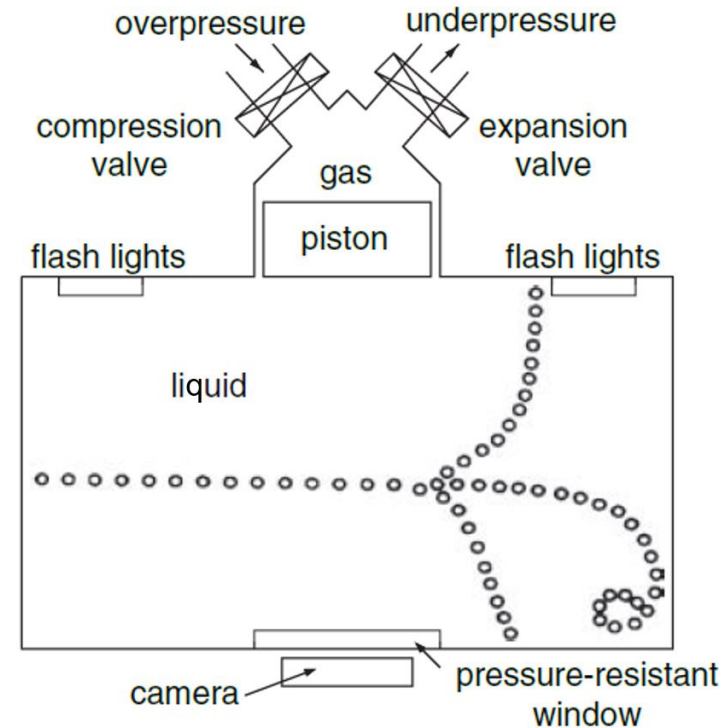
報告の完全版はレポートをご覧ください

ご清聴ありがとうございました

# 一般的な泡箱の動作の仕組み

加速器のビームと組み合わせて使われることが多い。

1. 高圧をかけて通常の液相にしておく
2. ピストンで急激に減圧し、過熱状態を作る
3. 荷電粒子が入射する
4. ライトが光り写真を撮る
5. 元の圧力まで圧縮し、泡を消す



**利点：高密度な液体を標的にして、稀な反応を観測できる**

# 蒸発熱の計算

## 実験結果

$$T(\text{減圧}) [^{\circ}\text{C}] = \underbrace{a(e^{-b \cdot t [\text{s}]} - 1) + 65 - c \cdot t [\text{s}]}_{\text{常圧の温度}} - \underbrace{d \cdot (t [\text{s}])^2}_{\text{蒸発熱}}$$

- ・ 4 分後の温度に約8.9 °C の差
- ・ 4 分後の水量に約0.5 mL の差

ほぼ一致

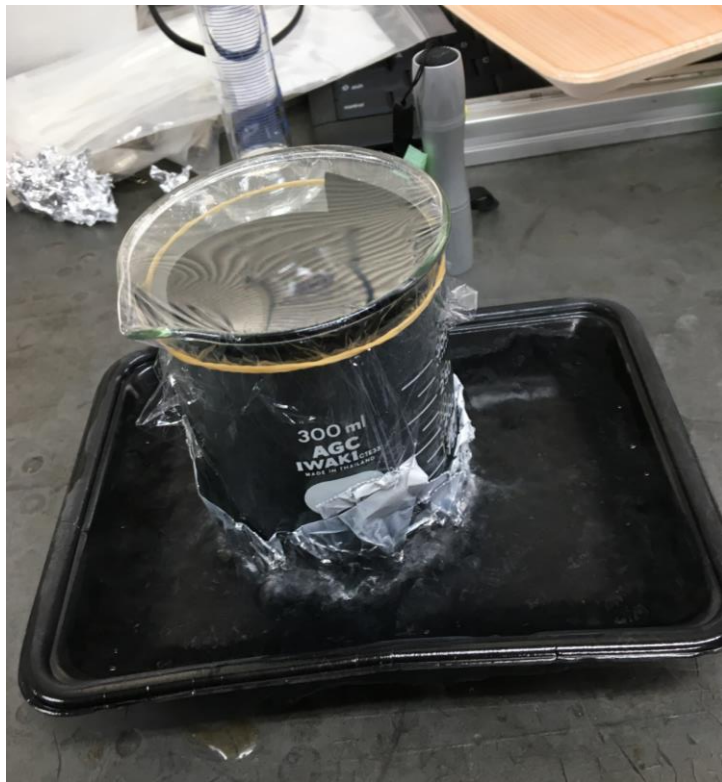
## 理論計算

0.5 mL の水が蒸発したときの温度減少

$$\Delta T [^{\circ}\text{C}] \simeq \frac{0.5 [\text{mL}]}{\rho M} \cdot \Delta_{\text{vap}} H_{\text{m}} \cdot \frac{\rho}{30 [\text{mL}] \cdot C} \approx 9.38$$

# 霧箱の動画

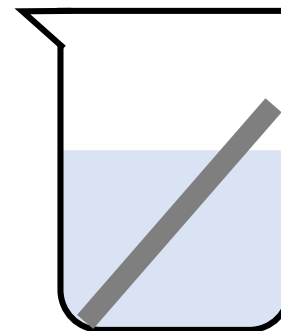
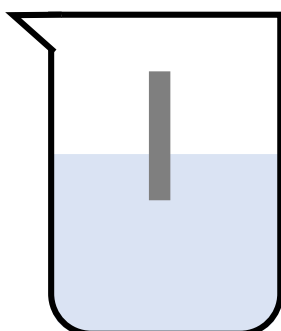
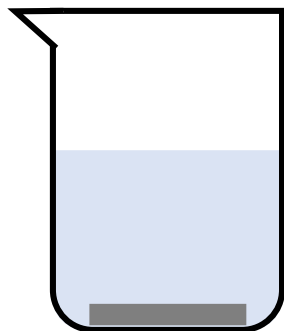
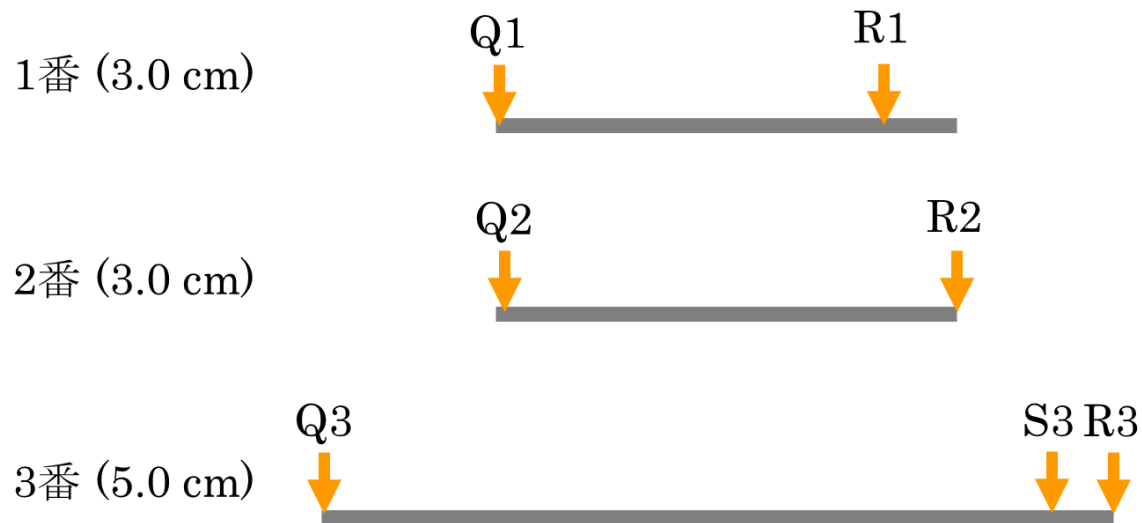
霧箱を自作し,トリタン棒を入れた.  
エタノール, 液体窒素を使用.





# トリタン棒の泡の発生場所

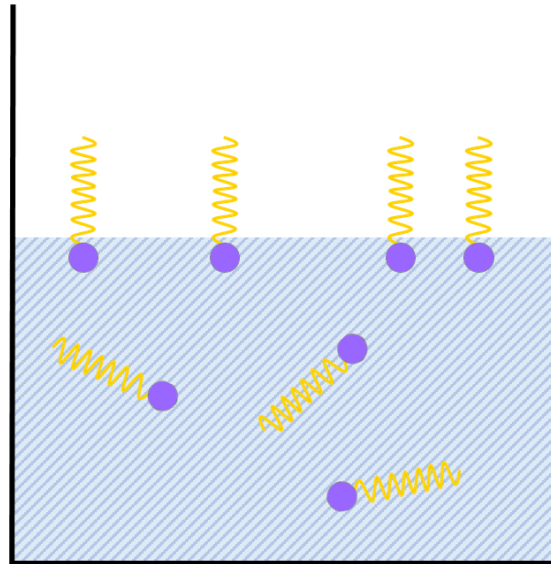
## 確認された沸騰の起点



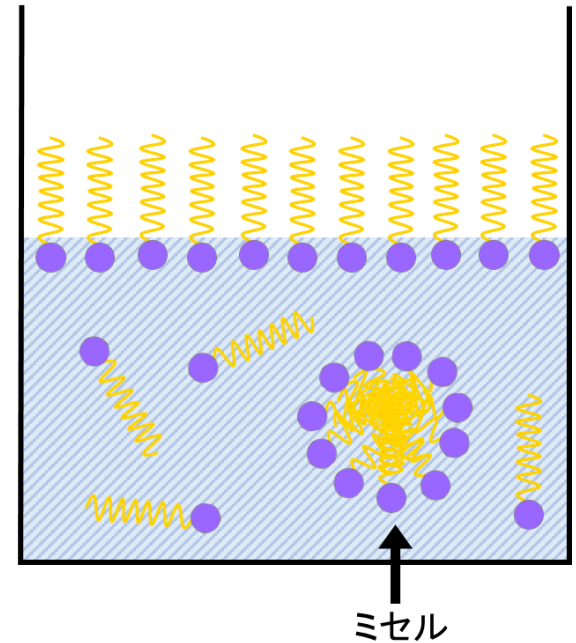
# 界面活性剤の働き



(a) CMC 以下



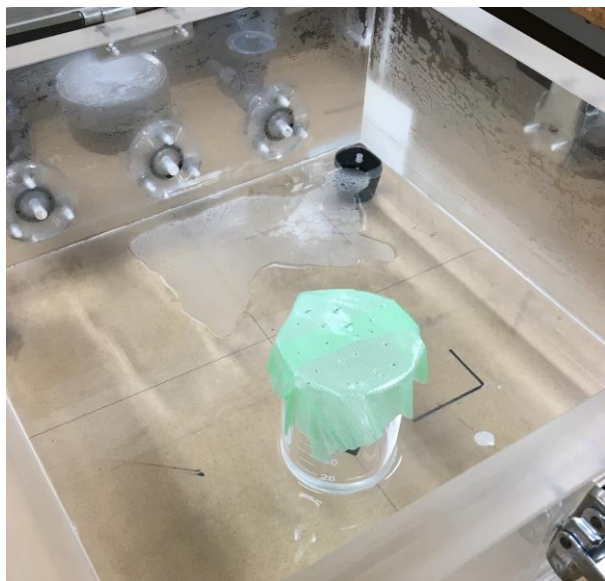
(b) CMC 以上



臨界ミセル濃度 (CMC) 以上に濃度を増やしても、  
表面張力は低下しない。

# 水溶液の失敗例

- (1) 脱泡後に食塩を多量加える → 減圧すると沸騰する
- (2) 脱泡前に洗剤を加える → 液体が残らない
- (3) 脱泡前に片栗粉を加える → 減圧すると沸騰する



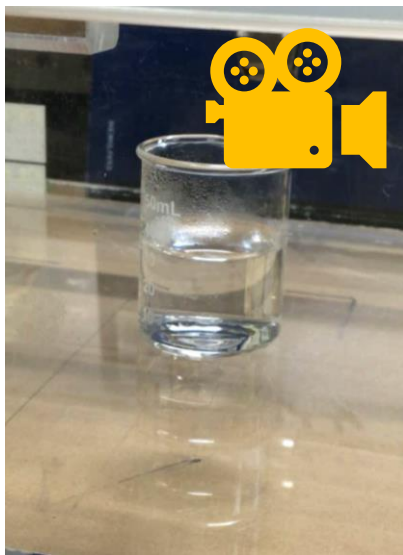
(2)



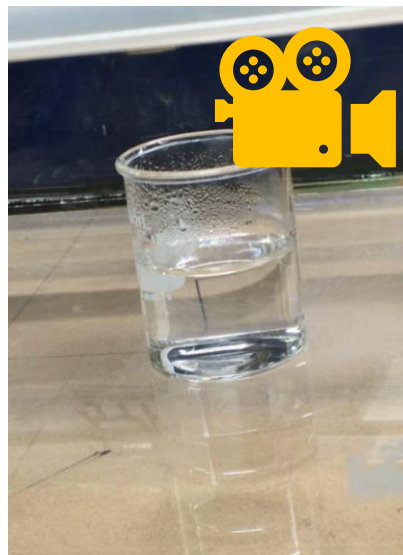
(3)

# 沸騰の激しさの見本

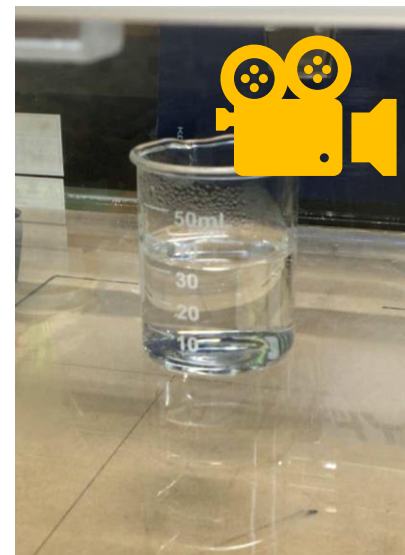
(すべて脱泡蒸留水, 65 °C)



↙  
A



↙  
B



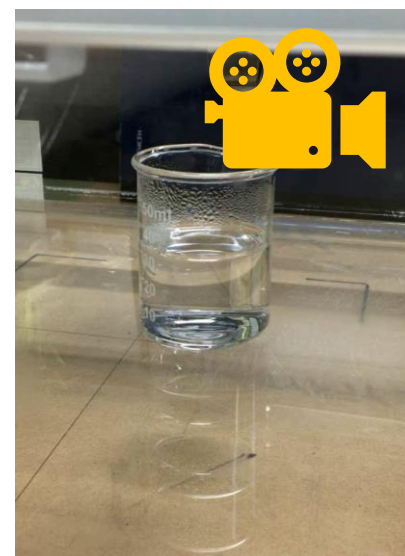
↙  
C



↙  
D



↙  
E



↙  
F

# 沸騰の激しさの見本画像

(すべて脱泡蒸留水, 65 °C)



↙  
A



↙  
B



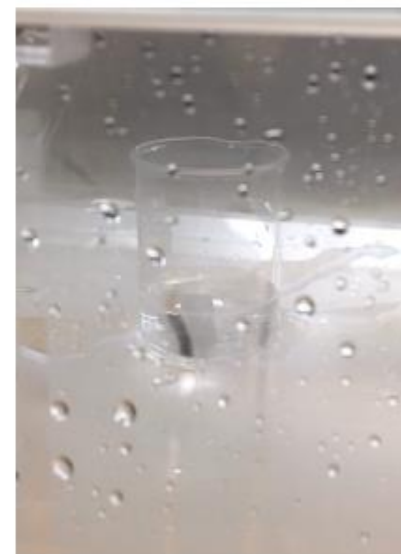
↙  
C



↙  
D



↙  
E



↙  
F

# 磁石投下実験

溶液 (約)30 mLを65 °Cに加熱し, 減圧する.

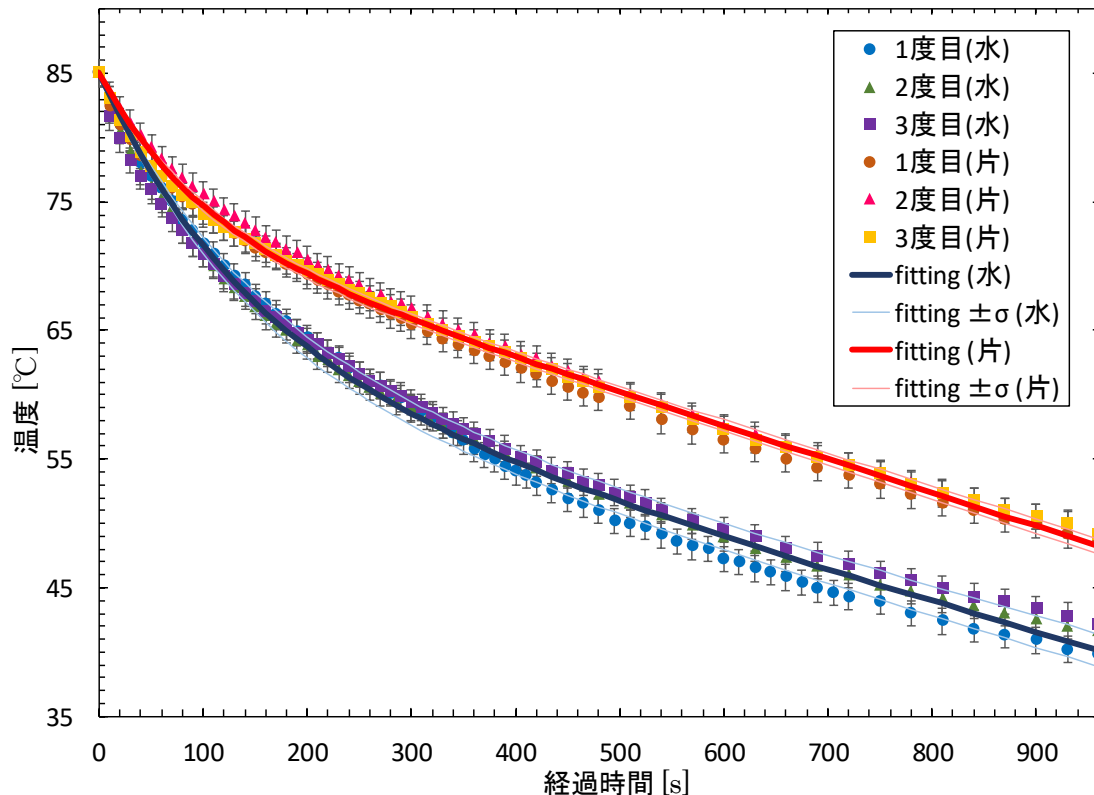
圧力 [MPaG]	経過時間 [分:秒]	水	食塩	洗剤 1 滴	洗剤 0.5 mL	片栗粉
-0.082	2:00	-	-	A	-	A
-0.083	2:07	-	-	B	A	B
-0.084	2:15	A	-	C	B	B
-0.085	2:23	A	-	D	D	C
-0.086	2:30	B	B	D	D	D
-0.087	2:37	C	C	D	D	D
-0.088	2:45	D	C	E	D	E
-0.089	2:52	D・E	D	F	E	E
-0.090	3:00	E	D	F	F	F
-0.091	3:10	E・F	E	-	-	-
-0.092	3:20	F	E	-	-	-
-0.093	3:30	-	E	-	-	-

(- は測定せず)



# 水温の時間変化 (高温)

液体を85 °Cに加熱, 常圧で放置. 10 秒~30 秒おきに温度を記録.  
液体 …… 水道水30 mL 又は 蒸留水30 mL + 片栗粉0.24 g



フィッティング:  $T(\text{常圧}) [^{\circ}\text{C}] = a'(e^{-b' \cdot t [\text{s}]} - 1) + 85 - c' \cdot t [\text{s}]$

水道水  $a' = 22.14 \pm 0.54$  ,  $b' = 0.00690 \pm 0.00026$  ,  $c' = 0.0237 \pm 0.0007$

片栗粉  $a' = 11.80 \pm 0.22$  ,  $b' = 0.00106 \pm 0.00043$  ,  $c' = 0.0260 \pm 0.0004$



# シンチレーター的位置

