

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索実験のための  
CsIカロリメータ読み出しPMT baseの開発

---

---

★★★★

★★★★

京都大学大学院理学研究科  
物理第二教室

高エネルギー研究室

**増田 孝彦** 河崎 直樹 臼杵 亨 塩見 公志

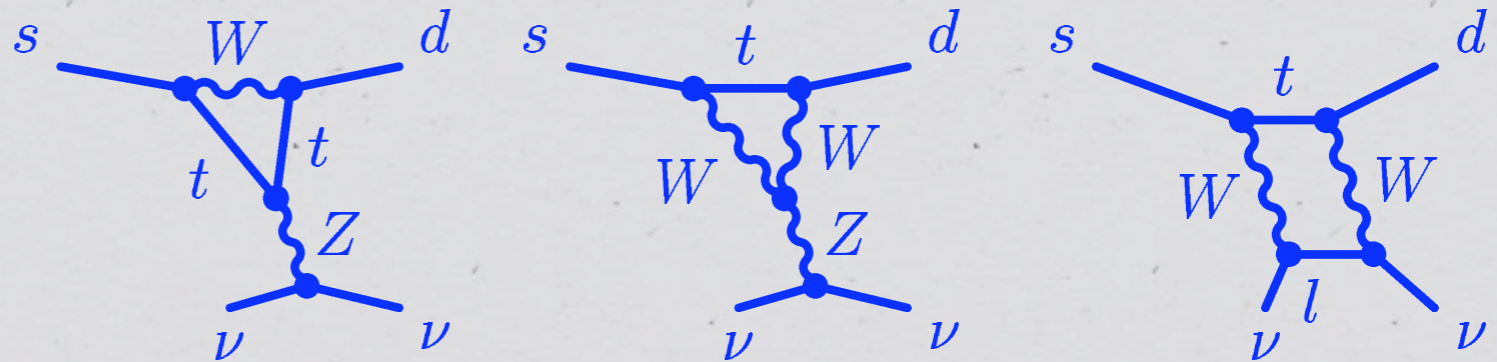
森井 秀樹 隅田 土詞 南條 創 野村 正 笹尾 登

*The Physical Society of Japan the 63rd Annual Meeting*



# $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験

✓  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の物理



- $\eta$  の精密測定
- 崩壊振幅

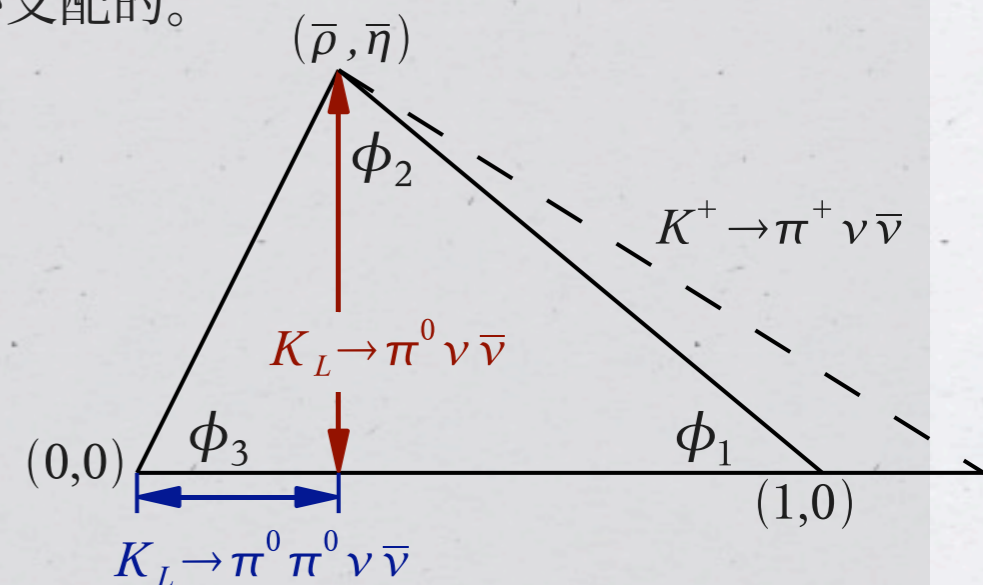
$$\text{▶ } A(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \cong \frac{1}{\sqrt{2}} [A(K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) - A(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})]$$

$$\propto V_{td}^* V^{ts} - V_{ts}^* V_{td} \propto 2i\eta$$

- ▶ この崩壊モードは  $\eta$  以外のパラメータが持つ不定性がきわめて小さく (1-2%)、 $\eta$  の精密測定が可能。また Beyond SM の効果も見やすい。
- ▶ 間接的 CP の破れに対して、直接的 CP の破れの効果が支配的。

- 崩壊分岐比

- ▶  $(2.8 \pm 0.4) \times 10^{-11}$  (SM からの予言)



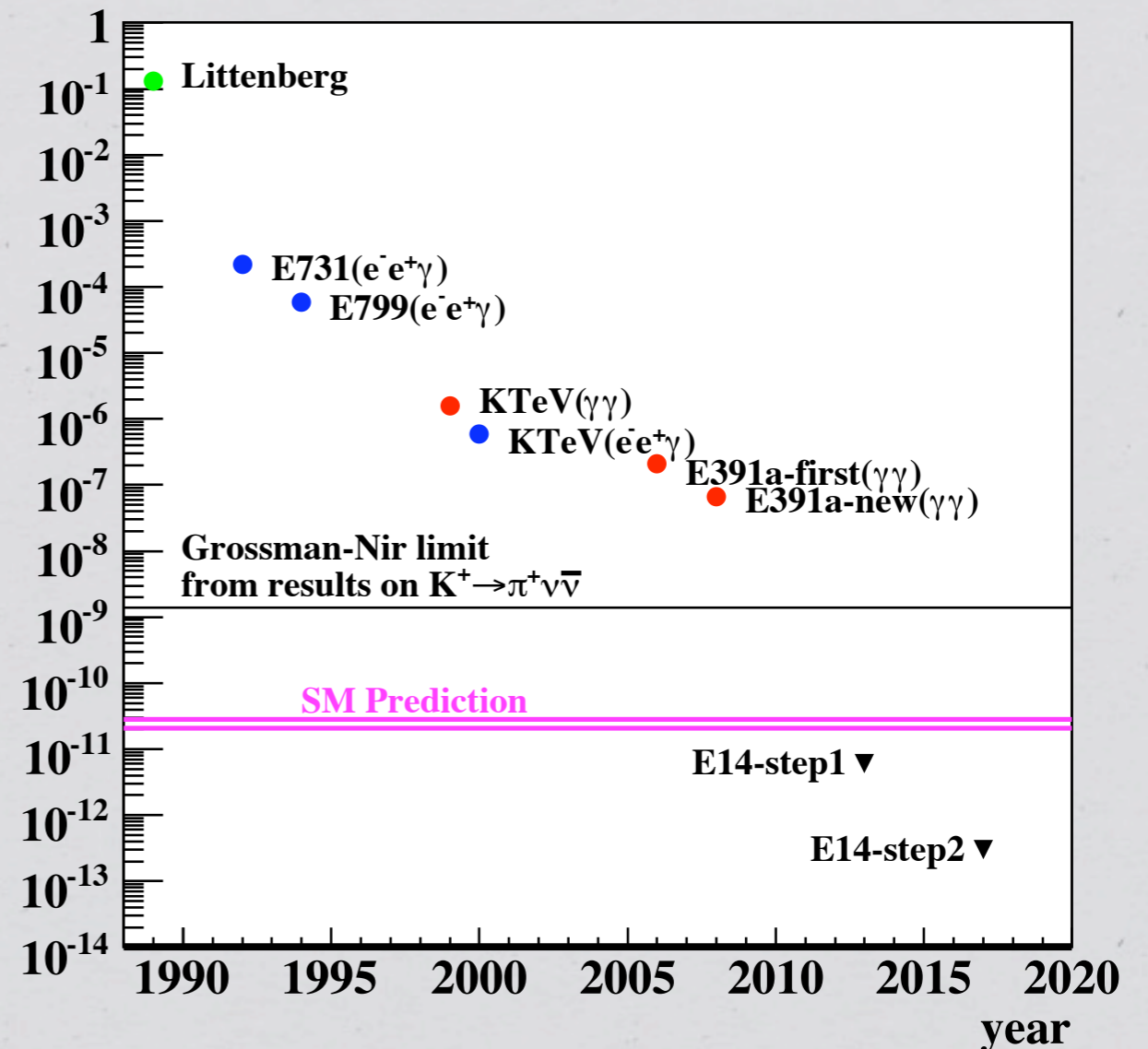
# step by step approach

## ✓ E391a (KEK PS)

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索に特化した初の実験
- 実験手法の確立
- 2004年2月～2005年12月までData taking

## ✓ E14 (J-PARC)

- Step 1
  - ▶ SES  $8 \times 10^{-12}$
  - ▶ 世界初の崩壊event観測を目標
- Step 2
  - ▶ 100event程度の観測
  - ▶  $\eta$  の精密測定





# シグナルの同定

✓ ニュートリノは検出できないので、 $\pi^0$ からの崩壊粒子を見る

-  $\pi^0$ の崩壊モード

- ▶  $\pi^0 \rightarrow e^+e^- \gamma$  (Br 1.2%) 荷電粒子のtrackingによる $\pi^0$ の再構成が可能
- ▶  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  (Br 98.8%) 分岐比が大きい

-  $\pi^0$ からの $2\gamma$

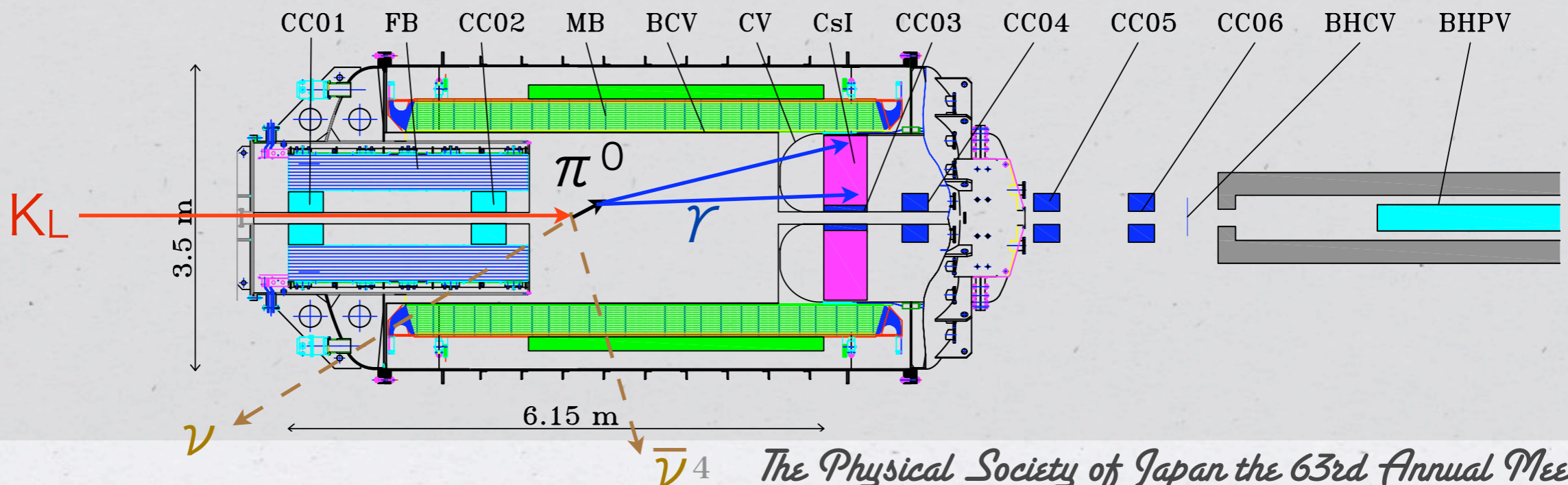
- ▶ CsIカロリメータで $\gamma$ の位置、エネルギーを求め $\pi^0$ を再構成

-  $K_L$ と $\pi^0$ の運動方向のずれ(ニュートリノによる運動量移項の存在)

- ▶ ペンシルビームを用い、 $K_L$ の $p_t$ を0とする

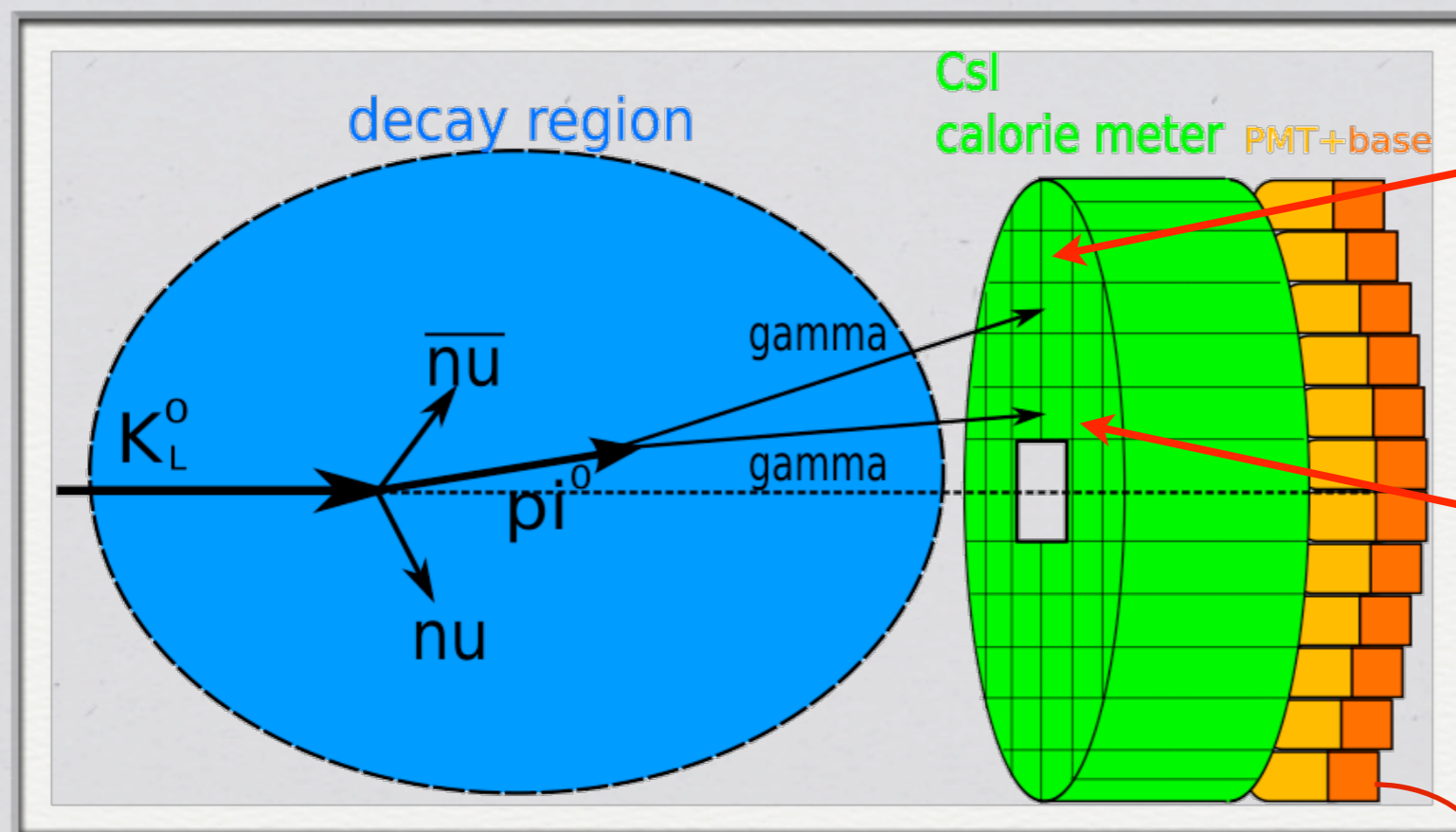
- その他に何も粒子が無い

- ▶ 崩壊領域を $4\pi$ 囲むveto検出器を設置



# E14 CsI calorimeter

E14実験ではCsI main Calorimeterに、3000本のKTeV pure CsIを再利用する  
同時に読み出し用光検出器にもKTeV PMTを用いる



外周部

CsI  $5 \times 5 \times 50 \text{cm}^3$

PMT  $\phi 34 \text{mm}$

beam hole 周辺部

CsI  $2.5 \times 2.5 \times 50 \text{cm}^3$

PMT  $\phi 15 \text{mm}$

gaussian filter  
&

125MHz flash ADC

KTeV . . . 以前にFermilabで行われたKaon rare decay探索実験



# 問題点

## ✓ 発熱

- E14はPMTを真空中に設置する
- PMT数がE391aに比べて2.3倍(1300本→3000本)
  - ▶ 真空中で約3kWの発熱があり、冷却が大変

## ✓ スペース

- HVケーブルを3000本真空中に引き込まなければならない
- 冷却用の配管
- PMT固定

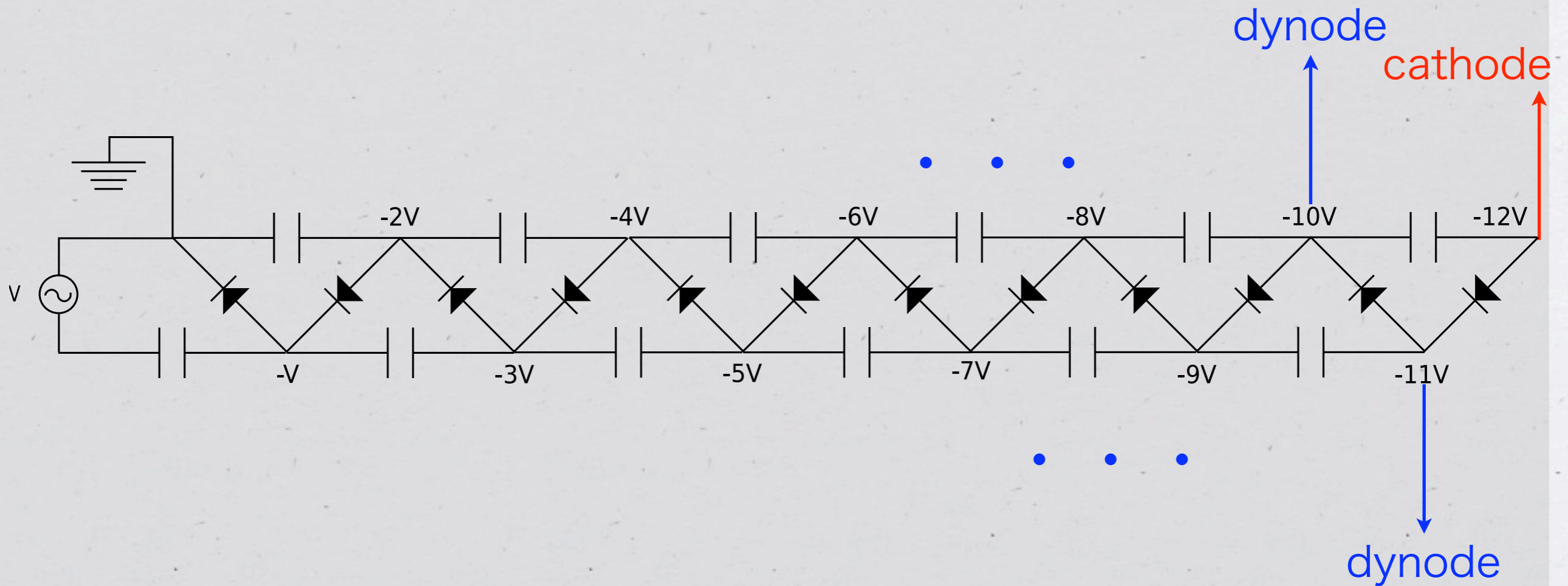
## ✓ 光電子増倍率

- KTeV PMT + KTeV base(抵抗分割型)でのgainはtyp.6000
  - ▶ 目標30000

➡ Cockcroft Walton base (以下CW base)の使用を検討  
また、電圧分割比を変更してgain増加

# CW circuit

- ✓ Diode & Capacitorのブリッジで昇圧する回路
- ✓ 交流から高圧を発生





# CW baseのメリット・デメリット

## ✓ merit

- 発熱(消費電力)が小さい
  - ▶ 冷却が容易
- low voltage (5V) 供給でケーブルリングが楽
  - ▶ 真空へのフィードスルーが少ない
  - ▶ コントロール電圧で各PMTのHV値を真空内部で多チャンネル供給&調整可能

## ✓ demerit

- 昇圧がACなのでNoiseの源になる
- 電圧分割比が整数のみ
  - ▶ 細かいtuningが出来ない



# CW base prototype

✓ 松定プレシジョン製

HPMC-1.8N-01

- 分割比 K 2:1:1:1:1:1:0.5 A
- 最大定格出力 -1800V
- ドライブ電圧  $V_{in} +5V(\text{fixed})$
- 発振周波数 145kHz
- 出力制御  
コントロール電圧  $V_{con}=0\sim 1.8V$

✓ 今回はこのCW baseについて  
測定した各種データを発表する

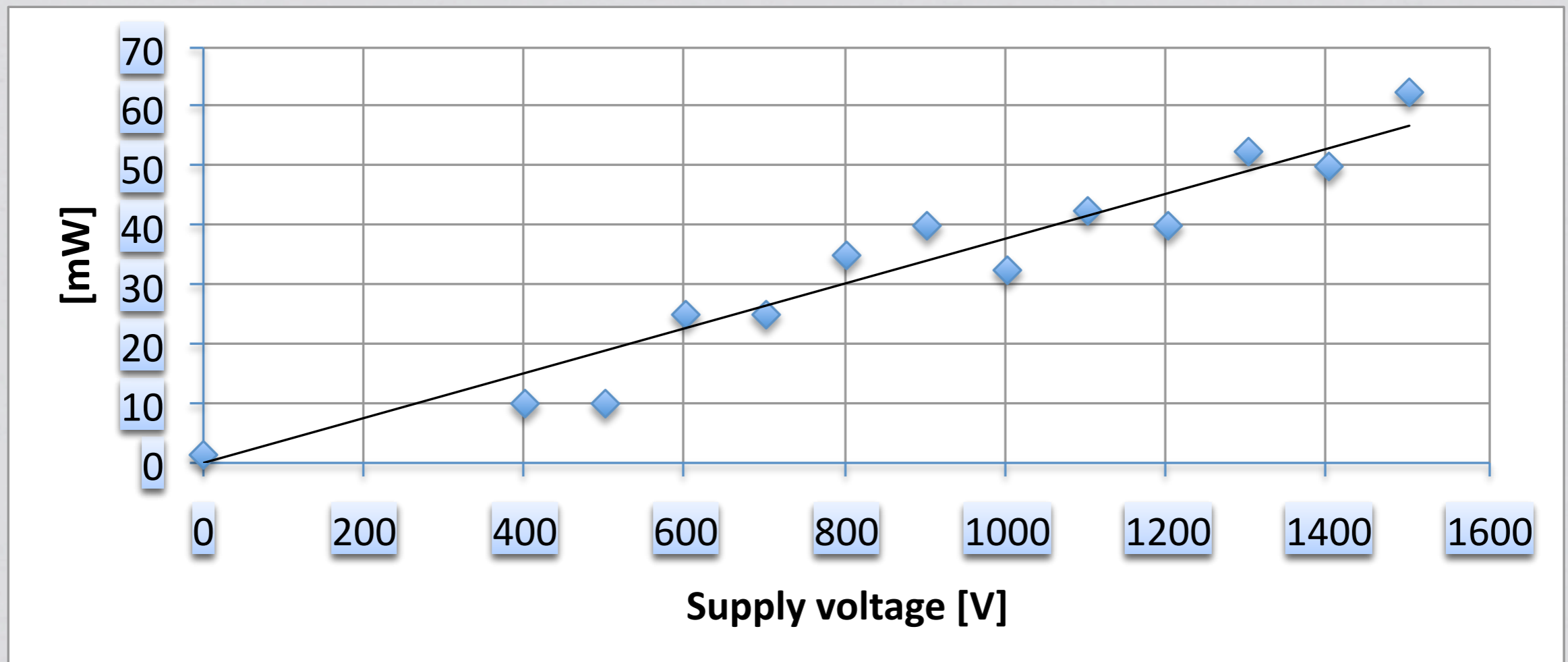




# 消費電力

- ✓ Drive voltage  $V_{in}(5V)$  ---  $12.5 \pm 2mA$  --- **50~70mW@1500V**
- ✓ Control voltage  $V_{con}(1.5V)$  ---  $150 \mu A$  ---  $225 \mu W$  (negligible)
  - KTeV resistor-divided base 738mW@1500V

✓ **1/10**に減少する事ができた



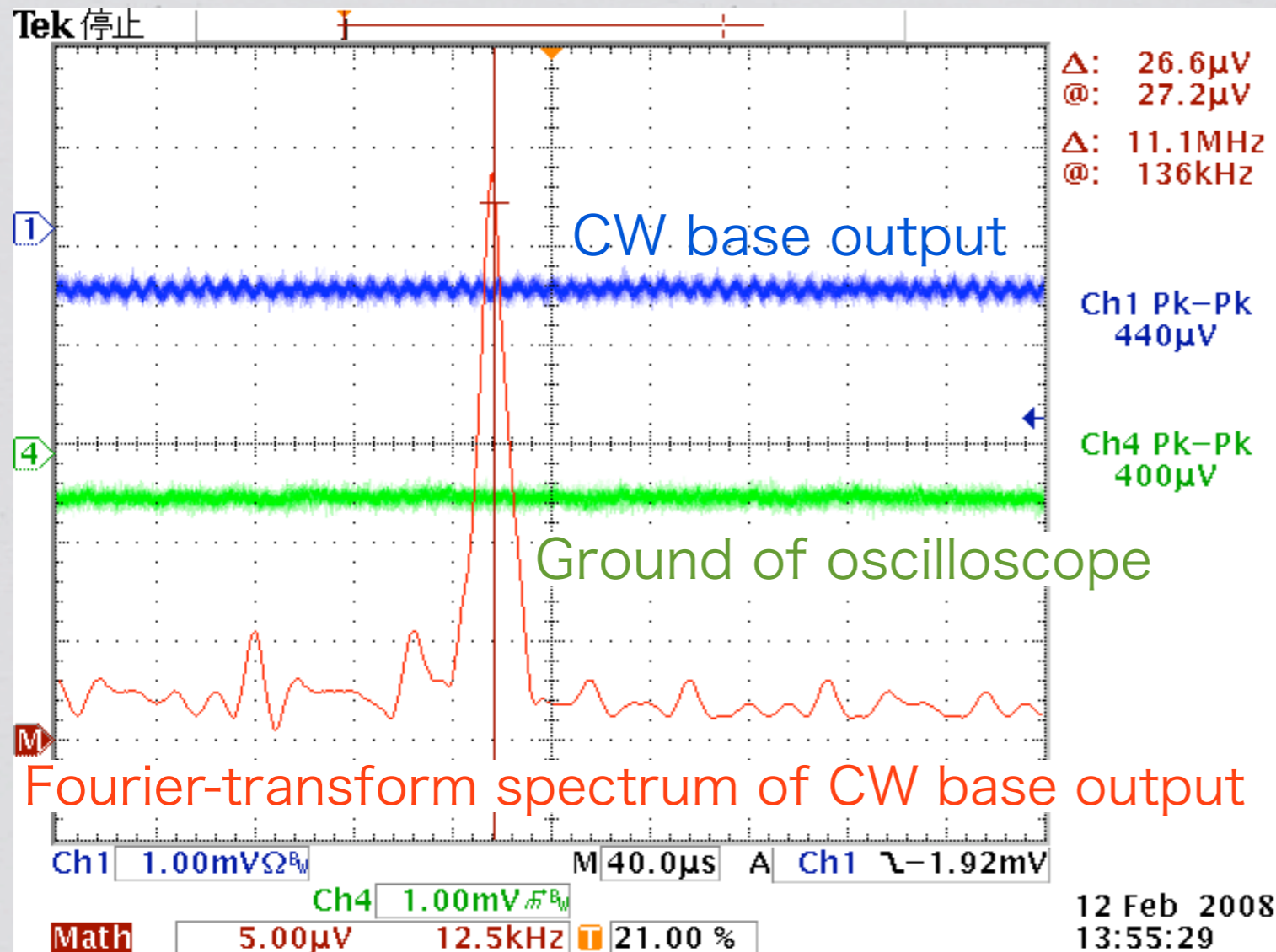


# Ripple noise

✓ CW circuit の発振によって発生。

◇ ✓ 無視できるレベルにおさまっていた。

TDS 3034B 12 Feb 2008 13:55:29

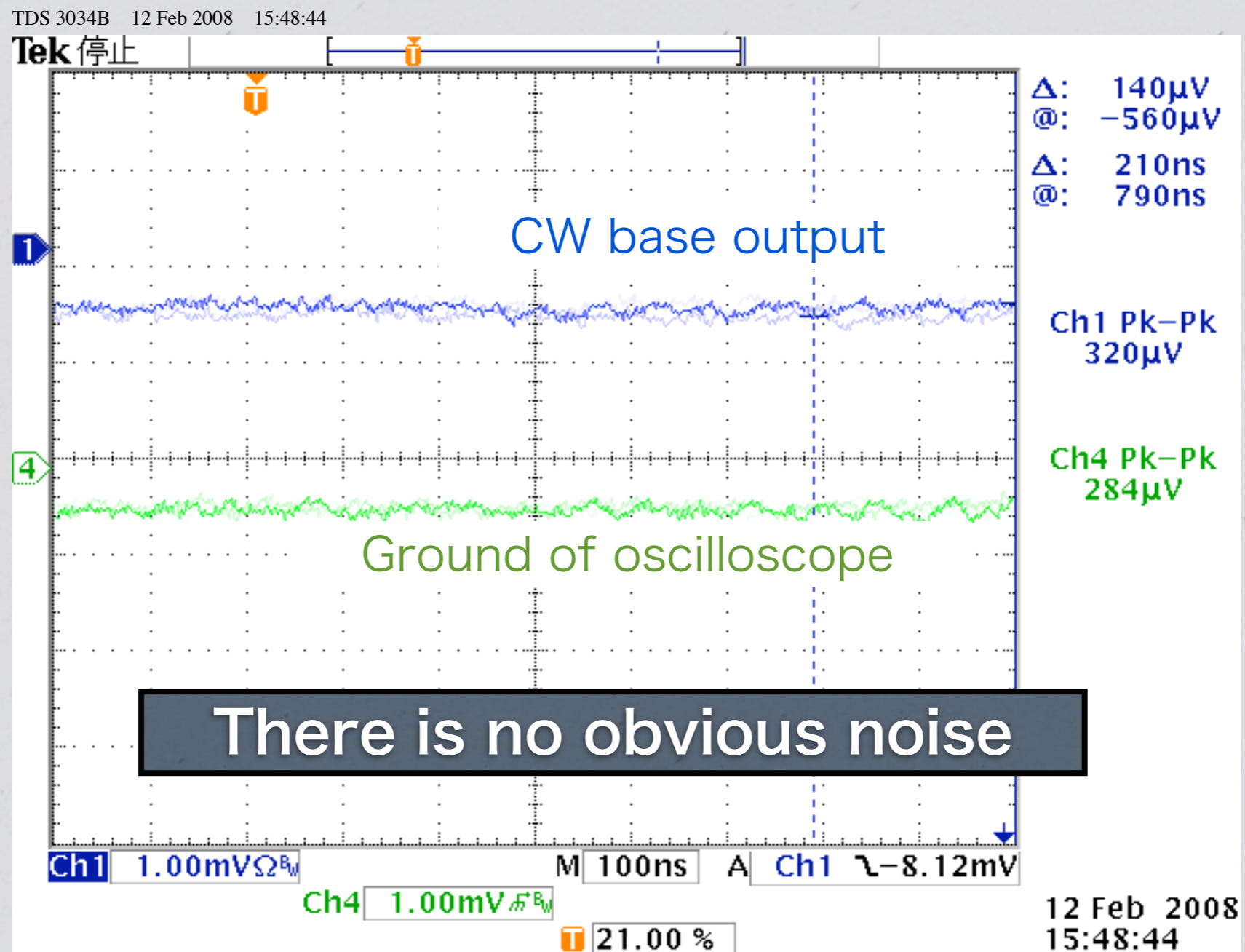


HV	$\mu V_{p-p}$	kHz
1000	10-20	130
1250	15-25	130
1500	20-30	135
1750	35-40	138

Ripple noise height & frequency vs. HV

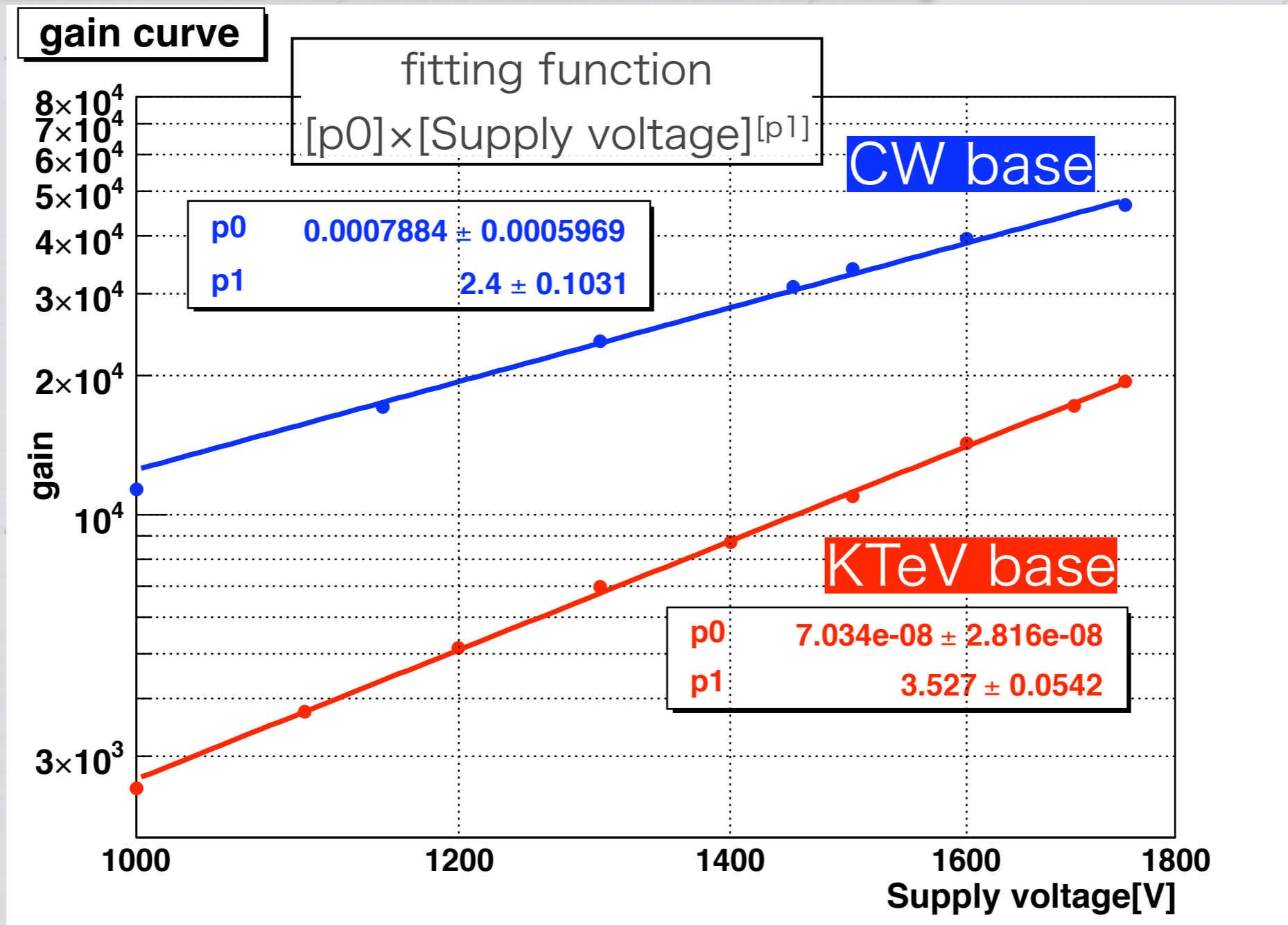
# noise

✓ Ripple noise以外には、明らかなノイズは見られなかった。





# Gain curve



✓ 電圧分割比を変更する事により、  
十分な光電子増幅率が得られた ( over 30000 (1MeV→1mV signal))

# Rate effect

✓ Dynamic range (Geant4 sim)

deposit energy per crystal [MeV]	rate [kHz]
0-1	87
1-10	42
10-100	16
100-1000	2.4
1000-	0.003

1 MeV Threshold

60kHz

Then I measured

~600kHz@100MeV(2000p.e.)

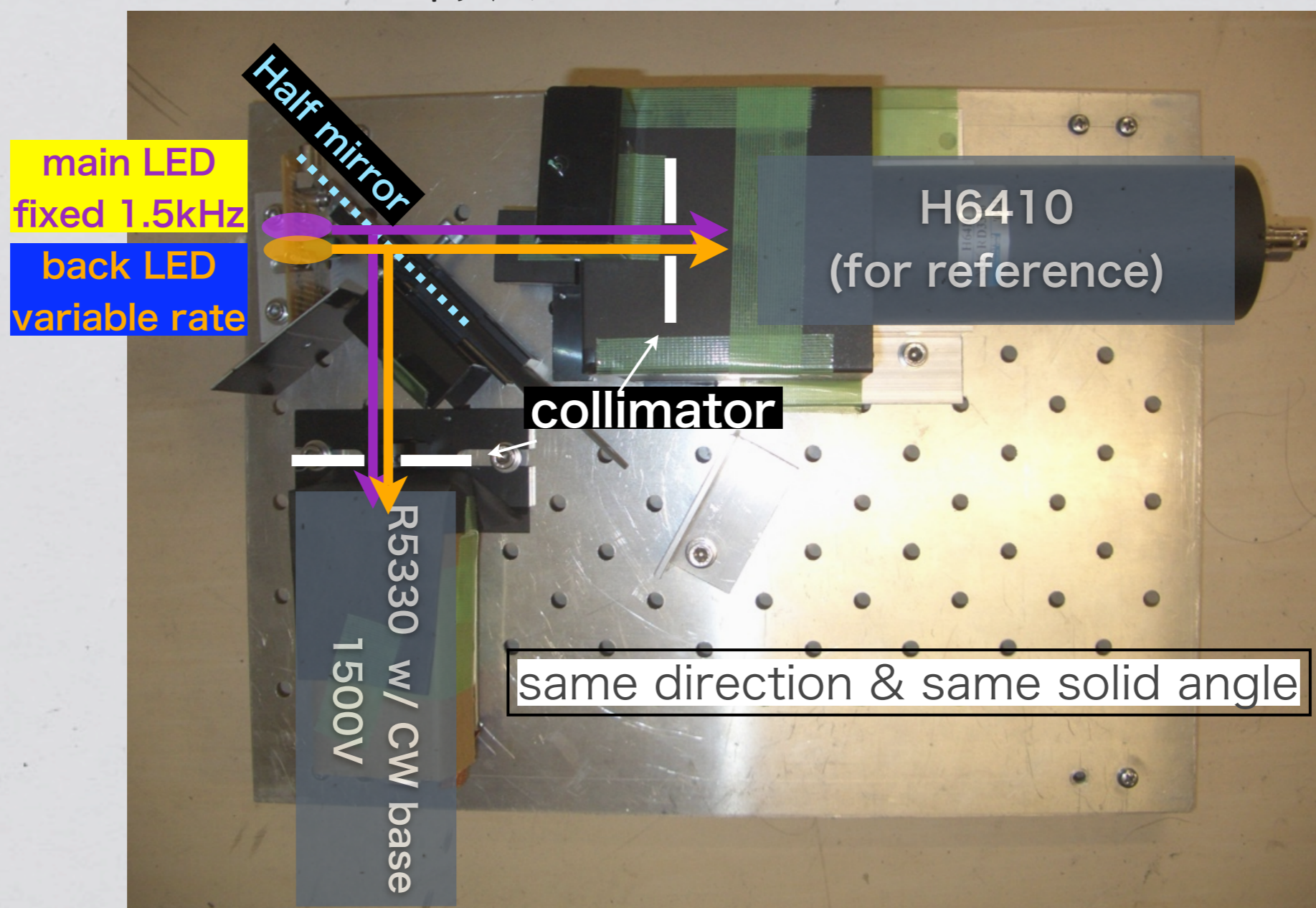
~24kHz@1GeV(20000p.e.)

(safety factor  $\times 10$ )



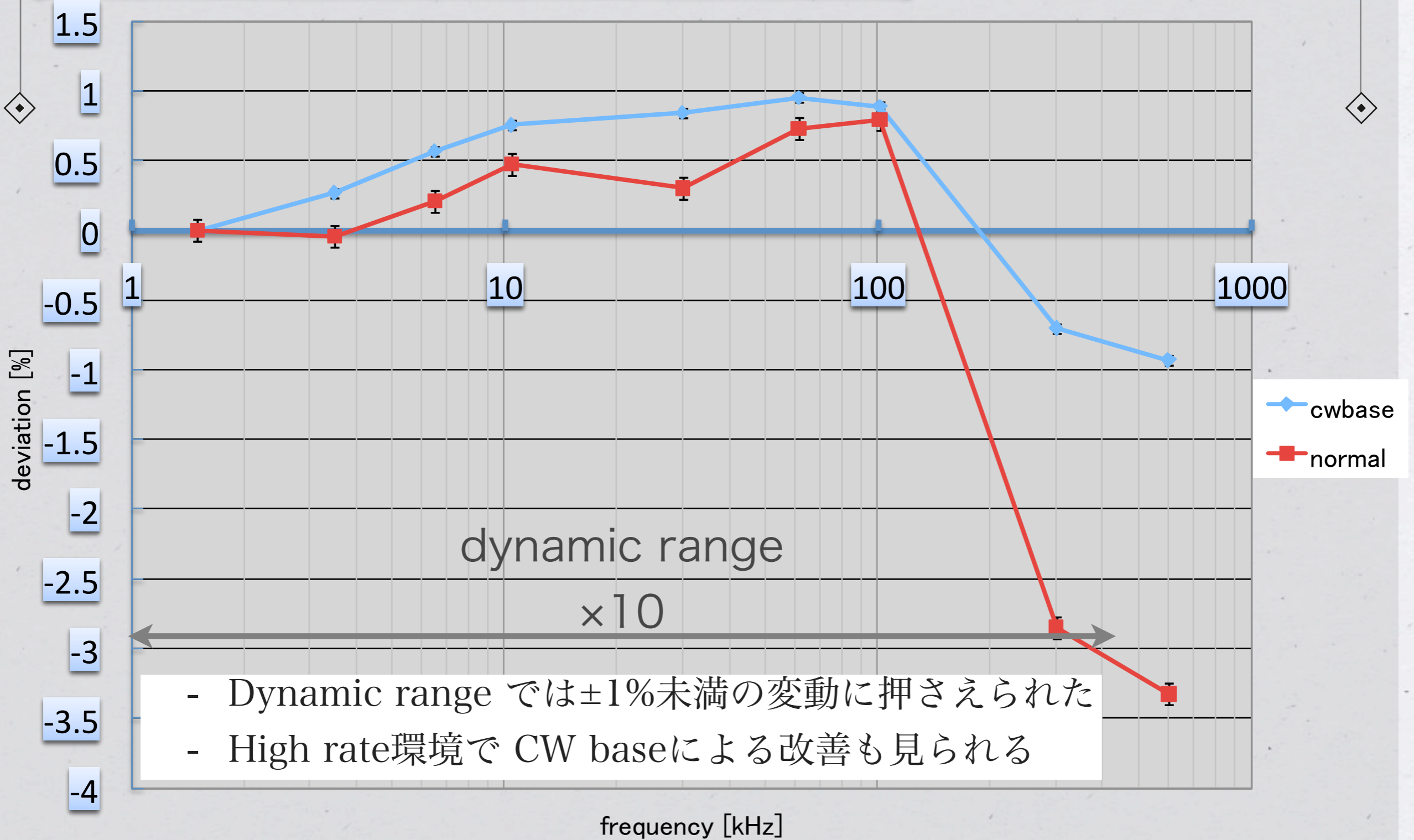
# Rate effect set up

- ✓ バックグラウンド用LEDを使用
- ◇ ✓ ADCでmain LEDが光っている時のみを測定し、LEDのrate effectを除去



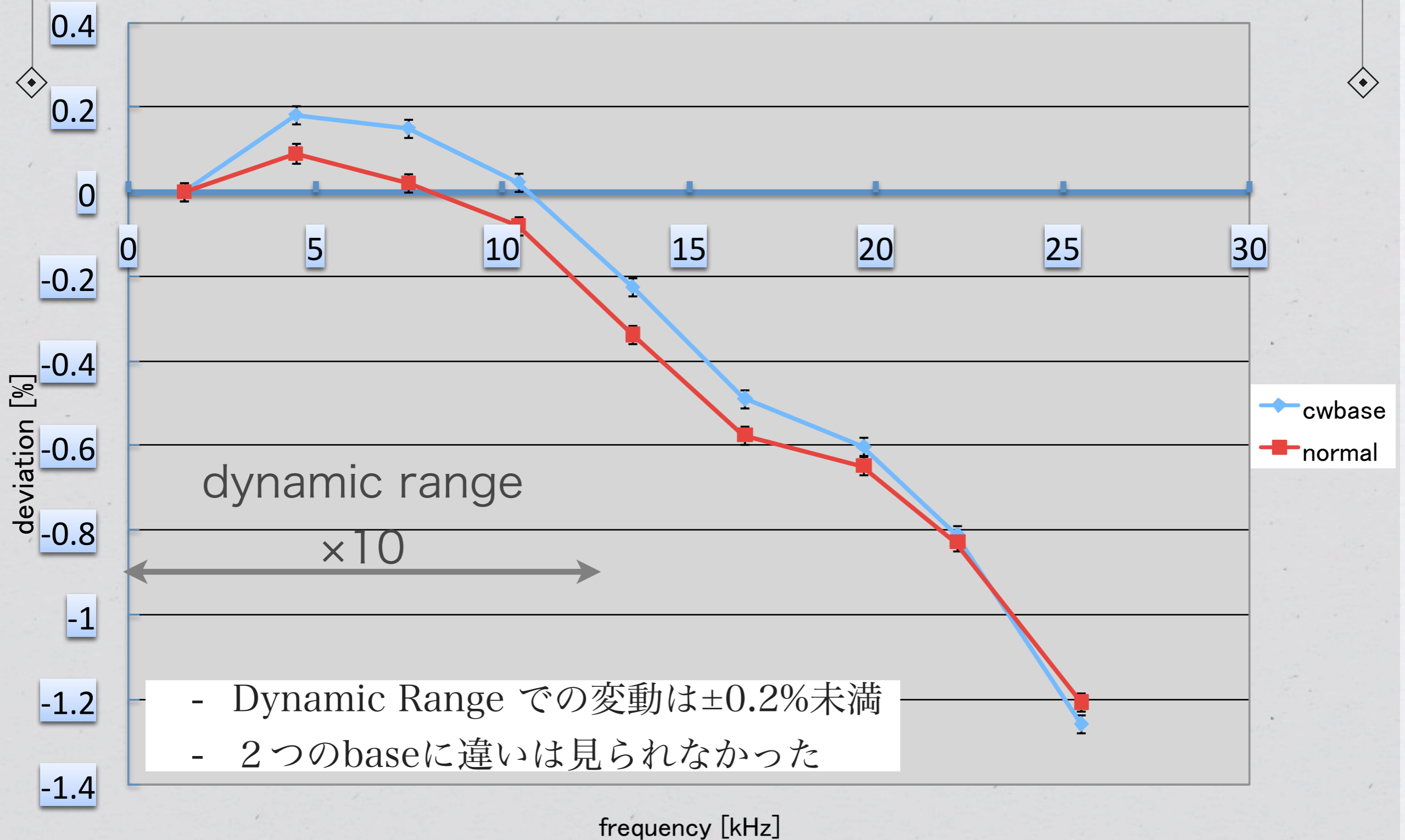


# 100MeV(2000p.e.)





# 1 GeV(20000p.e.)

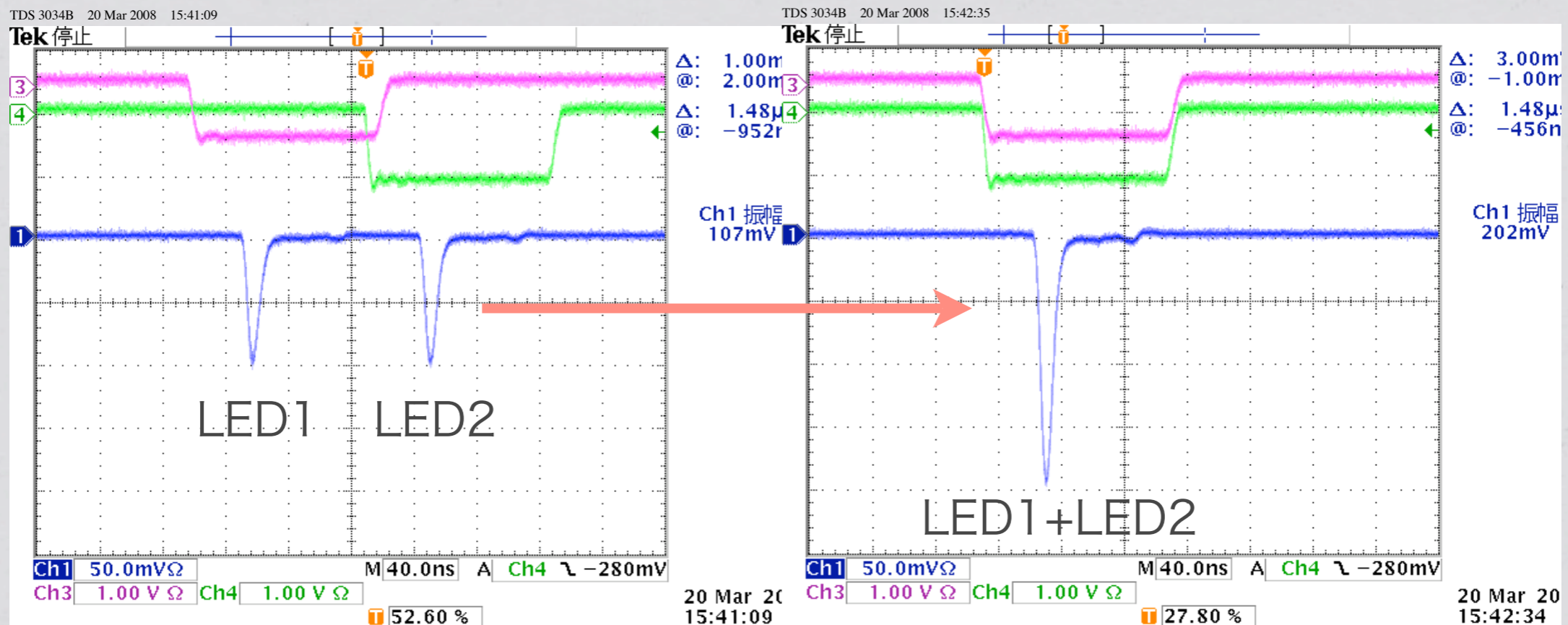


# Linearity

## ✓ The measurement method

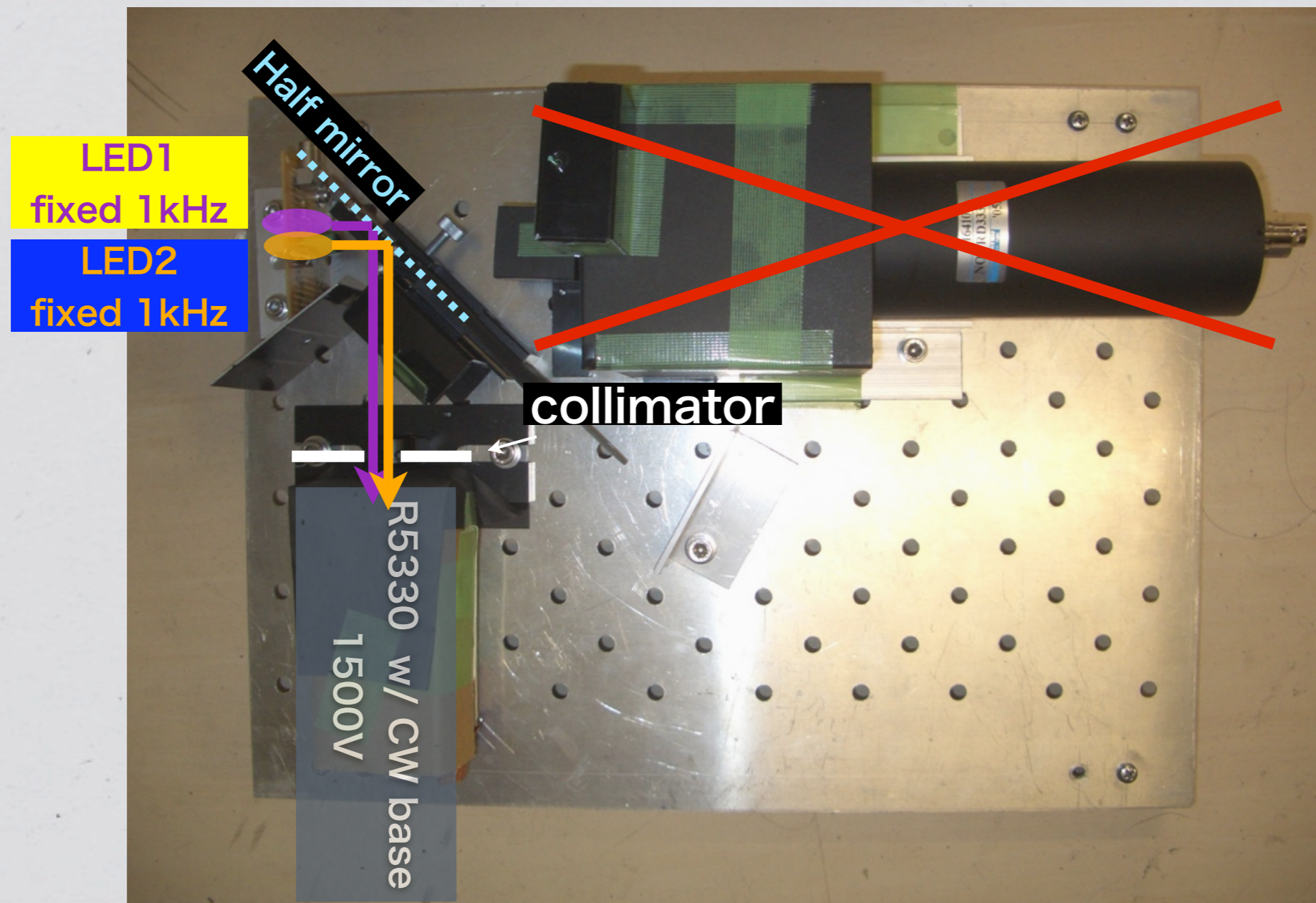
- 2つのLEDを別々に光らせた時(下左図)のADCデータの合成と、同時に光らせた時(下右図)のADCデータの比をLinearityと定義した。
  - ▶ Linearityが完璧な場合は、Rが精確に1になる。

$$R \equiv \frac{\text{ADC}(\text{LED1} + \text{LED2})}{\text{ADC}(\text{LED1}) + \text{ADC}(\text{LED2})}$$





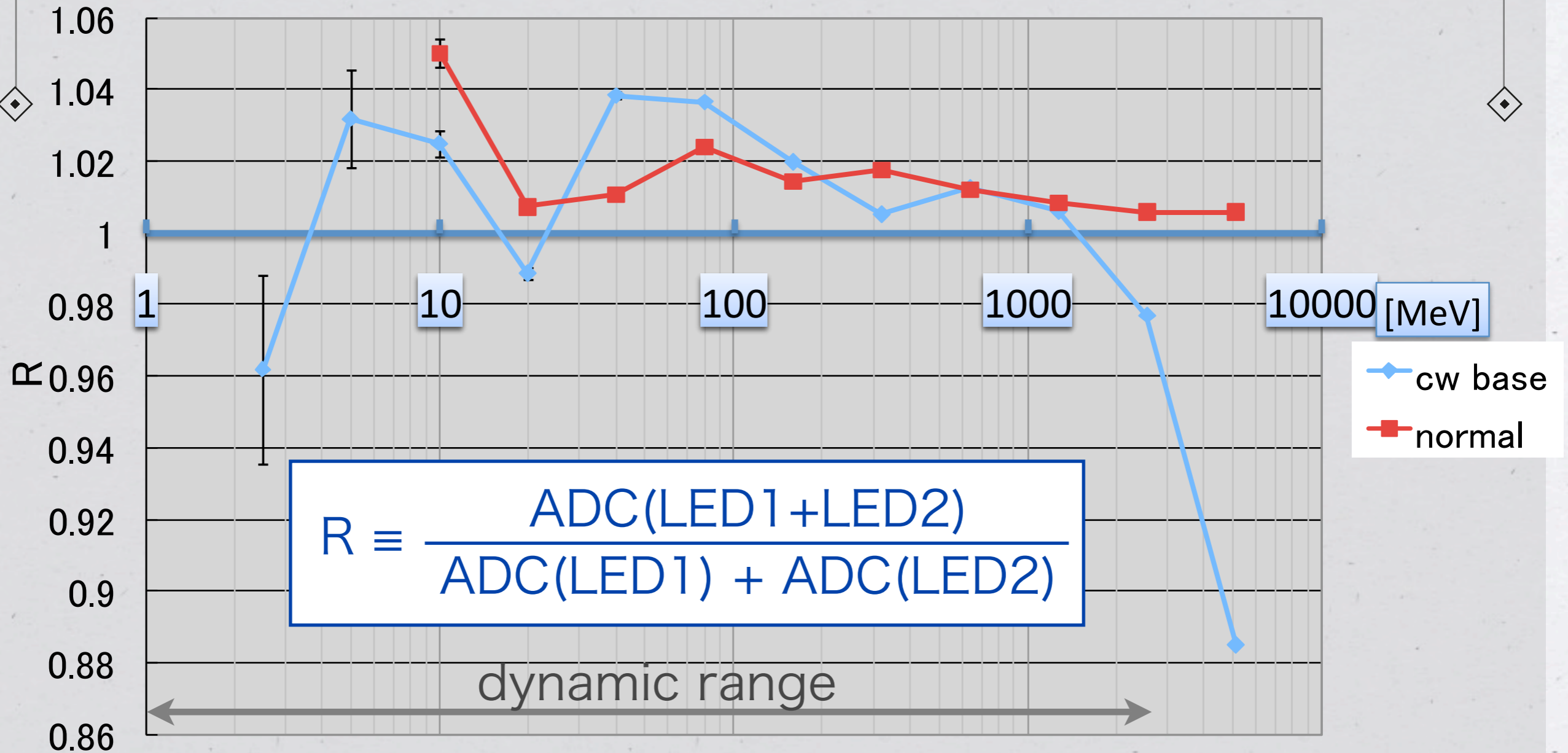
# Linearity set up





# Linearity result

Linearity



- ✓ Dynamic range で±4%の変動が見られる
- ✓ CW base prototypeでは2GeV以上で悪化した



# summary

## ✓ CW base prototypeの基本特性の測定を行った

- 消費電力 → 抵抗分割型の1/10まで減少
- rate effectは問題なし → < 1%
- PMT gain 目標達成 30000

## ✓ 今回のPrototypeの問題点

- linearityの悪化
  - ▶ linearityの許容値を知る必要あり

## ✓ 今後の予定

- HV control システムの確立
- 来年度末に行われるビームテストに向けて量産(100本)