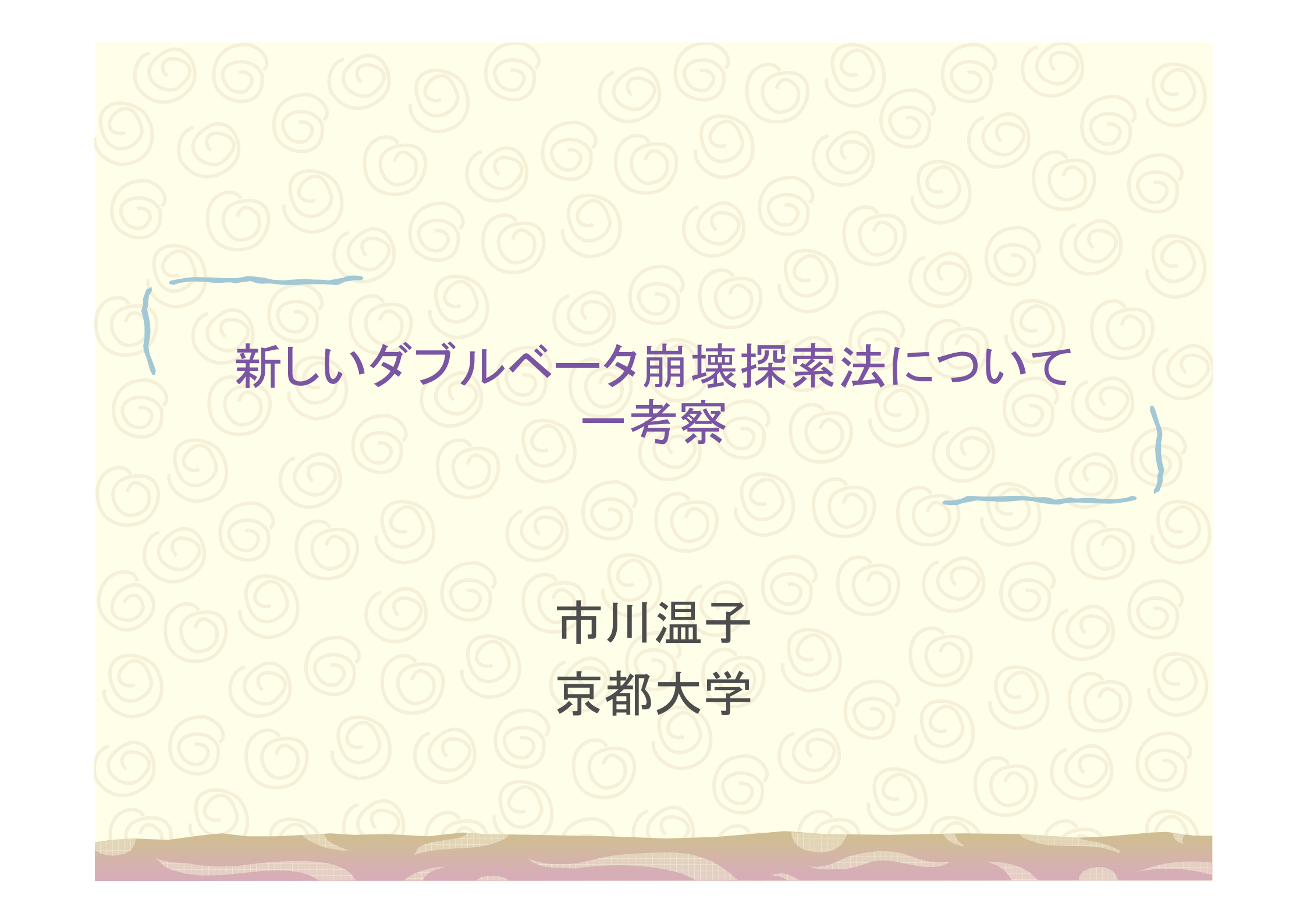




新しいダブルベータ崩壊探索法について 一考察

市川温子
京都大学

$0\nu\beta\beta$ 崩壊

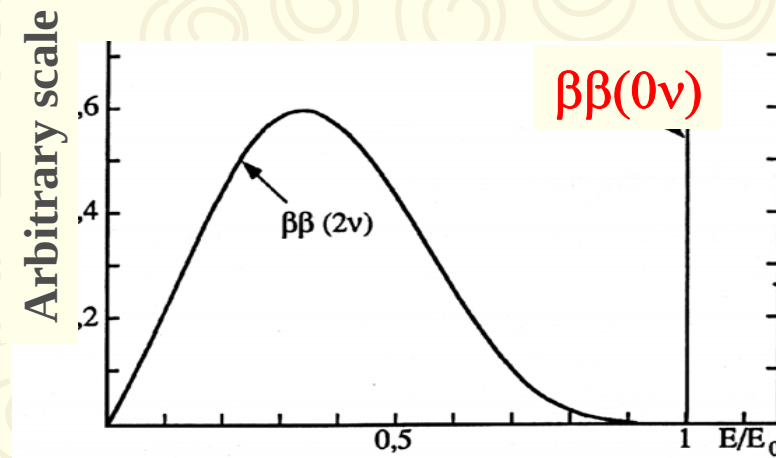
$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad (2\nu\beta\beta \text{ - decay})$$

can happen when $m(Z, A) > m(Z+2, A)$ and $m(Z, A) < m(Z+1, A)$

$$(Z, A) \rightarrow (Z + 2, A) + 2e^- \quad (0\nu\beta\beta \text{ - decay})$$

violating lepton number conservation

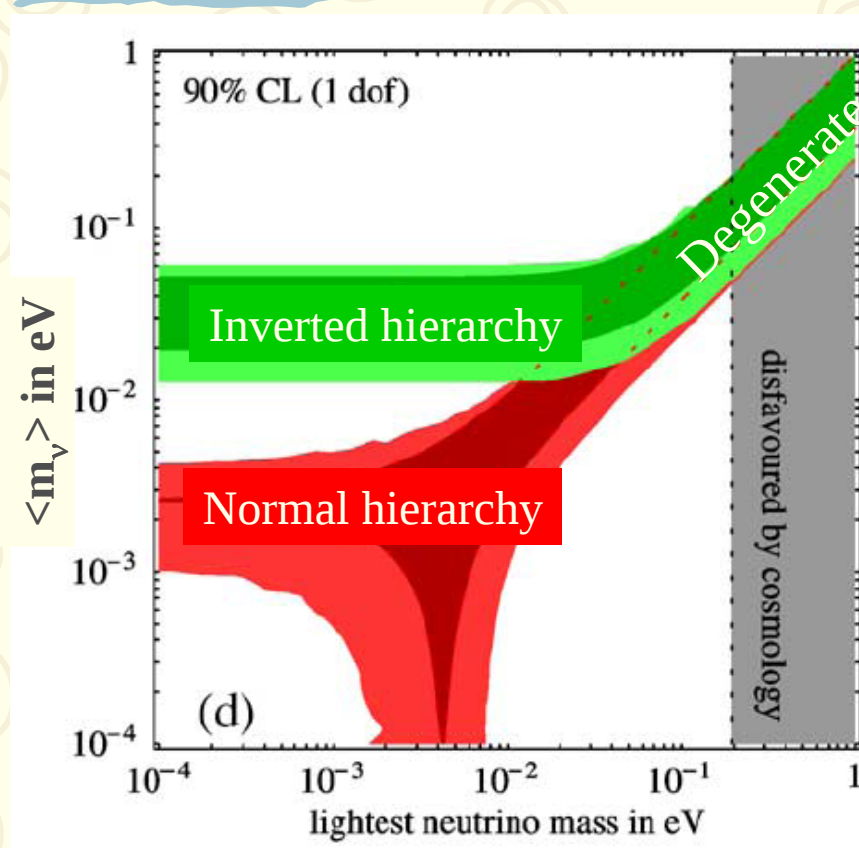
Require neutrino to be Majorana($\text{anti-}\nu_R = \nu_L$) and to have masses.



Electron energy sum $Q_{\beta\beta}$

Effective neutrino mass and neutrino oscillations

$$|\langle m_\nu \rangle| = |\sum U_{e_i}^2 m_i| = |\cos^2 \theta_{13} (m_1 \cos^2 \theta_{12} + m_2 e^{2i\alpha} \sin^2 \theta_{12}) + m_3 e^{2i\beta} \sin^2 \theta_{13}|$$



Degenerate: can be tested

Inverted hierarchy: tested by the next generation of $\beta\beta$ experiment

Normal hierarchy: inaccessible

* 借りてきたトラペ

World record for life time upper limit

Heidelberg/Moscow ^{76}Ge experiment

5 HP-Ge crystals, enriched to 87% in ^{76}Ge ~11kg

total statistics 71.7kg x y

controversial result

claim for evidence v.s. refute by collaborators.

$$\tau_{1/2}^{0\nu} = 1.2 \times 10^{25} \text{ years}$$

$$\langle m_{\nu} \rangle = 0.44 \text{ eV}$$

Next generation $0\nu\beta\beta$ experiments

toward $\sim 0.01\text{eV}$ on $\langle m_\nu \rangle$



^{76}Ge diode

Mojarana, GERDA

- more mass several x 100kg
- segmented electrode to suppress background



Bolemeters

- CUORE (^{130}Te)
- Edelweiss (^{76}Ge)
- MOON (^{100}Mo)



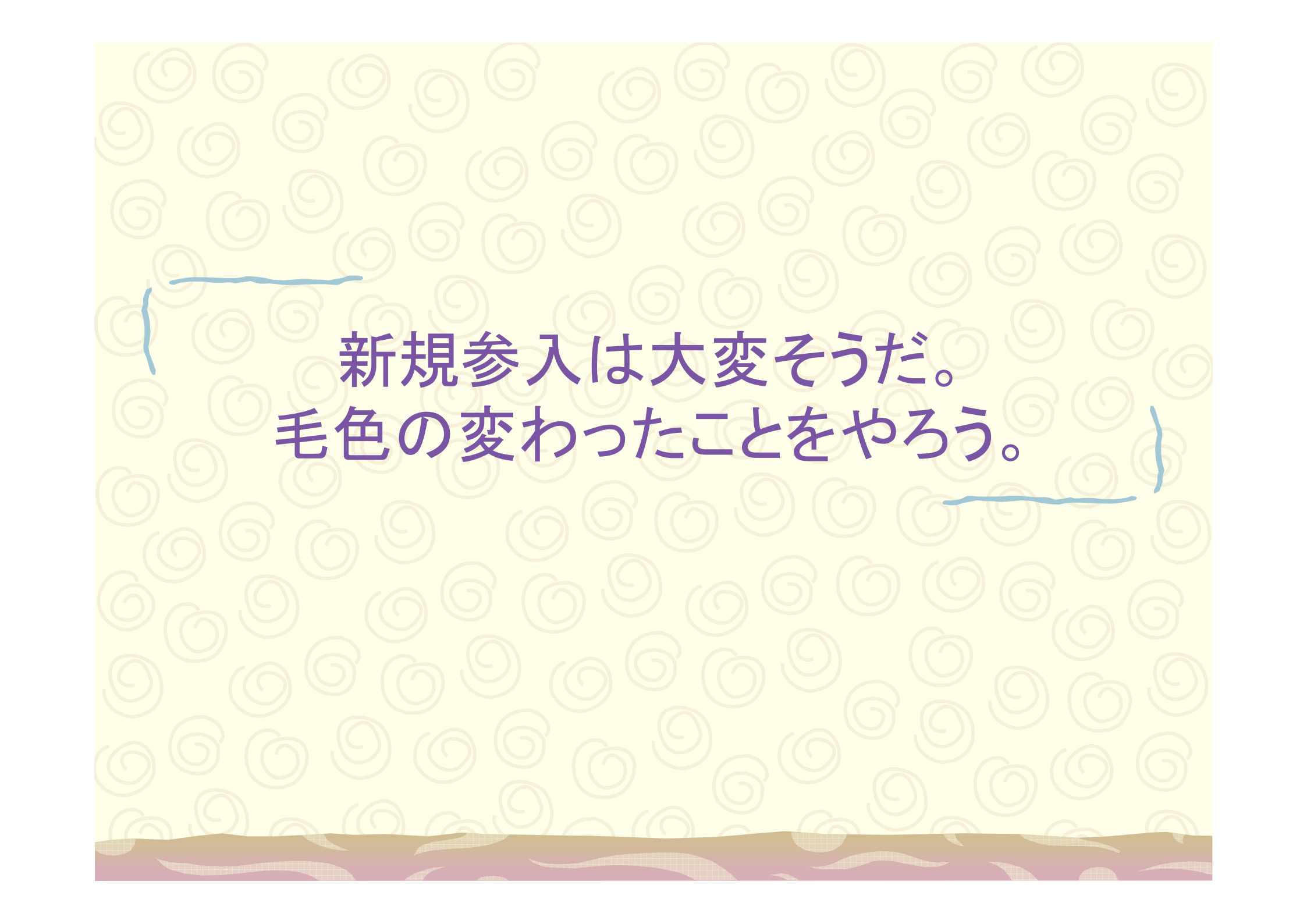
Scintillators

- CANDLES (^{48}Ca)
- XMASS (^{136}Xe)



Tracking detectors

- MOON (^{100}Mo)
- DCBA (^{82}Se , ^{150}Nd)
- SuperNEMO (^{82}Se)



新規参入は大変そうだ。
毛色の変ったことをやろう。

$\beta^+\beta^+$, $EC\beta^+$, $ECEC$ mode

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A) + 2e^+ (+2\nu_e) \quad (\beta^+\beta^+)$$

$$e_B^- + (Z, A) \rightarrow (Z - 2, A) + 2e^+ (+2\nu_e) \quad (\beta^+/EC)$$

$$2e_B^- + (Z, A) \rightarrow (Z - 2, A) (+2\nu_e) \quad (EC/EC)$$

欠点

－ 候補の核種が少ない。

・ 例 ^{106}Cd 自然存在比 1.25%

^{120}Te 自然存在比 0.096%

－ Q値が小さい

・ 例 ^{106}Cd $E_{\beta^+\beta^+}=727\text{keV}$, $E_{\beta^+}(EC)=1749\text{keV}$

・ 期待される寿命が長い。

－ $10^{26}\sim 10^{27}$ year for ^{106}Cd c.f. 10^{23} for ^{76}Ge at $\langle m_\nu \rangle \sim 1\text{eV}$

・ バックグラウンドに弱い

ということで、比較的、手をつけられていない。

過去の実験 (1)

P.Belli *et.al.* Astro. Phys. 10 (1999) 115

■ ^{106}Cd を68%まで濃縮して154gのシートを作成。表裏をNaI1個ずつで挟んだ。

■ 実験時間は、4321時間。

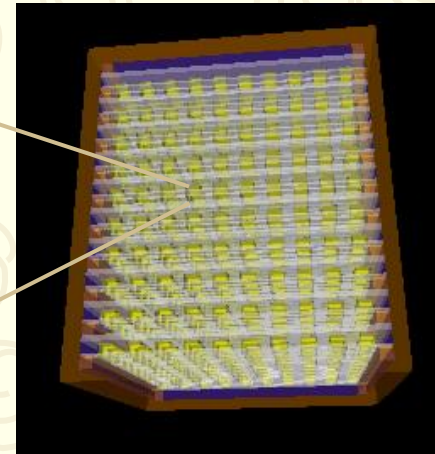
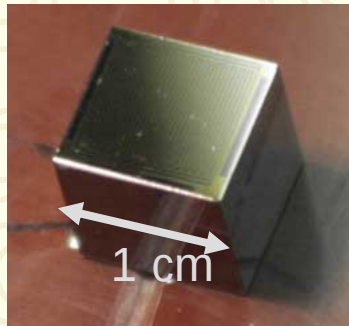
■ 例えば β^+/EC modeに対しては、信号として両方のNaIに511keVを要求。

■ 寿命のupper limit 4.1×10^{20} 年

過去の実験 (2)

COBRA project (on going)

- Build up a large array of CdZnTe semiconductor detectors



- CdZnTe contains 9 $\beta\beta$ Isotopes

^{116}Cd , ^{130}Te , ^{114}Cd , ^{70}Zn , ^{128}Te ($\beta\beta^-$),
 ^{64}Zn , ^{106}Cd , ^{108}Cd , ^{120}Te ($\beta^+\beta^+$, $\beta^+\text{EC}$, EC/EC)

- Main $0\nu\beta\beta$ candidate: ^{116}Cd

- Enrichment to 90%

- Also interesting: ^{106}Cd

- EC/EC , β^+/EC and $\beta^+\beta^+$ modes

- Currently $\tau_{1/2}^{\beta^+/\text{EC}} \sim 5 \times 10^{18}$ years by searching for 1.7 MeV peak

^{106}Cd β^+ /EC search
with CdTe diode detector and NaI

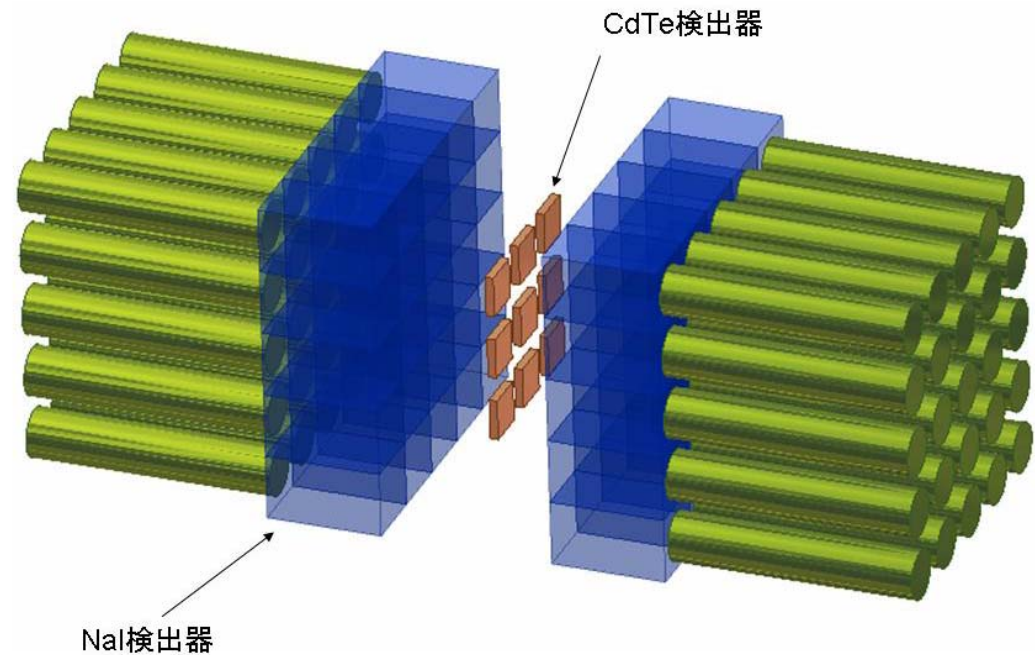
	CdTe	$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}^*$	Ge	Si
密度 (g/cm^3)	5.85	~5.8	5.33	2.33
原子番号	48,52	48,30,52	32	14
エネルギー分解能	<5% @ 60keV	10% @ 60keV	<1% @ 約100keV ~ @ 約1MeV	
バンドギャップ エネルギー (eV)				1.12
電子・正孔対生成 エネルギー (eV)	4.43	~5.0	2.96	3.62
比抵抗室温下 ($\Omega \text{ cm}$)	10^9	$10^9 \sim 10^{11}$	50	~ 10^4
μ_e ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	1100	1000	3900	1400
μ_h ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	400	50 ~ 60	1000	480
τ_e (s)	5×10^{-7}	5×10^{-7}	> 10^{-3}	> 10^{-3}
τ_h (s)	2×10^{-6}	10^{-6}	1×10^{-3}	2×10^{-3}

Merit

- High Z
- room temperature operation

日本にメーカーがある！

セッティングアップ？



β^+ EC探索実験のセッティングアップ概念図

- Detect 1.7MeV β^+ by CdTe diode detector
- Detect two 511keV γ from positron annihilation
- (Probably) strong against noise because of triple coincidence method.
- (Maybe) setup is easy because of room temperature operation
- (Principally) Enrichment of ^{106}Cd (1.25%) upto $\sim 70\%$ is possible.

10²⁰年 (¹⁰⁶Cdでの世界記録)の寿命に感度を持つためには、～200gのCdTe素子が必要。

10²⁷年 (⁷⁶Geの世界記録相当)の寿命に感度を持つためには、～100%濃縮されたCdTe素子が～5トン必要。(1cm厚の素子で9x9m²)

(ちなみにカドミウムの年間産出量は2万トン)

$\langle m_\nu \rangle \sim 0.05 \text{ eV}$ (Inverted hierarchy)だと500トン。

これを今、考えるとくじけそうなので、とりあえず忘れよう。

	CdTe	Cd _{1-x} Zn _x Te*	Ge	Si
密度 (g/cm ³)	5.85	~5.8	5.33	2.33
原子番号				
エネルギー	(寿命が長いこと以外の)CdTeのDemerit $\mu_e \tau_e = 2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}$ $\mu_h \tau_h = 3 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$ 正孔が電極に辿り着く割合が、電極までの距離で変わってしまう。			
バンドギャップエネルギー				
電子・正孔エネルギー (eV)				
比抵抗室温下 ($\Omega \text{ cm}$)	10^9	$10^9 \sim 10^{11}$	50	$\sim 10^4$
$\mu_e (\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	1100	1000	3900	1400
$\mu_h (\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	100	50 ~ 80	1900	480
$\tau_e (\text{s})$	3×10^{-6}	3×10^{-6}	$> 10^{-3}$	$> 10^{-3}$
$\tau_h (\text{s})$	2×10^{-6}	10^{-6}	1×10^{-3}	2×10^{-3}

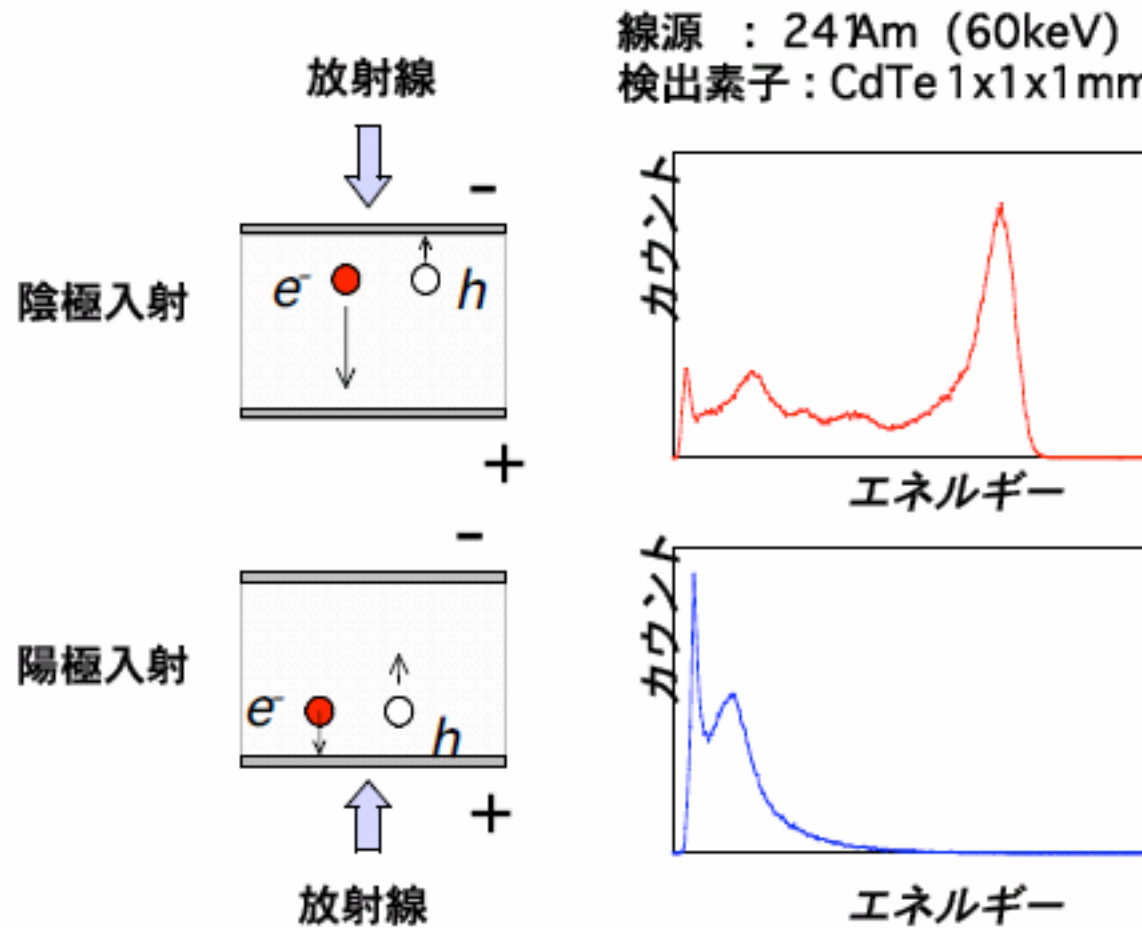
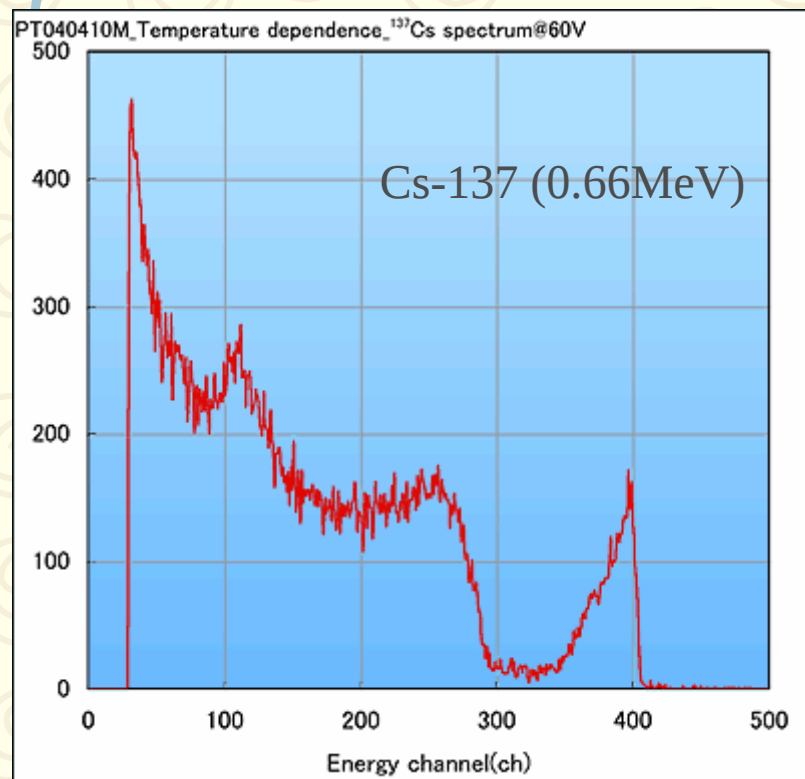


図2 検出放射線の入射面によるスペクトルの違い

高エネルギー($\sim 1\text{MeV}$)に対しては、エネルギー分解能が悪化する。

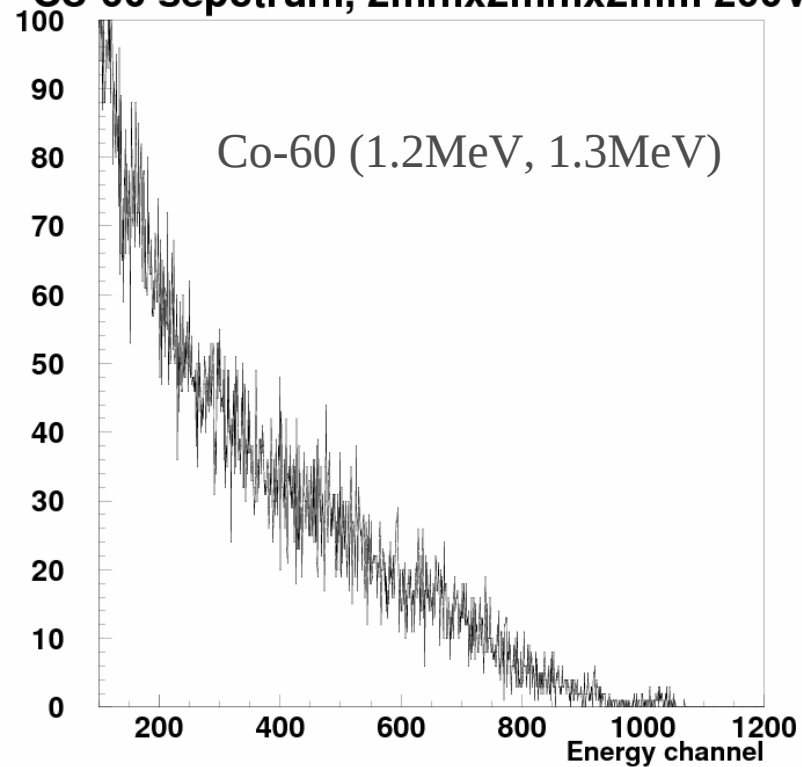
ショットキー型にして電圧勾配を高くする方法も取られているが、素子の厚みが $<1\text{mm}$ と限られる。

4x4x1mm , Pt//Pt 電極, 60V bias, 20°C



アクロラド社ホームページより。

Co-60 sepctrum, 2mmx2mmx2mm 200V



自前で測定

Coplanar Grid Technology

- Proposed by P.N.Luke (IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.42, No.4, 1995)
- COBRA実験はすでにこれをCdZnTe検出器に採用している。
- CdTeでは、まだ試されていない。
- 一方の電荷のキャリアー(electron)だけを読み出す。
- ガス・イオンチェンバーにおけるFrisch電極配置と同じことをする。

Figures from P.N.Luke (IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.42, No.4, 1995)

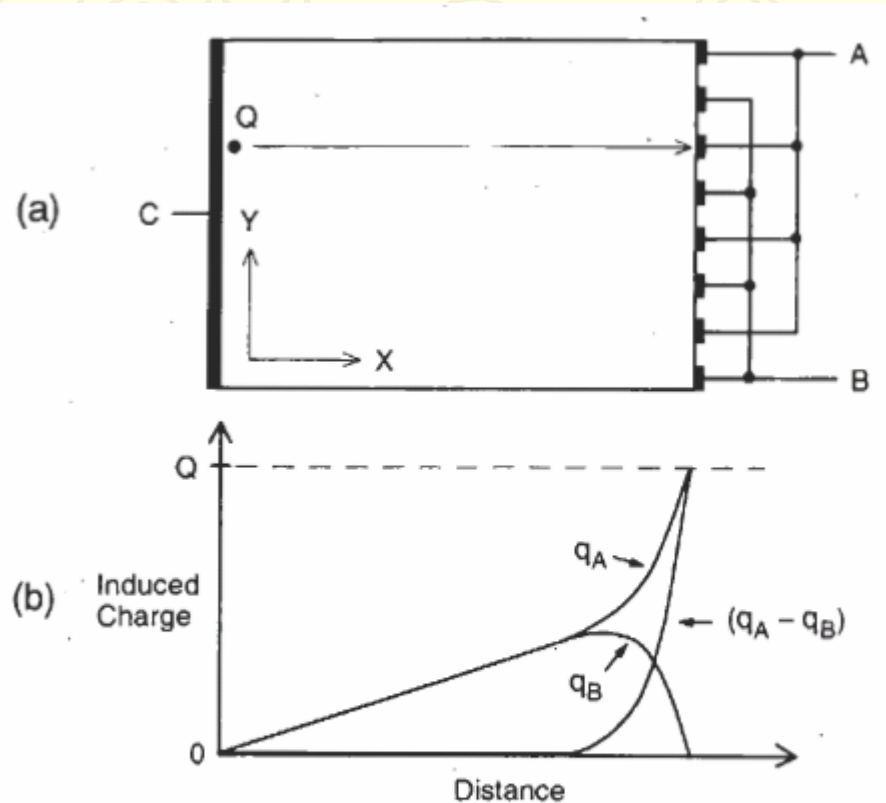


Fig. 2. (a) Basic structure of the coplanar grids. (b) Induced charge at electrode A (q_A), at electrode B (q_B), and the difference signal ($q_A - q_B$) as a function of distance traveled by a charge Q which is ultimately collected at electrode A.

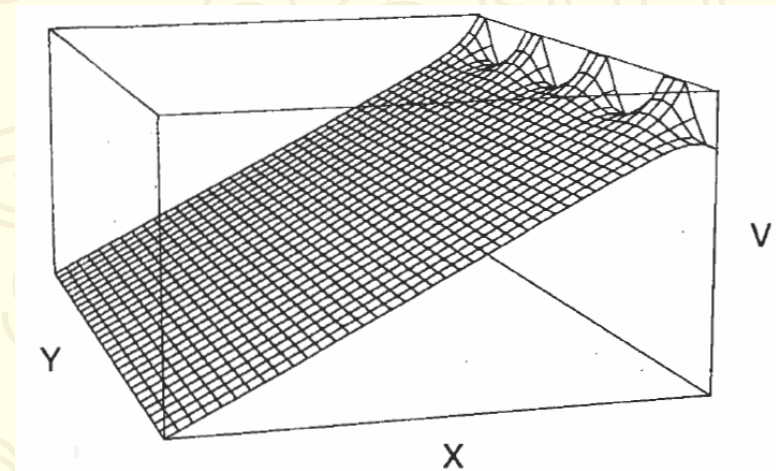
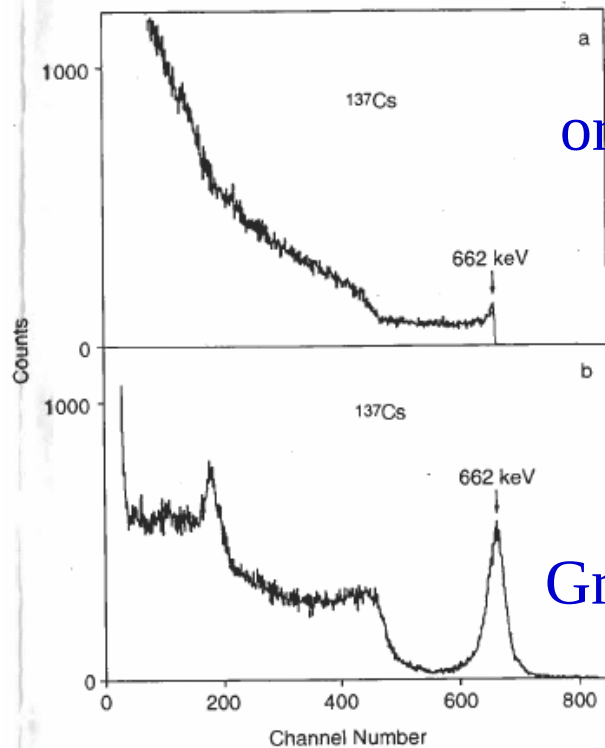


Figure 4. Calculated potential distribution in a coplanar grid detector with grid bias equal to one fifth the bias across the detector. The potential is shown for a positive charge.



original

Grid technique

Fig. 7. ^{137}Cs spectra obtained (a) with the original detector and (b) using the coplanar grid detection technique. Detector bias was 480 V.

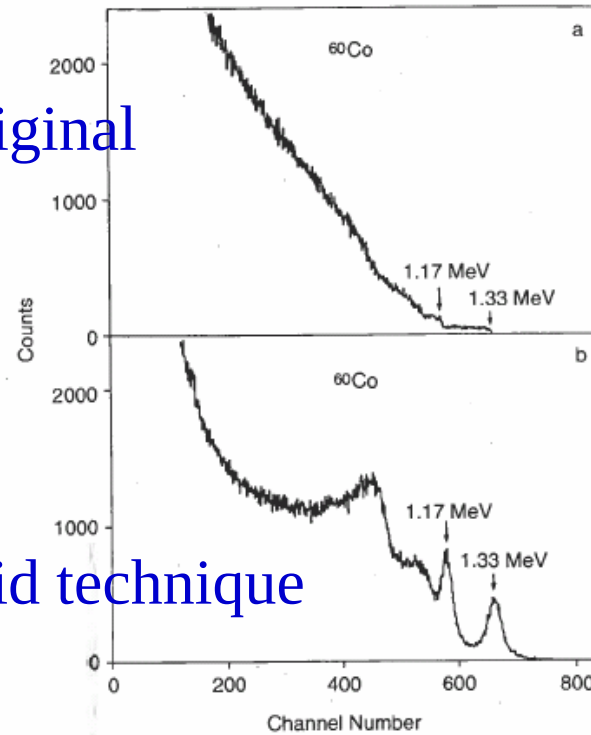


Fig. 8. ^{60}Co spectra obtained (a) with the original detector and (b) using the coplanar grid detection technique. Detector bias was 480.

CdZnTe(5mmx5mmx5mm)で実証

Figures from P.N.Luke
(IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.42, No.4, 1995)

二つの電極からの信号
の比で位置(深さ)情報も
得られるかも。

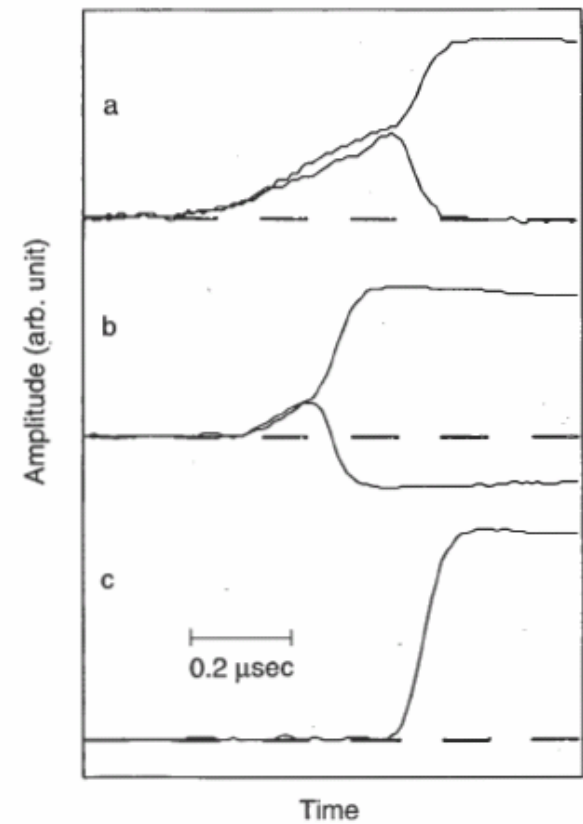
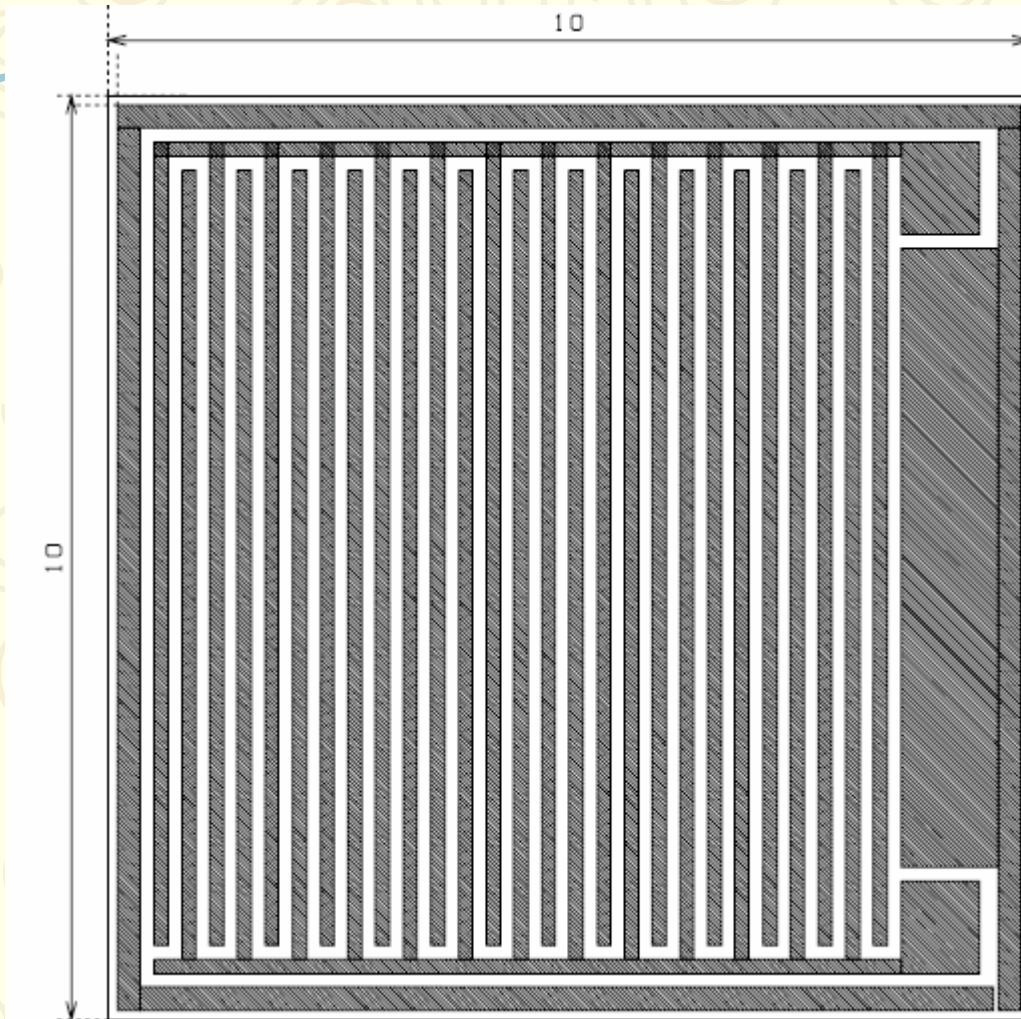
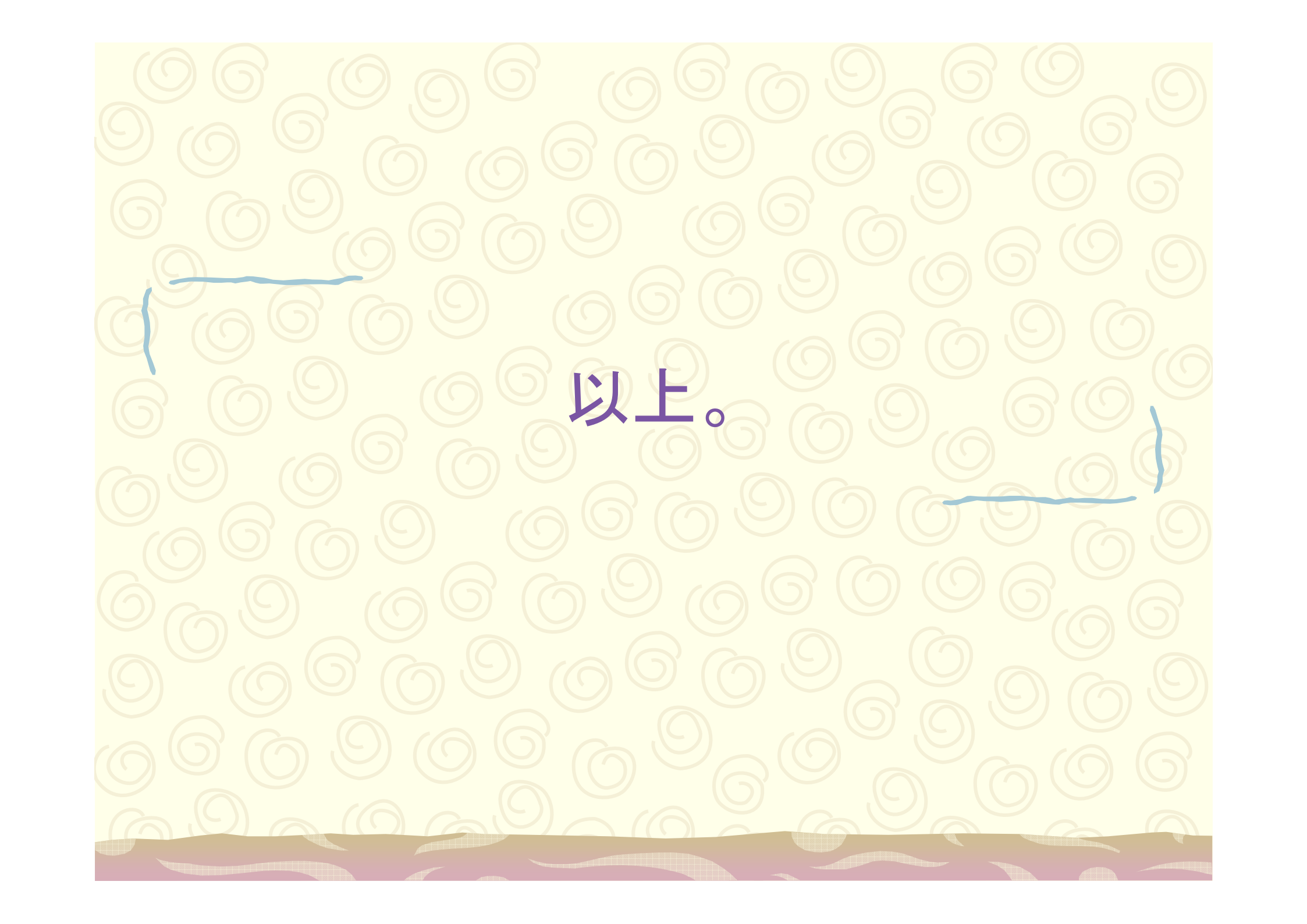


Fig. 10. (a,b) Charge signals captured simultaneously from the two grid electrodes. (c) A difference signal obtained from the output of the signal subtraction circuit. Dashed line (— —) indicates baseline.

というわけで、CdTeで試作中



厚さはとりあえず1mm。
うまくいったら、もっと厚くする。



以上。