



Candles

2重ベータ崩壊と 宇宙の物質生成

岸本忠史

阪大理、RCNP



内容

- ビッグバンと物質の生成
 - 粒子と反粒子
- ニュートリノ振動実験とニュートリノ質量
- 2重ベータ崩壊とマヨラナ質量
- 世界の研究の現状
- 阪大理での取り組み ^{48}Ca
 - ELEGANT VI, **CANDLES**, MOON
- 将来の発展

宇宙のバリオン(原子核)密度



Candles

- 宇宙の元素存在比
 - ${}^4\text{He}$, D, ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}$
 - バリオン密度

宇宙元素合成

$$\rho_B \sim 10^{-10} \rho_\gamma$$

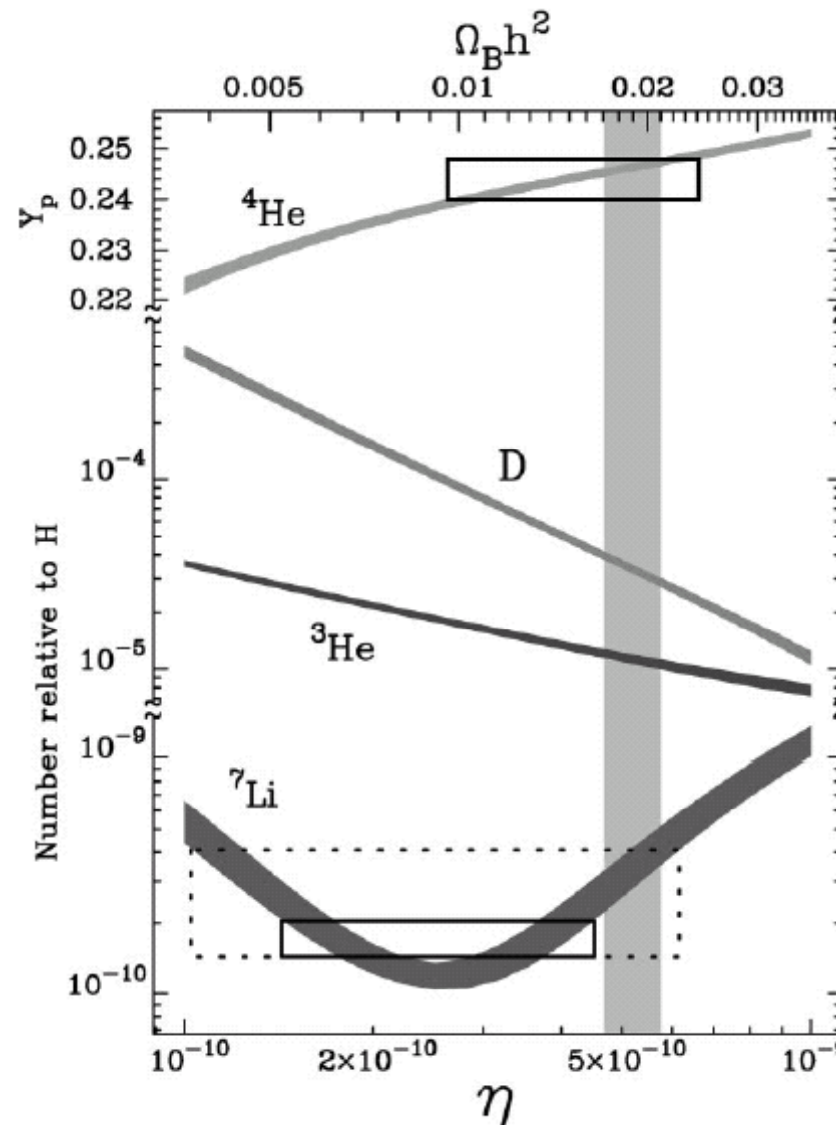
熱平衡

$$\rho(B) = \rho(\bar{B}) \sim \rho(\gamma)$$

$$\rho_B \sim 0$$

如何にしてバリオンを作るか

→ **ニュートリノのマヨラナ質量**



ニュートリノ質量



- 振動現象の確立

- ニュートリノの種 (e、μ、τ 型) が変化
- 質量の差、混合

$$\nu_{lL} = \sum_{j=1}^3 U_{lj} \nu_{jL}$$

質量の固有状態 $j=1$

弱い相互作用の
固有状態

- SK, GALLEX-SAGE, SNO, KamLAND
- 更に多くの実験が進行・計画中

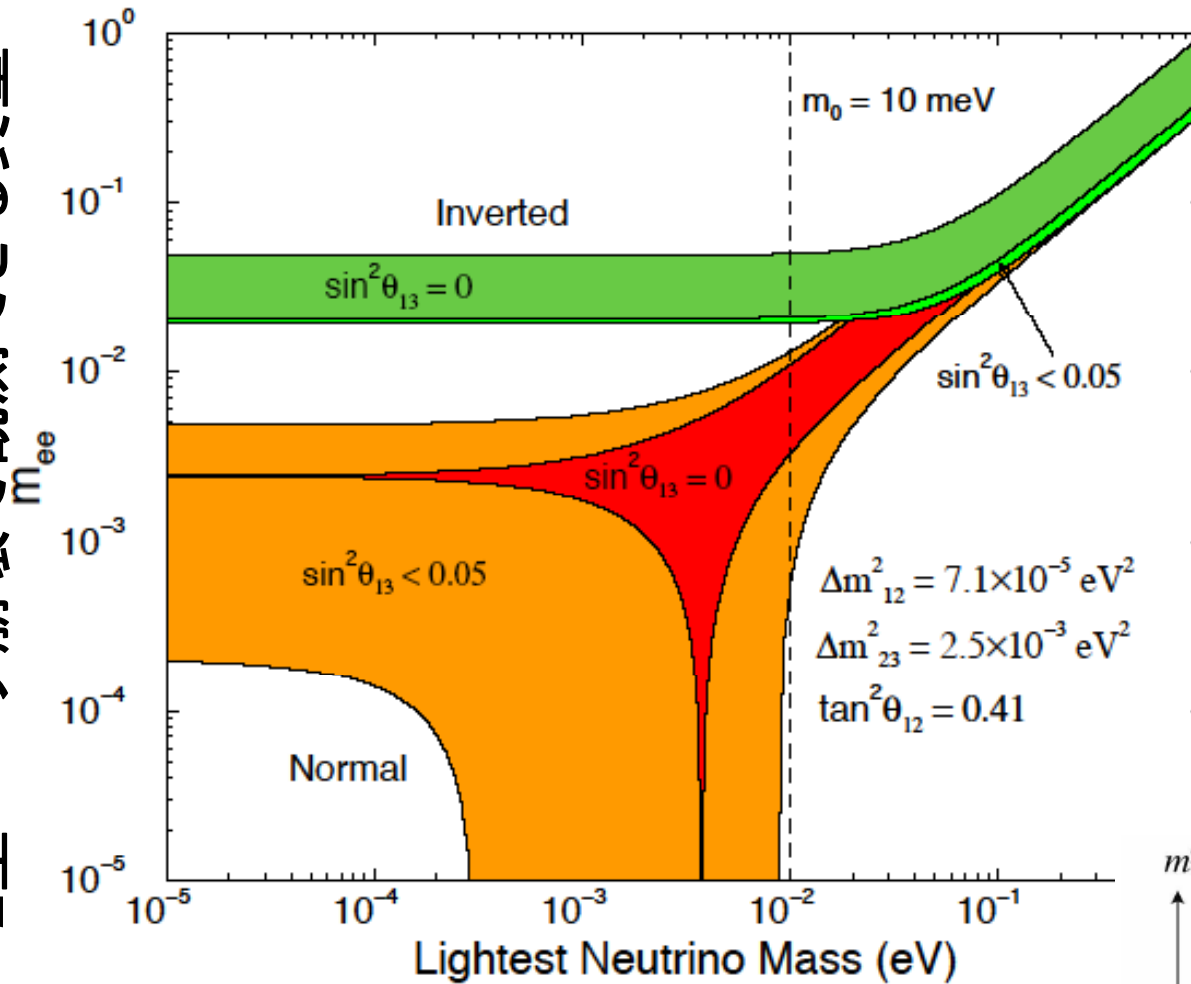
- ニュートリノは質量を持つ



Candles

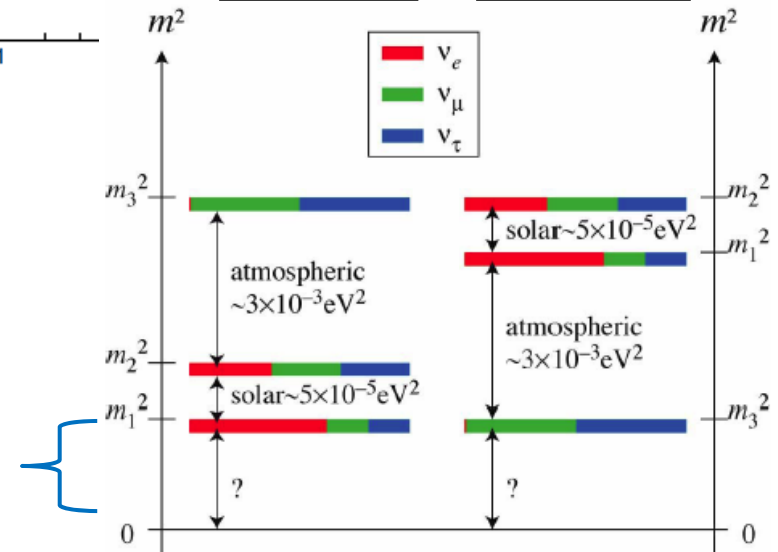
現在の理解

2重ベータ崩壊で観測できる質量



質量の絶対値
は未知

Normal	Inverted
--------	----------



m_ν の測定



Iles

KATRIN =>
 $m_\nu \sim 0.2 \text{ eV}$

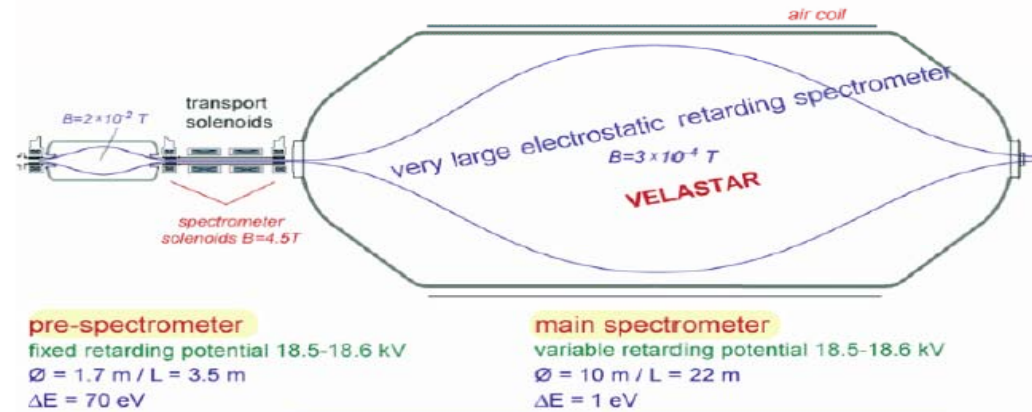
- ^3H β -decay (Q_β : 18.7keV)

- $0\nu\beta\beta$ decay

- CMBR
 - WMAP + SDSS + ...

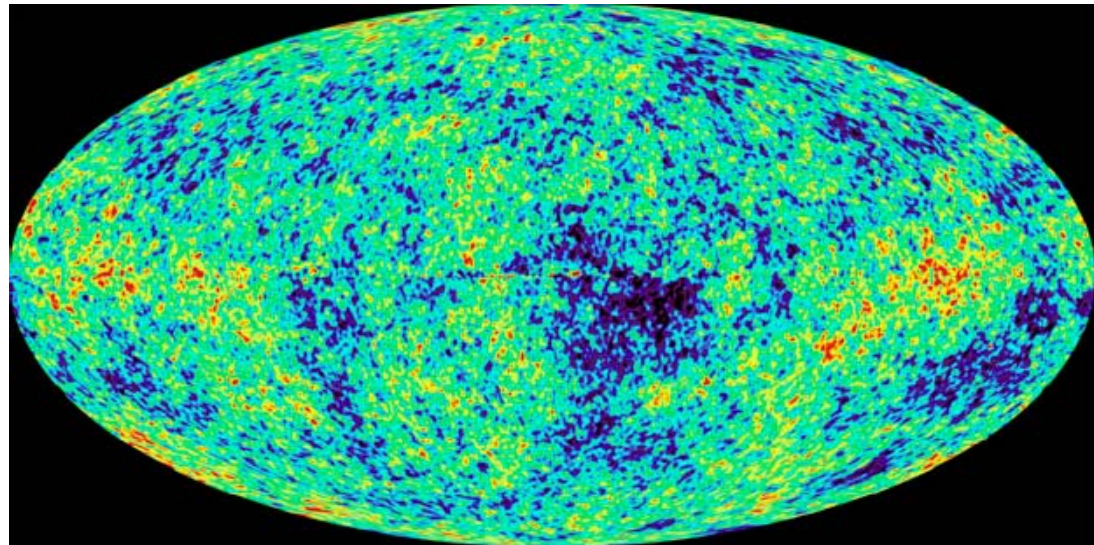
$m_\nu < \sim 0.6 \text{ eV}$

electrostatic spectrometers: tandem design
electrostatic pre-filtering & analysis of tritium β -decay electrons



XHV conditions $p < 10^{-11}$ mbar : main challenge

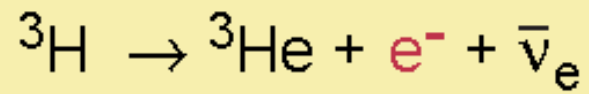
Figure: Pre-Spectrometer and Main Spectrometer





KATRIN実験

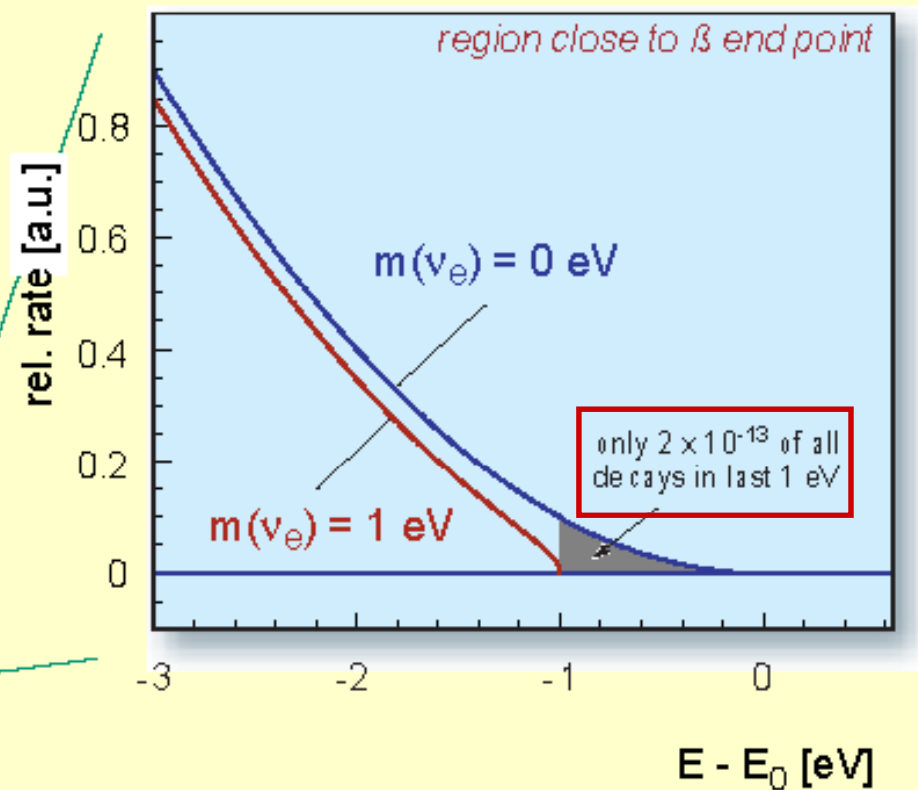
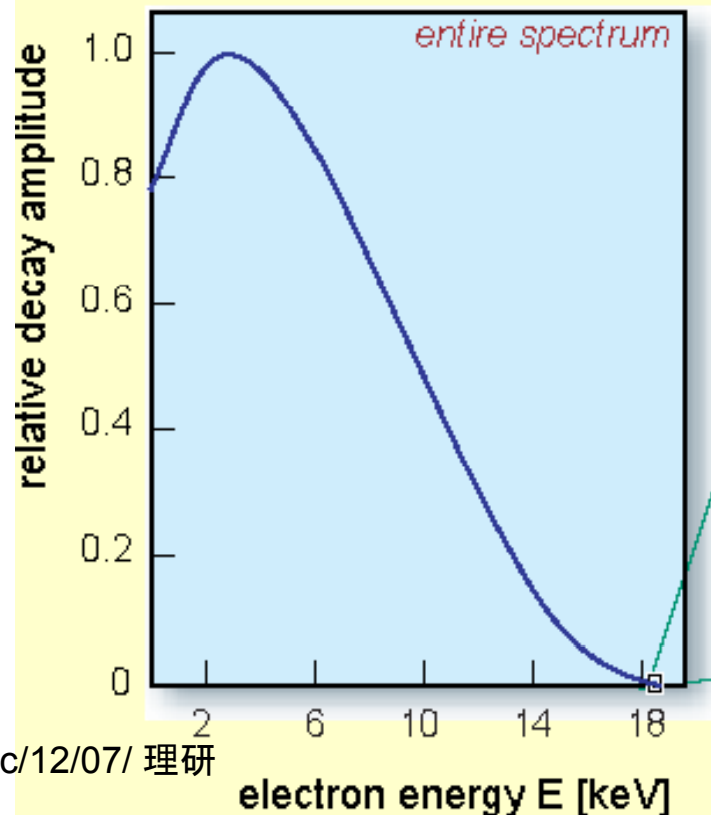
tritium β -decay and the neutrino rest mass



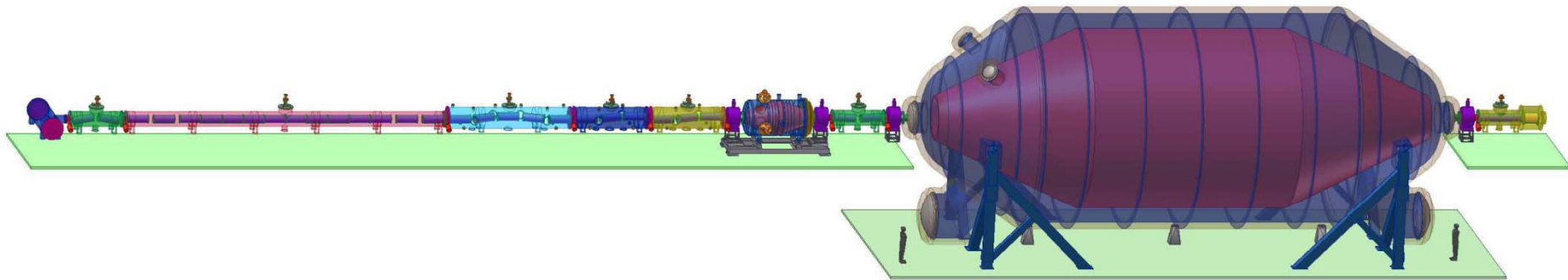
superallowed

half life : $t_{1/2} = 12.32 \text{ a}$

β end point energy : $E_0 = 18.57 \text{ keV}$

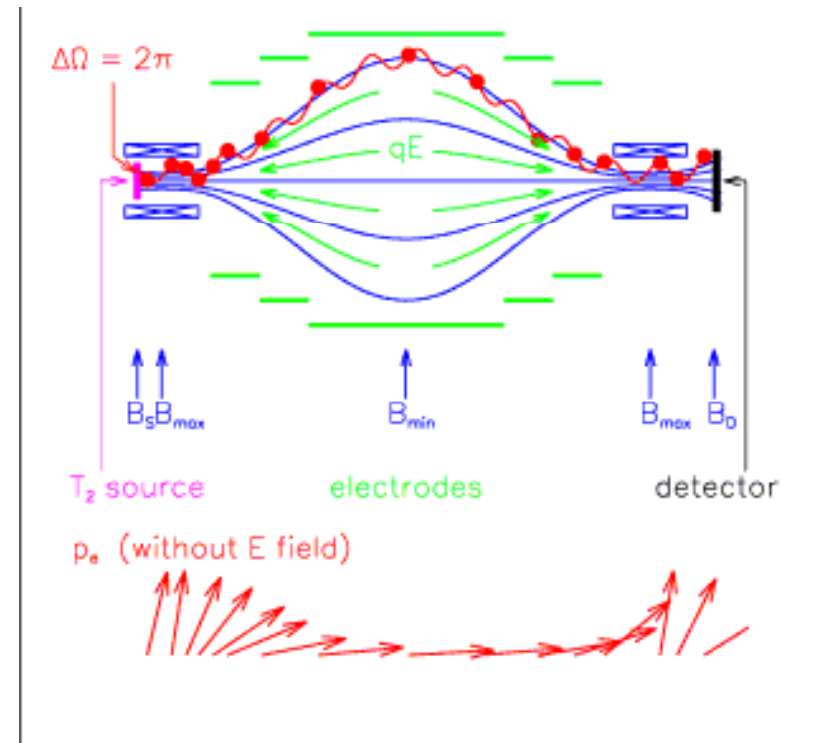


KATRIN実験

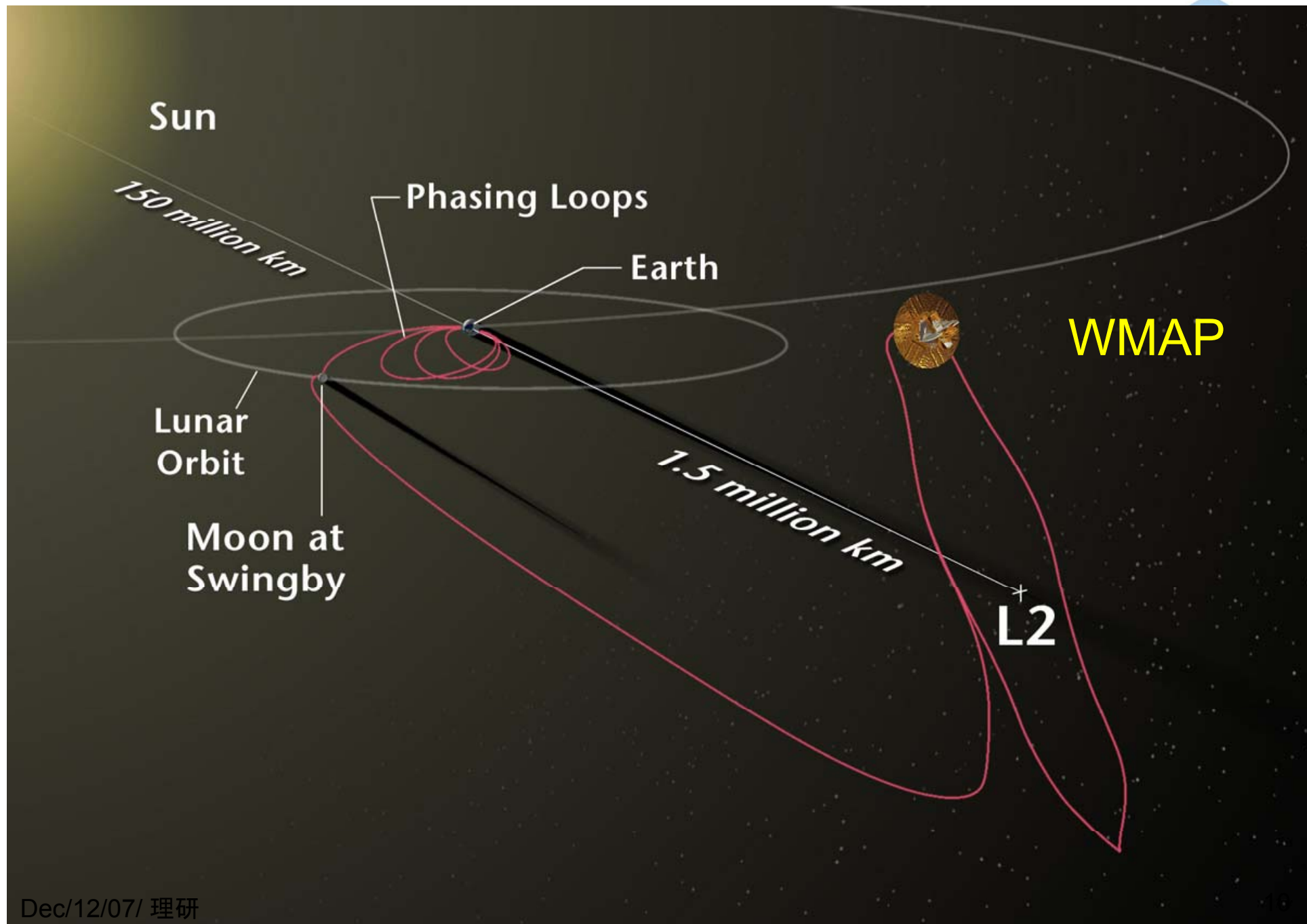


MAC-E フィルター
Magnetic Adiabatic Collimation
(MAC)

立体角 最大 2π
エネルギーフィルター

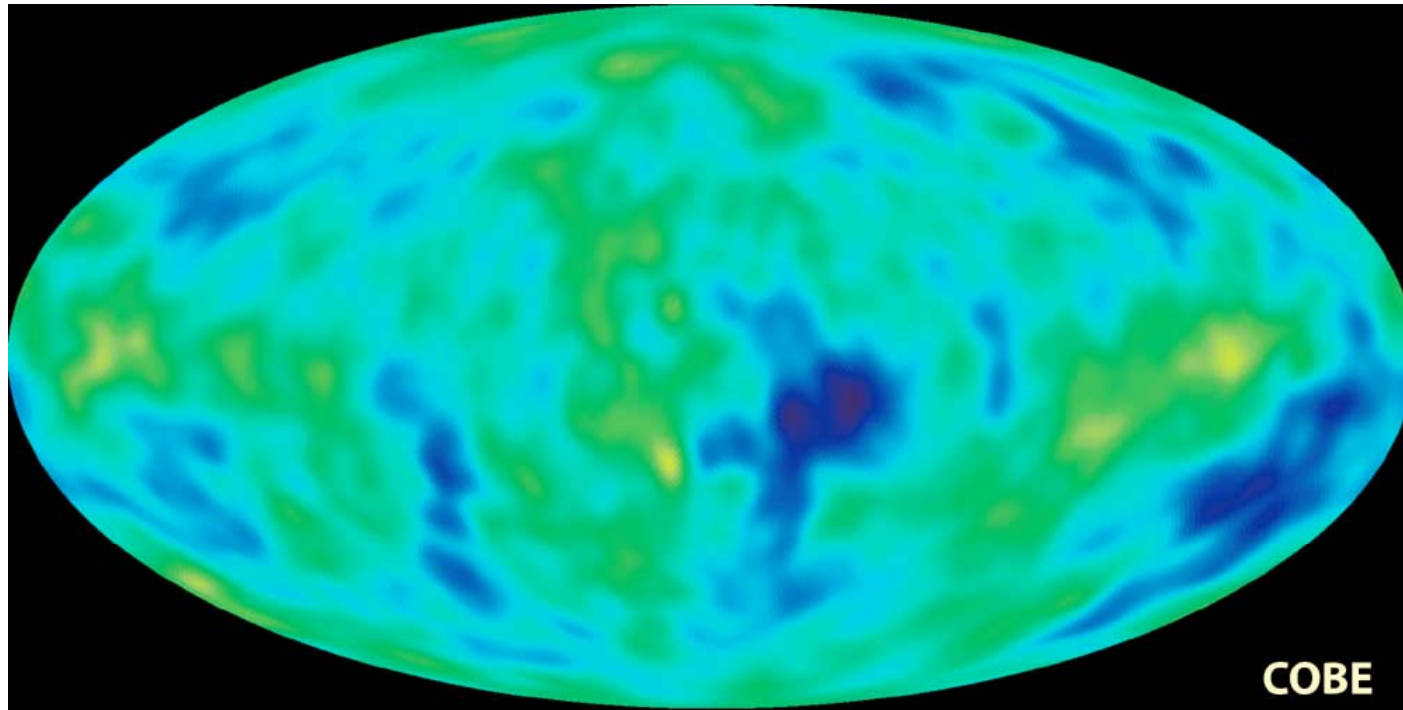




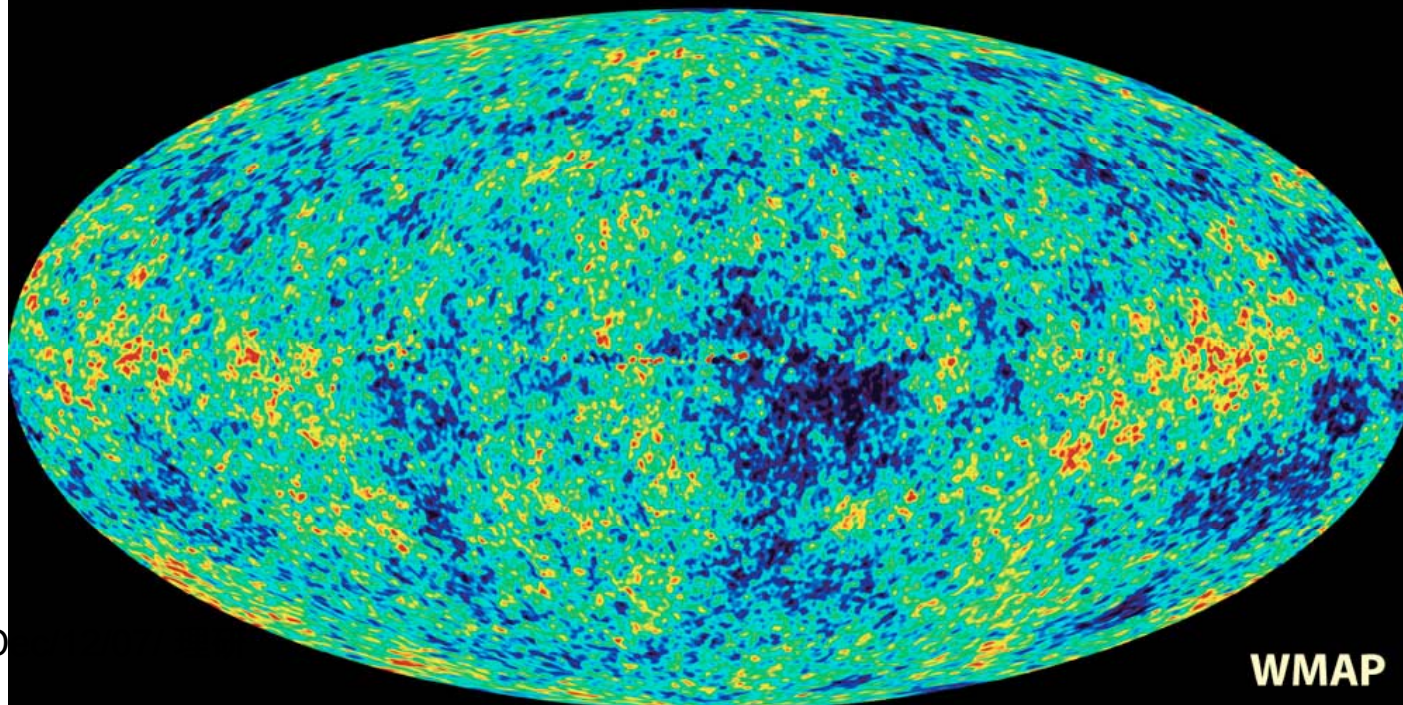


COBEと の比較

Candles



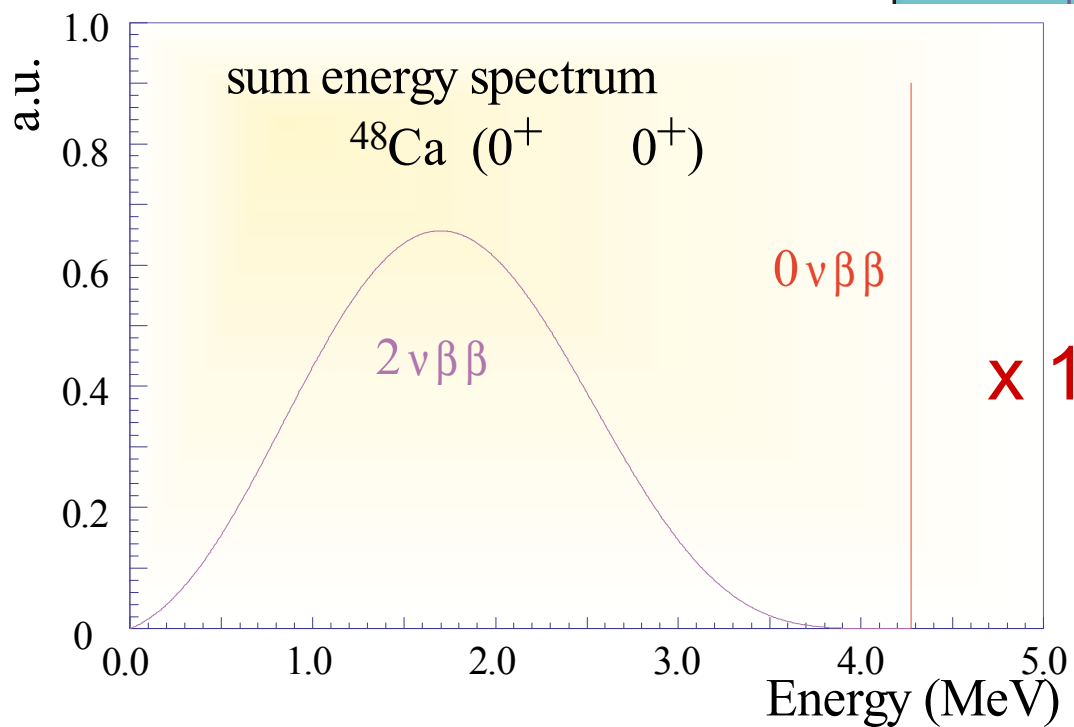
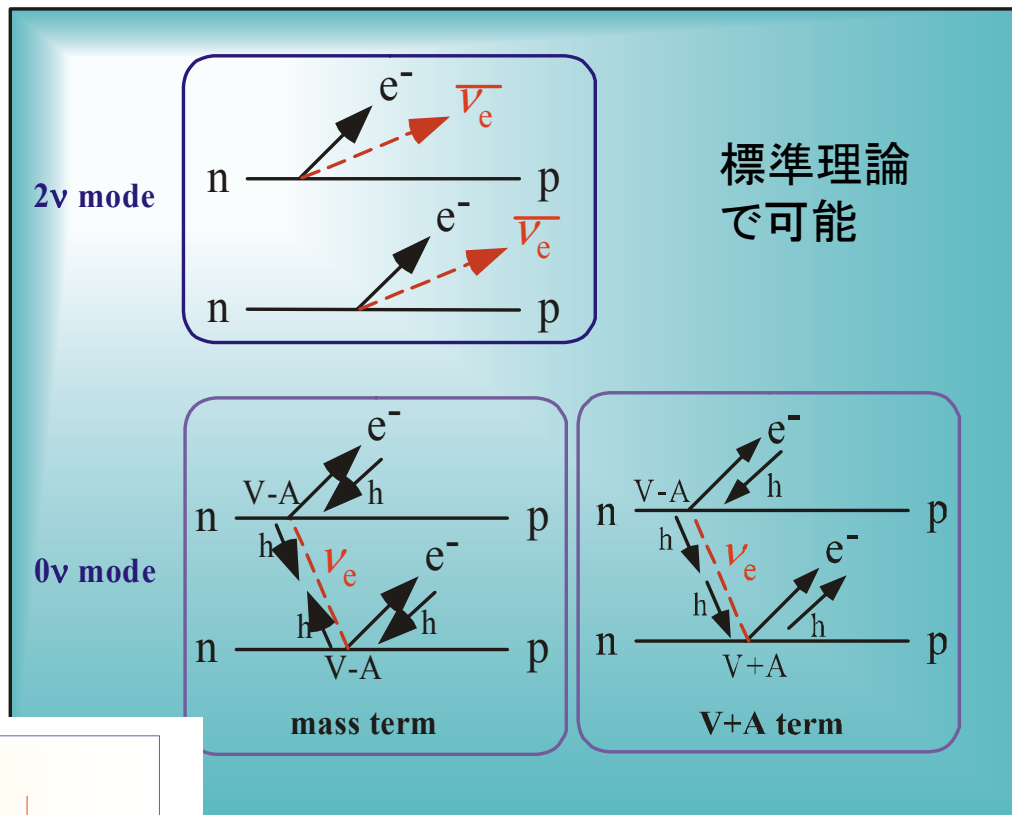
COBE



WMAP

構造の成長：
ニュートリノ質量

2重ベータ崩壊と ニュートリノ質量



2重ベータ崩壊が観測されると



Candles

- ニュートリノはマヨラナ粒子
 - ニュートリノだけがマヨラナ粒子であり得る
 - 他の荷電粒子(クォーク・レプトン)は全てディラック
- マヨラナ質量を持つことが示されると
 - 粒子と反粒子が結ばれる
 - 粒子数の保存則が破れる
 - 宇宙の粒子数(バリオン数)を作る
 - レプトジェネシス

ニュートリノはマヨラナ粒子



Candles

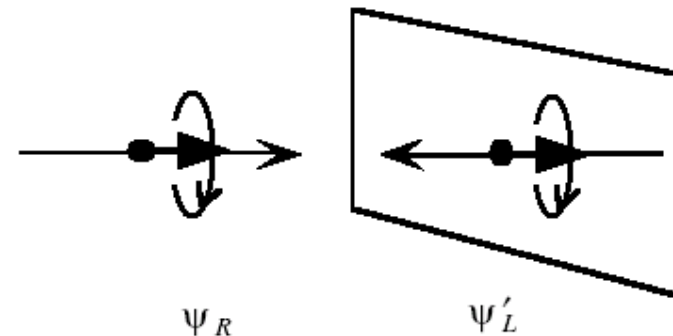
- ディラック質量項
 - 右巻きと左巻きを結ぶ

$$\mathcal{L}_D = -m_D \overline{\nu_R^0} \nu_L^0 + \text{h. c.}$$

- マヨラナ質量項
 - 粒子と反粒子を結ぶ
 - 粒子数の保存則を破る
 - 中性のニュートリノだけ可
 - 左巻きと右巻きに別の質量可
 - ニュートリノは左巻きだけ
 - 相互作用(質量)は左巻きだけ
 - 右巻きは重い(シーソー機構)

$$\mathcal{L}_{m_L} = -\frac{m_L}{2} \overline{(\nu_L^0)^c} \nu_L^0 + \text{h. c.}$$

ヘリシティ反転
(特殊相対論)
左巻きの反粒子 → 右巻き



- 2重ベータ崩壊の研究

ニュートリノのタイプ



Candles

- type
- 成分

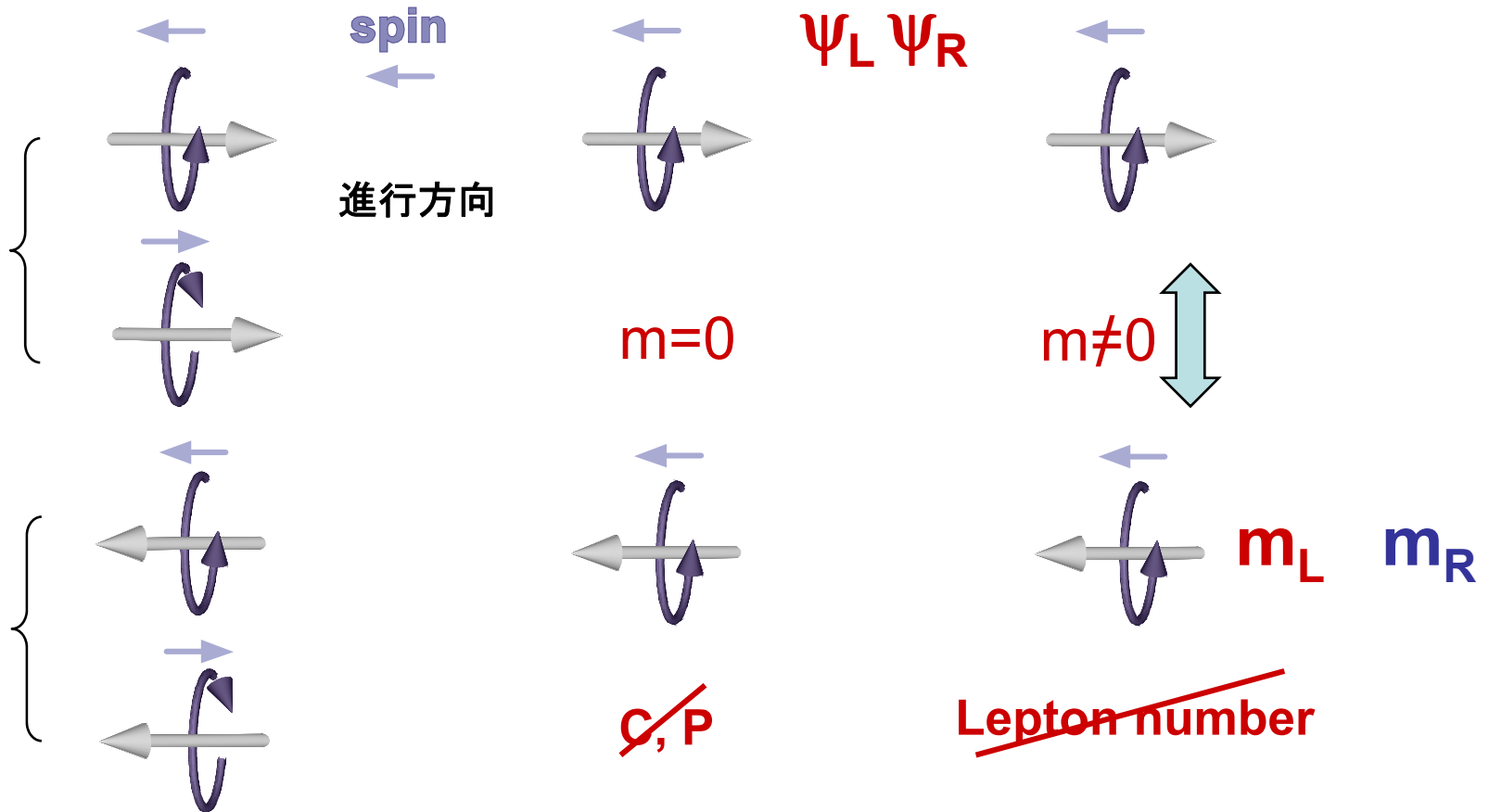
ディラック
4

ワイル
2

マヨラナ
2 x 2

粒子

反粒子



荷電レプトン数 = 電荷保存 ○

中性レプトン数 = ヘリシティ ×



Candles

シーソー機構

$$L_m = -m_D \bar{\Psi}_R \Psi_L - \frac{m_R}{2} \bar{\Psi}_R^C \Psi_R + h.c.$$

ディラック: 右巻 × 左巻 マヨラナ: 左巻 (右反粒子) × 右巻

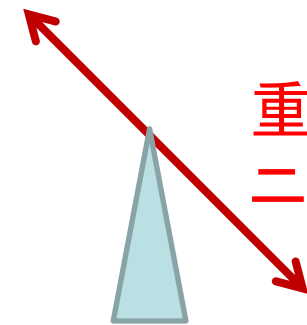
$$= -\frac{m_R}{2} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_L^C & \bar{\Psi}_R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_R \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Psi_L \\ \Psi_R^C \end{bmatrix} + h.c.$$

$$m \sim \begin{bmatrix} m_D^2 / M_R & 0 \\ 0 & M_R \end{bmatrix}$$

柳田, Gell-mann

軽い左巻き
ニュートリノ

重い右巻き
ニュートリノ



m_D ~ ディラック質量
クォーク・レプトン質量
 M_R ~ 統一論スケール

$10^{13} \sim 10^{15}$ GeV

マヨラナニュートリノ



Candles

- Today, Majorana is particularly well known for his ideas about neutrinos. Bruno Pontecorvo, the "father" of neutrino oscillations, recalls the origin of Majorana neutrinos in the following way: **Dirac discovers his famous equation describing the evolution of the electron; Majorana goes to Fermi to point out a fundamental detail: " I have found a representation where all Dirac γ matrices are real. In this representation it is possible to have a real spinor that describes a particle identical to its antiparticle."**

CERN courier

Dirac: 反粒子

Majorana: 右巻き粒子



マヨラナ: フェルミによってアインシュタインやディラックを超えてニュートン、ガリレオと並ぶ天才と称された。
Mystery of Majorana

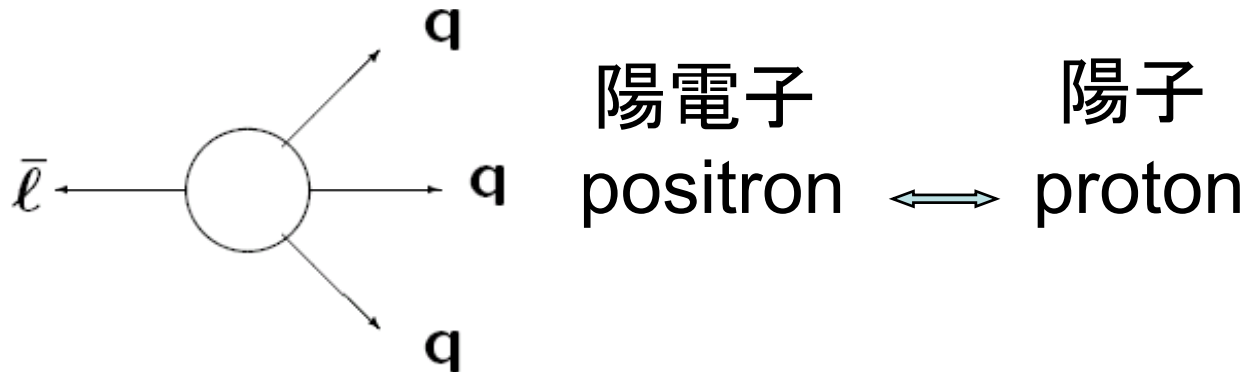
レプトジェネシス



福来、柳田 (1986) Candles

- マヨラナ (レプトン数非保存)
- CP (粒子・反粒子非対称)
- インスタントン効果 (レプトン→バリオン)
 - t'Hooft (標準模型)

– B-L

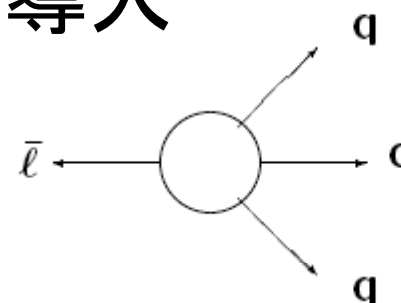
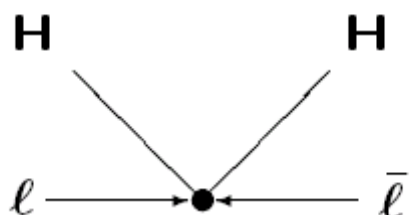


- 現在はその確率は微小だが、宇宙初期では大きい
- Proton decay is irrelevant to the Baryogenesis

レプトン数の生成

- Fukugita Yanagida '86
- レプトン数を破る相互作用を導入

レプトン \Rightarrow 反レプトン



反レプトン数 \Rightarrow 物質数

- ニュートリノのマヨラナ質量

2重ベータ崩壊の観測

2重ベータ崩壊核



- 原子核

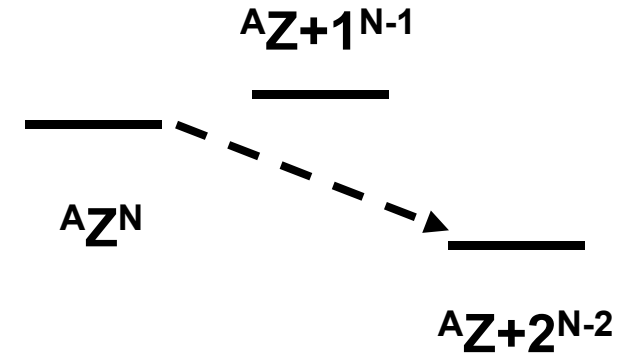
- ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo ,
- ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd
- 陽電子崩壊

- 超稀現象

- $10^{20\sim 25}$ 年

- 自然界にはバックグラウンドの過程がいっぱい

- 超高感度検出器開発
- 超低バックグラウンド環境 **地下実験施設**



崩壊率とマヨラナ質量

$$\begin{aligned} [T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} &= C_{mm}^{(0)} \frac{\langle m_\nu \rangle^2}{m_e^2} + \langle \lambda \rangle C_{m\lambda}^{(0)} \frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e} + \langle \eta \rangle C_{m\eta}^{(0)} \frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e} \\ &+ \langle \lambda \rangle^2 C_{\lambda\lambda}^{(0)} + \langle \eta \rangle^2 C_{\eta\eta}^{(0)} + \langle \lambda \rangle \langle \eta \rangle C_{\eta\lambda}^{(0)} \quad (1) \end{aligned}$$

- 崩壊率 $[T_{1/2}]^{-1} \propto m_\nu^2$ (右巻きを無視)
- 1桁 limit を下げる →
 - 2桁長い寿命 (稀現象) の探索
 - 2桁 (最低限) 多い物質質量

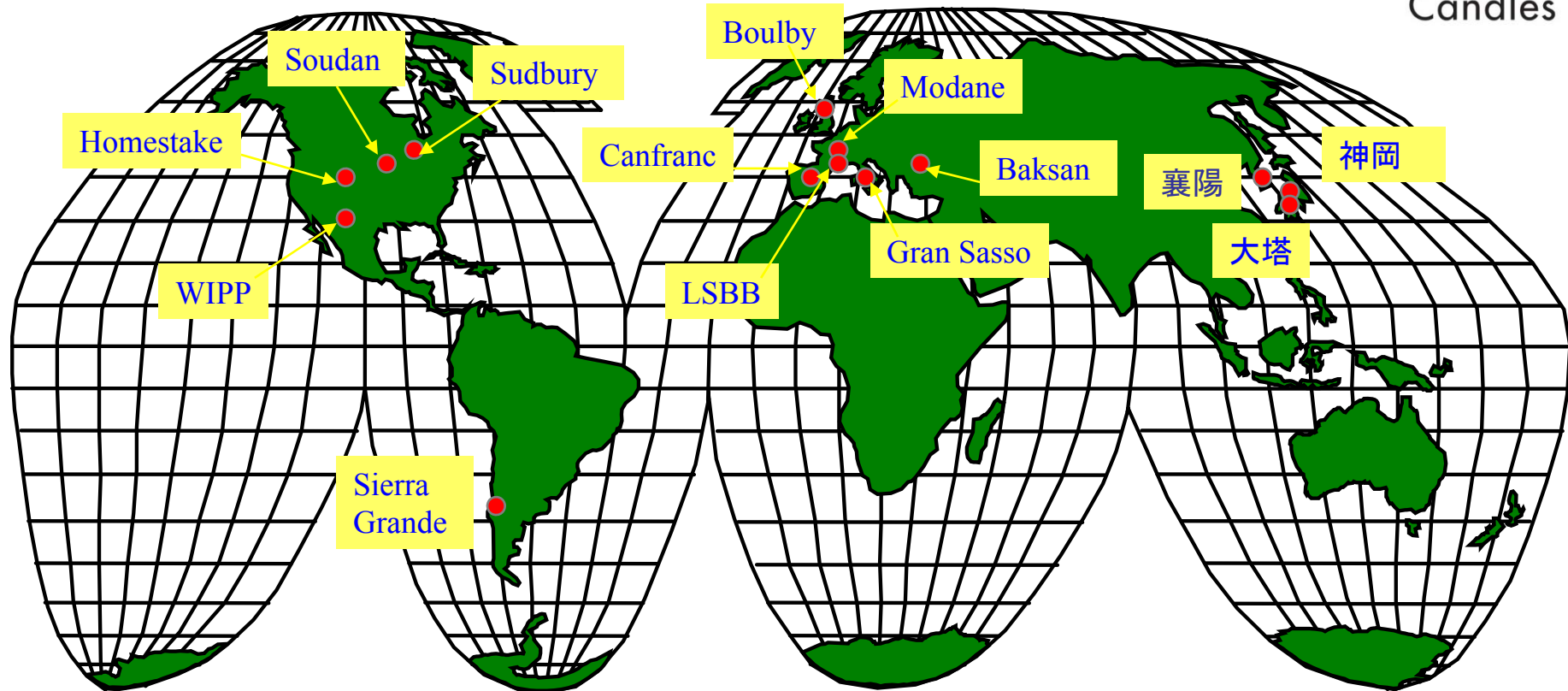
超稀現象
低バックグラウンド測定₂₁

世界の地下実験施設

2重ベータ崩壊の研究
ダークマターの探索



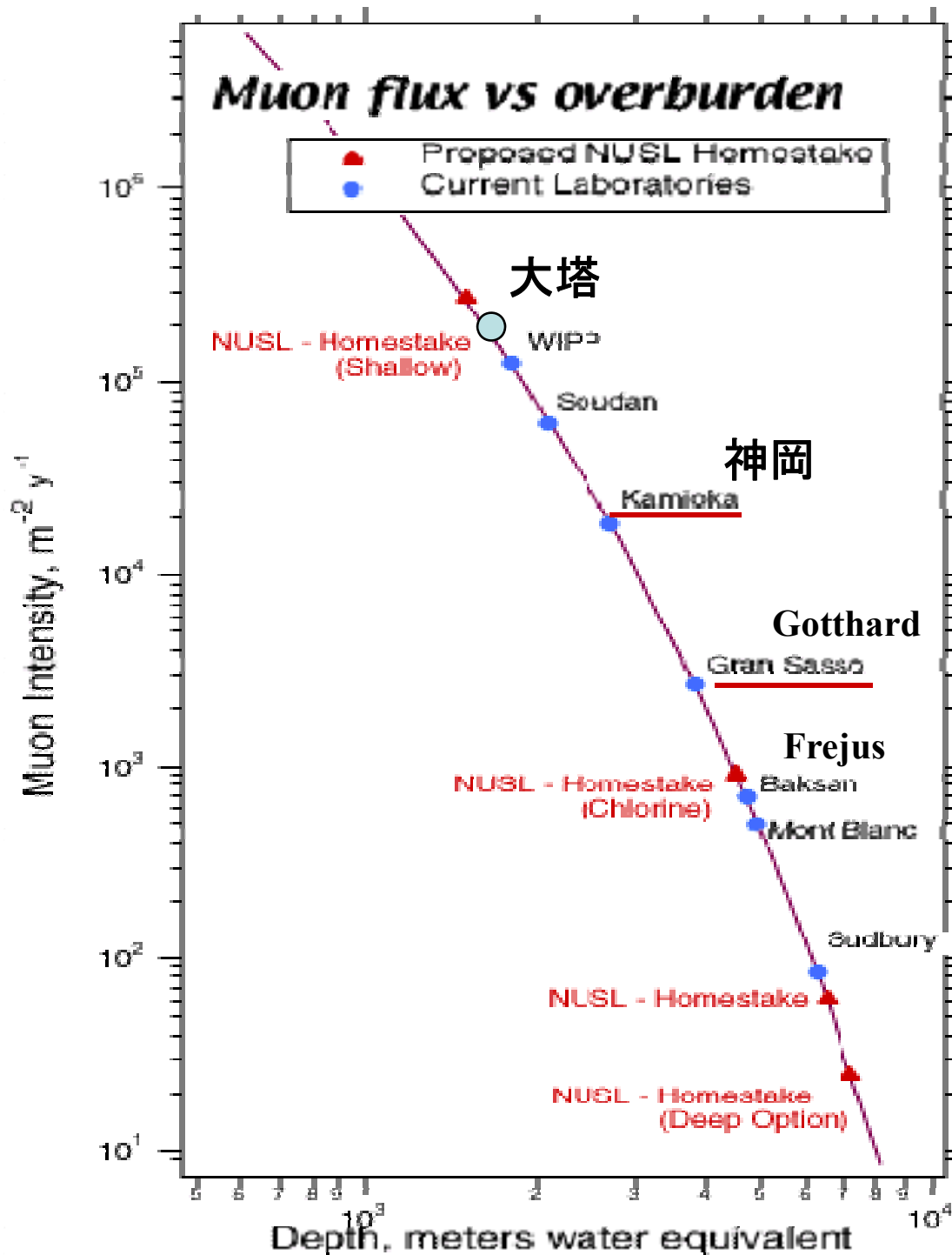
Candles



比較のため水中での深さに換算

- **大塔コスモ観測所** 奈良県, 日本, 1400 m水深相当
- **神岡鉱山** 岐阜県, 日本, 3000 m水深相当
- **SUF** スタンフォード, 米国, 17 m水深相当
- **Boulby 鉱山** イングランド, 英国, 3000 m水深相当
- **LSM** Frejus, フランス
- **Canfranc** ピレネー, スペイン, 2450 m水深相当
- **LNGS** グラン=サッソー, イタリア, 3400 m水深相当
- **Sierra Grande** リオ=ネグロ, アルゼンチン, 1000 m水深相当

宇宙線の強度



Candles

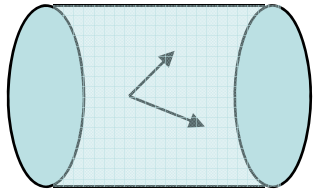
深さ

研究の現状



Candles

Isotope	Exposure (kmole-y)	Background (counts)	Half-Life Limit (y)	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (meV)
^{48}Ca	5×10^{-5}	0	$> 1.4 \times 10^{22}$	$< 7200 - 44700[105]$
^{76}Ge	0.467	21	$> 1.9 \times 10^{25}$	$< 350[106]$
^{76}Ge	0.117	3.5	$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 330 - 1350[107]$
^{76}Ge	0.943	61	$= 1.2 \times 10^{25}$	$= 440[103]$
^{82}Se	7×10^{-5}	0	$> 2.7 \times 10^{22}$ (68%)	$< 5000[108]$
^{100}Mo	5×10^{-4}	4	$> 5.5 \times 10^{22}$	$< 2100[109]$
^{116}Cd	1×10^{-3}	14	$> 1.7 \times 10^{23}$	$< 1700[110]$
^{128}Te	Geochem.	NA	$> 7.7 \times 10^{24}$	$< 1100 - 1500[111]$
^{130}Te	0.025	5	$> 5.5 \times 10^{23}$	$< 370 - 1900[112]$
^{136}Xe	7×10^{-3}	16	$> 4.4 \times 10^{23}$	$< 1800 - 5200[113]$
^{150}Nd	6×10^{-5}	0	$> 1.2 \times 10^{21}$	$< 3000[114]$

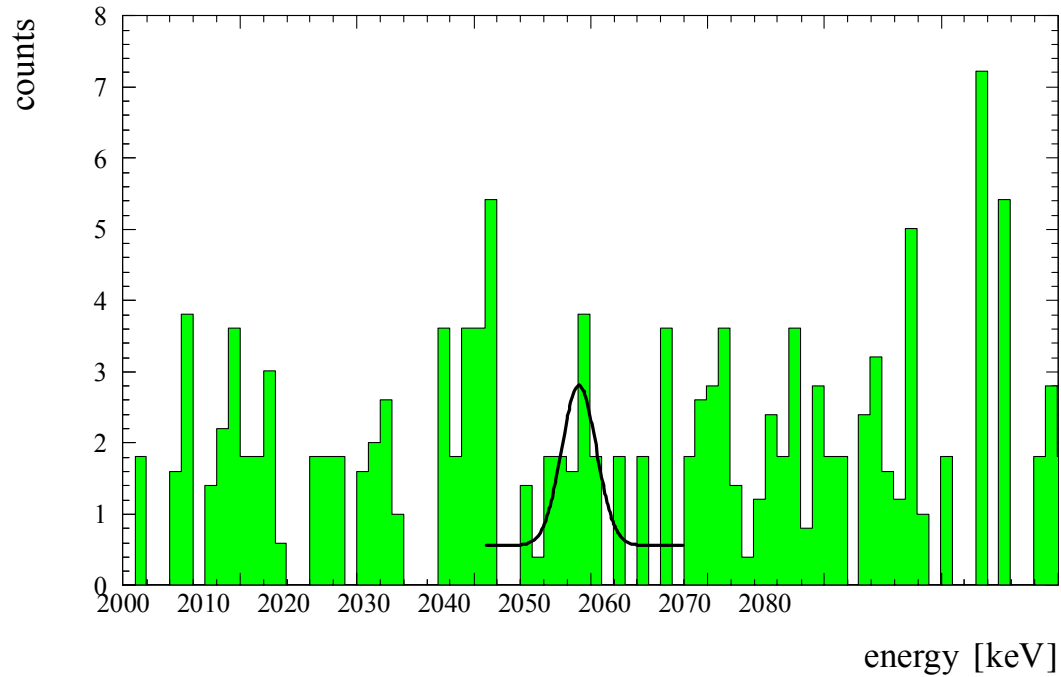


HDM (^{76}Ge)



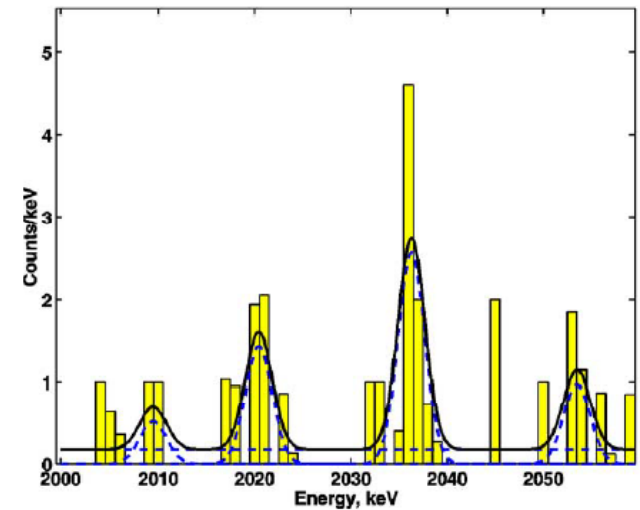
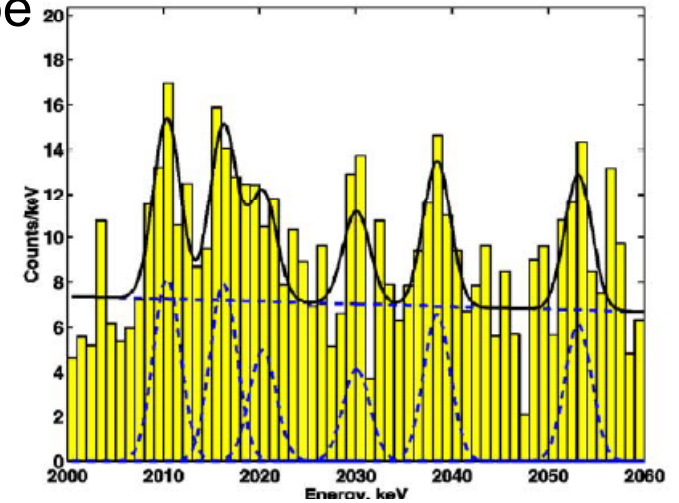
Candles

Recent reanalysis
Pulse shape



Sum energy of
2 electrons in
Ge detector

Dec/12/07 理研



NEMO3 : Neutrino Ettore Majorana Observatory

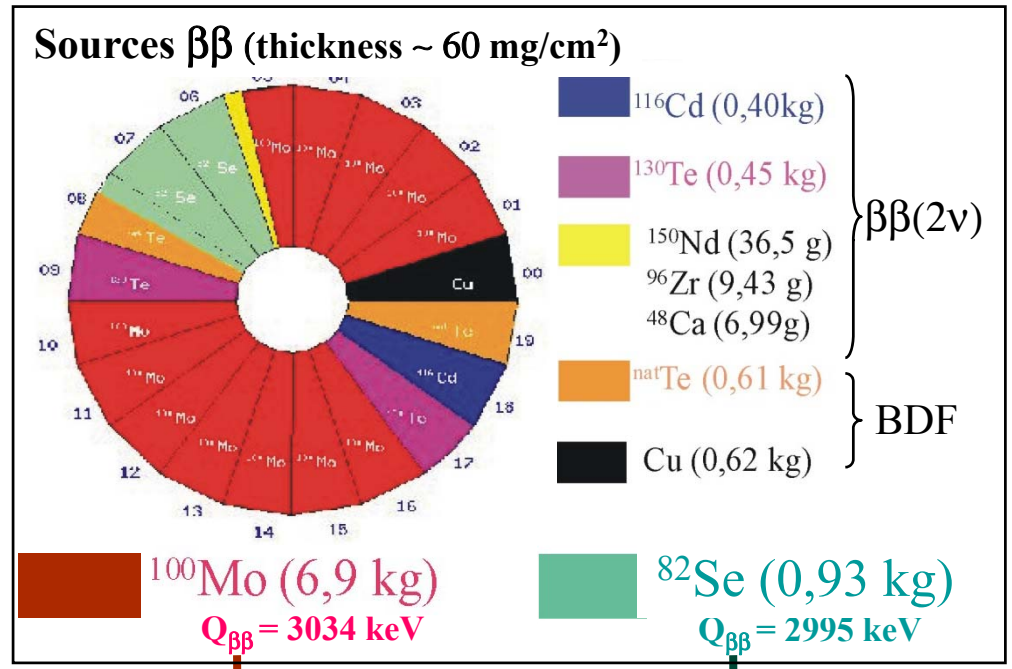
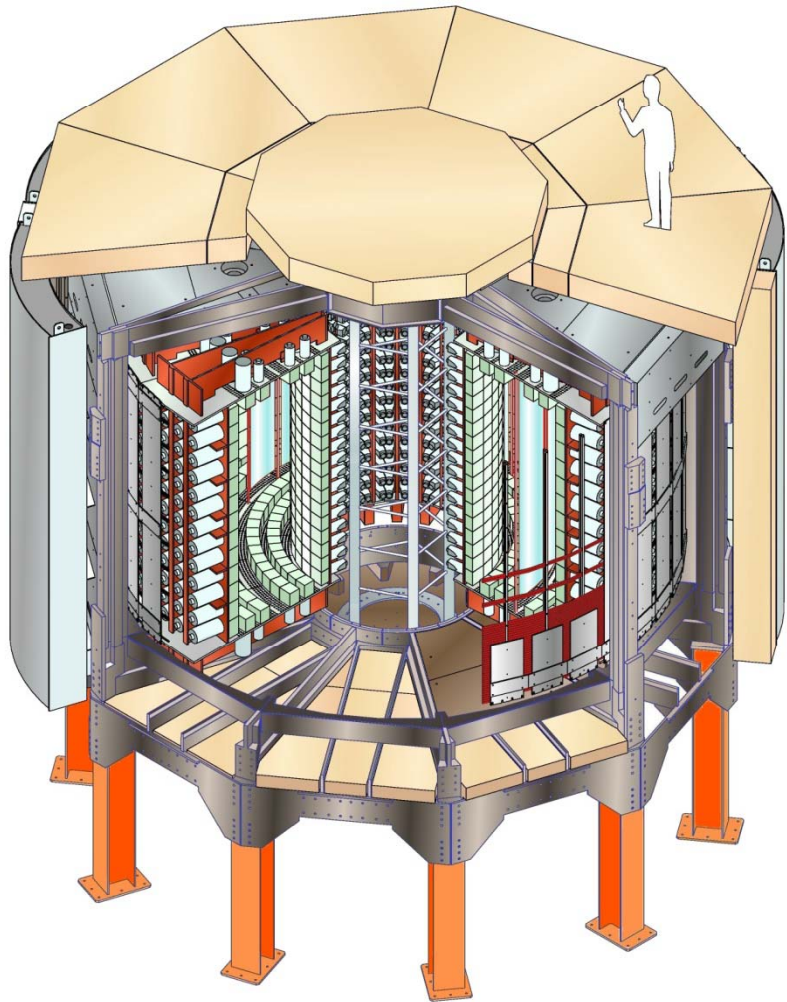
France, United-States, England, Japan, Tcheck Rep., Russia

Started taking data : Feb. 2003, duration : 5 years, Laboratoire Souterrain de Modane (4800 m.w.e)



Tracking detector (6180 Geiger cells in He+alcohol): Vertex $\sigma_t = 5$ mm, $\sigma_z = 1$ cm
Calorimeter (1940 plastic scintillators – PMTs low radioactivity) FWHM=14% (1 MeV)
Bkg: gamma + neutrons shield, **magnetic field**, materials low radioactivity

Candles



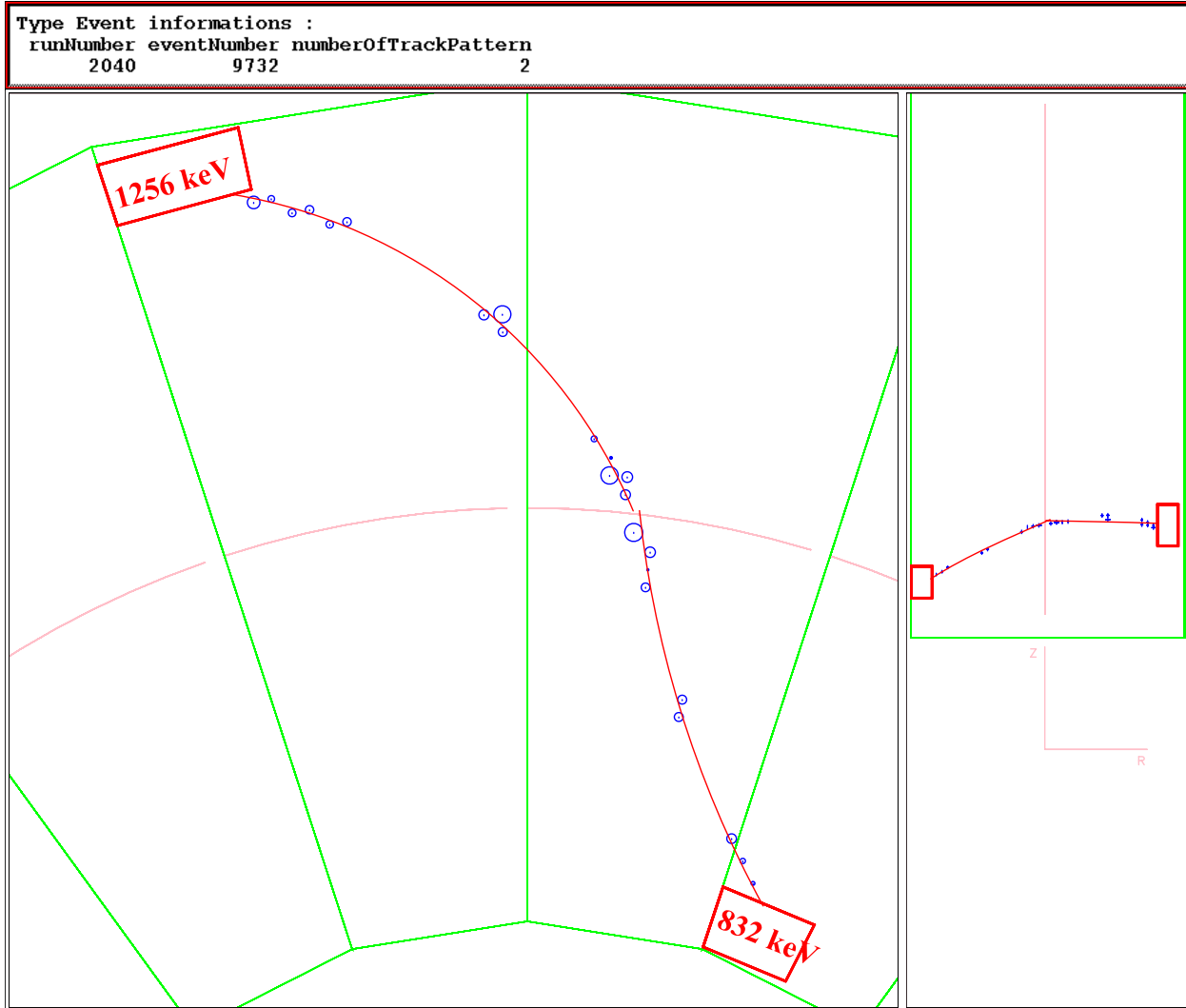
$N_{\text{Bkg}} = 0,2 \text{ evts y}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
 $T_{1/2}^{0\nu} > 8 \cdot 10^{24} \text{ y}$
 $\langle m_\nu \rangle < 0,1 - 0,3 \text{ eV}$
 (90% C.L.)

$N_{\text{Bkg}} = 0,02 \text{ evts y}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
 $T_{1/2}^{0\nu} > 1,5 \cdot 10^{24} \text{ y}$
 $\langle m_\nu \rangle < 0,45 - 1,2 \text{ eV}$
 (90% C.L.)

$\beta\beta$ EVENT OBSERVED BY NEMO-3...



Candles



$$E_1 + E_2 = 2088 \text{ keV}$$

$$(\Delta t)_{\text{mes}} - (\Delta t)_{\text{theo}} = 0.22 \text{ ns}$$

$$(\Delta \text{vertex})_{\perp} = 2.1 \text{ mm}$$

$$(\Delta \text{vertex})_{\parallel} = 5.7 \text{ mm}$$

$\beta\beta_{2\nu}$ event

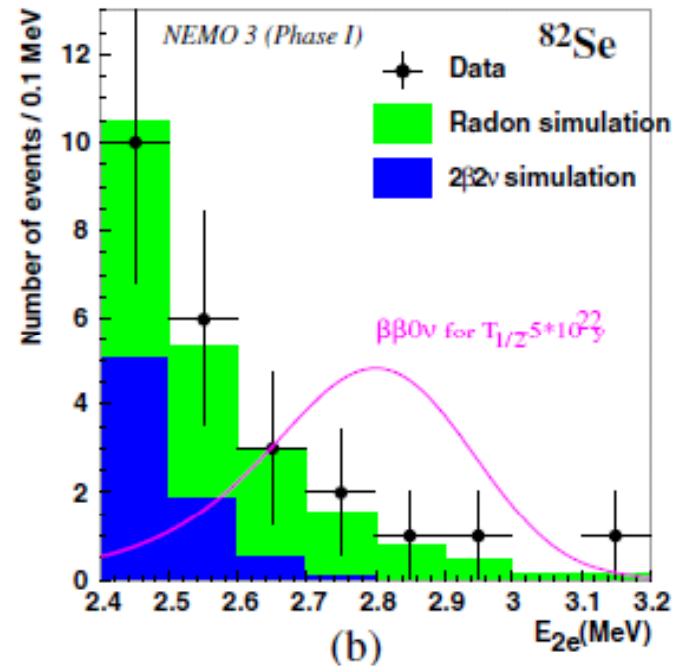
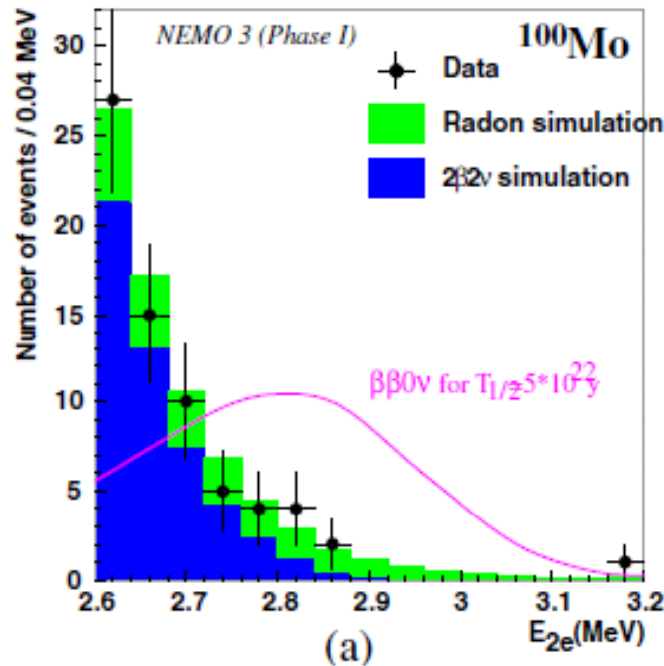
NEMO 3



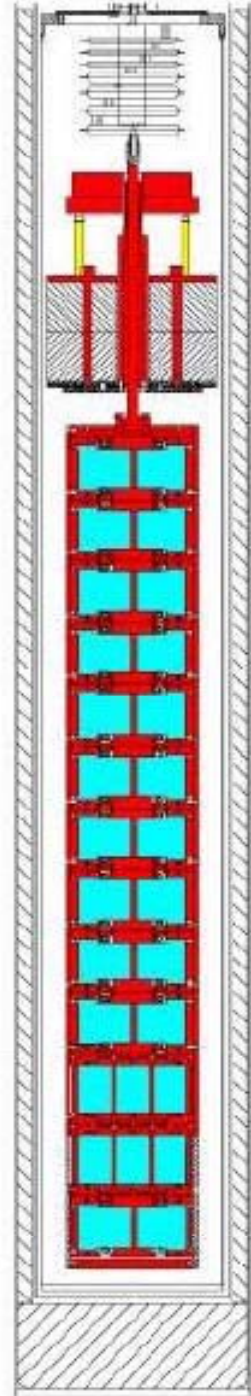
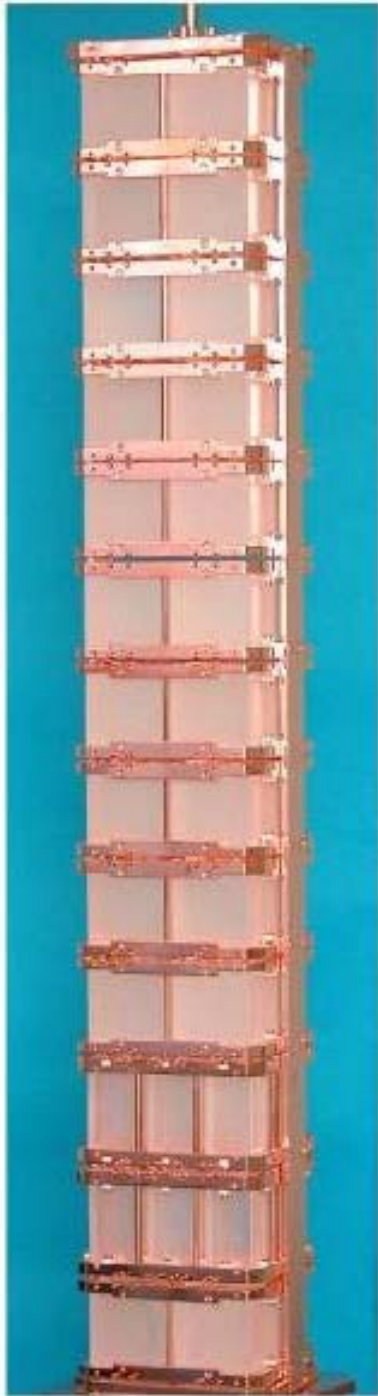
PRL **95**, 182302 (2005) Candles

$> 4.6 \times 10^{23}$ yr

$> 1.0 \times 10^{23}$ yr

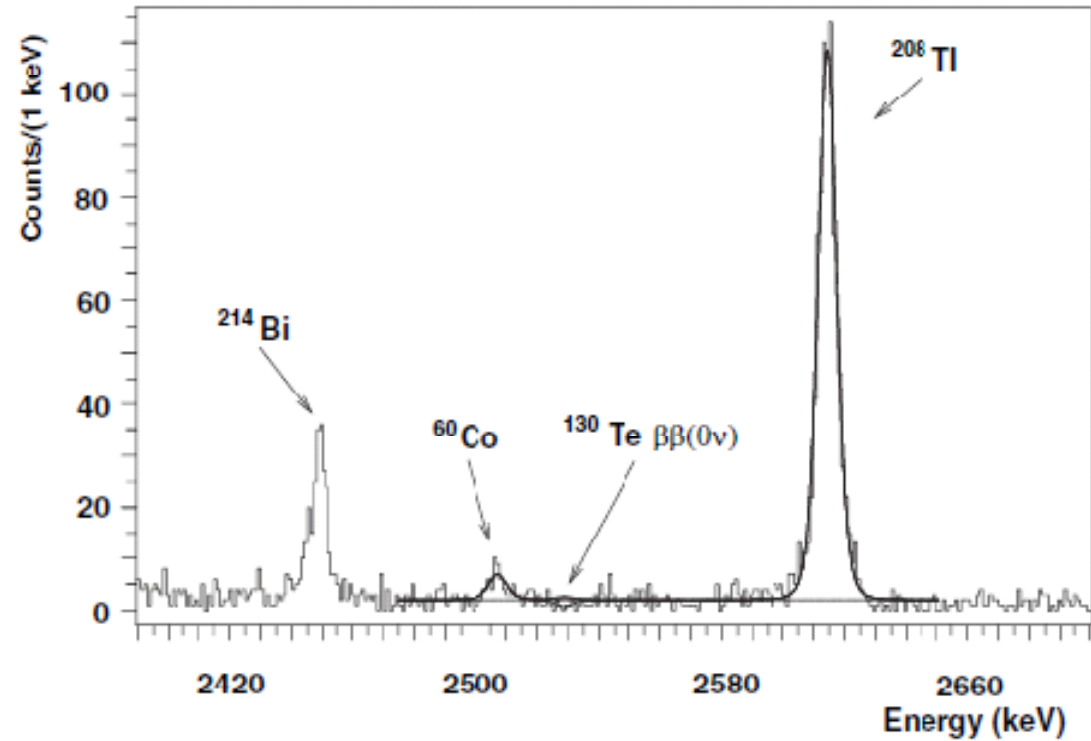


Nuclear matrix elements	^{100}Mo	^{82}Se
Shell model	Caurier 1996 [15]	< 4.9
QRPA	Rodin 2005 [16]	$< 2.7\text{--}2.8$
QRPA	Simkovic 1999 [17]	< 1.0
QRPA	Suhonen 2003 [18,19]	< 1.1
QRPA	Stoica 2001 [20]	$< 0.7\text{--}1.1$



CUORICINO

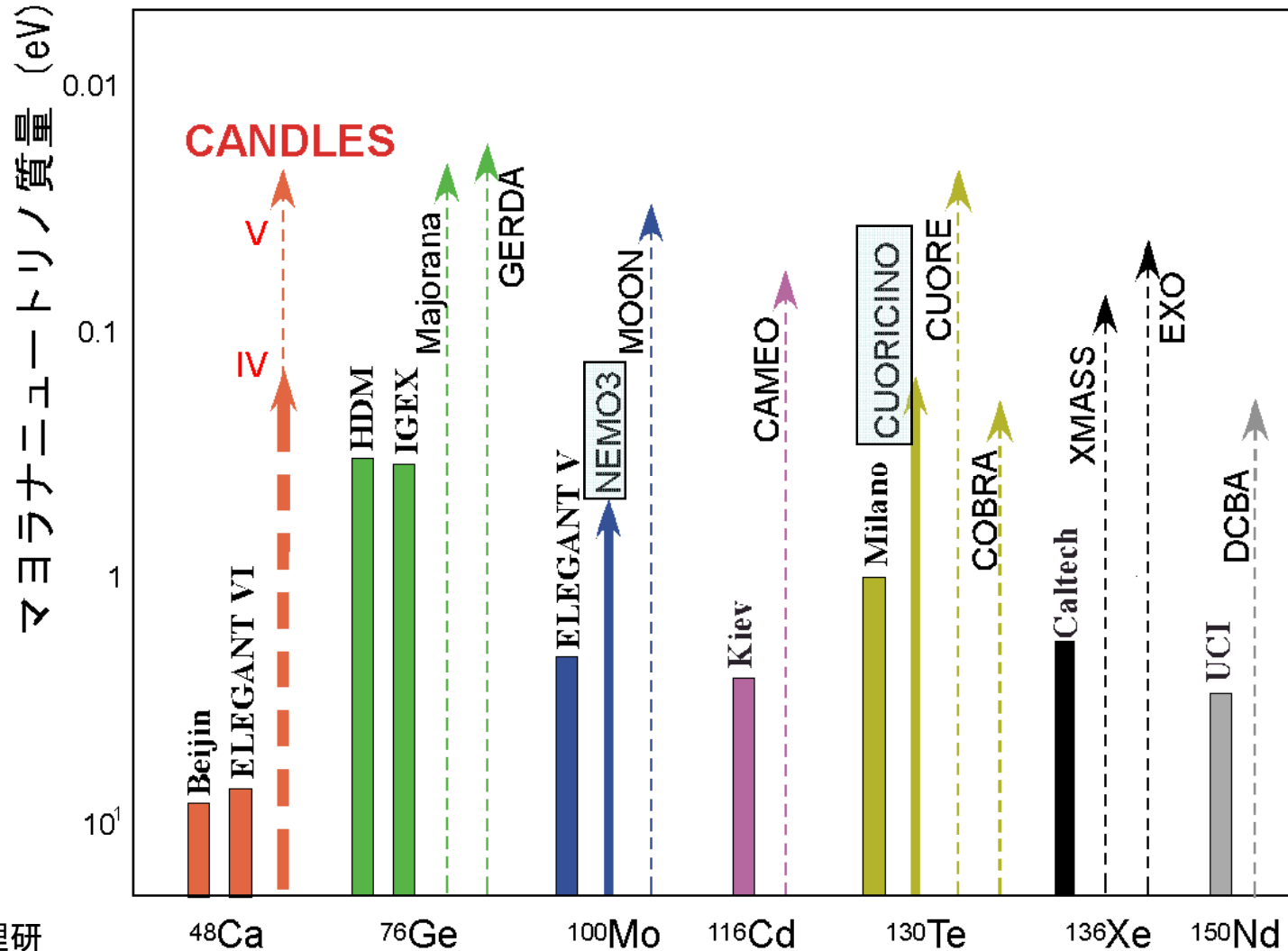
PRL **95**, 142501 (2005) Candles



$$m_\nu < 0.2 - 1.05 \text{ eV}$$

Bolometer TeO_2

世界の実験グループの目標値と CANDLES





阪大理での研究

- ELEGANTS III ^{76}Ge (source = det.)
 - Solid state detector
- ELEGANTS V ^{100}Mo (source \neq det.)
 - Plastic scint. + chamber
 - MOON (Nomachi)
- ELEGANTS VI ^{48}Ca (source = det.)
 - $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ scintillator
- **CANDLES** ^{48}Ca (CaF_2 in Liquid scintillator)

なぜ ^{48}Ca



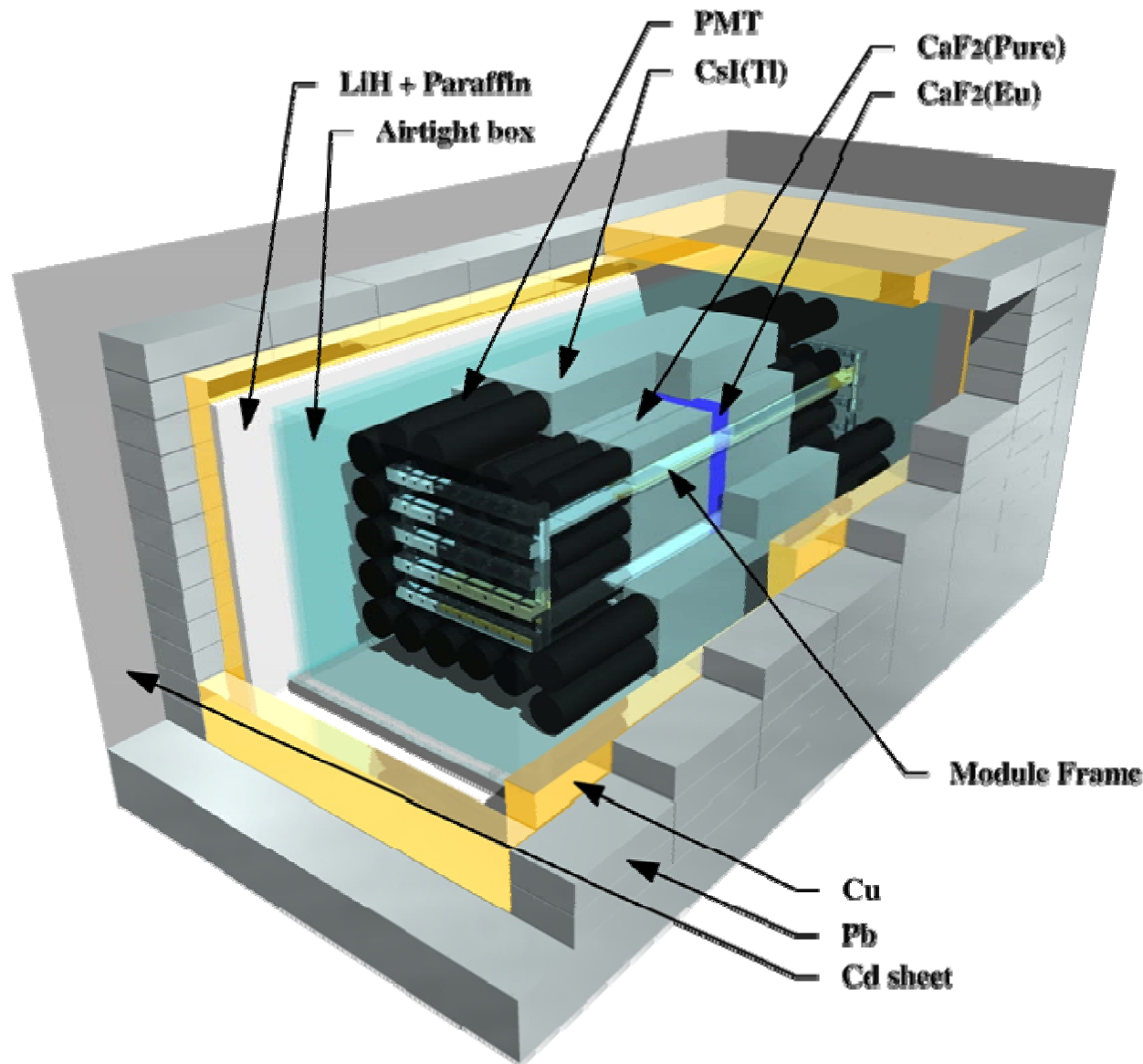
Candles

- Q値が最大 4.27 MeV(次の ^{150}Nd は3.3 MeV)
 - 崩壊率が大きい(核行列要素の不定性はあるが)
 - BGが少ない(自然放射線; γ : 2.6 MeV, β : 3.3 MeV)
- 自然存在比 \rightarrow 0.187%
 - 濃縮同位元素 \rightarrow 高価 (no Gas)
 - $\sim 10\text{g} \times 2$ (in the world)
- 初期の研究 (最近は濃縮同位元素のある核)
- 次世代
 - $M_\nu \sim T^{-1/2} \sim M^{-2}$ (BG無ければ)
 - $\sim M^{-4}$ (BG limited なら)
 - ^{76}Ge experiment (BG が見えている)
 - ^{48}Ca (no BG) 大きなQ値.

ELEGANT VI



Candles



遮蔽

- ・ γ 線
銅、鉛
- ・中性子
パラフィン
LiH, Cd
- ・ラドン
気密箱

活性遮蔽(ベトー)

- ・CsI
- ・roll off ratio

大塔コスモ観測所

Oto Cosmo Observatory

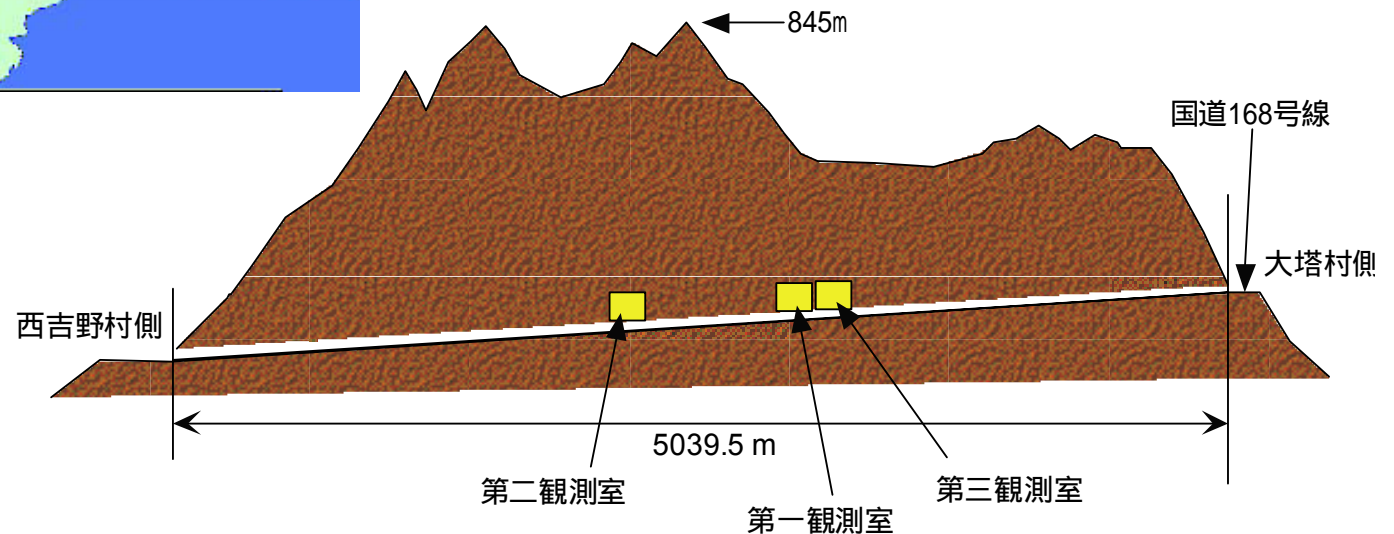
Candles



tunnel constructed for railroad (but not used)

470m (1.3 km water equivalent) shield

旧国鉄の五新線(奈良県五條市～和歌山県新宮市)用の鉄道トンネルだが、結局線路は敷かれず。



地下実験室(トンネル内)

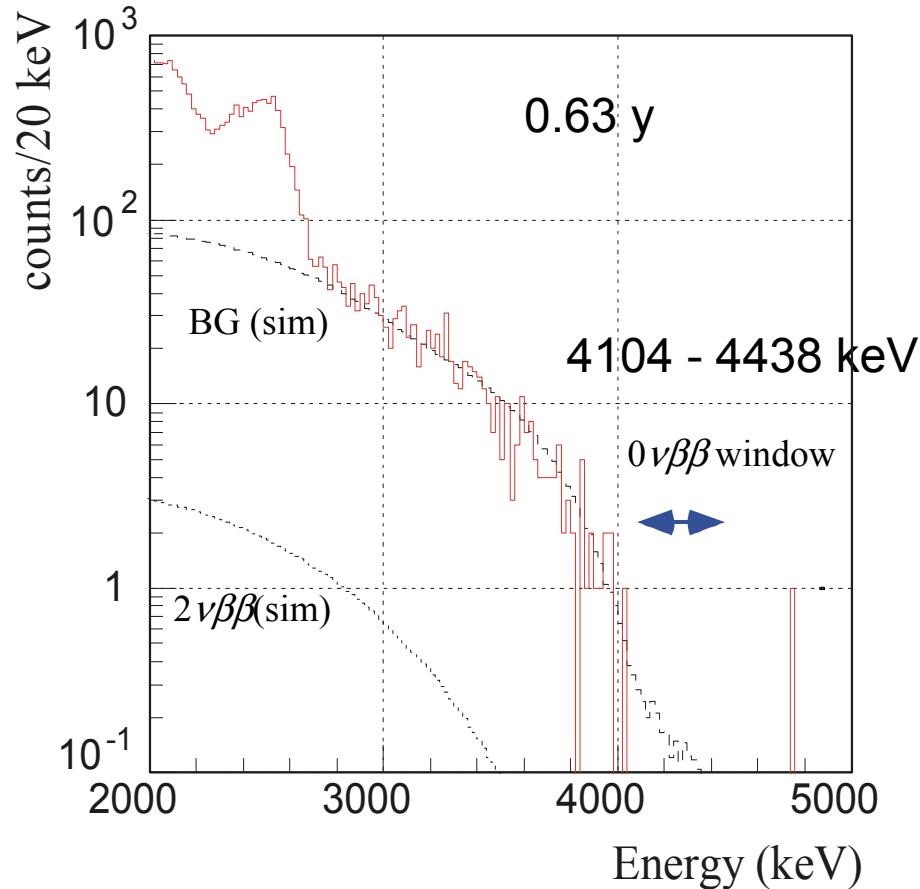


Candles



Dec/12/07/ 理研

^{48}Ca の2重ベータ崩壊 ELEGANT VI

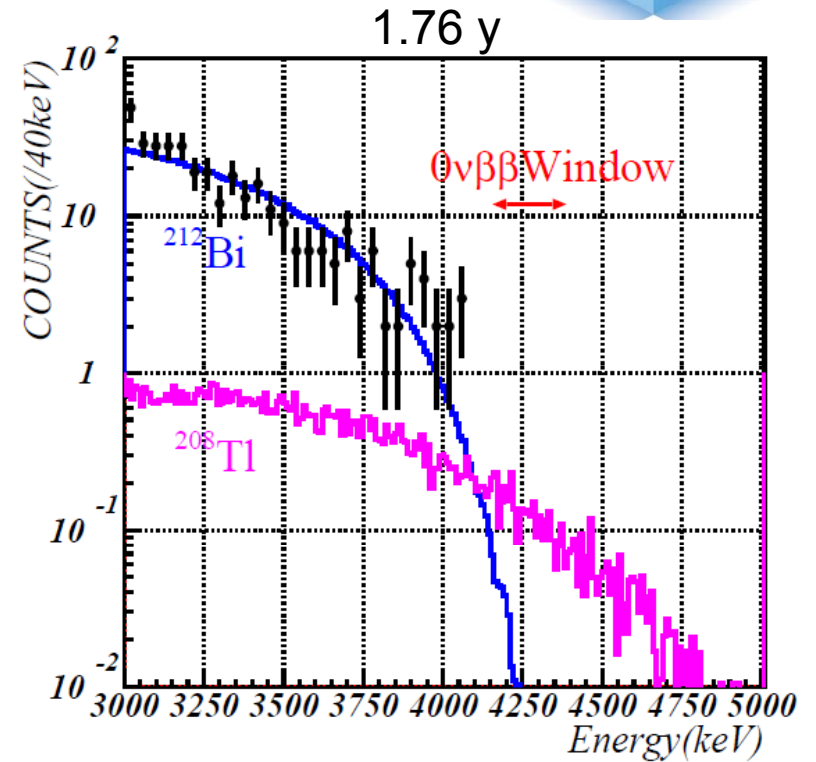


$$T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.4 \times 10^{22} \text{ year (90\% C.L.)}$$

$$\langle m_\nu \rangle < 7.2 \sim 44.7 \text{ eV (90\% C.L.)}$$

Dec/12/07/ 理研

NPA 730 '04, 215



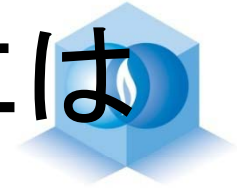
Yet no BG

$$\langle m_\nu \rangle < 3.5 \sim 21.7 \text{ eV (90\% C.L.)}$$

Not limited by backgrounds

But only 6.4g of ^{48}Ca 36

$m_\nu = 1 \sim 10^{-2} \text{eV}$ まで探索するには



Candles

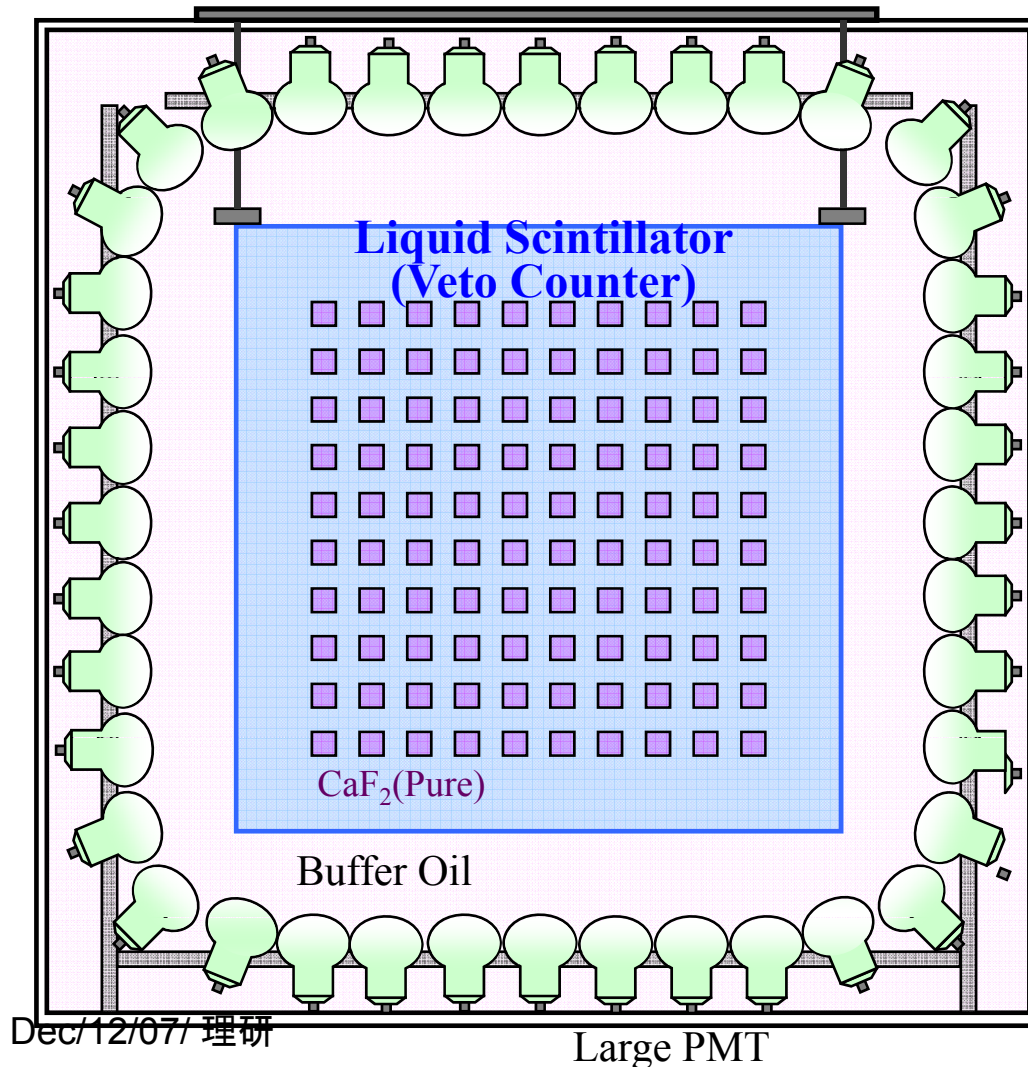
- 大型検出器
 - Huge amount of materials
- 低放射性バックグラウンド
 - 遮蔽(Active and Passive)
 - 低バックグラウンド材料
 - 信号処理による低バックグラウンド化
- 高分解能
 - $2\nu\beta\beta$ 空のバックグラウンド

• **CANDLES** is our solution

CANDLES



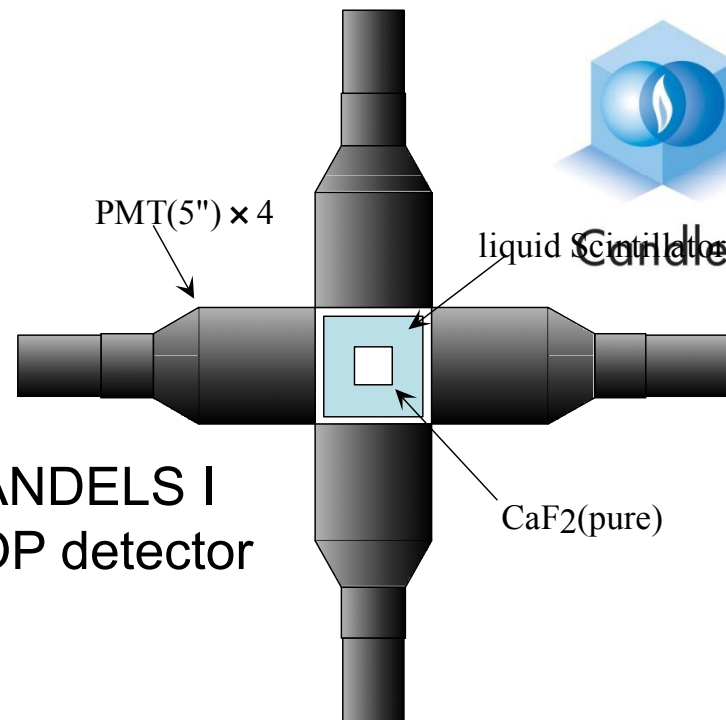
Calcium fluoride for studies of Neutrino and Dark matters
by Low Energy Spectrometer



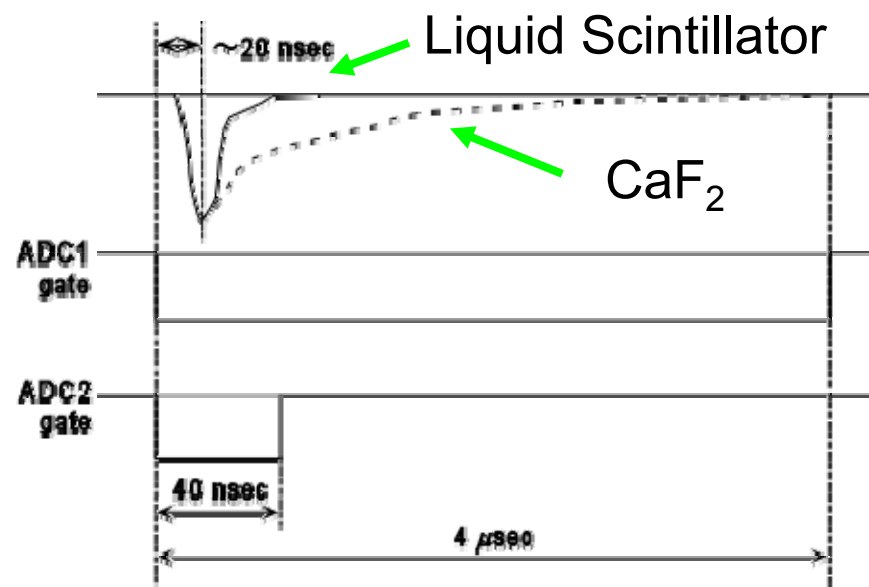
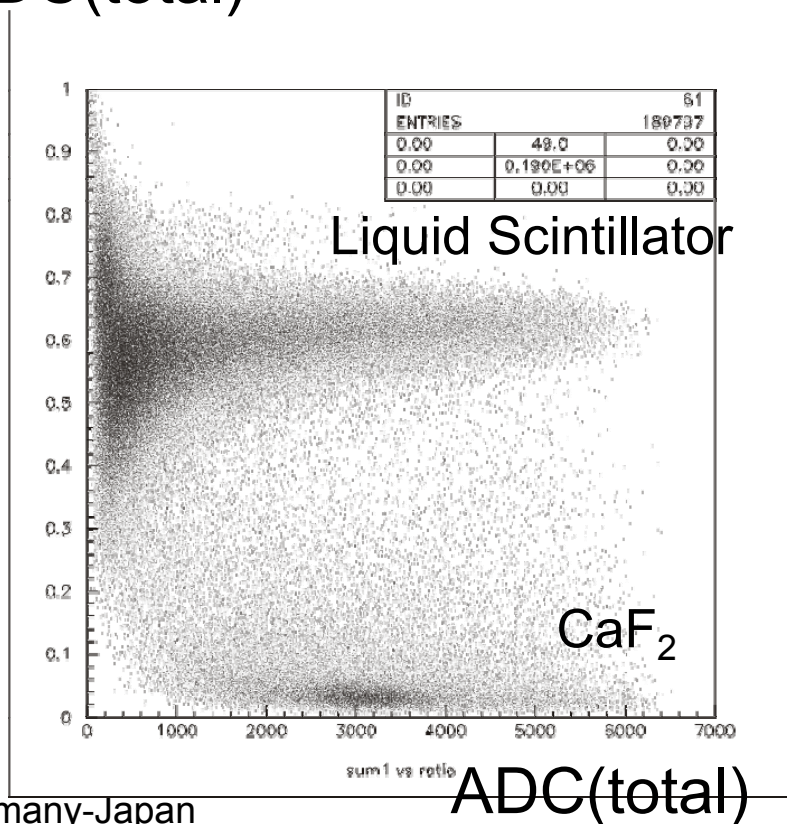
- ✦ **CaF₂(Pure)**
200kg, 300kg, 3t, 100t
⁴⁸Ca (Q_{ββ}=4.27MeV)
- ✦ **Liquid Scintillator**
Wave Length Shifter
4 π Active Shield
Passive shield
- ✦ **Photomultiplier**
energy resolution

CANDLES IV

CANDLES I (POP) Rejection of ext. BG



$\frac{\text{ADC}(\text{fast})}{\text{ADC}(\text{total})}$



バックグラウンド @ Q 値

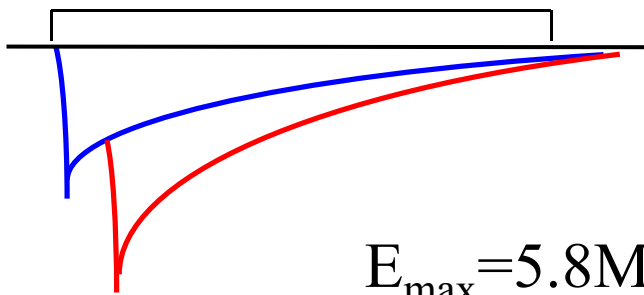


Candles

- No radioactive backgrounds @ ~ 4 MeV
 - $\gamma \sim 2.6$ MeV, $\beta \sim 3.3$ MeV, $\alpha \sim 2.5$ MeV (quench)
- Successive decay of $\alpha \beta \gamma$
 - $\sim 1 \mu\text{sec}$ decay time

Pulse shape

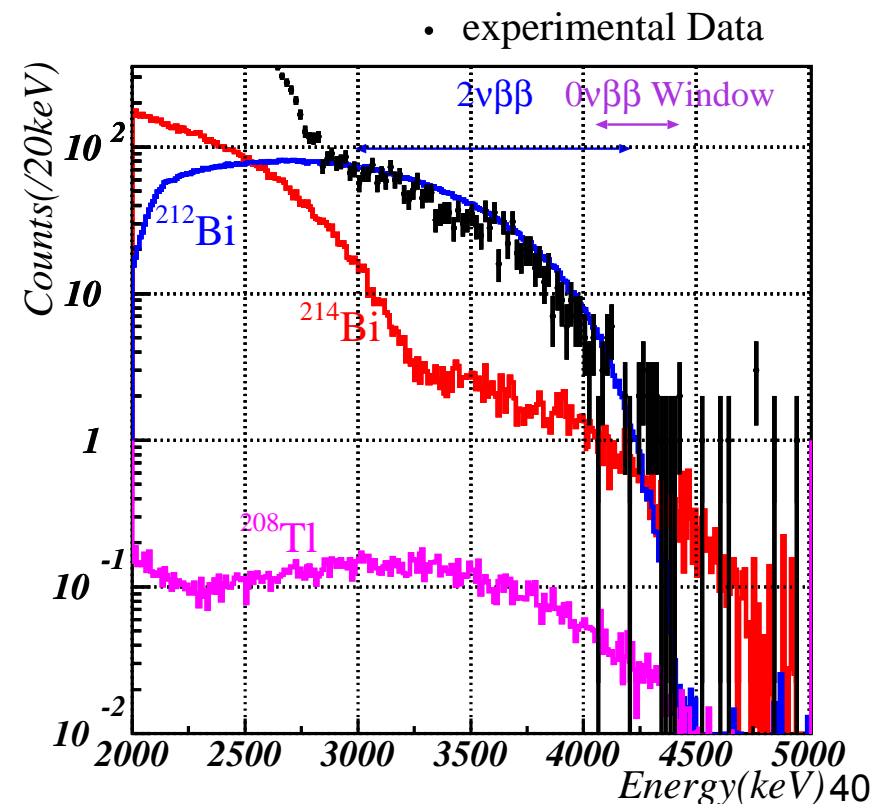
Gate width ($4 \mu\text{sec}$)



$E_{\text{max}} = 5.8 \text{ MeV (U)}$
 5.3 MeV (Th)

$\beta + \alpha$

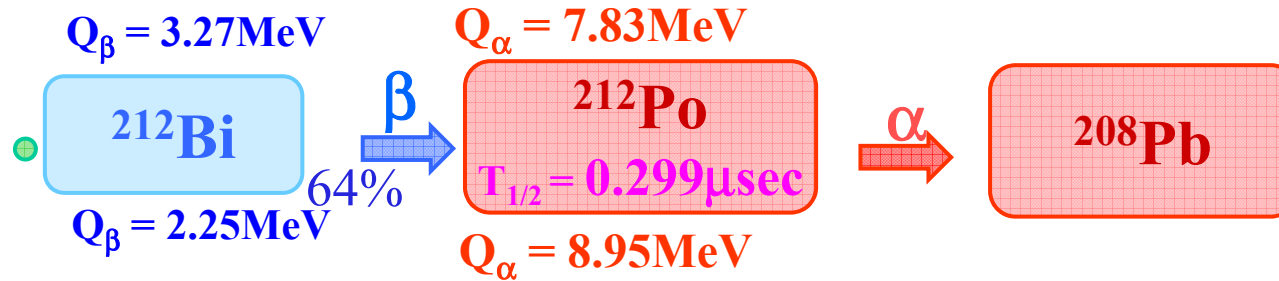
Dec/12/07/ 理研



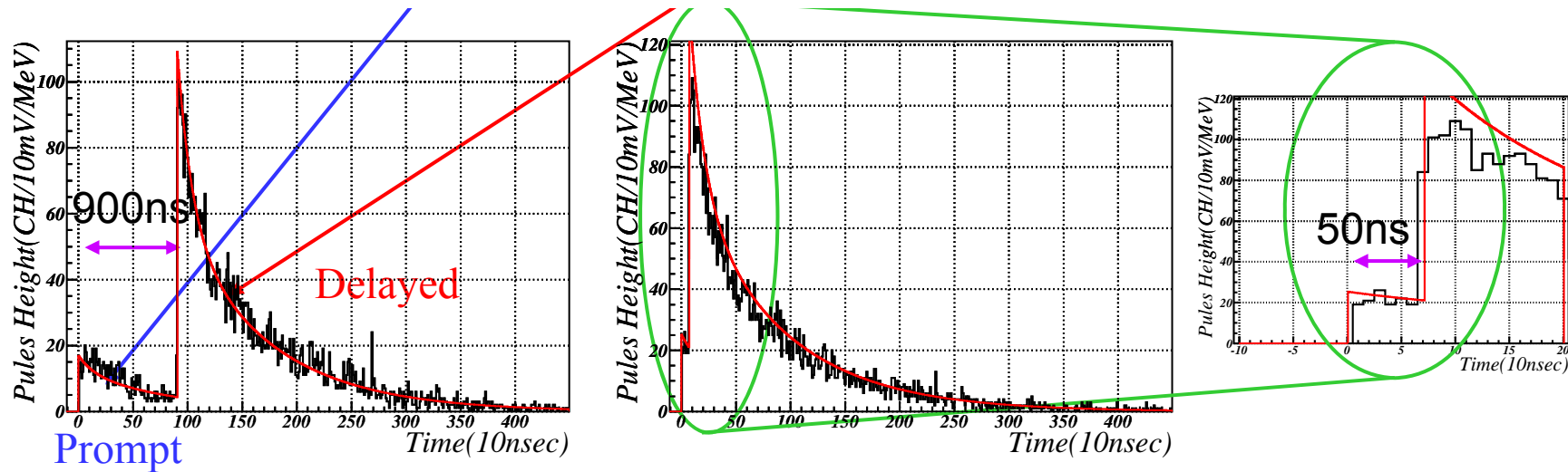
連続する崩壊



Candles



Typical Pulse Shape(100MHz FADC)



Reduction

100MHz FADC $\Delta T > 30\text{ns}(3\text{ch})$; $\sim 3\%$

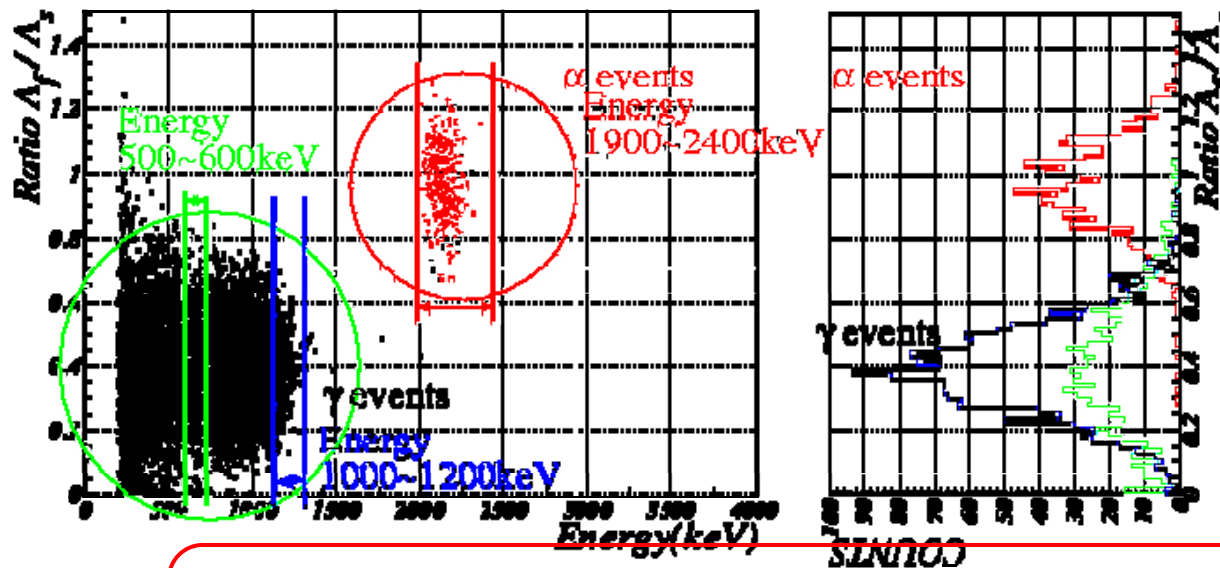
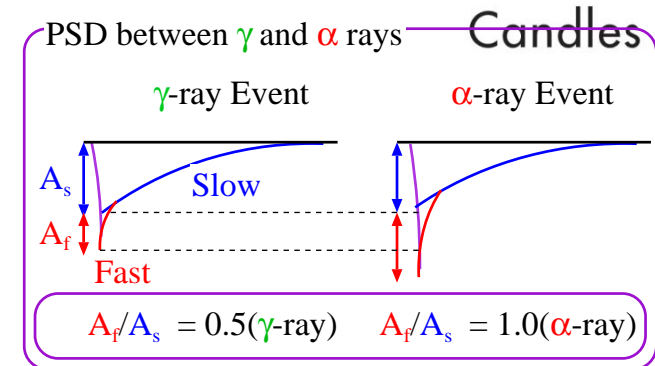
500MHz FADC (under preparation) ... $\Delta T > 5\text{ns}$; $\sim 1\%$

信号の形での弁別



Difference in decay time
between α and γ rays

- PSD (Event by Event)
 - FADC (100MHz)
 - A_{fast}/A_{slow} (Fast and slow component)



Discrimination between α and $\gamma(\beta)$ Events
Background Reduction $\sim 0.3\%$

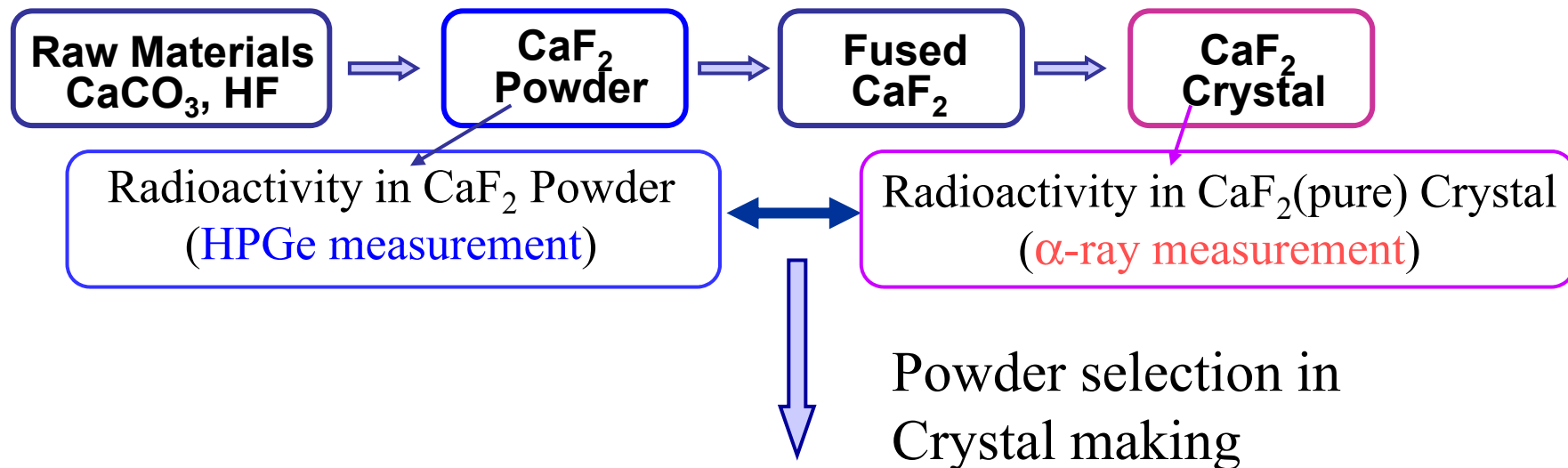
低バックグラウンド CaF_2 結晶



Candles

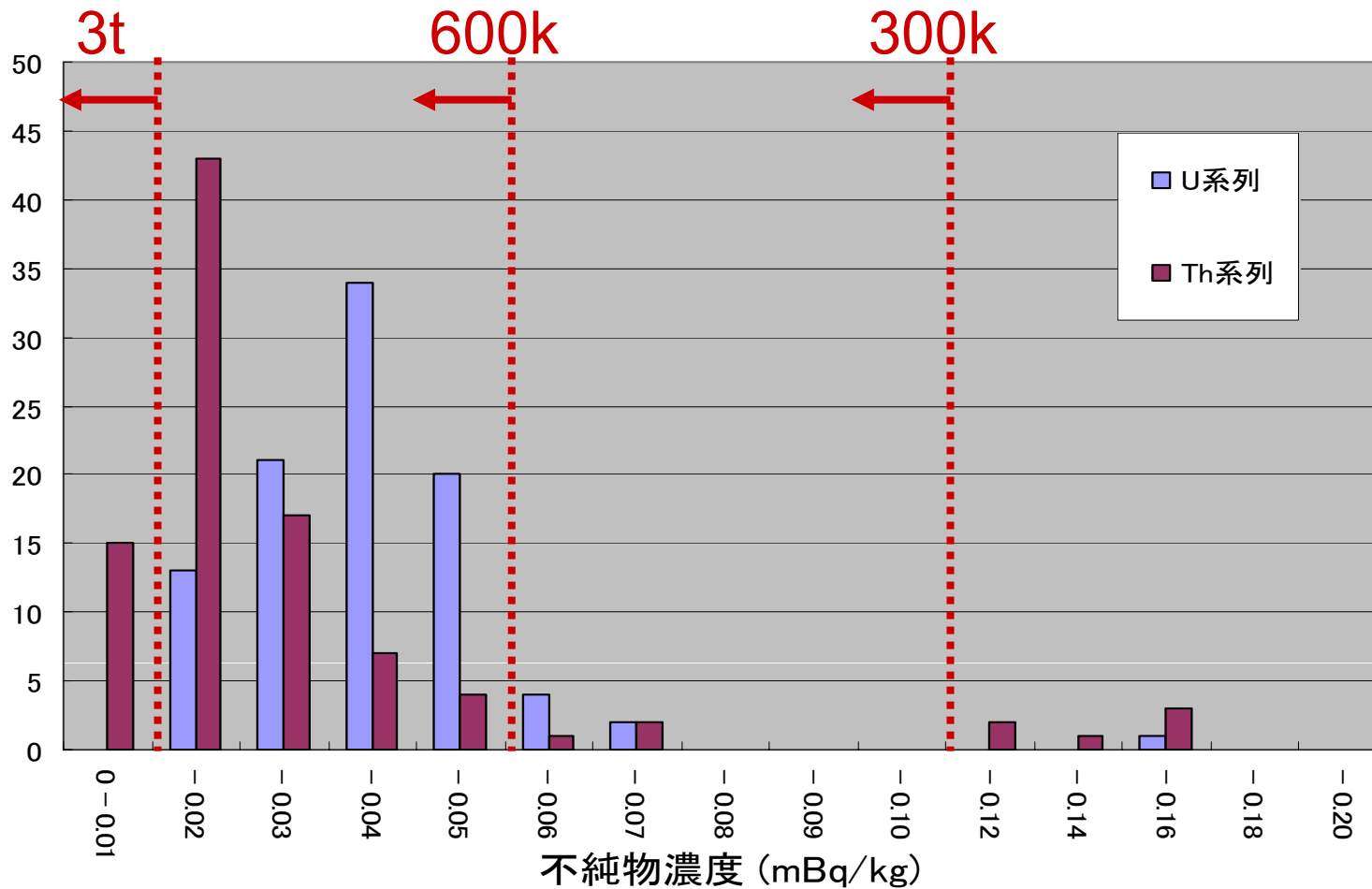
$\text{CaF}_2(\text{Eu})$ in ELEGANT VI
U-chain(^{214}Bi) : 1100 $\mu\text{Bq/kg}$
Th-chain(^{220}Rn) : 98 $\mu\text{Bq/kg}$

結晶成長過程の見直し

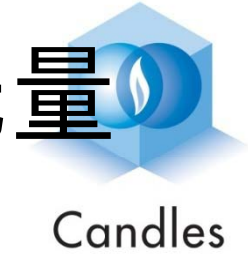


U-chain(^{214}Bi) ~41 $\mu\text{Bq/kg}$. . . 1/25 of Previous Crystals
Th-chain(^{220}Rn) ~21 $\mu\text{Bq/kg}$. . . 1/5 of Previous Crystals

放射性不純物濃度



CaF₂(pure)のシンチレーション光量 (分解能)



1/3 ~ 1/4 of CaF₂(Eu) (石英窓 PMT)

発光波長中心 U.V. region (275 nm)

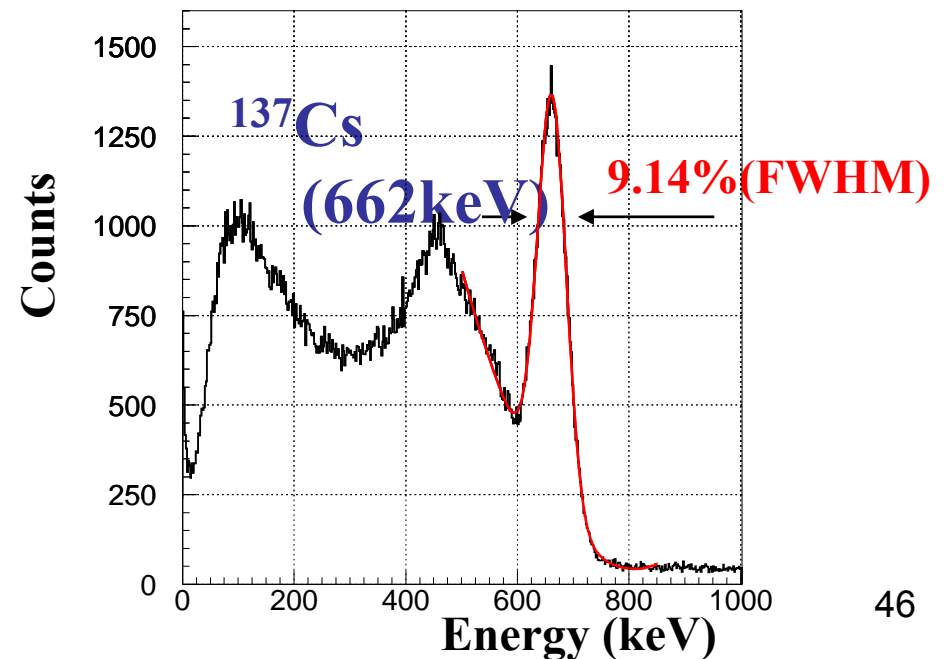
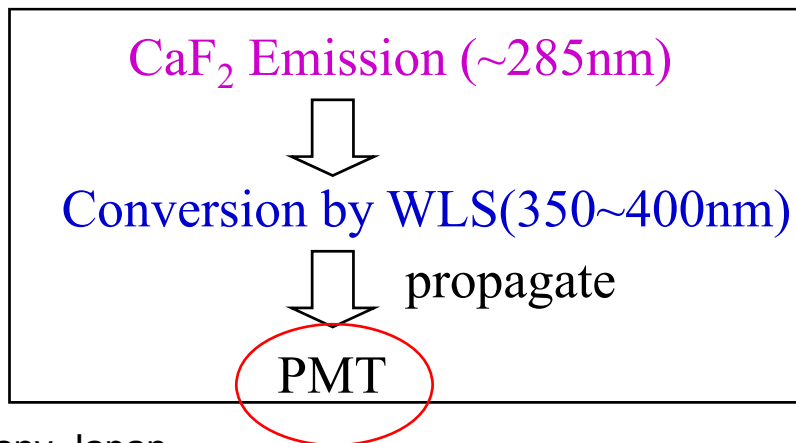
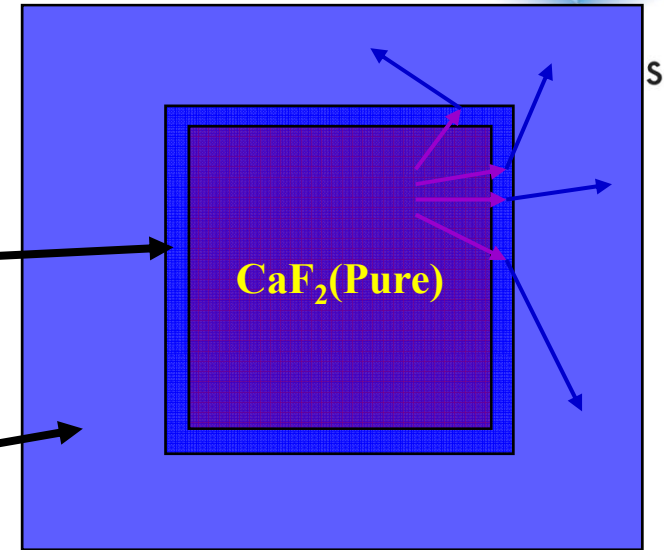


- 波長変換材 in liquid scintillator
 - 可視光 (match PMT sensitivity)
- 光量の増大(Light yield)

Energy resolution and BG rejection (2 phase)



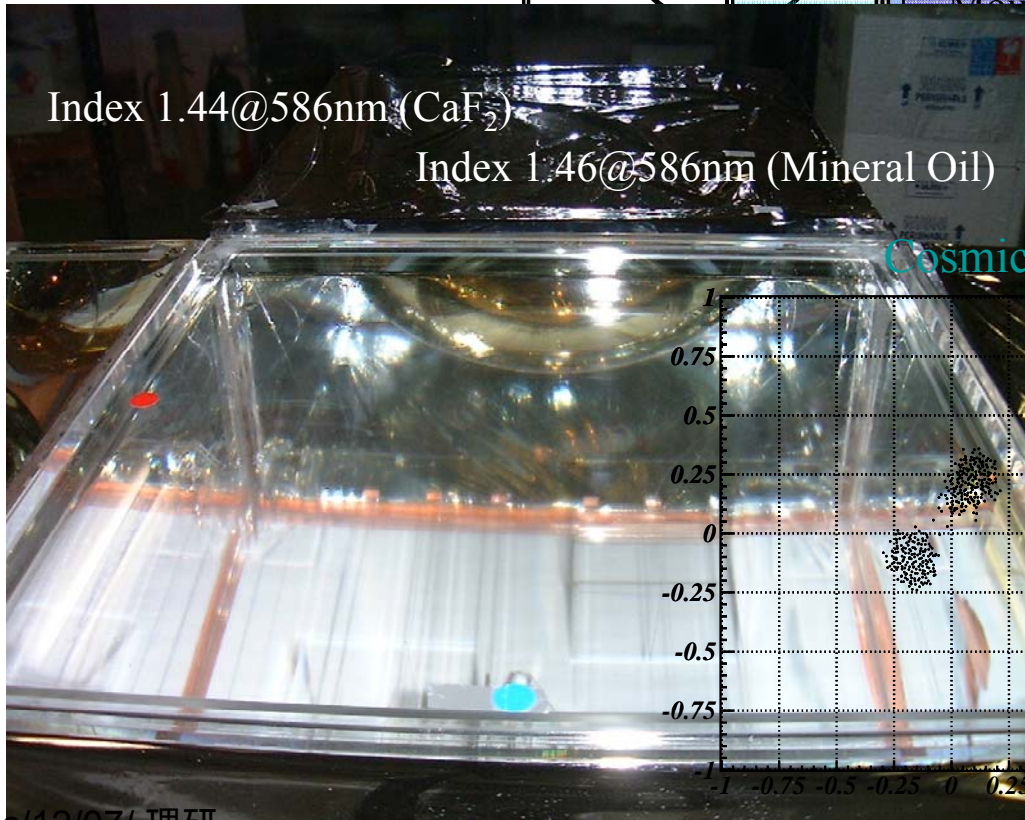
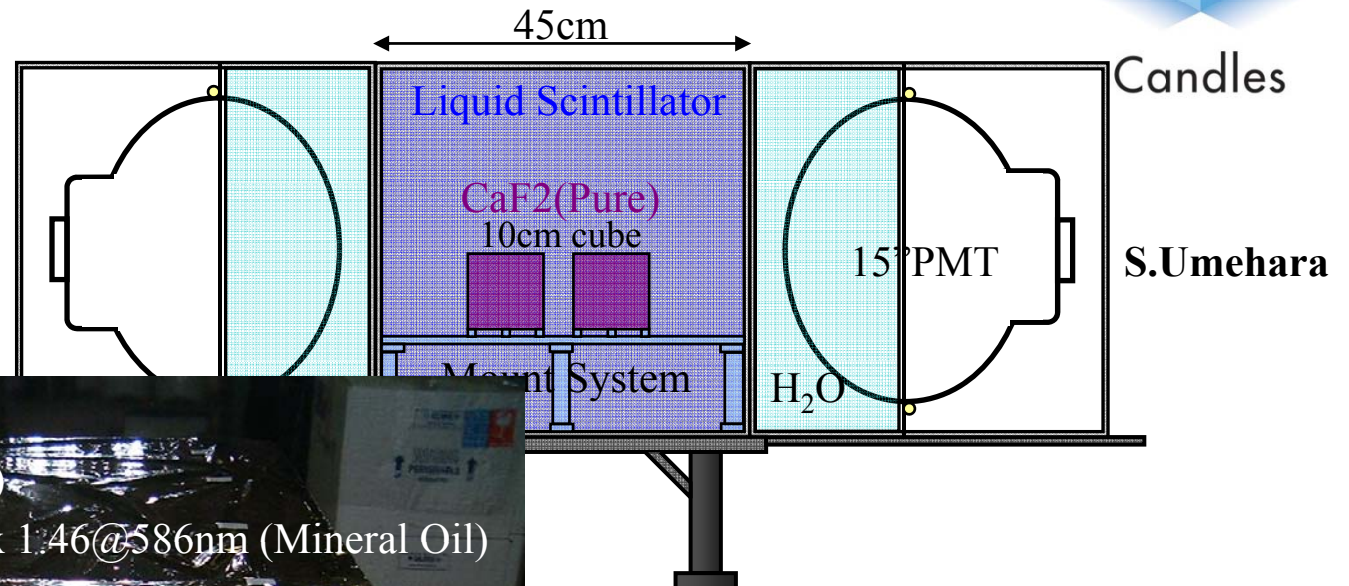
- CaF_2 : UV region (PMT)
- Conversion layer
 - UV \rightarrow visible (PMT)
 - UV transparent
- Veto layer
 - Liq scint: absorb UV



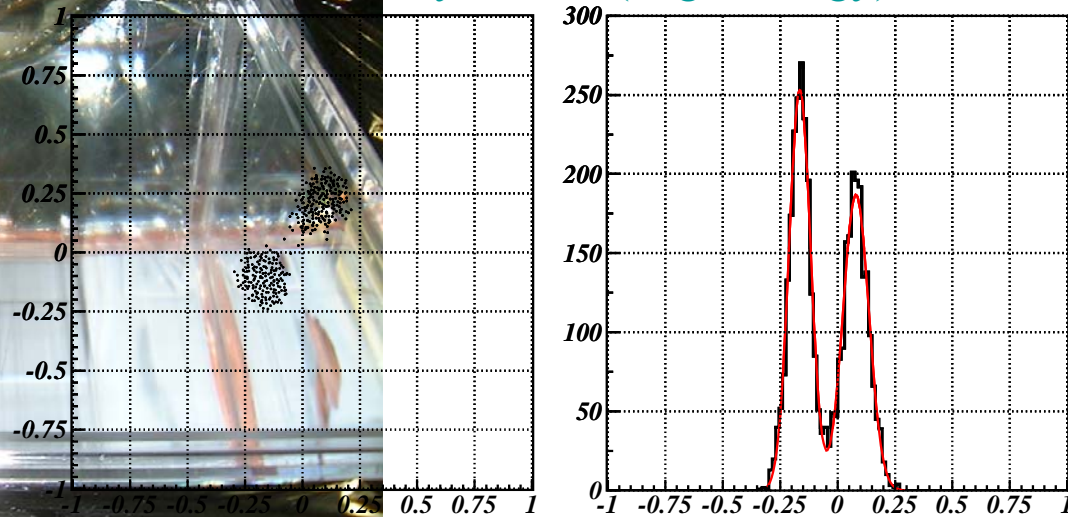
CANDLES-II



- Prototype



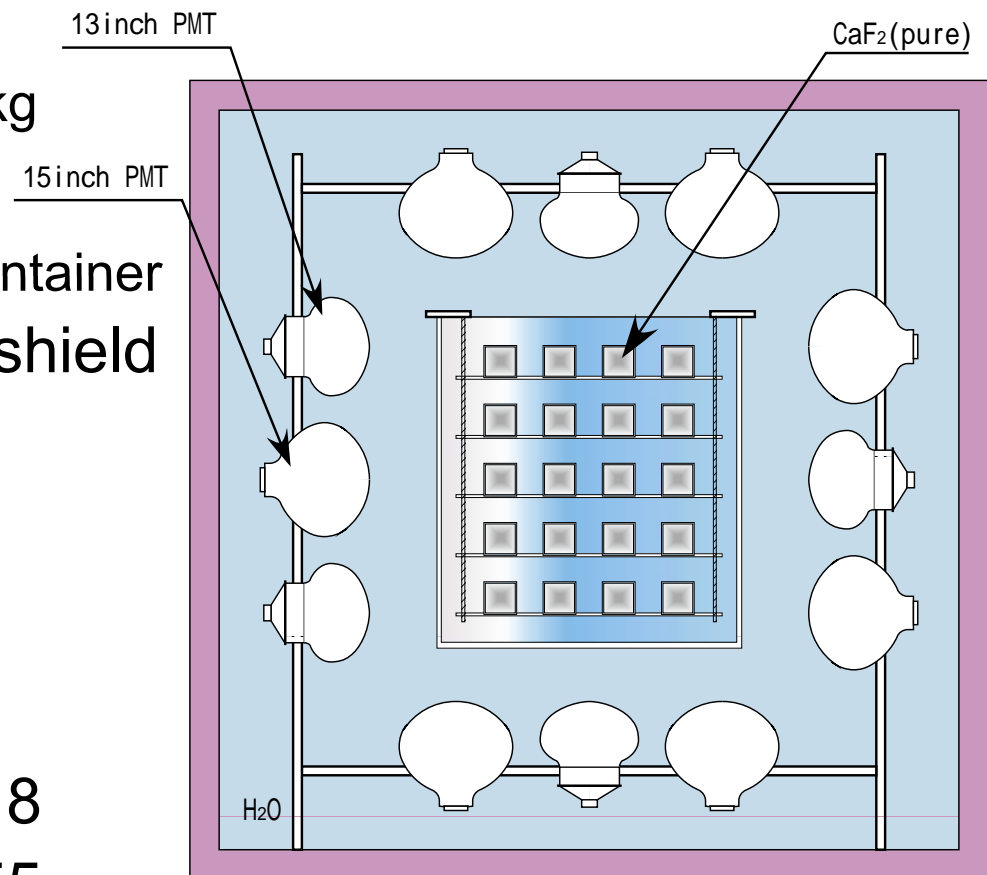
Cosmic-ray Events (High Energy)



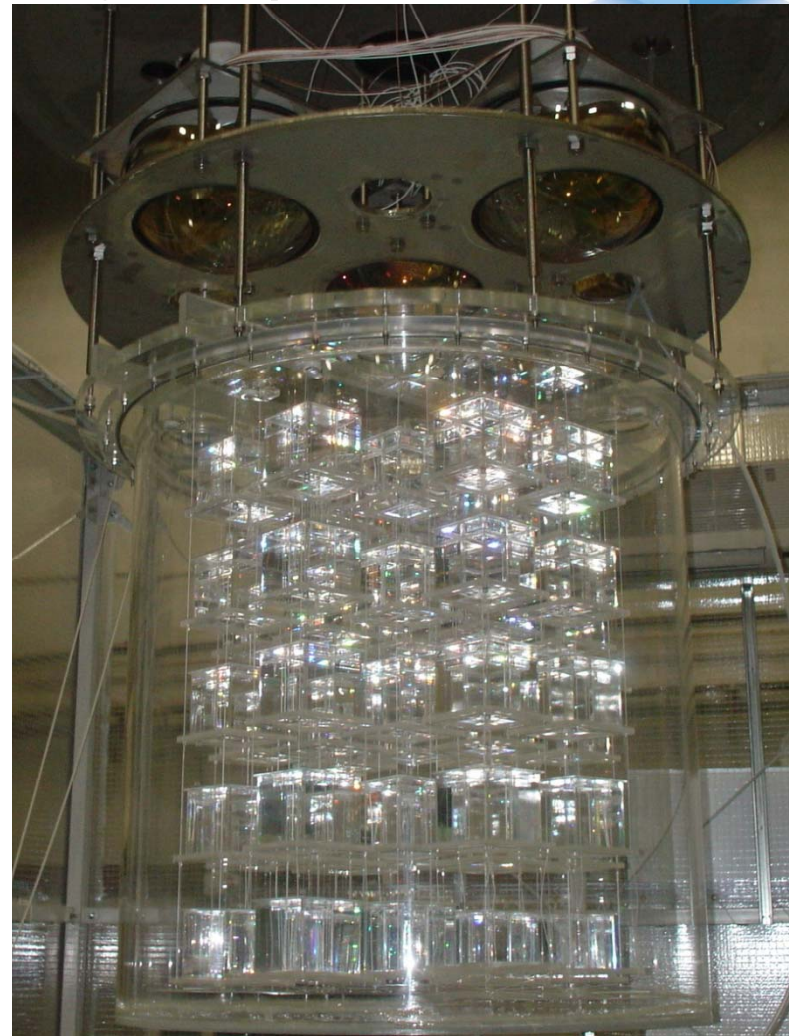
CANDLES III



- 阪大理で建設
- CaF_2 (pure)
 - $10^3 \text{ cm}^3 \times 60$ crystals
 - total weight : 191 kg
- 液体シンチレーター
 - $\phi 1000 \times h 1000$ acrylic container
 - H_2O Buffer passive shield
 - $\phi 2800 \times h 2800$
 - safety regulation
- 純化装置
- PMTs
 - 15” PMT ($\times 19$) : R2018
 - 13” PMT ($\times 29$) : R8055



CANDLES III (prototype)



Dec/12/07/ 理研

$\phi 2800 \times h 2600$

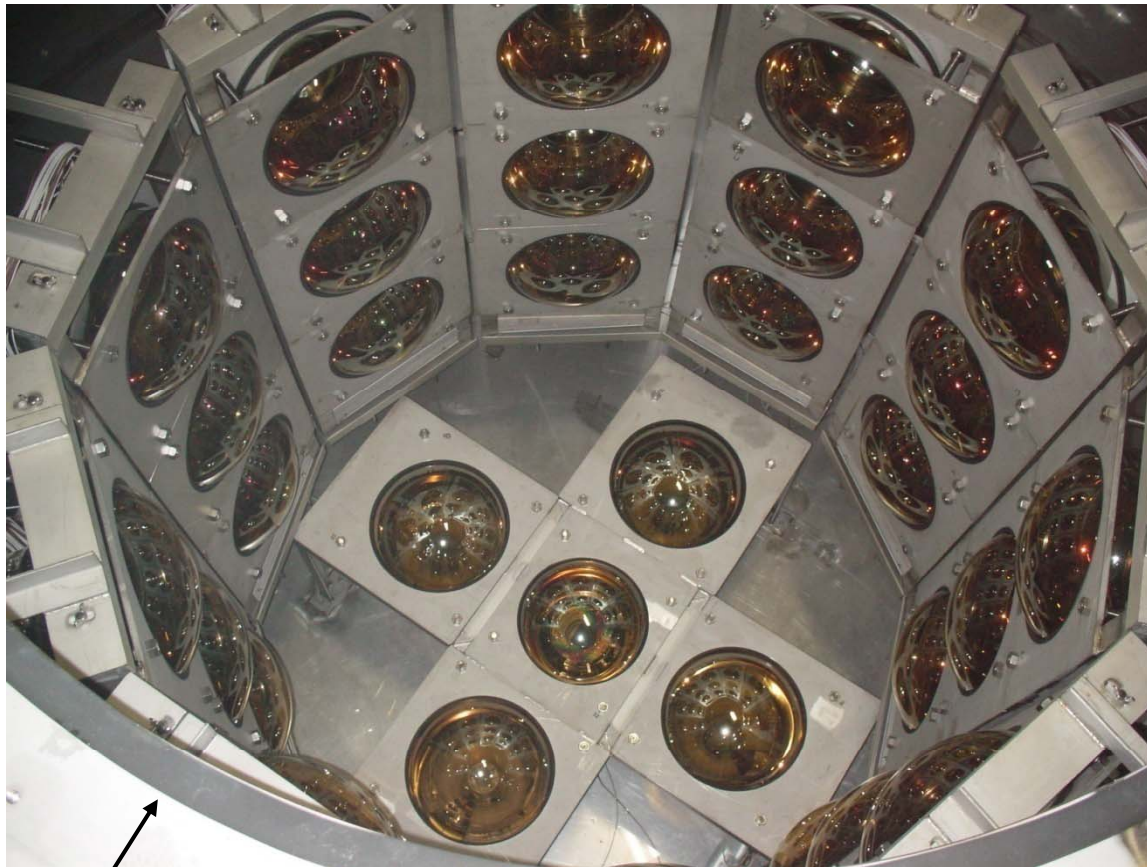
$10\text{cm}^3 \times 56 \text{CaF}_2$

CANDLES III



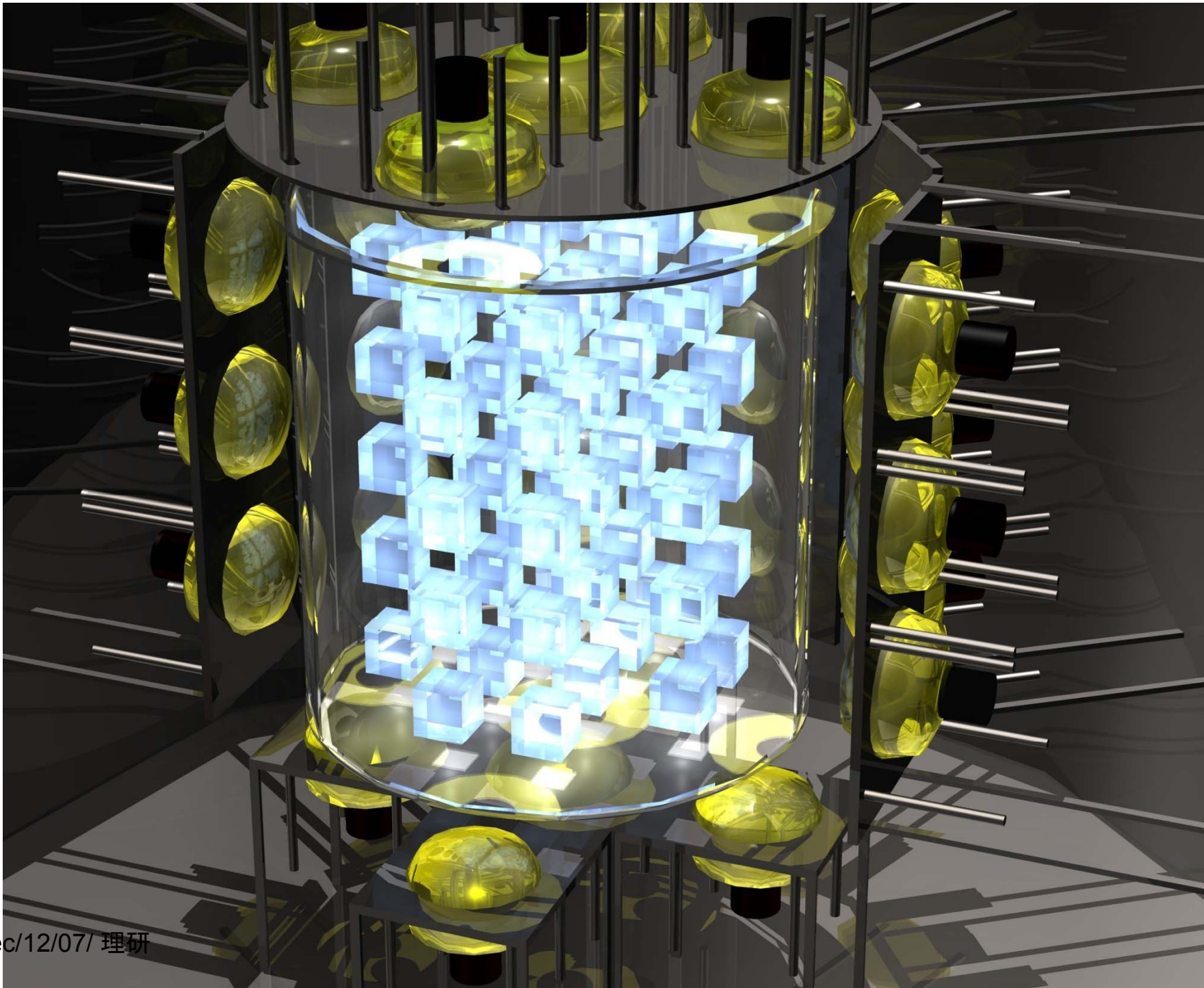
 **Inside View**

Photomultiplier Tube(13inch)



40 PMTs Version
And 60 PMTs Version . . . Funded

Tank for Liquid Scintillator
(Acrylic Case)



es

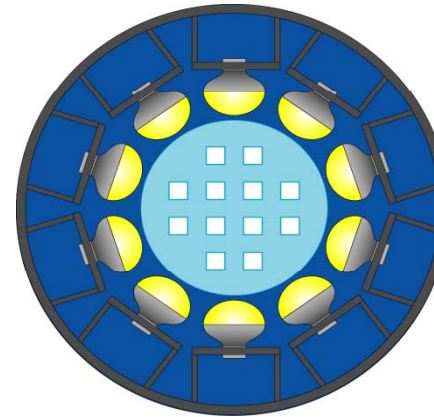
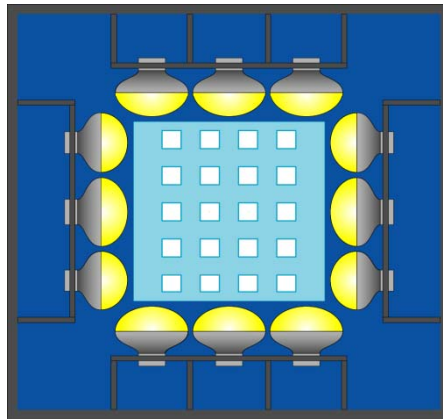


Position Reconstruction

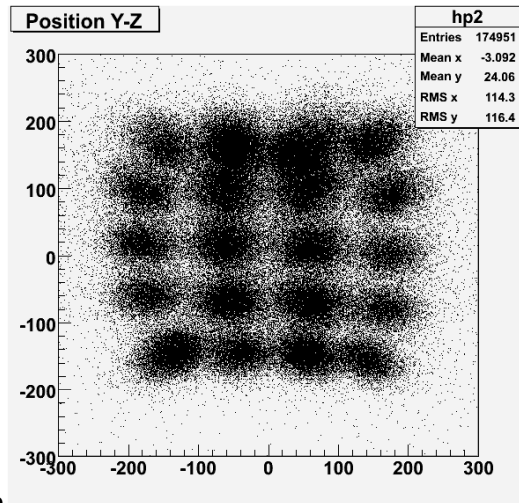


Candles

- position of event is reconstructed by PMT's ADC and its position

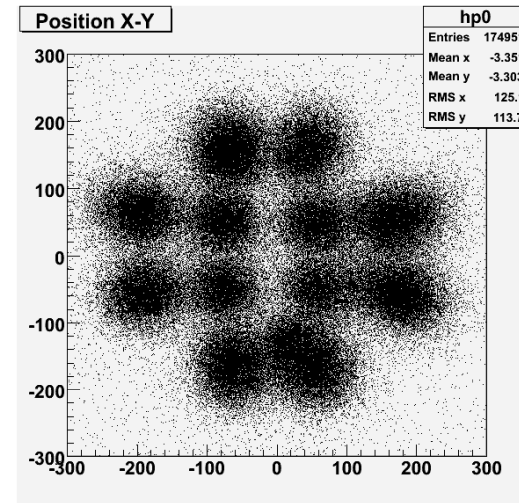


R: Z軸方向



R: Y軸方向

R: Y軸方向



R: X軸方向

2007/03/25 日本物理学会春の大会@首都大学東京

道のり



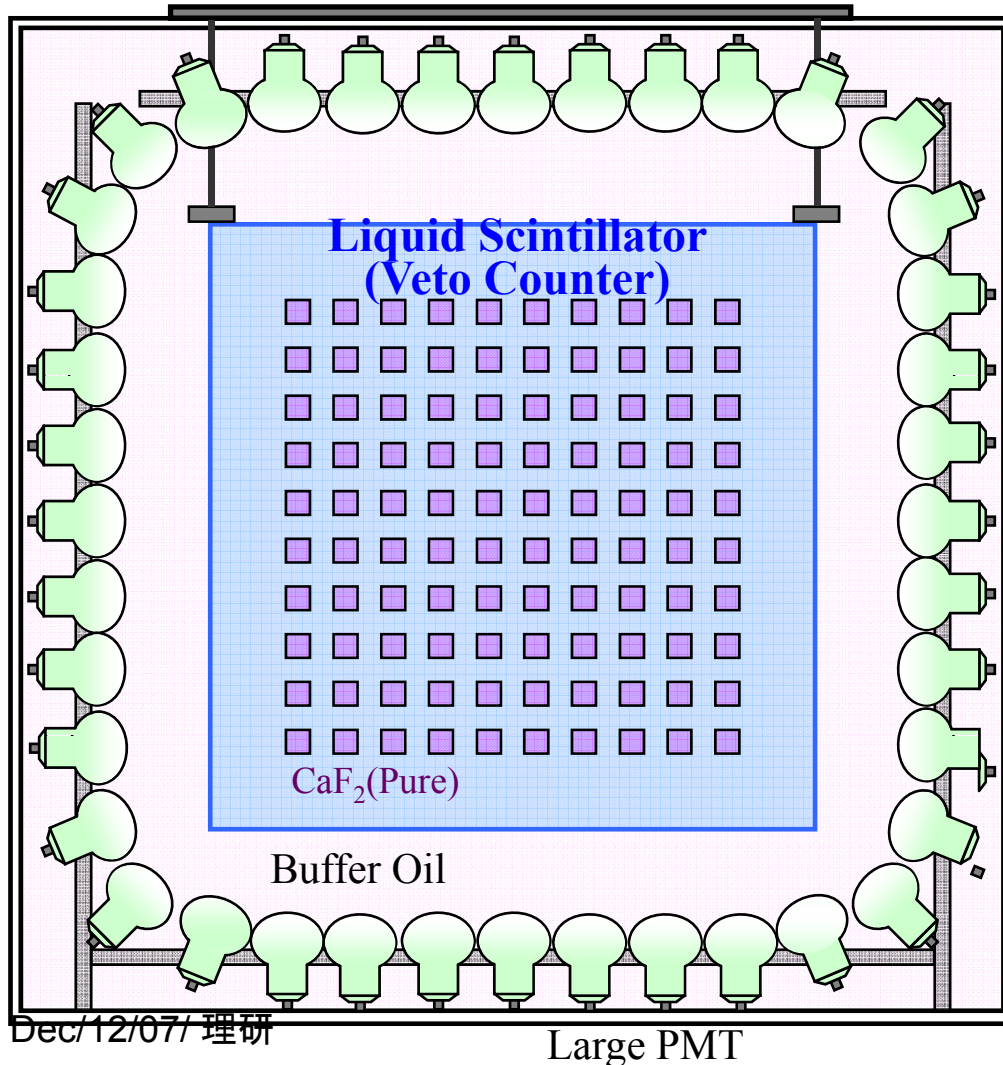
- ELEGANTS VI
 - 出発点
- CANDLES I, II
- CANDLES III
 - 10cm³ cube (100 crystals) ~0.5 eV
 - BG of CaF₂ ~30 μBq/kg

achieved
- CANDLES IV
 - 10cm³ cube (1000 crystals) **3t**
 - BG of CaF₂ ~10 μBq/kg for 0.2 eV (HDM超)
 - 神岡(宇宙線研)

CANDLES IV



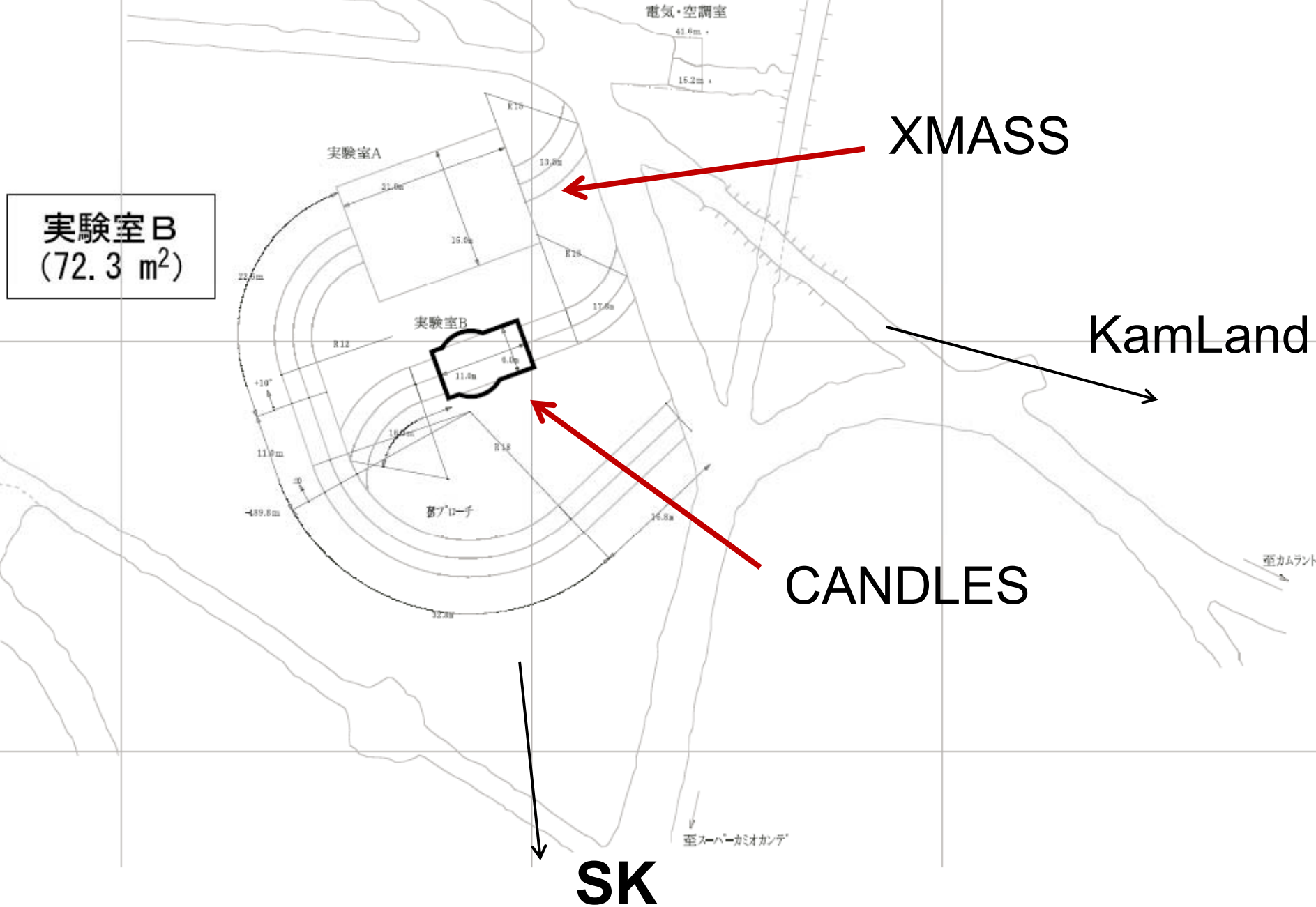
Candles



$10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3 \text{ CaF}_2$
(1000 cubes) 3.2 t
liquid scintillator Vessel
(^{48}Ca) 3.2 kg

1. BG
 1. Needs R&D
2. Energy resolution
 1. More PMT & gain control

掘削中の新しい実験室



将来



- 同位体濃縮
 - 2重ベータ崩壊研究
 - 大量の物質→同位体濃縮(^{76}Ge , ^{100}Mo , ^{128}Te)
 - 例外
 - ^{48}Ca , ^{150}Nd
- CANDLES
 - V 100トン: 0.03 eV (発見)
 - 濃縮法の開発
- 原子核実験施設、核物理研究センター……