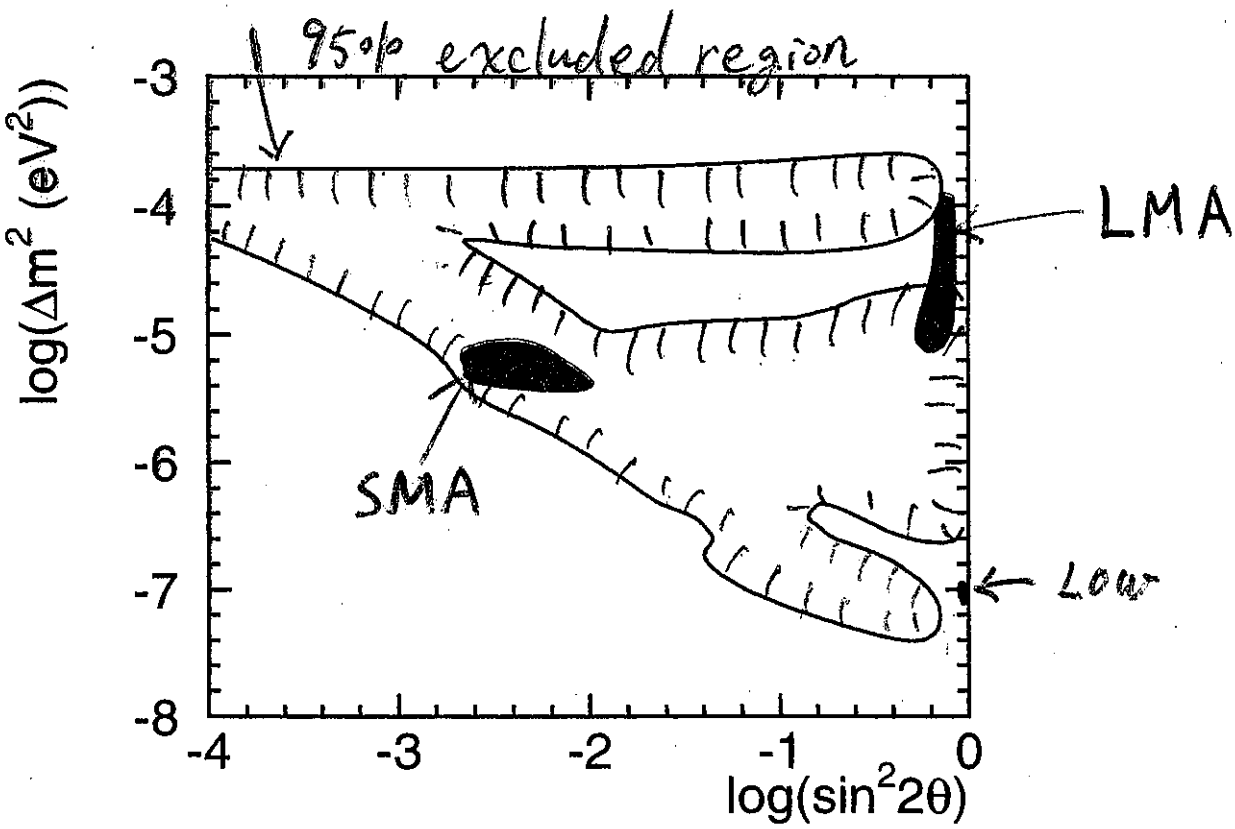
KamLAND

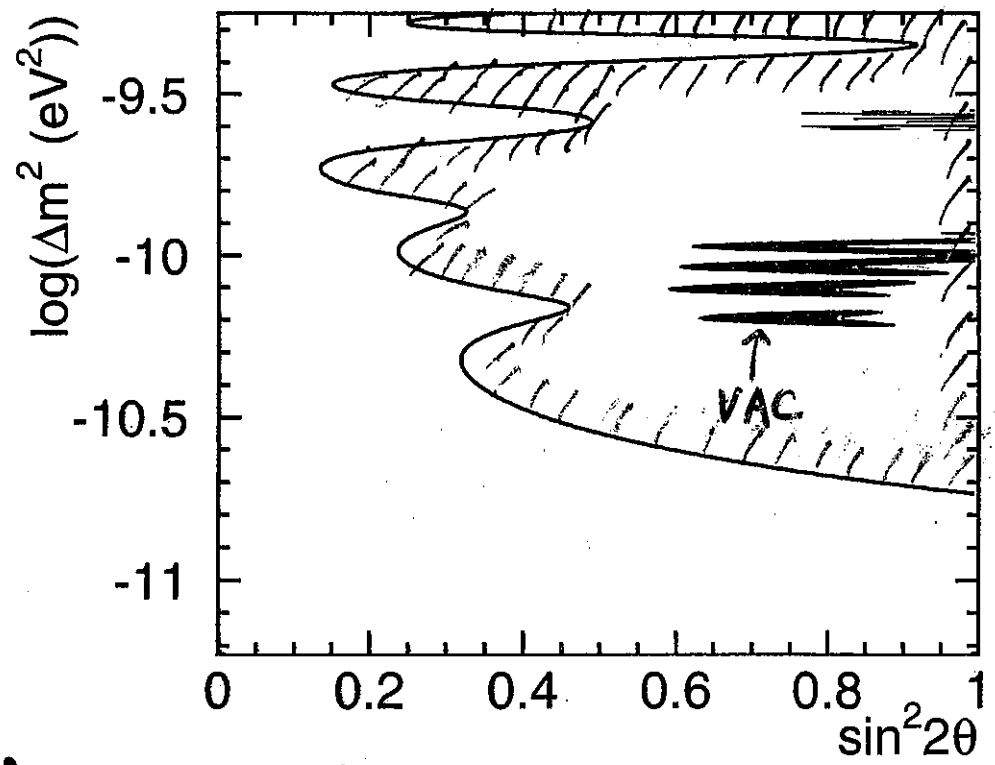
KamLAND の現状と可能性

東北大学　　石原賢治

- KamLAND の 概要
- 検出器
- 原子炉 $\bar{\nu}_e$
- その他の物理

SK day-night spectrum





Solar ν probrem の解として

LMA (と LOW) が有望である!

太陽ニュートリ問題

→ neutrino oscillation (LMA) が解か？

Super-Kamiokande の結果より

○ ニュートリノ事象の減少

× energy spectrumのゆがみ

× day-night effect

LMAであるポジティブな証拠がない！

太陽ニュートリノ以外で検証する必要がある！

原子炉は有効なニュートリノソース！

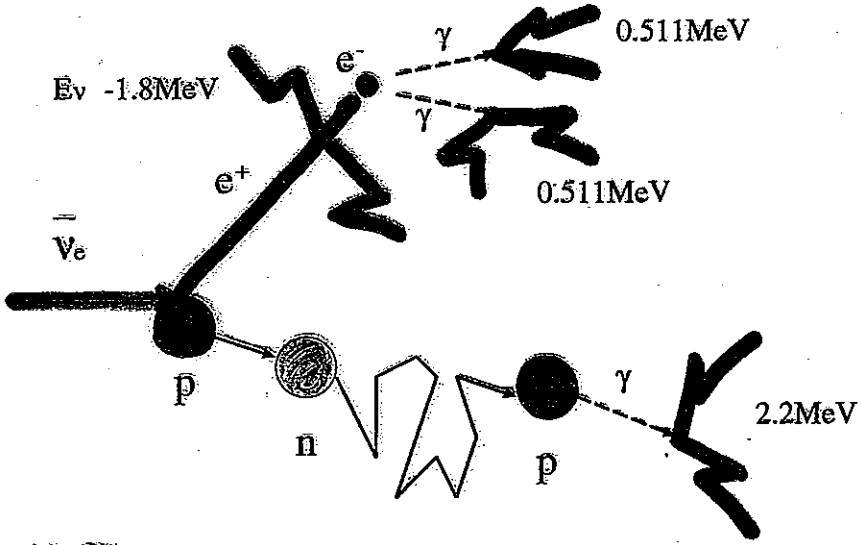
$\bar{\nu_e} \sim 5.6 \times 10^{20}/3\ GWth$ ← 典型的な原子炉の出力
$E_\nu \sim 4MeV$

原子炉ニュートリノ実験で LMA($\Delta m^2 \sim 5 \times 10^{-5} eV^2$) を検証する為には

- Long Base line 実験
  $L_\nu[km] \sim 160$ km
- 大出力の原子炉 $50 \sim 10GWth$
  一般的な原子炉の出力は 3 GWth
  (CHOOZ 8.5 GWth)
- 大容量のターゲット
  $\sim 100\ events/year \Rightarrow$
  Target mass $\sim 100t$!
- 低バックグラウンド環境
  disaperance 実験であるため
  S/N で 検出器の性能が決まる

KamLAND

Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector



$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

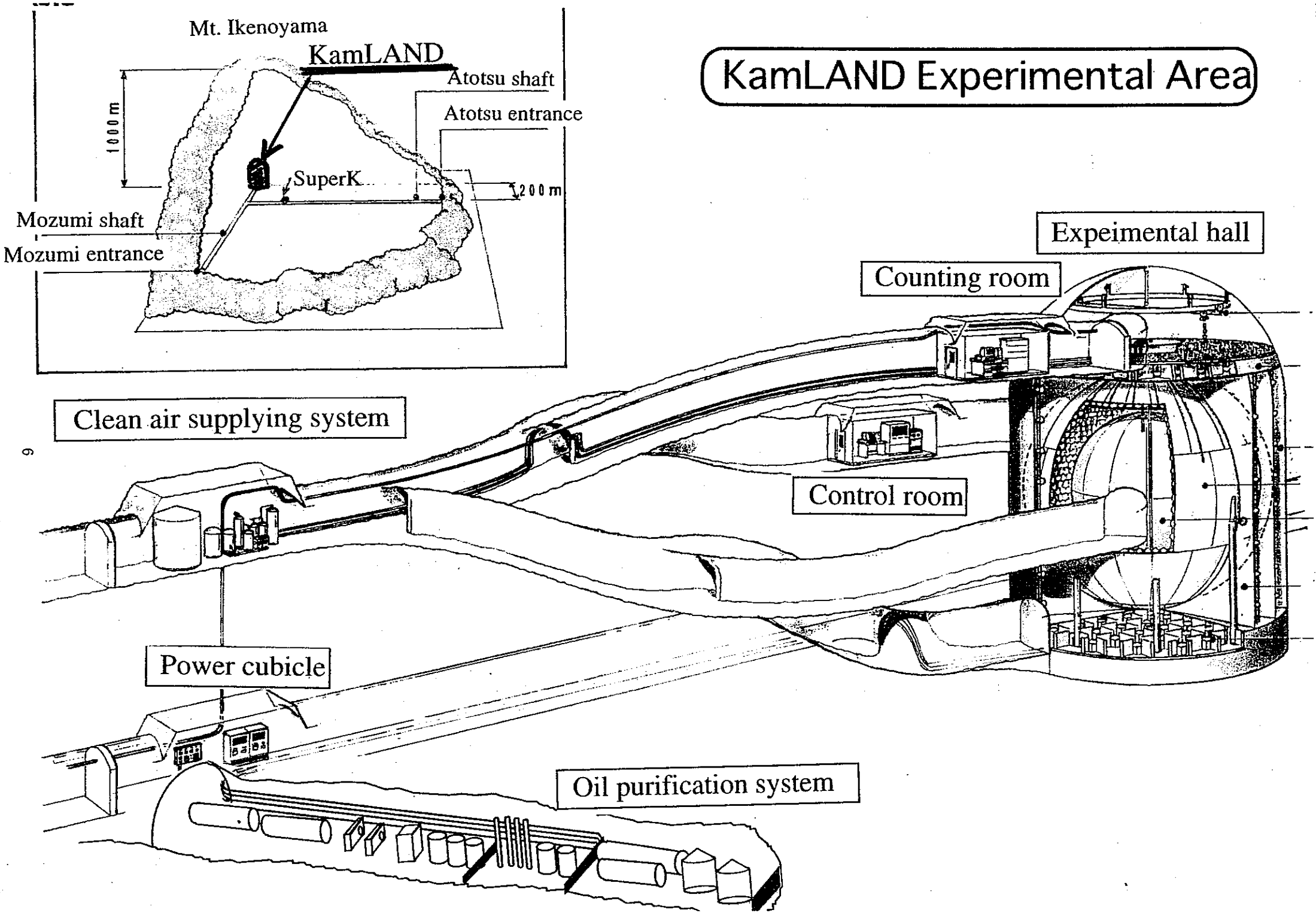
$$\Downarrow \quad \text{175 } \mu\text{s delay}$$

$$n + p \rightarrow d + \gamma \text{ (E = 2.2 MeV)}$$

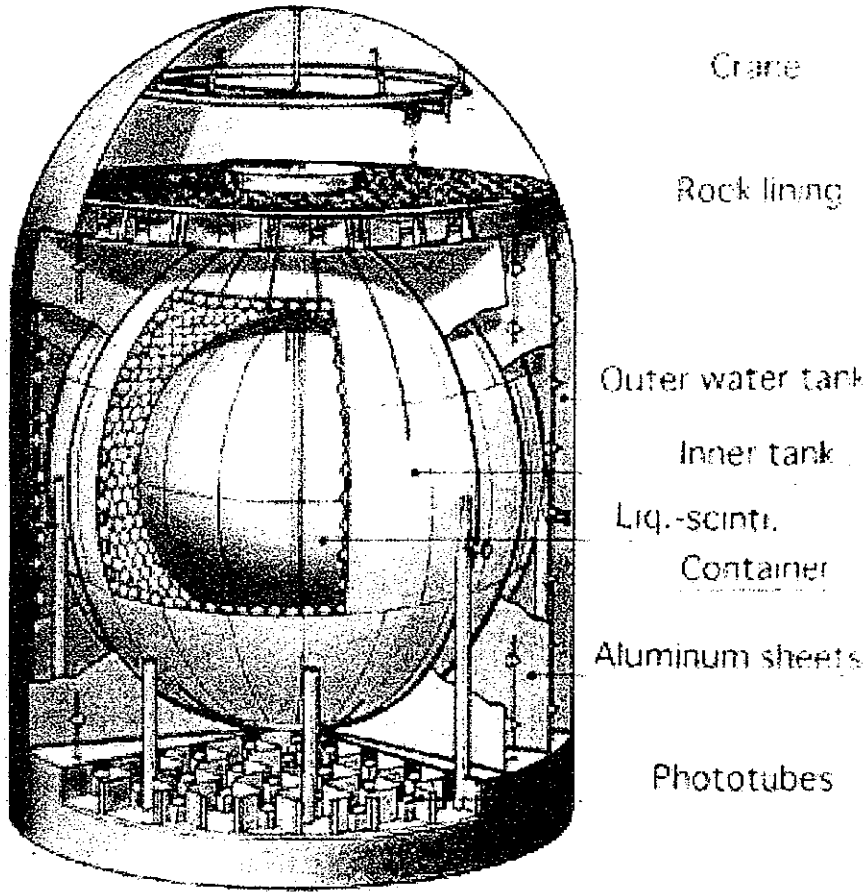
特徴

- $\bar{\nu}_e$ のエネルギーが測れる。
  $(E_{vis} = E_{\bar{\nu}_e} - 0.8MeV)$
- $\bar{\nu}_e$ だけを測れる。
- background free

KamLAND Experimental Area



KamLAND Detector



inner

- 18m ϕ stainless tank
- 13m ϕ balloon
- L.S. volume $1,200m^3$ (1 k ton)
  transparency 10 m at 400 nm
- buffer oil volume $1,800m^3$
  transparency 10 m at 400 nm
- # of PMTs (17 inch) 1325
  (20 inch) 554
- photo cavarage 36 %

anti

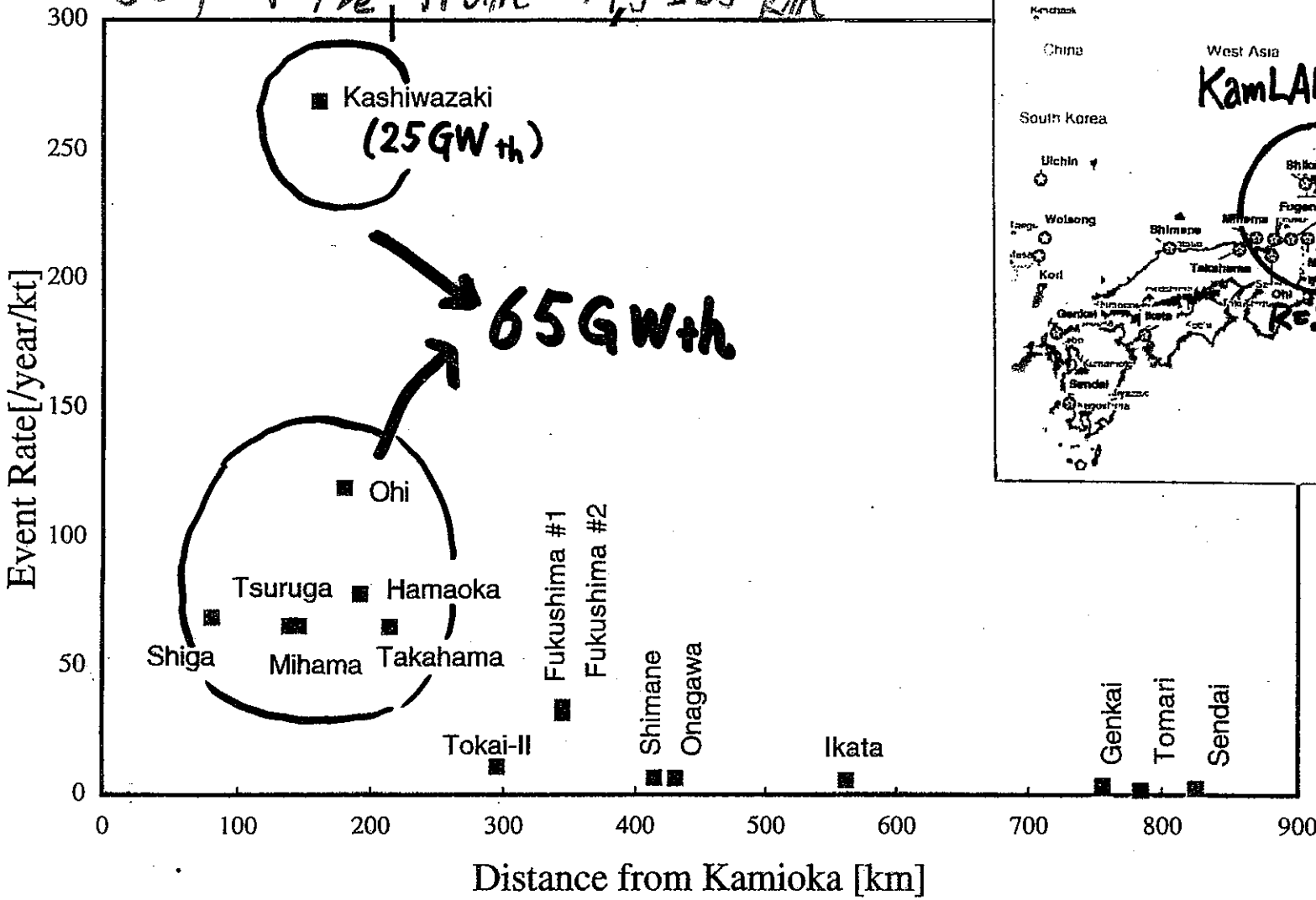
- water $3,200m^3$
- PMT (20 inch) 225

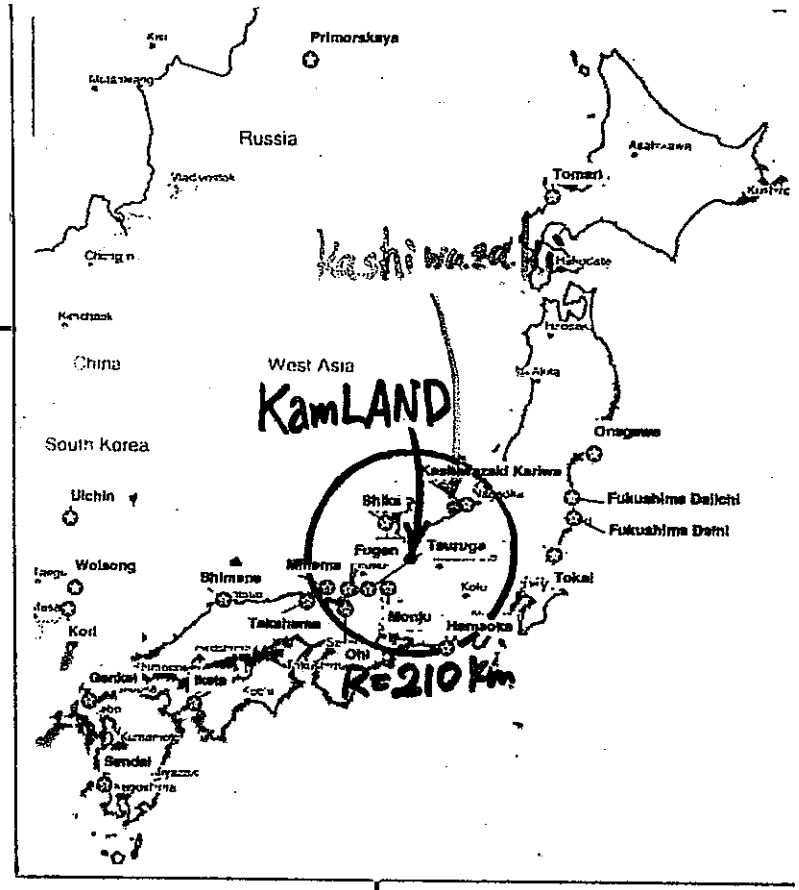
Detector performance

発光量	230 p.e./MeV
$\frac{\sigma_E}{E}$	$8/\sqrt{E_{(MeV)}}$ %
PMT の σ_t (17 inch)	1.7 ns
(20 inch)	5 ns
ΔPos	$\sim$ 10 cm (at 1 MeV)
ATWD module	2 ns 毎に sampling
PSD (n/γ)	80 % (at 1 MeV)
	93 % (at 3 MeV)
(α/γ)	$>$ 99 % (at 0.5 MeV)

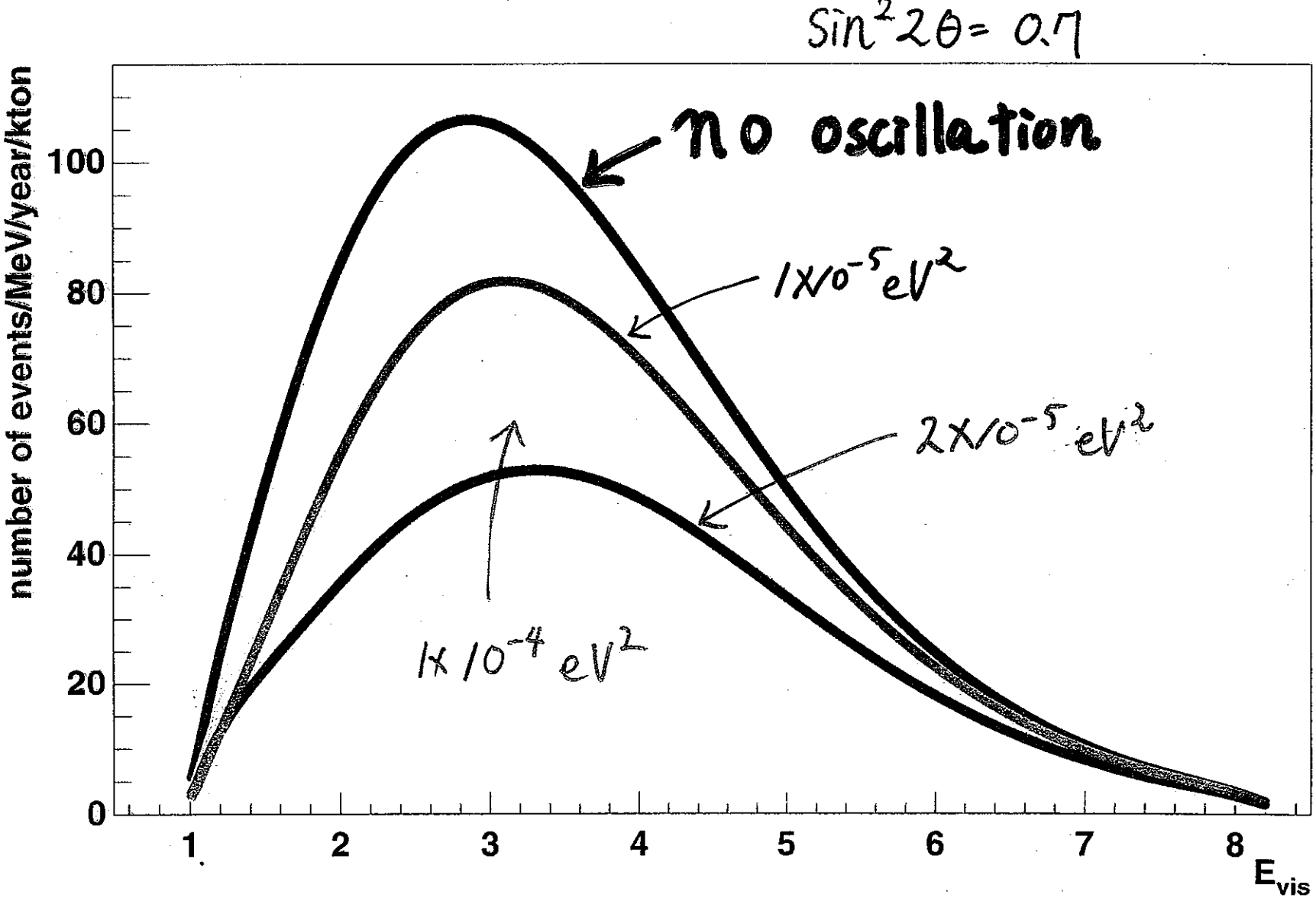
$\phi_{\bar{\nu}_e} = 2.9 \times 10^6\ cm^{-2} \cdot s^{-1}$ at Kamioka

80% of $\phi_{\bar{\nu}_e}$ from 175 ± 35 km

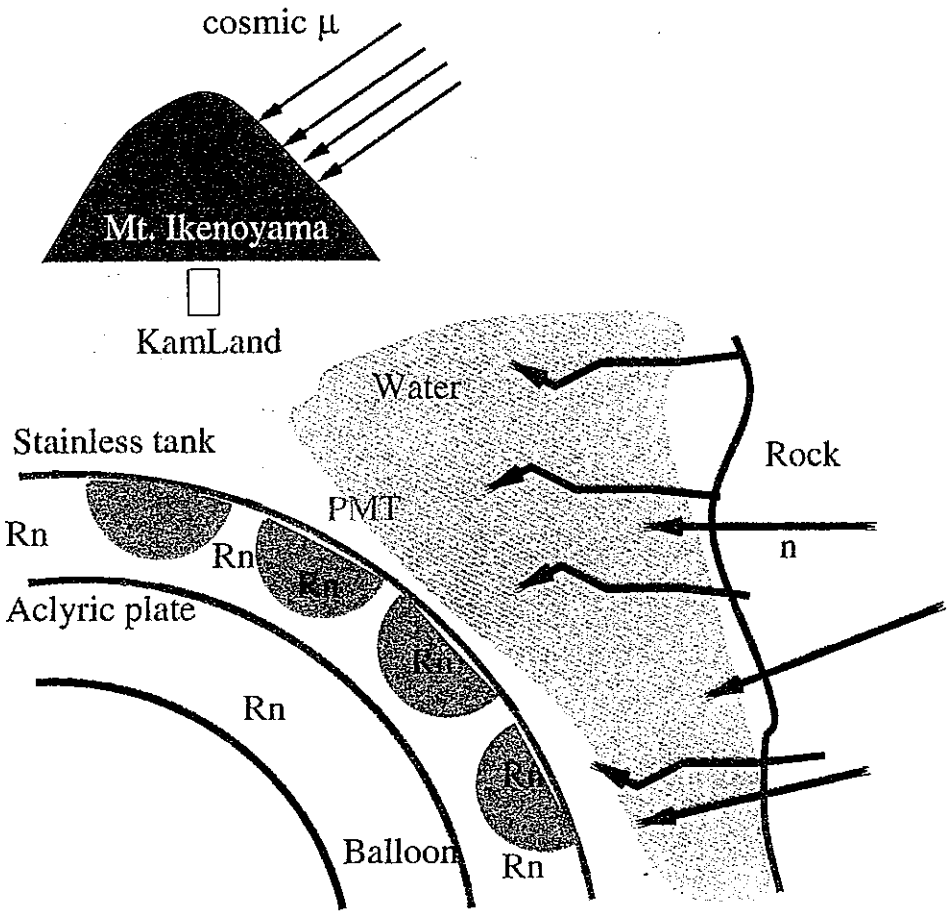




原子炉ニュートリノイベントの
エネルギー分布



極低放射能環境



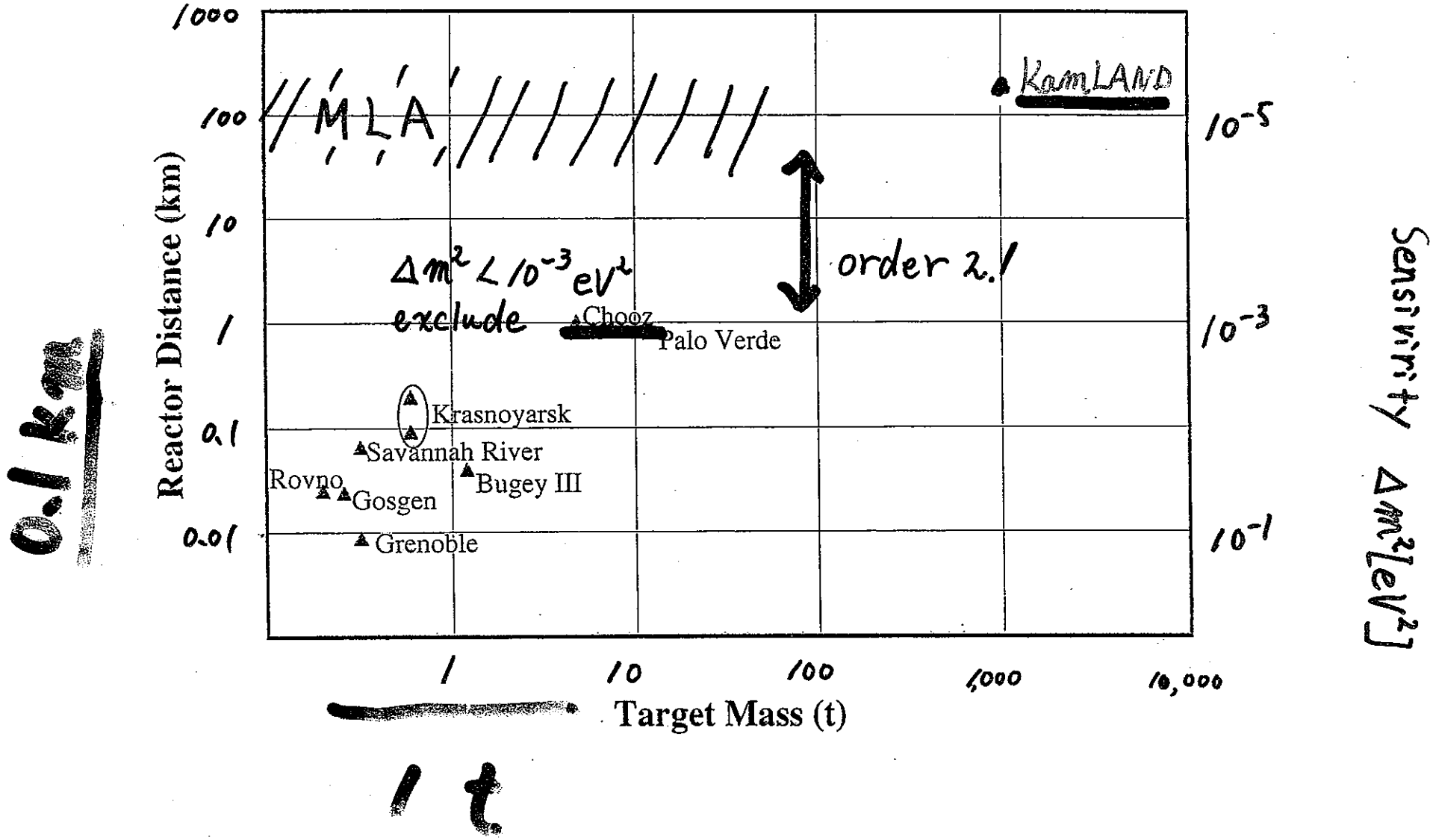
外部からのバックグラウンド対策

池の山	cosmic μ の遮蔽 地上の 10^{-5}
水(アンタイ)	岩盤からの γ や n を防く
アクリル板	PMTから出る Rn を防ぐ
バルーン	oilからの Rn を防ぐ (1.8×10^{-6})

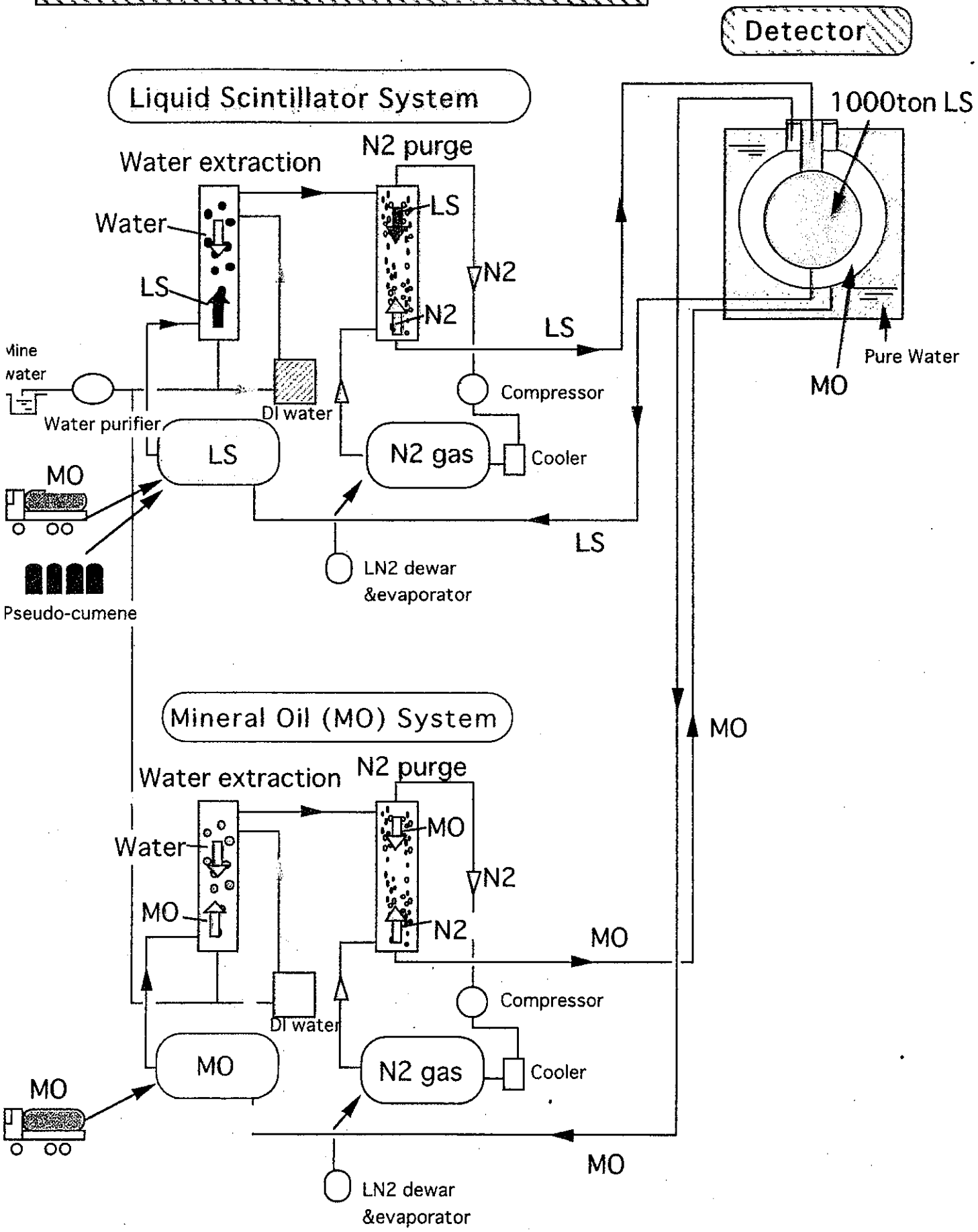
L.S.

	U	Th	K
購入時	$< 10^{-13}$	$< 6 \times 10^{-12}$	$< 1.2 \times 10^{-12}$
目標	10^{-14}	10^{-14}	10^{-12}

Comparison of the Reactor-Antineutrino Detectors



KamLAND Oil Purification System



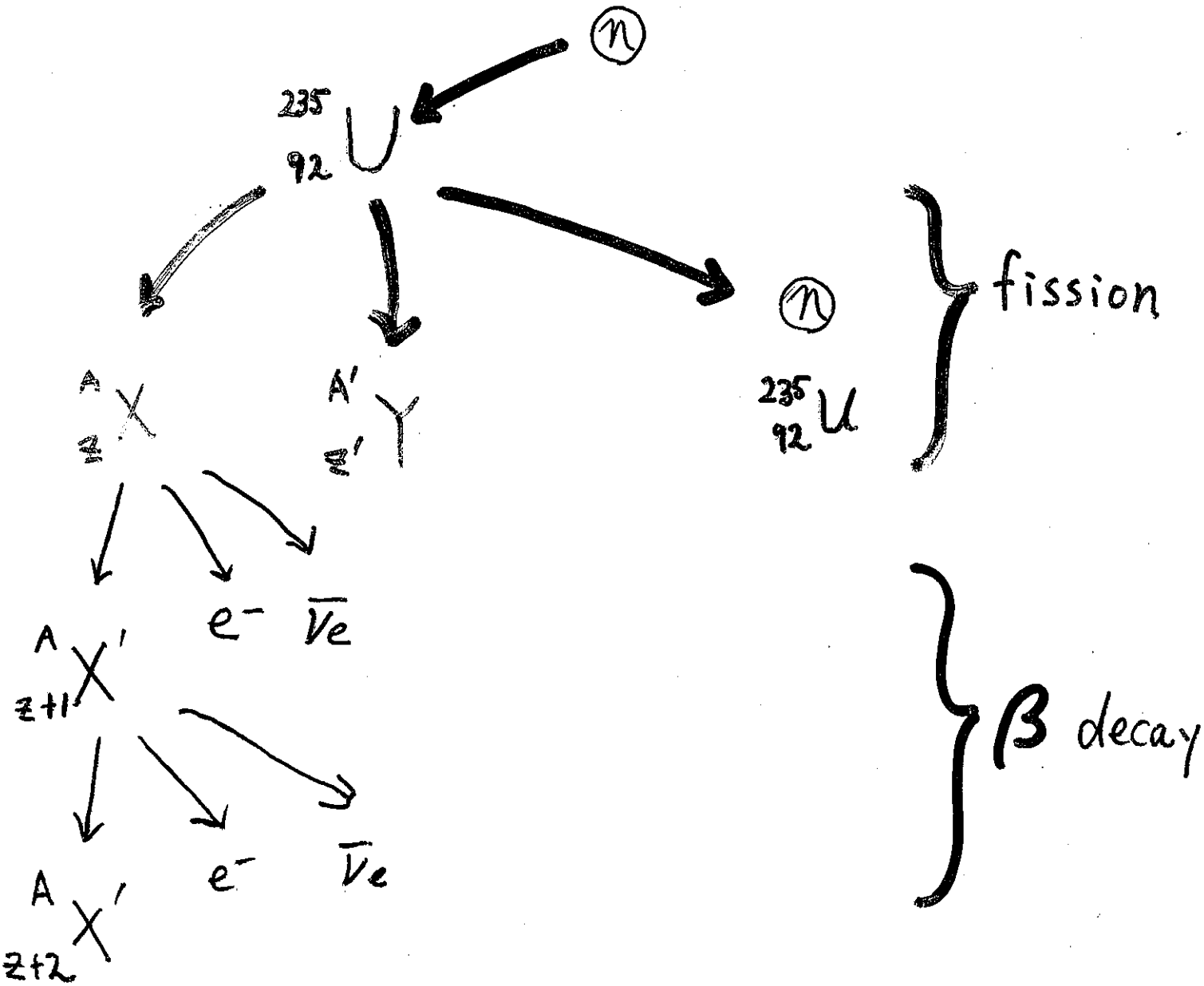
KamLANDでの原子炉ニュートリノ物理

- 原子炉ニュートリノ
  発生原理
  flux 測定の信頼度

- Background estimation

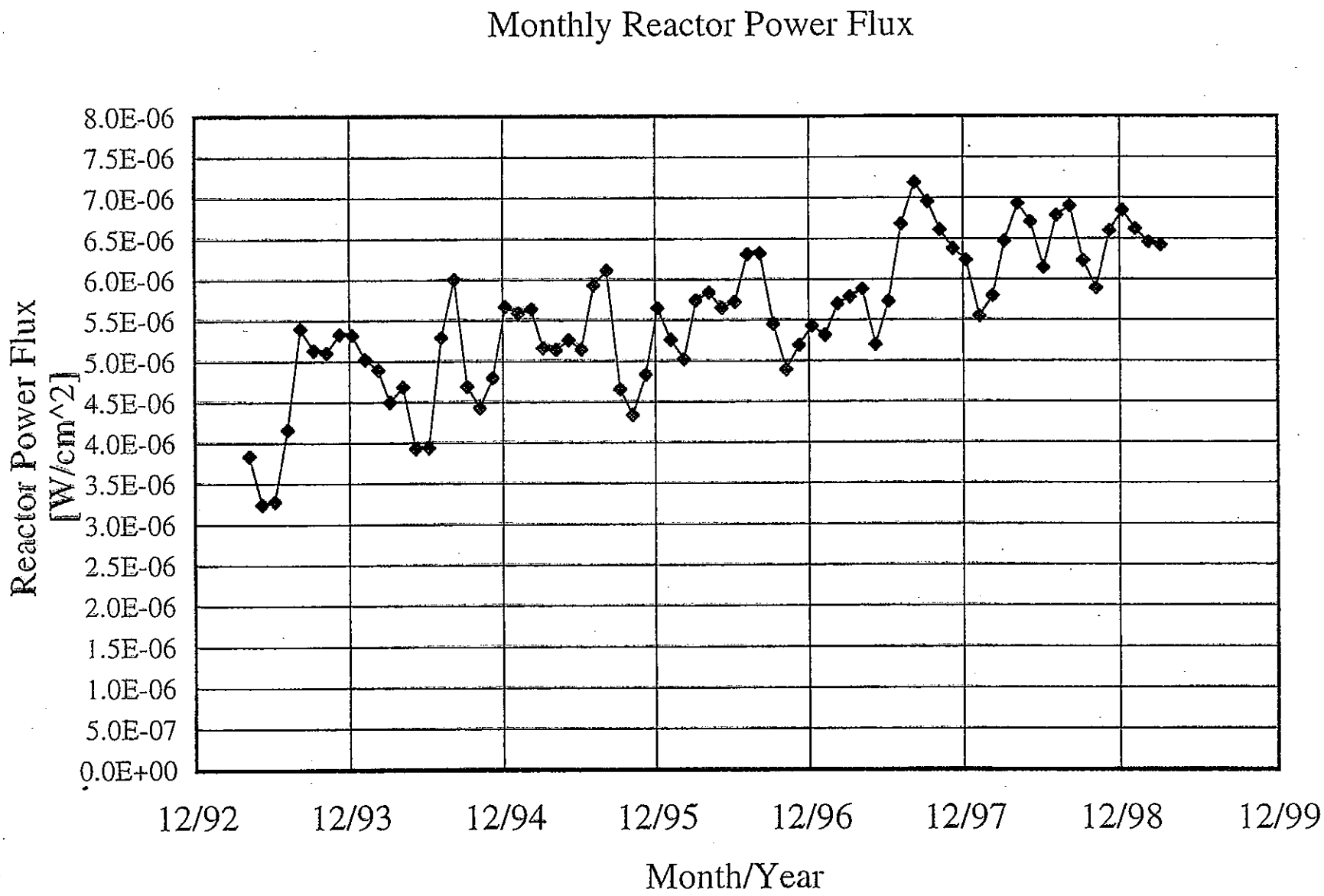
- systematic error

- KamLAND の Potential
  sensitive reagion



	# $\bar{\nu}_e$	E
^{235}U	6.1/fission	197 MeV/fission
^{239}Pu	5.6/fission	205 MeV/fisson

発熱量から fissionの数がわかる!


Monthly Reactor Power Flux
Reactor Power Flux [W/cm^2]
8.0E-06
7.5E-06
7.0E-06
6.5E-06
6.0E-06
5.5E-06
5.0E-06
4.5E-06
4.0E-06
3.5E-06
3.0E-06
2.5E-06
2.0E-06
1.5E-06
1.0E-06
5.0E-07
0.0E+00
12/92
12/93
12/94
12/95
12/96
12/97
12/98
12/99
Month/Year

原子炉$\bar{\nu}_e$フラックスの不定性

現在、理論計算と測定値のデータがある。

理論値

A.A.Hahn *etal.* Phys.Lett:B218. 365

- fission rate
  $\sim$ 0.7 %
- 燃料棒内の ^{235}U と ^{239}Pu の量
  $<$ 0.3 %
- $\bar{\nu}_e$ yield / fission
  3 %

測定値

G.Zacek *etal.* Phys.Rev. D34. 2621

B.Achkar *etal.* Phys.Lett. B374. 243

KamLAND と同じ

$\bar{\nu}_e + P \rightarrow e^+ + n$ 反応を

使った検出器(Bugey)で

原子炉ニュートリノの測定

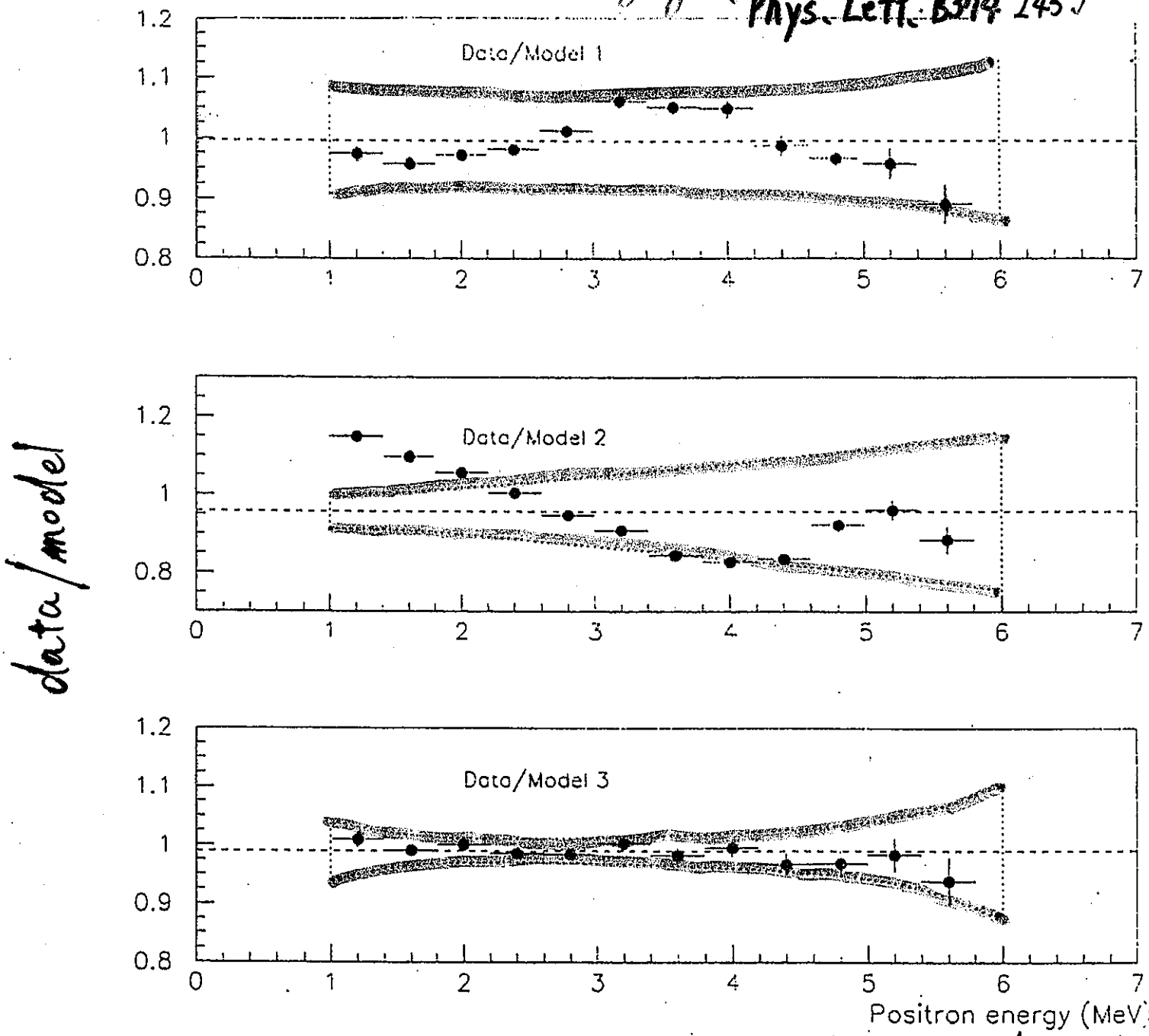
(cross section 等の不定性も含む)

absolute 1%

shape $\pm$1.5%

独立なデータの比較により
原子炉$\bar{\nu}_e$フラックスの不定性は $\sim$ 3%

Comparison between expected reactor $\bar{\nu}_e$ spectra and result from Bugey. (B. Achkar et al Phys. Lett. B374 243)



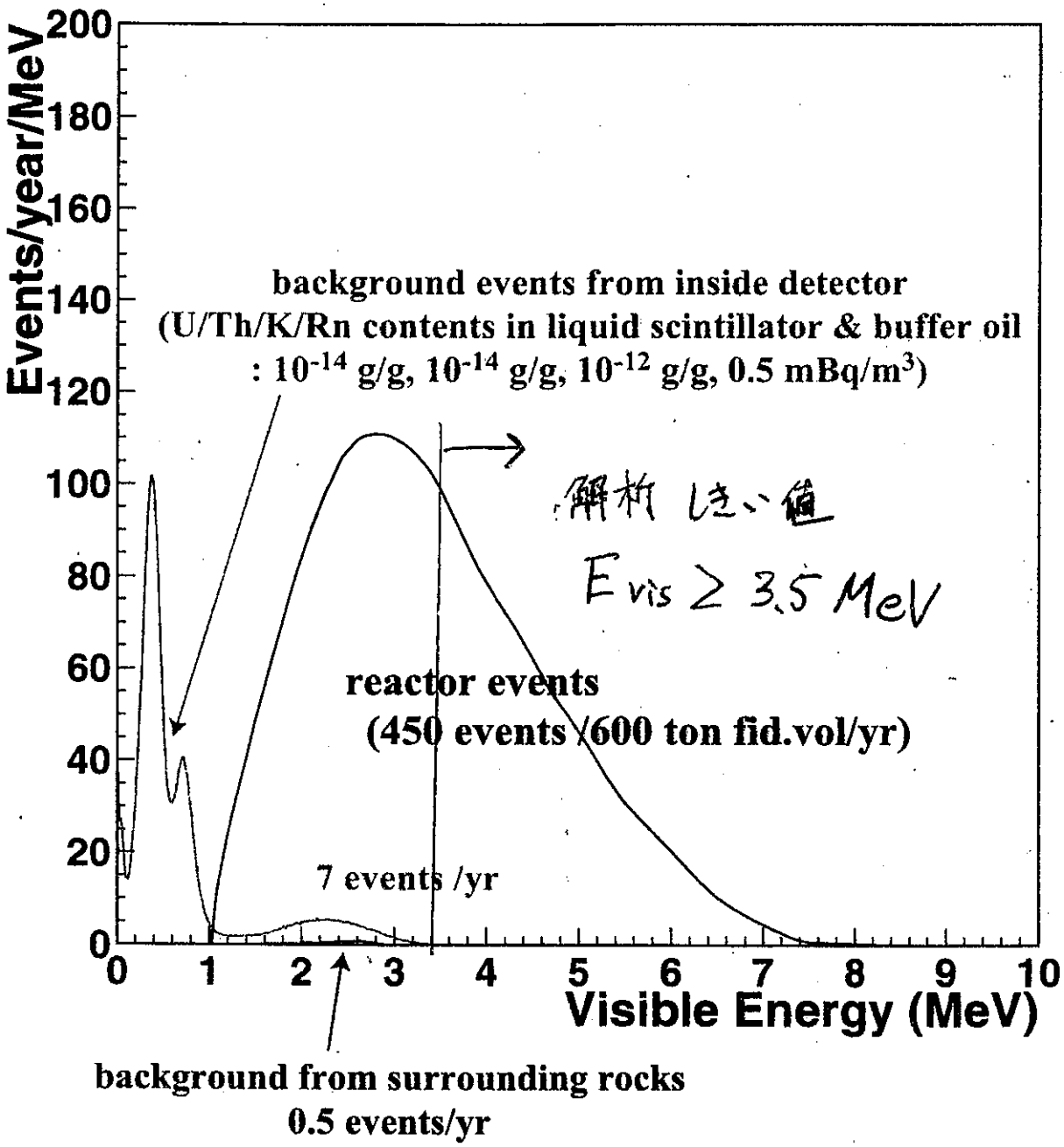
systematic error depending on each model

model 3 can predicts reactor $\bar{\nu}_e$ spectrum.

absolute 1%

spectrum ± 1.5%

KamLAND e^+ Visible Energy Spectrum



$E_{vis} \geq 3.5$ MeV より

background をほぼ取り除ける!

Expected Backgreound estimation

Prompt signal $E_{vis} > 3.5\ MeV$
delayed signal $1.4 < E_{vis} < 2.8\ MeV$

Accidental BKG Rate $(f_{prompt} \times f_{delayed})$

Source	Remarkable	f_p Hz	f_d Hz
U	10^{-14} g/g (*)	$\ll 0.0012$	< 0.06
Th	10^{-14} g/g (*)	< 0.007	< 0.02
K	10^{-12} g/g (*)	0	$\ll 0.1$
Rn	$0.5 mBq/m^3$ (*)	< 0.006	< 0.3
U in Ballon $\rightarrow$ Rn	10^{-10} g/g	< 0.0006	< 0.03
γ from Rocks	3 ppm Th	0	< 1.5
Cosmic ray	after 3 s (*)	0.012	0.012
Total		< 0.027	< 2.9

Correlated BKG

Source	Remarkable	f /day
High Energy n	Simulation	$\ll 0.01$
Cosmic rays	after 3 s (*)	< 0.0088
Total		< 0.02

*: assumption

Background substruction

- f_p と f_d を独立に求める事により差し引ける。
十分な統計(一日 2000 events 以上)で BG を見積り可能。

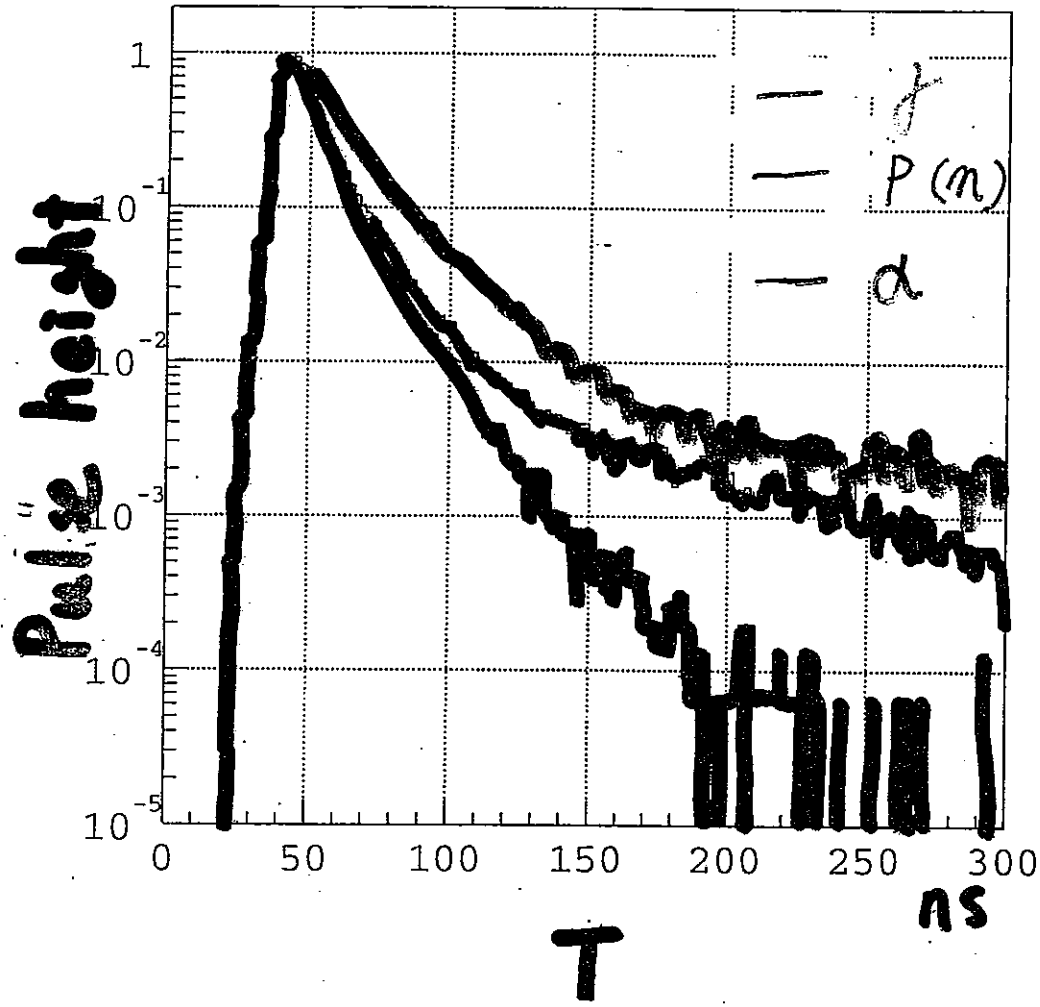
- 発光波形の違いでnとγの粒子識別を行う。
(Pulse Shape Discrimination)

  - n/γ separation 93 % at $E_{vis} = 3MeV$
    n BG を一桁下げられる。($\ll$ 0.001 /day)

- cosmic μ との時間差分布、距離分布等を用いたカットで $\sim$ 90% 以上の spallation events を取り除ける。

バックグラウンドによる不定性は $<$ 1% 以下

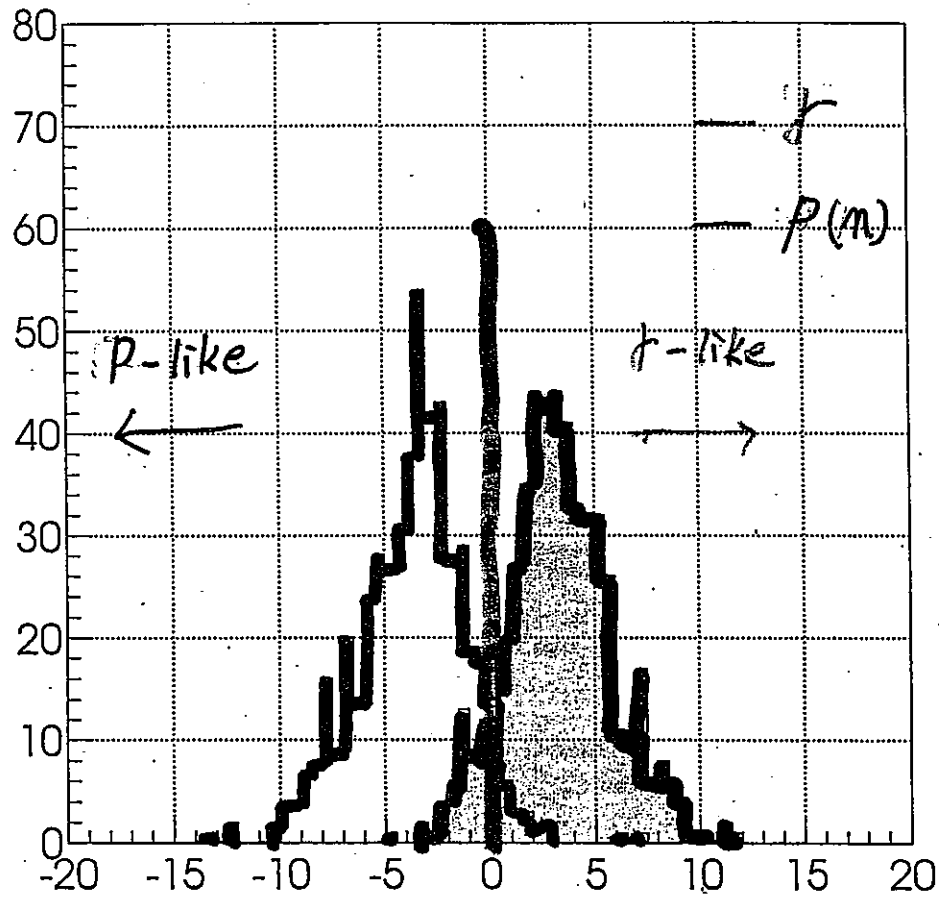
発光波形



Plush Shape Discrimination

発光波形の違いにより粒子識別可能

Eris = 3MeV の γ, P の likelihood 分布



n/γ separation 93% at 3MeV

α/γ separation 99% at 0.5MeV

calibration

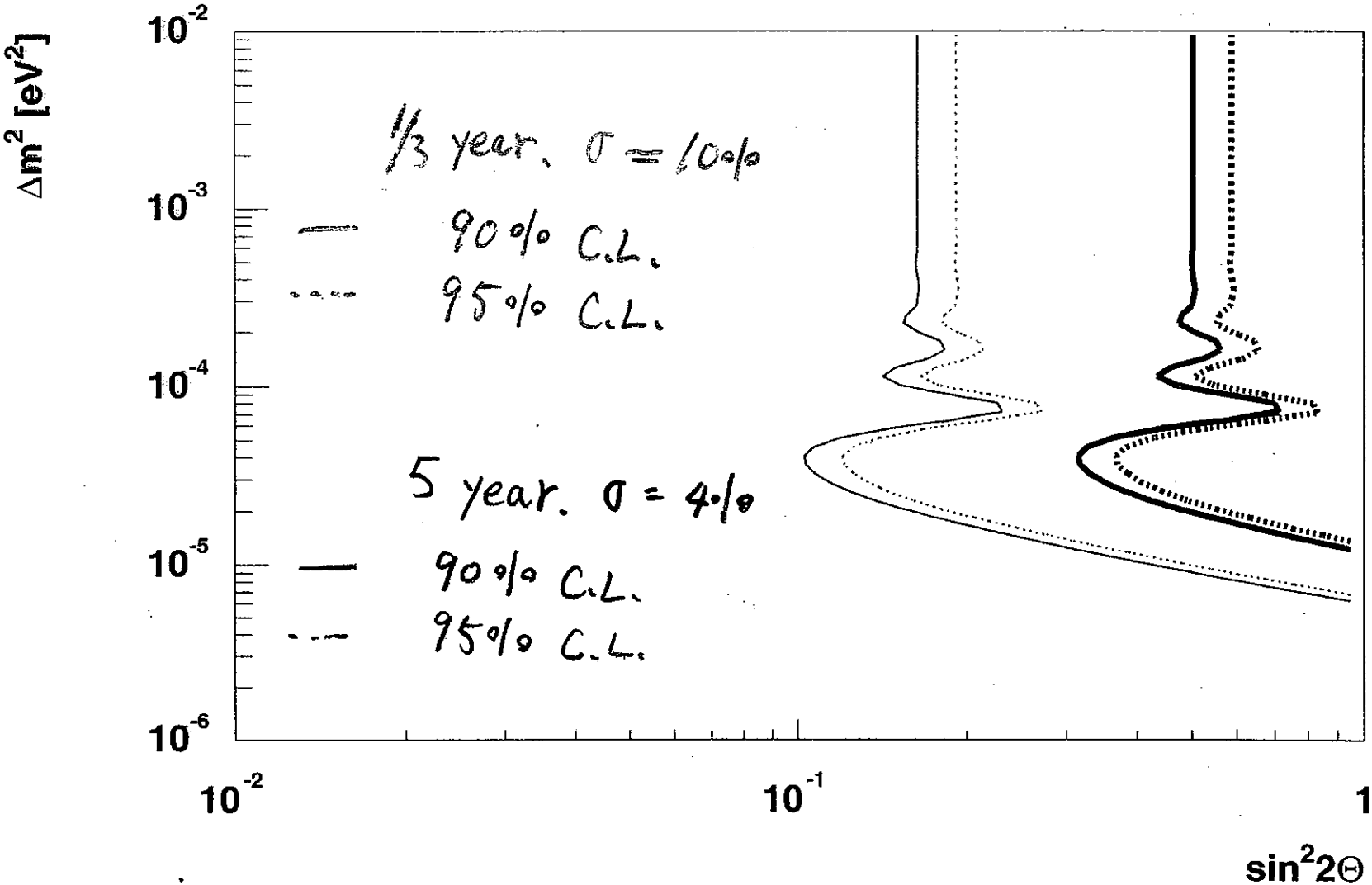
	goal	at begining
vertex shift	1 cm	3 cm
absolute energy	1 %	3 %

Systematic error for reactor neutrino analysis

Source	Assumption	%
absolute $\bar{\nu}_e$ flux	from Bugey (include $\sigma_{c.s.}$)	1.4
	caluclation	3
cross section		~ 2
fiducial volume	vertex shift = 1 cm	< 1
	vertex shift = 3 cm	~ 2
absolute E_{ν_e}	$\sigma_E = 3\%$	~ 7
	$\sigma_E = 1\%$	~ 2.5
Background		$< 1\%$
Total		$4 \sim 8$

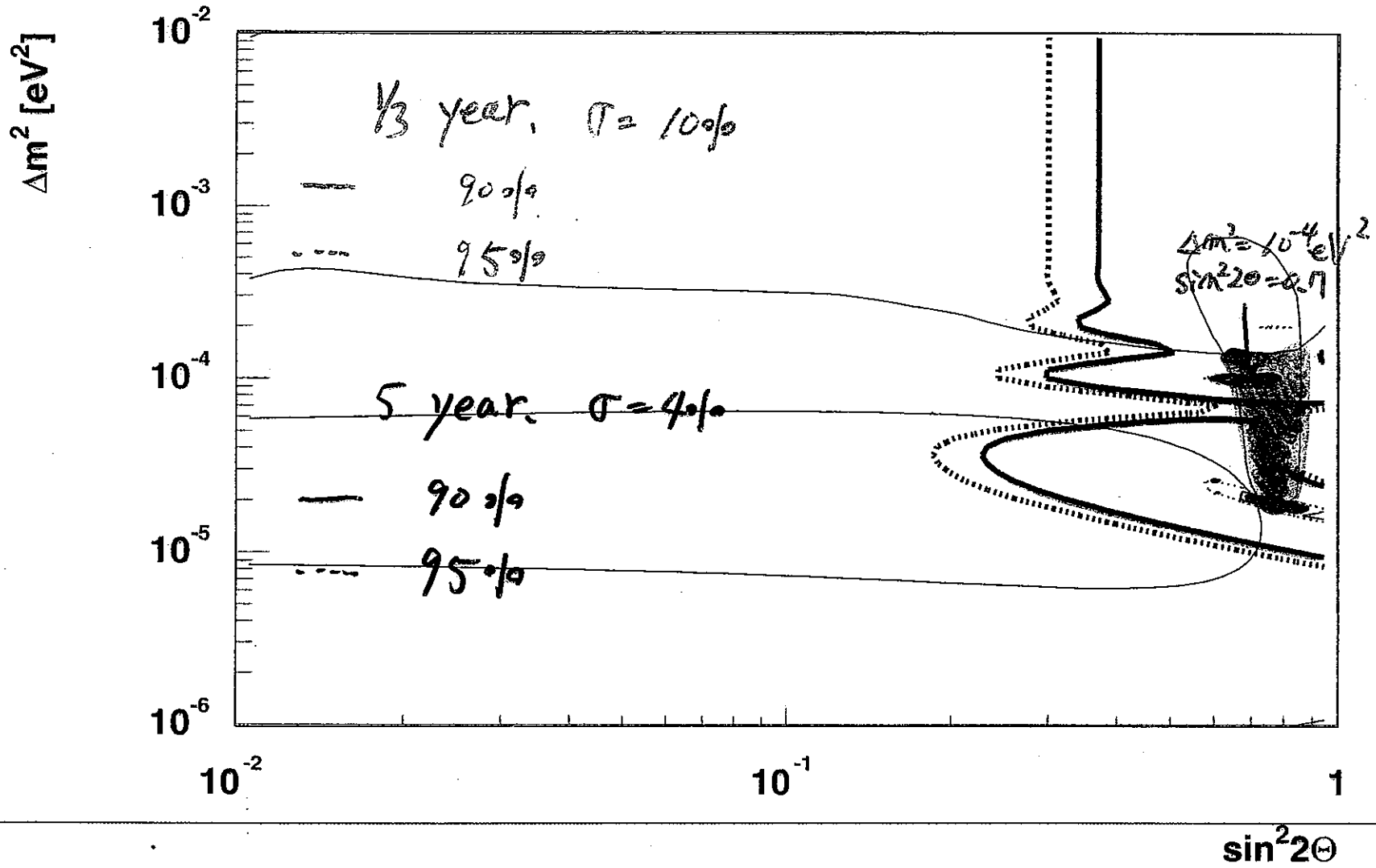
Sensitive region

$$\chi^2 = \left\{\frac{n_d - n_e(1+\alpha)}{n_d}\right\}^2 + \left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)^2$$



$(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (10^{-4}\,eV^2, 0.7)$ の

allowed region の予想図



Summay

- KamLAND は 世界最大の液体シンチレータ検出器である。来年夏からのdata taking に向け建設中。

- 太陽ニュートリノ問題の解が LMA なら、原子炉ニュートリノ解析により2002年春までには何らかの結果が出せそうだ！

Construction of KamLAND

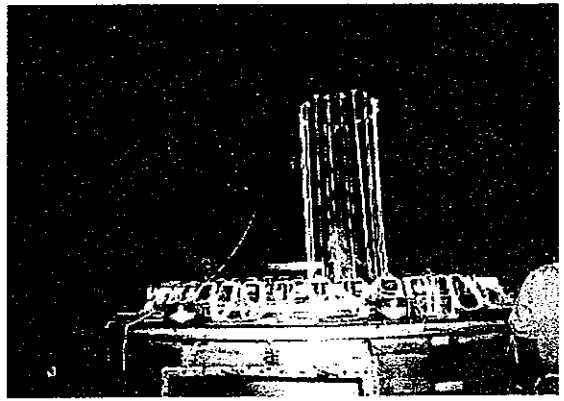
NOW !

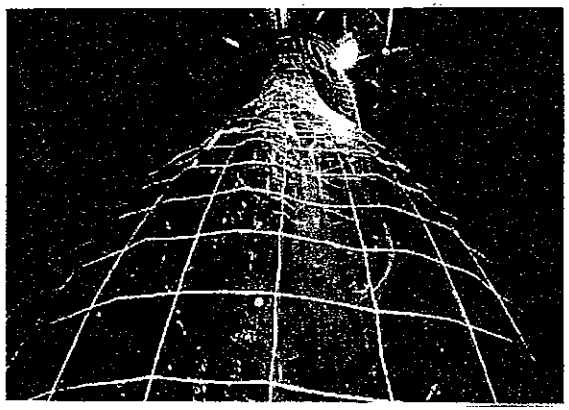
1999 2000 2001

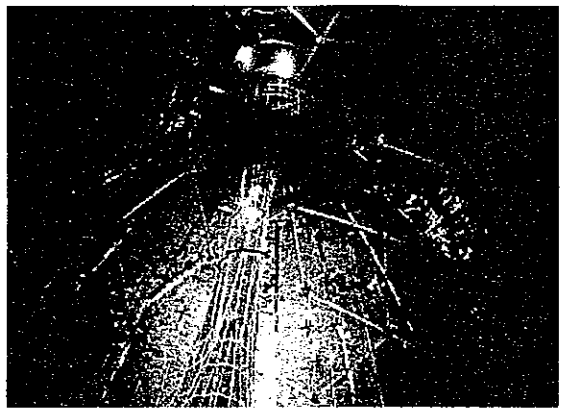
Experimental Area	Main Shaft Cavity	Main Tank clean room	Water plug
PMT	17"(1300) 20"(820)	check &Assembly	Install
Balloon	R&D	proto-type 1/1 test	Install
Liq. Scintillator	R&D	check	Filling
Purification	R&D	Construction	Cleaning
Electronics			Mass prod. Install

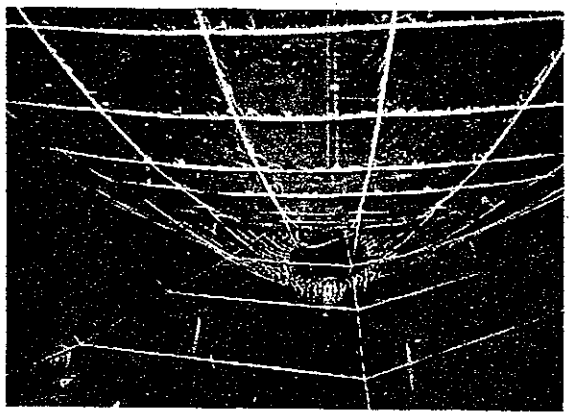
Data Taking

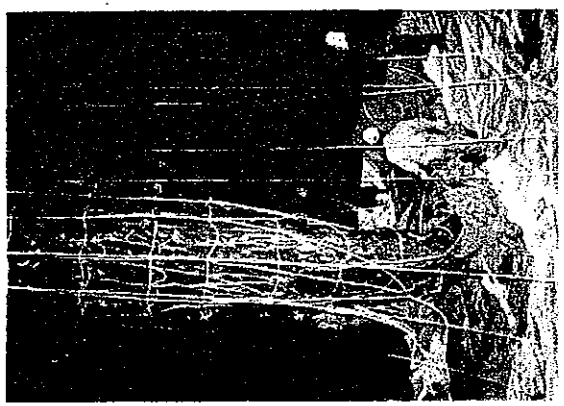
2000 (Installation Test of Full Size Balloon)

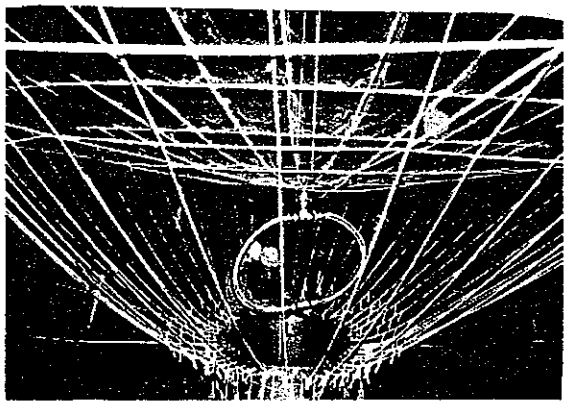




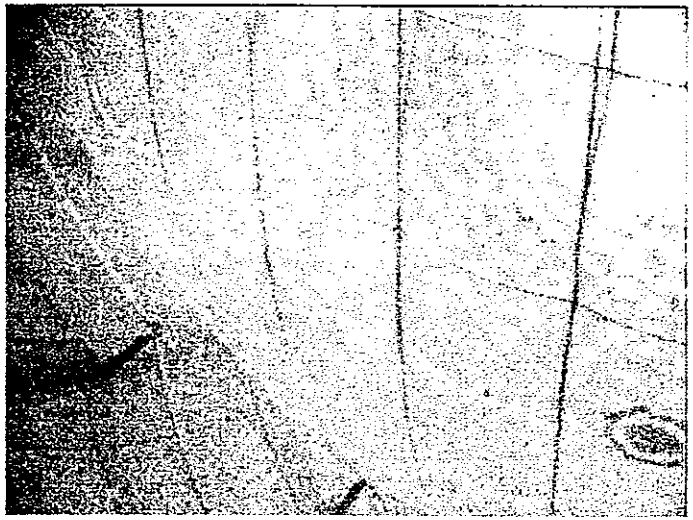


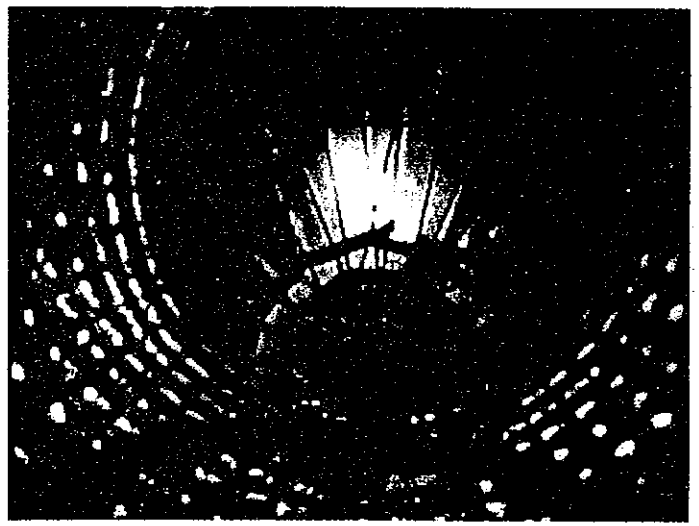


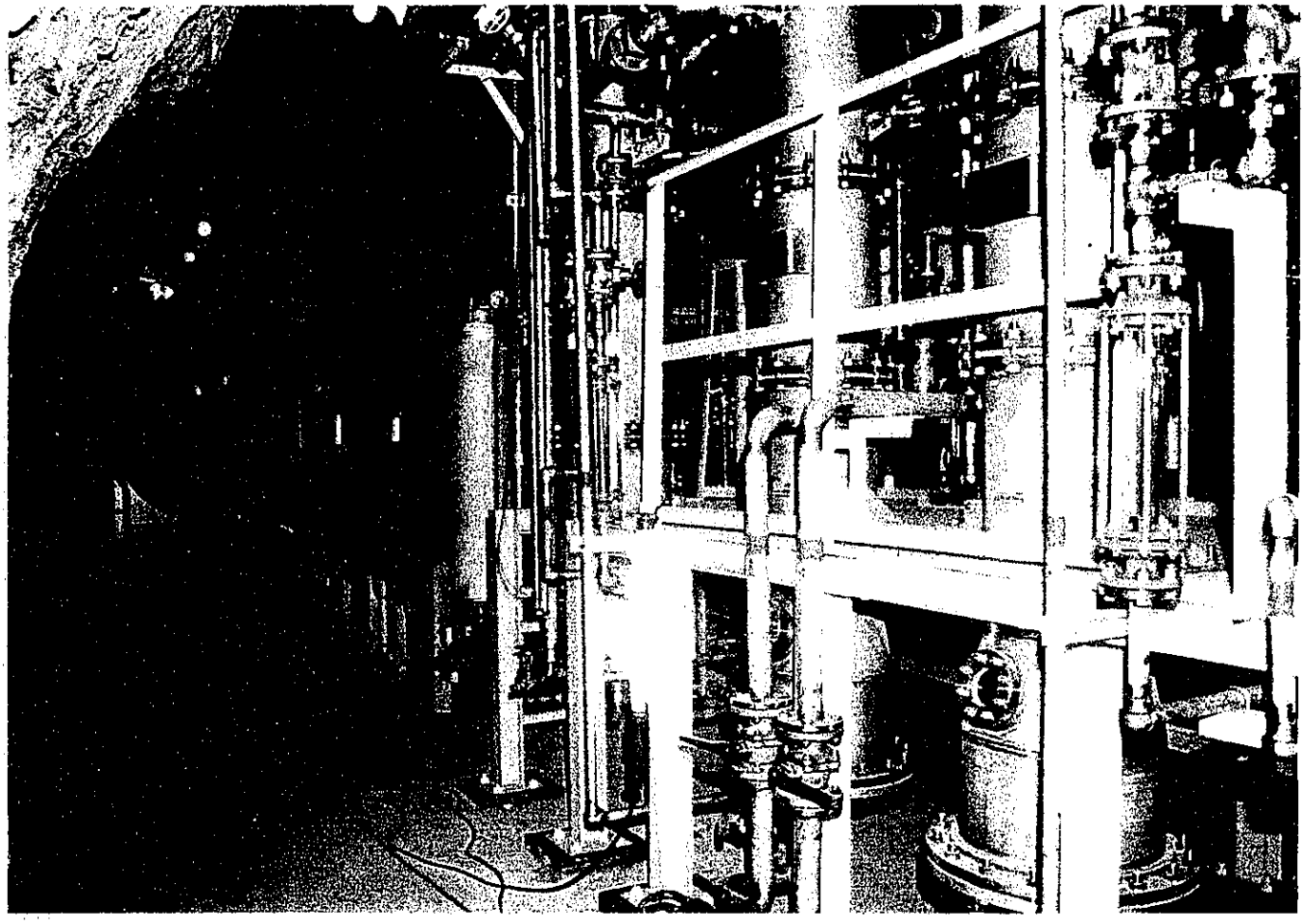




Water Filling Test
into inside and outside Balloon







スーパーノバニュートリノ

$(L_\nu = 10kpc,\ 3 \times 10^{53} erg)$

$\bar{\nu}_e P \rightarrow e^+ n$ 330

$\nu e^- \rightarrow \nu e^-$ 8.0

KamLAND では νC scattering が観測でき ($\frac{\sigma_E}{E} = 2 \sim 3\%$)

	$\nu_e {}^{12}C \rightarrow {}^{12}Ne^-$ 17.3 MeV (11ms)	$\bar{\nu}_e {}^{12}C \rightarrow {}^{12}Be^+$ 14.4 MeV (20.4ms)	$\nu_x {}^{12}C \rightarrow {}^{12}C\nu_x$ 15.1 MeV
ν_e	1.9	-	1.5
$\bar{\nu}_e$	-	7.4	4.2
ν_x	-	-	51.9
VAC	14.5	13.8	57.6
MSW	27	7.4	57.6

CC/NN ratio により no osc かMSW, VAC のどれが $\nu_e \rightarrow \nu_x$ の解か区別できる。

太陽ニュートリノ

^7B ($E_{\nu_e} = 861keV$) ニュートリノの観測

極低放射能検出器が必要

U	10^{-16} g/g	
Th	10^{-16} g/g	$\Leftarrow$ Borexino の 目標値
K	10^{-14} g/g	

neutrino signal $\sim$ 230 events/day

<u>昼夜変動によりMSW Low solutionをカバー</u>

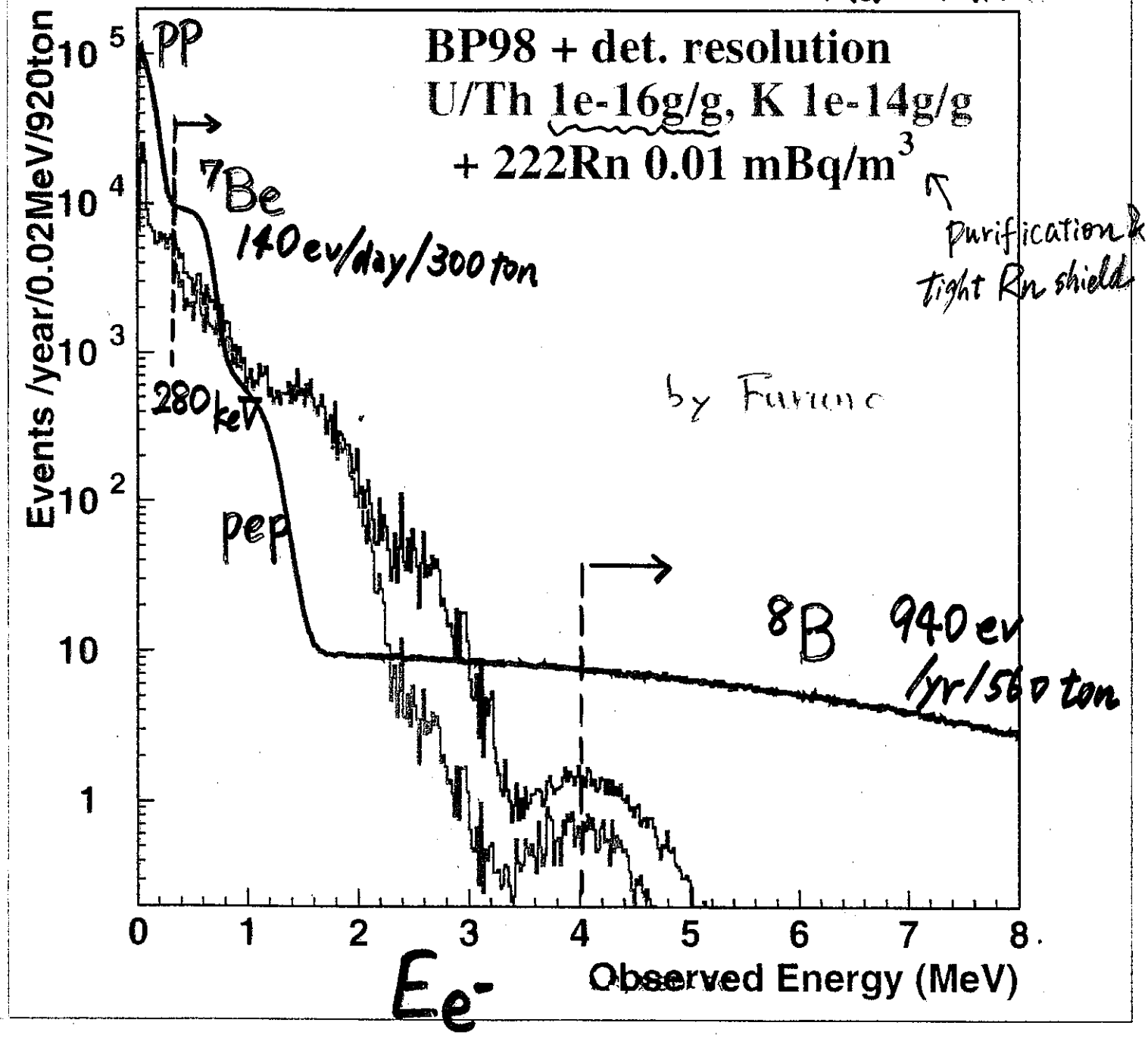
Solar ν detection

reaction : $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e' e^{-\prime}$

Single counts of e^- in

Very Low radioactive environment.

KamLAND



↳ $\Phi_\nu(^7Be)$, $\Phi_\nu(^8B)$: Key of the solar ν.

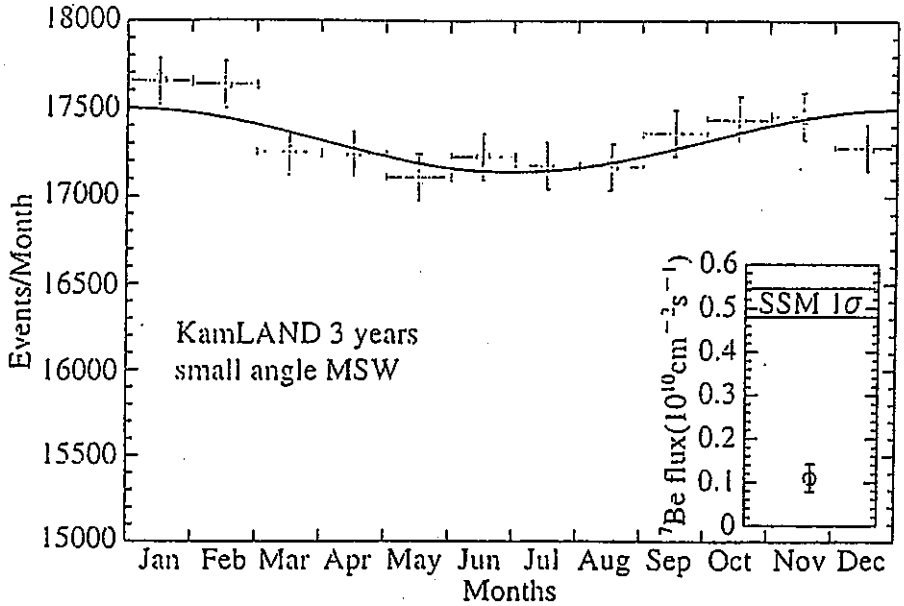


図 9　小混合角解の場合の公転距離変動による ^{7}Be ニュートリノ事象数の季節変動.

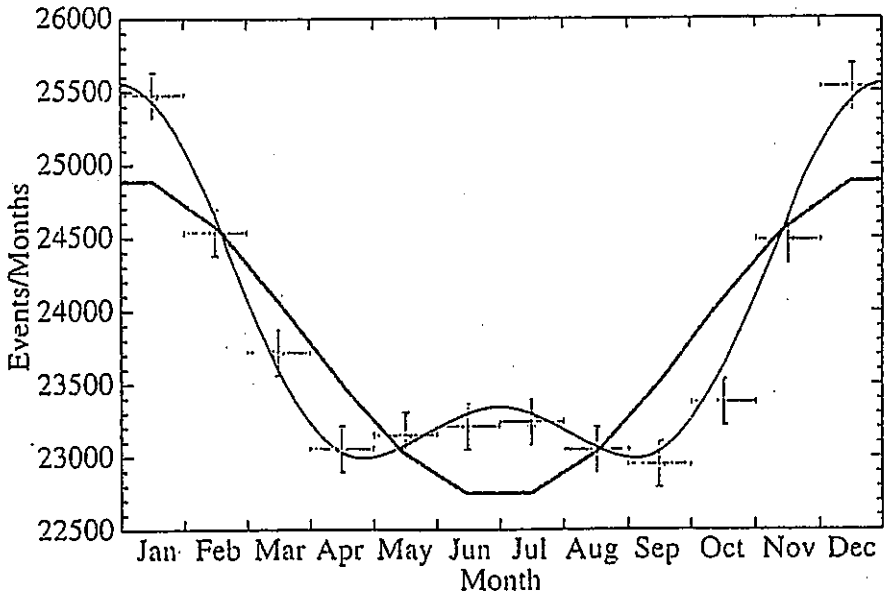
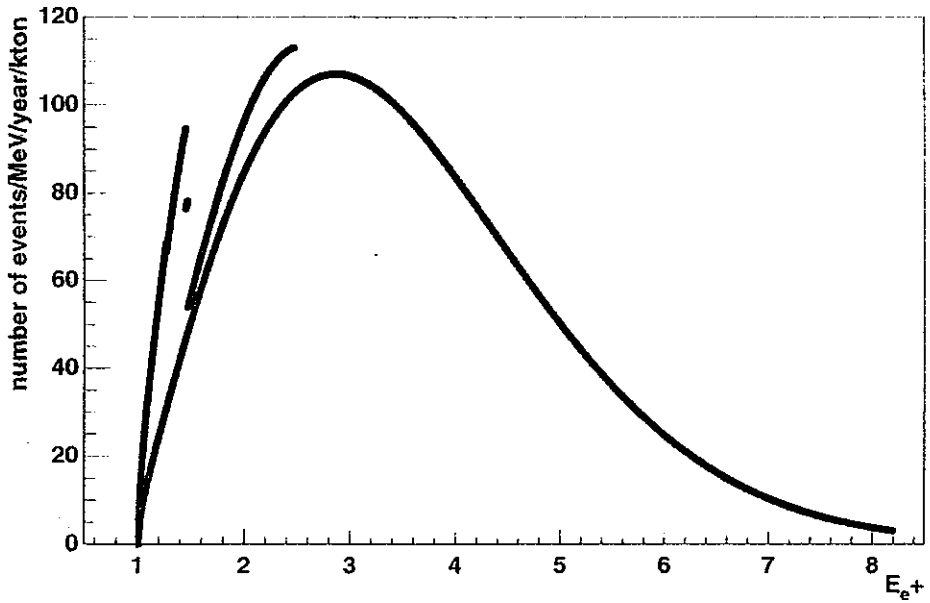


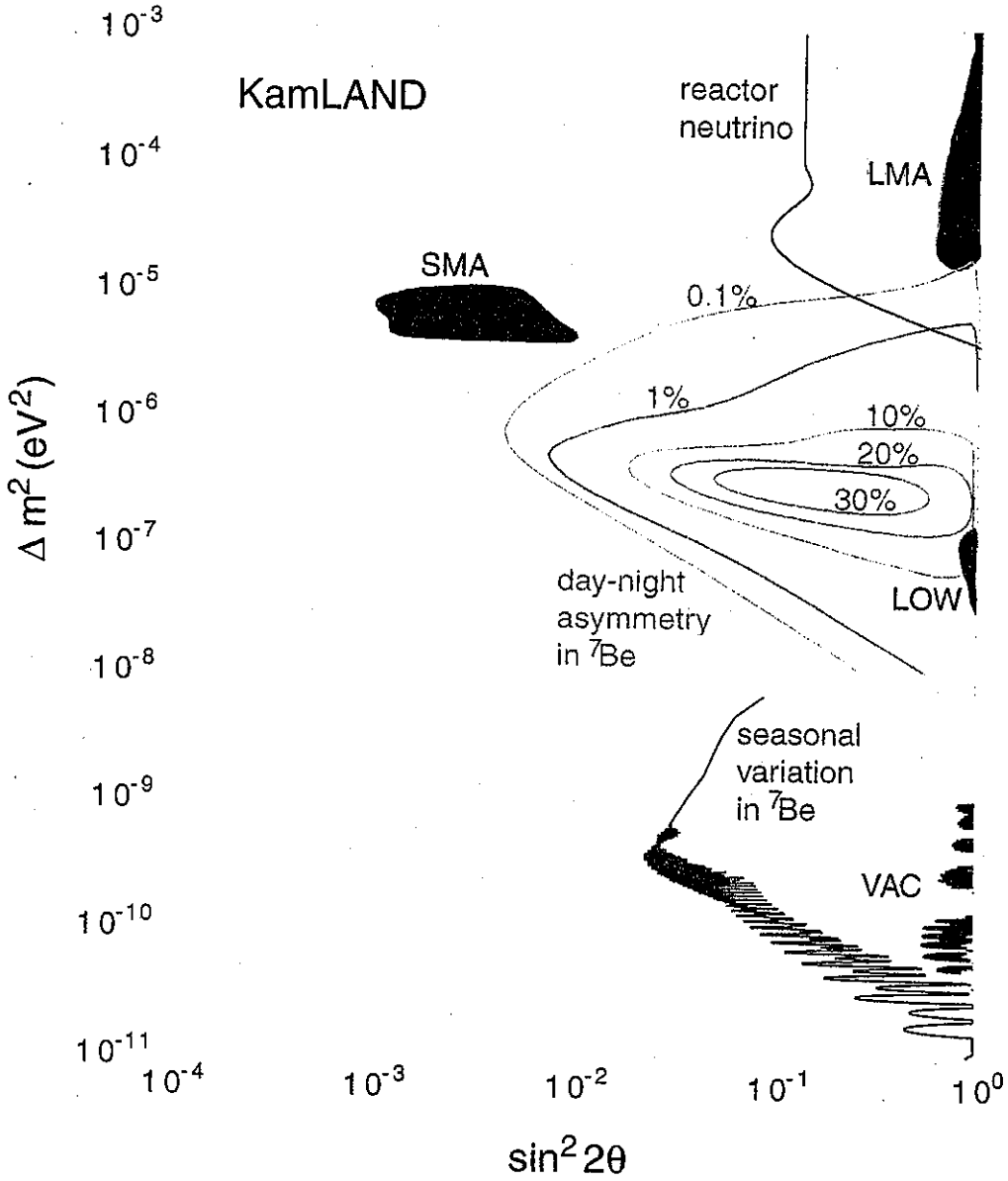
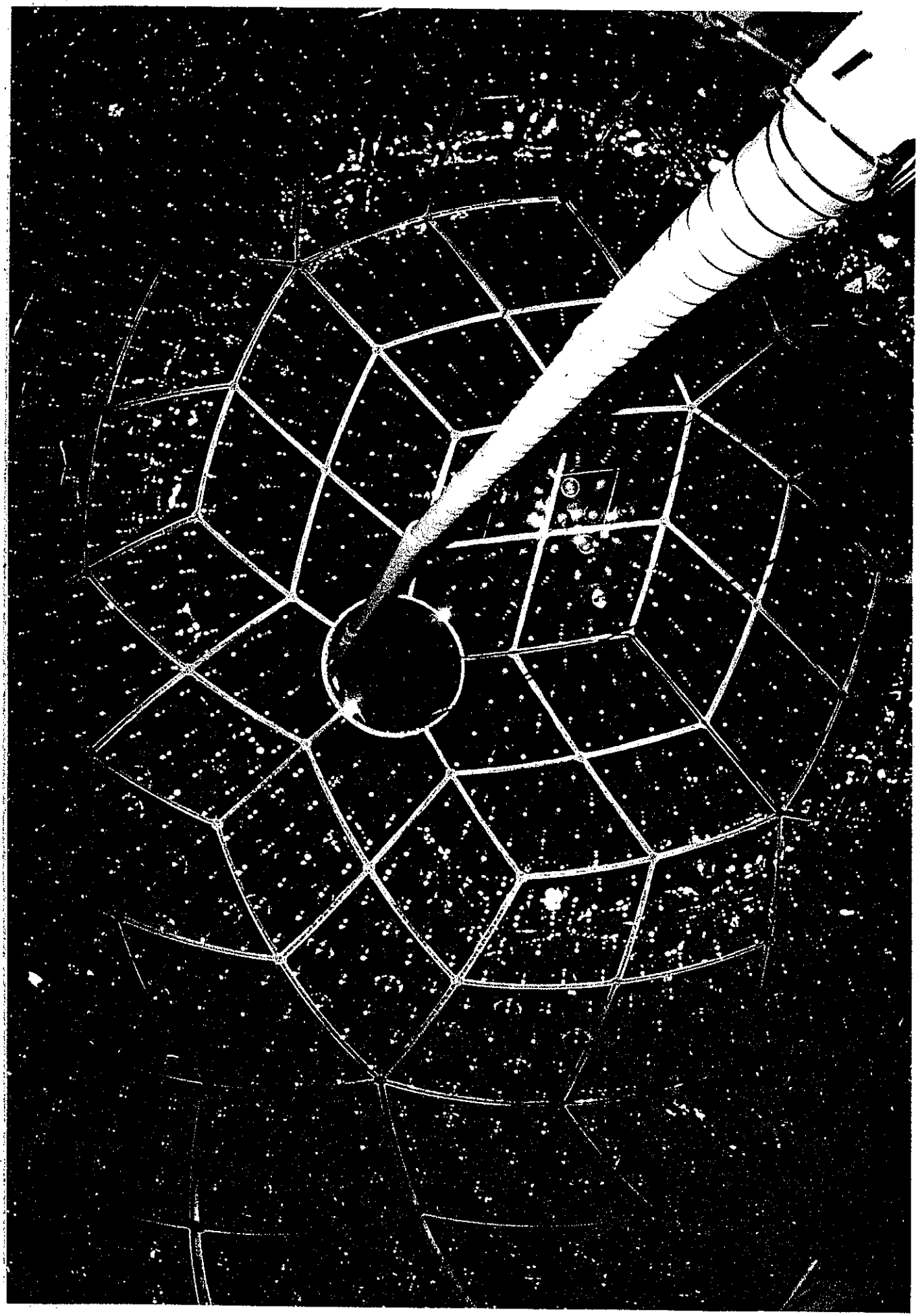
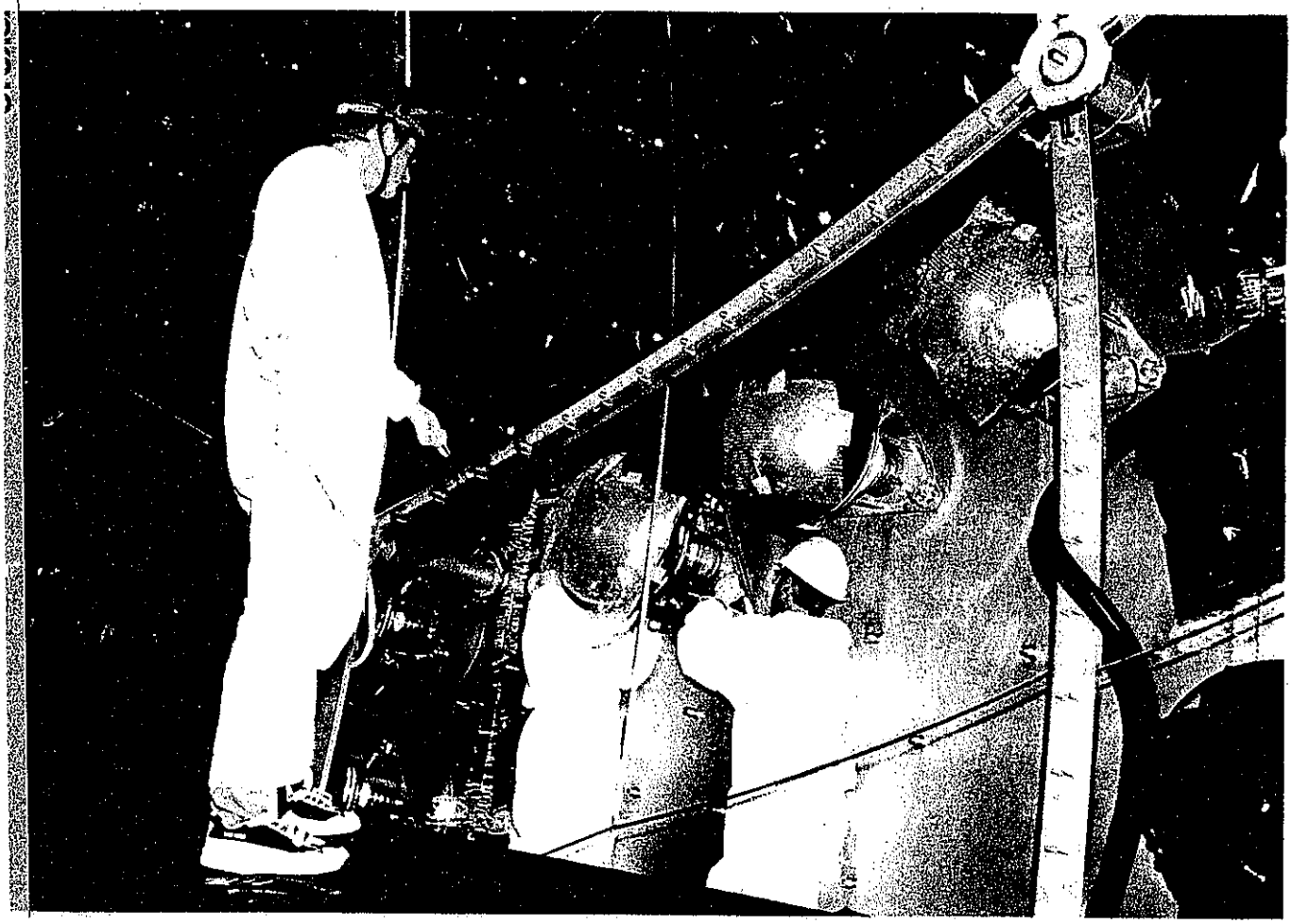
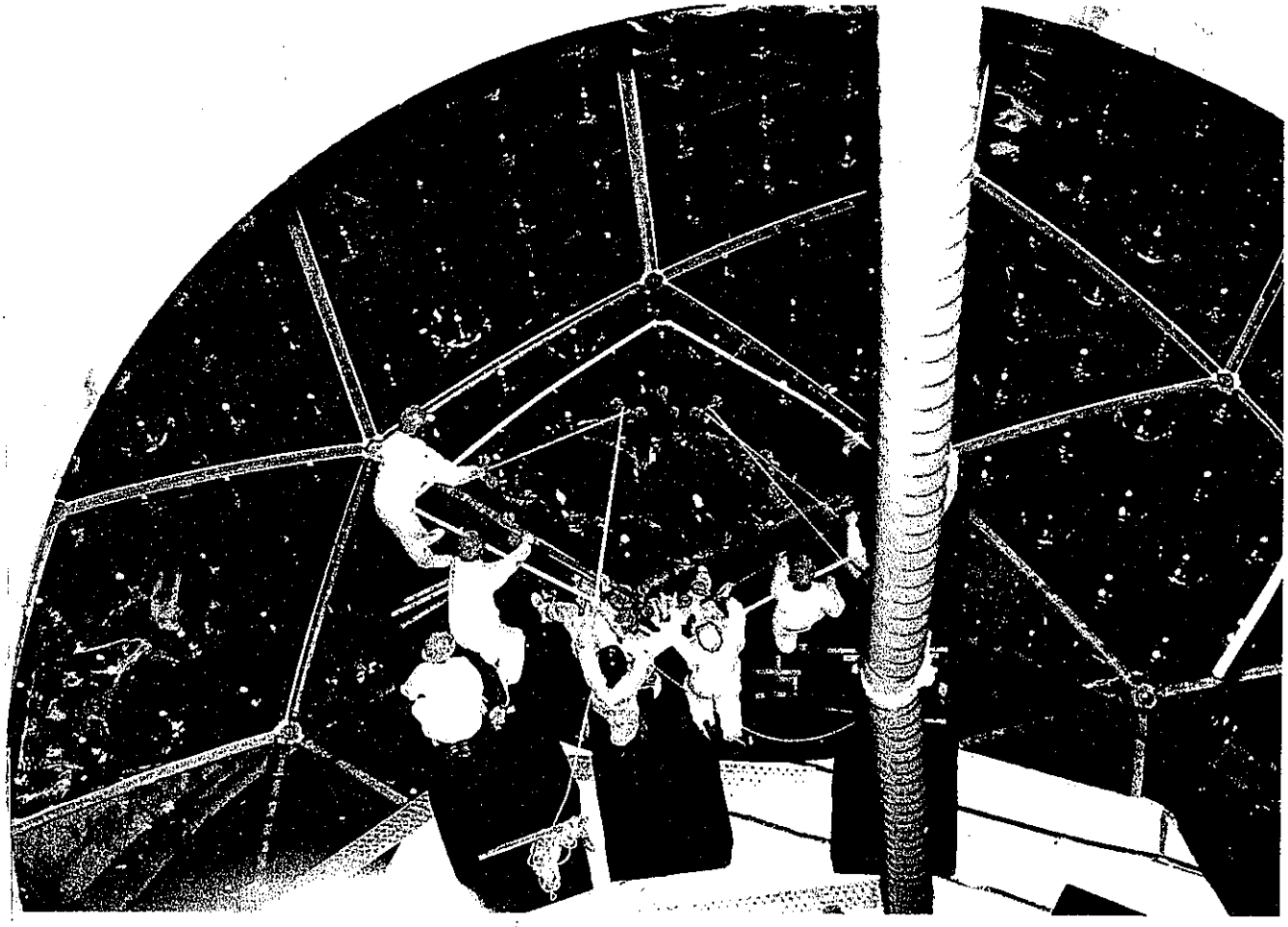
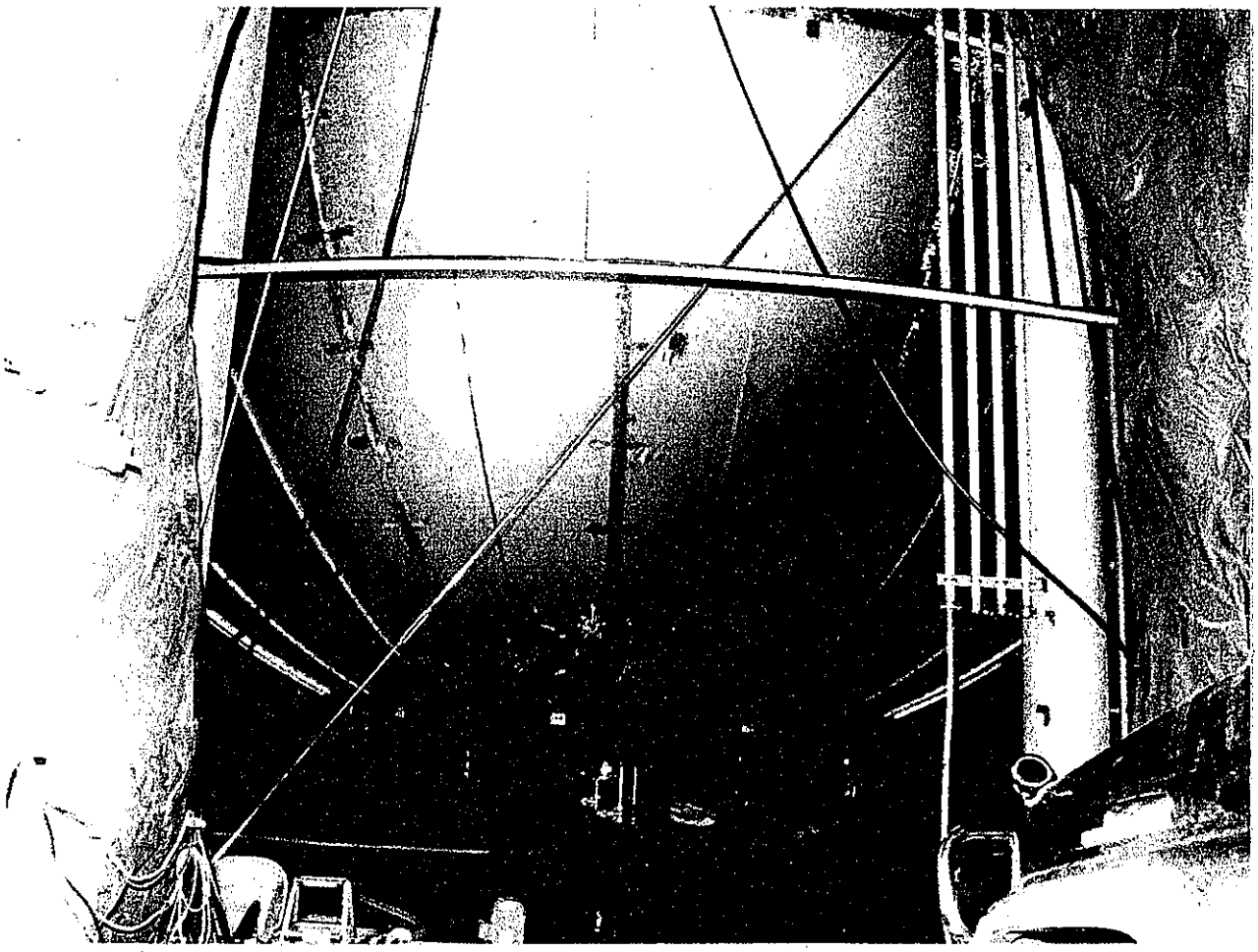
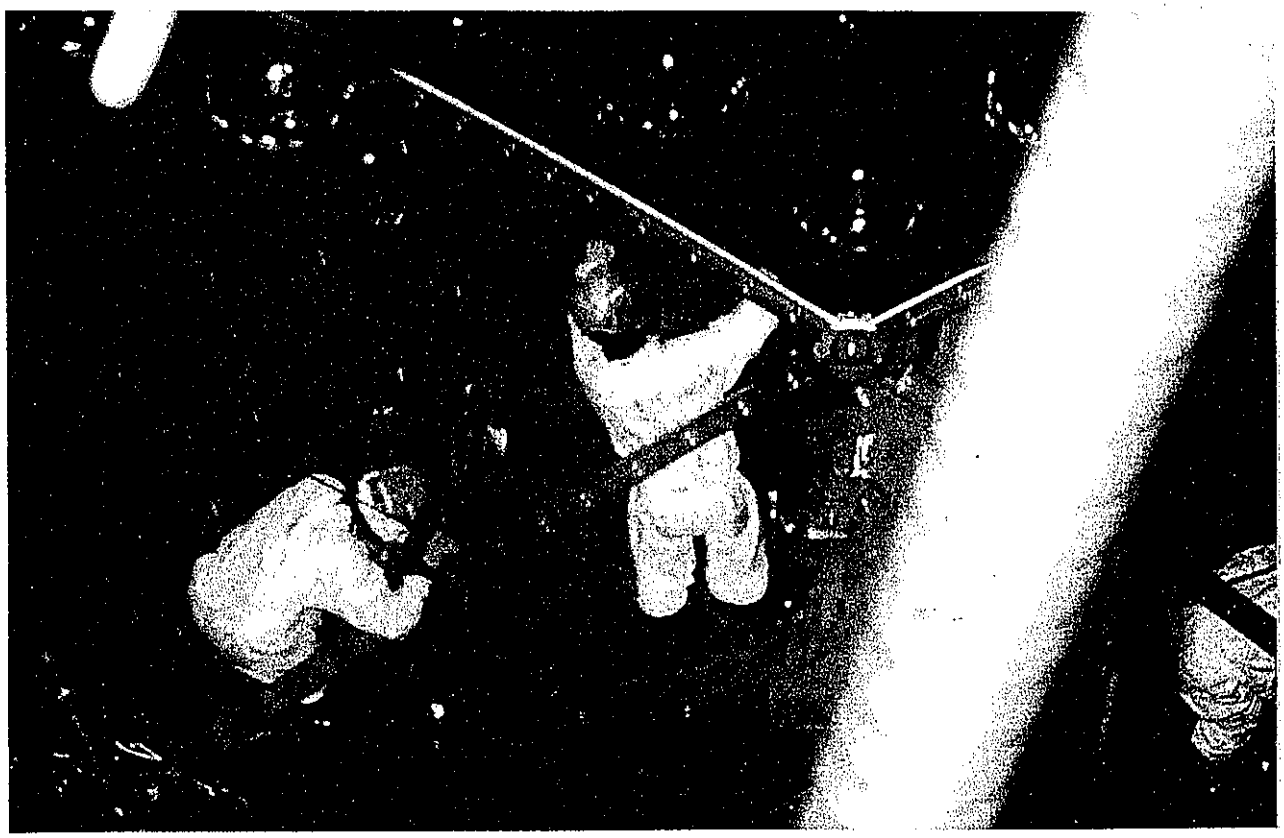
図 10　真空振動解 ($\Delta m^2 = 7.8 \times 10^{-11}$ eV^2, $\sin^2 2\theta = 0.71$) における ^{7}Be ニュートリノ事象数の季節変動 (点線). 実線は公転距離のみによる変動.

地球 ニュートリノ

地球の熱の 40% は 地球内部の U/Th の崩壊による。
大量のニュートリノが放出される。



- $\frac{\sigma_E}{E} << \frac{10}{\sqrt{E_{MeV}}}$ が必要。
  KamLAND $\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{8}{\sqrt{E_{MeV}}}$
- 20 ~ 60 event /year
- 成功すれば 世界初 !


KamLAND
reactor
neutrino
LMA
SMA
0.1%
1%
10%
20%
30%
LOW
day-night
asymmetry
in 7Be
seasonal
variation
in 7Be
VAC
Δ m2 (eV2)
sin2 2θ
10-3
10-4
10-5
10-6
10-7
10-8
10-9
10-10
10-11
10-4
10-3
10-2
10-1
100