



# チュートリアル講演 シンチレータの原理と応用例

2018年1月9日

飯田崇史(筑波大学)

# 目次

---

- 自己紹介
- シンチレータの歴史
- 無機シンチレータの原理と応用例
- 有機シンチレータの原理と応用例
- 物理実験における液体シンチレータ
- 将来のR & D
  - シンチレーション光-チェレンコフ光の分離
  - 水ベースの液体シンチレータ

# 自己紹介

- 名前: 飯田崇史(いだたかし)
- 所属: 筑波大学・助教



- 2005年～ 東大宇宙線研  
神岡で**スーパーカミオカンデ実験**。  
超新星爆発からの宇宙背景ニュートリノ探索で博士論文
- 2010年～ クイーンズ大学(カナダ)  
**SNO+実験**(2重ベータ崩壊探索、太陽ニュートリノ観測)
- 2013年～ 大阪大学  
**CANDLES実験**(2重ベータ崩壊探索)、暗黒物質探索
- 2017年～ 筑波大学  
**COBAND実験**(ニュートリノ崩壊探索)、他

水チェレンコフ  
5年

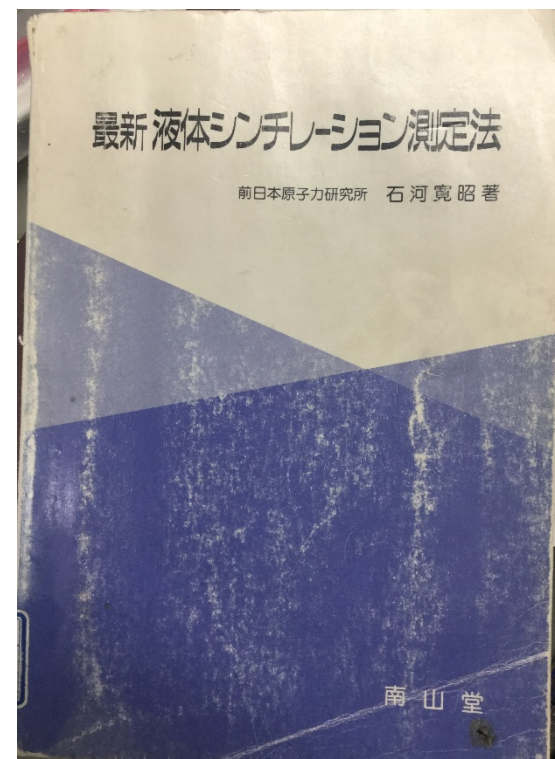
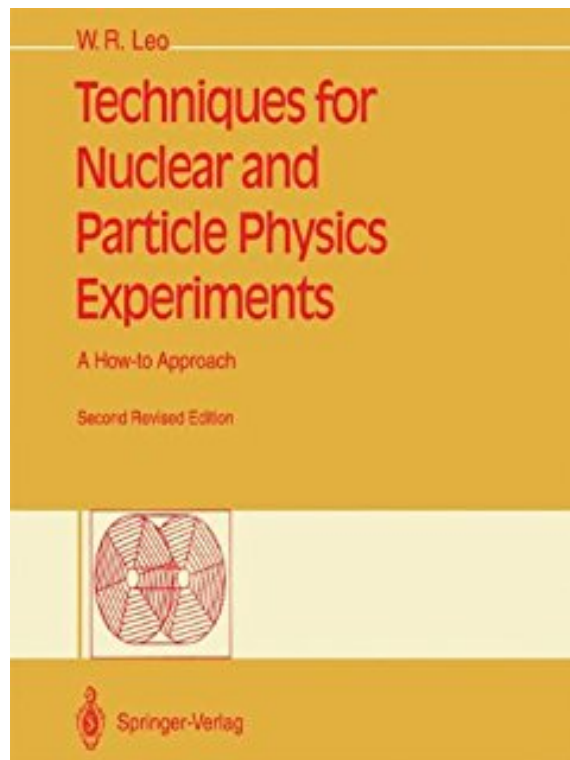
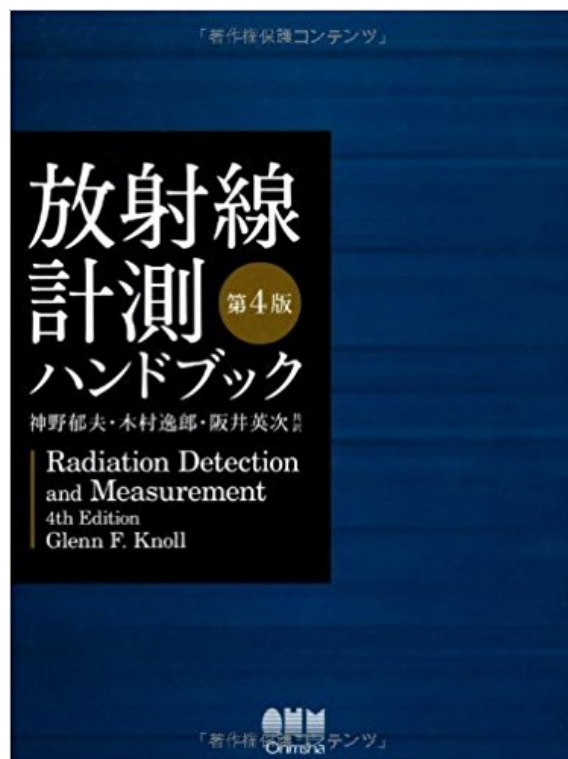
液体シンチ  
3年

無機シンチ  
4年

超伝導検出器  
1年

# 参考文献

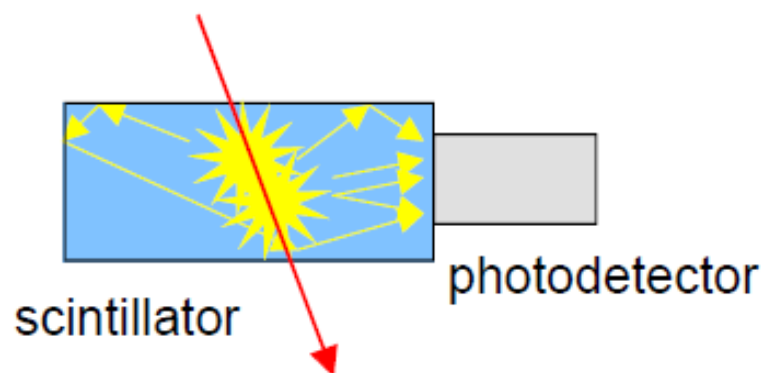
- 余り液シンに詳しくないので、本を読んでお勉強しました。
- 今回の発表は以下の本を参考にしています。





# シンチレータって？

- シンチレータとは「荷電粒子が通過するときに発光する」物質の総称で、そこで出てくる光をシンチレーション光という。
- シンチレータと光検出器を組み合わせたシンチレーション検出器は、素粒子物理のみならず、身の回りでも様々な用途で応用されている。
- 化学組成によって有機と無機に大別される。



# シンチレータの種類と特徴

- 有機、無機、固体、液体など様々な種類がある。

## 無機

明るい！！

固体

NaI(Tl)、BGOなど

原子番号が大きく、密度も高い。  
ただし遅い( $\mu$ 秒)。  
ガンマ線、エックス線の検出向き。

液体

液体Xe, 液体Arなど

有機同様、分子レベルの反応なので応答速度も速い。  
値段が高く、扱いづらい。

## 有機

早い！！(ナノ秒)

固体

プラシン、有機結晶

安い、軽い。  
加工性に優れる。  
早いので高計数率の測定向き。  
ミューオン検出等。

液体

液シン

安い、軽い。  
大規模実験がしやすい。  
純化可能。  
危険物である。

# 様々なシンチレータ

素粒子物理学ハンドブックより引用

物質	発光波長 [nm]	蛍光減衰時間 [ns]	相対光量*	屈折率	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
NaI(Tl)	410	230	100	1.85	3.67
CsI(Tl)	540	1050	~50	1.80	4.51
CsI(Na)	420	630	110	1.84	4.51
CsI	310, 420	6, 35	2, 3, 5, 6	1.85	4.51
BGO	480	300	7~10	2.15	7.13
BaF <sub>2</sub>	220, 310	0.6, 620	5, 16	1.50	4.89
CaF <sub>2</sub> (Eu)	435	940	50	1.48	3.19
GSO	430	30~60, 600	18, 2	1.85	6.71
LSO	420	40	~70	1.82	7.4
PbWO <sub>4</sub>	560	50	0.1	2.2	8.3
YAP(Ce)	370	28	40	1.94	5.37
液体 Xe	178	45	70	~1.6	2.95
アントラセン	440	30	43	1.62	1.25
プラスチックシンチ レーター NE102	423	2.4	28	1.58	1.03
KamLAND シンチレーター	~400	6	~30	1.44	0.778

アルカリハ  
ライド結晶

酸化物結晶

希ガス

有機結晶

プラシン

液シン

\* 相対光量は NaI の値を 100 として、通常よく使われる光電子増倍管で測定した相対値。

\*\* 各欄で 2 つ以上ある数値は、それぞれ異なる成分に対応する。

# シンチレーション以外の蛍光

シンチレーション光は蛍光の一種。励起された電子が基底状態に戻るときの光を蛍光という。電子系を励起するにはいくつかの方法があるが、励起方法によって異なる名称が与えられる。

## (1) フォトルミネッセンス

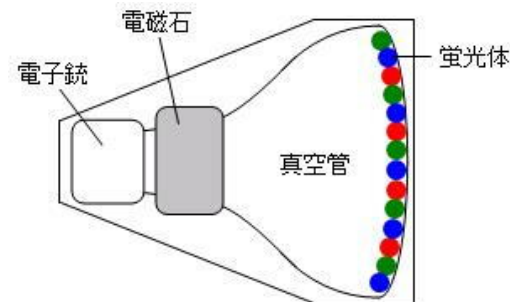
光によって励起する場合をフォトルミネッセンスとよぶ。

例：蛍光灯、プラズマディスプレイなど。



## (2) カソードルミネッセンス

高い運動エネルギーをもった電子をぶつけて励起する場合をカソードルミネッセンスという。例：ブラウン管やFED



## (3) エレクトロルミネッセンス

電界または電流によって励起する場合をEL(エレクトロルミネッセンス)という。例：LED、有機EL

## (4) 化学ルミネッセンス

化学反応によって励起された分子が基底状態に戻る際、エネルギーを光として放出する現象。例：蛍の光(ルシフェリン)





# シンチレータの歴史



# シンチレータの歴史

---

- 1903年 CrookesがZnSを使って $\alpha$ 線を見る。
- 1909年 Rutherford, Geiger, Marsdenによる  
アルファ線の大角度散乱の実験。
- 1937年 Kallmannが有機蛍光体の蛍光を初観測。
- 1944年 CurranとBakerが光電子増倍管を用いて  
放射線検出器を開発。
- 1947年 Kallmann、有機溶媒＋蛍光物質（液シン）
- 1948年 HofstadterがNaI(Tl)結晶を発見。
- 1953年 ReinesとCowanが有機液体シンチレータを  
使ってニュートリノを発見。

# ラザフォードの散乱実験(1909年)

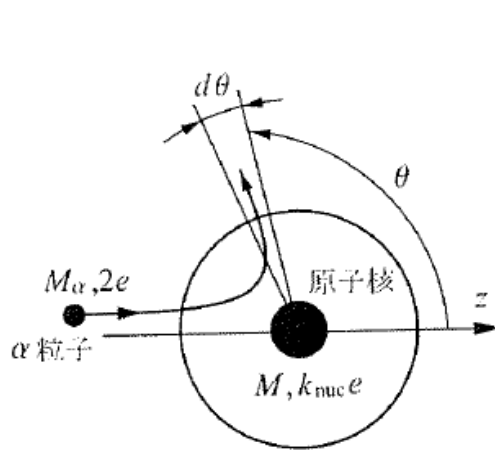
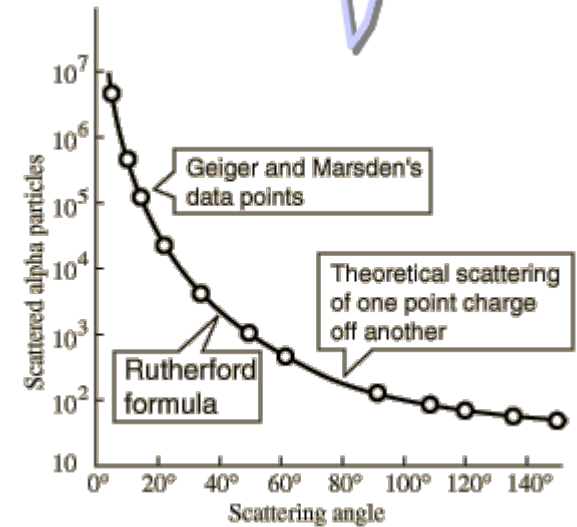
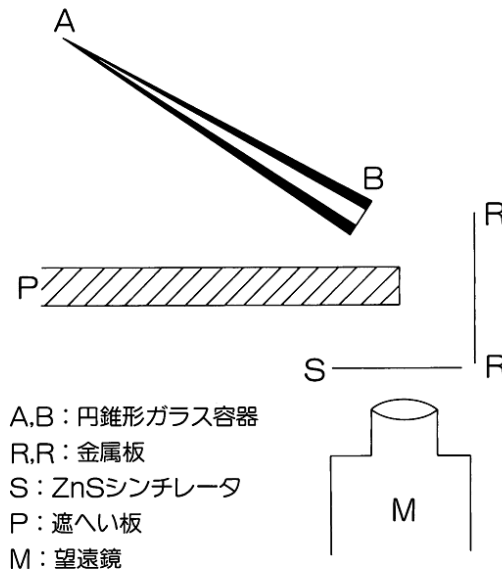


図 1.2  $\alpha$  粒子の原子核による散乱



- 金属板に当たったアルファ線は反射されてZnSが光るのが観察された。
- ラザフォードは薄い金属板でアルファ線がはじき返されたことが、「チリ紙で弾丸がはじき返されたことのように思えた」と後に述べている。
- 反射されるアルファ線の数に反射金属板の原子番号が大きいほど増加した。
- また、薄い金箔を重ねていくと、最初は枚数に比例して反射されるアルファ線数は増加していくが、20枚ほどで飽和した。
- ラザフォードは一連の実験事実とボーアの軌道電子モデルを考慮にいて、いわゆる有核原子モデルを1914年に提案した。



# 世界初のニュートリノ検出

20 July 1956, Volume 124, Number 3212

## SCIENCE

### Detection of the Free Neutrino: a Confirmation

C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison,  
H. W. Kruse, A. D. McGuire

A tentative identification of the neutrino was made performed at Hanford that work the reaction

$\nu_e + p^+ \rightarrow e^- + p^+$



Clyde Cowan Jr.

both triads. The detector was completely enclosed by a paraffin and lead shield and was located in an underground room of the reactor building which provides excellent shielding from both the reactor neutrons and gamma rays and from cosmic rays.

The signals from a bank of preamplifiers connected to the scintillation tanks were transmitted via coaxial lines to an electronic analyzing system in a trailer van parked outside the reactor building. Two independent sets of equipment were used to analyze and record the operation of the two triad detectors. Linear ampli-

ifier select-  
units. When  
s and co-  
yed) were  
riple-beam  
and the  
vent were  
the three



Frederick Reines

1930年

Pauliがニュートリノを提唱。

1953年

Hanfordの実験

世界初ニュートリノ検出！

1956年

サイエンス誌に論文投稿

1995年

Reines、ノーベル賞受賞

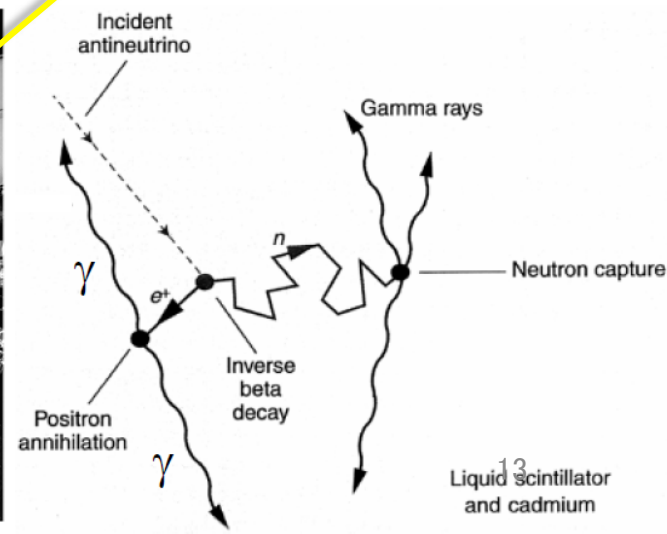
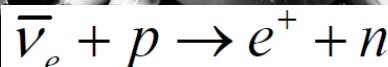
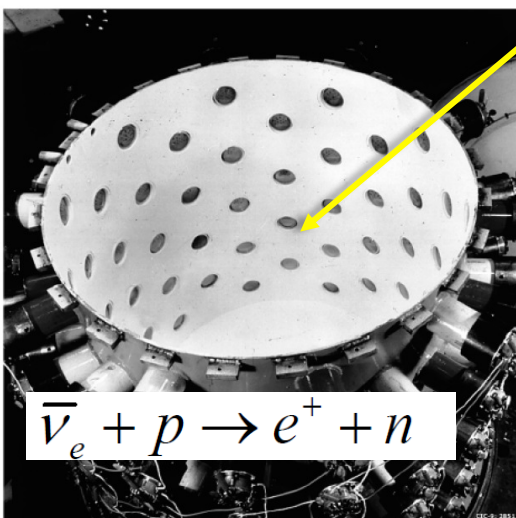


# 世界初ニュートリノ検出実験

- 1953年、ワシントン州Hanfordの原発でCowanとRinesが行った、世界初のニュートリノ検出実験。

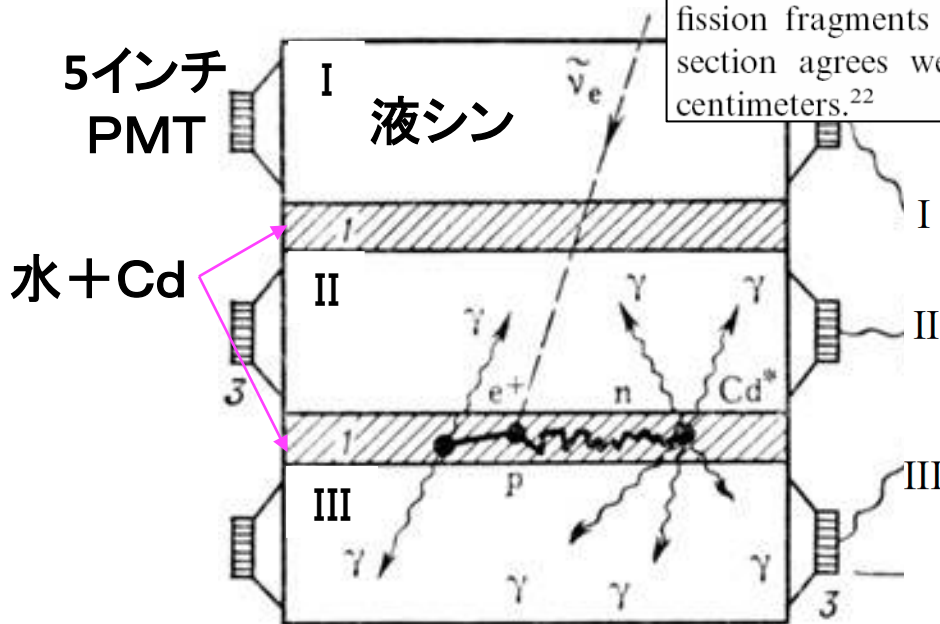
- 300リットルの液シン(P-ターフェニルとPOPOP) + 光電子増倍管。カドミニウム入り。
- 原子炉からの反ニュートリノを逆ベータ崩壊と中性子捕獲の同時計数。
- 高いBGRレベル → S/N ~ 1/20

→  $0.41 \pm 0.20$  events / minute



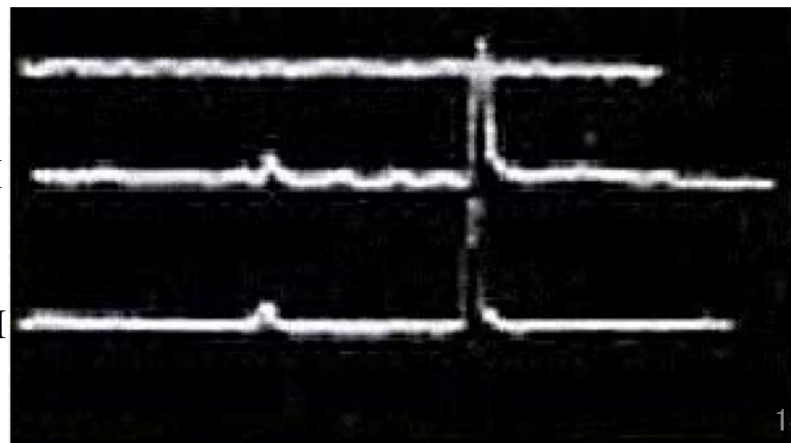
# Savannah River実験

- ニュートリノ検出を確実にするため、1956年にサウスカロライナ州のSavannah Riverで再実験。
- 水 + Cdのターゲット層、トータル4200リットルの液体シンチレータ層のサンドイッチ。二つの検出器で同時計数。
- ニュートリノ断面積 =  $6.3 \times 10^{-44} \text{ [cm]} \pm 25\%$

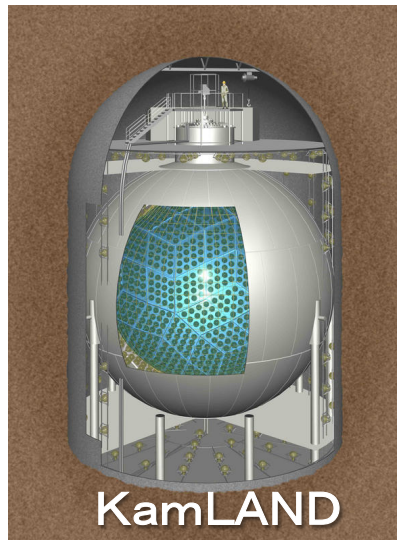


In June of 1956, they sent a telegram to Pauli:

We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse beta decay of protons. Observed cross section agrees well with expected six times ten to minus forty-four square centimeters.<sup>22</sup>



# その後の液体シンチレータ実験



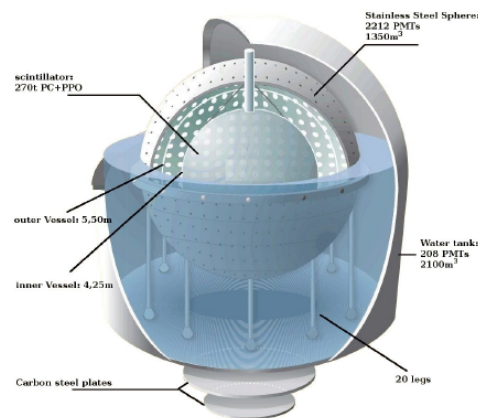
KamLAND

- 1000 t
- 1000 m U.G. @神岡
- DC+PC+PPO

2002年 観測開始

2004年 原子炉 $\nu$ 振動

2007年 地球 $\nu$



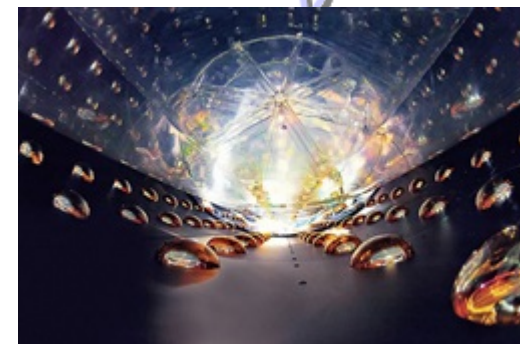
Borexino

- 278 t
- 1350 m U.G. @Italy
- PC+PPO (1.5 g/l)

2007年 観測開始

2008年  $7\text{Be}$ 太陽 $\nu$

2012年 PEP太陽 $\nu$



Daya Bay

- 20 $\times$ 8 t
- 250~850 m U.G. @中国
- LAB+PPO (3 g/l)+bis-MSB (15 mg/l)+Gd (0.1wt%)

2011年 観測開始

2012年  $\theta_{13}$  ( $5\sigma$ )測定

液体シンチレータは大ボリウムを要するニュートリノ実験で活躍している。  
一方の無機シンチレータは大発光量が必要な暗黒物質、二重ベータ崩壊実験で活躍。

A person's hand is visible in the upper left, holding a device that emits a bright blue laser beam. The beam is directed at a large, clear, faceted crystal that is resting on a dark, textured surface. The crystal is illuminated from below by a blue light source, creating a strong blue glow. The background is dark and out of focus.

# 無機シンチレータの原理と応用



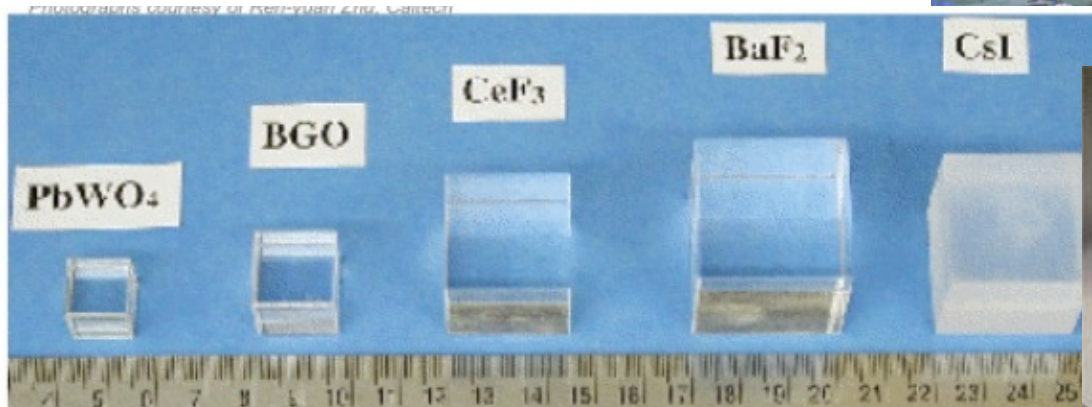
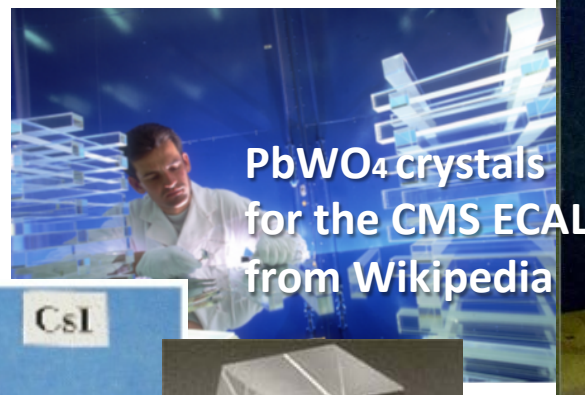
# 無機シンチレータの話

無機シンチレータにも色々種類がある。

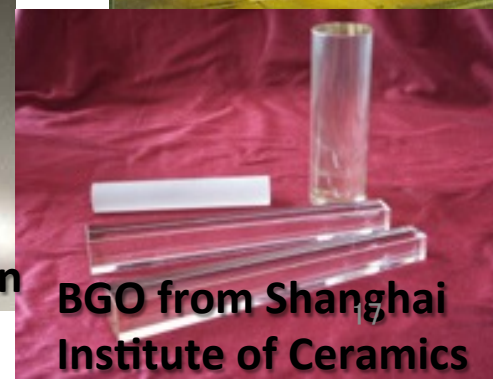
1. NaI(Tl)、CaF<sub>2</sub>(Eu)、LaBr<sub>3</sub>(Ce)などの  
**アルカリハライド結晶**。
2. BGO, GAGGなどの**酸化物結晶**。
3. Xe, Arなどの希ガス。

このトークでは上二つの無機結晶  
シンチレータについて話します。

CsI(Tl) from BaBar  
Rome group



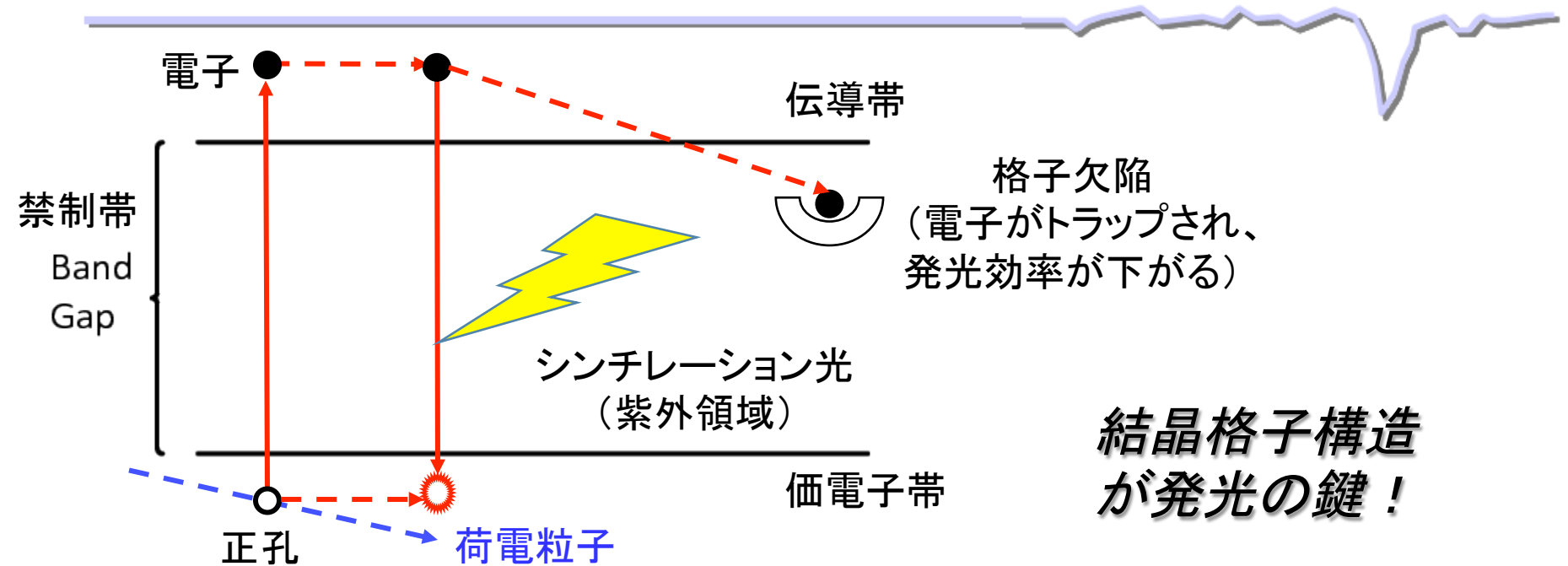
BaF<sub>2</sub> from  
Saint-Gobain  
Crystals



BGO from Shanghai  
Institute of Ceramics

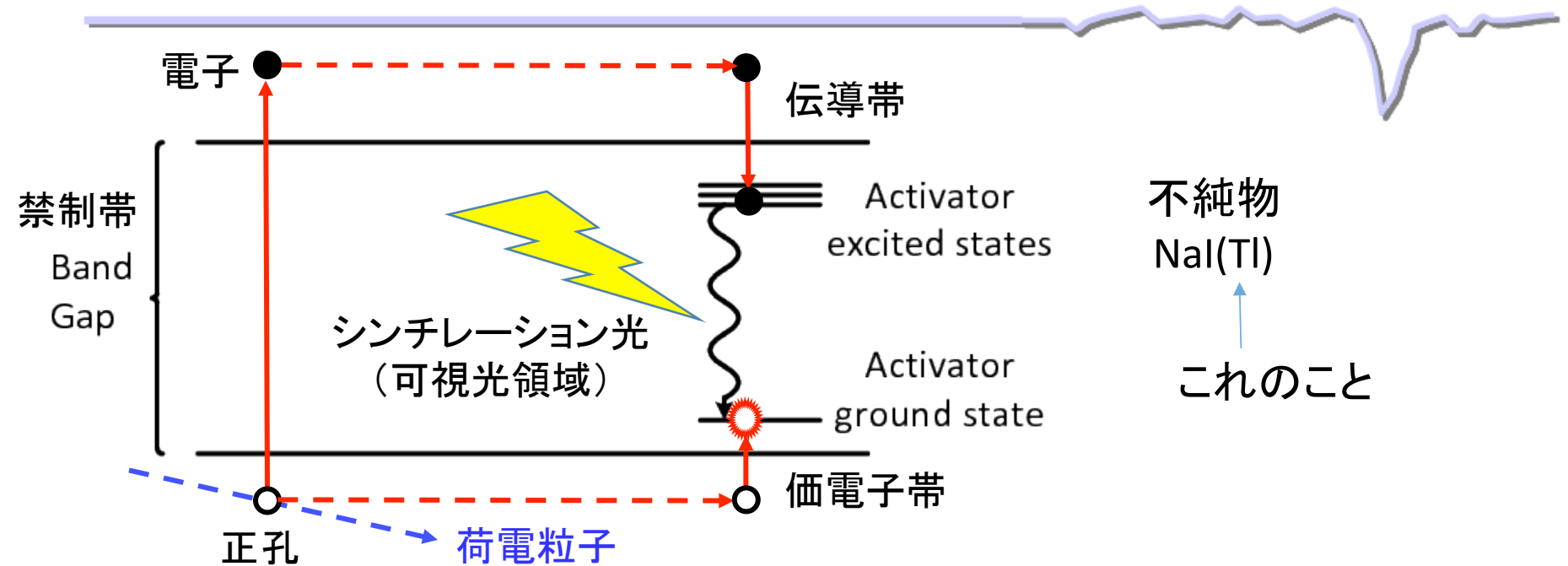
*Pictures are from Prof. Mark Chen's slide.*

# 無機シンチレータの発光過程



- 荷電粒子が結晶格子上的の価電子にエネルギーを落とし、電子を伝導体に押し上げる。
- 伝導体の電子と、価電子帯の正孔は各々、自由に動き回る。
- 電子と正孔が出会うと、電子は伝導体から価電子帯に落ちて、余剰エネルギーを光として放出する。
- 問題点： 余り効率が良くない＆発光波長が短い。

# 無機シンチレータの発光過程



- あえて不純物(活性化剤)を混ぜて一部結晶構造を変化させ、禁制帯内部に新たなエネルギー準位を作り出す。
- 不純物の励起エネルギー幅が小さいので、放出する光は可視光。
- 正孔は不純物の基底状態、電子は不純物の励起状態に捕獲されて、効率的にシンチレーション光が放出される。

※ NaI(Tl)の場合、Gap $\sim$ 20eVなので1MeVで約5万個の電子正孔対が作られる。  
一般的なNaI(Tl)の光量が42000光子/MeVなので、90%以上の効率で発光している。

# 無機結晶シンチレータの特徴



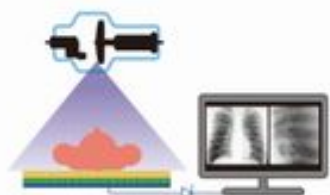
- ☺ 発光量が大きく、エネルギー分解能が良い。
- ☺ 密度が大きい&原子番号が大きい。  
つまりガンマ線の阻止能が高い。
- ☺ エネルギー応答の線形性が良い。

以上のような特徴を持つため、ガンマ線やX線のスペクトロメータとして使うのに適する。

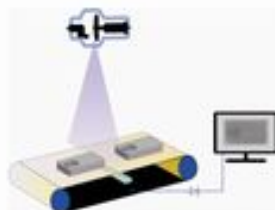
- ☹ 有機に比べて遅い。
- ☹ しばしば潮解性があり扱いにくい。



# 無機シンチレータの応用例



X線撮影装置



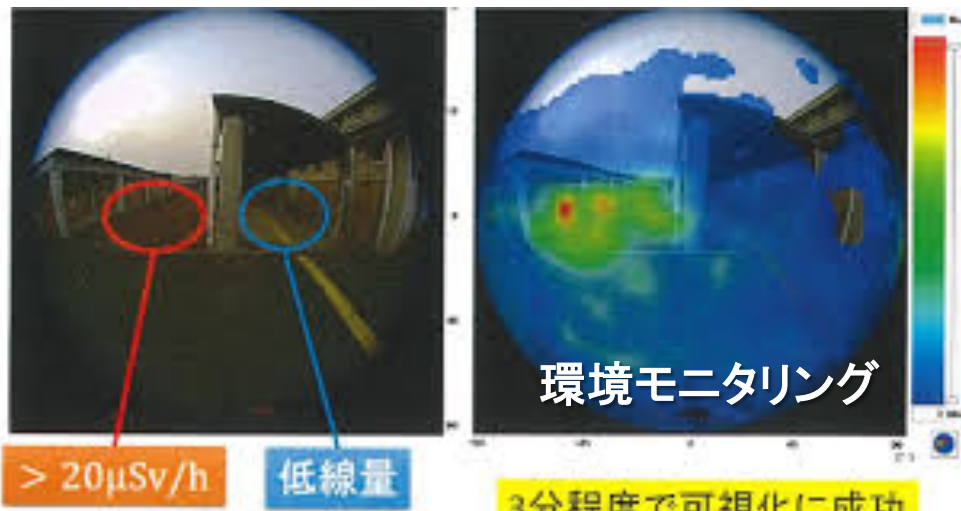
食品検査装置



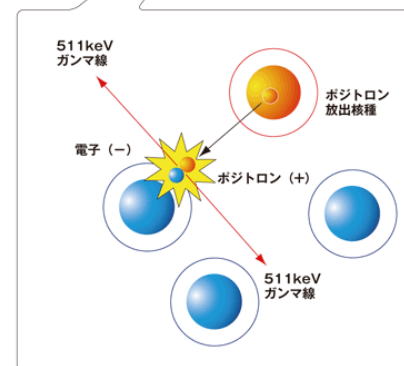
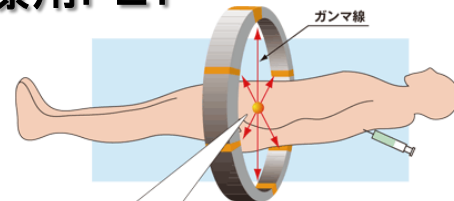
荷物検査装置



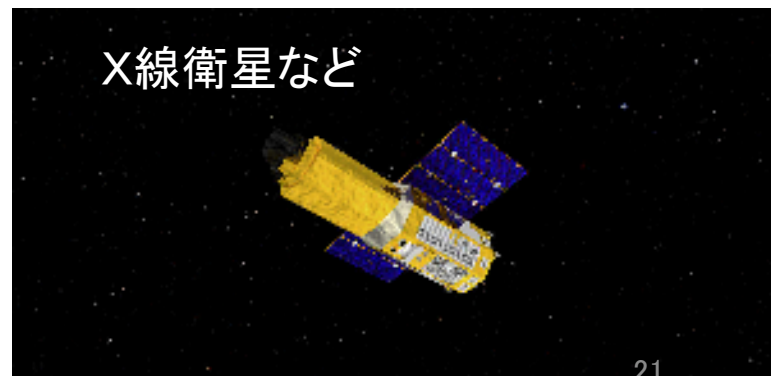
車体検査装置



医療用PET



X線衛星など

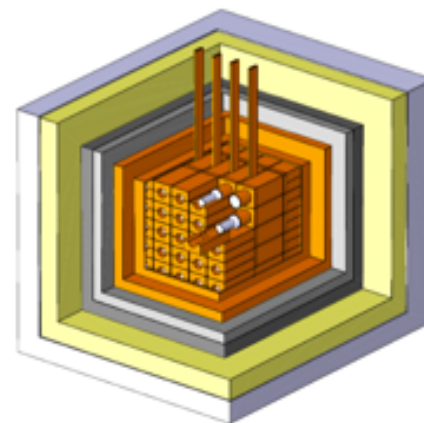


# 地下素粒子実験での応用例

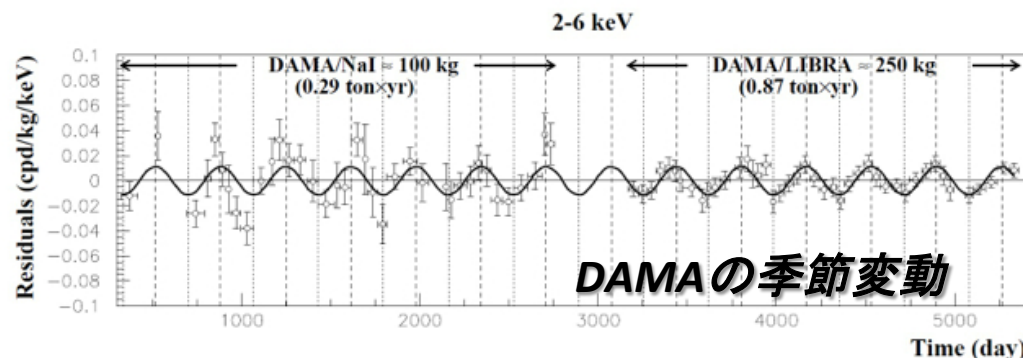
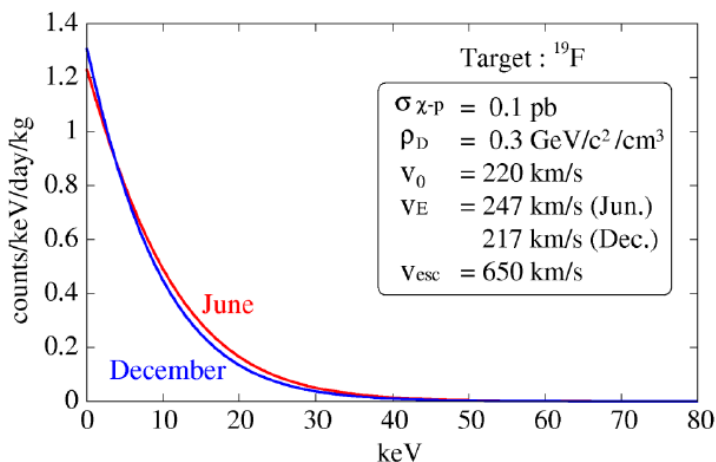
## 暗黒物質：イタリアのDAMA実験。

250kgのNaI(Tl)シンチレータを使って、  
暗黒物質の季節変動を発見したと主張

- キセノン検出器などで否定されており、  
実際に何を見ているかは不明。
- エネルギー閾値2keVだが、より下げた  
解析で季節変動を見ようとしている。



Bernabei et al. NIMA 592 (2008) 297.



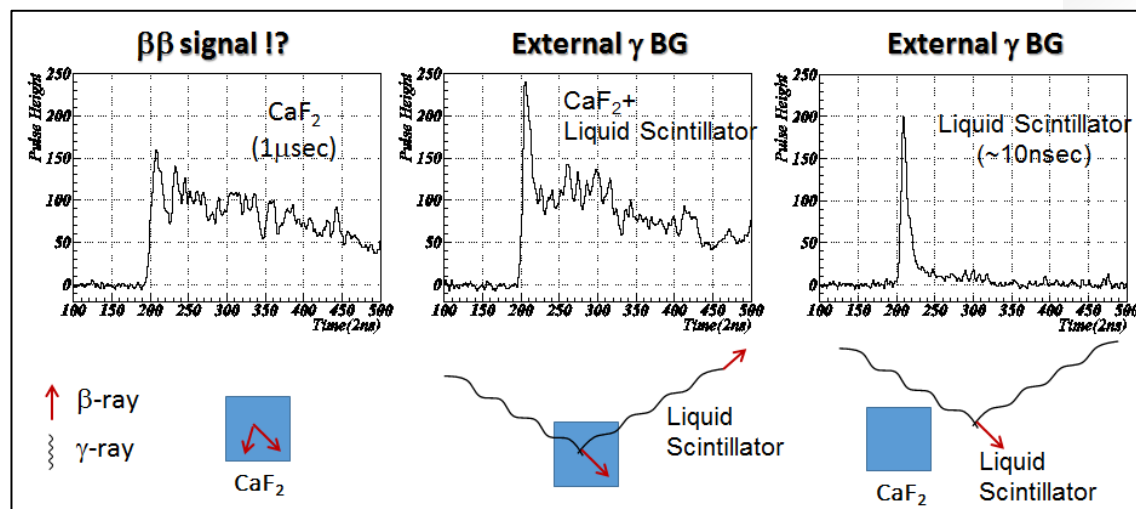
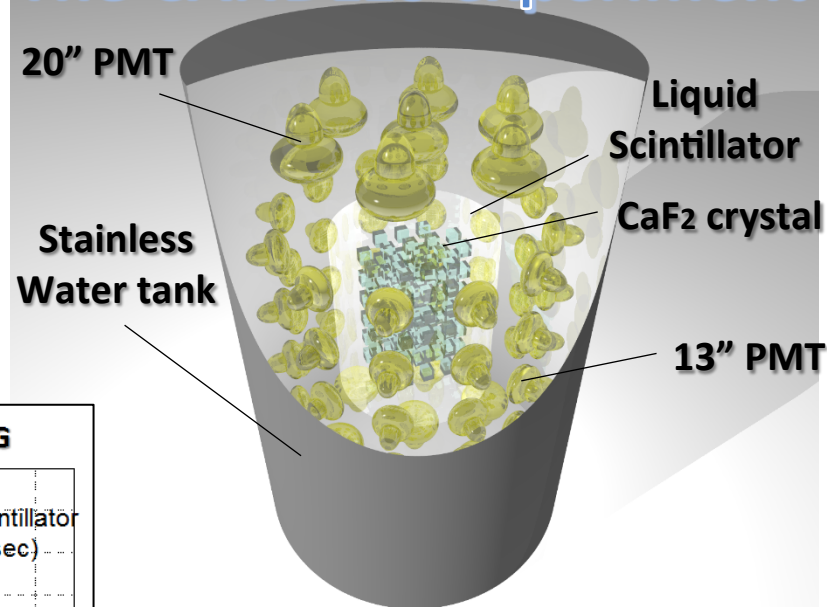
# 地下素粒子実験での応用例



## 二重ベータ：日本のCANDLES実験

- 岐阜県神岡でやっている、 $^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊の実験。
- $\text{CaF}_2$  結晶 ( $\tau \sim 1\mu\text{sec}$ )  
 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3 \times 96\text{ヶ}$  (計300 kg)
- $2\text{m}^3$ の液体シンチレータ ( $\tau \sim 10\text{nsec}$ )

## The CANDLES experiment



$^{48}\text{Ca}$ の二重ベータ崩壊では、  
世界最高感度を達成！！

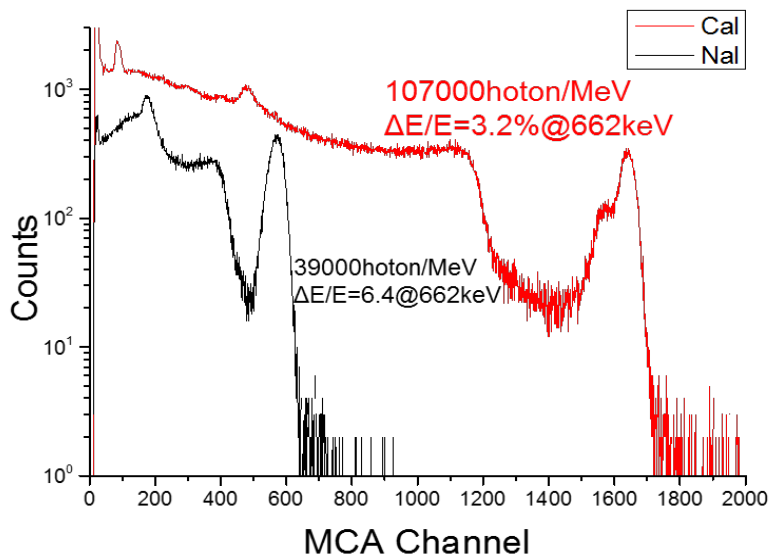
$$T_{1/2} > 6.2 \times 10^{22} [\text{y}]$$

現在も順調に稼働中。

この検出器で超新星ニュートリノに関する共同研究募集中！！

# ちょっと宣伝

- 最近、CaI<sub>2</sub> (ヨウ化カルシウム) というシンチレータを開発中。
- めちゃくちゃ明るくて分解能も良い。
- 二重ベータ崩壊核である<sup>48</sup>Caを含む。
- 発光量10万光子/MeV (NaIの2.7倍)を達成。
- 低BG化や大型化のR&D中。



## Single crystal growth and scintillation properties of Ca(Cl, Br, I)<sub>2</sub> single crystal

Kei Kamada <sup>a, b, c, d</sup>, Takashi Iida <sup>c, d</sup>, Takaki Ohata <sup>c</sup>, Masao Yoshino <sup>b, e</sup>, Shoki Hayasaka <sup>b</sup>, Yasuhiro Shoji <sup>b, e</sup>, Shiro Sakuragi <sup>f</sup>, Shunsuke Kurosawa <sup>a, e</sup>, Yuui Yokota <sup>a</sup>, Yuji Ohashi <sup>e</sup>, Akira Yoshikawa <sup>a, b, e</sup>



## Summary table of scintillator performance

	NaI(Tl)	CaI <sub>2</sub>
Light yield	39,000 ph/MeV	107,000 ph/MeV
E resolution	6.4% @662keV	3.2% @662keV
Emission WL	420 nm	410 nm
Time constant	230 ns	834 ns
Density	3.67 g/cm <sup>3</sup>	3.97 g/cm <sup>3</sup>

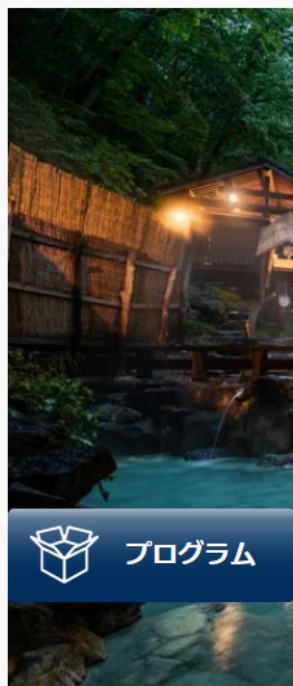


# シンチレータ研究会

## SMART 2017

Scintillator for Medical, Astroparticle and  
environmental Radiation Technologies  
2017年11月11～13日 蔵王温泉

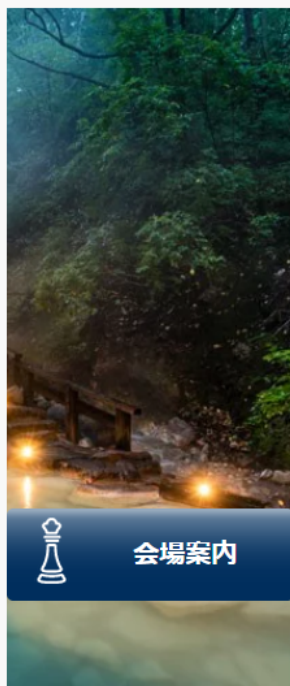
<https://smart20170.wixsite.com/smart2017>



プログラム



参加登録



会場案内



新着



次回は6月に沖縄で開催予定！是非ご参加ください！！

# 無機シンチレータまとめ

Parameter: $\rho$	MP	$X_0^*$	$R_M^*$	$dE/dx$	$\lambda_I^*$	$\tau_{\text{decay}}$	$\lambda_{\text{max}}$	$n^{\natural}$	Relative output $^{\dagger}$	Hygro- scopic?	$d(\text{LY})/dT$ %/ $^{\circ}\text{C}^{\ddagger}$	
Units: g/cm <sup>3</sup>	$^{\circ}\text{C}$	cm	cm	MeV/cm	cm	ns	nm					
NaI(Tl)	3.67	651	2.59	4.13	4.8	42.9	230	410	1.85	100	yes	$\sim 0$
BGO	7.13	1050	1.12	2.23	9.0	22.8	300	480	2.15	9	no	$-1.6$
BaF <sub>2</sub>	4.89	1280	2.03	3.10	6.6	30.7	630 <sup>s</sup>	300 <sup>s</sup>	1.50	21 <sup>s</sup>	no	$-2^s$
							0.9 <sup>f</sup>	220 <sup>f</sup>		2.7 <sup>f</sup>		
CsI(Tl)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	1300	560	1.79	45	slight	0.3
CsI(pure)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	35 <sup>s</sup>	420 <sup>s</sup>	1.95	5.6 <sup>s</sup>	slight	$-0.6$
							6 <sup>f</sup>	310 <sup>f</sup>		2.3 <sup>f</sup>		
PbWO <sub>4</sub>	8.3	1123	0.89	2.00	10.2	20.7	50 <sup>s</sup>	560 <sup>s</sup>	2.20	0.1 <sup>s</sup>	no	$-1.9$
							10 <sup>f</sup>	420 <sup>f</sup>		0.6 <sup>f</sup>		
LSO(Ce)	7.40	2070	1.14	2.07	9.6	20.9	40	420	1.82	75	no	$\sim 0$
GSO(Ce)	6.71	1950	1.38	2.23	8.9	22.2	600 <sup>s</sup>	430	1.85	3 <sup>s</sup>	no	$-0.1$
							56 <sup>f</sup>			30 <sup>f</sup>		

\* Numerical values calculated using formulae in this review.

<sup>‡</sup> Refractive index at the wavelength of the emission maximum.

<sup>†</sup> Relative light yield measured with a bi-alkali cathode PMT.

<sup>‡</sup> Variation of light yield with temperature evaluated at room temperature.

<sup>f</sup> = fast component, <sup>s</sup> = slow component

CaF<sub>2</sub>(Eu) 3.18

940 435 1.47

50

no

CdWO<sub>4</sub> 7.9

14000 475 2.3

40

no

LaBr<sub>3</sub>(Ce) 5.08

16 380 1.9

165

yes

from Saint-Gobain Crystals

Cal2 3.96

840 410

270

yes

from Particle Data  
Group, Review of  
Particle Detectors



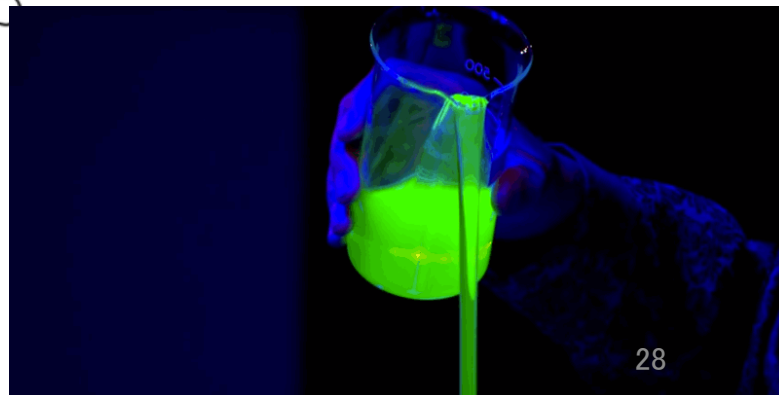
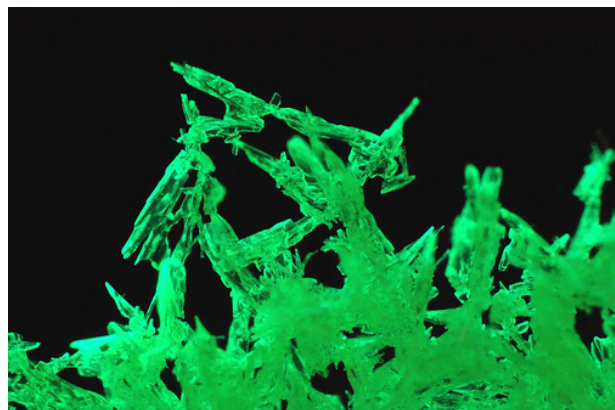
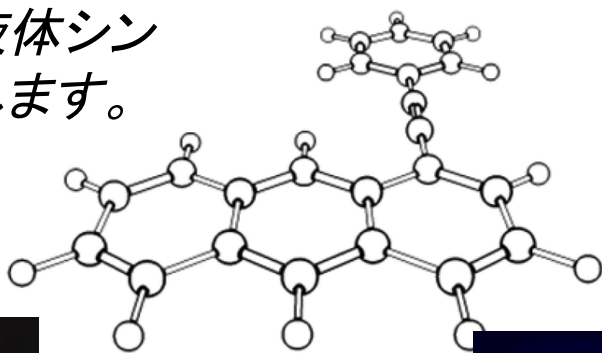
# 有機シンチレータの原理と応用



# 有機シンチレータ

- 純粋有機結晶シンチレータ
- プラスチックシンチレータ
- 液体シンチレータ

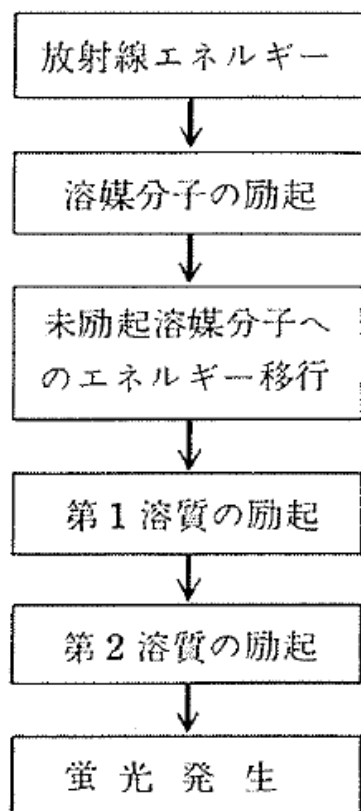
このトークでは主に液体シンチレータについて話します。



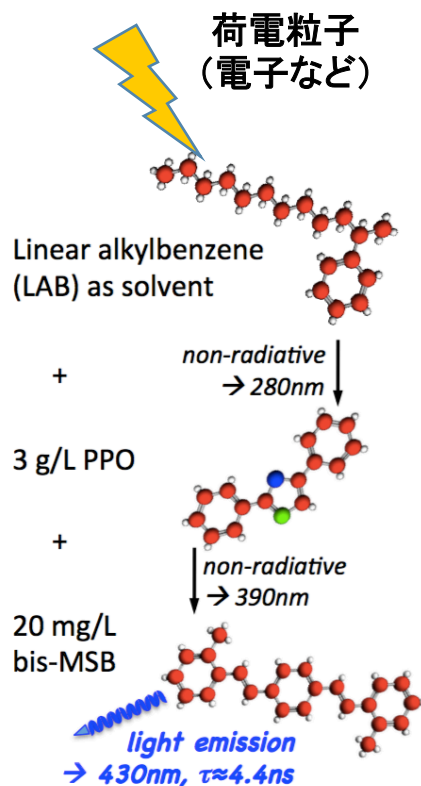


# 液体シンチレータの発光過程

液体シンチレータは有機溶媒に蛍光剤を混ぜたもの。



液体シンチレーションの発光過程



発光過程(図)

- 結晶格子構造が発光の基礎になっていた無機と違い、有機シンチレータは単一分子の励起で発光する(だから早い)。
- 溶媒＋第一溶質(蛍光体)＋第二溶質(波長変換剤)と混ぜるため、発光機構は複雑。
- 放射線のエネルギーは、溶媒から溶質へ移り、蛍光が出る。

# 液体シンチレータの溶媒

- 液体シンチレータの大部分を占める。
- 一般的に不飽和結合を持つ芳香族化合物が $\pi$ 電子を持っていて効率が良い。 $\pi$ 電子は移動性に富み、励起されやすい。
- 溶媒間のエネルギー移行は1ns以内で行われる。
- 溶質が出す光を吸収しない必要がある。
- 基本的に毒性・引火性がある。

表 2-1 液体シンチレーション用有機溶媒

一般名	化学名	凝固点 (°C)	吸収スペクトル (nm) $\lambda_{\max}^*$	発光スペクトル (nm)		相対的 パルス 波 高
				$\lambda_{\max}^*$	$\lambda_{\text{mean}}^{**}$	
トルエン	メチルベンゼン	-95	262	287	284	1.00
キシレン	ジメチルベンゼン	-20	~266	~289	~288	1.09
プソイドクメン	1,2,4-トリメチルベンゼン	-60.5	269	293	290	1.12
ジオキサン	1,4-ジオキサン	+12	188	247	—	0.65

\*最大値を与える波長    \*\*平均値を与える波長

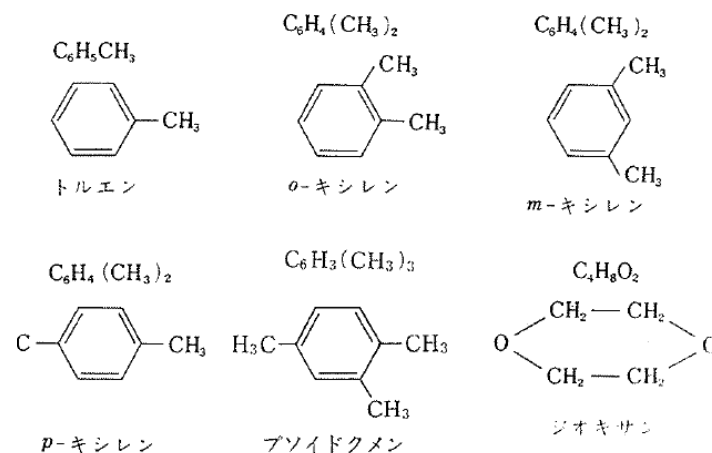


図 2-2 溶媒の分子構造

最近、**Linear Alkyl Benzene (LAB)**がDayaBay, SNO+等、物理実験で使われている

# 液体シンチレータの溶質

- 溶媒からエネルギー移行。
- 第一溶質(蛍光体)が励起され蛍光を放出。蛍光効率や溶解度が重要。
- 第二溶質(波長変換剤)はその光を吸収して、光電子増倍管の感度に合わせた光を放出する。

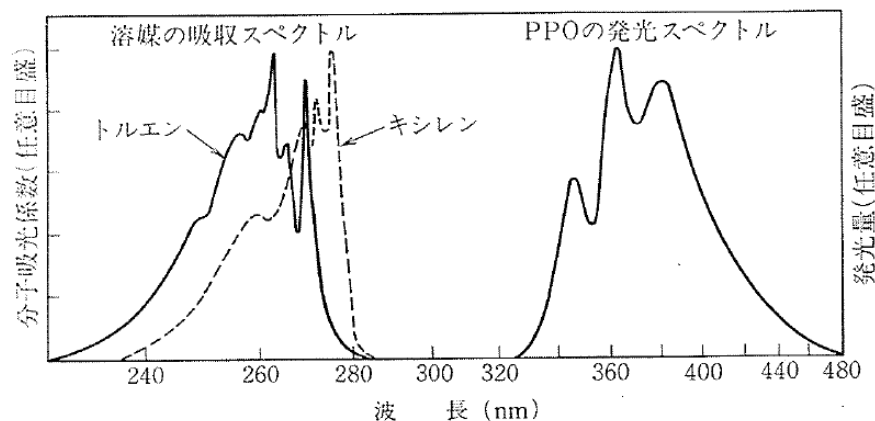


図 2-1 溶媒の吸収スペクトルと PPO の発光スペクトルとの波長関係

## Primary Scintillators

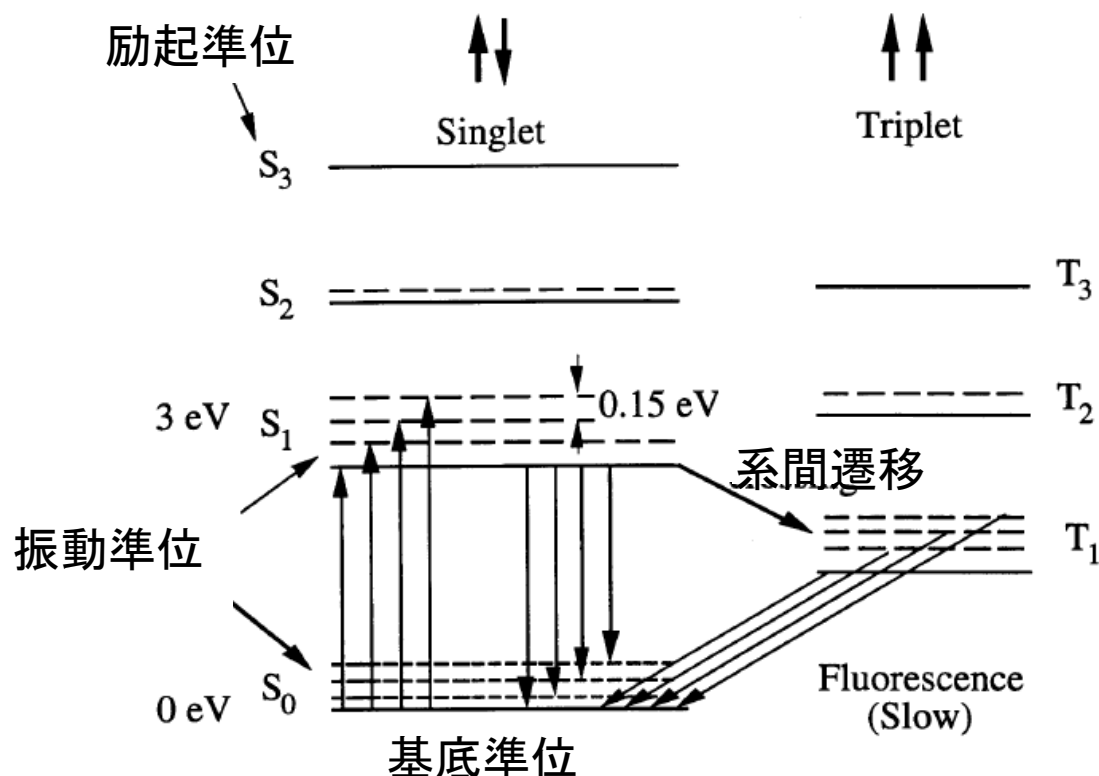
Scintillator	Structure	Emission Wavelength
Butyl PBD 2-[4-biphenyl]-5-[4-tert-butyl-phenyl]-1,3,4-oxadiazole Order No. SFC-20	<chem>CC(C)(C)c1ccc(cc1)-c2nc3ccccc3cc2-c4ccccc4</chem>	363nm
Naphthalene Order No. SFC-40	<chem>c1ccc2ccccc2c1</chem>	322nm
PPO 一般的 2,5-diphenyloxazole Order No. SFC-10	<chem>c1ccc(cc1)-c2oc3ccccc3n2</chem>	357nm
p-Terphenyl Order No. SFC-50	<chem>c1ccc(cc1)-c2ccccc2-c3ccccc3</chem>	340nm

## Secondary Scintillators

BBQ {7H-benzimidazo[2,1-a]benz[de]isoquinoline-7-one} Order No. SFC-13	<chem>O=C1c2cc3c(c1n2)c4ccccc4c5ccccc35</chem>	477nm
Bis-MSB 早い (1,4-bis[2-methylstyryl]-benzene) Order No. SFC-90	<chem>Cc1cc(C=Cc2cc(C)cc(C)c2)ccc(C=Cc3cc(C)cc(C)c3)c1</chem>	420nm
POPOP 一般的 (1,4-bis[5-phenyloxazol-2-yl]benzene) Order No. SFC-60	<chem>c1ccc(cc1)-c2oc3ccccc3n2-c4cc(ccc4)-c5oc6ccccc6n5</chem>	410nm
TPB (1,1,4,4-tetraphenyl-1,3-butadiene) Order No. SFC-15	<chem>c1ccc(cc1)/C=C/C=C/c2ccccc2</chem>	455nm

# 有機蛍光体の発光過程

- 分子内での電子のエネルギー準位  
(from Birks, as redrawn by Derenzo)

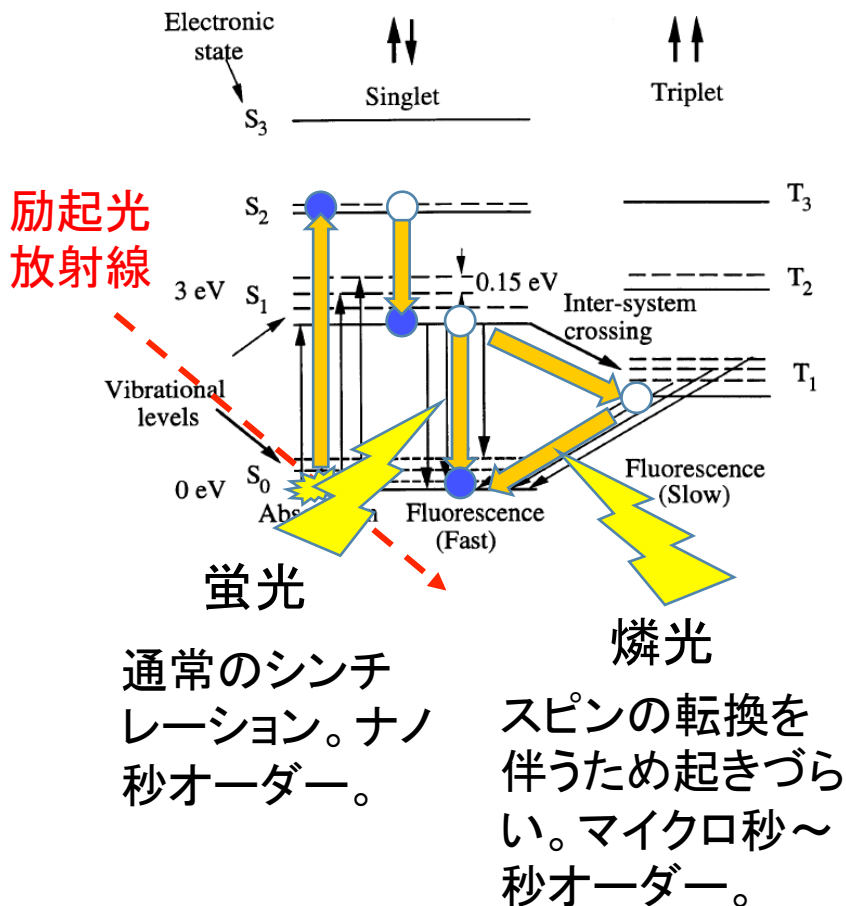


振動準位の差は室温 (0.025 eV) より大きいので、ほぼ全ての電子は基底状態



# 有機シンチレータの発光過程

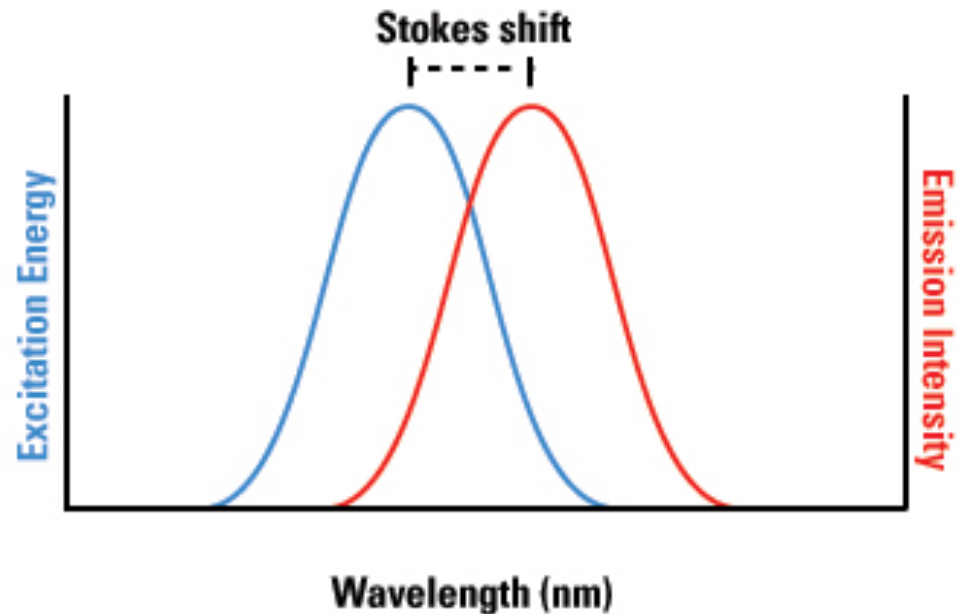
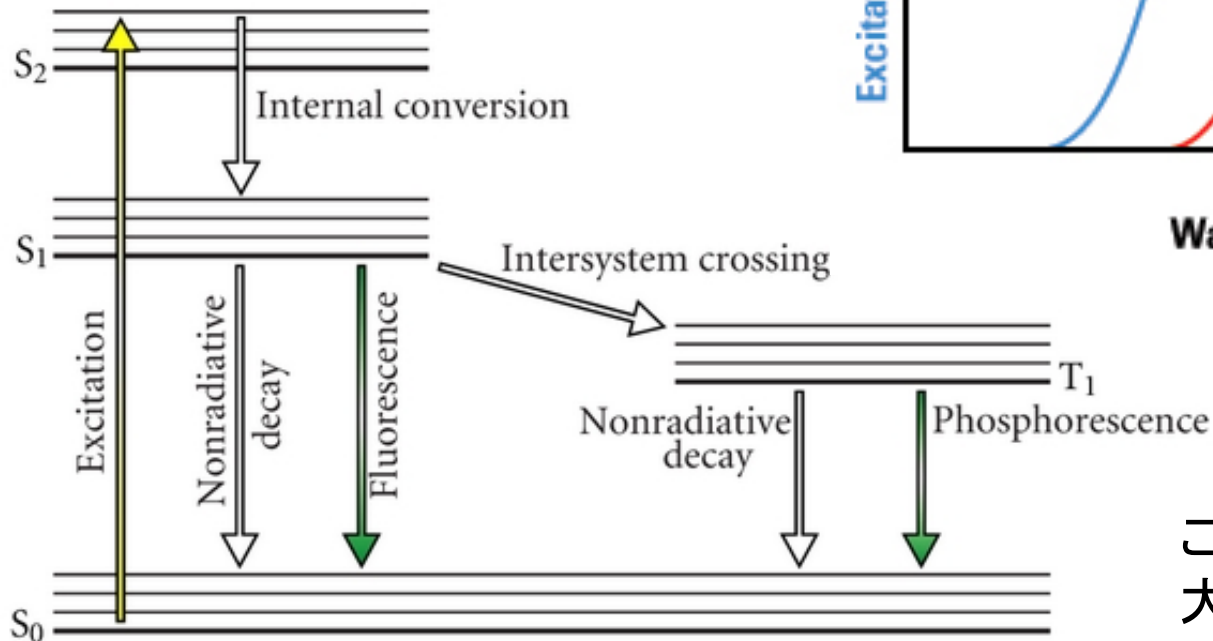
Typical energy levels  
(from Birks, as redrawn by Derenzo)



- 励起光や放射線により基底状態の電子が励起される。
- 第2励起状態以上に励起するものもあるが、非常に短時間(～ピコ秒)で、内部転換(熱的放射)により第一励起状態へ。
- 大部分の励起電子は第一励起状態から基底状態に光子を放出して落ちる。これを蛍光という。
- 落ちた先の振動状態によって準位が少し違うので、放出波長は広がって見える。
- 一部の電子はスピン三重項の状態に系間遷移し、非常に長時間かけ光を出して基底状態に戻る。これを燐光という。スピン禁制則により反応が抑制。
- 一旦、三重項に行った後、一重項に戻って出す蛍光(遅発蛍光)も存在する。<sup>33</sup>

# ストークスシフト

- 励起は一番下の基底状態から、励起状態への遷移。
- 発光は第一励起状態の一番下の振動状態から、基底状態への遷移。



発光波長は、励起波長より長いほうにずれる。

これを**ストークスシフト**といい、大きいほど透過率が良い。

# 有機シンチレータのまとめ

バイクロン社の  
プラシン

scintillator	light output	peak $\lambda$	decay constant	attenuation length	index of refraction	density [g/cm <sup>3</sup> ]
BC-400	65%	423 nm	2.4 ns	250 cm	1.58	1.032
BC-404	68%	408 nm	1.8 ns	160 cm	1.58	1.032
BC-416	38%	434 nm	3.3 ns	400 cm	1.58	1.032
BC-428	36%	480 nm	12.5 ns	150 cm	1.58	1.032
PC-based liquid	80%	425 nm	2.5 ns		1.505	0.877
30% PC diluted in mineral oil	60%	425 nm	3 ns	>500 cm	1.48	0.86
LAB-based	75%	425 nm	3.5 ns		1.47	0.87

マークチェン氏  
自作の液シン

発光量はアントラセンを100とした相対比。17,400 ph/MeV

# 物質中の荷電粒子の反応

## 衝突によるエネルギー損失

$$\frac{dE}{dx} = \left( \frac{dE}{dx} \right)_e + \left( \frac{dE}{dx} \right)_n$$

電子阻止能

原子核阻止能

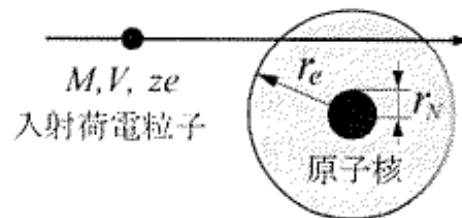


図 4.5 荷電粒子と原子の相互作用

電子の存在範囲( $r_e$ )  $\gg$  原子核の断面積( $r_N$ )なので、電子阻止能が圧倒的に大きい。

## ベーテブロッホの式

古典力学的なエネルギー損失の計算に、相対論的效果を加えたもの。  
高エネルギー粒子に対して実験と良い一致。

$$-\frac{dE}{dx} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e V^2} N Z \left[ \log \left\{ \frac{2m_e V^2}{I(1-\beta^2)} \right\} - \beta^2 \right]$$

## リンドハード理論

原子内の電子の運動を、自由電子ガスとして近似したもの。  
電子の運動が無視できない低エネルギーでも使える。



図 4.9 トーマス・フェルミの原子模型

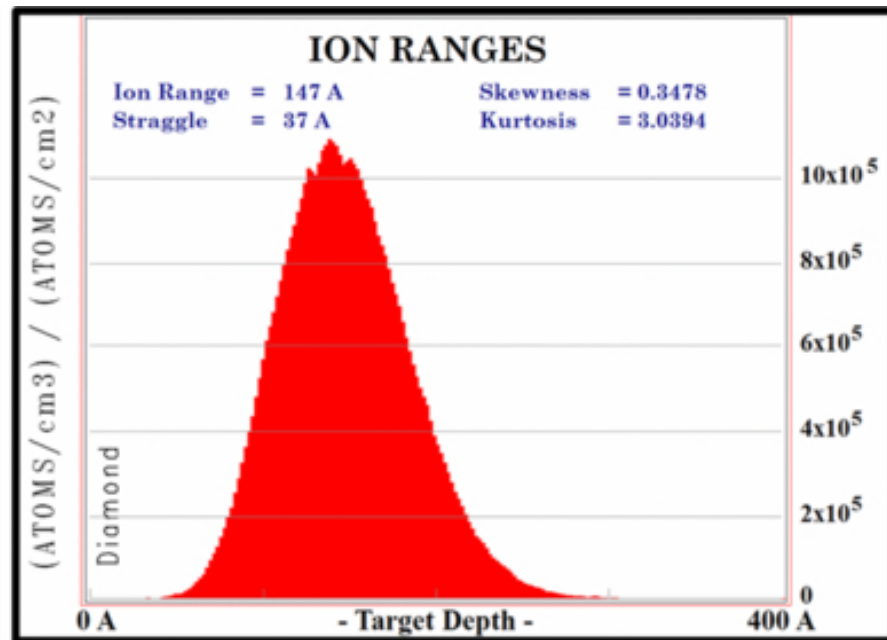
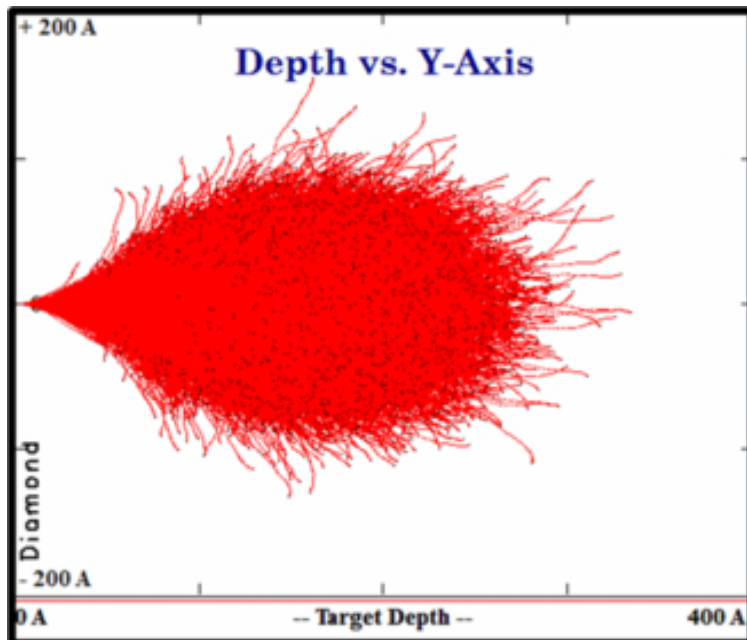


# SRIMソフトウェア

<http://www.srim.org/>

## SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter

- ベーテブロッホの式とリンドハード理論に基づきシミュレーションしてくれるソフト。
- 学術研究に用いることを条件に無料で公開されている。
- 入射イオンとターゲット物質を入力すれば、電子阻止能、原子核阻止能、飛程などを計算してくれる。



# 電子と物質の相互作用

電子の場合のエネルギー損失は、衝突と制動放射による。

$$\frac{dE}{d\xi} = \left( \frac{dE}{d\xi} \right)_{\text{coll}} + \left( \frac{dE}{d\xi} \right)_{\text{rad}}$$

衝突

制動放射

- 電子は軽いので、原子核の周りで急激に曲がり、加速度によって電磁放射が起こる。
- 制動放射のエネルギー損失は、 $Z^2/m^2$  に比例する。
- 電子の次に軽いミューオンでも、電子の200倍重いので、制動放射の影響は4万分の1。

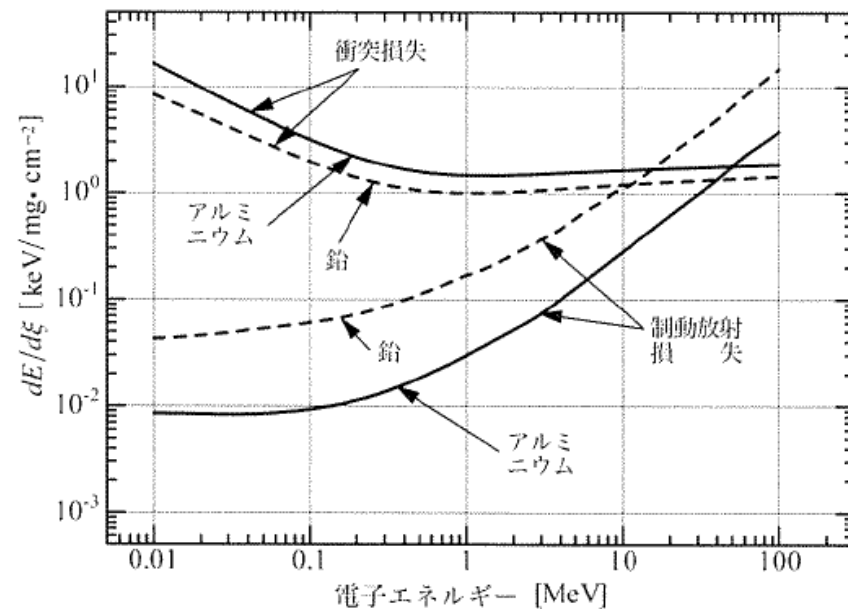
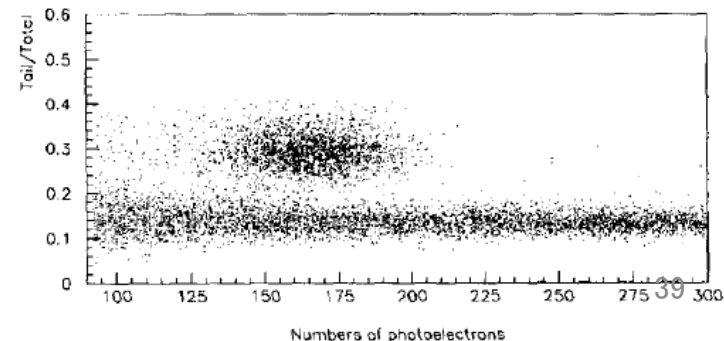
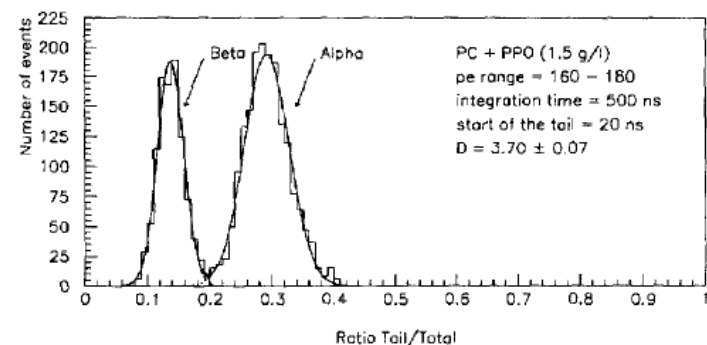
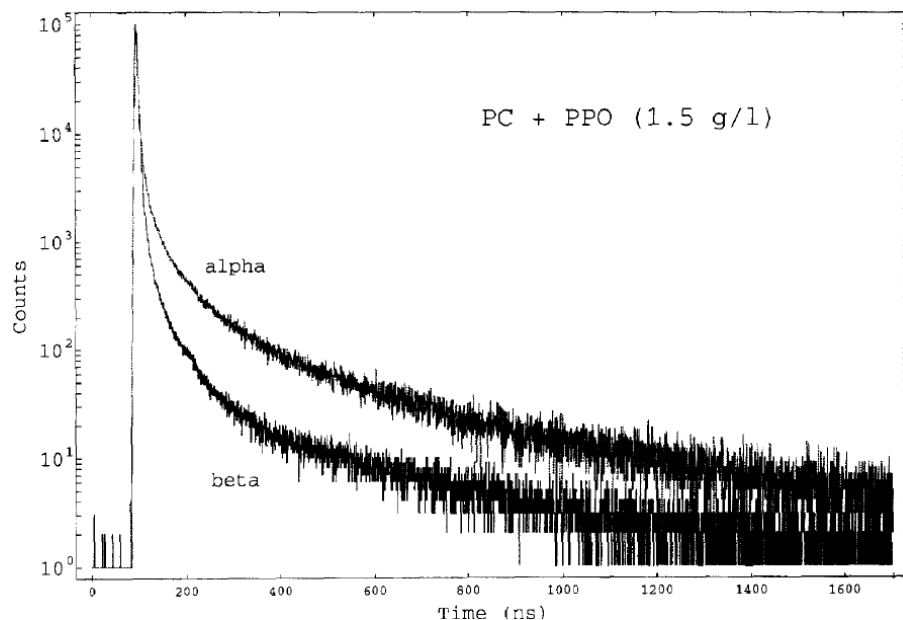


図 4.20 アルミニウムと鉛における電子のエネルギー損失 [31].

- よって、エネルギーの高いミューオンは物質を透過する能力が高い。
- 一定以上のエネルギーでは、 $dE/dx$ がほぼ一定(最小電離作用粒子:MIP)。

# 粒子波形弁別 (PSD)

- 粒子の種類によって $dE/dx$ が異なる。
- 一般的に重い粒子ほど $dE/dx$ が大きく与えるエネルギーが大きいため、三重項への遷移確率が高まる。
- つまり粒子によって、即発蛍光(早い成分)と、遅発蛍光と燐光(遅い成分)の比が変わる。
- 波形によって粒子を識別することを **Pulse Shape Discrimination** という。



# クエンチング（消光効果）

- シンチレーション効率は、入射粒子エネルギーが可視光に転換される割合で定義される。
- この効率が大きいほど、たくさんの光子を収集できるが、励起分子が発光を伴わず、主に熱によってエネルギーを失う遷移モードがある。
- このような発光しない遷移をまとめてクエンチングという。
- 液体シンチレータの場合の重要なクエンチングとして、溶存酸素によるものが上げられる。（酸素クエンチング）
- 液体シンチレータを使う際は窒素ガスなどで酸素が溶け込まない環境を作る。
- また、 $dE/dx$ が大きいと励起電子が飽和してエネルギーが熱に逃げやすくなる。
- 同じエネルギーでも重い粒子ほど発光量が小さくなる。



# 液シンの純化

シンチレータ中の不純物は、バックグラウンド事象やクエンチングを引き起こすので除去する。

## • 蒸留

- 液シン導入前に蒸留で徹底的に純化
- ガス不純物以外全て (U, Th, Ra, Pb etc...)

## • 水抽出

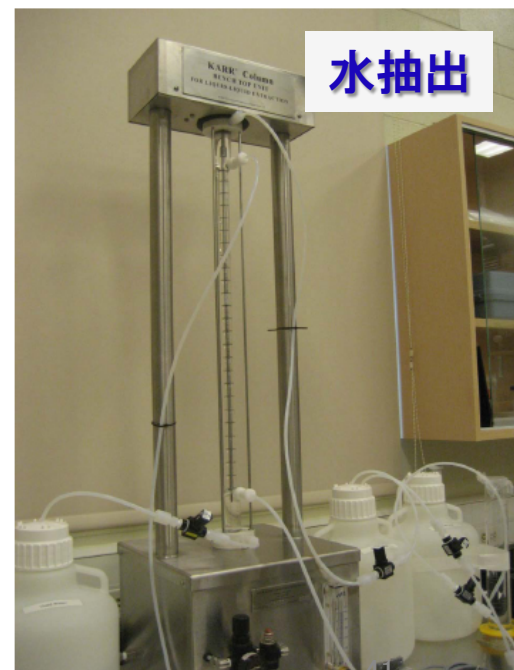
- 純水と混ぜ合わせて液シンの不純物を除く
- U, Th, Ra, Pb, K40 etc.


## • フィルタ

- Quadra-pure IDA (金属捕捉材) で不純物除去
- 主にPb, Biに有効。Poも取り除けるか？

## • ガス分離

- N<sub>2</sub>ガスで液シンからガス不純物を除去。
- Rn, Ar, Kr, O etc.





# 超新星背景ニュートリノと 液体シンチレータ実験

# 超新星背景ニュートリノ(SRN)

- 新星背景ニュートリノ (SRN) とは、ビッグバン以降起こった全ての超新星爆発を起源とする宇宙背景ニュートリノ

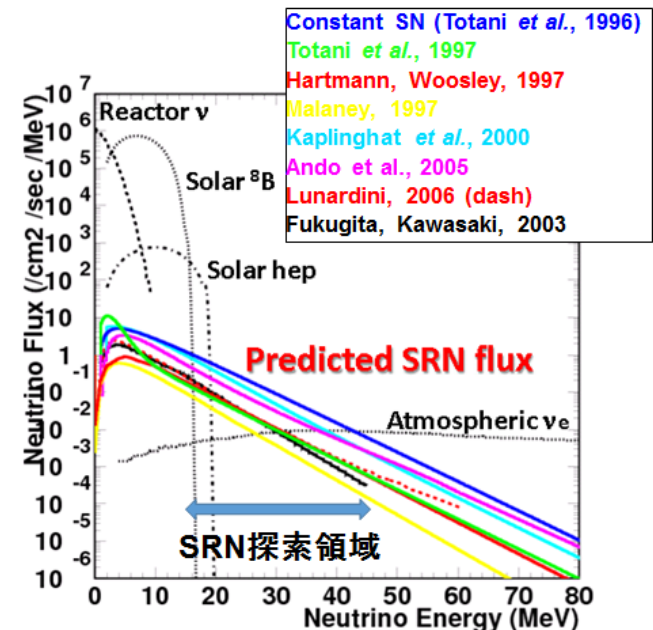
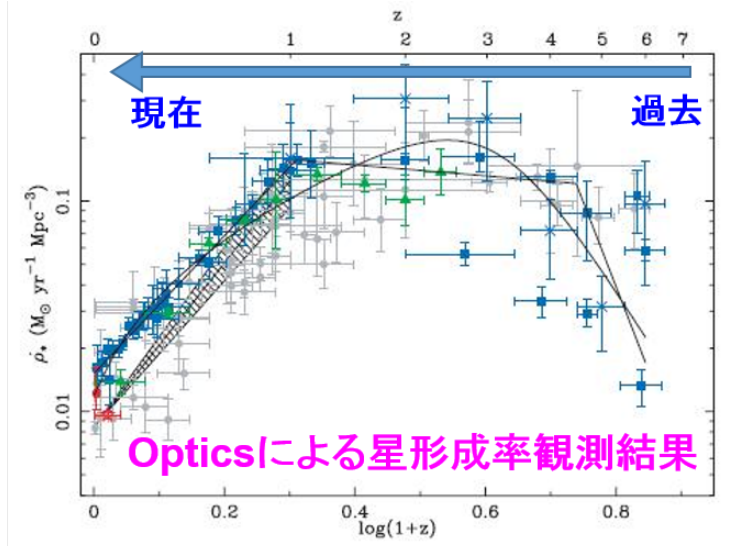
$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

C: Speed of light

Z: Red shift parameter

F<sub>ν</sub>: Flux of SRN

E<sub>ν</sub>: Energy of SRN



## Medium-energy neutrinos in the universe

G. S. Bisnovatyi-Kogan and Z. F. Seidov

*Institute for Space Research, USSR Academy of Sciences, Moscow*

(Submitted April 13, 1981)

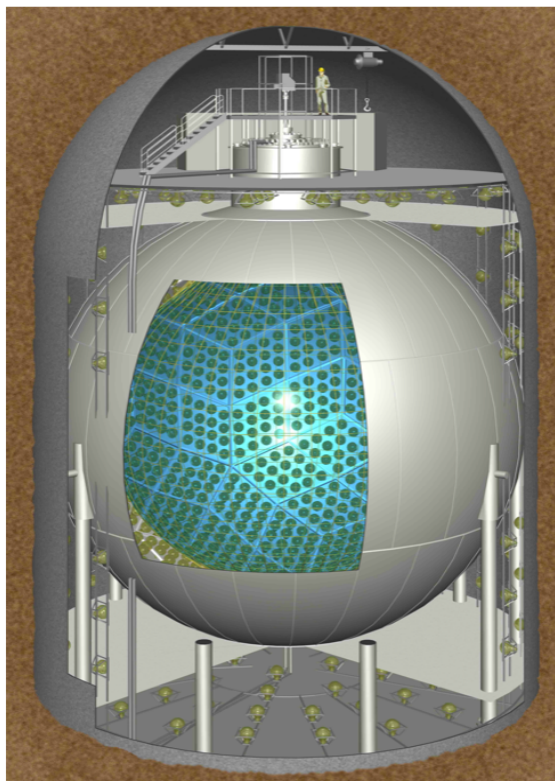
*Astron. Zh.* 59, 213-223 (March-April 1982)

The number density and energy spectrum of 3-30 MeV neutrinos and their influence on a solar neutrino detector are calculated on the basis of recent theoretical estimates for supernova neutrino emission, supernova rate data, and the heavy-element abundance of galactic matter. The evolution of galaxies is taken into account. At present the mass density of such neutrinos in the universe should be  $(2-10) \times 10^{-33} \text{ g/cm}^3$ , greater than the equivalent density of the cosmic background radiation. But unlike matter and the microwave

SRNは37年前に予言されていた！！



# SRN@カムランド実験

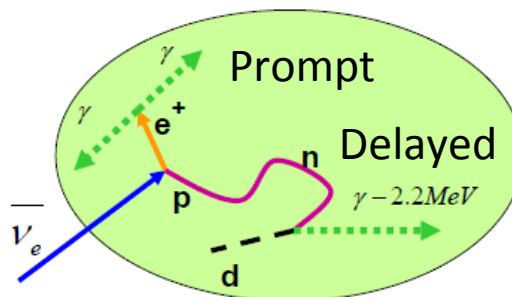


Target LS Volume : **1 kton, 13m diameter**

80% Dodecane( $C_{12}H_{26}$ )、20% Pseudocumene( $C_9H_8$ )、PPO 1.36g/l

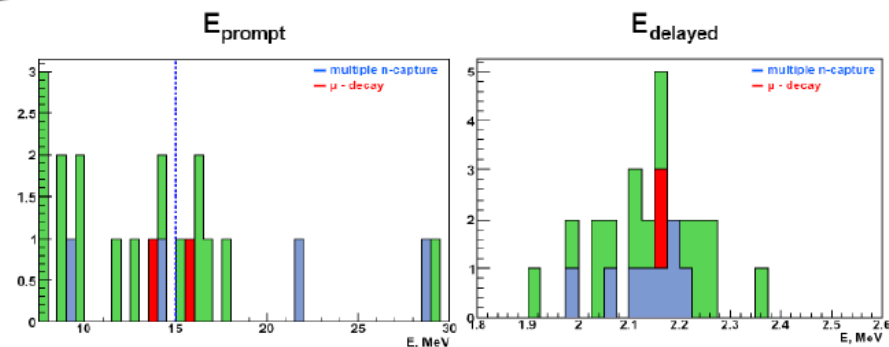
逆ベータ崩壊

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



液シンなので、SKで問題  
となる、Invisible-Muonが  
問題にならない！！

- $7.5 \text{ MeV} < E_{\text{prompt}} < 30 \text{ MeV}$  and  $1.8 \text{ MeV} < E_{\text{delayed}} < 2.6 \text{ MeV}$
- $R_{\text{prompt}} \& R_{\text{delayed}} < 600 \text{ cm}$ .
- $dR_{\text{prompt-delayed}} < 160 \text{ cm}$
- $dT_{\text{prompt-delayed}} < 1000 \mu\text{sec}$



**10 events in 6.0m volume**



# カムランドでの超新星背景ニュートリノ

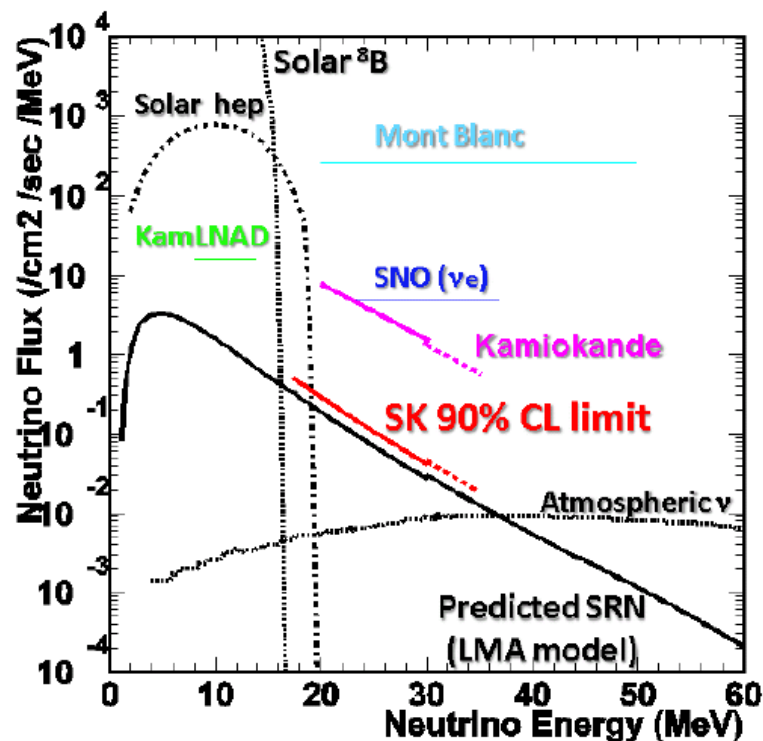
	7.5-15MeV	Comments	15-30MeV	Comments
<b>Candidates</b>				
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	6	1 multiple n-capture, 1 $\mu$ -decay	2	1 multiple n-capture, 1 $\mu$ -decay
<b>Charged Current Atmospheric Neutrinos Background</b>				
$\nu_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^- + n + {}^{11}\text{N}$	0.046		0.154	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^{11}\text{B} + \gamma$	0.03		0.136	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^7\text{Li} + \alpha$	0.066		0.105	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + 2n + {}^{10}\text{B}$	0.007		0.006	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^{11}\text{B}$	0.073		0.246	
$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$	0.344		0.626	
$\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$	0.008		0.022	
<b>Neutral Current Atmospheric Neutrinos Background</b>				
$\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + n + {}^{11}\text{C}$	3.882		2.619	
Neutrino int. in the rock	0.1		0.05	
<b>Others</b>				
${}^9\text{Li}$	2.7		0	
Reactor anti neutrinos	1.5		0	
Accidental background	0.02		0	
<b>TOTAL Background</b>				
	8.776		3.964	

**BG期待値:**  
 **$8.78 \pm 2.16$  events**

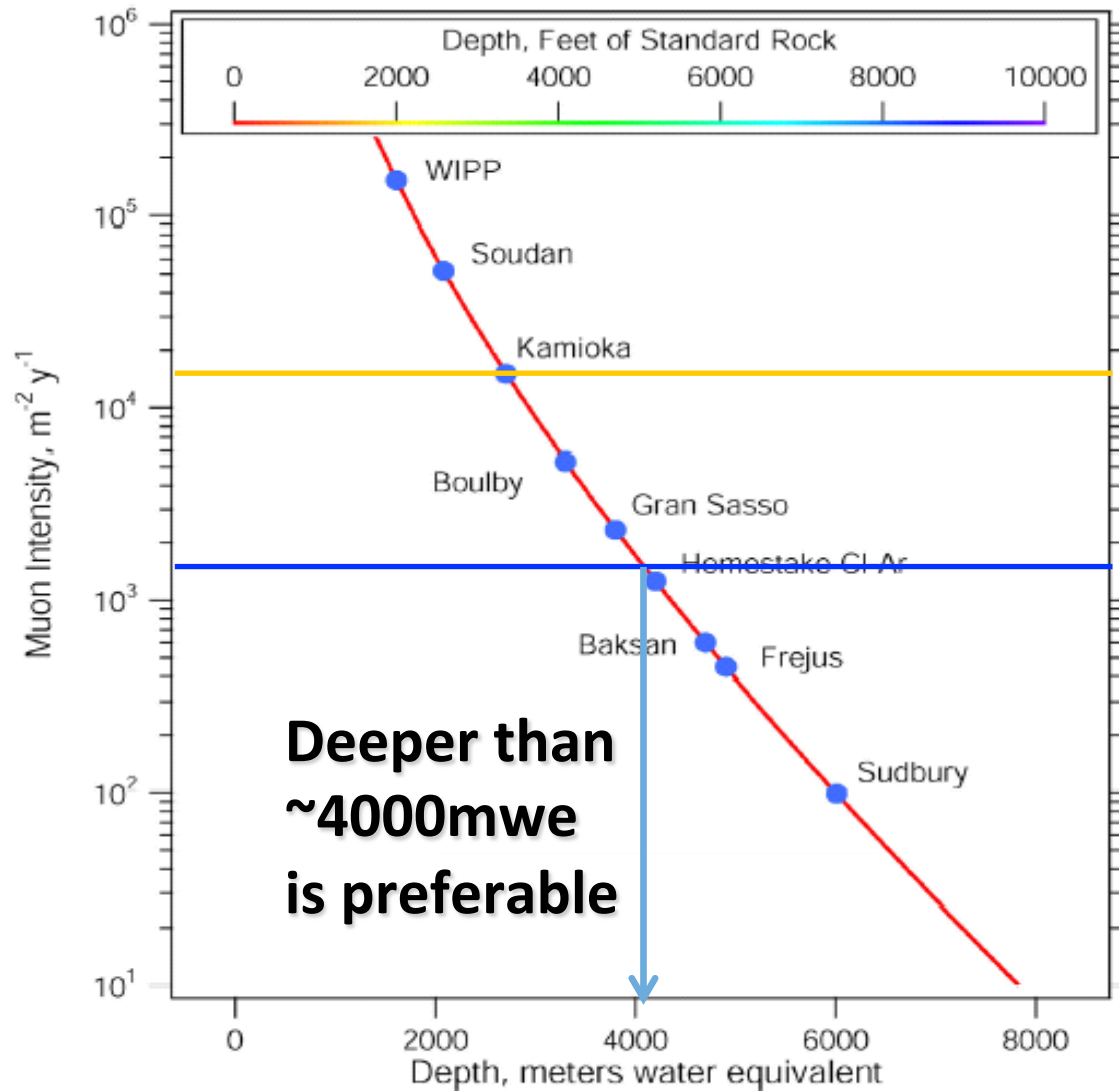
$$\Phi_{\nu_e} = \frac{N_{limit}}{\sigma \times \varepsilon \times T \times N_{protons}}$$

$N_{limit}$  : 95% CL limit by F-C  
 $\sigma$  : Averaged cross section  
 $\varepsilon$  : Detection efficiency  
 $T$  : Livetime (1430d)

120 /cm<sup>2</sup> /sec (7.5-15MeV)  
 $\rightarrow$  16/cm<sup>2</sup> /sec /MeV



# 大気νRGを除去出来ないか？



$\frac{^{11}\text{C rate}}{^{11}\text{C}}$   
~100

If we

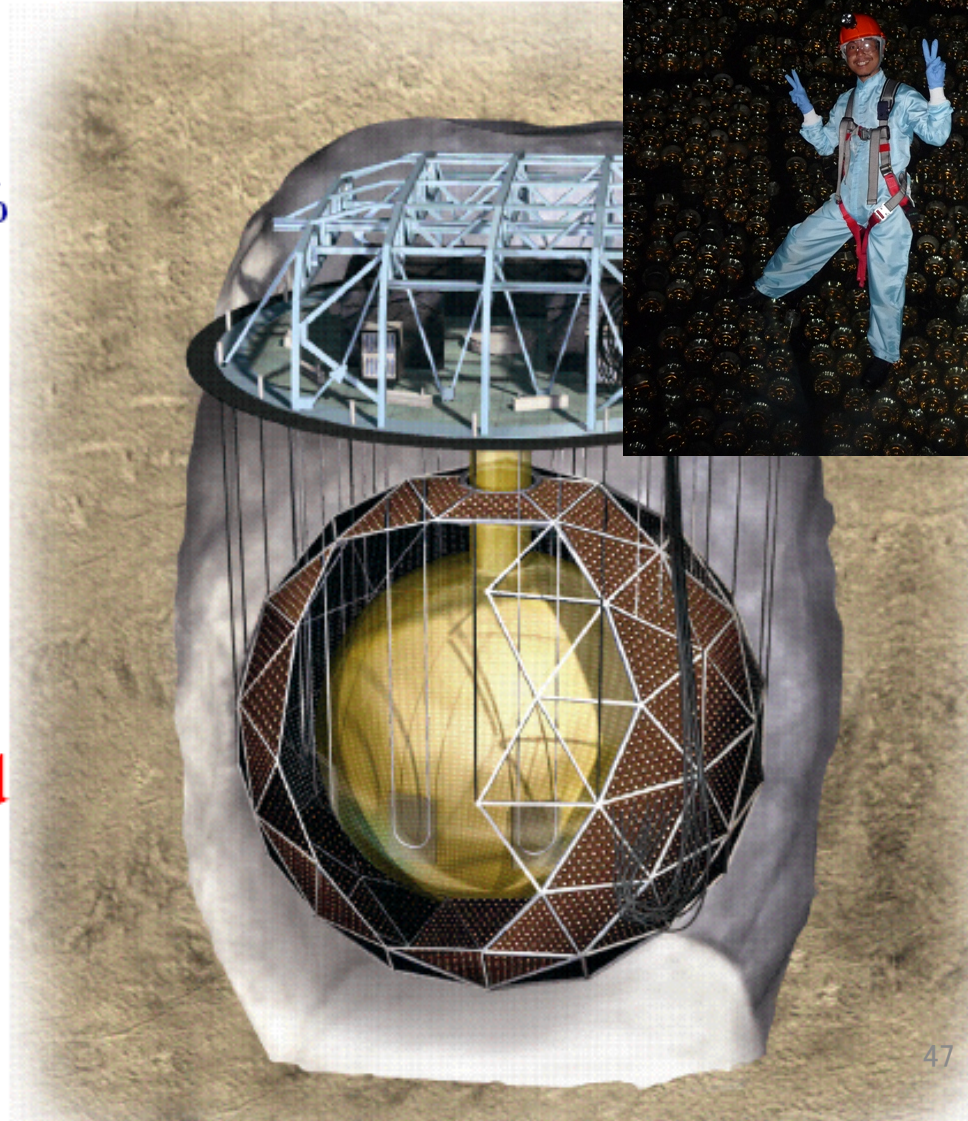


late  
1MeV

ired!!

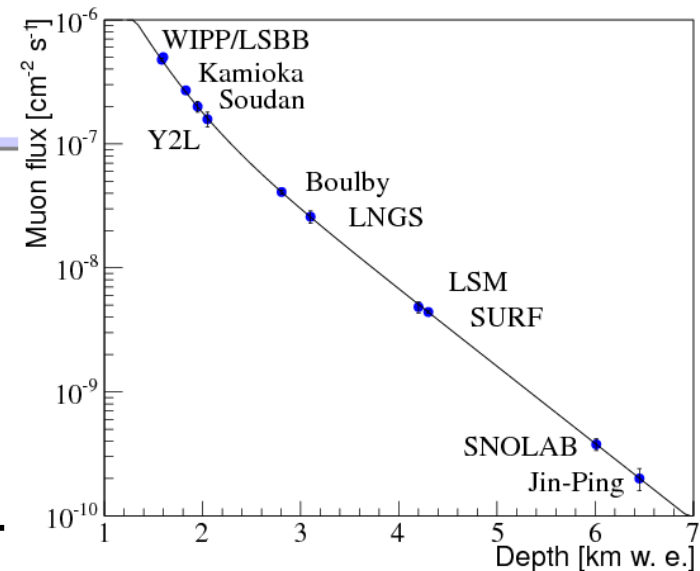
# SNO+実験@カナダ SNO Lab

- 1000 t of  $D_2O$  replaced by liquid scintillator
  - Neodymium-loaded at 0.1%
  - 780 kg of natural Nd
- 9000 PMTs
  - 3.5 % resolution at Nd endpoint (3.37 MeV)
- Water shield
  - 1700 + 5300 tons UPW
- New rope system to hold down the 6 m radius acrylic vessel



# SNO+ advantage

- **世界最深**の大規模液シン検出器
- $^{11}\text{C}$ ,  $^9\text{Li}$ など、ミューオン起源のBGが無視できる
- 原子炉ニュートリノは神岡の1/4程度
- 有効体積はBorexinoの4～5倍
- 光量 500～600 pe/MeVは他の実験と同等以上



	Borexino	KamLAND	SNO+
Volume	300t	1000t	780t
Depth	1350m	1000m	2000m
Muon rate	10,000 $\mu$ /day	30,000 $\mu$ /day	70 $\mu$ /day
Photo-coverage	30%	34%	54%



# BG estimation

## KamLAND analysis

	7.5-15MeV	Comments	15-30MeV	Comments
<b>Candidates</b>				
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	6	1 multiple n-capture, 1 $\mu$ -decay	2	1 multiple n-capture, 1 $\mu$ -decay
<b>Charged Current Atmospheric Neutrinos Background</b>				
$\nu_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^- + n + {}^{11}\text{N}$	0.046		0.154	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^{11}\text{B} + \gamma$	0.03		0.136	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^7\text{Li} + \alpha$	0.066		0.105	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + 2n + {}^{10}\text{B}$	0.007		0.006	
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^{11}\text{B}$	0.073		0.246	
$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$	0.344		0.626	
$\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$	0.008		0.022	
<b>Neutral Current Atmospheric Neutrinos Background</b>				
$\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + n + {}^{11}\text{C}$	3.882		2.619	
Neutrino int. in the rock	0.1		0.05	
<b>Others</b>				
${}^9\text{Li}$	2.7		0	
Reactor anti neutrinos	1.5		0	
Accidental background	0.02		0	
<b>TOTAL Background</b>				
	8.776		3.964	

Assuming...

Reactor flux  $\rightarrow 1/4$

${}^9\text{Li} \rightarrow$  negligible

Atm  $\nu \rightarrow$  same rate  
(tag  ${}^{11}\text{C}$ )



**Total expected BG**

**1.07 BGs**

(1430d, 7.5-15MeV)

Main BG source :  $\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + n + {}^{11}\text{C}$  20min life time

**Tagging  ${}^{11}\text{C}$  can reduce the atmospheric  $\nu$  BGs dramatically.  
SNO+ BG rate is less than 1/8 of KamLAND!!**

# SNO+実験でのSRN上限

$$\Phi_{\nu_e} = \frac{N_{limit}}{\sigma \times \varepsilon \times T \times N_{protons}}$$

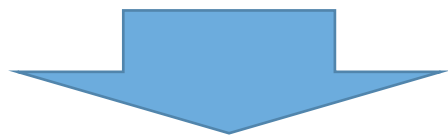
$N_{limit}$  : number of limit @90% CL by F-C.

$\sigma$  : Averaged cross section

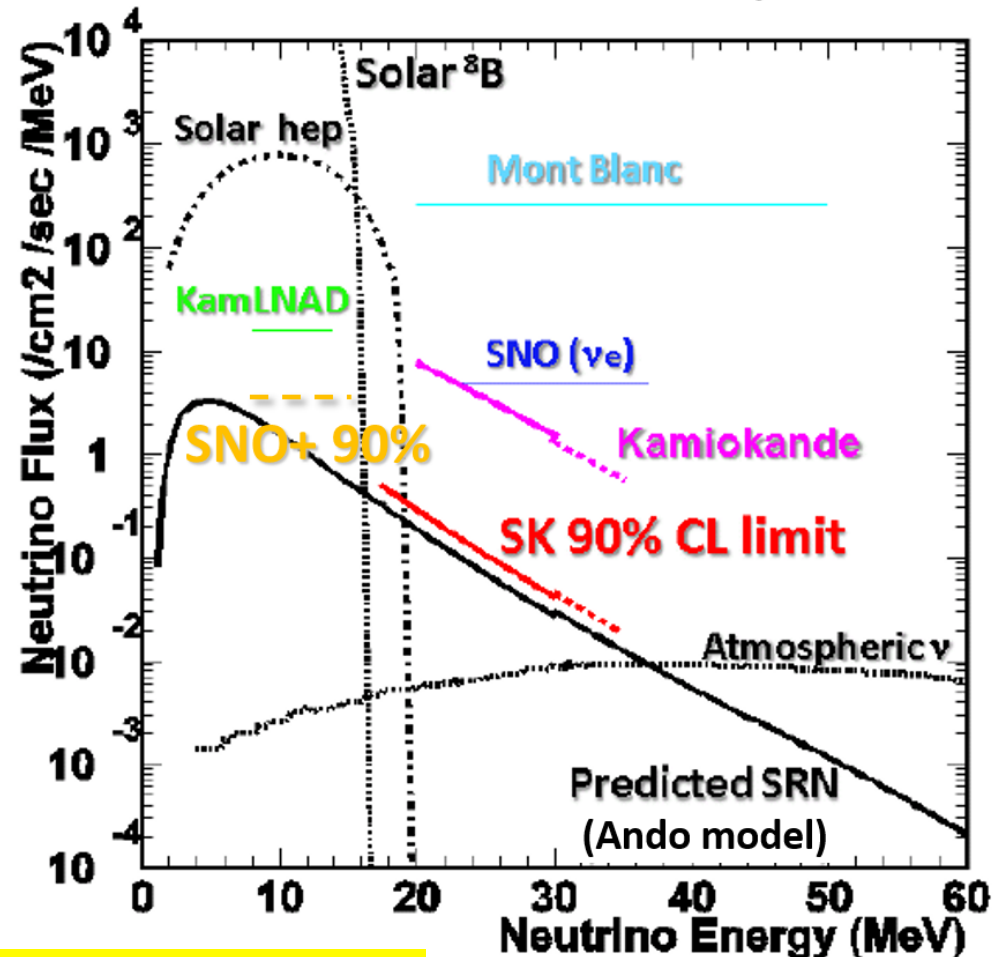
$\varepsilon$  : Detection efficiency (assume 90%)

$T$  : Livetime (5y)

$N_{protons}$  : Number of protons in SNO+  
( $=7 \times 10^{31}$  protons)



26 /cm<sup>2</sup> /sec (7.5-15MeV)  
 $\rightarrow$  3.5 /cm<sup>2</sup> /sec /MeV  
 For 1.07 BG



**SRN発見にはサイズが重要。大型液シン実験！**

## DETECTOR LAYOUT

### Cavern

height: 115 m, diameter: 50 m  
shielding from cosmic rays: ~4,000 m.w

### Muon Veto

plastic scintillator panels (on top)  
Water Cherenkov Detector  
1,500 phototubes  
100 kt of water  
reduction of fast  
neutron background

### Steel Cylinder

height: 100 m, diameter: 30 m  
70 kt of organic liquid  
13,500 phototubes

### Buffer

thickness: 2 m  
non-scintillating organic liquid  
shielding external radioactivity

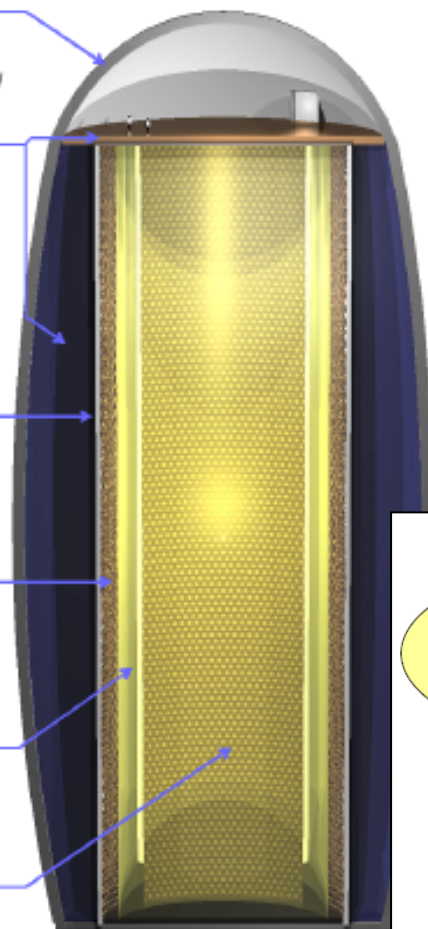
### Nylon Vessel

parting buffer liquid  
from liquid scintillator

### Target Volume

height: 100 m, diameter: 26 m  
50 kt of liquid scintillator

vertical design is favourable in terms of rock pressure and buoyancy forces



## Low Energy Neutrino Astronomy

- Size: 100 m length  $\times$  30 m  $\varnothing$
- 50 kt of organic scintillator
- ~15 000 photosensors (including water veto)

Galactic supernova  
neutrino detection

Relic supernovae  
neutrino detection

Search for  
Proton Decay

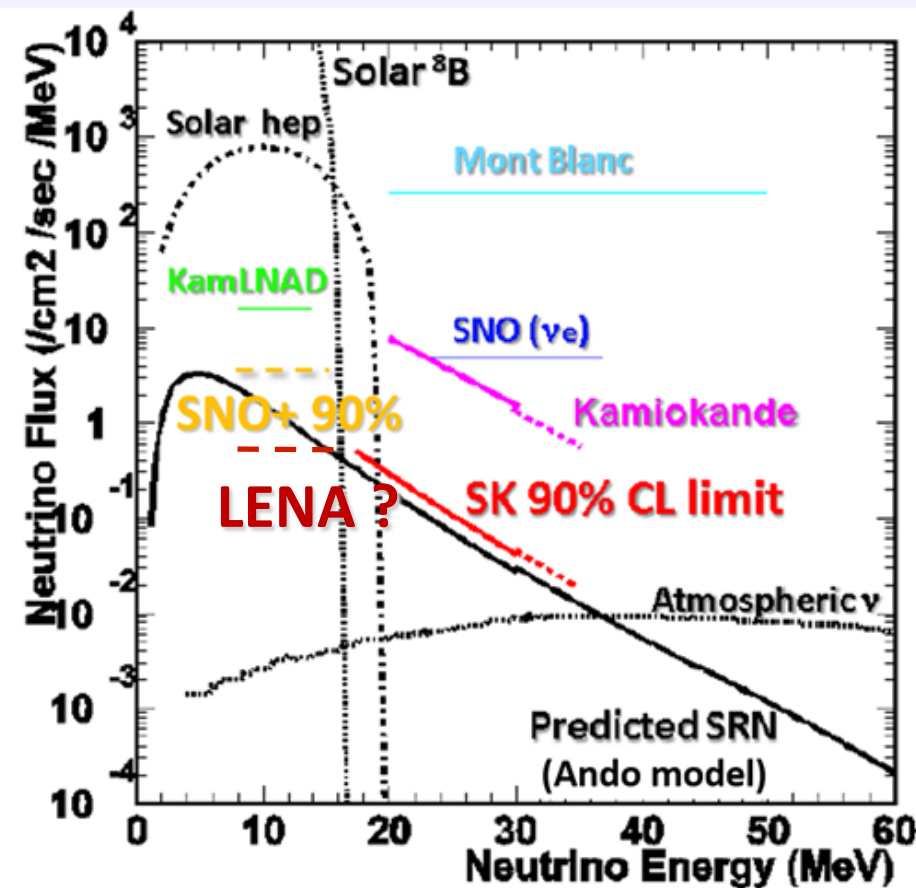
Neutrino  
properties

Solar Neutrino  
Spectroscopy

artificial neutrino  
sources

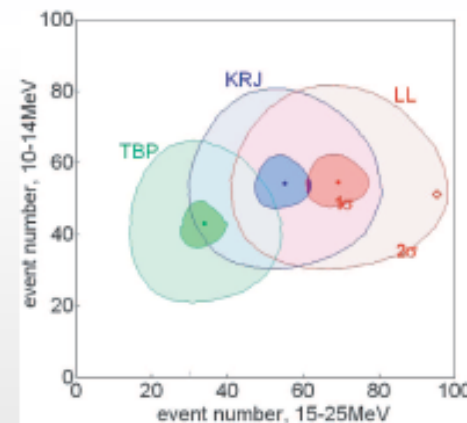
Terrestrial  
neutrino detection

# Diffuse Background of Supernova Neutrinos



In **LENA** detector: (44 kt f.v.)  
Event rate in 10 y:

- LL:  $\sim 110$  events
- TBP:  $\sim 60$  events

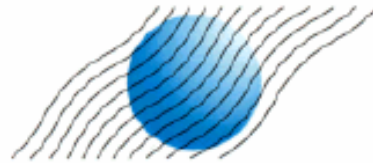


M. Wurm *et al.*, Phys. Rev. D75 023007 (2007)

Information about Star Formation Rate for ( $0 < z < 1$ )



# Possible locations for LENA ?

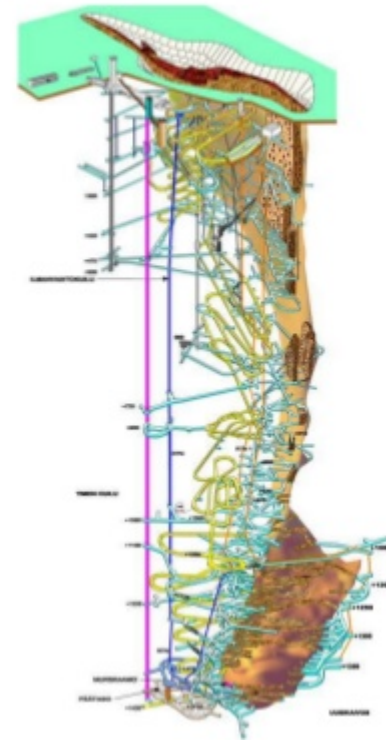


**CENTRE FOR UNDERGROUND  
PHYSICS IN PYHÄSALMI MINE**

**Underground mine**

**~ 1450 m depth, low  
radioactivity, low  
reactor  $\nu$ -  
background !**

**Access via trucks**

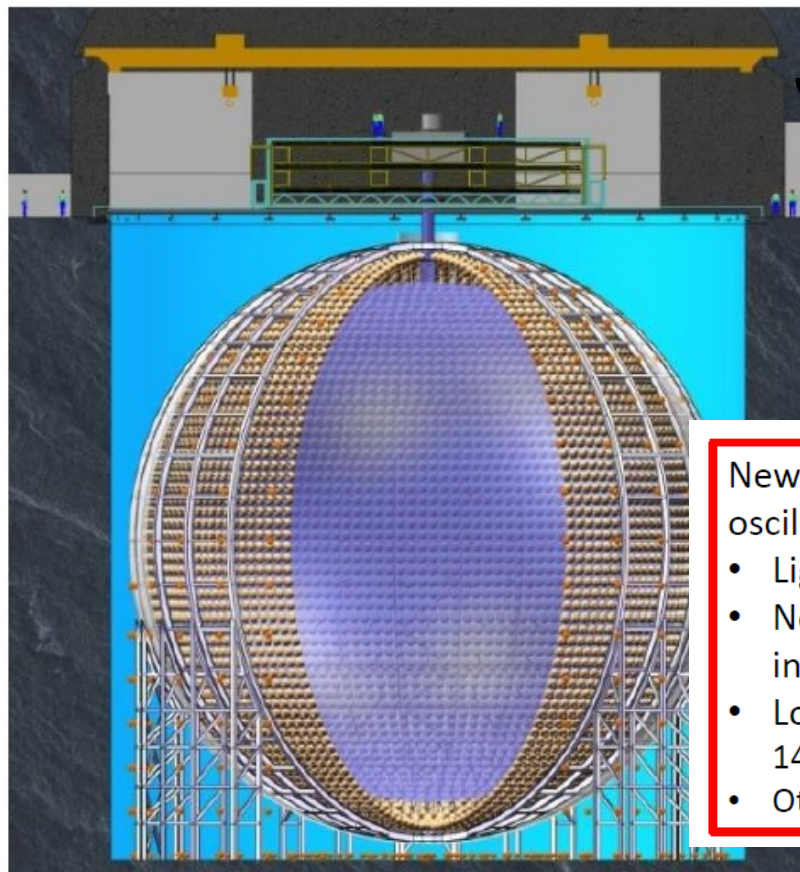


# JUNO detector challenges

## Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO)



Jiangmen



New physics tests in low-energy oscillation phenomena:

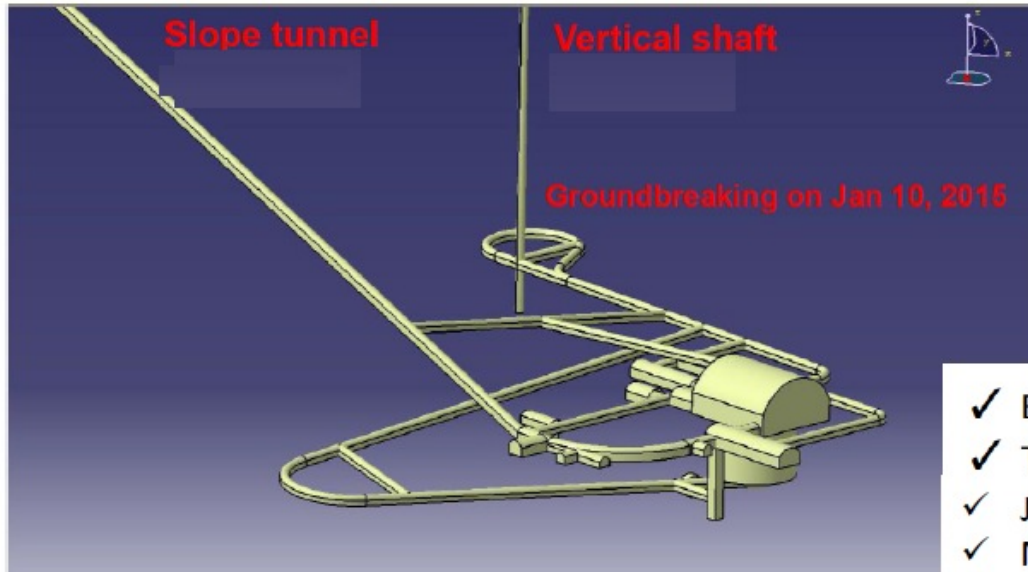
- Light sterile neutrinos 1405.6540
- Non-standard neutrino interactions 1310.5917, 1408.6301
- Lorentz and CPT violation 1409.6970
- Other Neutrino s: Geo, Super Nova,...

5

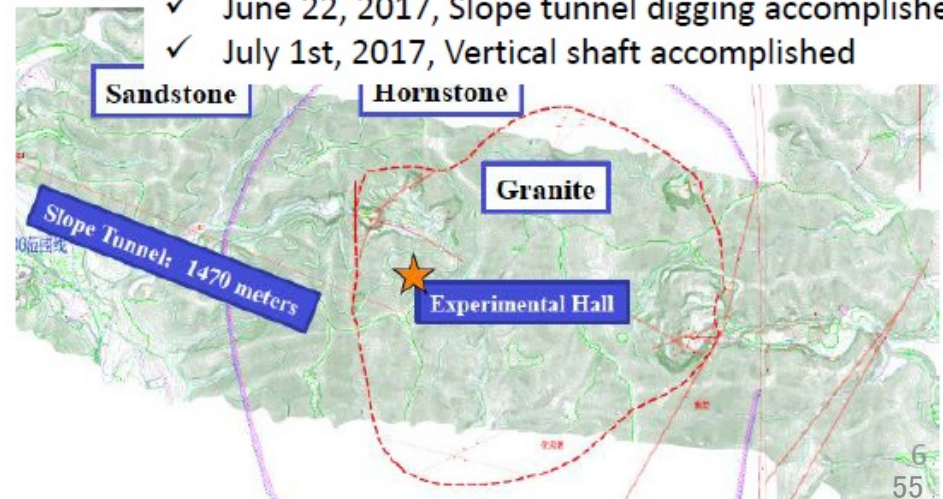
Experiment	Daya Bay	BOREXINO	KamLAND	JUNO
LS mass	20 ton	~300 ton	~1 kton	20 kton
Coverage	~12%	~34%	~34%	~80%
Energy resolution	~7.5%/√E	~5%/√E	~6%/√E	~3%/√E
Light yield	~ 160 p.e. / MeV	~ 500 p.e. / MeV	~ 250 p.e. / MeV	~ 1200 p.e. / MeV



# Going 720 m underground

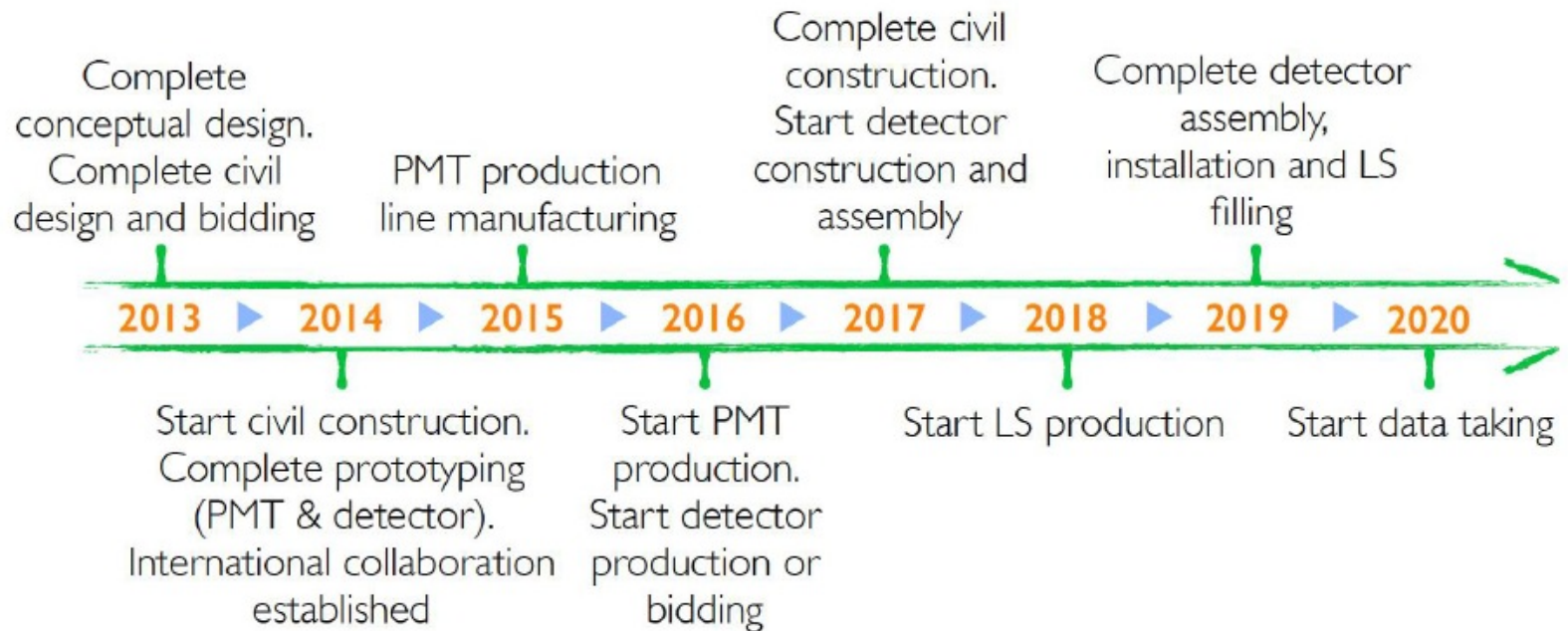


- ✓ Experimental Hall overburden: 720 m (1900 mwe)
- ✓ Two access to experimental Hall
- ✓ Jan 10, 2015, Civil construction kick-off
- ✓ May 26, 2015, Vertical shaft digging started
- ✓ June 22, 2017, Slope tunnel digging accomplished
- ✓ July 1st, 2017, Vertical shaft accomplished





# JUNO schedule



# 将来のR&D



- シンチレーション-チェレンコフ分離
- 水ベースの液体シンチレータ



# 液シンでチェレンコフは見えるか？

- 次世代のニュートリノ実験(中国のJinpingとか)のために、シンチ光とチェレンコフ光を分けるスタディが行われている。
- 超新星、太陽ニュートリノ実験では方向を見たい。
- 陽子崩壊でもリングが見たい。

## Separation of Scintillation and Cherenkov Lights in Linear Alkyl Benzene

Mohan Li,<sup>1</sup> Ziyi Guo,<sup>1</sup> Minfang Yeh,<sup>2</sup> Zhe Wang,<sup>1</sup> and Shaomin Chen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

<sup>2</sup>*Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA*

(Dated: November 30, 2015)

## Slow Liquid Scintillator Candidates for MeV-scale Neutrino Experiments

Ziyi Guo<sup>a,b</sup>, Minfang Yeh<sup>c</sup>, Rui Zhang<sup>d</sup>, De-Wen Cao<sup>d</sup>, Ming Qi<sup>d</sup>, Zhe Wang<sup>a,b,\*</sup>, Shaomin Chen<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

<sup>b</sup>*Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging (Tsinghua University), Ministry of Education, China*

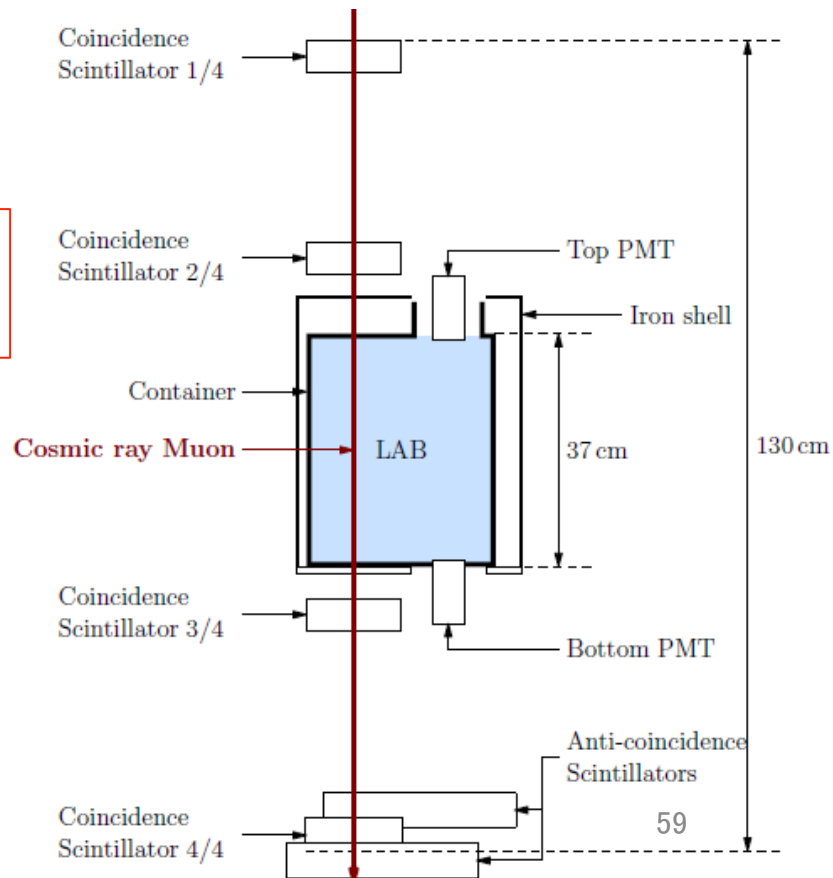
<sup>c</sup>*Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA*

# 実験セットアップ

- LABシンチレータのみ(蛍光剤、波長変換剤無し)で、ミュオン事象を見る実験。
- ミュオンは下向きに走るので、チェレンコフ光は下向きにでる。
- 一方シンチレーション光は等方向に出る。

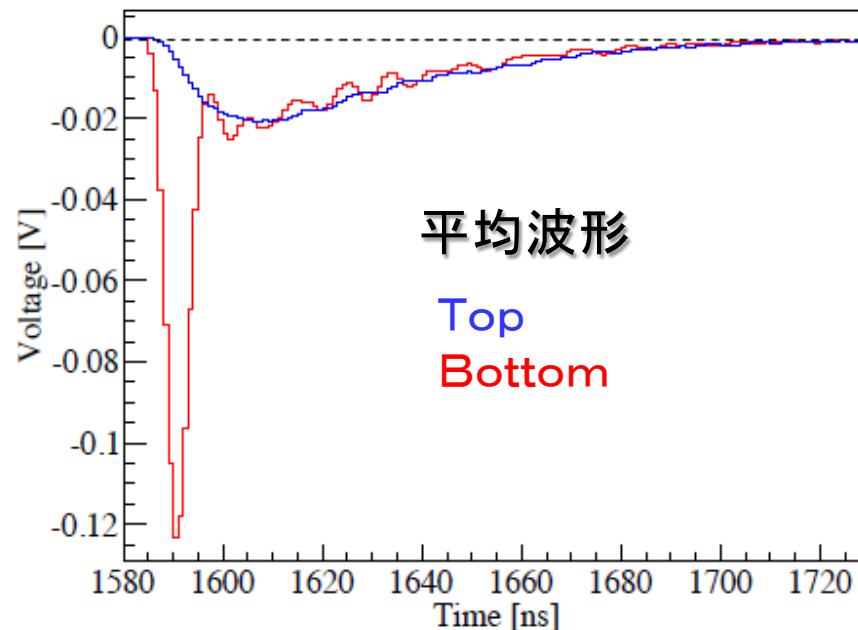
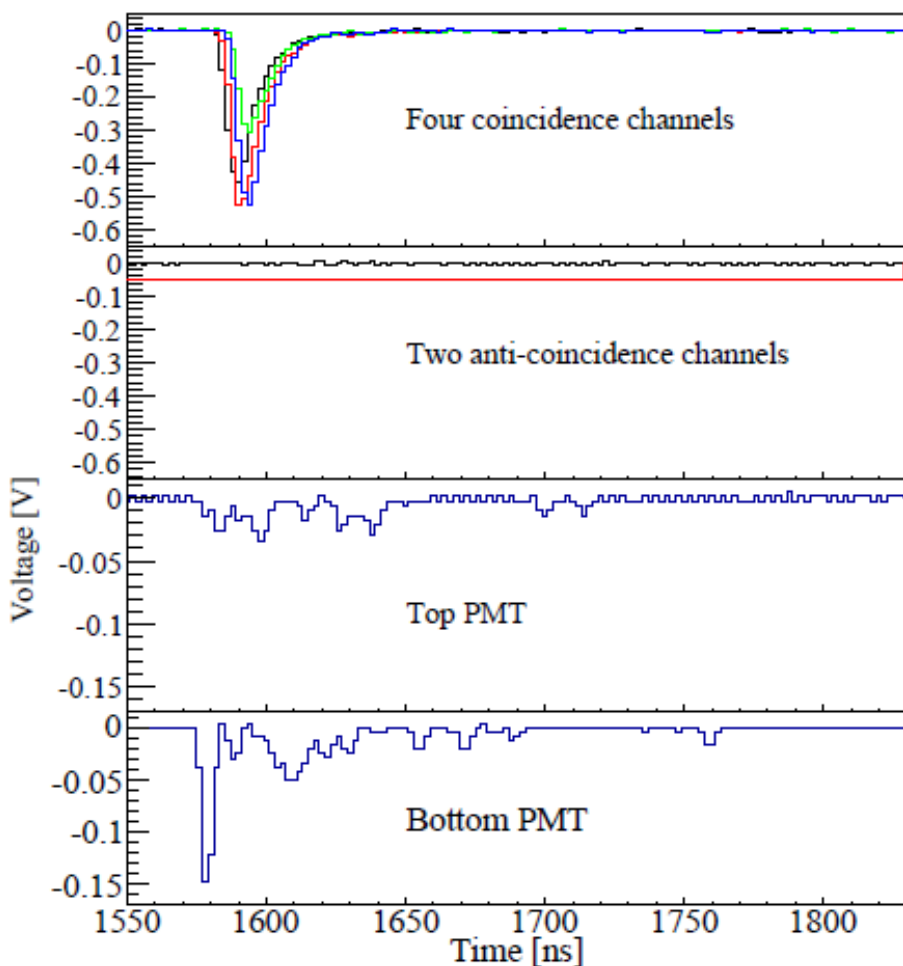
上PMT: シンチレーション光のみ  
下PMT: チェレンコフ + シンチレーション

- 4つのシンチレーションカウンタで、コインシデンスを取って、真っ直ぐ下向きに走ったミュオンのみ選別。
- 奥行き方向前後に二つ置いたAntiコインシデンスでシャワー事象を排除。



# 結果

- ある1イベントの波形



- 得られた光電子数

	Top PMT	Bottom PMT
Cherenkov	$0.33 \pm 0.33$	$10.7 \pm 0.4$
Scintillation	$17.6 \pm 0.6$	$17.7 \pm 0.6$



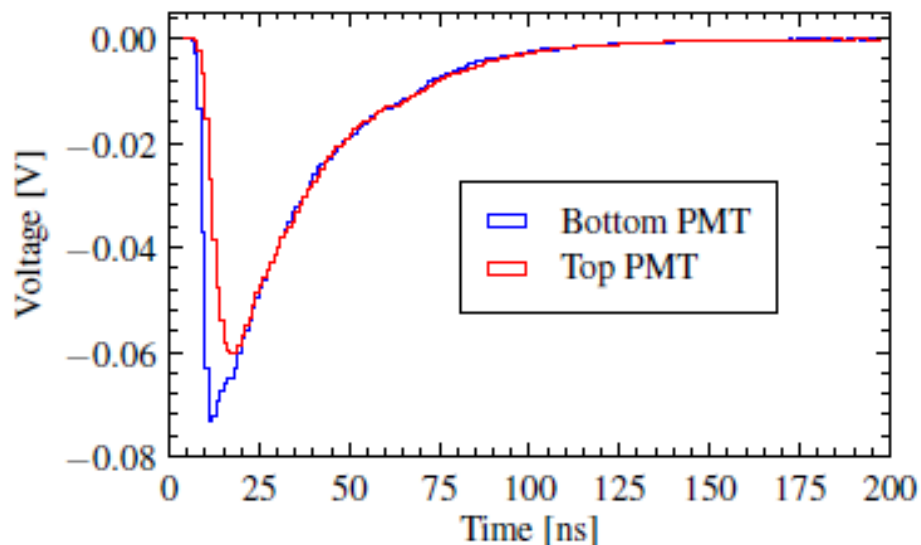
**発光量:  $\sim 1,000$  ph./MeV**

分離出来た！！  
でも発光量が小さい。。

# 蛍光剤を混ぜて発光量増？

- 同様のセットアップで、PPOやbis-MSBなどの溶質を溶かした場合、波形や発光量がどうなるかを調べた。
- シンチレーション光が大きく増えるが、代わりに時定数が短くなってしまい、チェレンコフ光との分離が難しくなる。
- 論文いわく、左下の分量がバランスが良くてExcellentらしい。

LAB + PPO (70mg/L) + bis-MSB (13mg/L)



PPO (g/L)	bis-MSB (mg/L)	Light yield ( $10^3$ photons/MeV)	Decay time constant (ns)
0	0	$1.54 \pm 0.25$	$35.42 \pm 1.18$
0.02	0	$2.36 \pm 0.39$	$34.31 \pm 0.42$
0.04	0.13	$2.88 \pm 0.47$	$30.55 \pm 0.30$
0.07	0	$3.14 \pm 0.52$	$26.72 \pm 0.20$
0.07	13	$3.39 \pm 0.56$	$26.76 \pm 0.19$
0.1	0	$3.87 \pm 0.64$	$24.85 \pm 0.14$
0.1	129	$4.75 \pm 0.78$	$20.94 \pm 0.10$
0.5	0	$6.32 \pm 1.04$	$14.96 \pm 0.04$
2	0	$8.70 \pm 1.44$	$8.88 \pm 0.02$
3	0	$9.40 \pm 1.55$	$7.72 \pm 0.02$
3	10	$10.67 \pm 1.76$	$7.63 \pm 0.01$



# 水ベースの液体シンチレータ

- 水ベース液シン (Water Based Liquid Scintillator : WbLS)
- 水を溶媒とし、蛍光剤とそれを溶かすための界面活性剤からなる。
- 油を使わないのでエコノミー＆エコロジー＆セーフティ。
- 大規模実験向き。

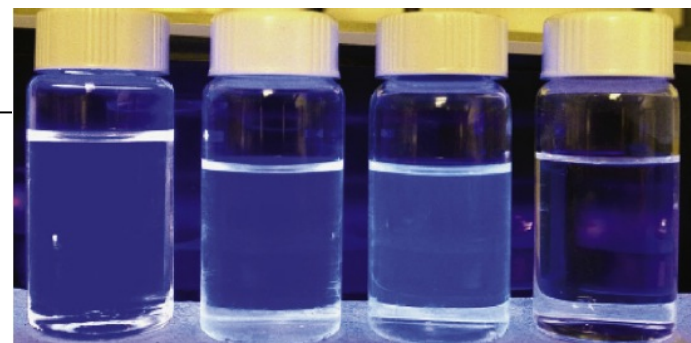
## A new water-based liquid scintillator and potential applications

M. Yeh<sup>a,\*</sup>, S. Hans<sup>a</sup>, W. Beriguete<sup>a</sup>, R. Rosero<sup>a</sup>, L. Hu<sup>a</sup>, R.L. Hahn<sup>a</sup>, M.V. Diwan<sup>b</sup>, D.E. Jaffe<sup>b</sup>, S.H. Kettell<sup>b</sup>, L. Littenberg<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory<sup>1</sup>, Upton, NY 11973, USA

<sup>b</sup> Physics Department, Brookhaven National Laboratory<sup>1</sup>, Upton, NY 11973, USA

主に海外で将来に向けた  
スタディが行われている。

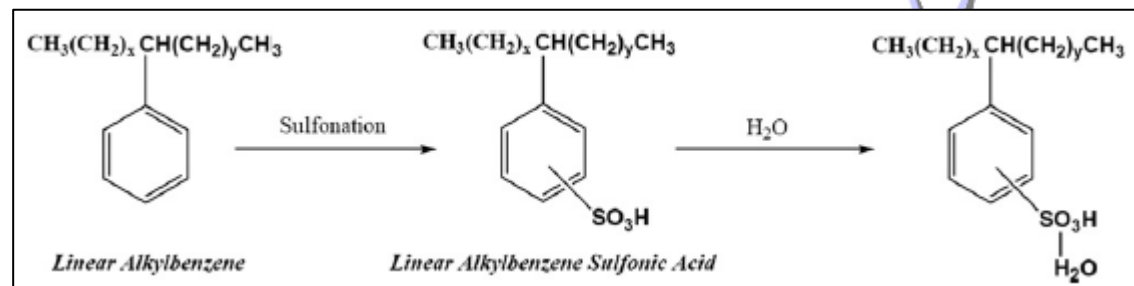


LAB LS

WbLS

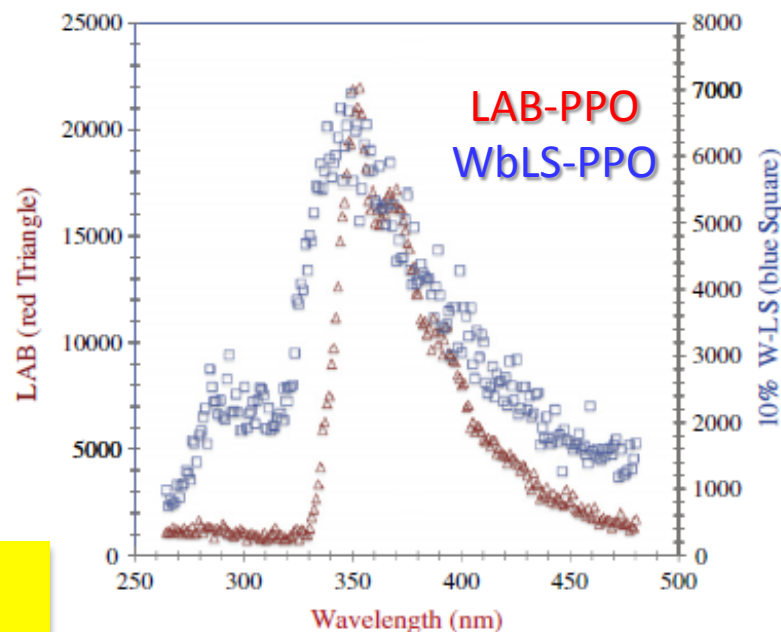
# 水ベースの液体シンチレータ

- 直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩 (LAS)



- 水にLASを10%、PPOを3g/L溶かした溶液作成に成功。
- 120 p.e./MeV @15%被覆率。
- 透過率は余り良くないので、今のところ大型化は難しそう。
- 作ってから1.5年は安定だった。

SK-Gdの次は、  
SK-WbLSの時代？



250nmのレーザーで  
励起したときの発光

# まとめ

---

- シンチレータは「放射線によって発光する」物質。
- 有機と無機があり、どちらも素粒子物理実験や身の回りで活躍している。
- 超新星背景ニュートリノを含めた近い将来のニュートリノ実験でも重要な役割。
- SK-GdからSK-WbLSへ。。。

# おわり

---

ありがとうございました！！



# カムランドでの超新星ニュートリノ



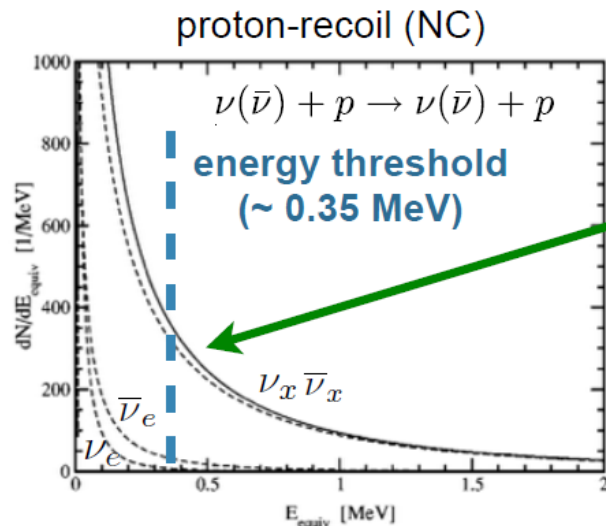
KamLANDでの期待イベント数 @ 10 kpc SN

neutrino detection	#event
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	~ 300
$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	~ 30
$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	~ 10
$\nu(\bar{\nu}) + e^- \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + e^-$	~ 20
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C}^*$	~ 60
$\nu(\bar{\nu}) + p \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + p$	~ 150

CC

ES

NC



$\nu_e$   
 $\bar{\nu}_e$   
 $\nu_x$   $\bar{\nu}_x$

${}^{12}\text{C}$  (CC)

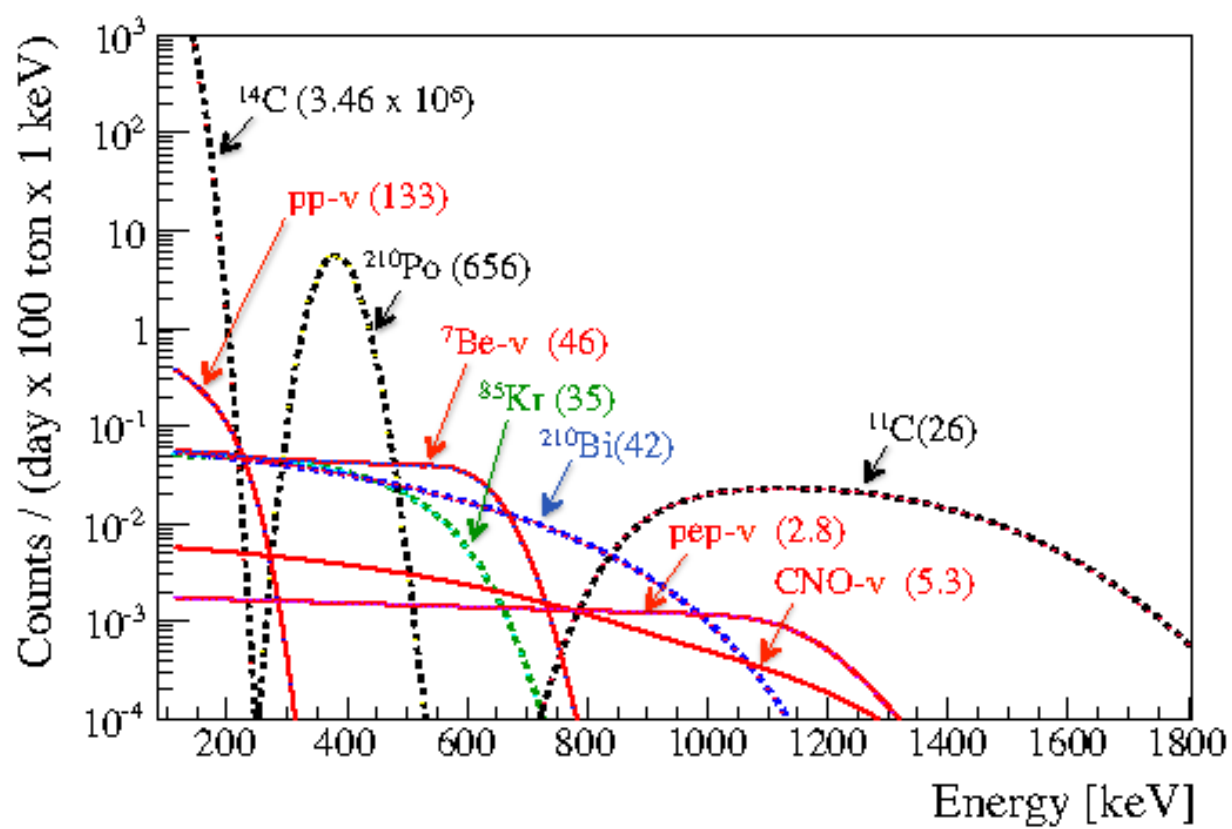
proton,  ${}^{12}\text{C}$  (CC)

proton-recoil (NC)

フレーバーごとの  
スペクトルを観測

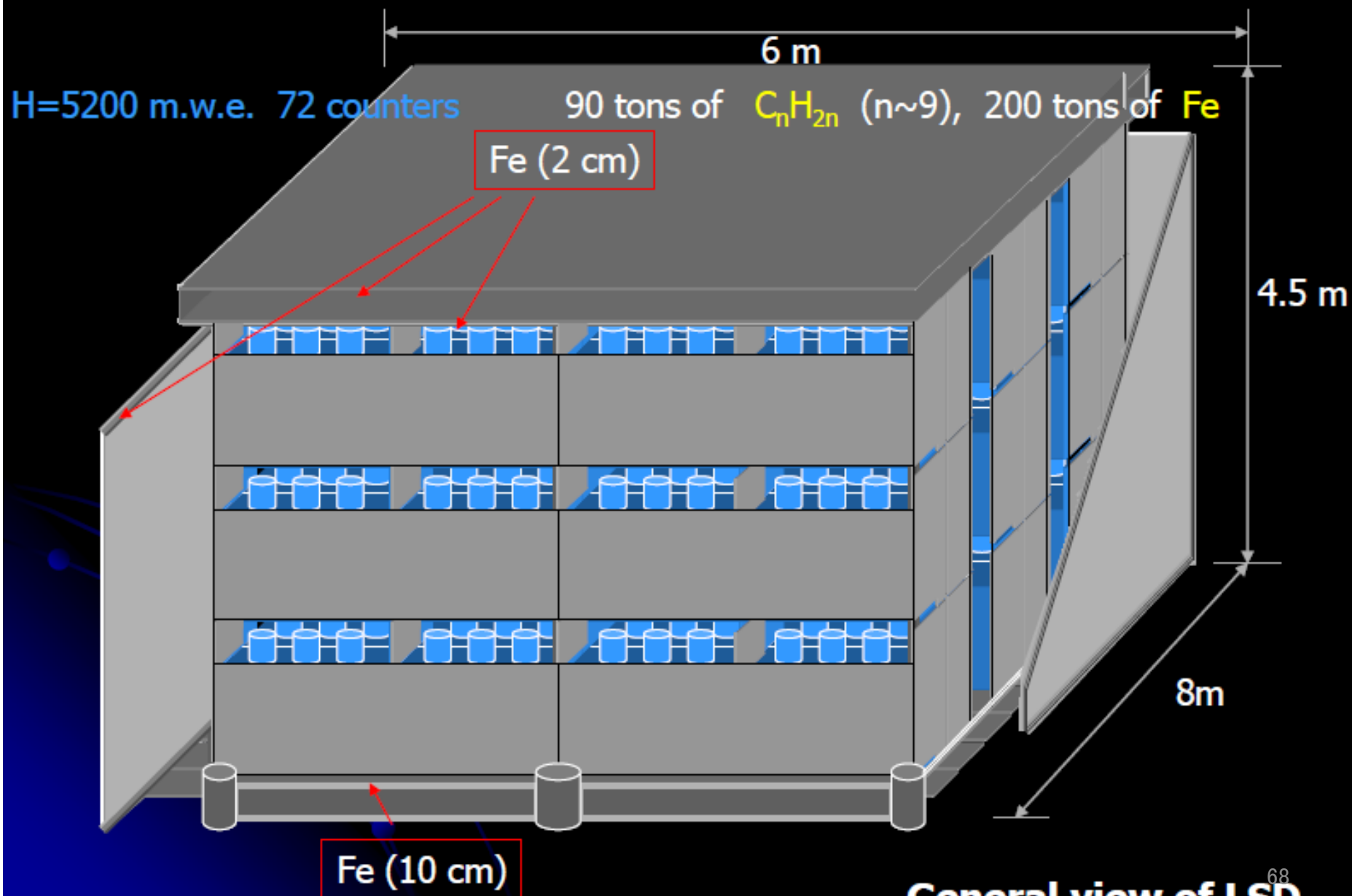
フレーバーごとにニュートリノ

温度・時間発展を測定できる



# Liquid Scintillator Detector (LSD)

in Mont-Blanc Laboratory



# Result in LSD

- Energy spectrum.
- One event between 12-25MeV.

→  $N_{\text{limit}} = 3.8$  @90% C.L.

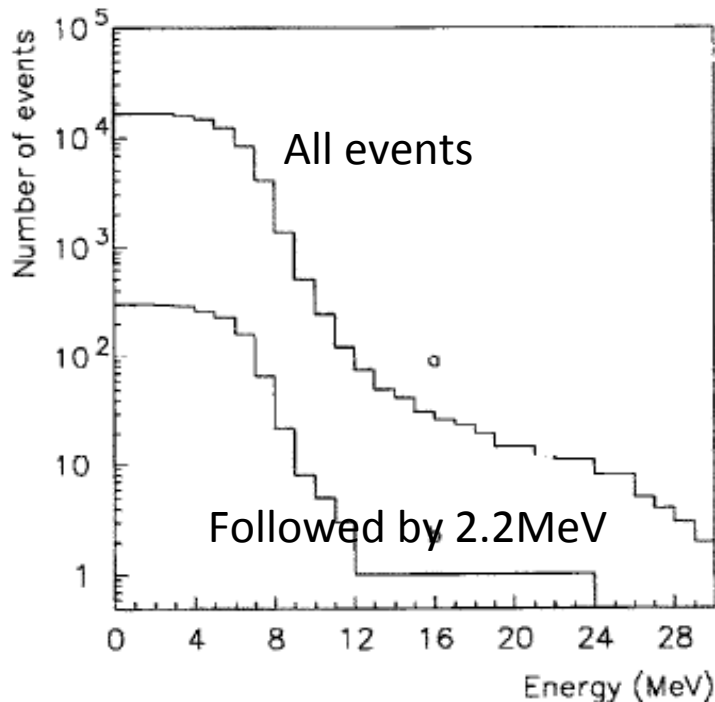


Fig. 6. Integral energy spectrum of the trigger events with  $E < 30$  MeV recorded in the 8 tanks core during the whole period of measurement considered in this analysis: (a) all events, (b) events with the double signature of the  $(\bar{\nu}_e + p)$  interaction; only one event was detected in the range  $12 < E < 30$  MeV.

