



XMASS検出器を用いた 超新星ニュートリノの観測

東京大学宇宙線研究所 平出克樹

2016年1月6-7日

新学術「地下素核研究」第2回超新星ニュートリノ研究会

富山商工会議所

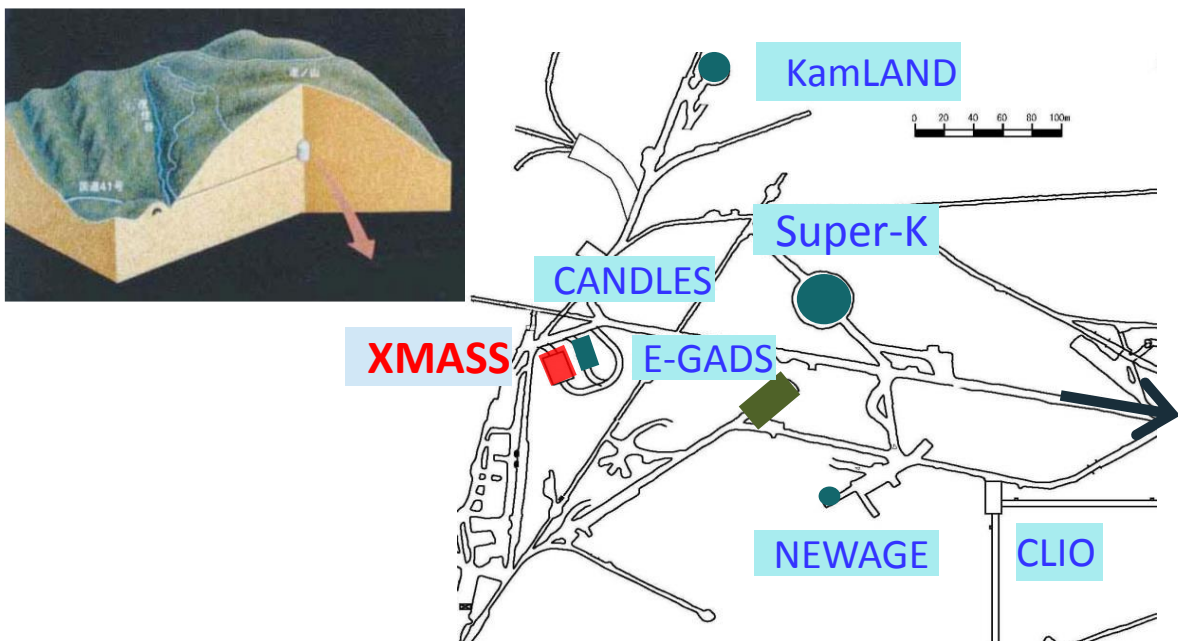
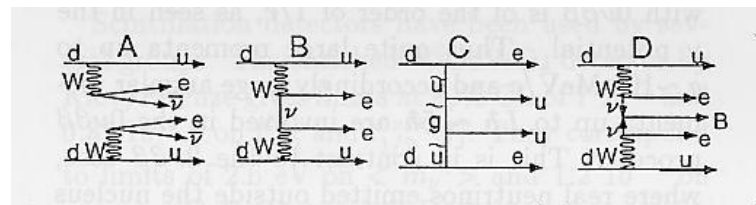
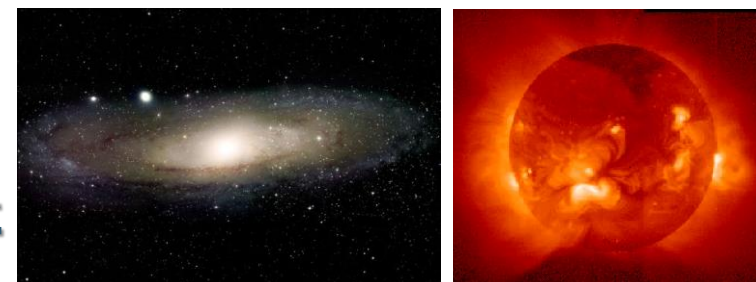
内容

- XMASS実験の紹介
- ニュートリノ・原子核コヒーレント弾性散乱
- XMASS検出器を用いた超新星ニュートリノの観測

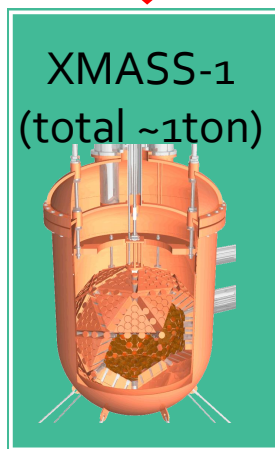
XMASS実験

■ 神岡地下1,000mで行う大型液体キセノン検出器を用いた多目的宇宙素粒子実験

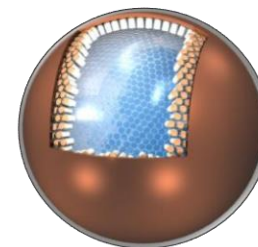
- 暗黒物質の直接探索
- 低エネルギー太陽ニュートリノの観測
- ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索



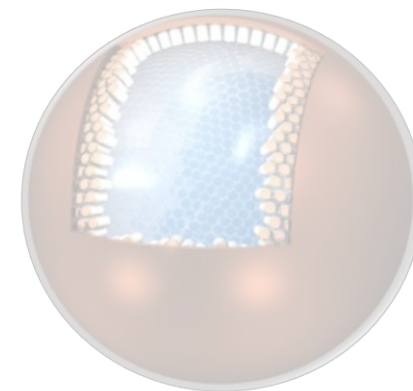
現在稼働中



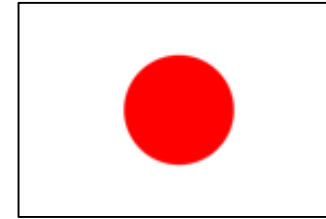
XMASS-1.5
(total ~6tons)



XMASS-2
(total ~24tons)



XMASSコラボレーション



Kamioka Observatory, ICRR, the University of Tokyo: K. Abe, K. Hiraide, K. Ichimura, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, M. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, T. Norita, H. Ogawa, K. Sato, H. Sekiya, O. Takachio, A. Takeda, S. Tasaka, M. Yamashita, B. Yang

Kavli IPMU, the University of Tokyo: K. Martens, Y. Suzuki, B. Xu

Kobe University: R. Fujita, K. Hosokawa, K. Miuchi, N. Oka, Y. Takeuchi

Tokai University: K. Nishijima, M. Miyasaka

Yokohama National University: S. Nakamura

Miyagi University of Education: Y. Fukuda

STEL, Nagoya University: Y. Itow, K. Kanzawa, R. Kegasa, K. Masuda, H. Takiya

Tokushima University: K. Fushimi, G. Kanzaki

KRISS: Y. H. Kim, M. K. Lee, K. B. Lee

Sejong University: N. Y. Kim, Y. D. Kim

10 institutes

~40 physicists



June 2014

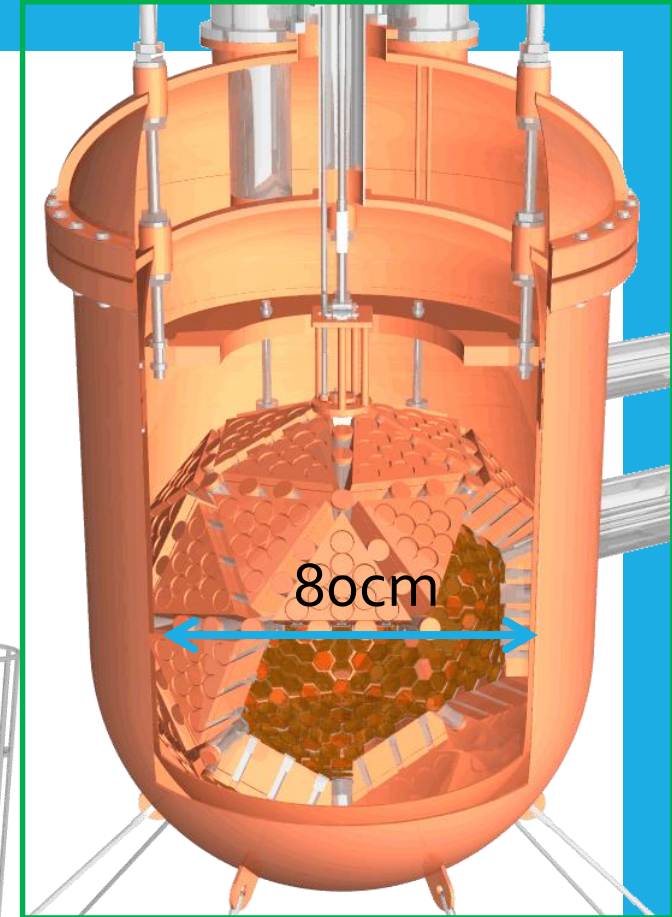
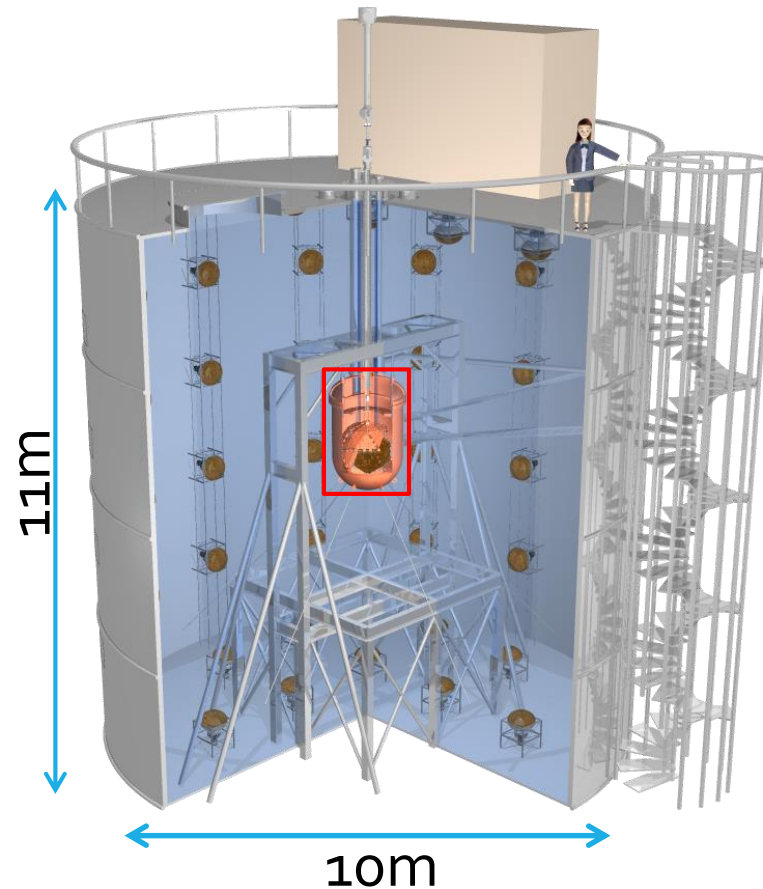
XMASS検出器の概要

■ 液体キセノン検出器

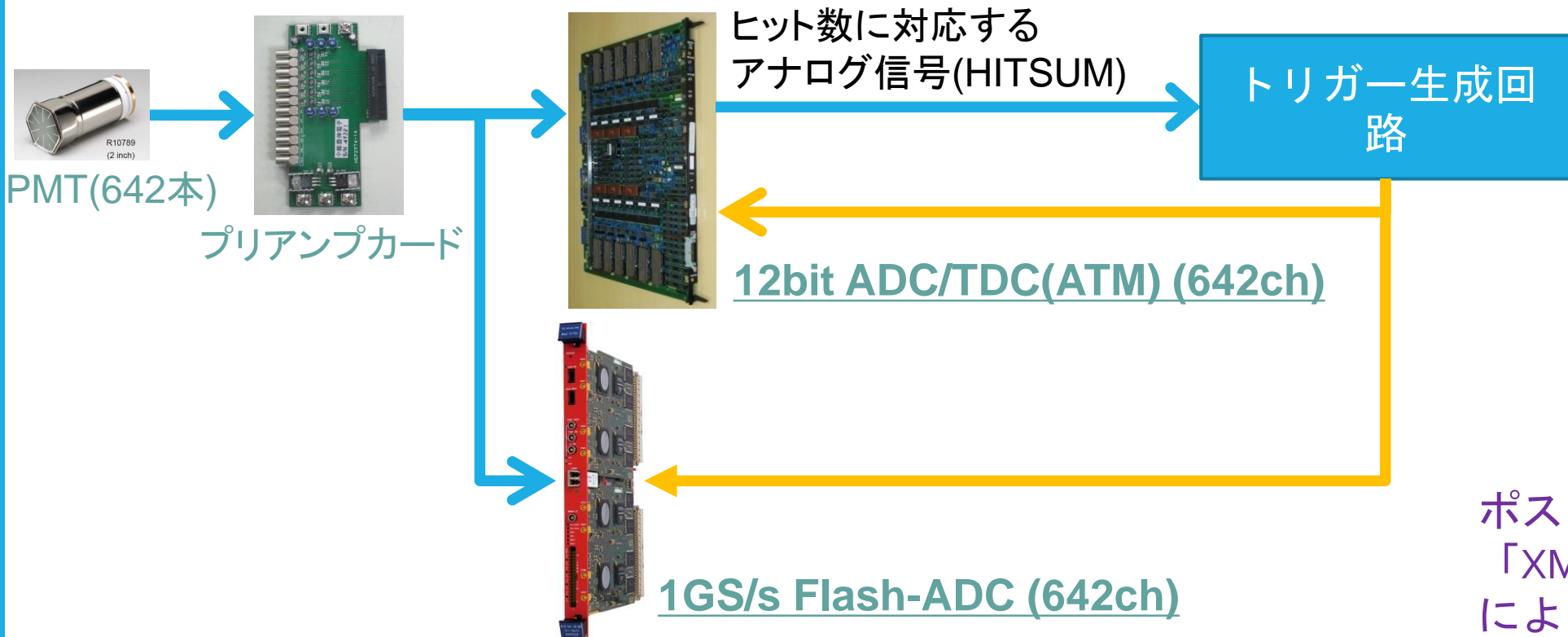
- 832kgの液体キセノン
- 642本の光電子増倍管
- 高い光電子収量 (14 p.e./keV_{ee} for ^{57}Co)
- 低エネルギー閾値 (0.3 keV_{Co} , $\sim 3 \text{ keV}_{nr}$)

■ 水チェレンコフ検出器 (外水槽)

- 環境 γ 線・中性子の遮蔽
- 宇宙線ミューオンのveto
- 72本の光電子増倍管



XMASSデータ収集システムの概要



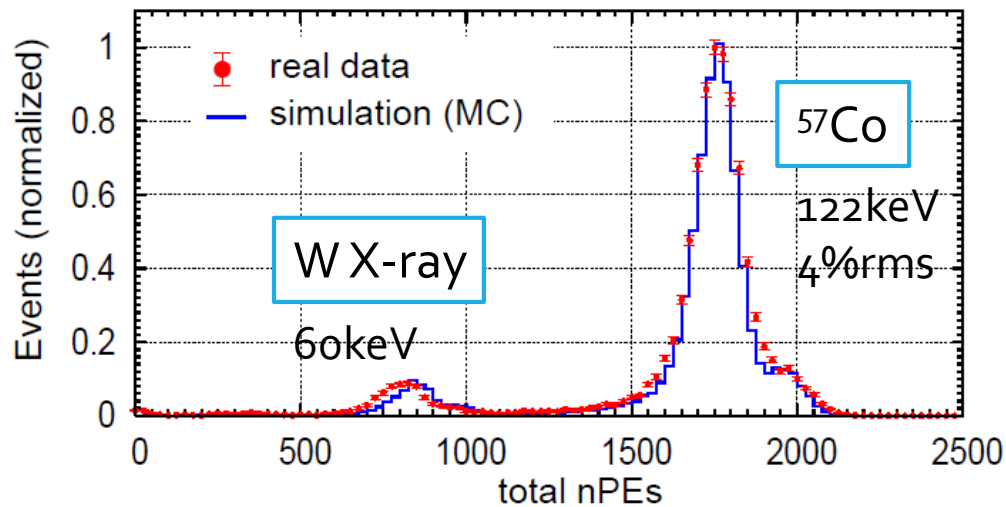
ポスター発表
「XMASS検出器の低閾値化による感度向上についての研究」小林雅俊

- ATMからのHITSUM信号を用いてトリガーを生成する。(≥ 4 ヒット)
- 通常のトリガーレートは、5Hz程度。

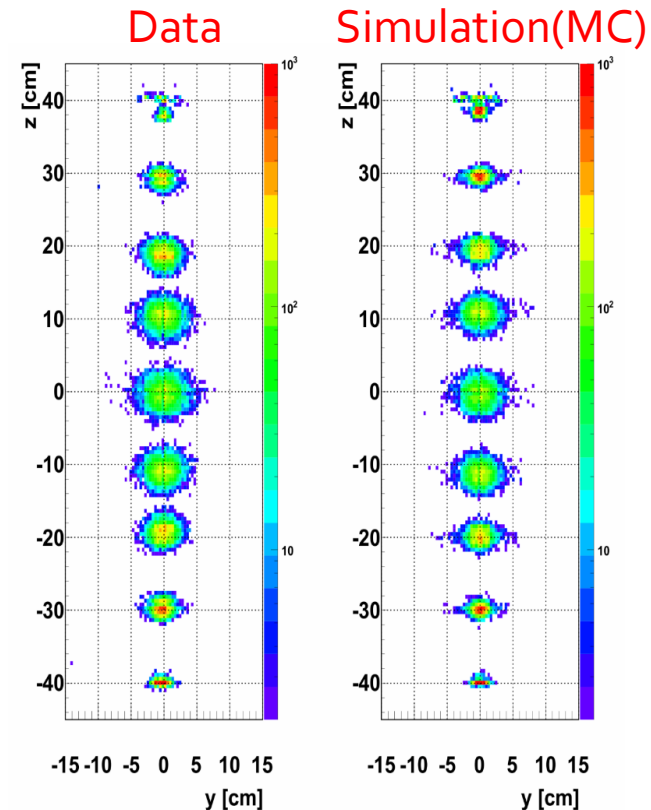
検出器の較正

^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs などのガンマ線源をキセノン検出器中に導入して、光量、光学パラメータなどの評価を行う。

観測された光電子数の分布

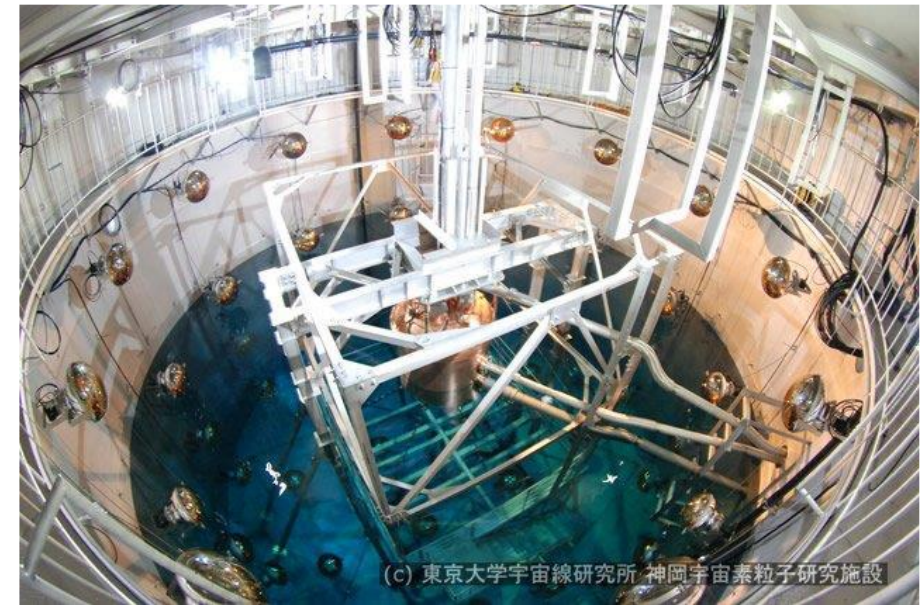


事象再構成された位置の分布



XMASS実験の現状

- 2010年9月: XMASS検出器完成
- 2010年10月~2012年5月: コミッショニングラン
 - Light WIMP search (Phys. Lett. B 719 (2013) 78-82)
 - Solar axion search (Phys. Lett. B 724 (2013) 46-50)
 - WIMP- ^{129}Xe inelastic scattering search (Prog. Theor. Exp. Phys. 063Co1 (2014))
 - Bosonic super-WIMP search (Phys. Rev. Lett. 113, 121301 (2014))
 - ^{124}Xe double electron capture search (arXiv:1510.00754)



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

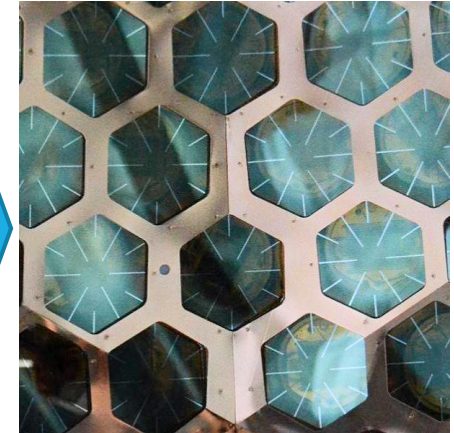
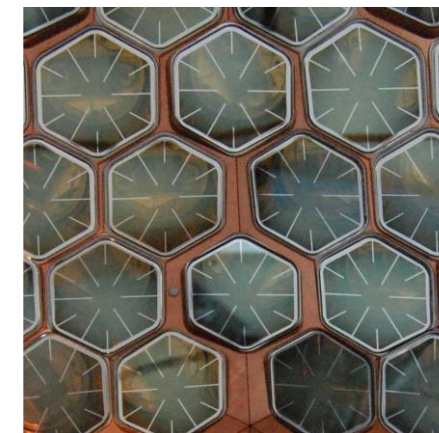
- 2012年6月~2013年10月: 検出器改良作業

- 2013年11月~ データ収集継続中

- Dark matter search by annual modulation (arXiv:1511.04807)

- 明日(1/7 9:00-)の招待講演

「XMASS実験: 季節変動による暗黒物質直接探索」 山下雅樹



XMASSにおける超新星ニュートリノの観測

■Coherent elastic neutrino-nucleus scattering (CEvNS)

$$\nu_x + (A, Z) \rightarrow \nu_x + (A, Z)$$

- XMASSにおける超新星ニュートリノ事象の主なプロセス。
- 全てのフレーバーに感度がある。
- O(10keV)以下の原子核反跳を観測する。

■Charged current neutrino-nucleus reactions

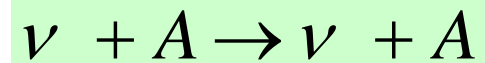
$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z + 1)$$

$$\bar{\nu}_e + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z - 1)$$

- 近傍超新星の場合には観測できる可能性がある。
- O(MeV)の電子事象なので、コヒーレント散乱とは区別できる。

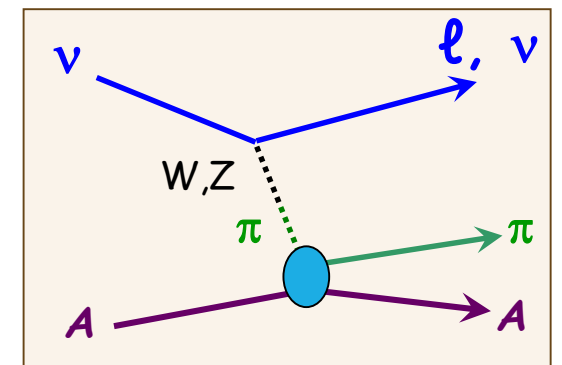
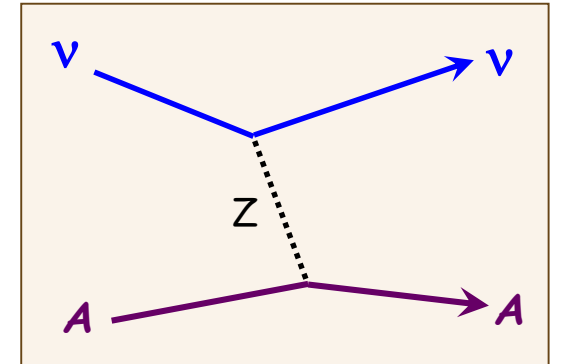
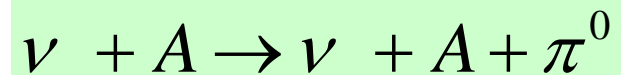
コヒーレント弾性散乱とは

ニュートリノが原子核中の全核子と“コヒーレント”に反応して原子核が反跳される。



素粒子標準模型により予言されているが、まだ観測されていない

一方、数~数十GeVエネルギー領域のニュートリノでは、
ニュートリノが原子核中の全核子と“コヒーレント”に反応して
 π 中間子を生成する“コヒーレント π 生成反応”は観測されている。



コヒーレント弾性散乱の物理

- まずは、コヒーレント弾性散乱の初観測

- 素粒子標準理論を超える物理（相互作用）の探索
- ステライルニュートリノの探索
- 暗黒物質の直接探索における究極のバックグラウンド
- 超新星爆発時にニュートリノがコア中にトラップされる主な機構

- 超新星ニュートリノの観測手段

など

暗黒物質の直接探索における究極のバックグラウンド

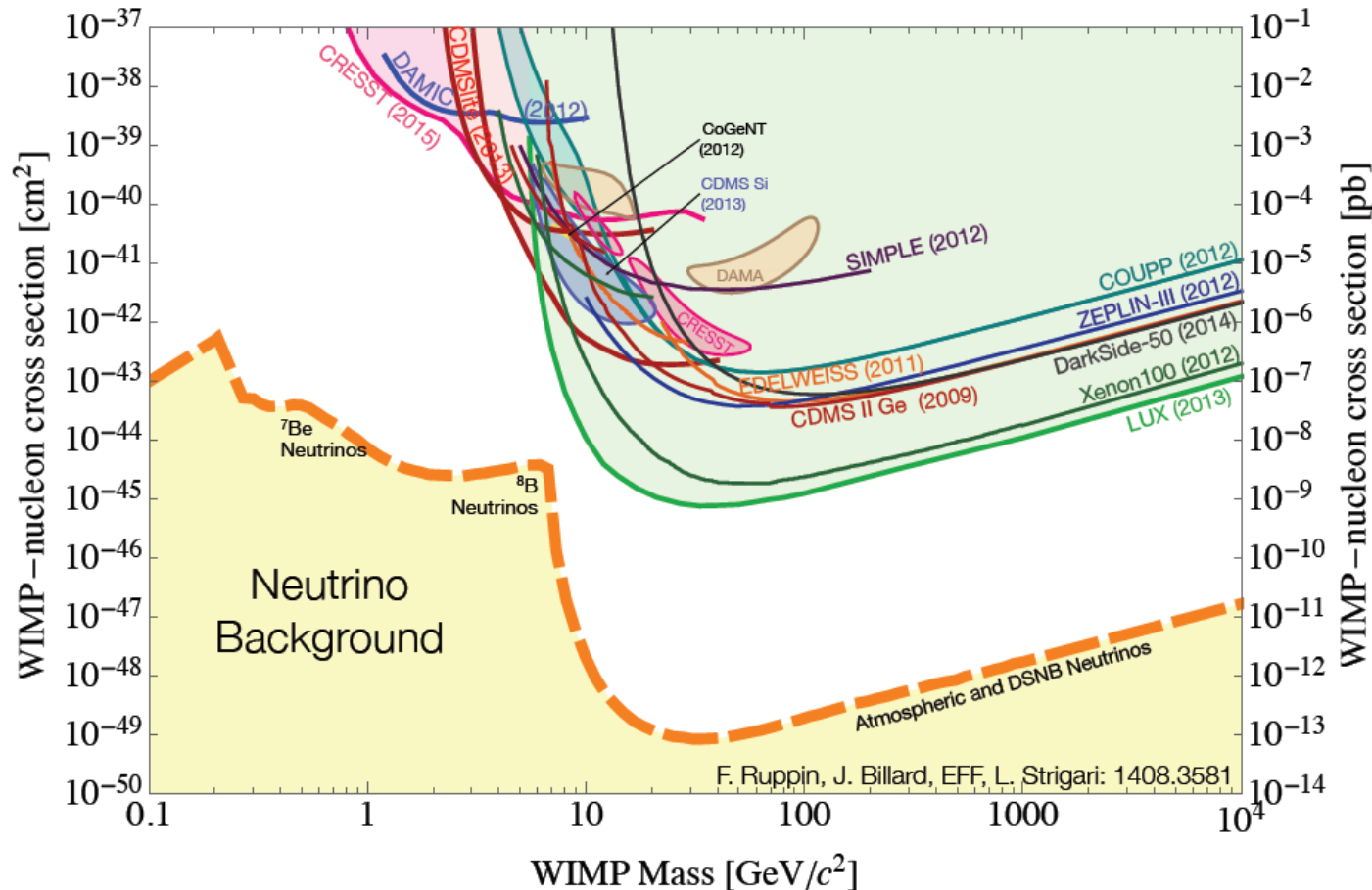
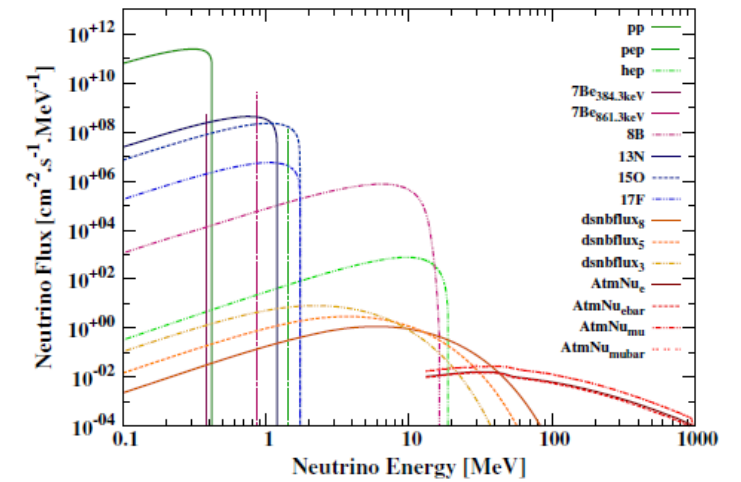


Figure taken from Enectali Figueroa-Feliciano, presented at ICRC2015

Ruppin et al.,
Phys. Rev. D90, 083510 (2014)



暗黒物質の直接探索において、
太陽ニュートリノ (${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ etc.)、
大気ニュートリノ、および
超新星背景ニュートリノによる
コヒーレント弾性散乱が
究極のバックグラウンドとなる。

コヒーレント弾性散乱を用いた 超新星ニュートリノの観測

- A. Drukier and L. Stodolsky, Phys. Rev. D30, 2295 (1984)
 - コヒーレント弾性散乱によるspallation-sourceニュートリノ, 超新星ニュートリノ, 原子炉ニュートリノ, 太陽ニュートリノなどの観測を議論
- C. J. Horowitz et al., Phys. Rev. D68, 023005 (2003)
 - 暗黒物質検出器を用いた超新星ニュートリノの観測を議論
- P. C. Divari, Adv. High Energy Phys. 2012, 379460 (2012)
 - ^{40}Ar と ^{132}Xe についてコヒーレント弾性散乱(+インコヒーレント散乱) 断面積と超新星ニュートリノ事象数を計算
- S. Chakraborty et al., Phys. Rev. D89, 013011 (2014)
 - 暗黒物質検出器を用いた超新星ニュートリノの時間分布の観測を議論

コヒーレント弾性散乱の微分断面積

ニュートリノエネルギー E_ν 、原子核反跳エネルギー T_A とすると微分断面積は

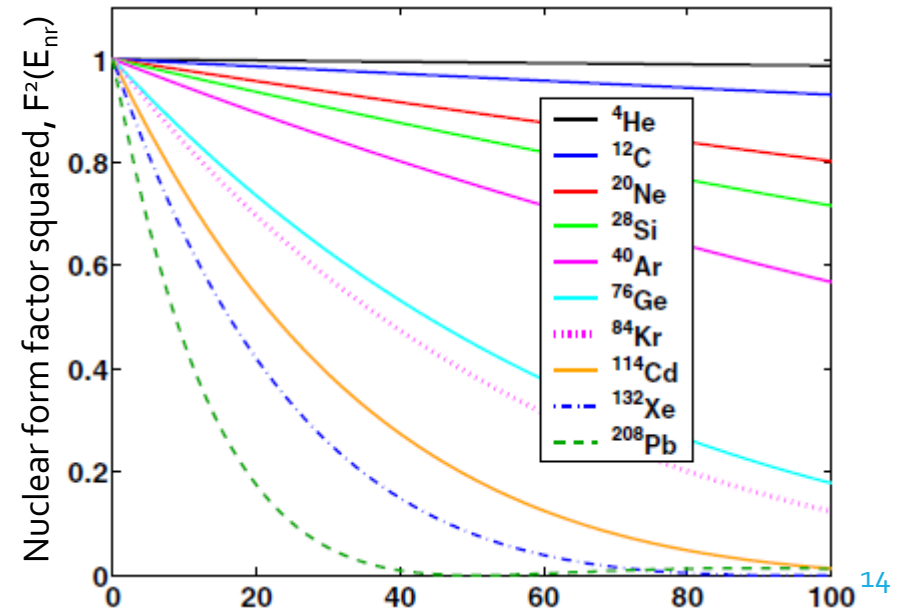
$$\left(\frac{d\sigma}{dT_A}\right)_w(T_A, E_\nu) = \frac{G_F^2 M}{8\pi} \left[1 + \left(1 - \frac{T_A}{E_\nu}\right)^2 - \frac{MT_A}{E_\nu^2} \right] Q_W^2 F^2(q^2)$$

Form factor

$$Q_W = N - (1 - 4 \sin^2 \Theta_W) Z,$$

中性子数

陽子数



Divari, Adv. High Energy Phys.
2012, 379460 (2012)

Nuclear recoil energy, E_{nr} [keV]

コヒーレント弾性散乱の原子核依存性

Horowitz et al., Phys. Rev. D68, 023005 (2003)

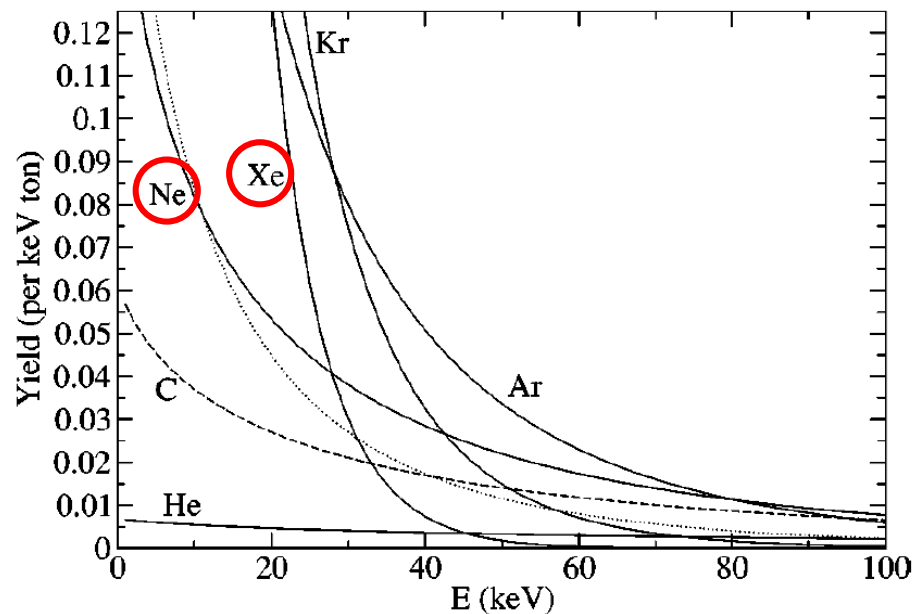


FIG. 1. Yield versus recoil kinetic energy E . The solid curves are for noble targets of ${}^4\text{He}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{40}\text{Ar}$, ${}^{84}\text{Kr}$ and ${}^{132}\text{Xe}$ as indicated; the dashed curve is for ${}^{12}\text{C}$. Finally the dotted curve, only shown for ${}^{20}\text{Ne}$, assumes a reduced ν_x temperature of $T_{\nu_x} = 5$ MeV.

$$\left(\frac{d\sigma}{dT_A}\right)_w(T_A, E_\nu) = \frac{G_F^2 M}{8\pi} \left[1 + \left(1 - \frac{T_A}{E_\nu}\right)^2 - \frac{MT_A}{E_\nu^2} \right] Q_W^2 F^2(q^2)$$

$$Q_W = N - (1 - 4 \sin^2 \Theta_W) Z,$$

$$\sin^2 \Theta_W = 0.2385$$

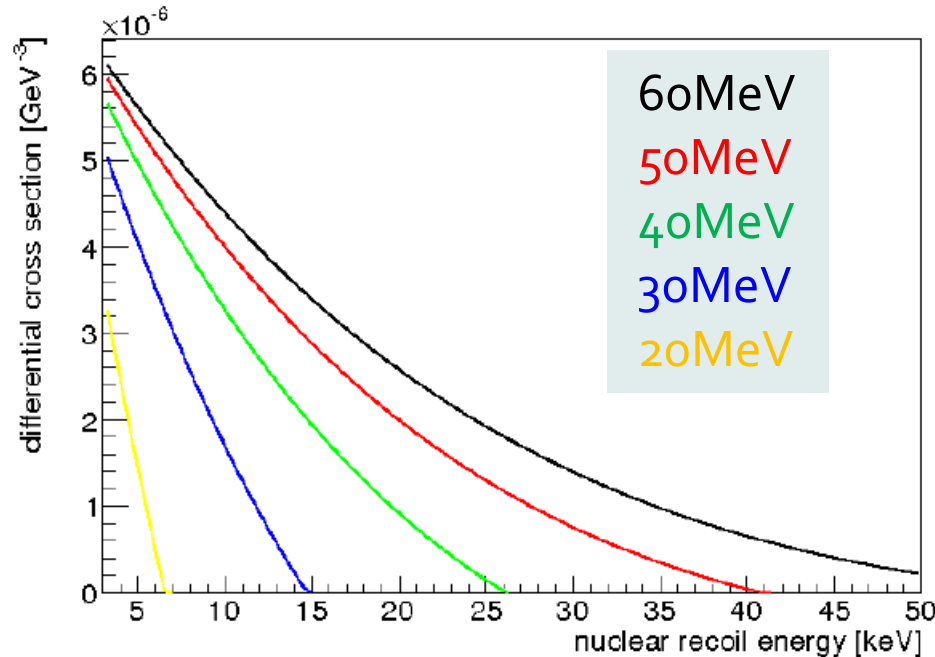
- 反応断面積は、およそ(中性子数)²に比例して大きくなる。
- 軽い原子核ほど、反跳エネルギーが大きい。

コヒーレント弾性散乱の微分断面積

キセノンの場合

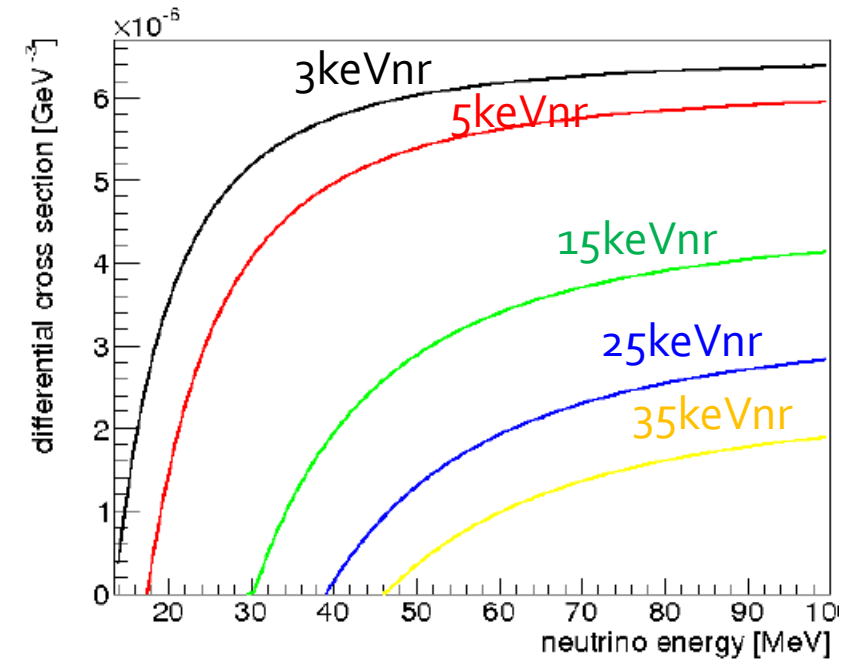


各ニュートリノエネルギーにおける
原子核反跳エネルギースペクトル



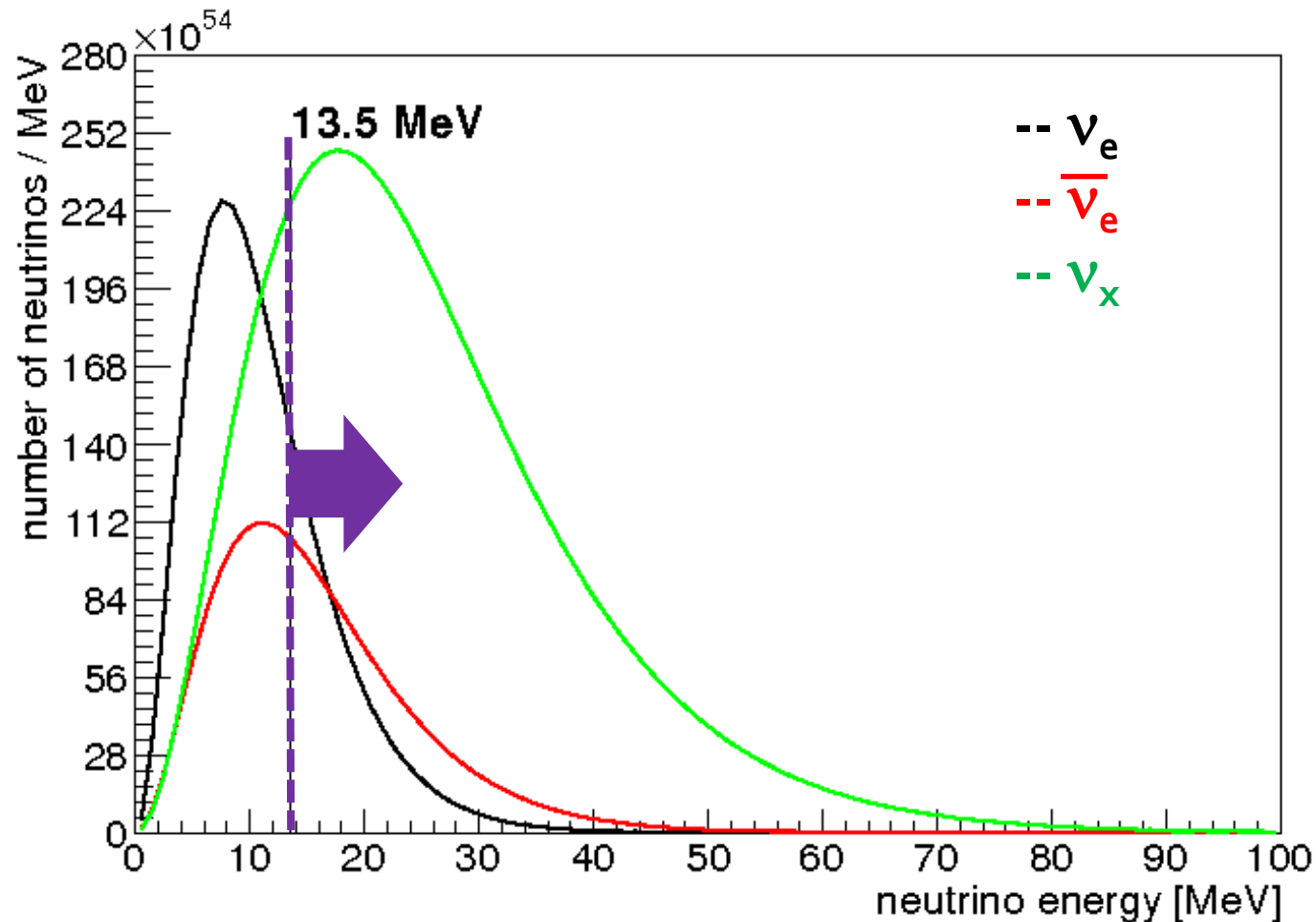
原子核反跳エネルギー~数十keV以下

各原子核反跳エネルギー
における微分断面積



XMASSのエネルギー閾値~3keVnr
→ 13.5 MeV以上のニュートリノが
検出できる

XMASS検出器においてコヒーレント弾性散乱で観測できる超新星ニュートリノ

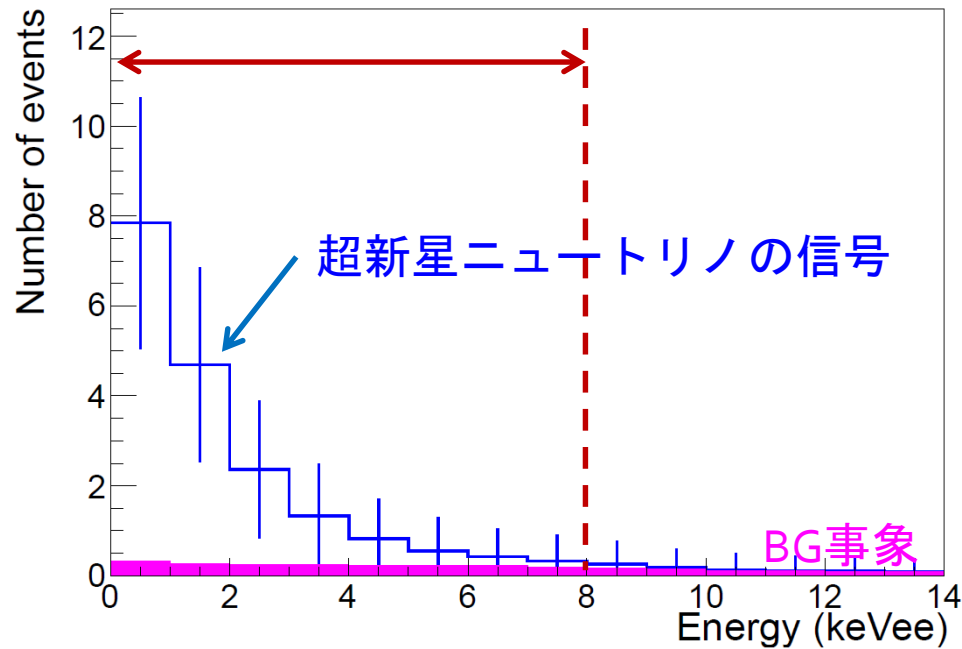


Livermoreモデルで予想される
超新星ニュートリノフラックス

- 中性カレント反応なので
全てのフレーバーに感度がある
- $E_\nu > 13.5$ MeVのニュートリノ
が観測できる

XMASS検出器で期待される 超新星ニュートリノの信号

Livermoreモデル (d=10kpc)
10秒間で観測される事象

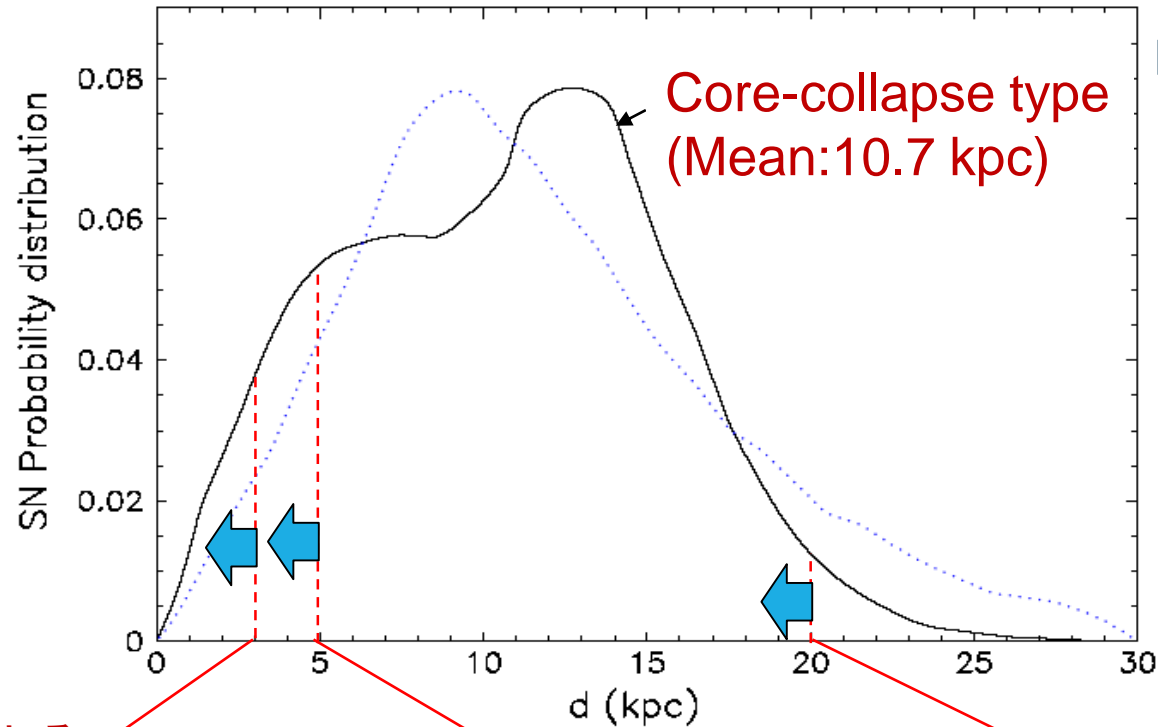


XMASS(832kg)で期待されるイベント数

Supernova model	d=10 kpc	d=196 pc
Livermore	15	3.9×10^4
Nakazato (20M, Z=0.02, 100ms)	3.5	0.9×10^4
Nakazato (30M, Z=0.02, 300ms)	8.7	2.3×10^4
Nakazato (blackhole)	21	5.5×10^4

ニュートリノコヒーレント弾性散乱の
世界初の観測になるかも！！

銀河系内の期待される超新星爆発の分布



Ref) Mirizzi, Raffelt and Serpico, JCAP 0605,012(2006).

- 銀河系内で超新星爆発が起きたらXMASSで観測が可能
- ベテルギウス(196pc)の場合、 $\sim 10^4$ イベント期待される。

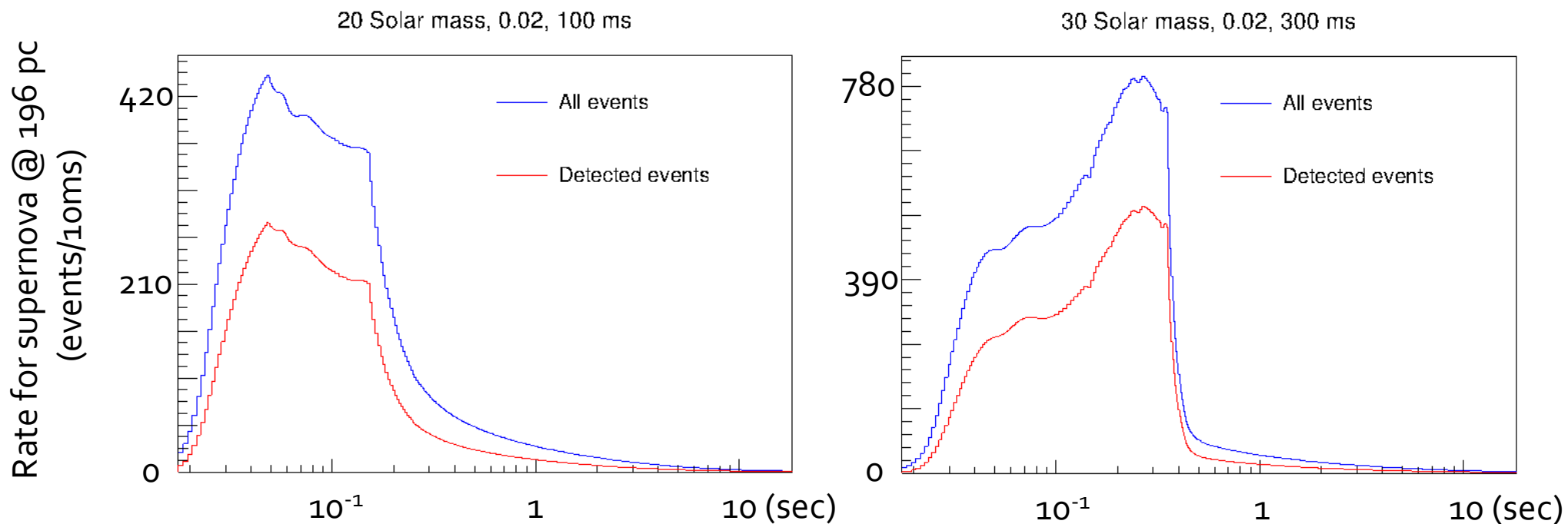
Livermoreモデルによる

<3.16 kpc
(7% probability)
>150events @XMASS

<5 kpc
(16% probability)
>60events @XMASS

<20 kpc
(97% probability)
>4events @XMASS

XMASS検出器で期待される 超新星ニュートリノ事象の時間分布

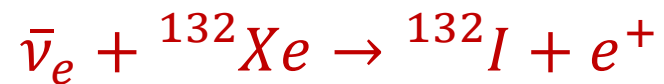


超近傍超新星爆発の場合には、XMASS検出器で観測されたコヒーレント弾性散乱事象の時間分布から超新星モデルの区別ができそう。

超近傍超新星爆発の場合

Ref.) P.C. Divari, Advances in High Energy Physics vol. 2013, 143184 (2013).

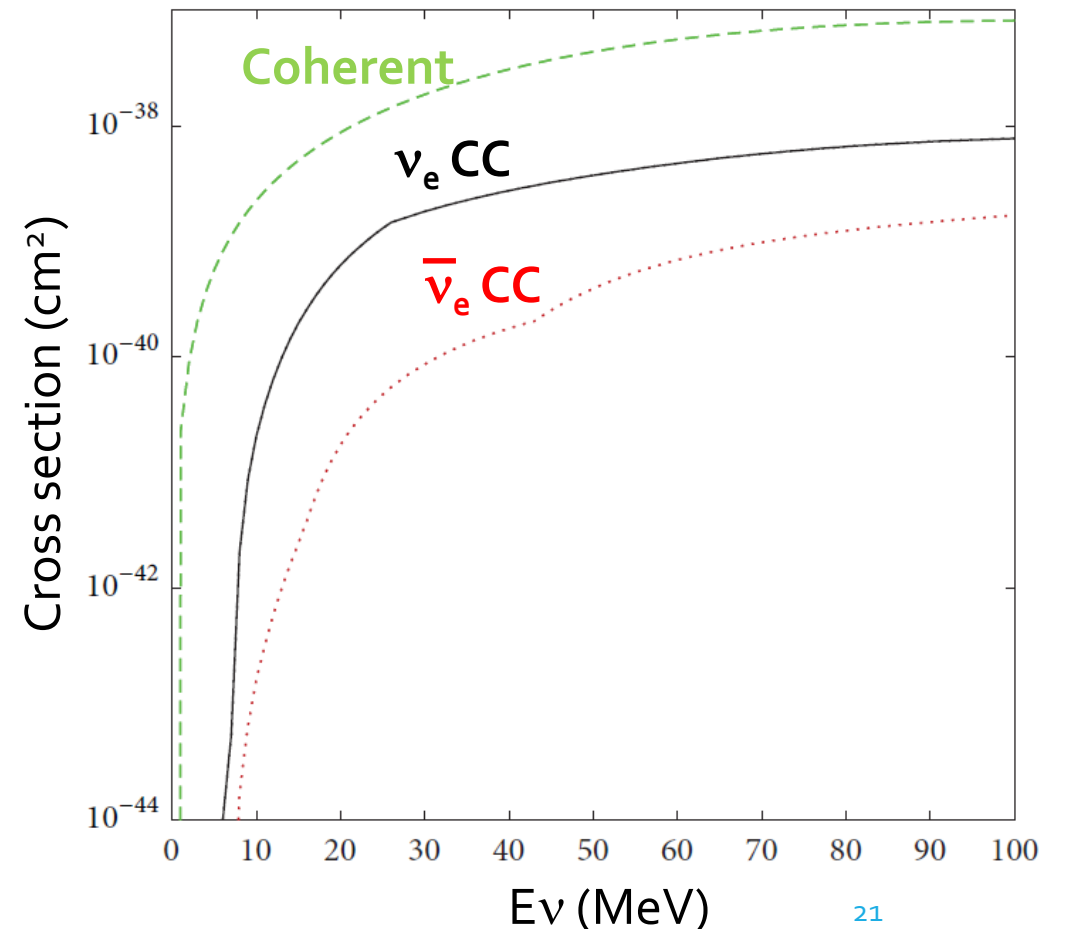
コヒーレント弾性散乱のほかに
荷電カレント反応も観測できる可能性がある。



ベテルギウス(196 pc)の場合XMASS検出器で

ν_e CC: ~数百イベント

$\bar{\nu}_e$ CC: ~数十イベント



近々始動しそうな大型の暗黒物質検出器

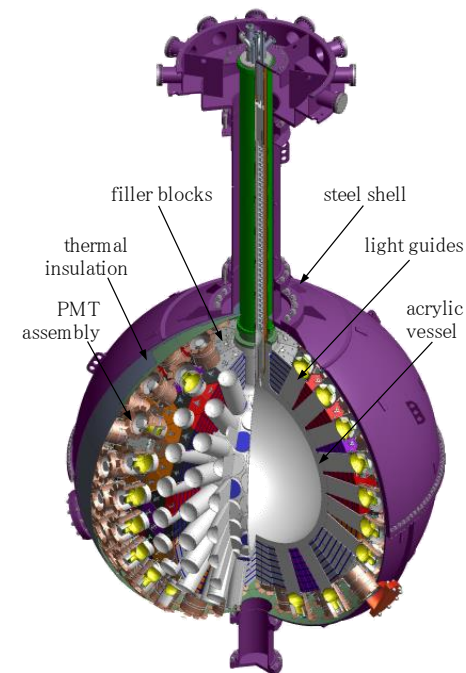
XENON1T

- Dual phase liquid xenon
- Total 3.5 tons, FV 1 ton



DEAP-3600

- Single phase liquid argon
- Total 3.6 tons, FV 1 ton



XMASS検出器を用いた 超新星ニュートリノ観測に向けた準備

✓GPSによる時刻同期

Super-Kamiokande, KamLANDやその他の観測と比較できるようにする

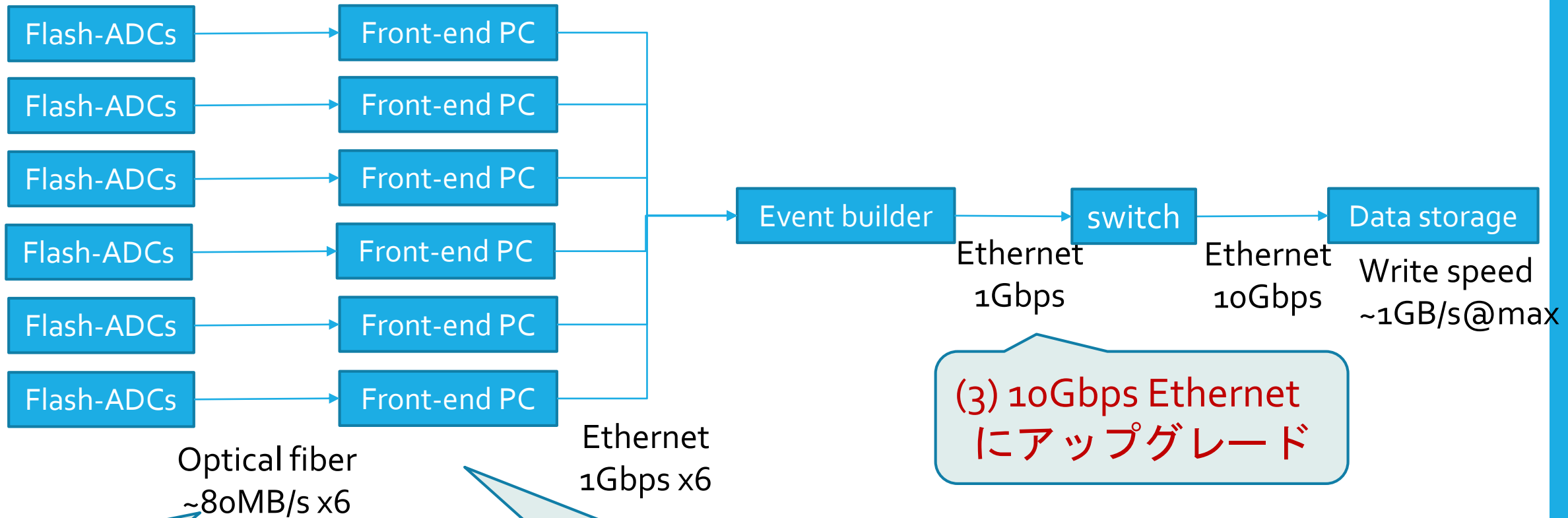
✓KamLAND前兆ニュートリノアラームの受信・監視

毎週おこなっている検出器キャリブレーションなどの日程を調整し、
万全の体制で観測にのぞむ

- データ収集システムの高速化
- 新型トリガーシステムの開発・導入

} 現在進行中

データ収集システムの高速度化



(1) 各クレート内
並列読出しで
~320MB/s x6に高速化

(2) フロントエンドPC
のメモリを増強

(3) 10Gbps Ethernet
にアップグレード

新型トリガーシステムの開発・導入

現行のシステムの問題点

- ATMのペDESTAL測定のため30分に一度、数秒間のdead timeが発生
- ATMのデータ転送が追いつかない場合、トリガーがvetoされてしまう



Flash-ADCによるトリガーシステムを開発・導入して、ATMを切り離したい
(現在、ATMはトリガー生成とODの記録にしか使っていない)

Flash-ADC



各チャンネルのヒット
情報をLVDSで出力

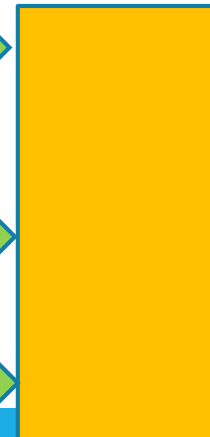
クレート毎に
足し上げる



⋮



トリガー生成
モジュール



FPGAを用いて
ヒット数を計算して
トリガーを作る

まとめ

- XMASS実験は、液体キセノンを用いた多目的実験で、現在その第1段階として主に暗黒物質の直接検出を目指してデータ収集中。
- 低エネルギー閾値かつ大質量のXMASS検出器を用いて、超新星ニュートリノによるコヒーレント弾性散乱を世界で初めて観測できる可能性がある。
- ベテルギウスなど超近傍での超新星爆発が起きれば、XMASSでも高頻度のイベントが観測されるため、XMASS DAQの強化を行う。

BACKUP SLIDES

コヒーレント弾性散乱の原子核依存性

Horowitz et al., Phys. Rev. D68, 023005 (2003)

TABLE I. Yield in events per ton for a supernova at 10 kpc assuming different target materials. Also listed is the number of events above thresholds of 5, 10, 25 or 50 keV. Finally the average recoil energy $\langle E \rangle$ is given.

Target	Y	$Y > 5$ keV	$Y > 10$ keV	$Y > 25$ keV	$Y > 50$ keV	$\langle E \rangle$ (keV)
^4He	0.85	0.82	0.79	0.72	0.62	240
^{12}C	2.5	2.2	2.0	1.6	1.1	83
^{20}Ne	4.0	3.3	2.9	2.0	1.2	46
^{28}Si	5.5	4.2	3.4	2.1	1.1	31
^{40}Ar	9.4	6.6	5.0	2.5	0.99	21
^{76}Ge	18.6	9.6	5.8	1.7	0.30	9.5
^{84}Kr	19.8	9.5	5.5	1.4	0.20	8.4
^{114}Cd	26.3	9.7	4.6	0.70	0.041	5.7
^{130}Te	31.8	10.1	4.3	0.47	0.014	4.8
^{132}Xe	31.1	9.8	4.1	0.43	0.012	4.8
^{208}Pb	47.5	7.3	1.7	0.022	0.001	2.6

キセノン原子核反跳エネルギースペクトル

Livermoreモデル($d=10$ kpc)の場合

