

# フッ素を用いた 大質量暗黒物質直接探索

神戸大学 身内賢太郎

2017年12月15日 CRCタウンミーティング

## 流れ

- 暗黒物質探索の現状
- それだけ?
- 手段

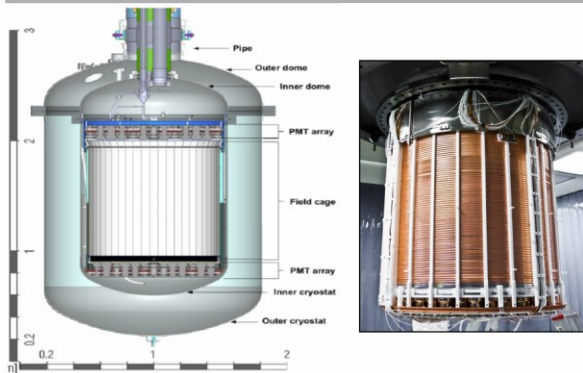
# 概観

# 現状

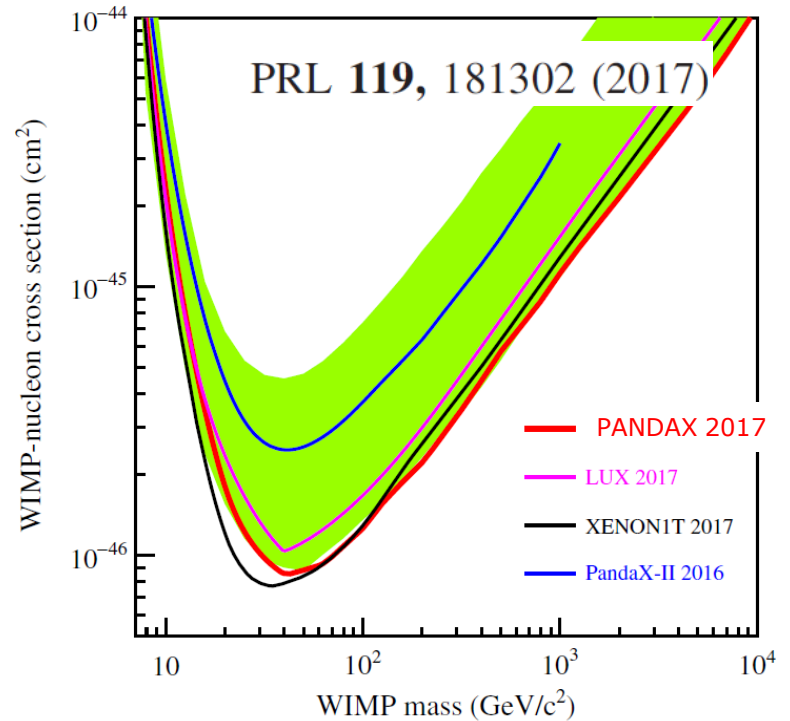
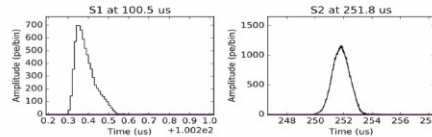
- 2層式液体キセノンの快進撃 世界に3つ
- $10^{-46} \text{cm}^2 \rightarrow 0(1) \text{ 事象/月/1ton(Xe)}$
- “2G” detector^

2017

## The Time Projection Chamber (TPC)



- 248 3" low-bkg PMTs
- 1 m drift  $\times$   $\phi$ 1 m
  - 2 tons active LXe
  - largest LXe TPC built
- filled and functional since May 2016



# WHAT'S NEW :

## ニュートリノコヒーレント散乱

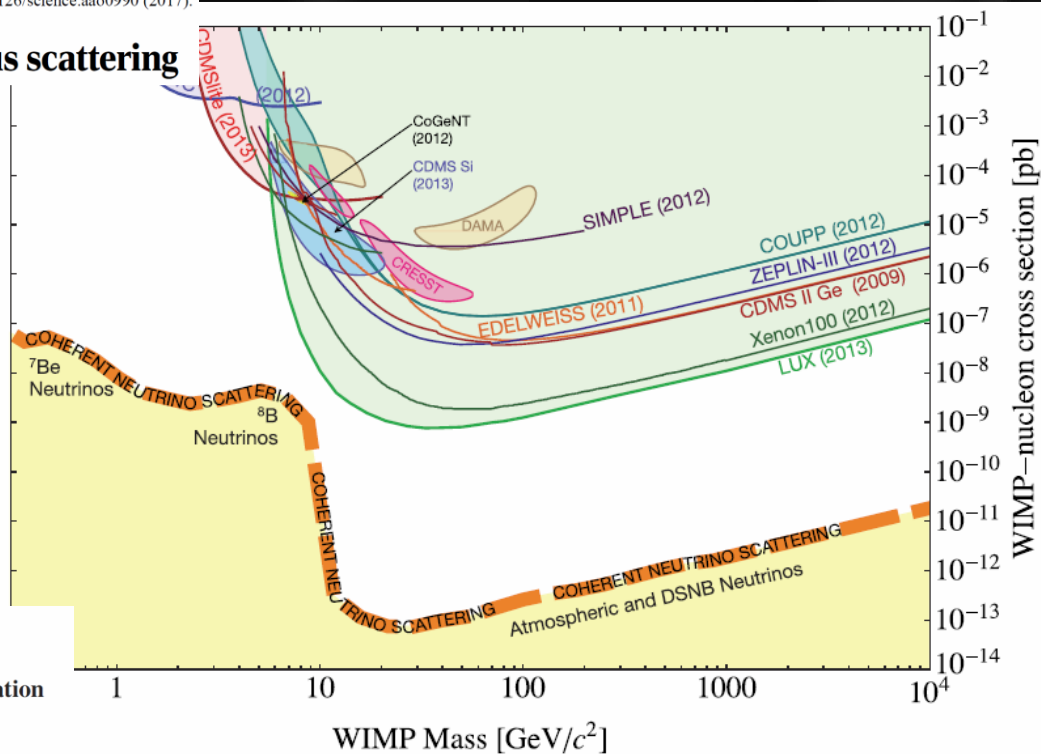
- 2017年初観測された
- 「固い」BG (=ニュートリノフロア) になる

Science

REPORTS

Cite as: D. Akimov *et al.*, *Science*  
10.1126/science.aao0990 (2017).

### Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering

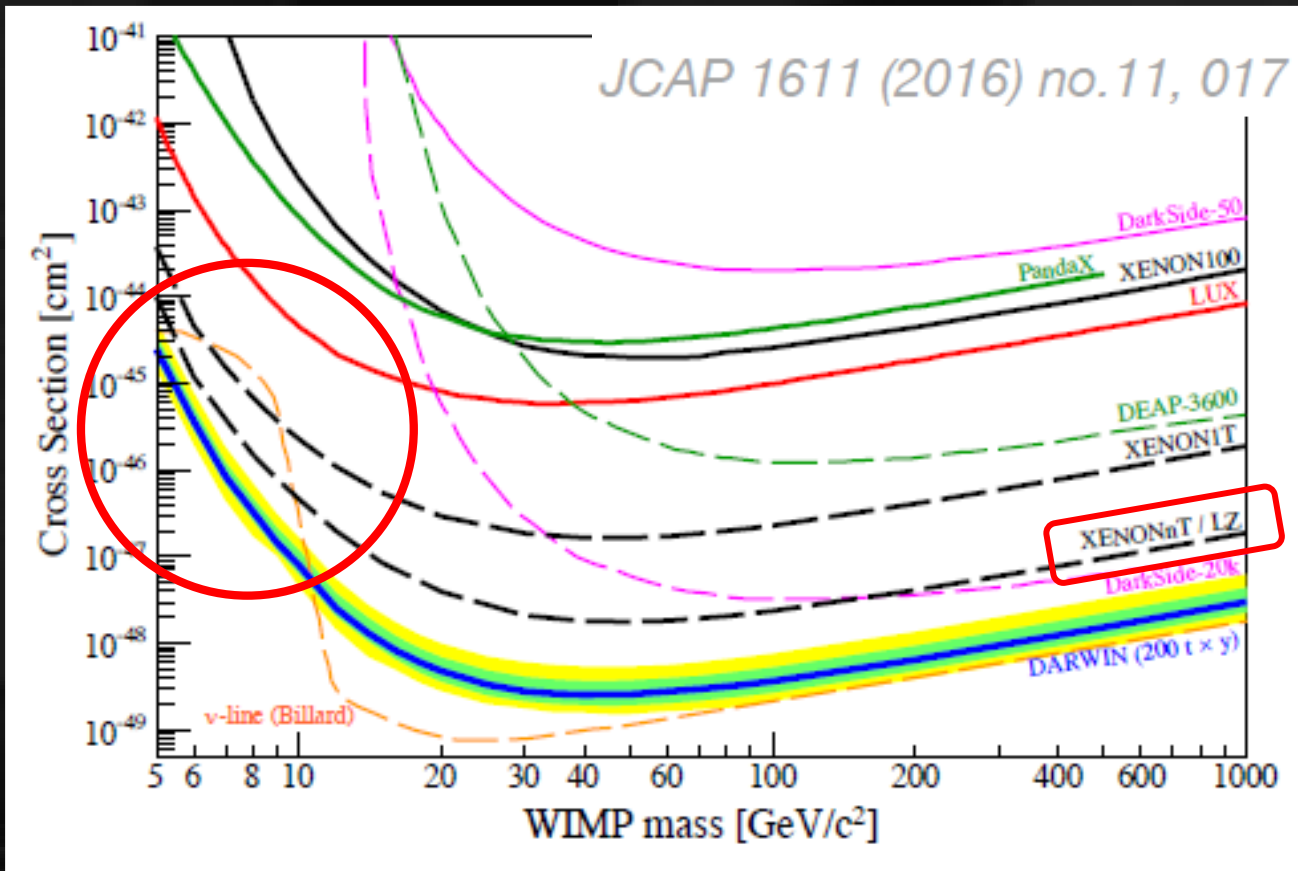
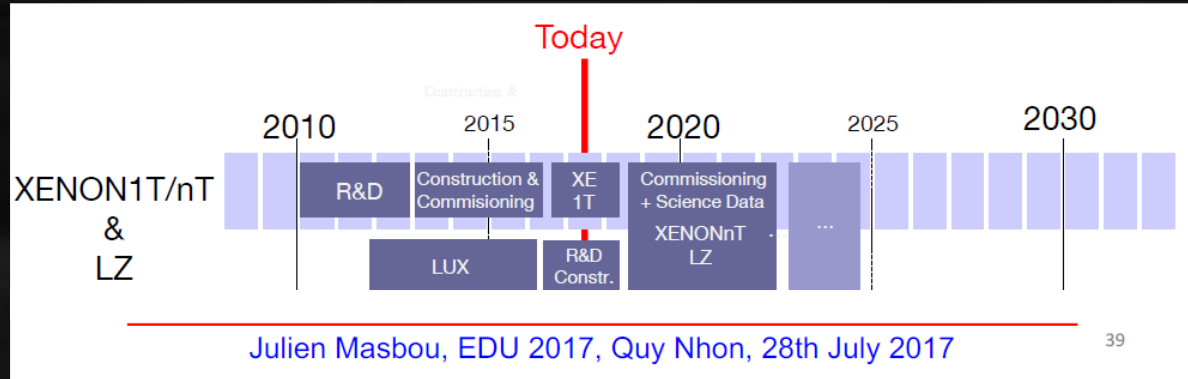


PHYSICAL REVIEW D 89, 023524 (2014)

Implication of neutrino backgrounds on the reach of next generation dark matter direct detection experiments

J. Billard,\* and E. Figueroa-Feliciano

- 2G detector  
2019-2020開始
- 1桁先の探索
- ニュートリノフロア / thresholdino



# それだけ？ G3に向けてどう考える？

東京大学宇宙線研究所将来計画検討委員会 最終報告書

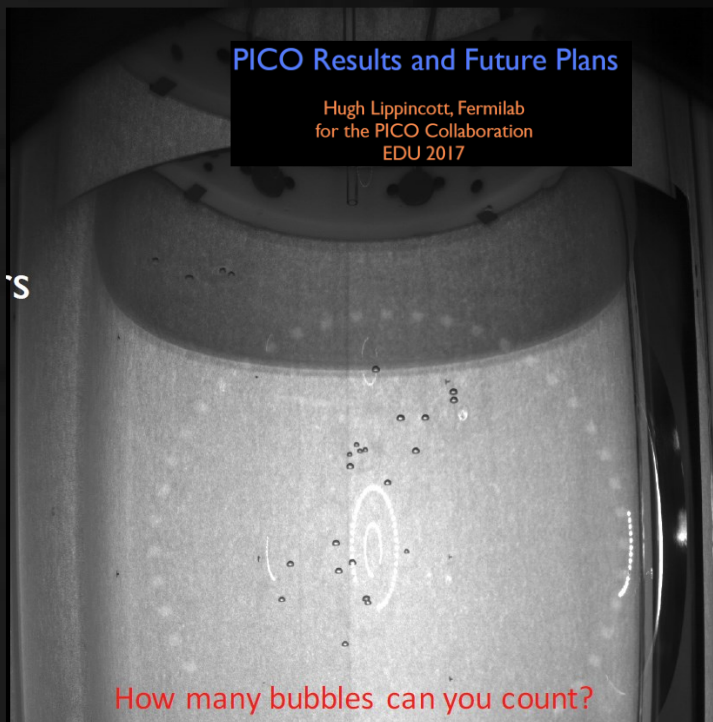
2017年10月26日

## 1. 科学的合理性

提案の概要は、1) 現 XMASS を今後 2 年程で運転を終了し、次期計画と位置付けていた XMASS1.5 を取り下げる、2) 海外の G2 実験に参加する、の二つからなる。現 XMASS 実験を停止して XMASS1.5 を取り下げる点に関しては、海外で進行中の他の実験との競争力の点から妥当な判断である。今後、海外の G2 実験に参加することは最先端の物理を引き出す有力な方針と認められる。一方では G2 に続く G3 も計画中であることから、G2 での経験と神岡でのアクティビティを G3 へ繋げる配慮が望まれる。

# Spin Dependent : PICO(=PICASSO+COUP)

- 過熱状態(superheated droplet)  $C_3F_8$  バブルチェンバー
- 閾値型検出器 (エネルギースペクトル情報はなし)  $3.3keVnr$
- 安価に大質量 60リットル
- ガンマには感度なし
- 音と泡でカット → 0事象/1167kgdays



SDについては、PICOがリード

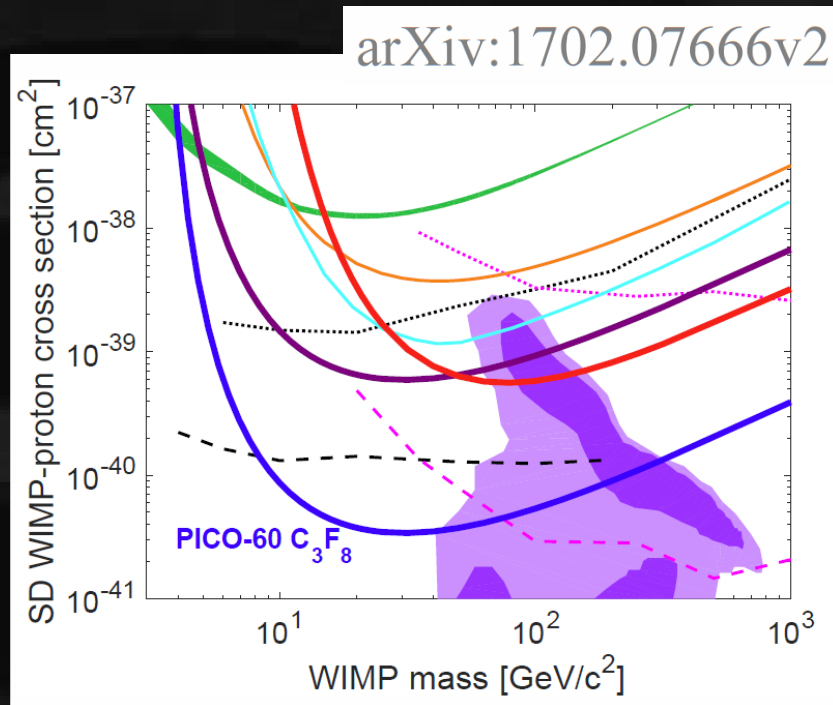


FIG. 3. The 90% C.L. limit on the SD WIMP-proton cross section from PICO-60  $C_3F_8$  plotted in thick blue, along with limits from PICO-60  $CF_3I$  (thick red) [10], PICO-2L (thick purple) [9], PICASSO (green band) [14], SIMPLE (orange) [34], PandaX-II (cyan) [35], IceCube (dashed and dotted pink) [36], and SuperK (dashed and dotted black) [37, 38]. The indirect limits from IceCube and SuperK assume annihilation to  $\tau$  leptons (dashed) and  $b$  quarks (dotted). The purple region represents parameter space of the constrained minimal supersymmetric model of [39]. Additional limits, not shown for clarity, are set by LUX [40] and XENON100 [41] (comparable to PandaX-II) and by ANTARES [42, 43] (comparable to IceCube).

## □ Cross section

- **Enhancement factor C**

$$\sigma_{\chi-N} = 4G_F^2 \mu_{\chi-N}^2 C_N$$

- **SI interaction**

$$C \propto A^2$$

- **SD interaction** (contribution of **either** proton **or** neutron is considered)

$$C \propto \lambda^2 J(J+1)$$

**A: atomic number**

**$\lambda$ : Lande factor**

**J: total spin of the nuclei**

$$\mu_{\chi-N} = \frac{M_\chi M_N}{M_\chi + M_N} : \text{reduced mass}$$

$G_F^2$ : Fermi coupling constant

Isotope	$J$	Abundance(%)	$\mu_{\text{mag}}$	$\lambda^2 J(J+1)$	unpaired nucleon
$^1\text{H}$	1/2	100	2.793	0.750	proton
$^7\text{Li}$	3/2	92.5	3.256	0.244	proton
$^{11}\text{B}$	3/2	80.1	2.689	0.112	proton
$^{15}\text{N}$	1/2	0.4	-0.283	0.087	proton
$^{19}\text{F}$	1/2	100	2.629	0.647	proton
$^{23}\text{Na}$	3/2	100	2.218	0.041	proton
$^{127}\text{I}$	5/2	100	2.813	0.007	proton
$^{133}\text{Cs}$	7/2	100	2.582	0.052	proton
$^3\text{He}$	1/2	$1.0 \times 10^{-4}$	-2.128	0.928	neutron
$^{17}\text{O}$	5/2	0.0	-1.890	0.342	neutron
$^{29}\text{Si}$	1/2	4.7	-0.555	0.063	neutron
$^{73}\text{Ge}$	9/2	7.8	-0.879	0.065	neutron
$^{129}\text{Xe}$	1/2	26.4	-0.778	0.124	neutron
$^{131}\text{Xe}$	3/2	21.2	0.692	0.055	neutron
$^{183}\text{W}$	1/2	14.3	0.118	0.003	neutron



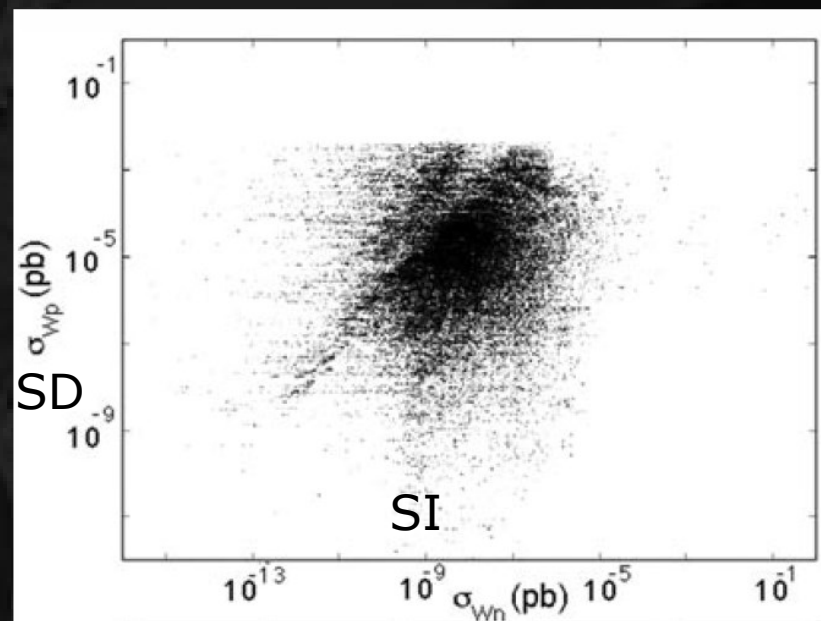
# Fの特徴： SD/SI F/Xe 相補性

- SDとSIの大きさは独立
- SDでの探索では ニュートリノフロアがXeより下
- 発見の先の物理へのリーチ

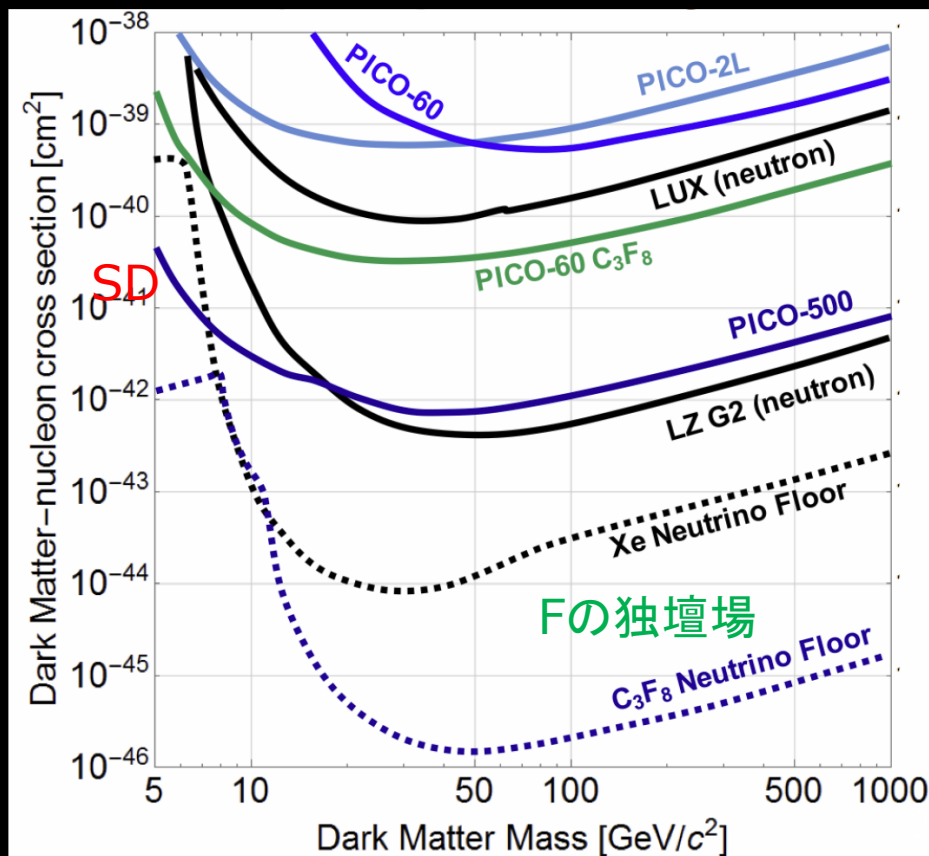
PICO Results and Future Plans

Hugh Lippincott, Fermilab  
for the PICO Collaboration  
EDU 2017

*New Journal of Physics* 2 (2000) 14.1–14.14



## Scaling to PICO-500



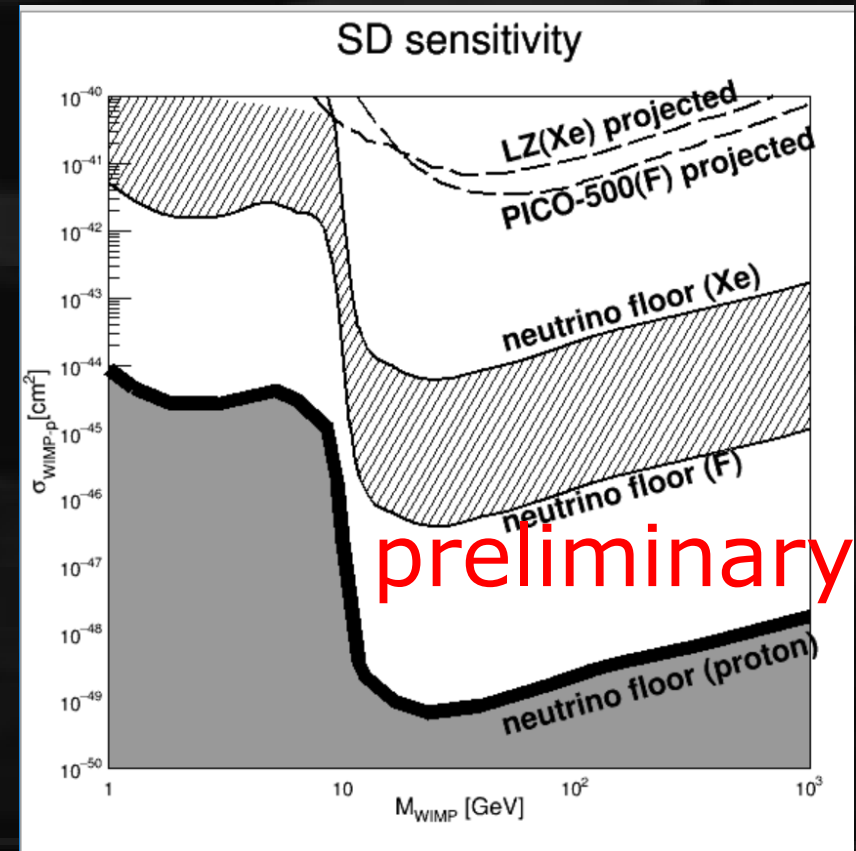
# ■ Xe, F, proton

- 物理学会での議論：「陽子はかなわないわけね。」
- おっしゃる通りです。計算してみました。
- つまらん大人になってしまったので、液体水素検出器とは言いません。

PHYSICAL REVIEW D 89, 023524 (2014)

$$\frac{d\sigma(E_\nu, E_r)}{dE_r} = \frac{G_f^2}{4\pi} Q_w^2 m_N \left(1 - \frac{m_N E_r}{2E_\nu^2}\right) F^2(E_r), \quad (3)$$

where  $m_N$  is the target nucleus mass,  $G_f$  is the Fermi coupling constant,  $Q_w = N - (1 - 4\sin^2\theta_w)Z$  is the weak nuclear hypercharge with  $N$  the number of neutrons,  $Z$  the number of protons, and  $\theta_w$  the weak mixing angle. From kinematics, one can easily derive that the maximum recoil energy  $E_r^{\max}$  is equal to



近い将来:PICOが「発見」する可能性

- **PICO** : エネルギー情報なし  
取りうる戦略のキーワード

**F** エネルギー情報 大質量

- シンチレータ、ボロメータ、高圧ガスなど  
(目的のためには手段は問わず)



Fluorine Complex  
for Underground Physics

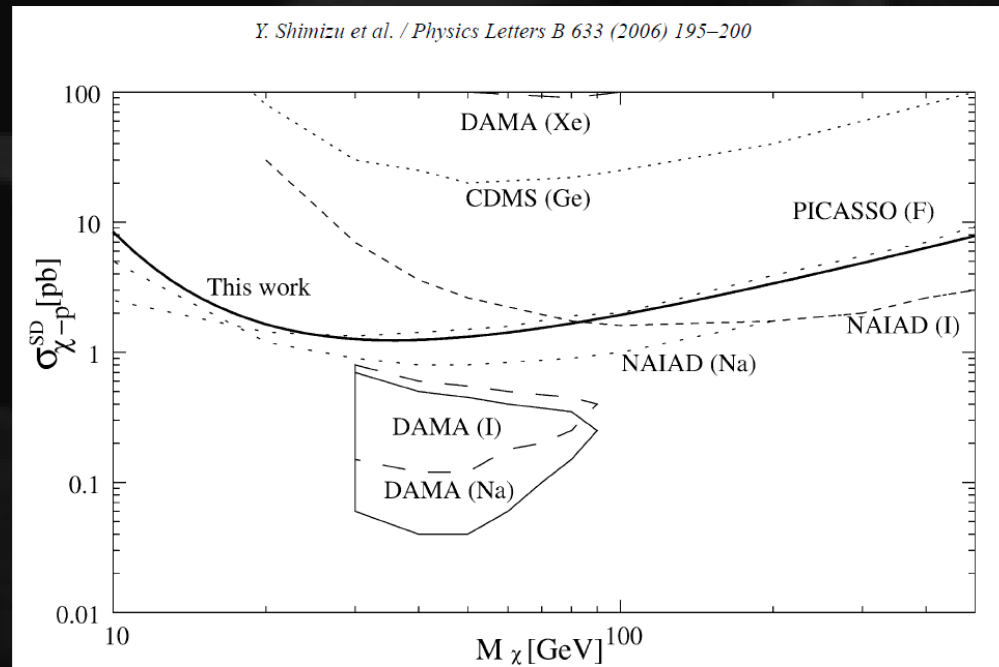
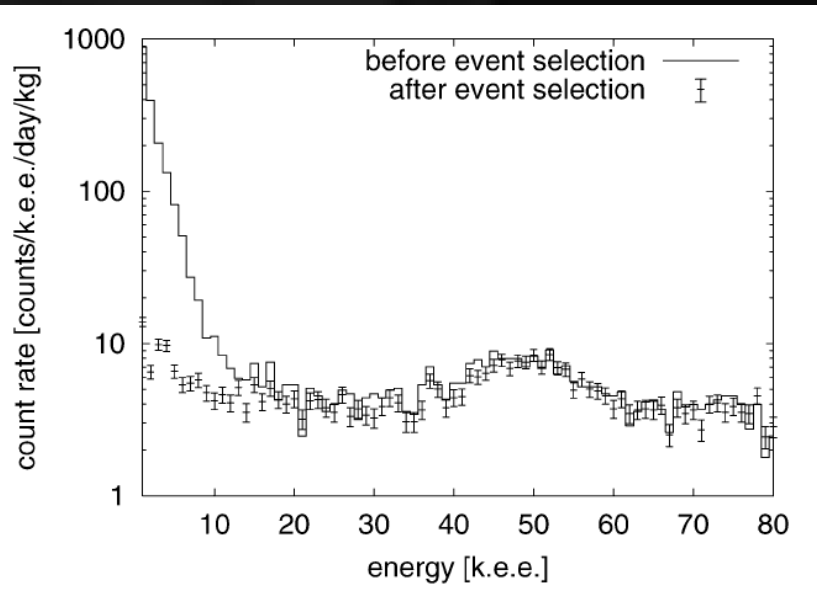
# 手段の可能性

# ■ シンチレータ

■ 2006年 みのわ研 (阪大結晶+XMASS PMT)  
CaF2

■ 閾値  $18\text{keVnr} = (2\text{keVee} / 0.11)$  ← ちと高い

*Y. Shimizu et al. / Physics Letters B 633 (2006) 195–200*



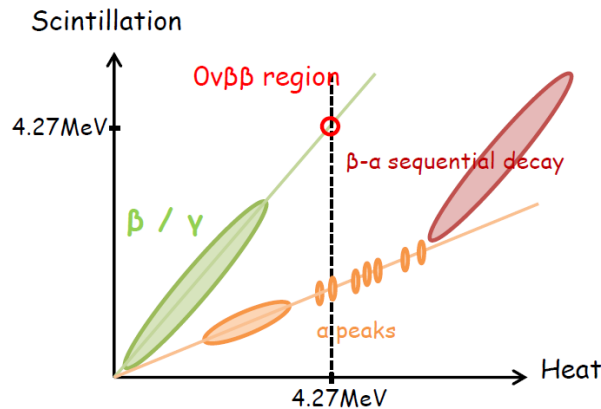
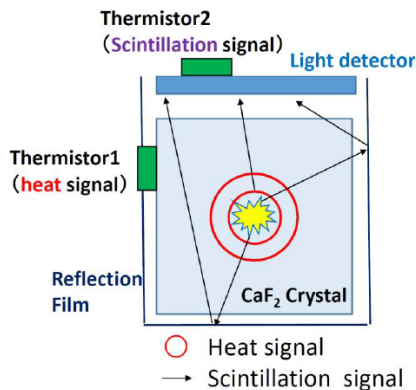
# シンチレーティングボロメータ

## CANDLES CaF<sub>2</sub>



### Scintillating Bolometer

- The technique (scintillating bolometer) was already established,
  - CRESST-II (CaWO<sub>4</sub>), Lucifer, AMoRE
  - CaF<sub>2</sub>(Eu) scintillating bolometer was also demonstrated by Milano group.  
Ref: NIMA386 (1997) 453, small size (~ 0.3 g) of CaF<sub>2</sub>(Eu)



- Simultaneous measurement both heat and scintillation enables to identify the particle types ( $\alpha/\beta$  particle ID)
- It is possible to reject alpha decay events of <sup>238</sup>U
  - Q-value; 4.27MeV = Q-value of <sup>48</sup>Ca 0 $\nu\beta\beta$   
→ Chance to achieve "BG free measurement"

Sei Yoshida  
Department of Physics, Osaka Univ.

## ■ 高圧ガス：DarkAXEL参照

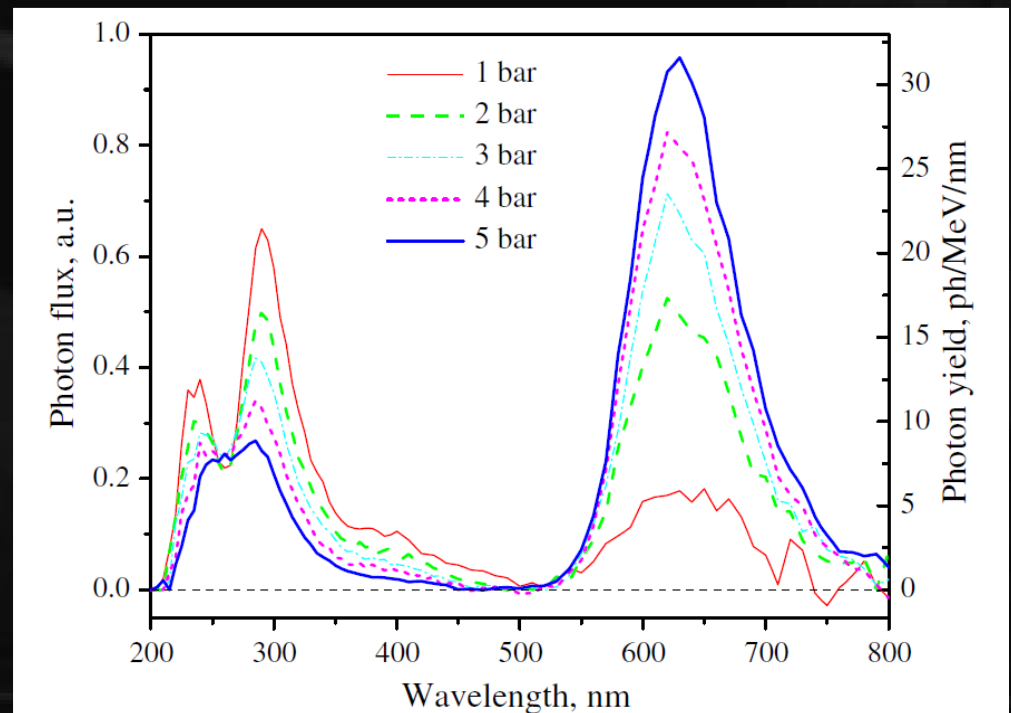
- CF<sub>4</sub>、SF<sub>6</sub>（NEWAGEガス）

- 一旦高圧ガスでやって 低圧・大型化

- ダークアクセル参照 せいぜい10気圧か

- CF<sub>4</sub>：圧力を上げると光量が上がるという先行研究あり。

NIM B 268(2010)1456



## ■ 液体シンチレータ

- CF<sub>4</sub>? 知る限り液体での発光測定はなし。
- 1kg/万円 程度

	CF <sub>4</sub>	キセノン
発光量 (気体)	キセノンの20%程度	42000 光子/MeV
発光量 (液体)	???	42000 光子/MeV
電離W値	34eV	22eV
沸点/融点 (液体窒素沸点 : 77K)	145K/90K	165K/161K

- 現状では単なる妄言ですが。。。
- Cが入っているので2層式は必須。



## ■ まとめ

- 液体キセノン：競争熾烈
- SD：SDD (F) で「発見」される可能性

F・エネルギー・大質量

- 提案：Fluorine Complex  
for Underground Physics

