

Jun 8, 2021

- 高エネルギー将来計画委員会：第11回 勉強会

どこまで探すのか、どこまで探せばいいのか、
陽子崩壊、 $0\nu\beta\beta$ 、暗黒物質

暗黒物質 (主にWIMP直接探索)

身内賢太郎
(神戸大学)

これまで
どこまで
わくわく

謝りの辞

・30分なので「ダークマター懇談会」もカバーしきれっていません。

ダークマターの懇談会

13:00	10'	Opening	身内	slide
座長：岸本				
13:10		WIMP探索現状 (レビュー)	山下	slide
		日本のこれまで (古代史)	伏見/関谷	slide(伏見) , slide(関谷)
		日本のこれまで (近・現代史)	森山	slide
		CaI2	飯田	slide
		light DM	細川	slide
15:00くらい		休憩		
		PICO-LON	伏見	slide
		ANKOK	香田	slide
		議論：これが私の生きる道?		
座長：関谷				
		XMASS	森山	slide
		議論：どうする、どうなるXMASS		
18:00		懇親会 酒山 梅田店		
		--->		
2017年1月28日 9:00-15:00(+/-2h)				
Session2:WIMP direction sensitive				
座長：森山				
9:00		WIMP direction sensitive (レビュー)	身内	slide
		NEWSdm	中	slide
		ZnWO4	関谷	slide
		NEWAGE/CYGNUS	身内	slide
		議論：「おともたち」のその先は?		
Session3:non-WIMP				
座長：身内				
11:00		non-WIMP DM (レビュー)	岸本	slide
		すずみかたによるが、		
		休憩		
		WISP	藍波	slide
		CARRACK	小川/詩安	slide
		SOI-AXION	小貫	slide
		dark photon	田島	slide
		議論：食べれるものは何でも食す?		

ダークマターの懇談会2019

13:30	13:40	30'	機密情報提供	白井 祥 (IPMU)	slide
13:40	14:10	30'	機密情報提供	池田 伸一 (東大)	slide
14:10	14:40	30'	面白くて大事な機密情報提供	松本 豊貴 (IPMU)	slide
14:40	15:10	30'	AXION-DM理論	関谷 伸一 (東北大)	slide
15:10	15:40	30'	質疑/議論 (お題：魅力的なDM)	白井, 池田, 松本, 高橋 + 観衆	
15:40	16:10	30'	コーヒーブレーク (ホスターセッション@同会場)		
DM探索実験					
座長：香田					
16:10	16:30	40'	DM探索 by LHC	宇田 秀行 (東工大)	slide
16:30	17:20	30'	機密情報 by 液体希ガス	山下 雅樹 (ICRR)	slide
17:20	17:40	20'	機密情報 by 固体シンチレータ	伏見 賢一 (徳島大)	slide
17:40	18:00	20'	機密情報 by 方向依存検出器	中島 大 (東北大)	slide
18:00	18:30	30'	SMILE2+とSubGeV WIMPレビュー	谷口 謙 (京都大)	slide
WIMP理論					
座長：岸本					
18:30	19:00	30'	WIMP探索：世界のロードマップ	高山 茂実 (ICRR)	slide
			一般家議論の抽出し、2日間の夕方に聞く		
			懇親会@酒山馬場・+高野、19時半開始、懇話会。 (お題：来春3月、スタッフ4千円)		
Day2[2019/7/6(Sat.)]					
DM理論/宇宙観測					
座長：伏見					
09:00	09:40	40'	宇宙線介接観測と機密情報提供	池田 伸一 (東大)	slide
09:40	10:00	20'	Evaluation of the CALET Cosmic-Ray Electron Spectrum with regard to DM	Hoelger Motz (東大)	slide
10:00	10:40	40'	機密情報 by 宇宙線観測 & AXION実験	湯田 和久 (ISAS/JAXA)	slide
10:40	11:00	20'	コーヒーブレーク (ホスターセッション@同会場)		
Axion/DM理論					
座長：中					
11:00	11:30	30'	ダークマター候補: PBH, Axion, WIMPの観測点	関根 剛 (KEK)	slide
11:30	12:00	30'	AXION理論	池田 伸一 (東北大)	slide
12:00	12:30	30'	AXION理論	中田 次郎 (神戸大)	slide
12:30	13:30	60'	昼食休憩		
議論+Axion実験					
座長：関谷					
13:30	14:00	30'	質疑/議論 (お題：魅力的なAXION)	池, 池田, 香田, 小川 + 観衆	
14:00	14:30	30'	国内AXION実験/CARRACK	小川 俊 (神戸大)	slide
14:30	14:50	20'	大型加速器を使ったアクシオン探索	岸本 康宏 (東北大)	slide
14:50	15:10	20'	実験室でのアクシオン・パワフォト探査	関谷 伸一 (東北大)	slide
15:10	15:30	20'	レーザー干渉計によるAXION機密情報提供	関根 剛 (東大)	slide
15:30	16:00	30'	量子干渉機密情報提供	池田 伸一 (東北大)	slide
16:00	16:20	20'	ADMX (+ CAST/AXIO+ABRACADABRA)	朝田 隆夫 (東大)	slide
16:20	16:40	20'	コーヒーブレーク (ホスターセッション@同会場)		
懇親会に向けた懇話会					
座長：高山/身内					
16:40	17:35	55'	日本のAxion探索の将来	中島	

ダークマターの懇談会2020 online

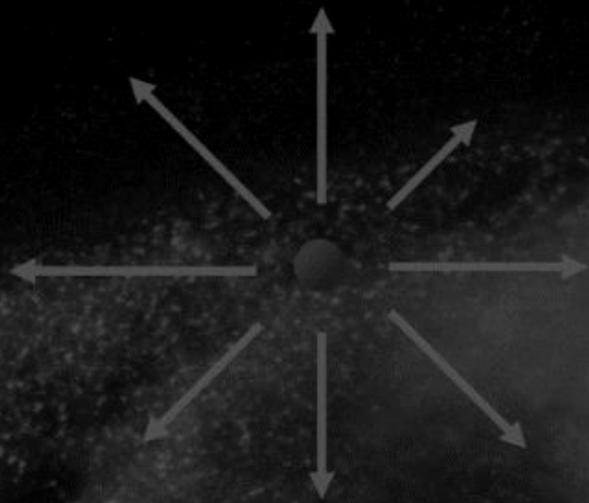
開始時刻	時間	名前 (所属)	講演題目	file
9:00	10分	山下雅樹 (名大ISEE)	Opening	
座長：森山茂実 (東大ICRR)				
9:10	40分	風間慎吾 (名大KMI)	XENON1T	slide
9:50	25分	広島 浩 (富山大)	XENON1T関連論文動向調査	slide
10:15	10分	休憩		
10:25	40分	高橋 史宜 (東北大)	アクシオンダークマターとXENON1T超過	slide
11:05	20分	千原 楓 (KEK)	Constraints on electron-scattering interpretation of XENON1T excess	slide
Session 2:関連実験 (公募)				
座長：岸本康宏 (東北大)				
11:25	20分	岩崎 愛一 (二松学舎大)	A New Method for Detecting Axion With Cylindrical Superconductor	slide
11:45	15分	梶野 文義 (甲南大)	DIMS実験：高速飛翔するマイクロサイズ暗黒物質と流量の探索	slide
12:00	60分	休憩		
Session 3:関連実験				
座長：伏見 賢一 (徳島大)				
13:00	25分	小川 洋 (日大)	XMASS	slide
13:25	20分	木村 真人 (早稲田大)	液体アルゴンによるNon-WIMP暗黒物質探索に関する考察	slide
13:45	15分	休憩		
14:00	30分	小林 雅俊 (コロロンビア大)	XENONnT	slide
14:30	40分	柿内 秀樹 (環境科学技術研究所)	環境トリチウムの振る舞い、定量評価、除去方法	slides
15:10	10分	休憩		
Session 4:関連実験				
座長：関谷 洋之 (ICRR)				
15:20	20分	伏見 賢一 (徳島大)	超高純度固体シンチレータによる宇宙暗黒物質探索	slide
15:40	20分	藤井 俊博 (京都大)	57FeとSOI検出器を使った太陽アクシオン探査	slide
16:00	20分	安達 俊介 (京都大)	ミリ波帯域でのダークフォトン探索 - DOSUE-RR実験	slide
16:20	10分	休憩		
Session 5:議論				
座長：身内 賢太郎 (神戸大)、山下雅樹 (名大ISEE)、香田 浩平 (早稲田大)				
16:30	0分	写真撮影		
16:30	10分	鶴 剛 (京都大)	X線天文衛星を用いたアクシオン探索の現状	slide
16:40	60分	議論 (追加質問、実験に期待することなど)		slide

謝辞

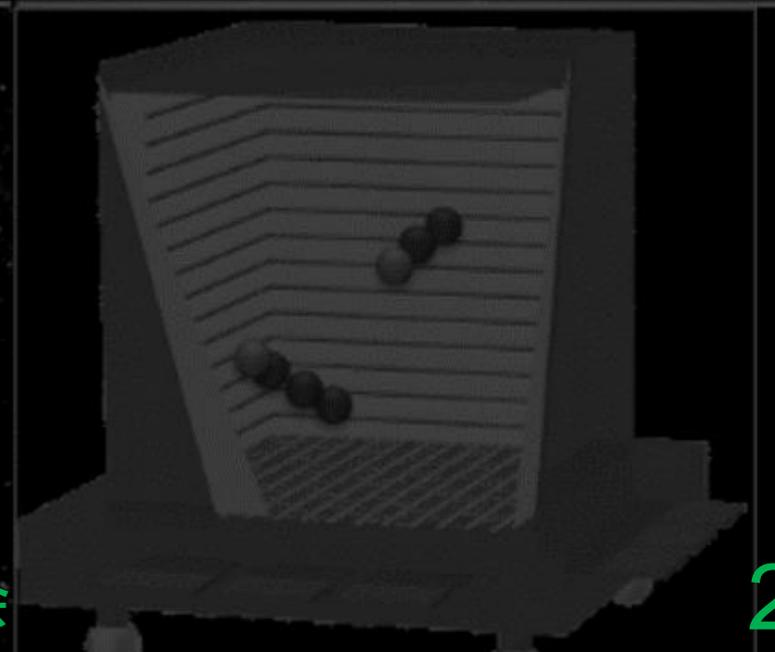
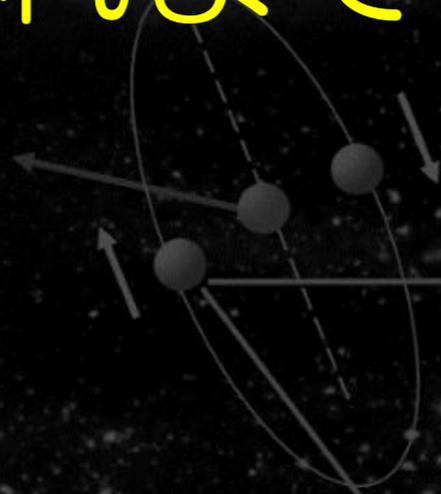
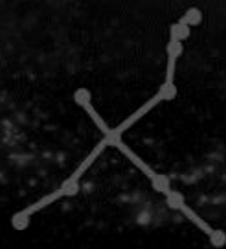
・懇談会世話人の皆様には議論いただきました。

世話人

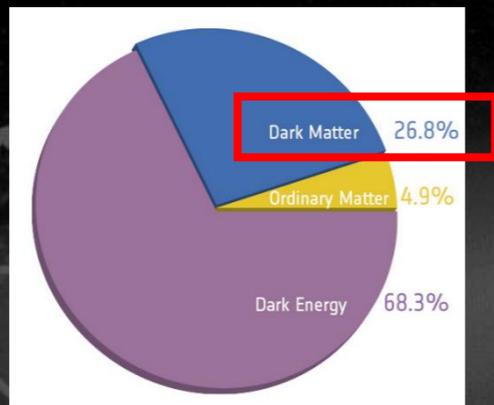
世話人：岸本 山下 関谷 森山 (以上ICRR) 中 (名古屋大) 香田 (早稲田大) 伏見 (徳島大) 身内 (神戸大)



これまで



DM



多くのDM候補

一粒でn度おいしいものが理論的「正見」を受けてきた

- AXION (CP problem in QCD)
- Primordial black hole (BHs are there)
- WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)

WIMPs

- Produced in the early universe
- Annihilate
rate \propto cross section \times velocity
- Freeze out at some point
abundance is fixed
- $\sigma \sim$ weak scale explains present abundance
 \Rightarrow WIMP miracle!

提案のポイント：ダークマターは**存在**するが、**未知の物質**

今までの探索は**ごくわずかな質量範囲**に集中

ニュートリノ 電子陽子 細菌 蚊 人間 富士山 地球 太陽

ダークマターの質量 [GeV/c²]

10⁻⁴⁰ 10⁻³⁰ 10⁻²⁰ 10⁻¹⁰ 10⁰ 10¹⁰ 10²⁰ 10³⁰ 10⁴⁰ 10⁵⁰ 10⁶⁰ 10⁷⁰

銀河に収まらないので排除 古典場 (波) 軽い粒子 素粒子 重い粒子 複合物質・巨視的天体 宇宙初期の物質の降着で排除

本領域 X線 CMB ニュートリノ実験 X線 CMB

レーザー干渉計 e⁺e⁻ 宇宙線 重力レンズ ずばるイメージング・分光観測 ずばる分光観測

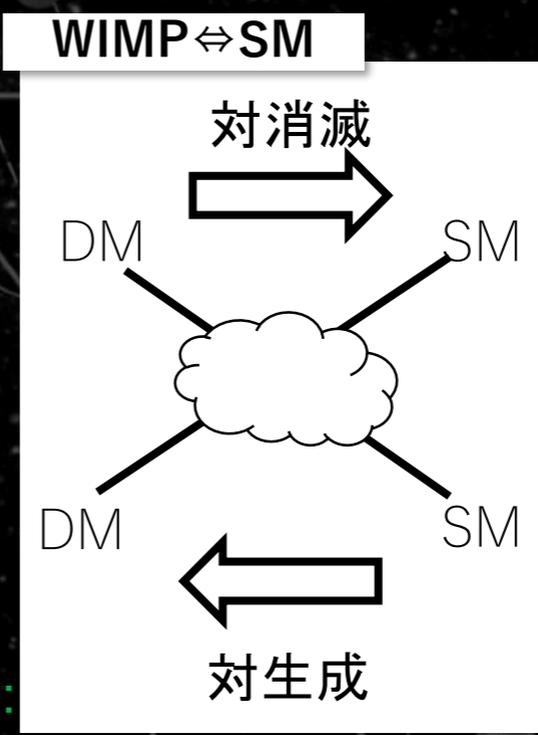
今まで**理論的な偏見**に囚われて見てこなかった

ディスカバリ 日本発で世界の既存分野の既存設備を本来の目的とは異

ダークマターの正体は何か？
広大なディスカバリースペースの網羅的研究
領域代表：村山斉 (東大 Kavli IPMU, Berkeley)

東京大学 THE UNIVERSITY OF TOKYO KAVLI IPMU

提案のポイント：ダークマターは**存在**するが、**未知の物質**

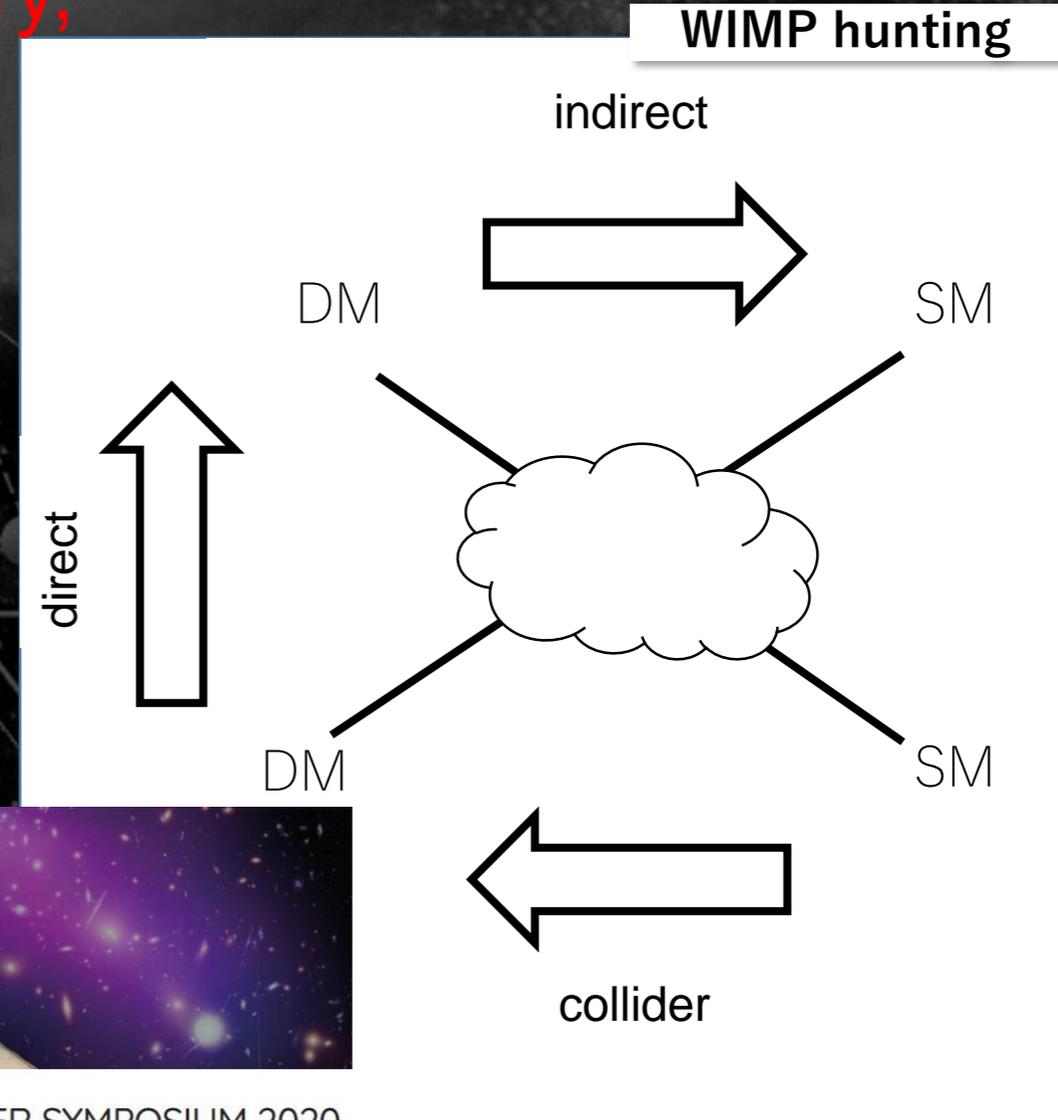


• WIMP hunting

• WIMP-SM (standard model particle, i.e. quarks) particle interaction

- Direct search
- Indirect search
- Collider

complementary,
synergy



Dark Matter searches in the 2020s At the crossroads of the WIMP

Symposium on next-generation collider, direct, and indirect Dark Matter searches

11-13 November 2019
The University of Tokyo, Kashiwa Campus
Asia/Tokyo timezone

Overview

- Registration
- Important Dates
- Invited speaker List
- Timetable
- Poster presentations
- Participant List
- How to get to Kashiwa
- Lunch Information
- Banquet Information
- Visa application
- Accommodation
- Wifi/Internet connection

Contact

✉ darkmatter2019.tokyo...

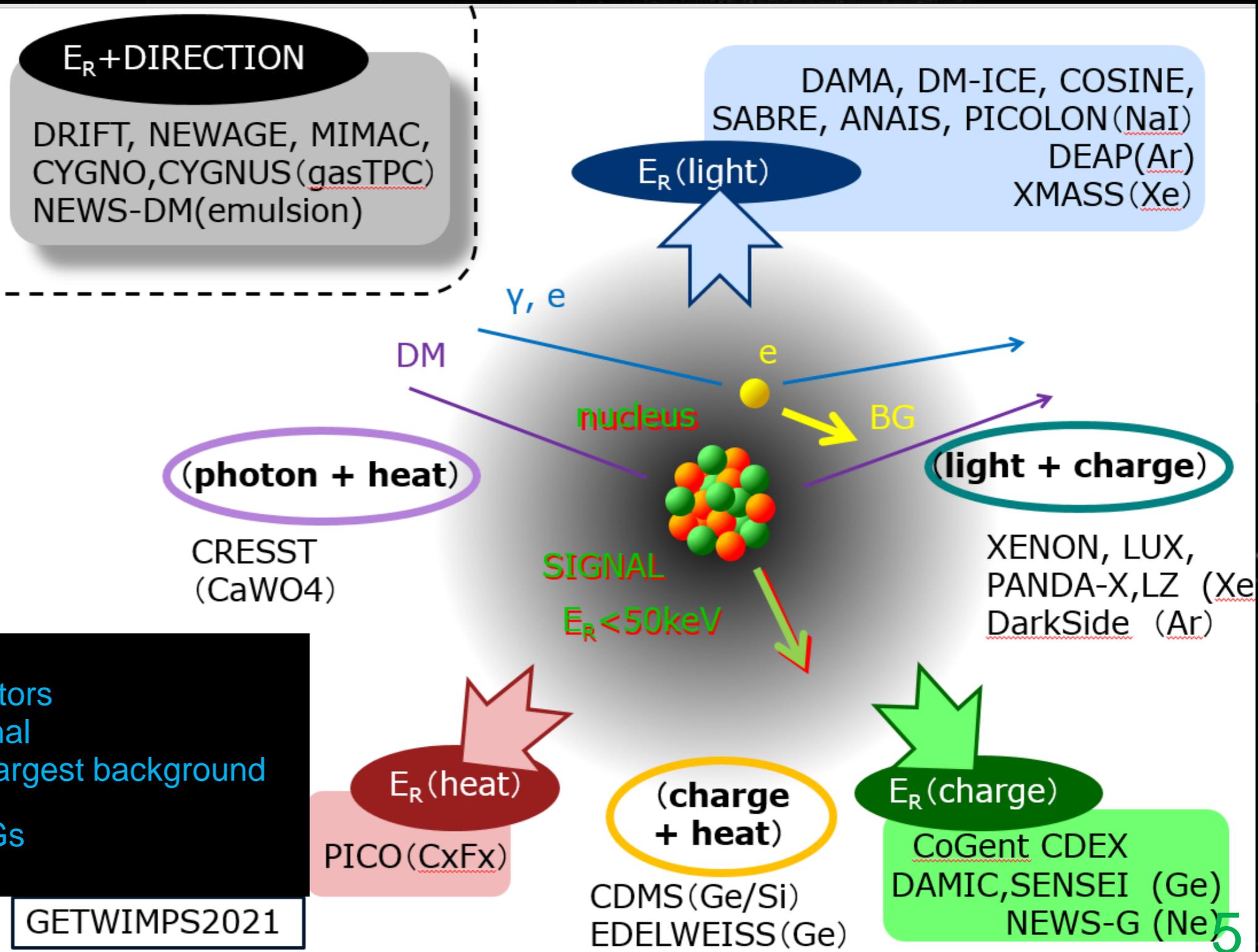
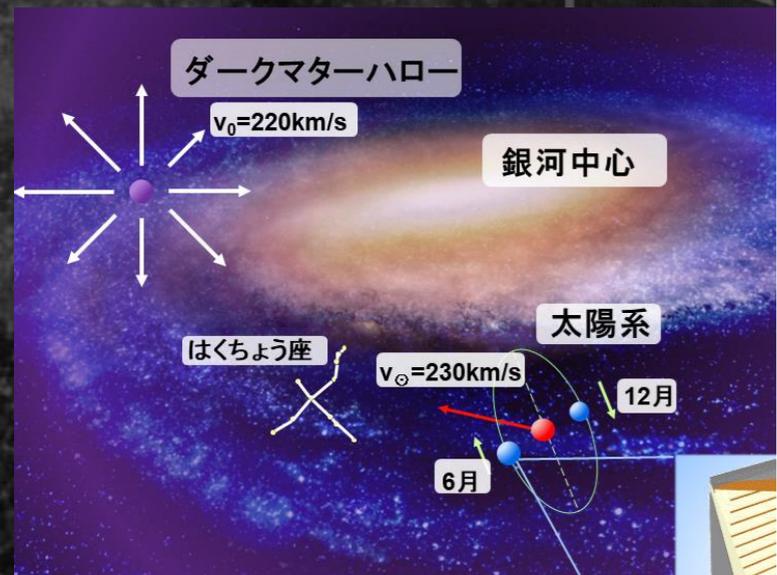


KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2020

16-19 November 2020
virtual

直接探索

詳細:
 日本物理学会誌 第75巻
 (2020年) 第2号 68-76頁
 「宇宙のダークマター直接探索の現状」など。



- Technologies
 - Ordinary radiation detectors
 - Nuclear recoil (NR): signal
 - Electron recoil (ER): largest background
 - more than two info
 ⇒ reject electron BGs

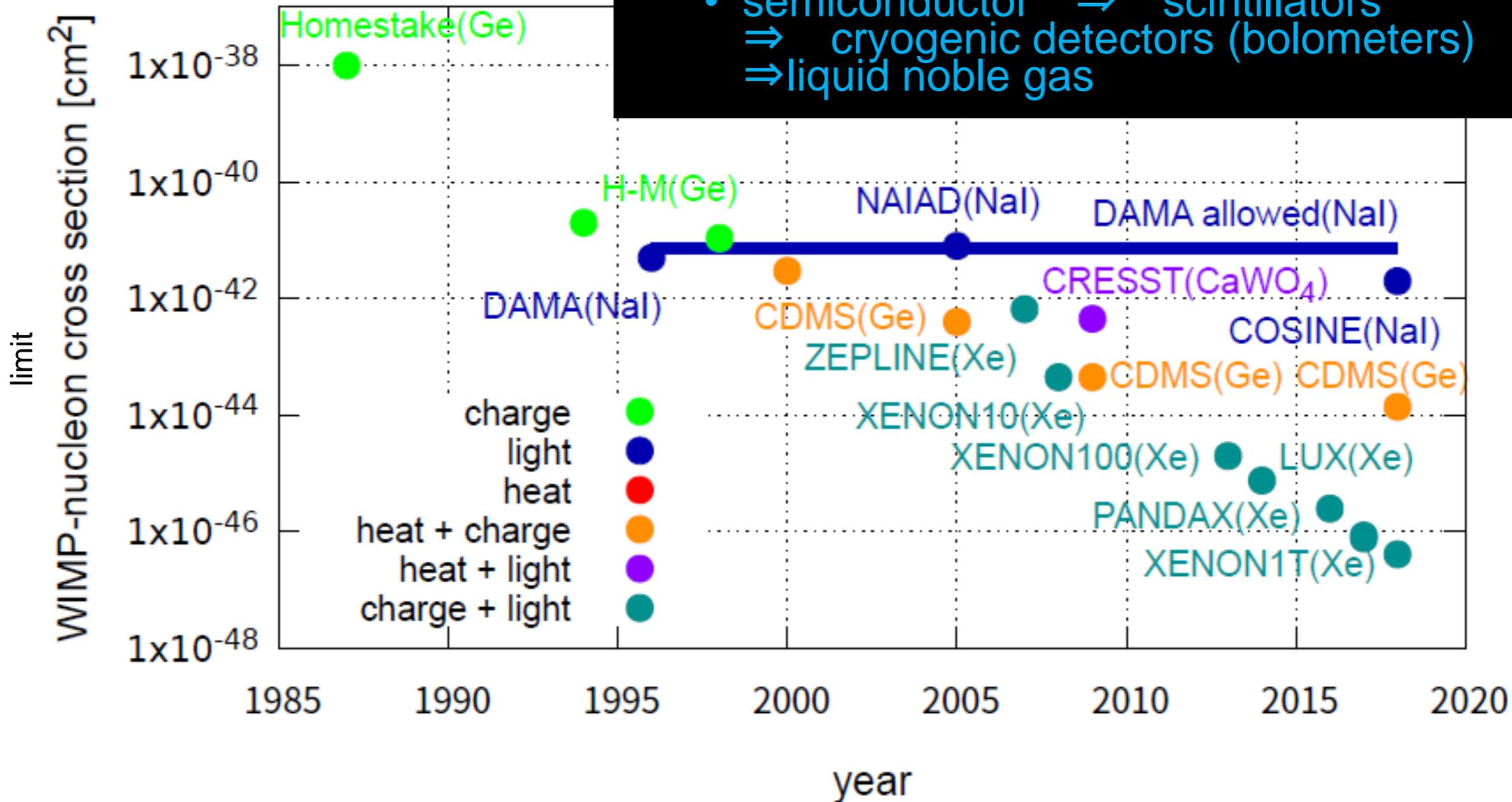
GETWIMPS2021

シキシ

Direct search history

• leading technologies

- semiconductor \Rightarrow scintillators
- \Rightarrow cryogenic detectors (bolometers)
- \Rightarrow liquid noble gas

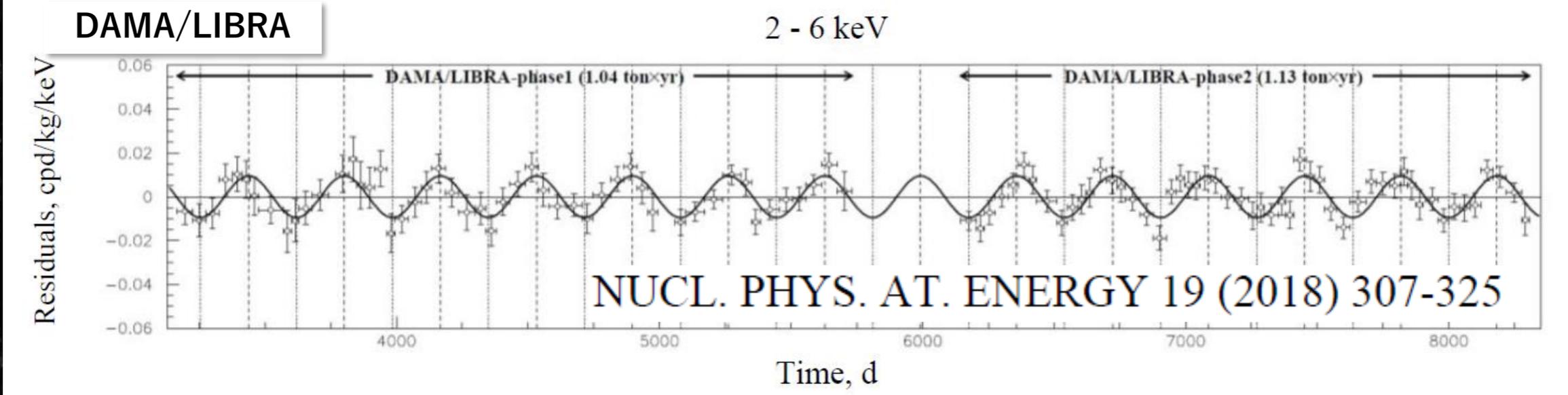
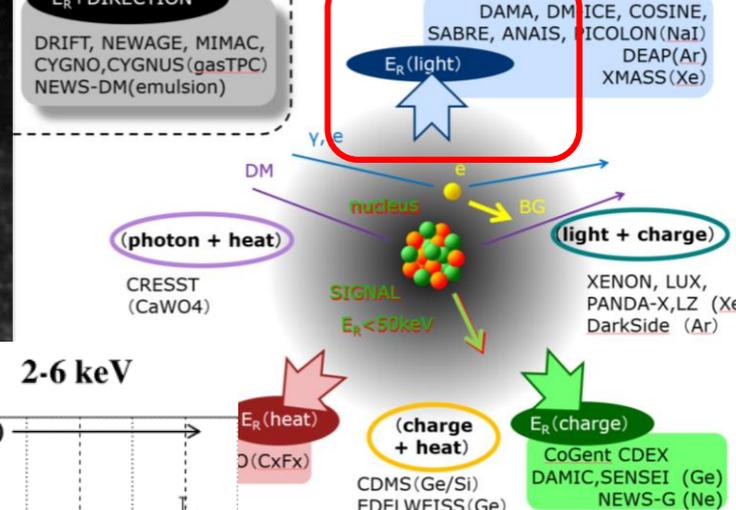
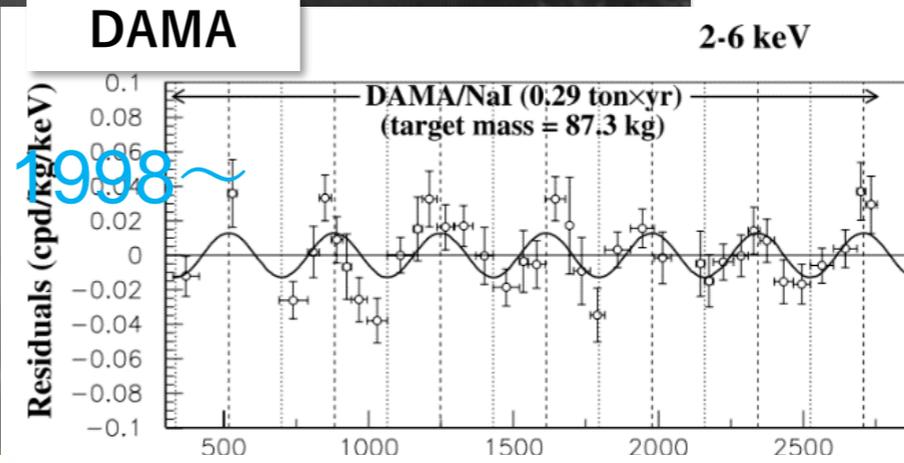


季節変動 (DAMAやその他のNaI)

• DAMA (NaI)

- 250kg NaI scintillators
- BG level ~ 1 cpd/keV/kg
- Annual modulation were reported :
- Latest 2.46 ton year 12.9σ
- 何か見えている

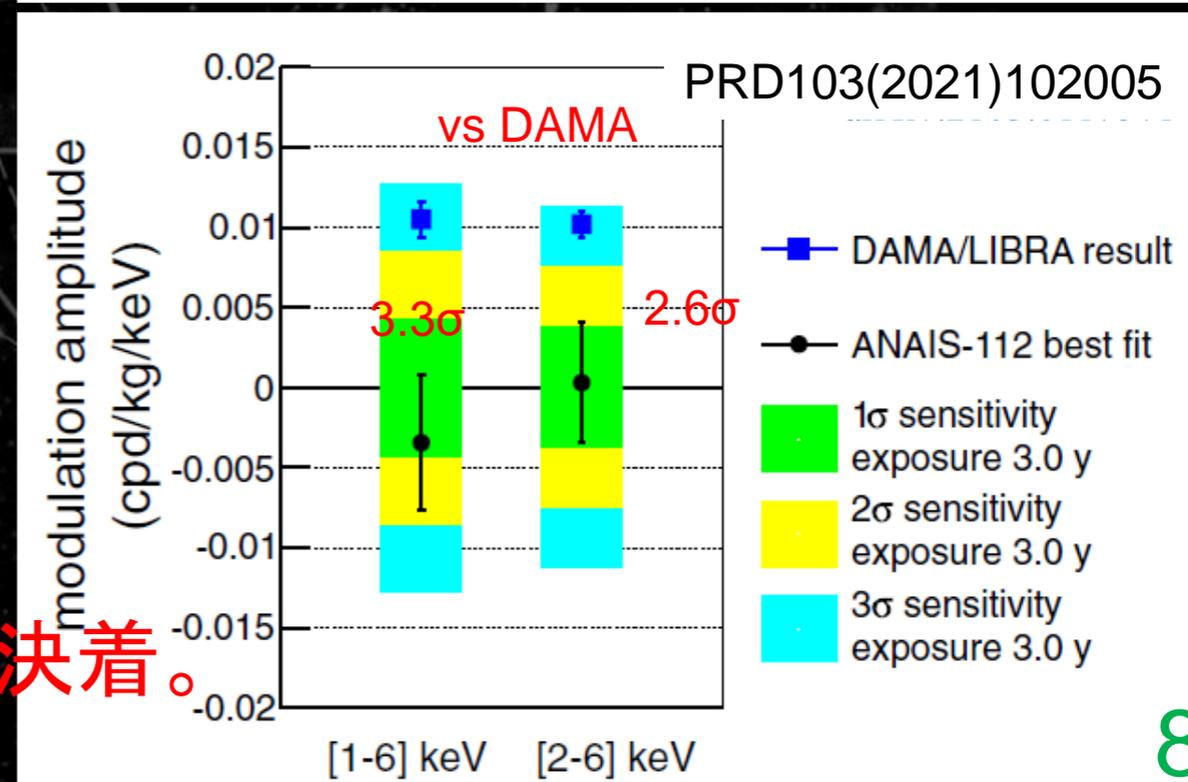
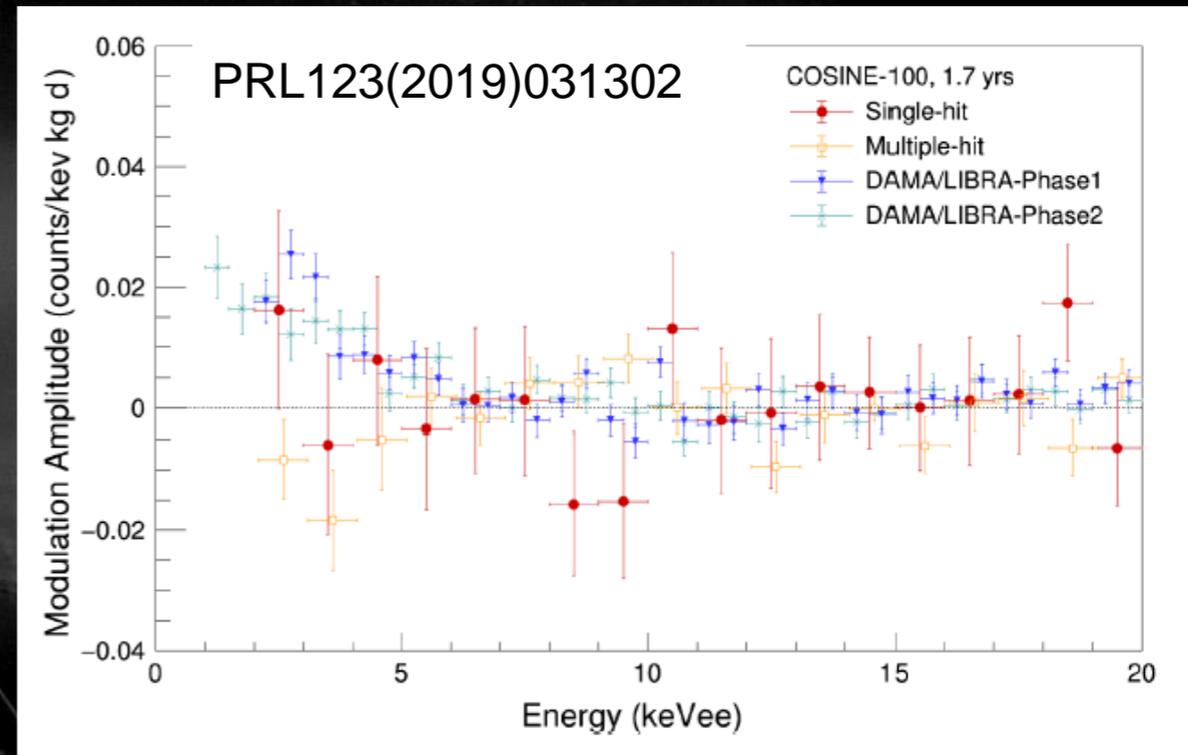
Eur. Phys. J. C (2008) 56: 333–355
DOI 10.1140/epjc/s10052-008-0662-y



BGによる説明はできていない

Other NaI detectors

- COSINE (106kg)
 - Annual modulation measurement
 - BG level 2~3 cpd/keV/kg
 - Consistent with null and DAMA, yet.
- ANAIS (112kg)
 - Annual modulation measurement
 - 2~3 cpd/keV/kg
 - (NEW) incompatible with DAMA
- SABRE
 - 両半球で準備中
- PICOLON (徳島大)
 - Pure crystal (DAMAと同レベル)を開発
 - 地下での試験測定をまもなく開始

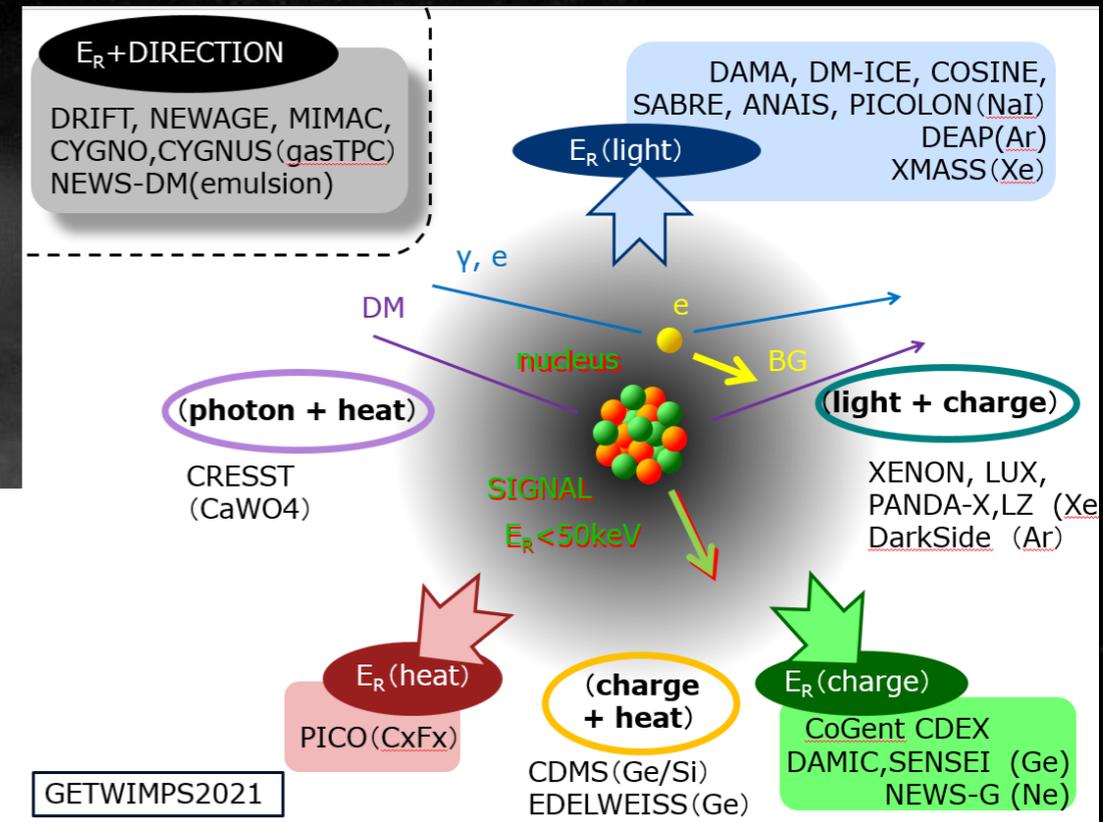
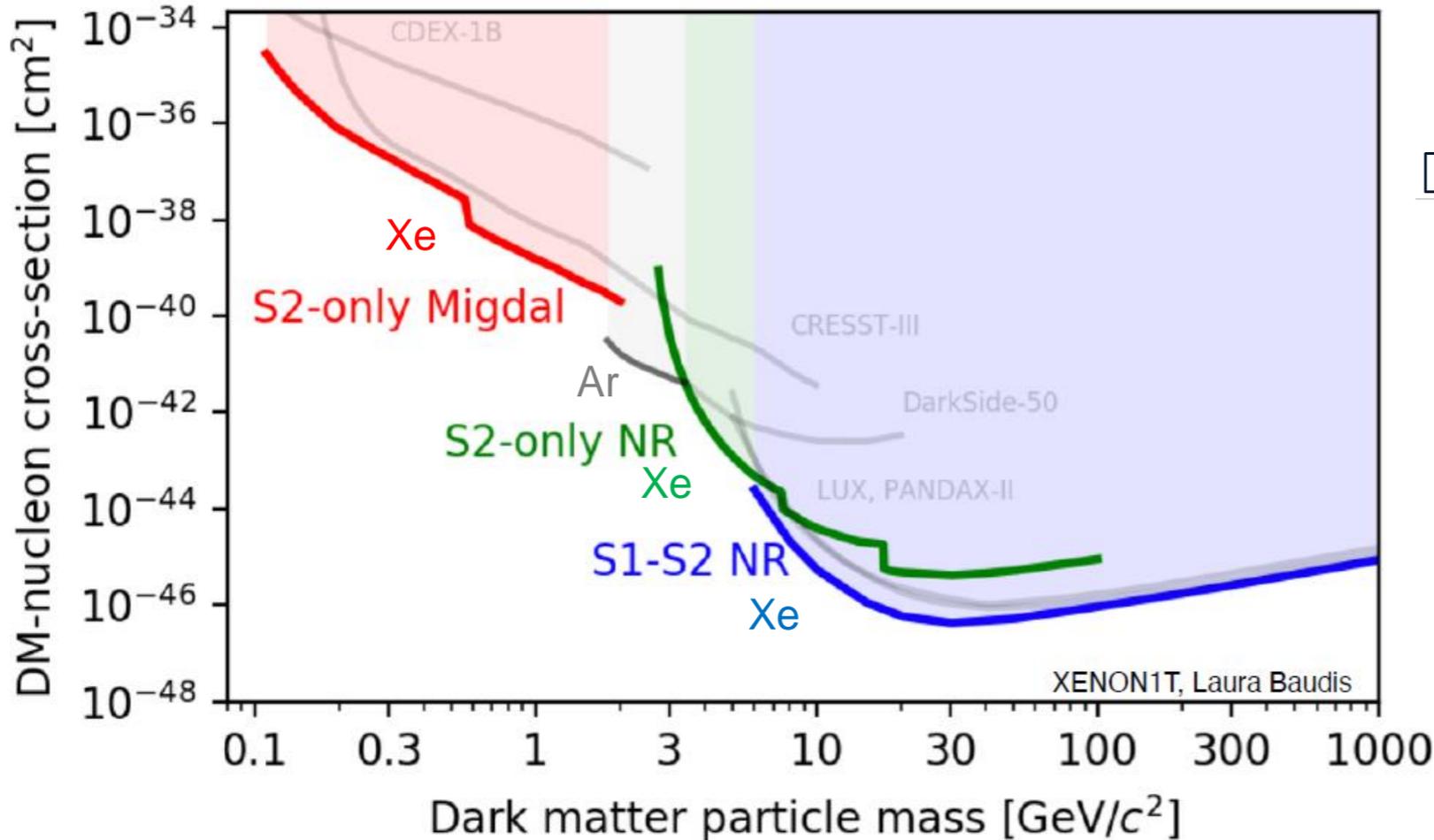


3 σ レベルでANAISが殺し始めているが、未決着。

低BG フロントティア

- 液化希ガスの「独り勝ち」
電子事象の排除 純化技術

Dark matter nucleus scattering



• 日本

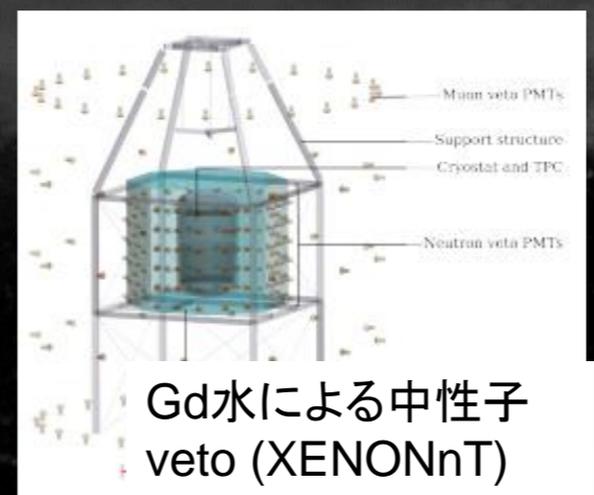
- ~2019 XMASS観測
- 2017年~ XENON (東大・名古屋大・神戸大)
- 早稲田液体Ar 技術

近い将来 (~5年)

XENONnT LZ PANDA-X

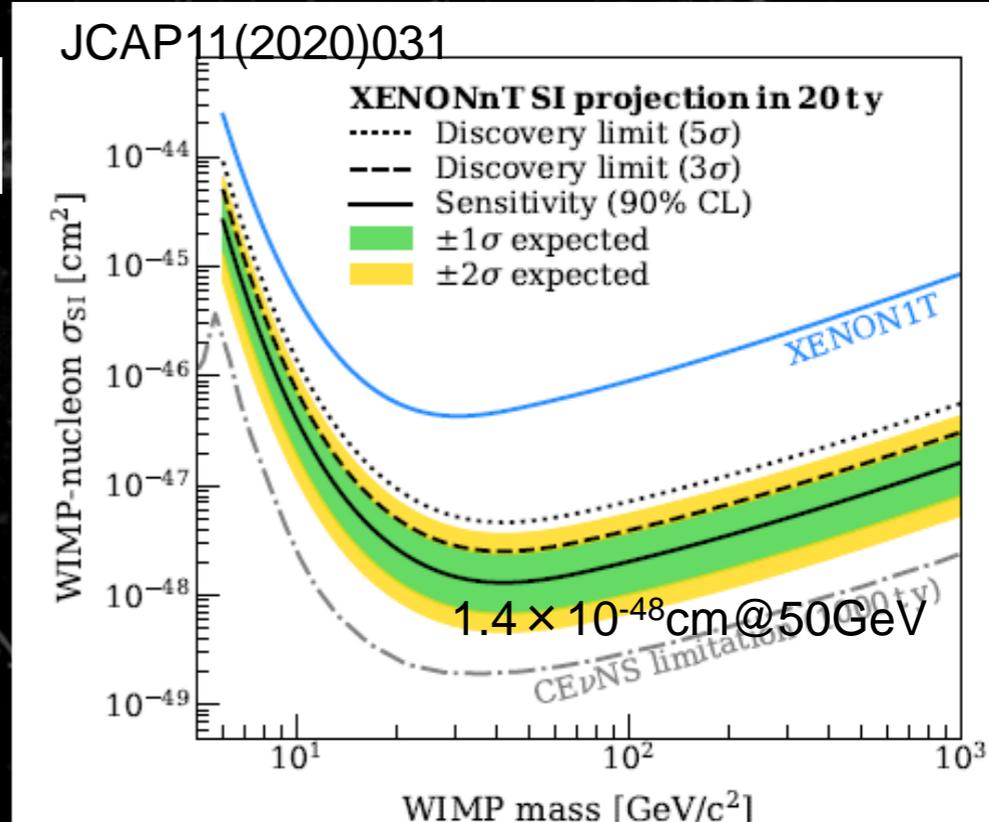
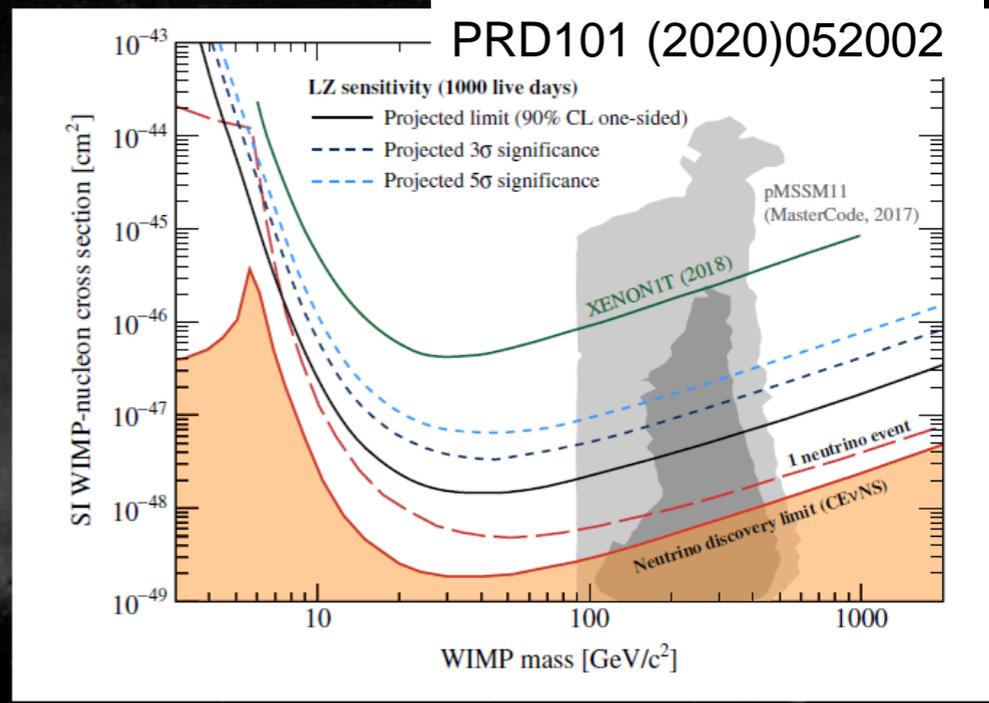
中性子BG

- 検出器中の放射性不純物 (U,Th系列の α 崩壊)
- (α, n) 反応
- NR事象
- 対策: 中性子VETO



ラドンBG

- 検出器中の放射性不純物 (U系列の α 崩壊)
- 希ガスのラドンがキセノン内に侵入
- ER事象が漏れ込み
- 対策: 気体+液体での純化によるラドン除去



ものすごくザックリしたイメージ

- exposure (トン・年) 増 同時にBG減らす

信号

DAMA: $\sim 10^{-42} \text{cm}^2$
 $\sim O(0.01) \text{ events/kg日}$

BG

XENON1T
 ^{222}Rn 4.5 $\mu\text{Bq/kg}$
 中性子 veto なし

綺麗な材料・結晶を使用

ER事象除去

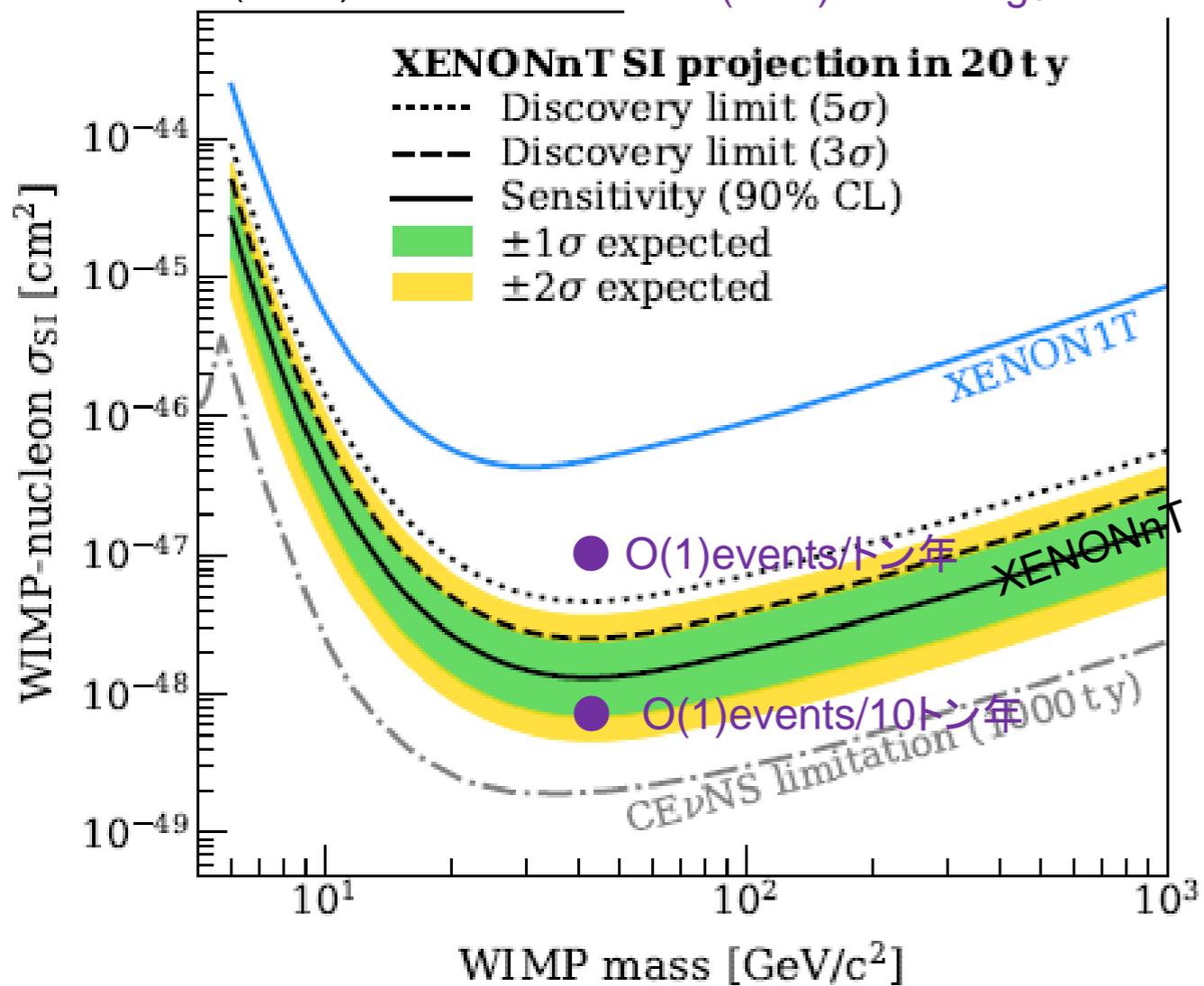
^{222}Rn 対策

中性子 VETO

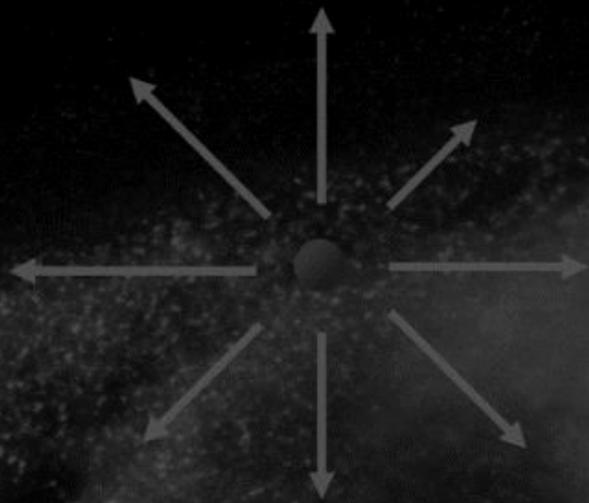
XENONnTの目標

JCAP11(2020)031

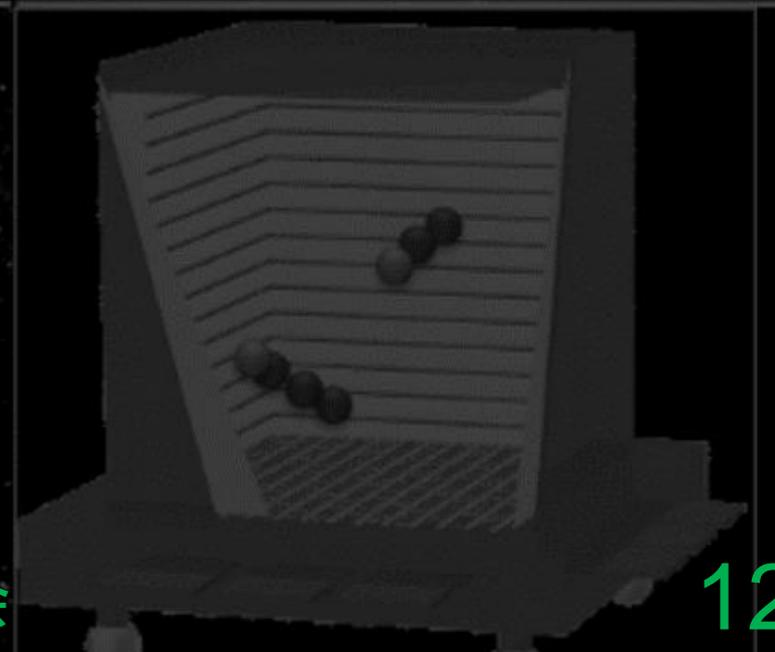
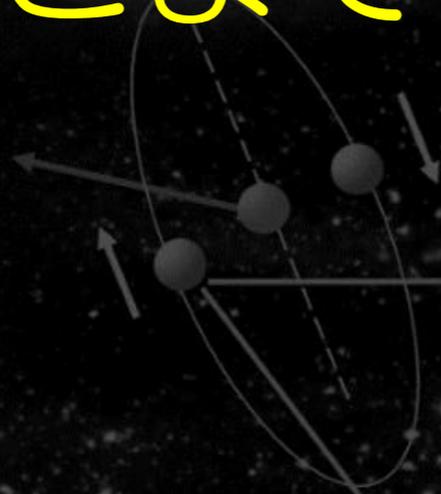
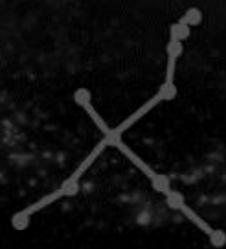
JCAP11(2020)031



		Expectation value (μ) in 20 ty	
		Observable ROI	Reference signal region
Background			
ER	^{222}Rn 1 $\mu\text{Bq/kg}$	2440	1.56
Neutrons	w/ 中性子 veto	0.29	0.15
CEνNS (Solar ν)		7.61	5.41
CEνNS (Atm+DSN)		0.82	0.36
WIMP signal			
6 GeV/c^2	($\sigma_{\text{DM}} = 3 \times 10^{-44} \text{cm}^2$)	25	19
50 GeV/c^2	($\sigma_{\text{DM}} = 5 \times 10^{-47} \text{cm}^2$)	186	88
1 TeV/c^2	($\sigma_{\text{DM}} = 8 \times 10^{-46} \text{cm}^2$)	286	118

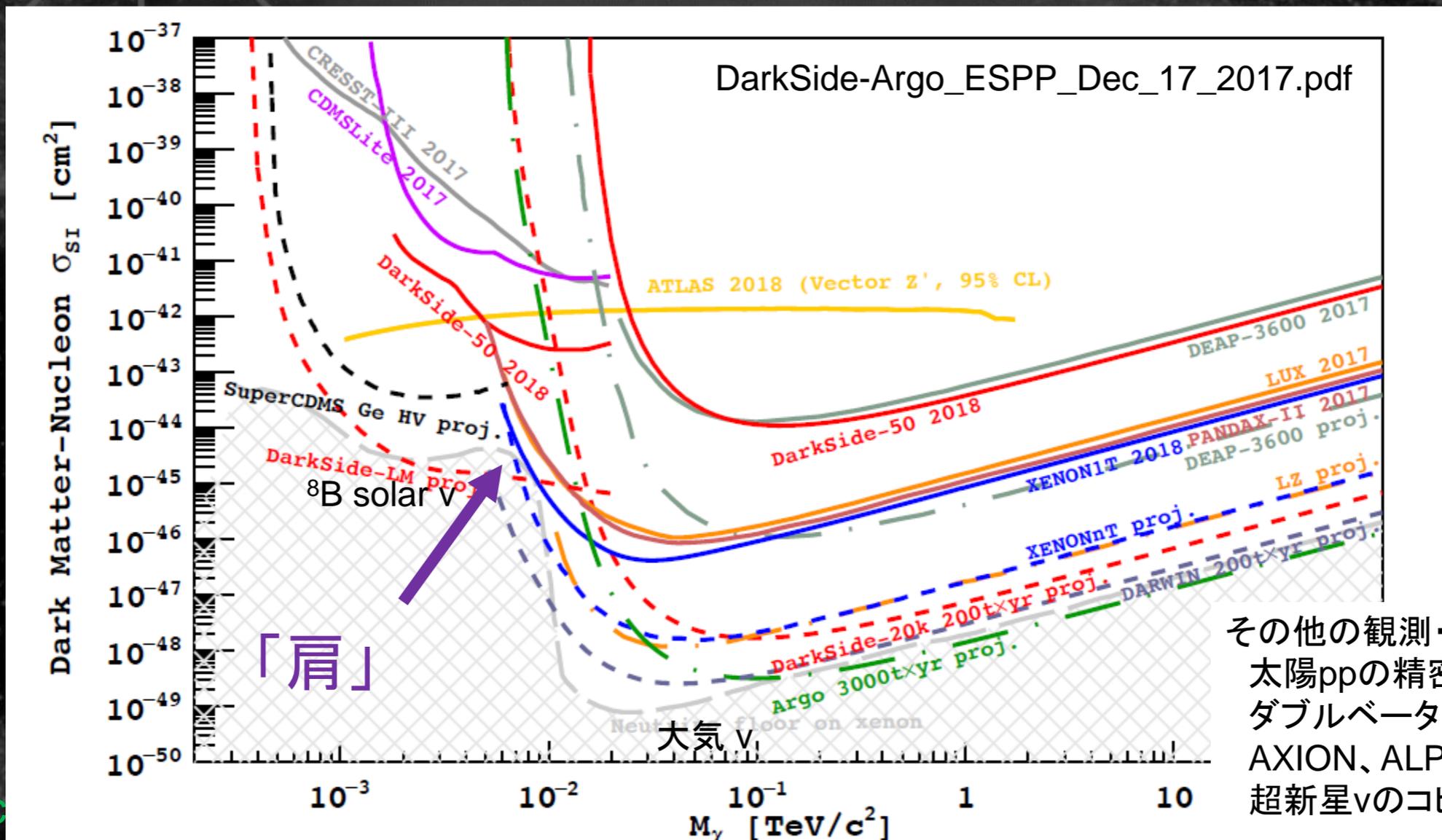


どこまで



ニュートリノフロア (fog)

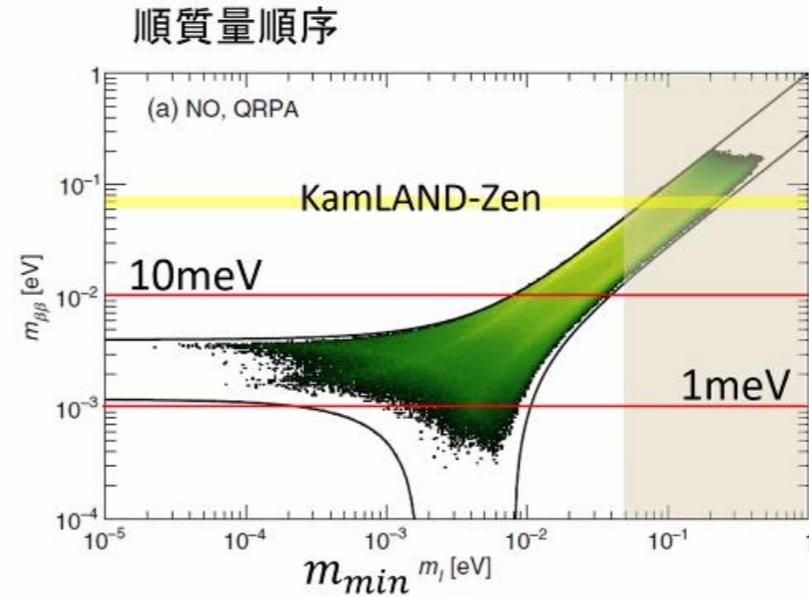
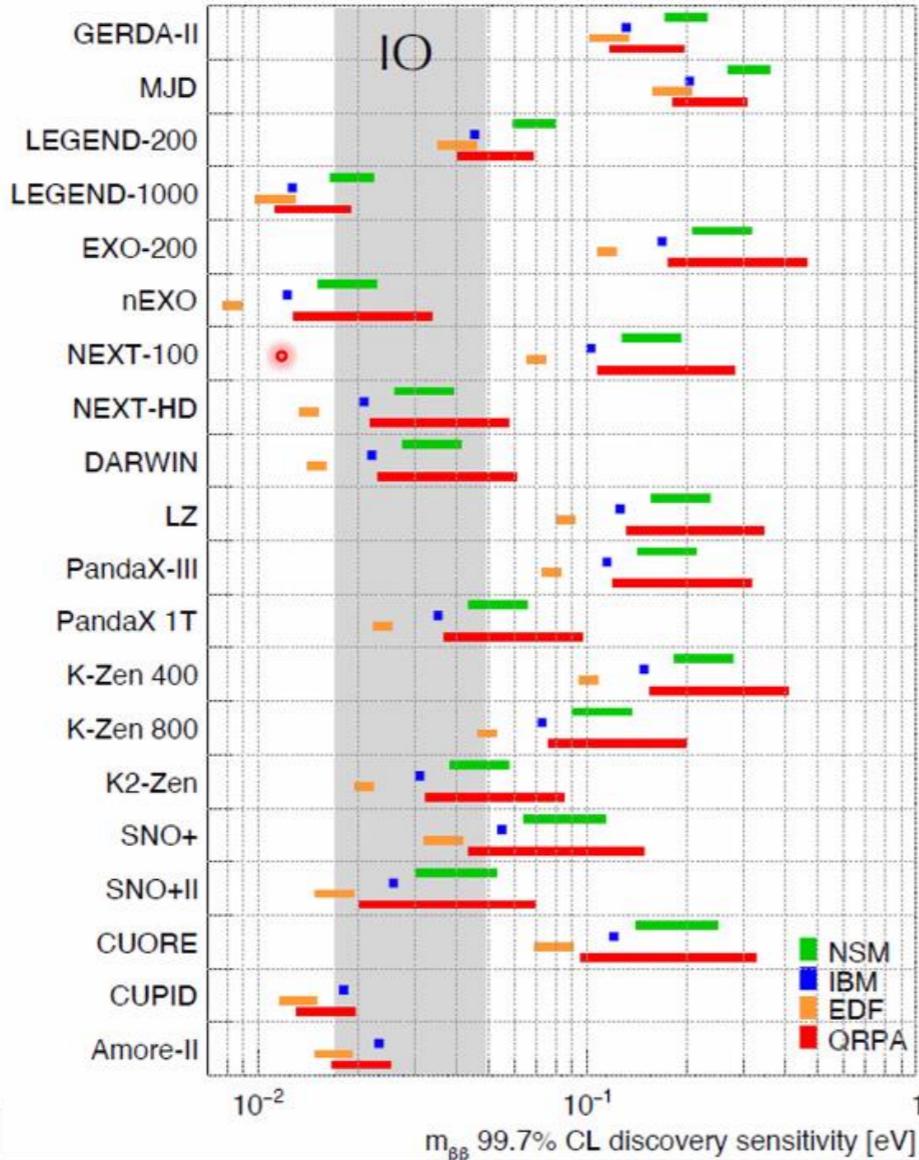
- CEvNS coherent elastic ν nucleus scattering
 - XENONnT・L/Zで肩に触れ始める
 - BGであり、観測対象でもある
- DARWIN(Xe 40 ton), Argo (Ar 300 ton)



その他の観測・探索
 太陽ppの精密(~1%)測定
 ダブルベータ(^{136}Xe)
 AXION、ALPS
 超新星 ν のコヒーレント散乱、、、

preliminary

Discovery Sensitivity Comparison



今の所、人類が到達できそうなのは、10 meVくらいか？

J. Detwiler
Agostini, Benato, JD, Menendez, Vissani

- 参加
- 検索
- 顔アイコン
- 顔アイコン
- AI
- AI
- A
- AT
- AO
- AT
- AM
- AH
- AG
- C
- EP
- FB
- FY

Timeline

- **DARWIN** : 2022 CDR, 2027- data taking
 - XENON/DARWIN/LZ がMOU締結に向けた議論開始 (2021年5月)
- **ARGO** : DARKSIDE-20k(準備中) 10年程測定の後
 - DS-LM (DS-20kの前に1トン程度で8Bの肩あたりを狙う) の議論も

DARWIN Timeline

- Plan: construction while XENONnT is taking data.
- Xe procurement is very challenging due to the limited market and large funding required, maybe consider staged-approach a la PandaX



<https://www.appec.org/>

Towards the ultimate direct search
 Present technologies can be pushed until they hit the background produced by coherent scattering of solar and atmospheric neutrinos – albeit an interesting signal in itself. In Europe, to probe WIMP masses up to 10 GeV, the EURECA consortium aims to push cryogenic detectors as used by CRESST and EDELWEISS to the ton-scale.

Similarly, the DARWIN (50 tons of xenon) and Argo (200 tons of argon) consortia plan to construct the ultimate noble-liquid detectors to explore WIMP masses in the 10 GeV to 1 TeV range.

Going beyond the coherent neutrino-scattering wall will require direction-sensitive detectors. As long as convincing Dark Matter signals are found, such detectors will almost certainly be crucial to assessing the detailed nature as well as the astrophysical origin of Dark Matter. Anticipating this, detector R&D in this sphere has already begun.

US: SNOWMASS 2021 is ongoing
 日本: 学術会議マスタープラン

日本学術会議

HOME メニュー

意志表明書 (Letter of Intent)

将来計画・MP2023

IAU/天文学・宇宙物理学分科会

3	NEWAGE/GYGNUS	ガス飛跡検出器による暗黒物質の正体解明	中型B	身内賢太郎 (神戸大学)
4	カムランド2	極低放射能環境でのニュートリノ研究	大型	井上邦雄 (東北大学)
5	SMILE-3	Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments 3	中型B	高田淳史 (京都大学)
6	JASMINE	小型JASMINE (赤外線位置天文観測衛星)	大型	郷田直輝 (国立天文台)
7	DARWIN	50トン級液体キセノン宇宙暗黒物質直接探索計画	中型B	山下雅樹 (Kavli IPMU)

国内でのDARWIN

PI: 山下雅樹 (東大IPMU)

6. 実施時期

LOIより

- 2020 - 2024: R&D, Conceptual Design Report (CDR, 2022 年), Technical Design Report (TDR, 2024 年)
- 2024 - 2025: 建設
- 2025 - 2026: コミッショニング
- 2027 - 2032 観測 (200 ton-year の exposure が目標)

7. 必要経費および予算プロファイル

日本グループは光センサー開発及び調達、キセノン純化装置、中性子半同時検出器の貢献を担う。総予算 200 億円、日本分担 15 億円。

準備期

- 実機で使用するキセノンガス調達(3トン ~ 8.5 億円)
- 極低放射能光検出器調達(5 億円)
- 開発 (光センサー、密閉型液体キセノン検出器) (0.5 億円)

建設期

- キセノン純化装置、中性子反同時検出器 (0.4 億円)

運用期

- 運転費用、旅費、コモン・ファンド、PD 人件費、年額 1000 万円 (5 年、合計 0.5 億円)

山下雅樹
新学術「地下宇宙」研究会
2021年5月

R&D for Future

ハーマチック型TPCの開発 (名古屋、東大)

- Low Mass WIMP 探索
- RnやO2などの不純物を遮蔽



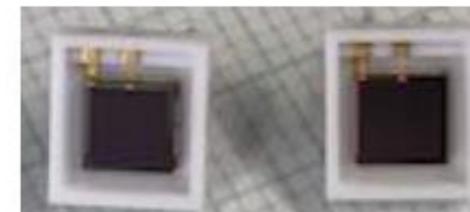
透明電極

ター

新しい光検出器の開発 (名古屋、東大)

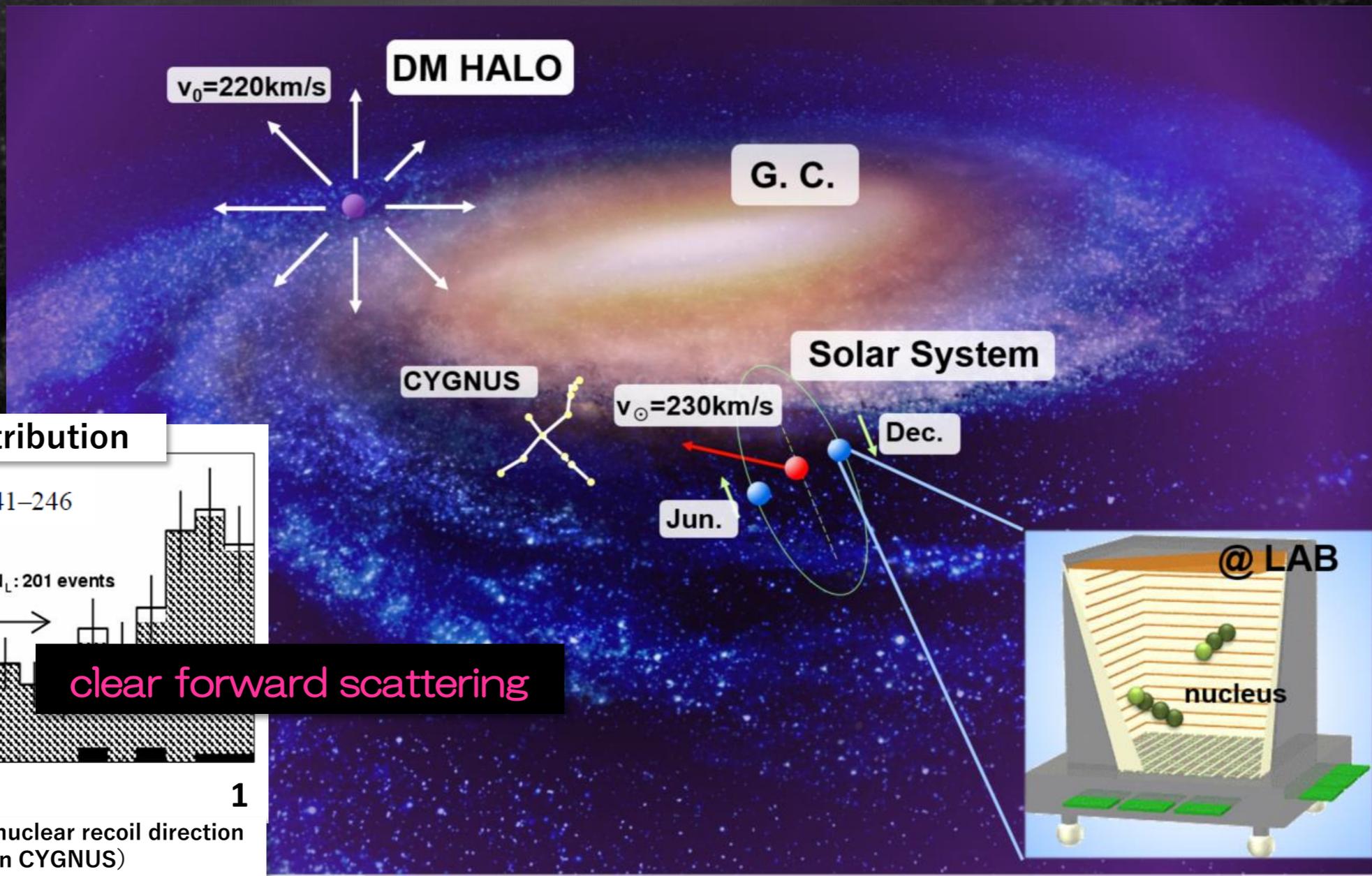
- 低dark rate SiPMの開発など
- ハイブリッドSiPM+PMT

S12572 (Hamamatsu)



• もう一つの将来：方向感度

- More robust evidence than annual modulation
- Study the DM nature after discovery

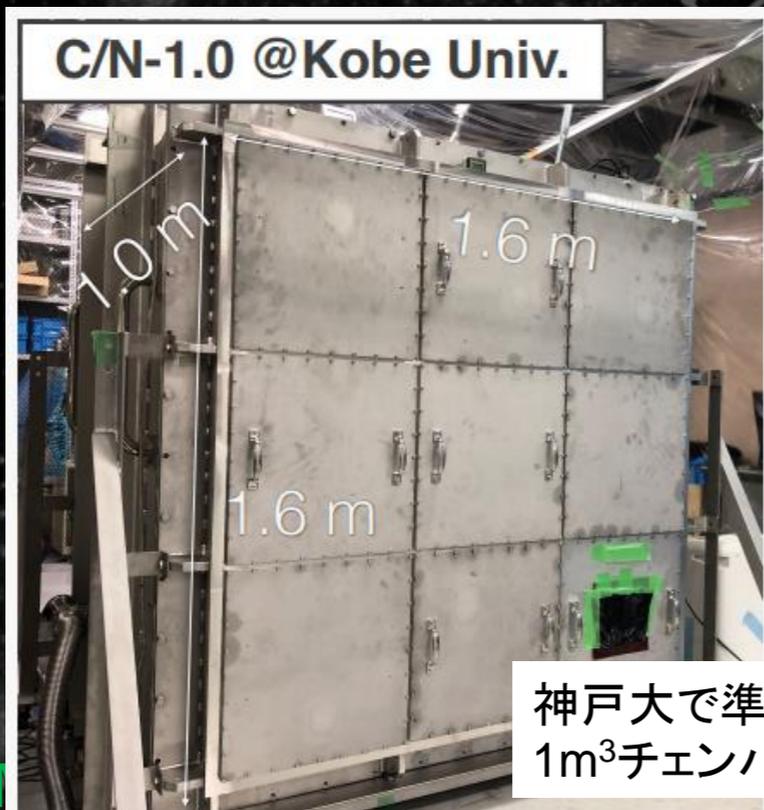


NEWAGE/CYGNUS

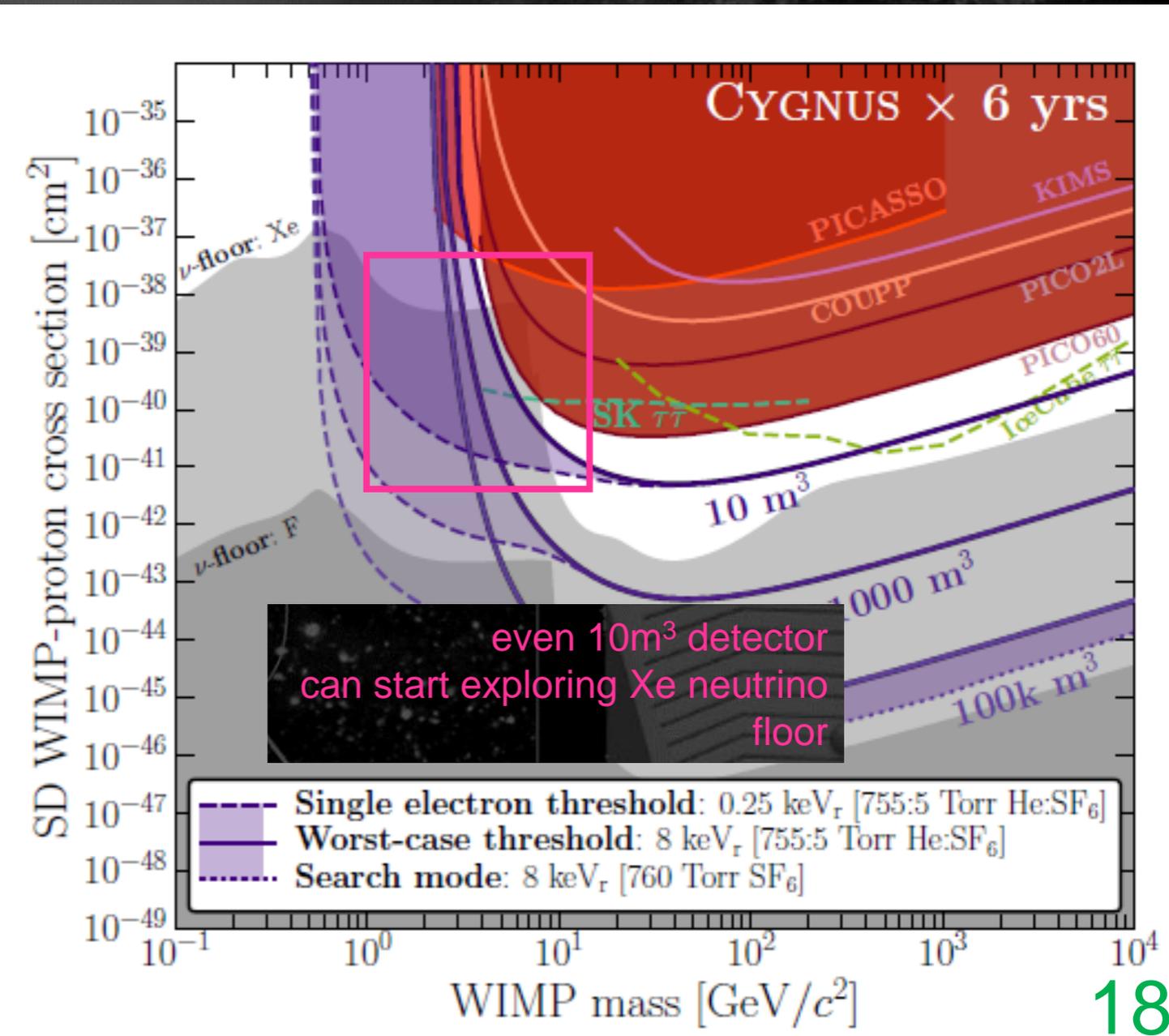
ガスTPCによる探索/決定的な証拠

arXiv 2008.12587

NEWAGE/GYGNUS	ガス飛跡検出器による暗黒物質の正体解明	中型B	身内賢太郎 (神戸大学)
カムランド2	極低放射能環境でのニュートリノ研究	大型	井上邦雄 (東北大学)
SMILE-3	Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments 3	中型B	高田淳史 (京都大学)
JASMINE	小型JASMINE (赤外線位置天文観測衛星)	大型	郷田直輝 (国立天文台)
DARWIN	50トン級液体キセノン宇宙暗黒物質直接探索計画	中型B	山下雅樹 (Kavli IPMU)



神戸大で準備中の
1m³チェンバー

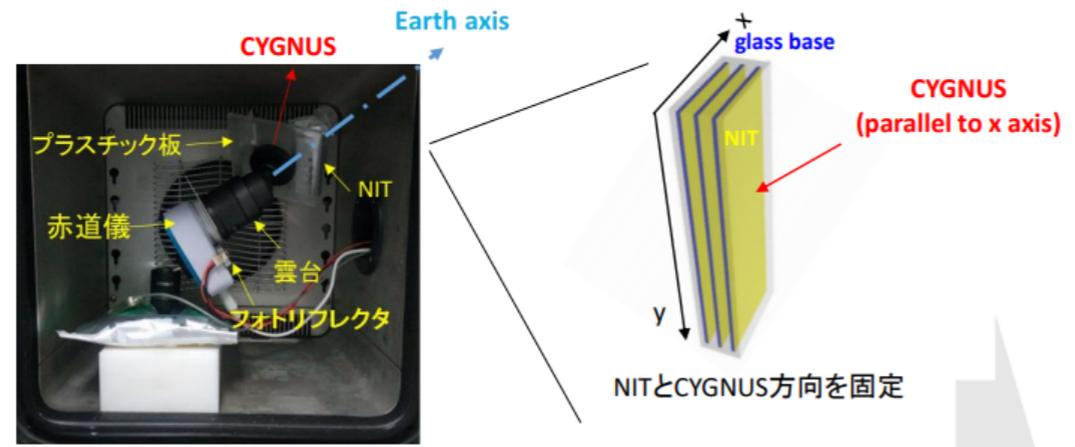


• 固体検出器による方向感度DM探索

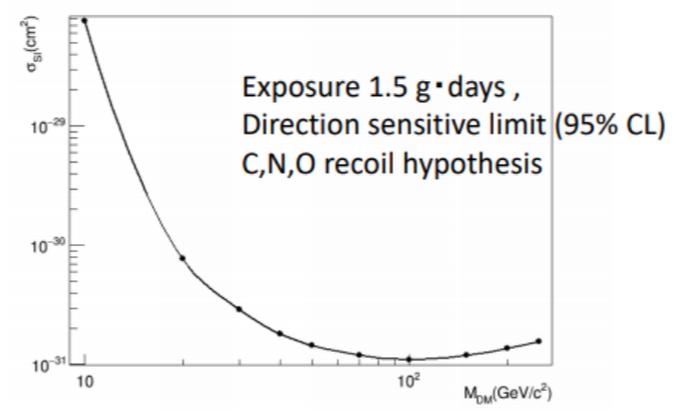
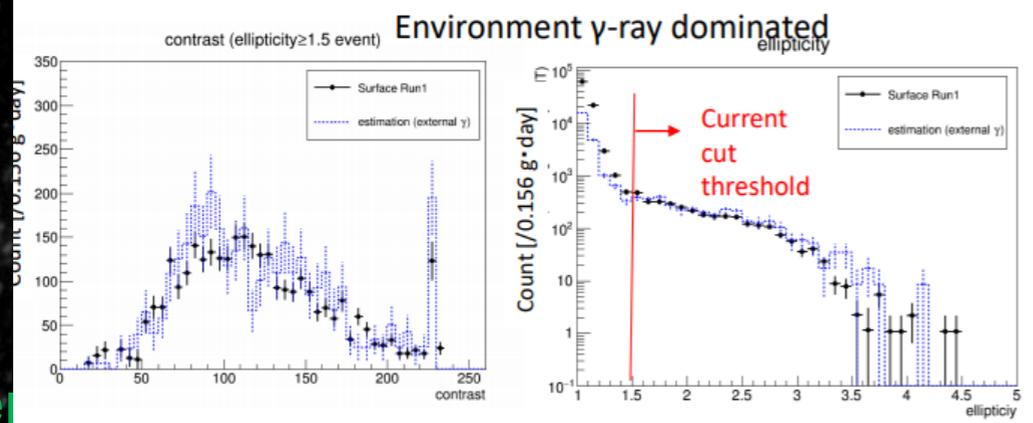
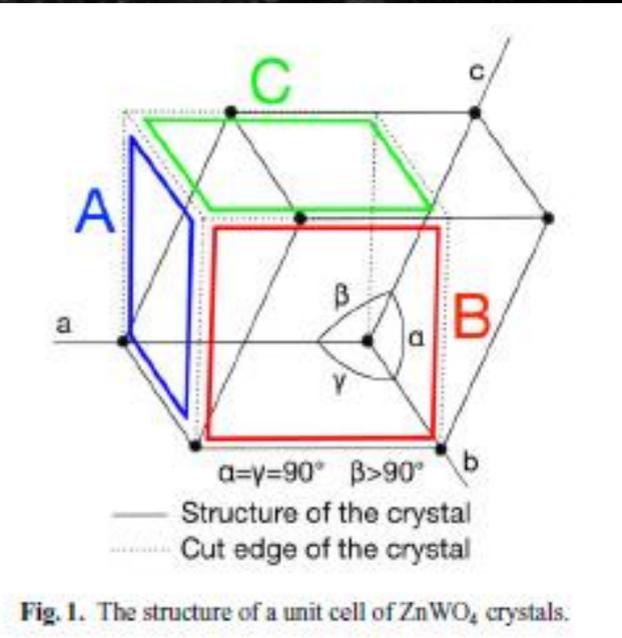
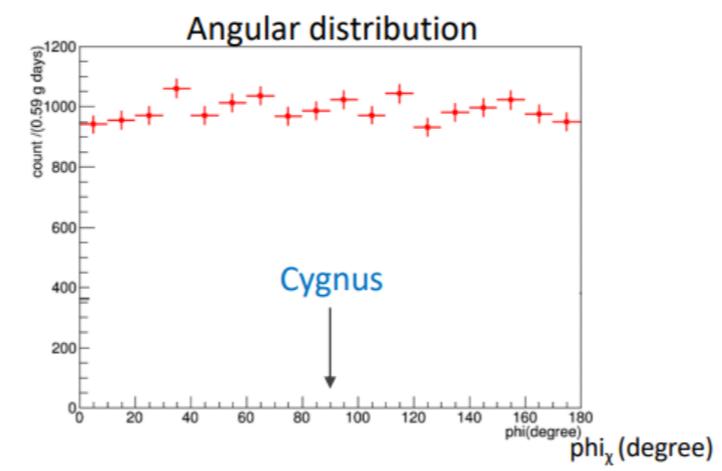
- 原子核乾板 (東邦大・中)
 - 地上での方向感度探索
- 異方性結晶 (東大・関谷)
 - 結晶開発、光量異方性測定

PTEP 2020, 023C01

地上ランによる赤道儀を用いた方向感度探索 実証試験



中竜大
新学術「地下宇宙」研究会
2021年5月



200keV oxygen recoil
A and B surface
~15% light yield difference

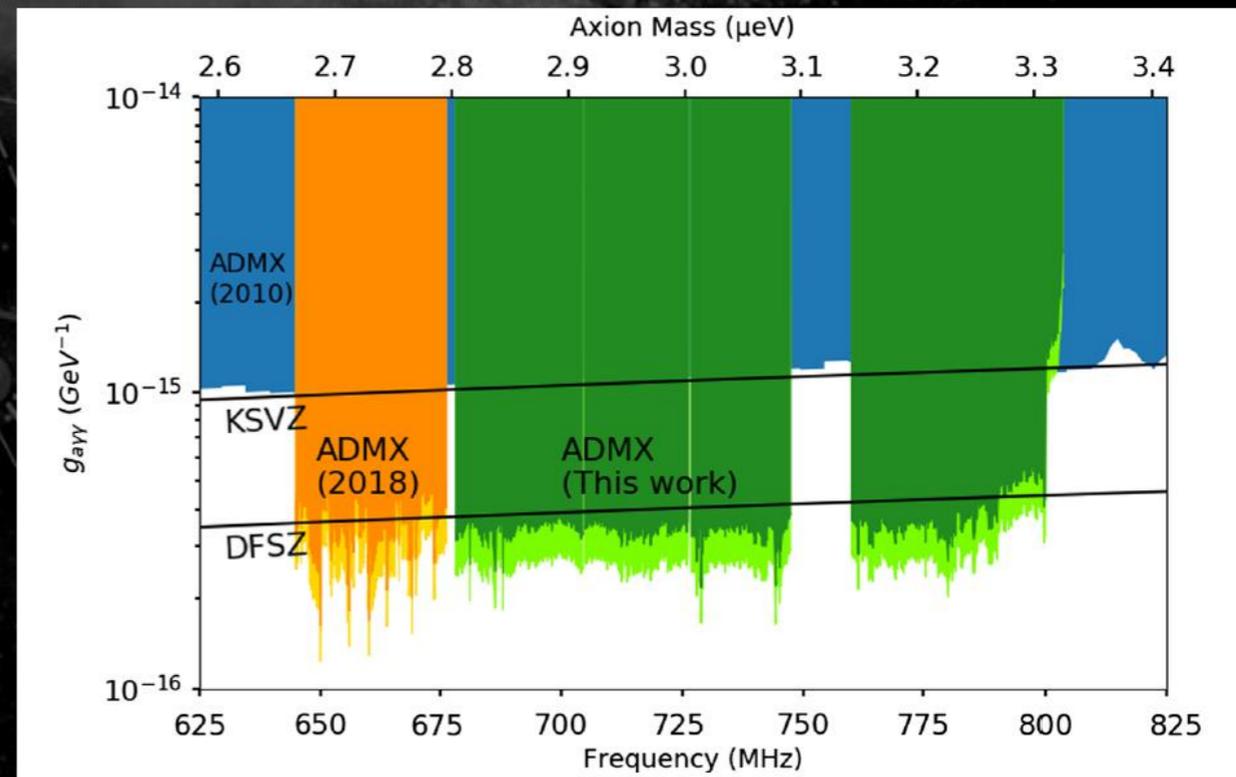
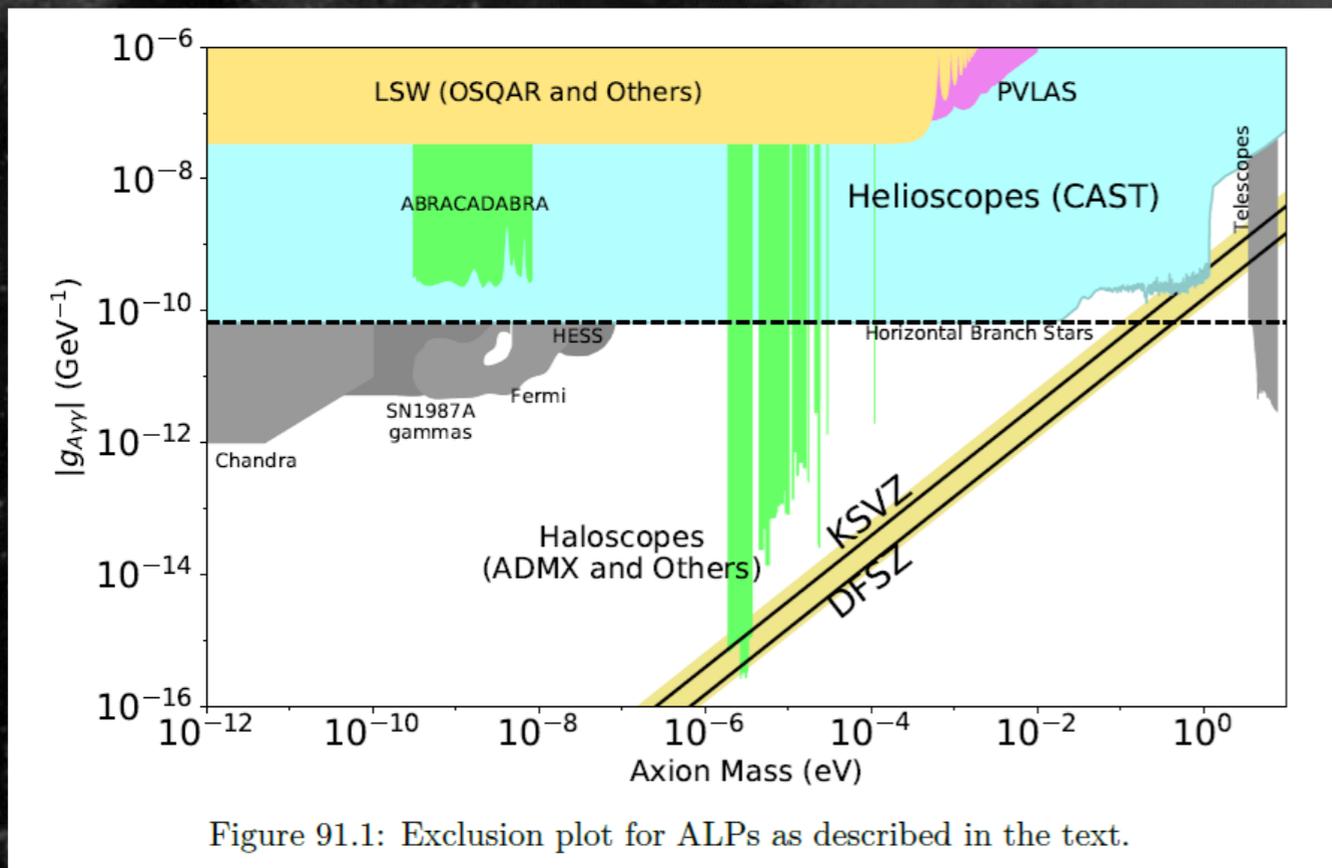
どこまで：QCDアクシオン

- KSVZ (hadronic) を超えてDFSZまで
- あるいは「気持ちのいい」どこまで

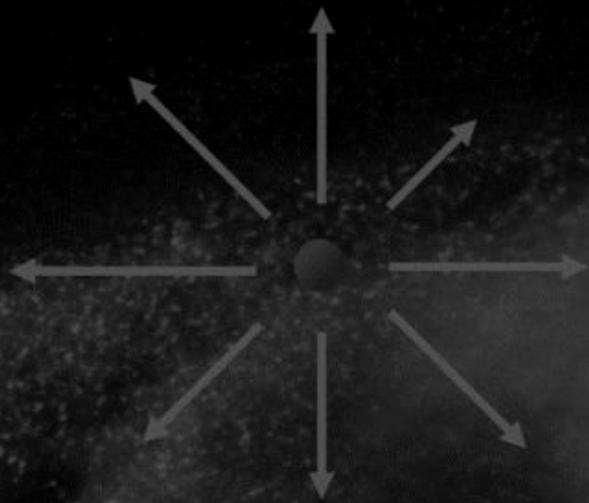
PDG review 2020

ADMX

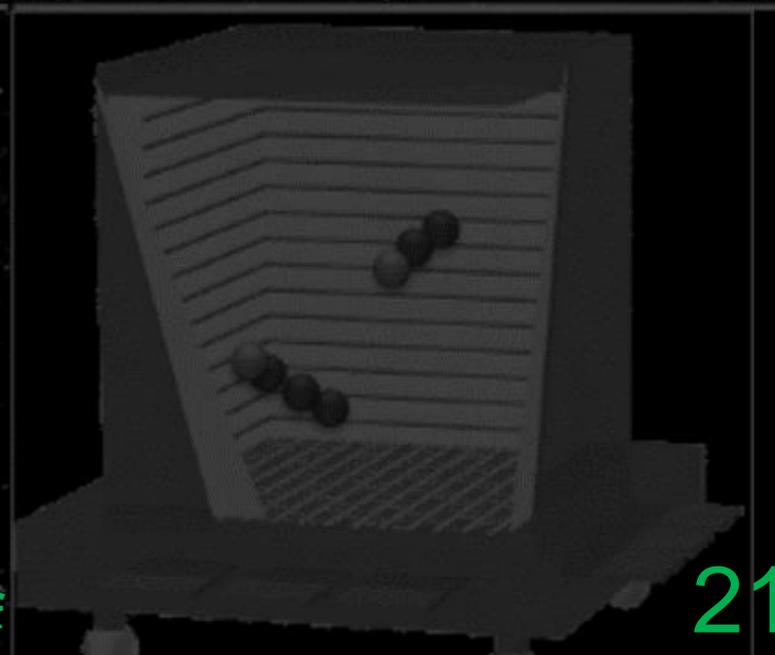
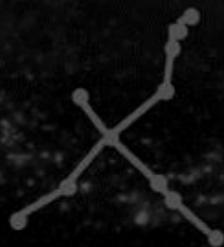
PRL124 (2020), 101303



(関連R&D) 強磁場+高Q値空洞 R&D 東北大 岸本康宏



わくわく



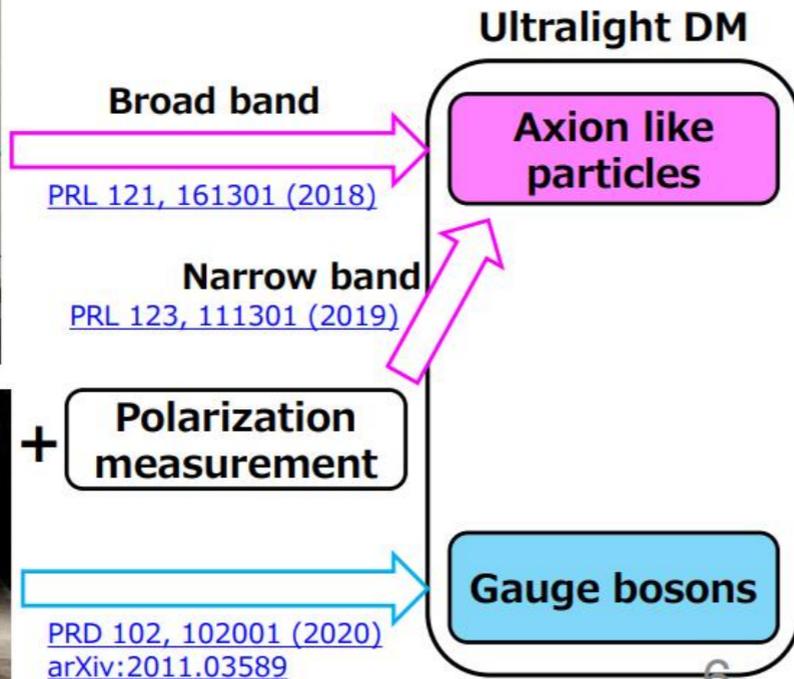
わくわく① DANCE

- 重力波技術の応用
- アクシオンによる偏光状態の変化

Our Strategy

東大 道村唯太
「ダークマター」シンポジウム
2021年2月

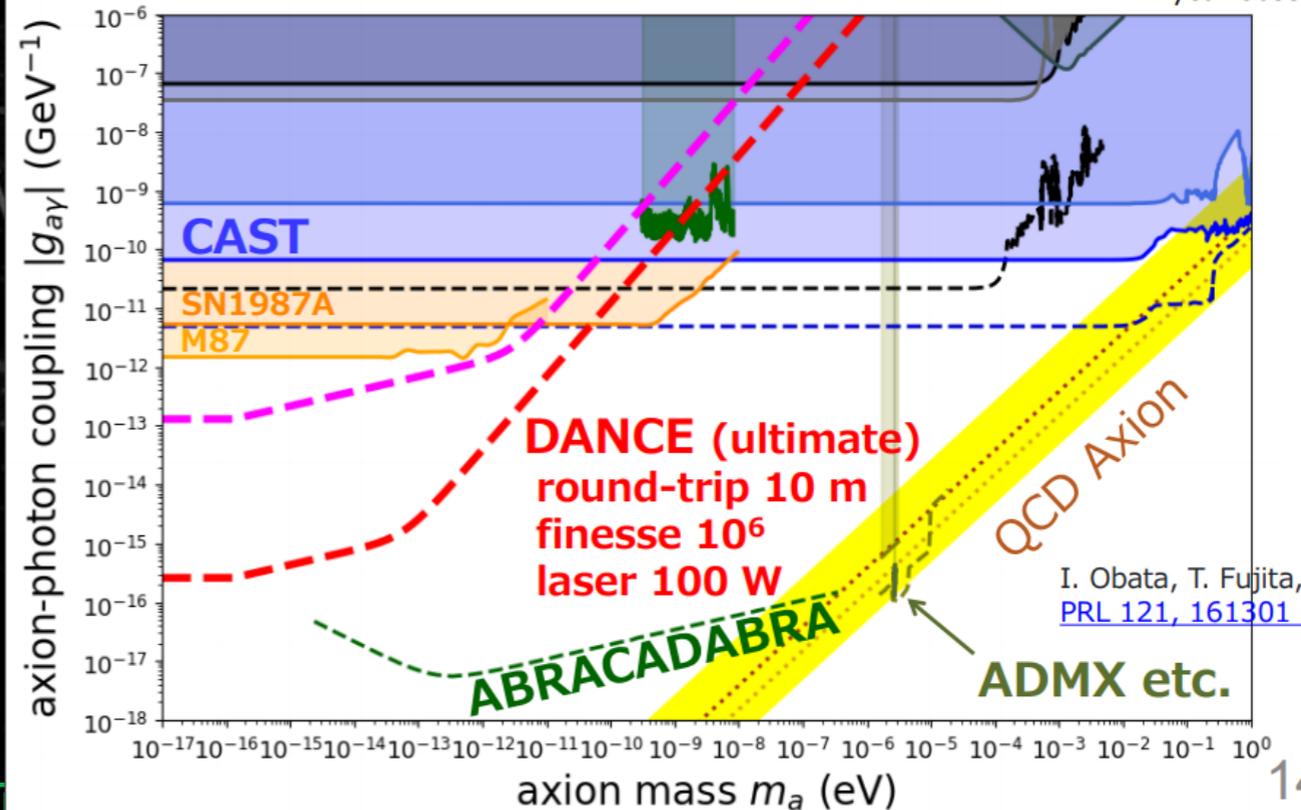
- Use both **table-top** optical cavities and **large-scale** laser interferometric gravitational wave detectors



Sensitivity of DANCE

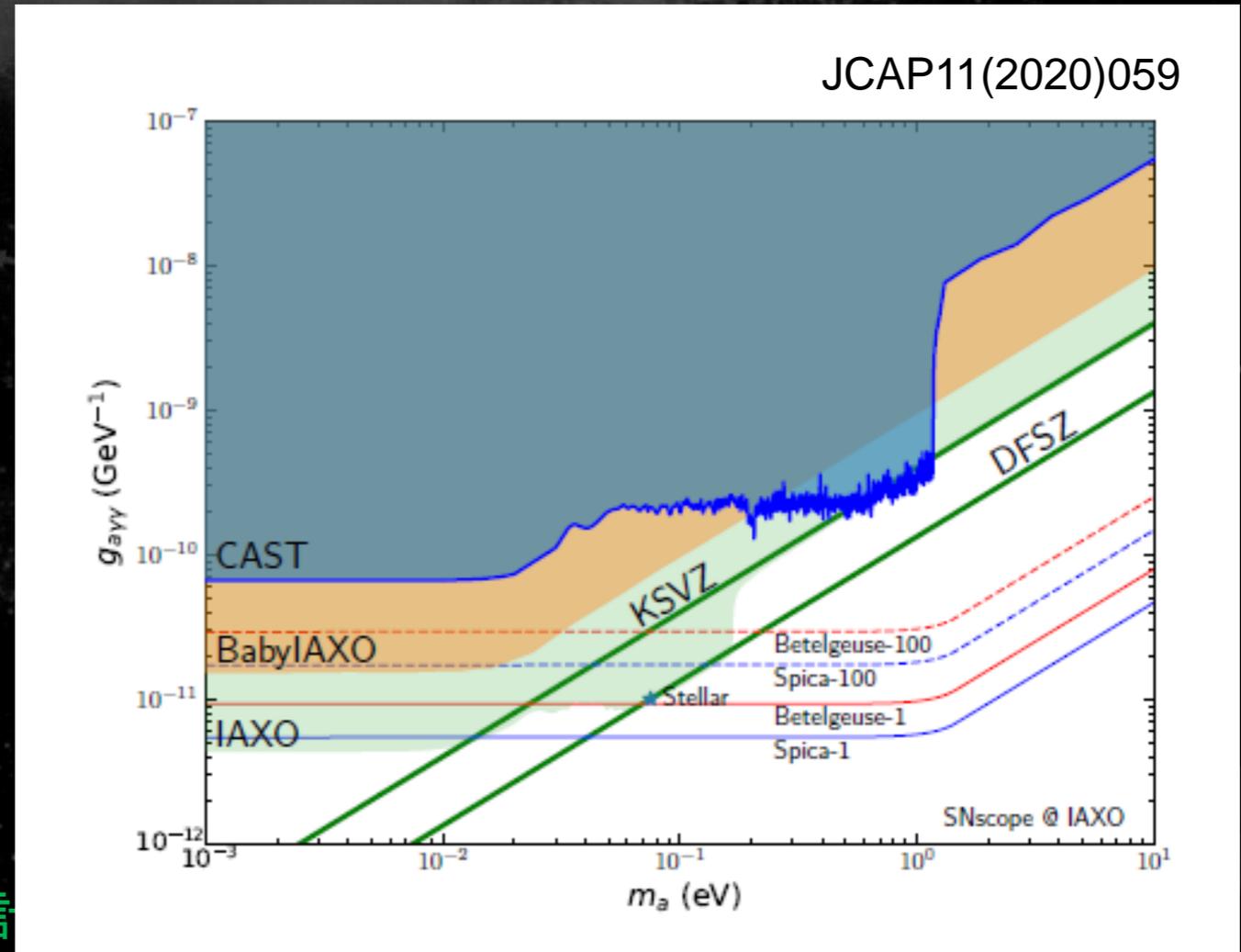
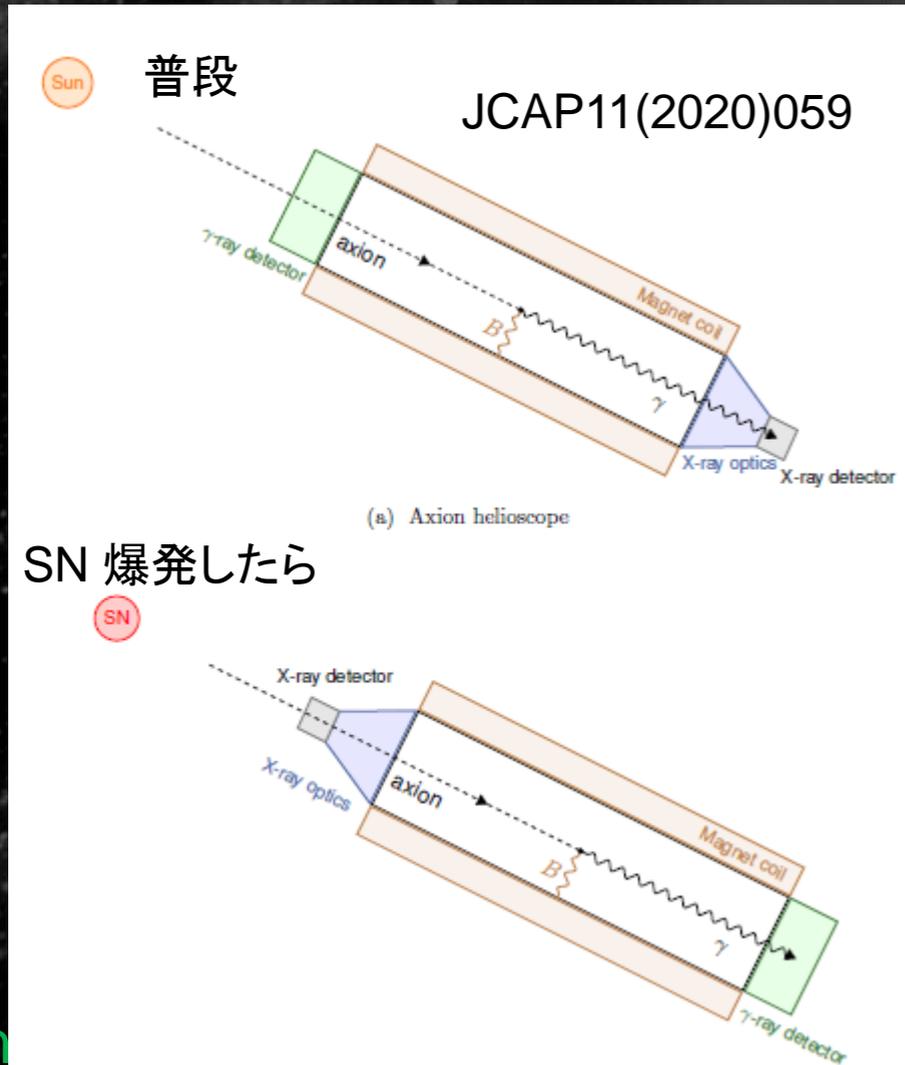
- Sensitivity **better than CAST limit**

* Shot noise limited
1 year observation



わくわく② 超新星AXION

- 太陽アクシオン望遠鏡 (IXAOなど) をジャック
- 超新星からのエネルギーの高い ($\sim \text{MeV}$) アクシオンを検出



わくわくその③ MIGDAL

• MIGDAL 効果

- Low mass search with “MIGDAL effect”
- Ordinary nuclear recoil : ionization along the track
- Low energy recoil : ionization efficiency is low
⇒ cannot be detected
- Very rare case electrons are emitted

PRL123, 241803 (2019)

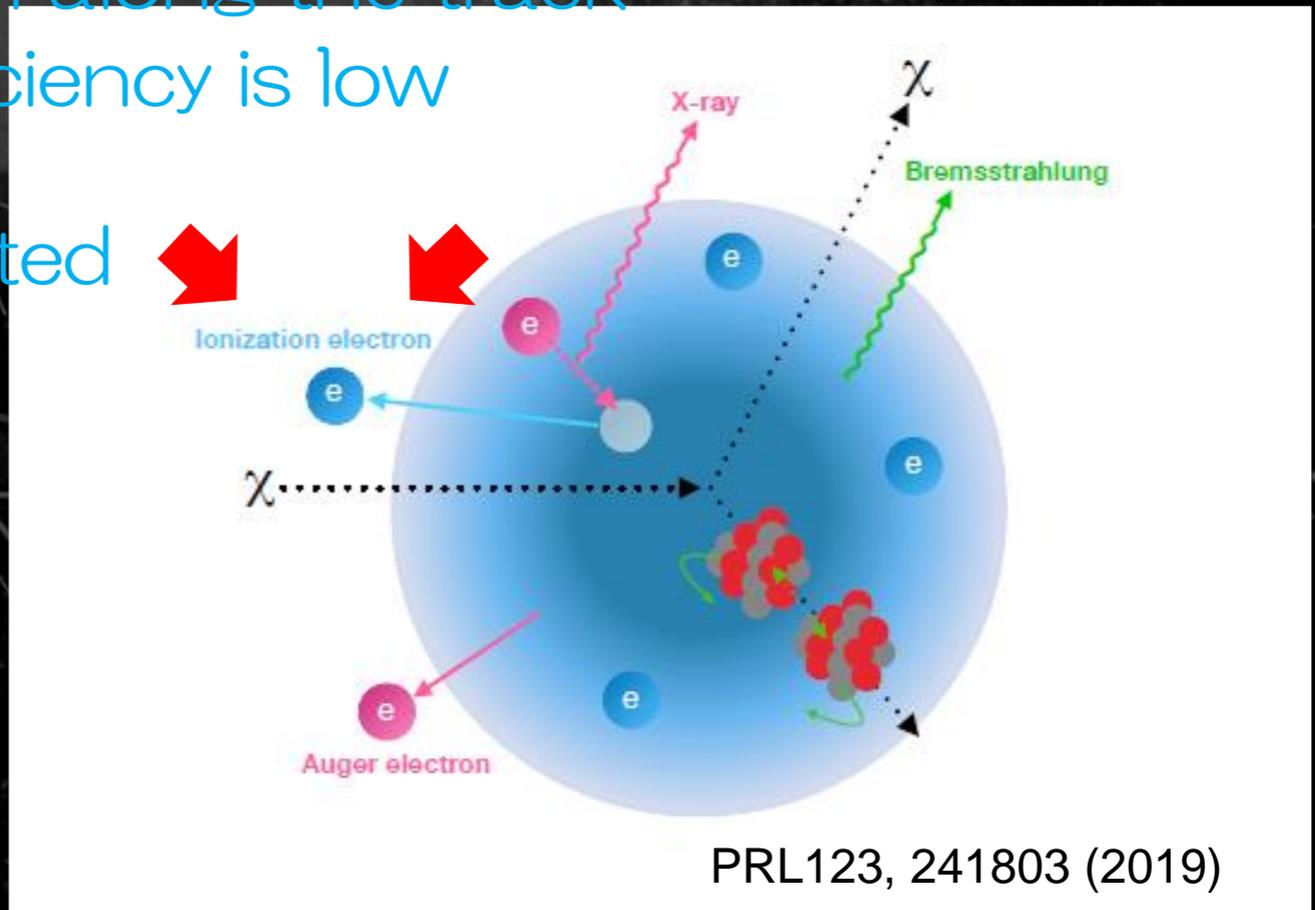
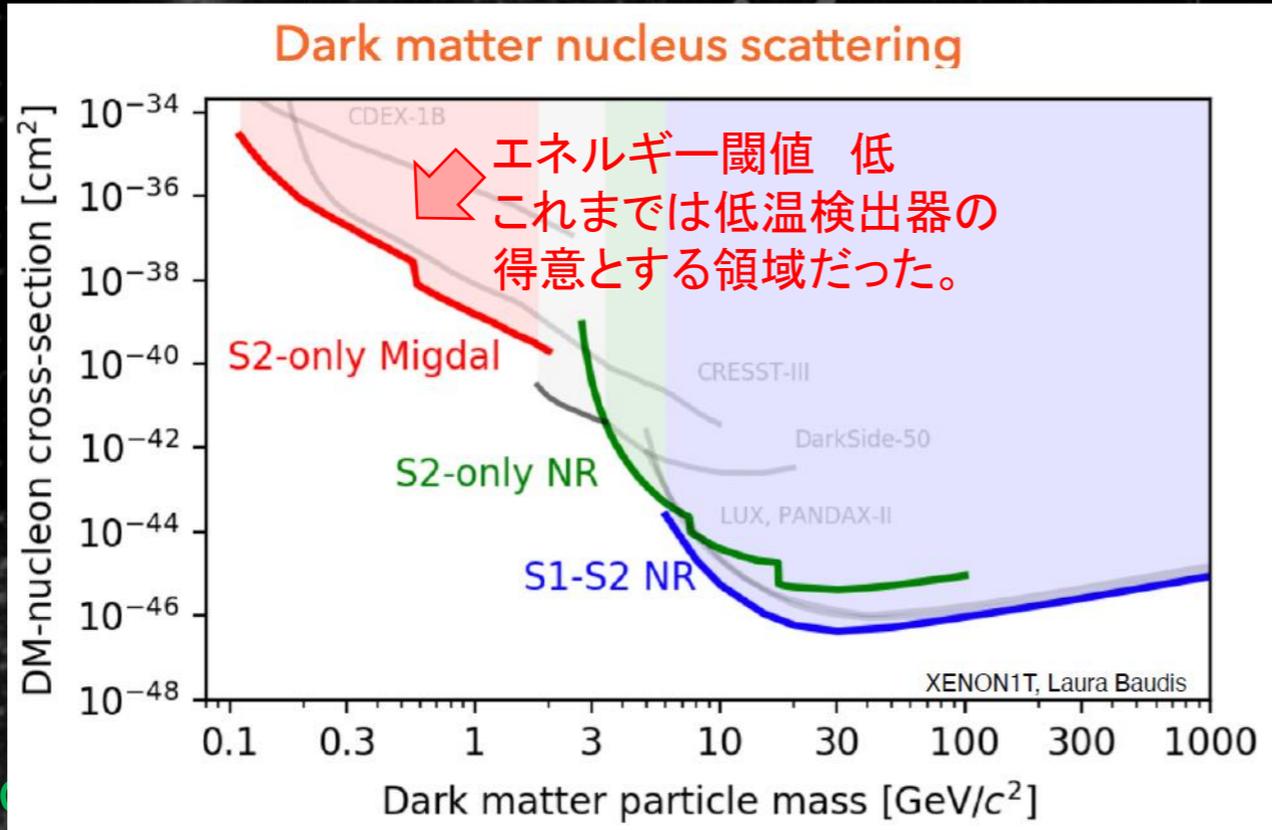


FIG. 1. Illustration of the ER signal production from BREM (green) and Migdal processes (pink) after elastic scattering between DM (χ) and a xenon nucleus.

• MIGDAL effect ?

- A. B. Migdal J. Phys. USSR 4(1941)449
 - calculated (predicted)
 - nuclear recoil \Rightarrow excitation / ionization
 - caused by a sudden change of the nuclear velocity
 - small probability

効果自体は固い計算
実験的には未確認

- Ibe et. al. 2018 JHEP03 (2018) 194
 - reformulated
 - energy momentum conservation
 - probability conservation
 - can be used for DM search

Migdal effect in dark matter direct detection experiments

Masahiro Ibe,^{a,b} Wakutaka Nakano,^a Yutaro Shoji^a and Kazumine Suzuki^a

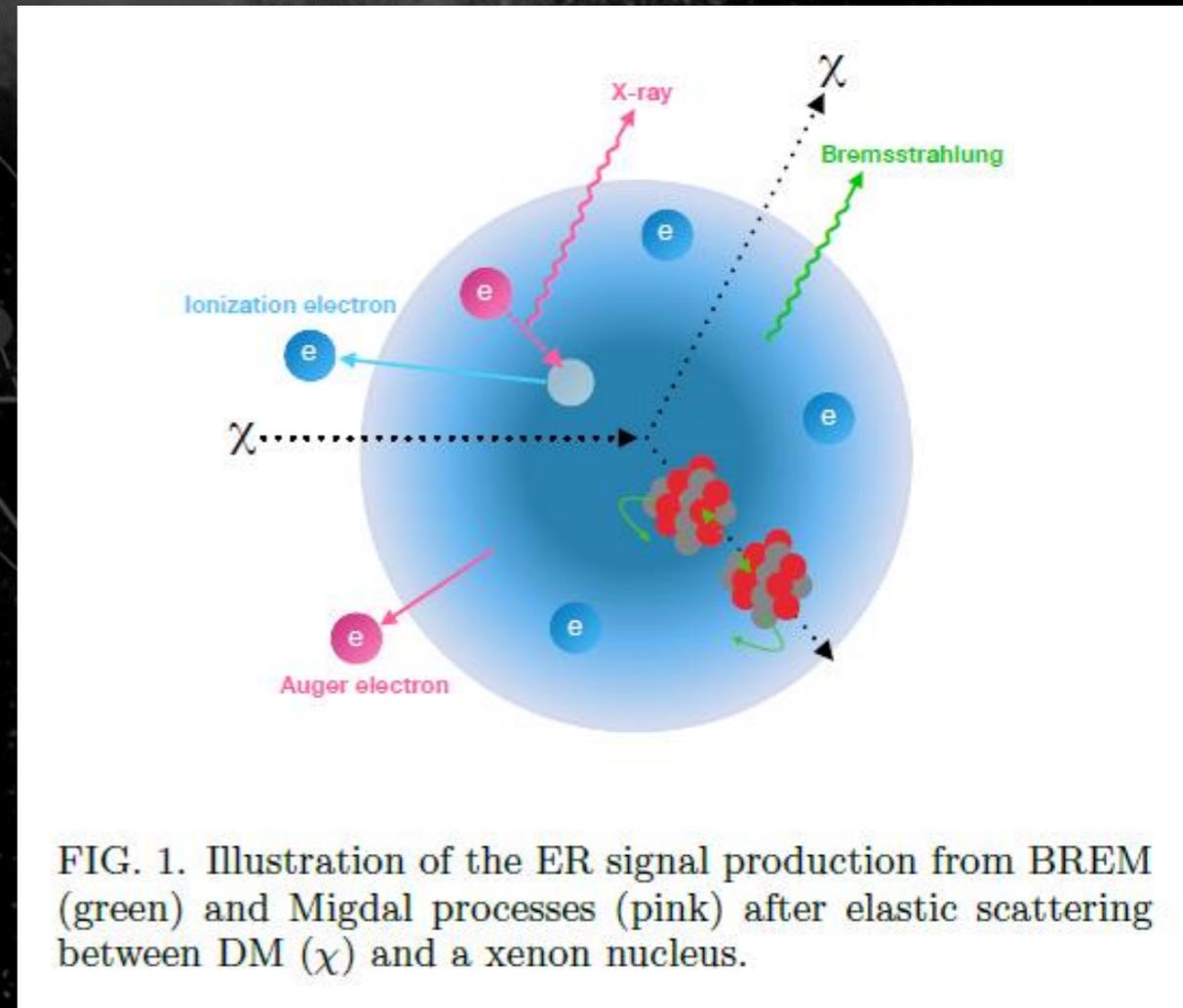


FIG. 1. Illustration of the ER signal production from BREM (green) and Migdal processes (pink) after elastic scattering between DM (χ) and a xenon nucleus.

Migdal challenges : just started

MIGDAL 実験 (CERN-UK)

- 原子核反跳 + 電子飛跡
- 個々の飛跡取得は実績有
- 通常の原子核反跳のBGからの切り分けが課題

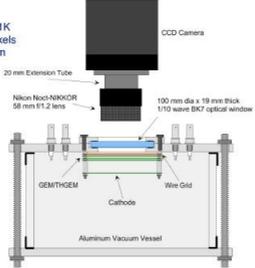
Miracle 実験 (東北大 : 中村輝石)

- 特性X線を放出するチャンネルに着目
- “2クラスター” によってBG削減

O-TPC at UNM (from D. Loomba) 2D reconstruction

UNM setup:

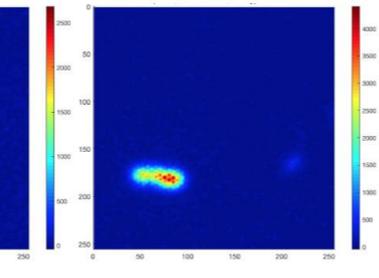
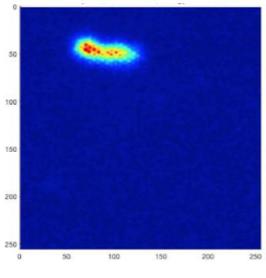
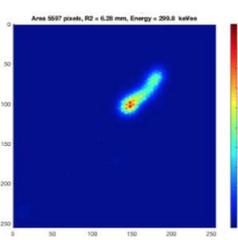
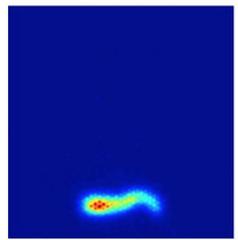
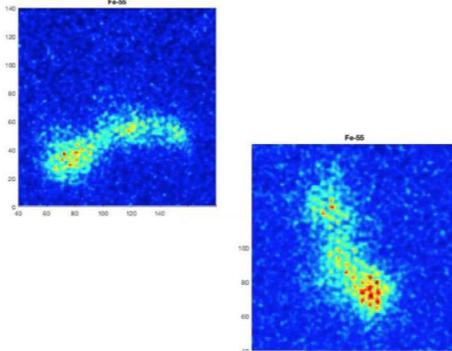
- Finger Lakes CCD with 1Kx1K E2V chip, with 13x13 μm^2 pixels
- lens to imaging plane ~20 cm



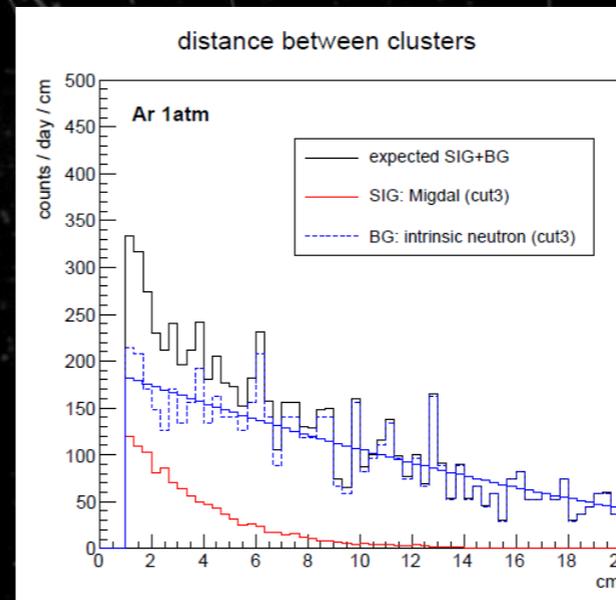
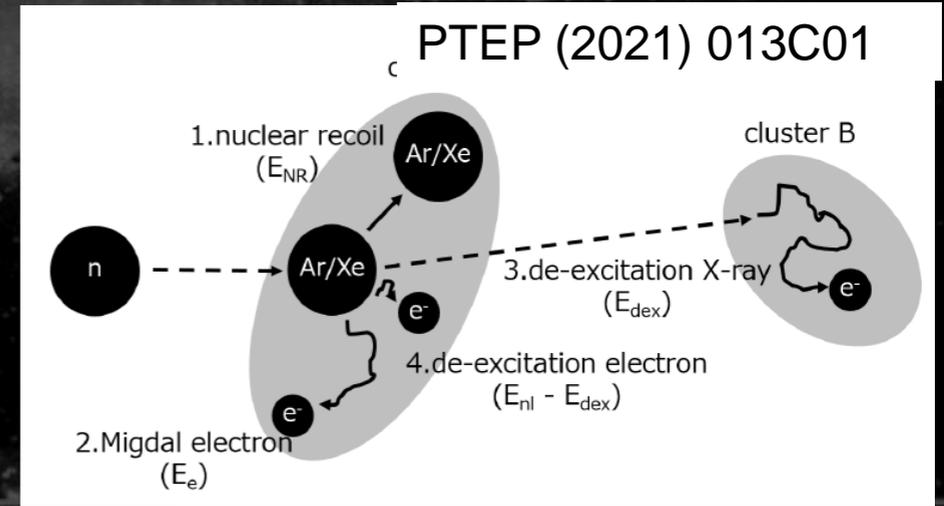
- 25-35 Torr CF4
- 2THGEMs ($\sigma > 0.7$ mm)
- Imaging area ~1.9cm x 1.9cm
- 4x4 on-chip binning

Data acquired using following sources:

- Fe-55 (5.9 keV x-rays)
- Co-60 (γ 's)
- DD neutron generator (~2.2 MeV n's + γ 's)



14



まとめ

- どこまで探すのか、どこまで探せばいいのか、

暗黒物質

- いつみつかってもおかしくない
- 正規軍 (Xe, Ar) : ニュートリノフロア
 - 季節変動 : DAMA信号
 - 方向感度 : DM証拠・性質
- アクシオン : QCD ALPは広大

