最先端研究V 暗黒物質探索

宇宙・素粒子スプリングスクール 2026
2026/03/12

竹田 敦
東京大学宇宙線研究所
次世代ニュートリノ科学連携研究機構
カブリ数物連携宇宙研究機構

暗黒物質提唱の最初 (1933)

Wikipedia より

Fritz Zwicky (1898-1974)

- 超新星研究のパイオニア。Walter Baade とともに、超新星が中性子星に移行する過程であり、宇宙線の発生源であることを提唱した。
- 1933年、かみのけ座銀河団の観測において、Virial定理を用いて銀河団の全質量を評価し、”**見えない質量**”の存在を推量した。

“Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln”, Helvetica Physica Acta 6: 110-127

これが最初の暗黒物質存在の予想となっている。

Virial 定理

$$<K> = -\frac{1}{2} < V >$$

→ かみのけ座銀河団 (Coma Galaxy Cluster) 内の銀河の動きが光学観測から推定される速度に比べて早すぎることに気が付き、
“**dunkle materie**” (**dark matter**) の存在が必要であると結論。

Coma Galaxy Cluster

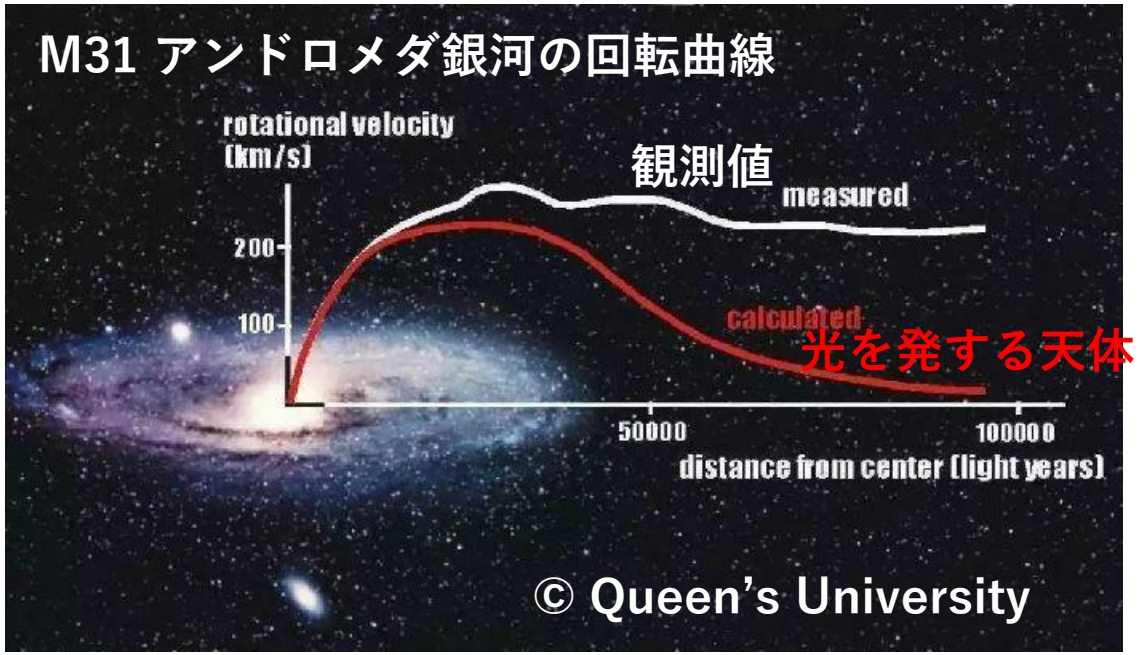
Credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

銀河スケールでの暗黒物質 (1970)

Wikipedia より

Vera Cooper Rubin (1928-2016)

- 1970年、M31 アンドロメダ銀河の回転速度をイメージ管分光器を用いて求め、光を発する天体をはるかに上回る質量の存在を示した。
  Rubin, Vera C and Ford, W. Kent Jr., "*Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*", *Astrophysical Journal 159 (1970) 379*



← アンドロメダ銀河(M31)の回転曲線 (銀河中心からの距離の関数で回転速度を表した図)。
赤線: 光を発する天体の質量から求められた速度で、$V \propto R^{-1/2}$ に従う。
白線: 実際の観測結果。星が無い領域にわたって回転速度が一定となっている。
→ **大量の暗黒物質の存在を示唆している。**

その後の、我々の銀河の回転曲線分布から、**太陽系近傍に~0.3 GeV/cc の密度で存在する**ことも分かってきている。

遠方銀河の重力レンズ効果 (1990～)

重力レンズ効果

- 強い重力場により、光の経路が曲げられる。
- 日食時の観測は、一般相対論の検証にもなった。
- ハッブル望遠鏡による遠方銀河観測から、暗黒物質の重力で空間がゆがんでいることが見えてきた。

銀河団 Abell2218
強い重力レンズ効果により背後の銀河が変形して見える。

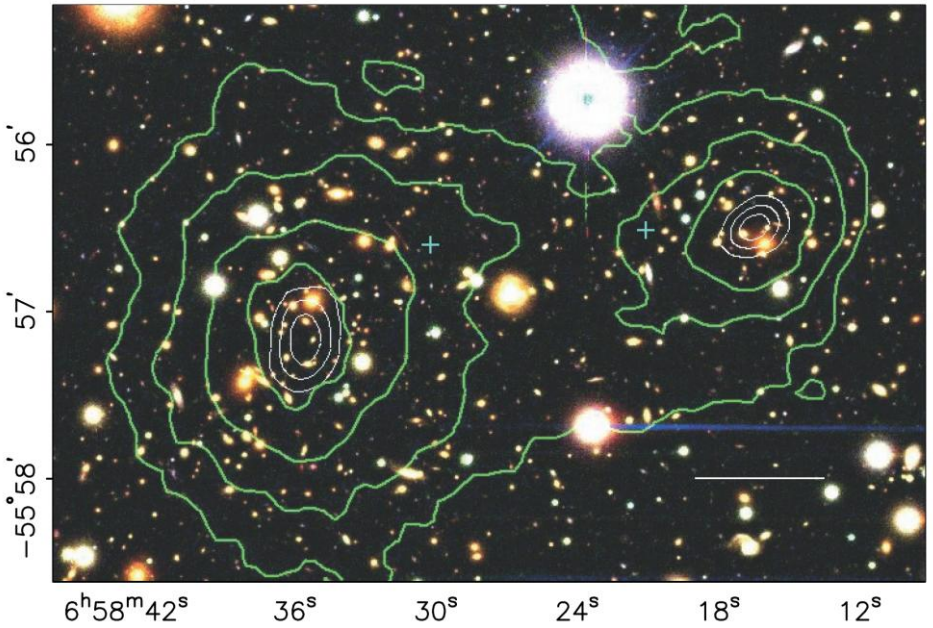
Credit: NASA, ESA, Richard Ellis (Caltech) and Jean-Paul Kneib (Observation Midi-Pyrenees, France)

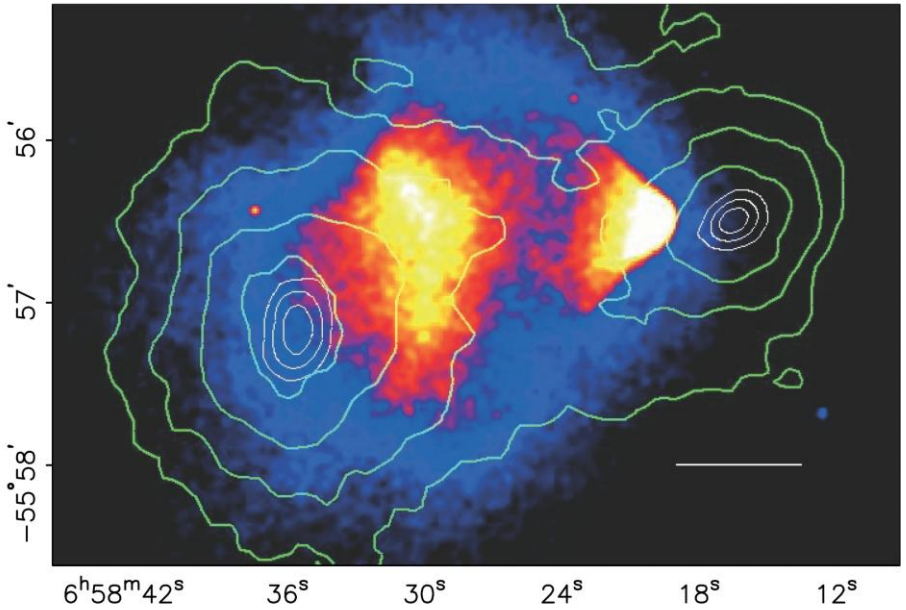
弾丸銀河団の衝突 (2006)

銀河団 1E-0657-56

- 2つの銀河団が衝突過程にあり強いX線を放っている。小さな銀河団が高速で大きな銀河団を弾丸のように貫いている状態から弾丸銀河団 (Bullet Cluster) と呼ばれている。
- X線で観測される通常の物質(右下図: プラズマガスによるX線強度分布)と、重力レンズ効果から推定される質量分布(緑の等高線)が大きく異なっている。
- 通常の物質が、質量の大部分と相互作用をせずにすり抜けるような挙動を示しているように見える。

→ **Collision less 暗黒物質の存在を強く示唆している。**



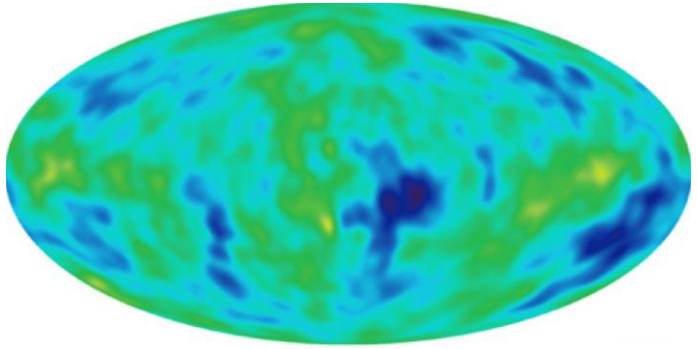


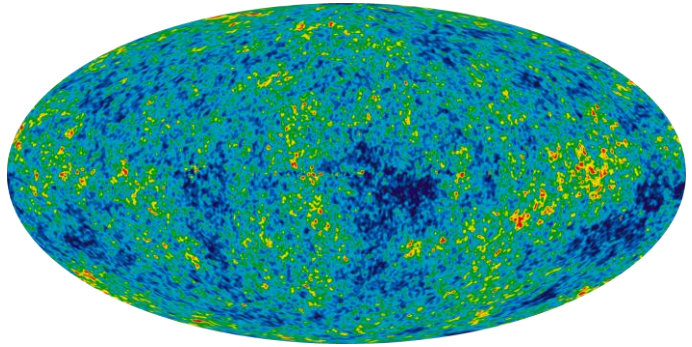
"A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter", Astrophysical Journal 648 (2006) L109-L113

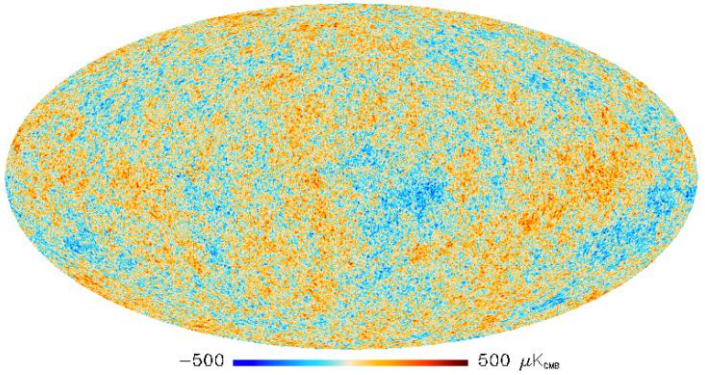
宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測

Cosmic Microwave Background (CMB)

- **宇宙の晴れあがり**: ビッグバン後約38万年で、宇宙は電気的中性になり、光が直進できるようになった。
- **CMB**: 晴れあがり時の光の波長が宇宙膨張で引き伸ばされ、約3Kのほぼ一様な背景放射となったもの。**平坦**であるが、**10^{-5} レベルの非一様性**があり、その観測値から暗黒物質のエネルギー密度、バリオン密度等の宇宙論パラメータが求められている。
- 主に衛星を用いた観測が行われてきており、NASAによるCOBE衛星と後継のWMAP衛星、さらに後継のESA主導・NASA協力によるPlanck衛星によりCMBの全天マップが得られている。

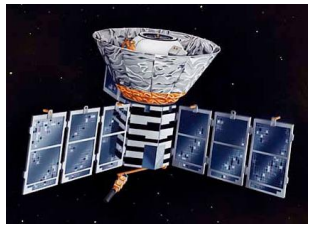






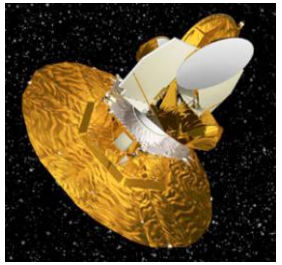
COBE (1989〜1996)

- 帯域: 32-90 GHz
- 角度分解能: ~7度



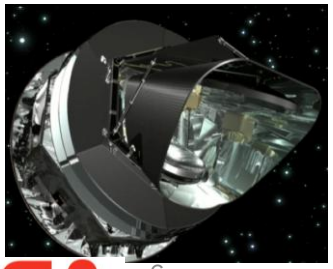
WMAP (2001〜2010)

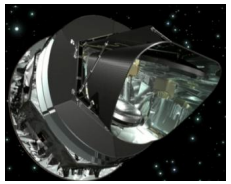
- 帯域: 23-94 GHz
- 角度分解能: ~0.2度



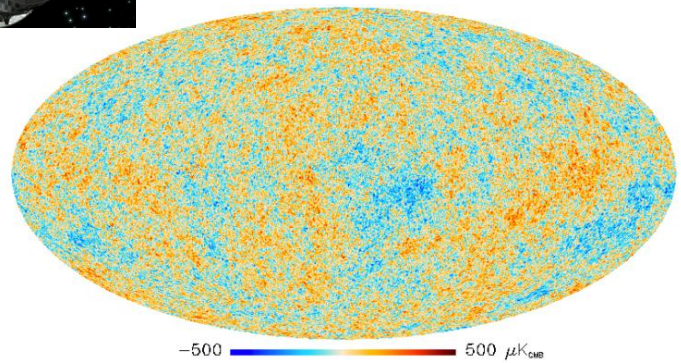
Planck (2009〜2013)

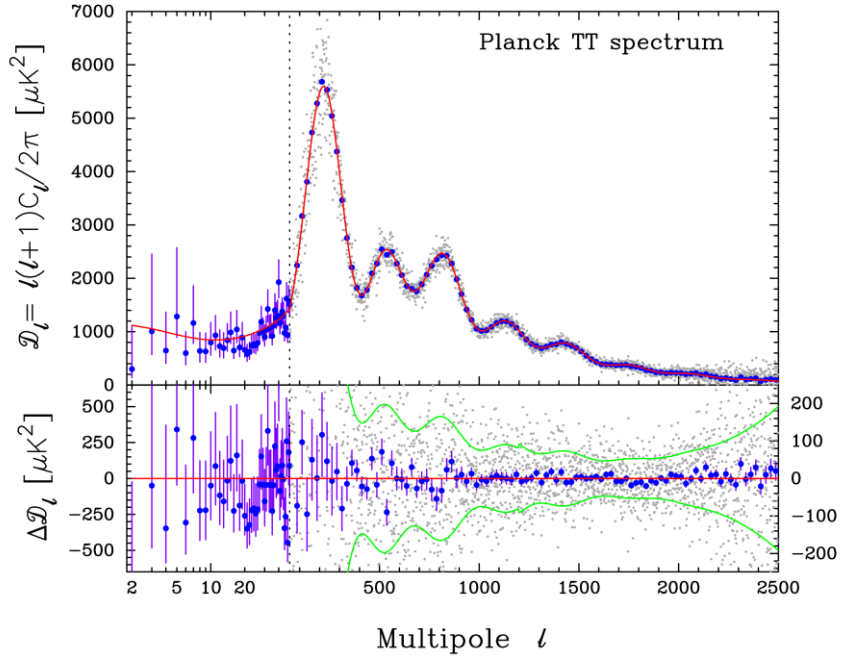
- 帯域: 30-857 GHz
- 角度分解能: ~0.1度





Planck によるCMB観測結果 (2014)

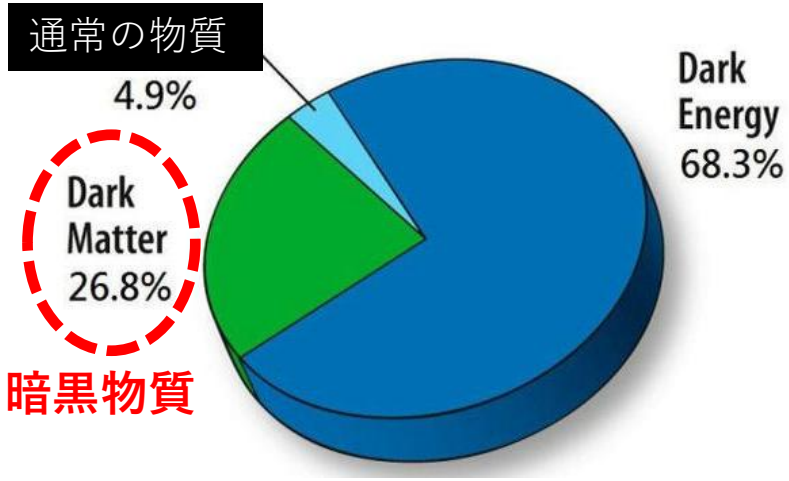




Six-parameter ΛCDM モデル: 冷たい暗黒物質であるCold Dark Matter (CDM)と、宇宙項Λを含む標準的なビッグバン宇宙モデルで、以下の6つのパラメータを持つ。CMB の角度パワースペクトラムの観測データをフィッティングすることで値が求められた。

- $\Omega_b h^2$: バリオン密度
- $\Omega_c h^2$: 冷たい暗黒物質密度
- θ_{MC} : 音響角度
- τ : 再電離時の光学的厚み
- N_s : 原始スペクトル傾き
- A_s : 原始スペクトル振幅

→ 冷たい暗黒物質密度$\Omega_c h^2$が、バリオン密度$\Omega_b h^2$より約5倍大きく、$\Omega_c h^2 = 0.1199 \pm 0.0027$ (Planck + WP) と得られている。



Planck による最新結果

↑ **CMB温度ゆらぎの角度パワースペクトラム**

各ピークが、バリオン総量や非バリオン質量密度等を表している。赤線がフィッティング結果。

"Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters", Astronomy & Astrophysics 571(2014) A16

暗黒物質の候補

- **安定** ← 宇宙初期に生成されて現在までのこっている。
- **電気的に中性** ← 通常の物質と電磁相互作用をしない。
- **通常の物質との相互作用が極めて弱い** ← 現在まで観測にかかっていない。
- **非相対論的速度** ← 銀河・銀河団に局所的に分布している。

これまでに、以下のような候補は否定されてきた

- **ニュートリノ**: 質量をもつことが分かり暗黒物質の候補だったが、超相対論的速度であり宇宙の構造形成を説明するのが難しいことから暗黒物質の主成分ではないと考えられている。
- **MACHOs**: 惑星・褐色矮星・白色矮星・中性性星・ブラックホールといった暗すぎて光学的に観測できない天体は Massive Compact Halo Objects (MACHOs) と呼ばれる。重力レンズ効果による観測が進められているが、暗黒物質の主成分となるまでの量はないことが分かってきている。

暗黒物質の候補は様々なものが考えられる中、**他の動機**から導入されるような粒子が良い候補といえる。

- **アクシオン**: QCD において CPが破れることを防ぐために導入された
- **原始ブラックホール**: 重力波観測がされたブラックホール連星の起源の可能性
- **WIMPs**: Weakly Interaction Massive Particles. 弱い相互作用スケールで現在の存在量を自然に説明できる

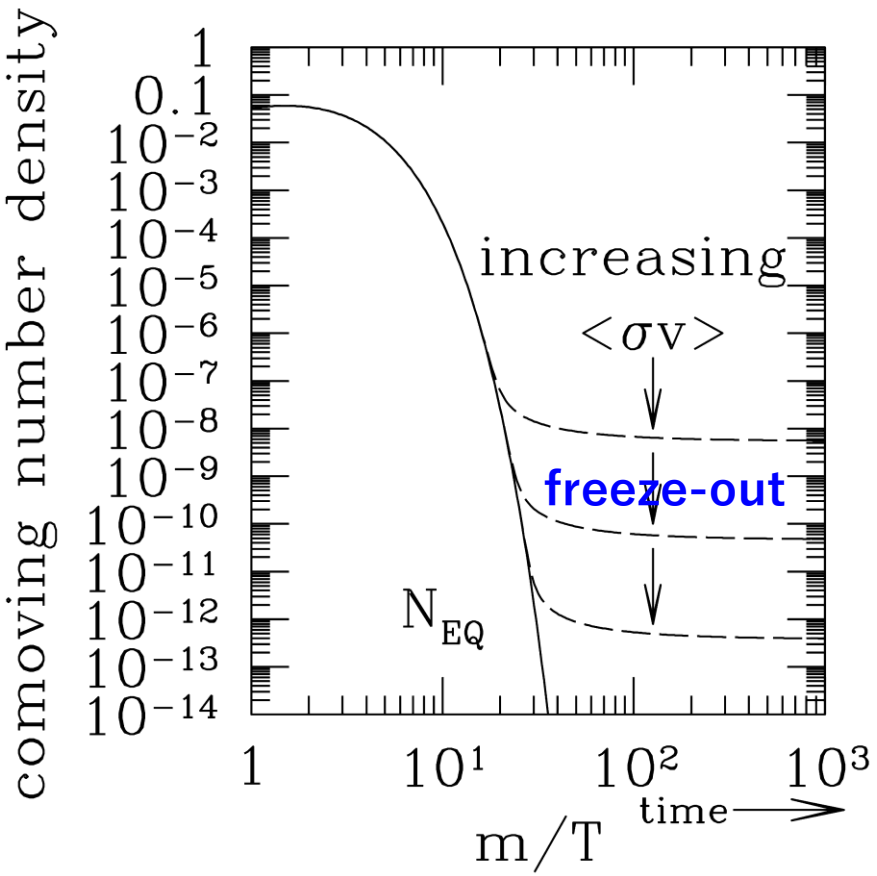
WIMPs

- **Weakly Interactive Massive Particles (WIMPs):** 電弱スケール程度の質量を持ち、標準模型粒子と弱く相互作用をする中性で安定な粒子の総称。
- 宇宙初期の高温プラズマ中で対生成・対消滅の熱平衡状態にあったと考えられるが、宇宙の温度がWIMP質量を下回ると温度に依存する平衡密度が減るため消滅過程優勢になり数密度は急速に減っていく。
- さらにWIMP消滅率が宇宙膨張率を下回ると、消滅過程は凍結 (freeze-out) される。
- ボルツマンの輸送方程式からWIMP数密度の時間発展を求めると、現在の暗黒物質密度は、対消滅断面積を σ 、速度を v として、以下で表される。

$$\Omega_\chi h^2 \simeq \frac{3\times 10^{-27}\,\mathrm{cm}^3\mathrm{s}^{-1}}{\langle\sigma v\rangle}$$

- 例えば、対消滅断面積が**弱い相互作用程度**で、WIMP質量を**100 GeV** 程度だとすると、**現在の暗黒物質密度を自然に説明できる。**

$$\langle\sigma v\rangle \simeq \frac{\alpha^2}{m_\chi^2} \simeq 10^{-25}\,\mathrm{cm}^3\mathrm{s}^{-1} \quad \rightarrow \quad \Omega_\chi h^2 \sim \mathcal{O}(0.1)$$



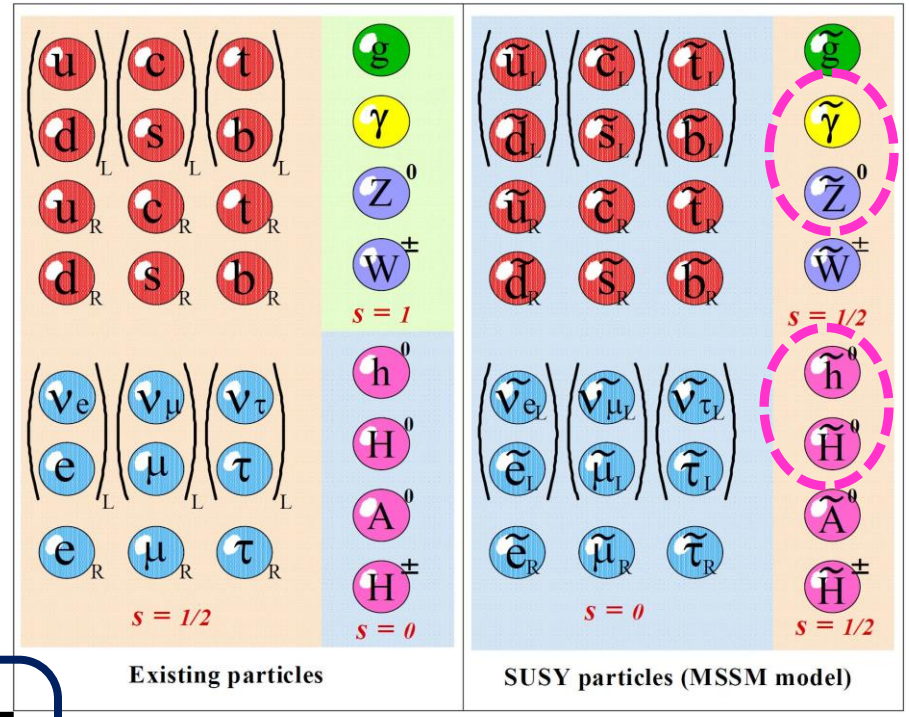
P. Gondolo, astro-ph/0403064

↑初期宇宙におけるWIMP数密度の時間変化

WIMPsの有力候補

超対称性粒子 (Supersymmetric particles)

- 超対称性(**SUSY**): ボソンとフェルミオン間の対称性。
- SUSYを導入することで、標準模型の様々な問題の解決につながる。
  - **階層性問題**: ヒッグス質量補正項の2次発散問題
  - **ゲージ結合定数の統一**: 大統一理論(Grand Unified Theory: GUT)への拡張に際して、標準模型を超対称性化することにより高いエネルギースケールでの統一が実現される。



超対称性で最小限拡張した標準模型(Minimal Supersymmetric extension of the Standard Model; **MSSM**)において、WIMPs の候補が自然に表れる。

$$\chi = a_1\tilde{B} + a_2\tilde{W}_3 + a_3\tilde{H}_1 + a_4\tilde{H}_2$$

ニュートラリーノ

ヒッグス(H)粒子の2次発散

$$\Delta m^2_{\rm higgs} \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2}\Lambda^2$$

$$m^2_{\rm higgs} \sim m^2_{\rm bare} + \Delta m^2_{\rm higgs}$$

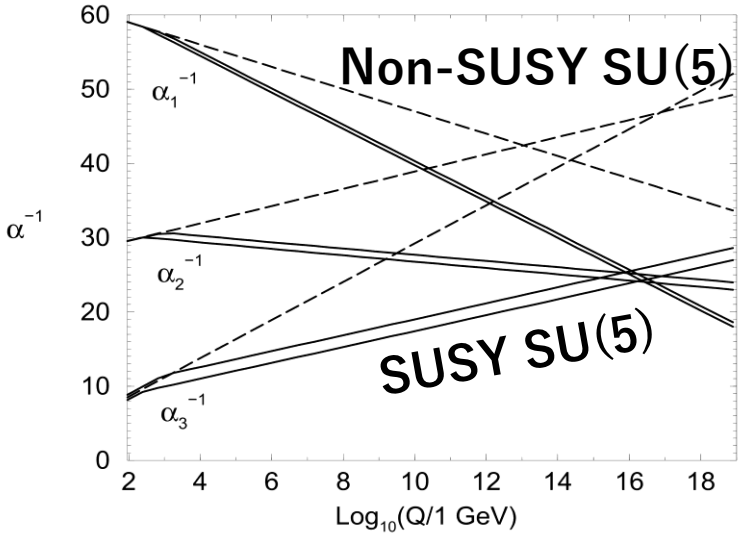
125 GeV **10^{38}** **-10^{38}**

SUSY

$$\Delta m^2_{\rm higgs} \sim \mathcal{O}(\log\Lambda)$$

→ SUSYを入れることで、Λをlog依存性にでき2次発散を回避できる。

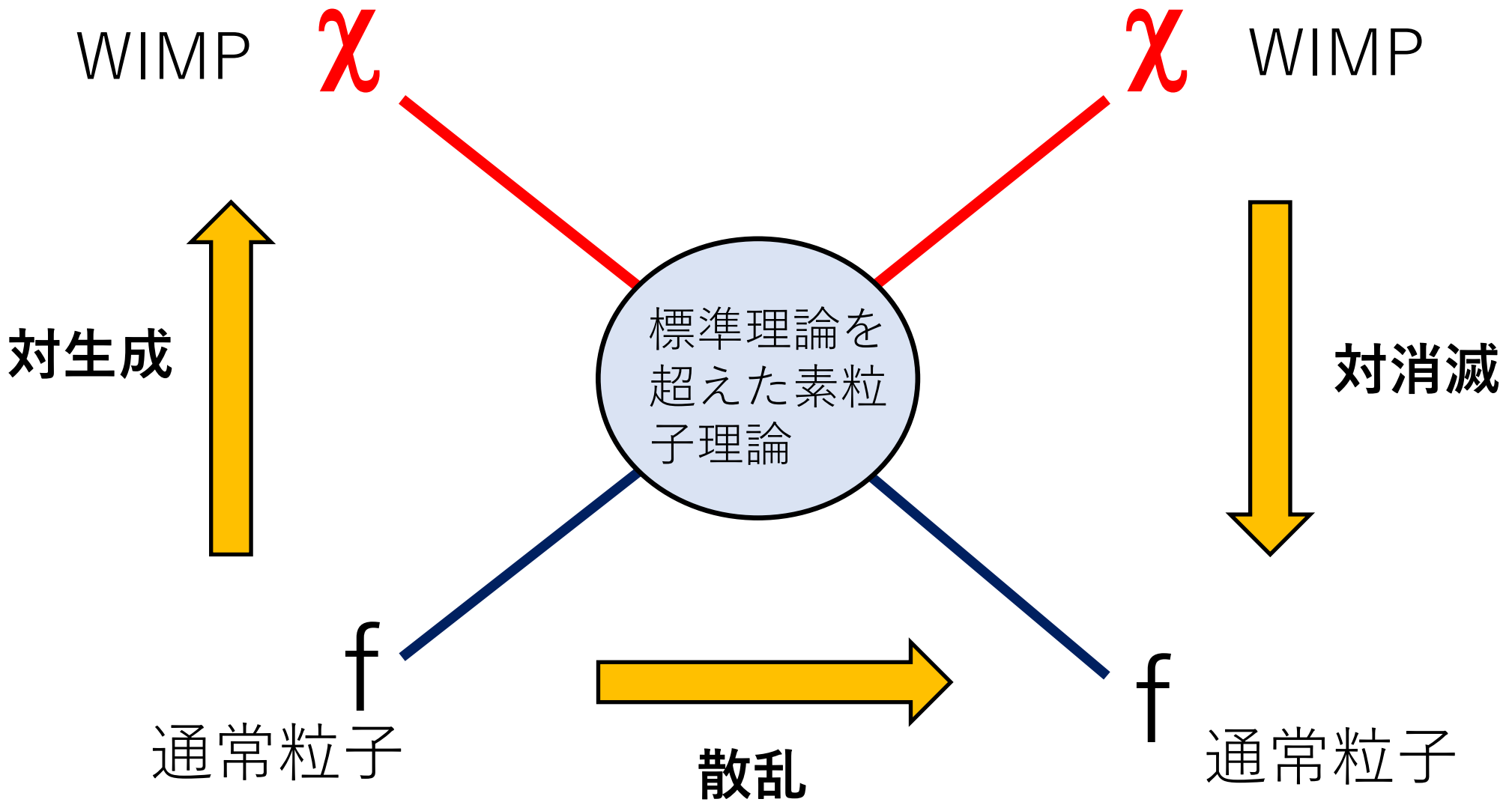
SU(5) GUT による結合定数の統一



S.P. Martin, arXiv:hep-ph/9709356

WIMPs の探索方法

大きく3つの方法に分けられる。

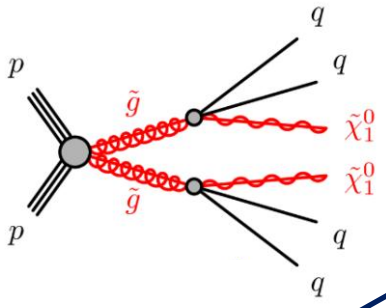


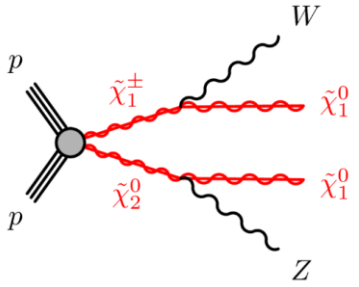
WIMPs の探索方法

加速器実験 Collider

加速器での粒子衝突時の高エネルギーでWIMPsを生成する。

- 生成されたWIMPs が持ち去るエネルギーの測定 (LHC, ATLAS, CMS, …)

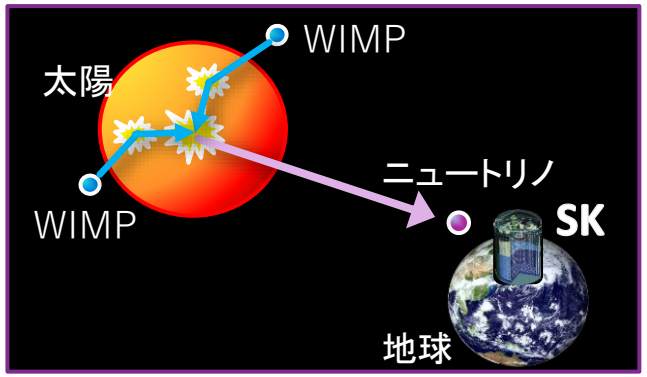




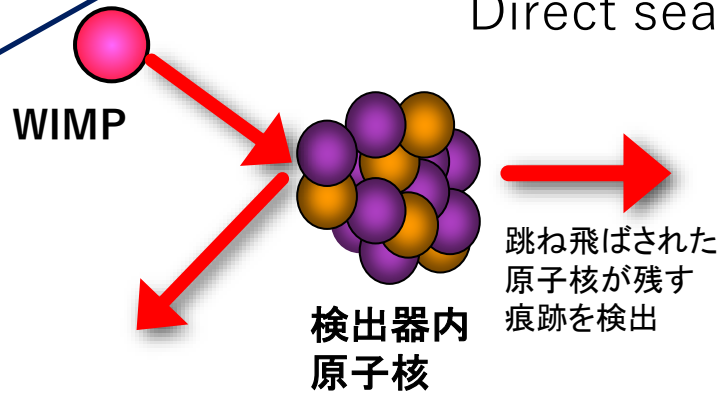
間接検出 Indirect search

宇宙内の重力場の強いところに捕らえられているWIMPsが対消滅をして生成する通常物質を探索

- 銀河中心からのガンマ線 (Fermi衛星, CTA,…)
- 太陽からのニュートリノ (Super-K, Hyper-K, IceCube,…)



直接検出 Direct search



検出器内の通常の物質との反応の痕跡をとらえる。

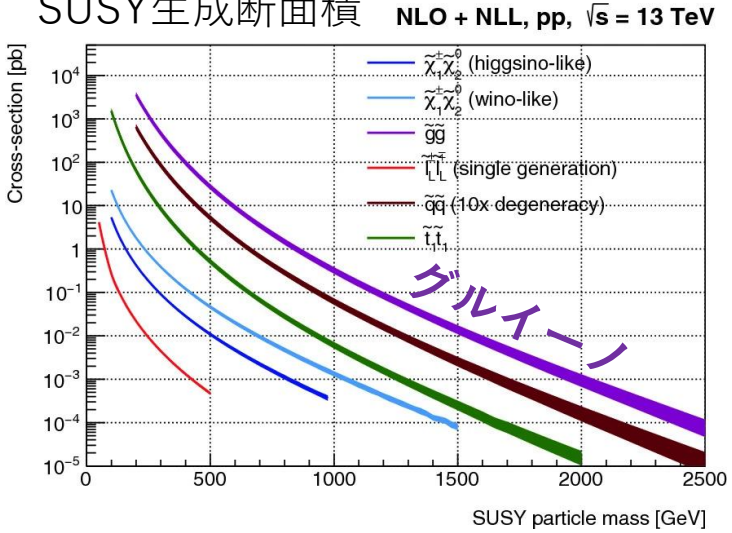
- 液体キセノン原子核の散乱 (XENONnT, LZ, PandaX, XLZD,…)

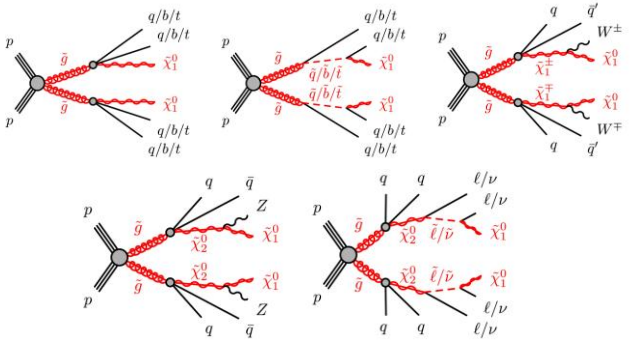
加速器実験

Large Hadron Collider (LHC)

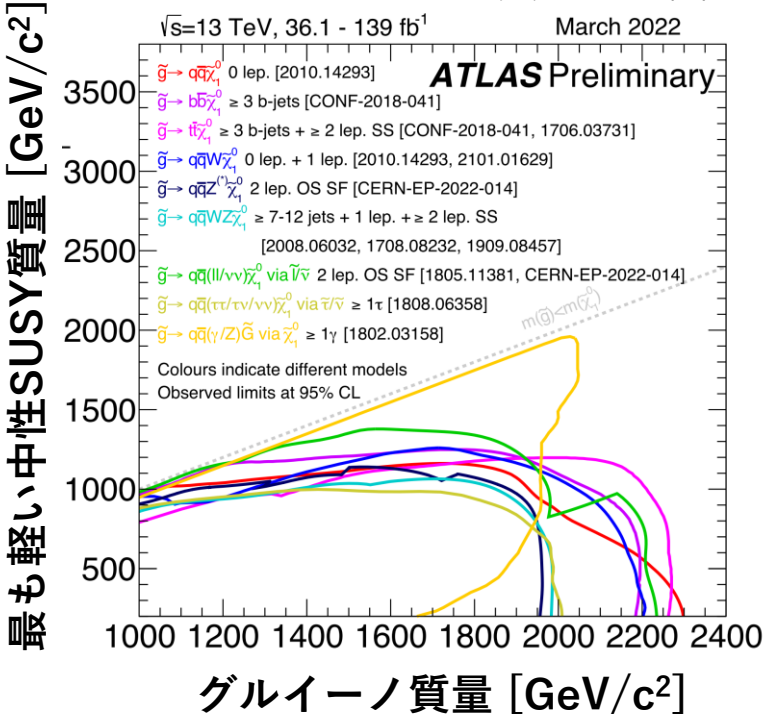
- 欧州原子核研究機構(CERN) にある全周約 26.7 km の世界最大の衝突型円形加速器。
- SUSY探索は、主に **ATLAS** 実験と**CMS**実験によって進められている。
- これまでに **Run1 (2009-2013), Run2 (2015-2018)** のデータ取得が行われており、2022年7月から **Run3 (2022-2026(予定))** のデータを取得中。
- 重心系エネルギー: 13.6 TeV

SUSY生成断面積



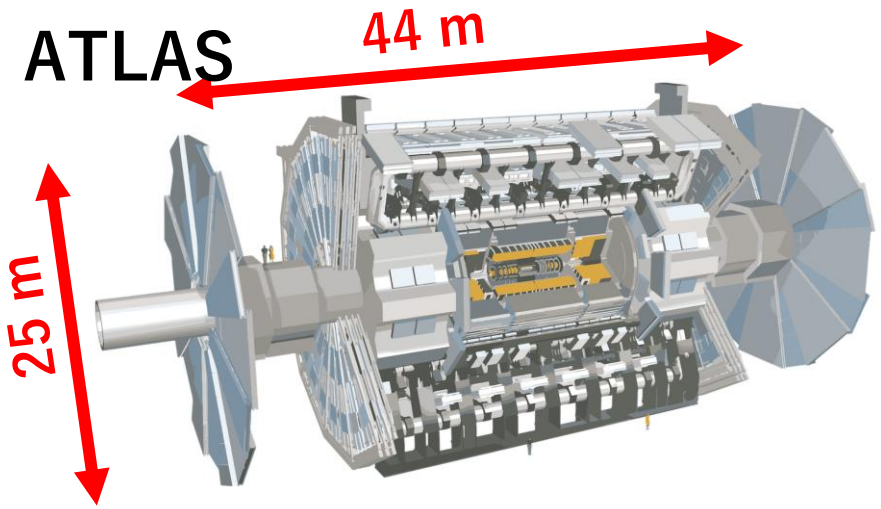


最も生成断面積の大きいグルイーノが生成される場合の質量制限図

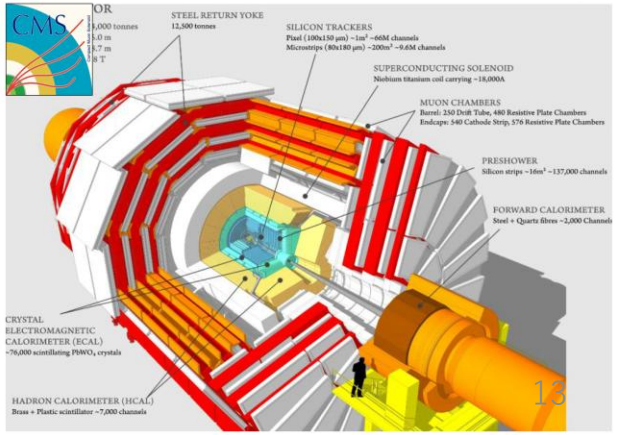


↑Run2までの解析がほぼ完了しているが、SUSYはまだ見つかっておらず制限のみが得られている。

ATLAS

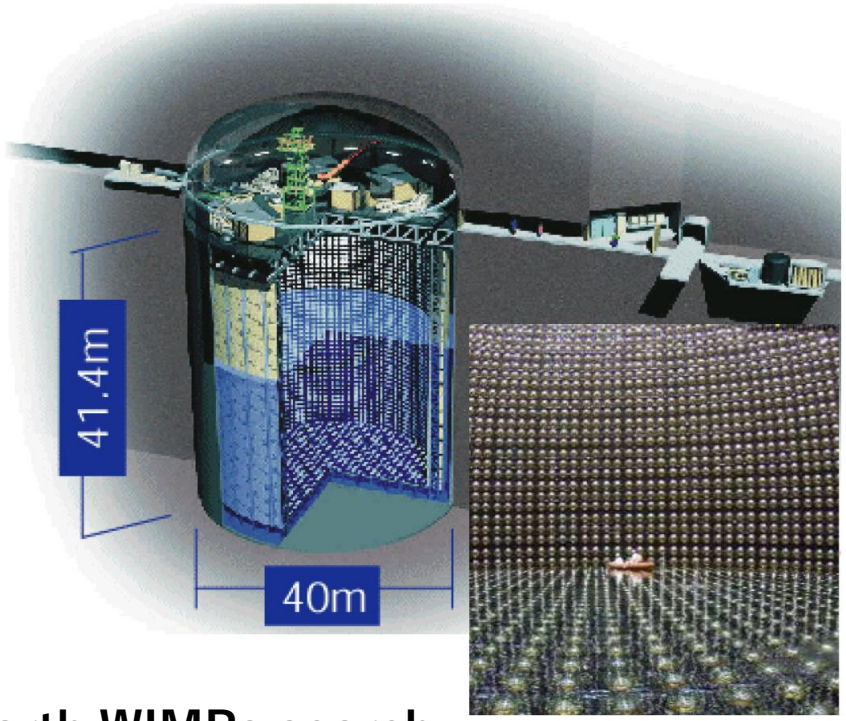


CMS

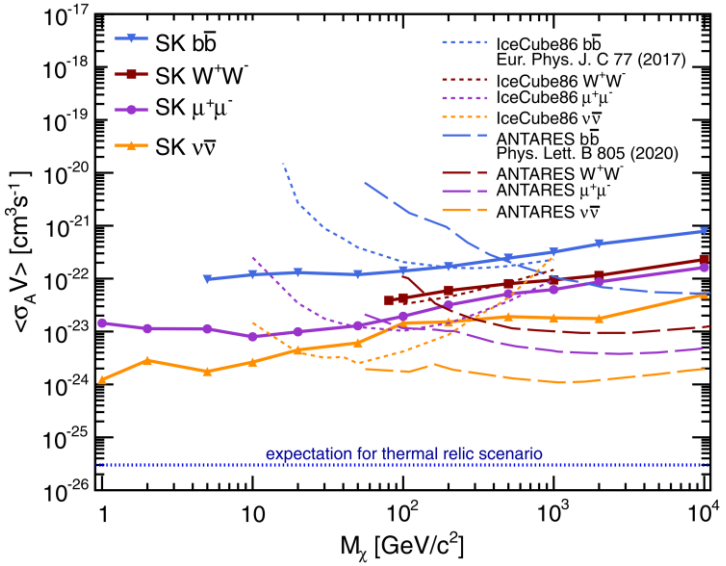


間接検出の例

- 重力場に捕らえられている暗黒物質が対消滅する際に出す(暗黒物質由来の) 通常粒子を検出する。
- Super-Kamiokande では、銀河中心、太陽、地球からくる暗黒物質由来のニュートリノを探すことで世界最高感度での間接検出による暗黒物質探索を行っている。

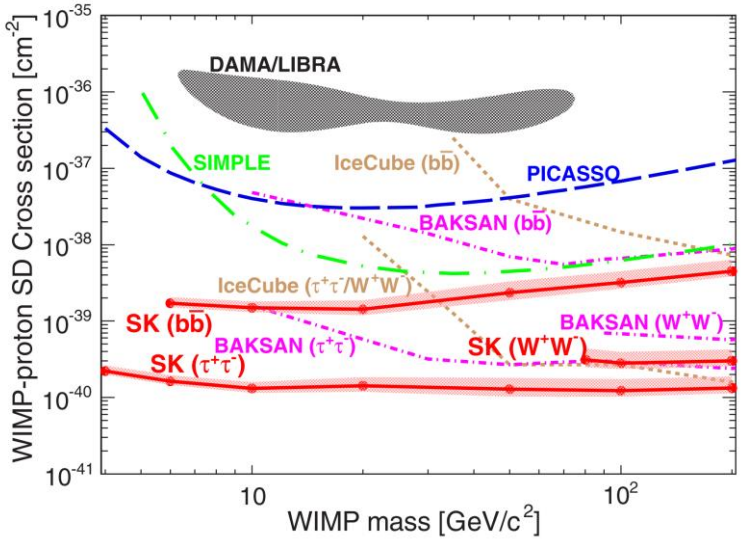


Galactic WIMPs search



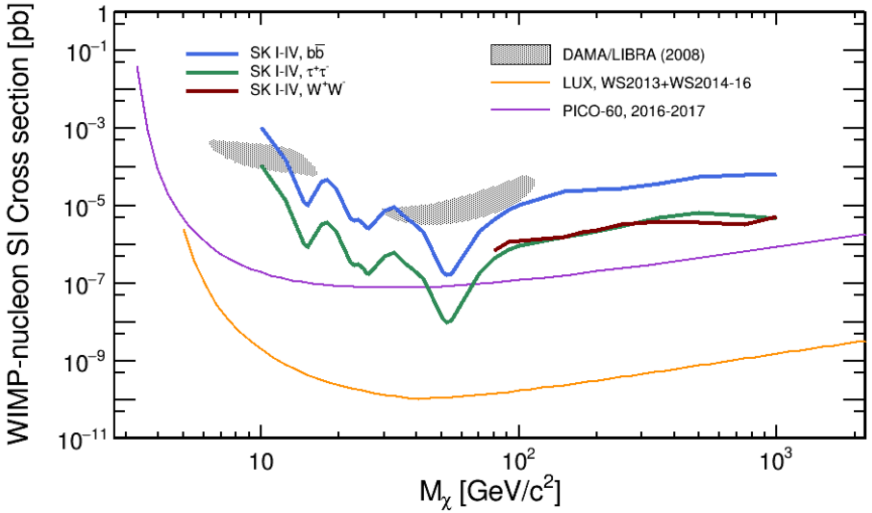
"Indirect search for dark matter from the Galactic Center and halo with the Super-Kamiokande detector", Phys. Rev. D 102, 072002 (2020)

Solar WIMPs search



"Search for Neutrinos from Annihilation of Captured Low-Mass Dark Matter Particles in the Sun by Super-Kamiokande", Phys. Rev. Lett. 114, 141301(2015)

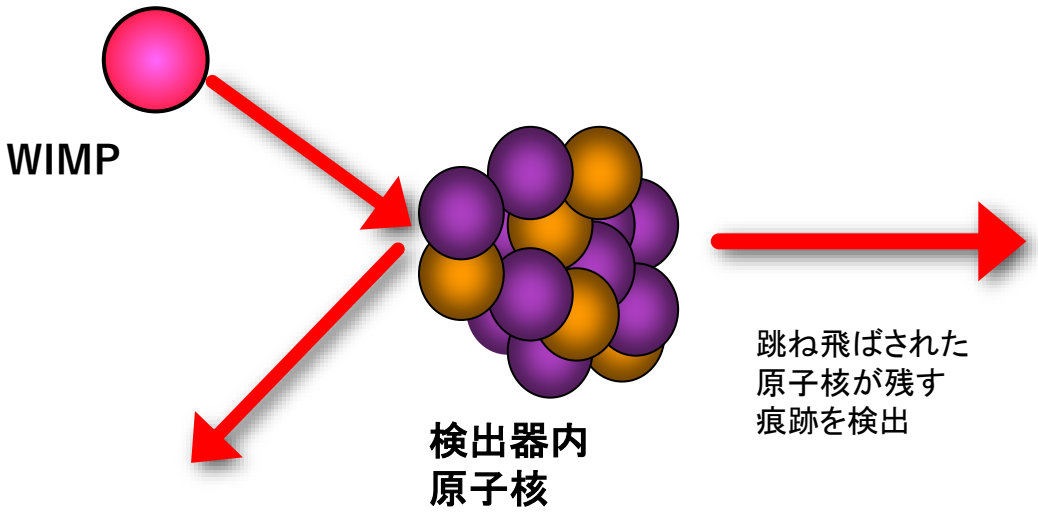
Earth WIMPs search

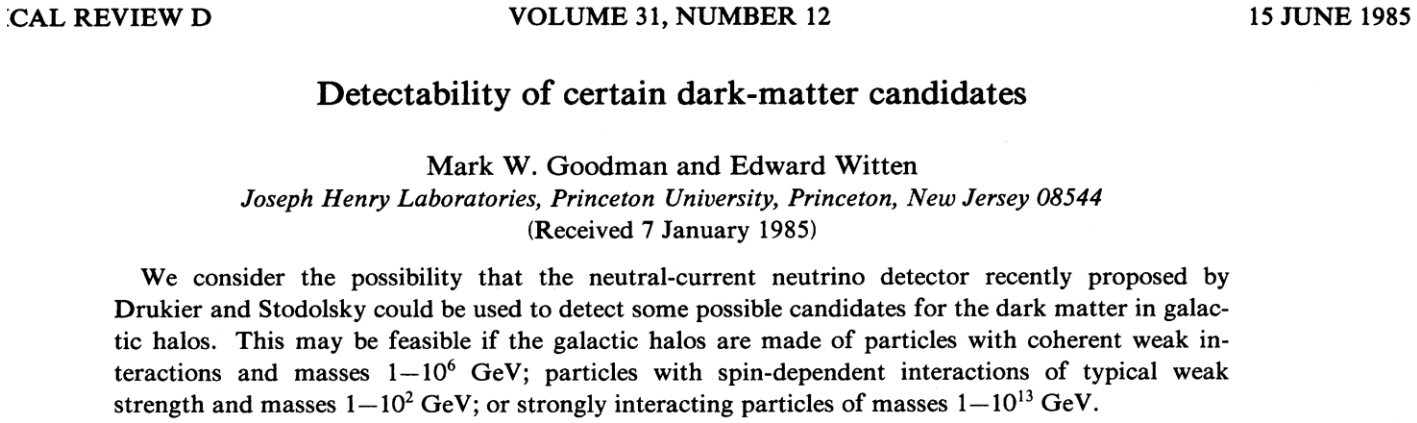


Katarzyna Frankiewicz, PhD thesis, National Center For Nuclear Research, Apr. 2018.

直接検出 (本講義のテーマ)

- 検出器内にきた暗黒物質と通常の物質とが反応するのをとらえる。
- 最初の発見のみならず、その後の暗黒物質の性質を詳細研究する上で直接検出は魅力的。
  (例: 原子核種による反応断面積の違い、スピンとの結合の研究等。)





CAL REVIEW D VOLUME 31, NUMBER 12 15 JUNE 1985

Detectability of certain dark-matter candidates

Mark W. Goodman and Edward Witten
Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544
(Received 7 January 1985)

We consider the possibility that the neutral-current neutrino detector recently proposed by Drukier and Stodolsky could be used to detect some possible candidates for the dark matter in galactic halos. This may be feasible if the galactic halos are made of particles with coherent weak interactions and masses $1-10^6$ GeV; particles with spin-dependent interactions of typical weak strength and masses $1-10^2$ GeV; or strongly interacting particles of masses $1-10^{13}$ GeV.

- 検出器に付与されるエネルギー分布で質量が決まる。
- 反応頻度から相互作用の強さが求まる。

直接検出におけるWIMPsの反応レート

反応レート [個/s] = 反応断面積 [cm²] × フラックス [個/cm²/s]

$$R = \sigma_{\chi-\mathrm{N}} \times n\langle v\rangle$$
$$= \sigma_{\chi-\mathrm{N}} \times \rho \int \vec{v} f(\vec{v}) d\vec{v}$$

$\sigma_{\chi-\mathrm{N}}$: 暗黒物質と原子核の断面積
ρ : 暗黒物質の密度
$f(\vec{v})$: 暗黒物質の速度分布

フラックス を出すための暗黒物質の密度は、回転曲線の観測等から太陽付近で **ρ ~0.3 GeV/cm³** 、速度分布は Maxwell-Boltzmann 分布を仮定し以下で表す。

$$f(\vec{v}) = \frac{1}{\pi^{3/2}\sigma^3} e^{-|\vec{v}|^2/\sigma^2}$$

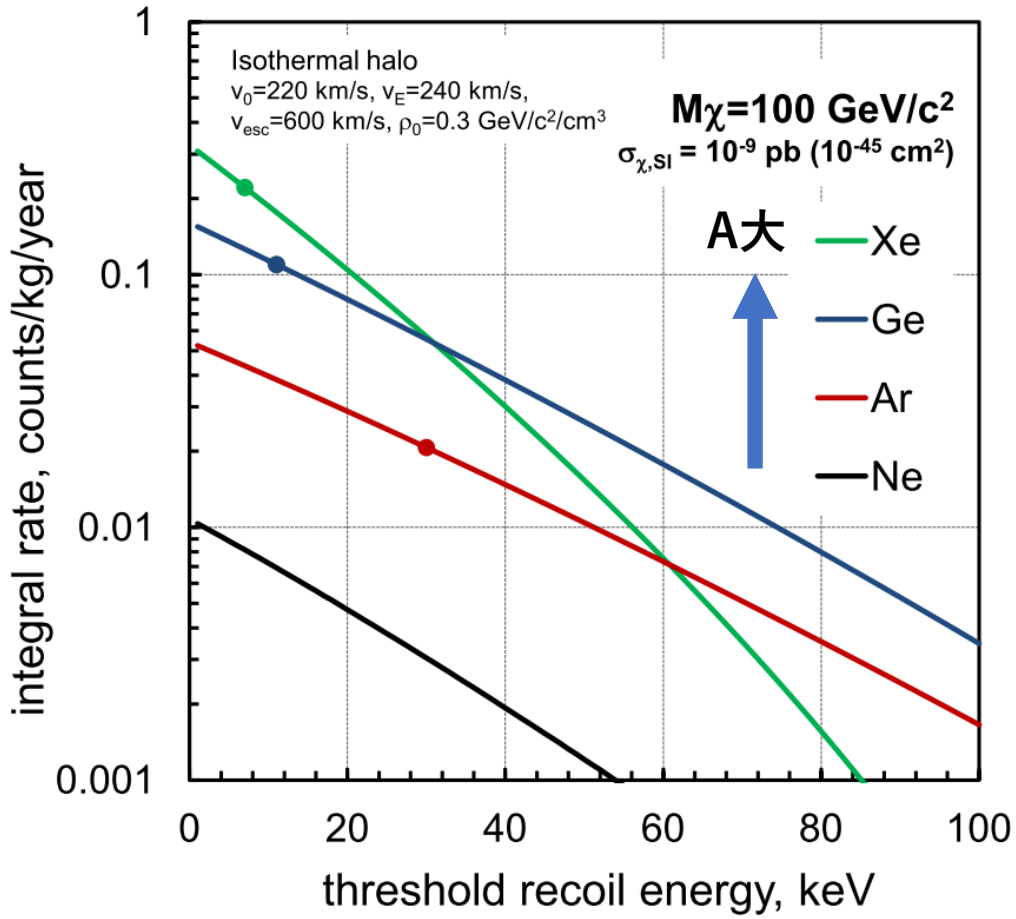
反応断面積は、スピンに依存しない(Spin Independent, SI) 項とする(Spin Dependent, SD) 項からの寄与が主となる。

$$\sigma_{\chi-\mathrm{N}} = 4G_{\mathrm{F}}^2 \left(\frac{M_\chi M_{\mathrm{N}}}{M_\chi + M_{\mathrm{N}}}\right)^2 (C_{\mathrm{N}}^{\mathrm{SI}} + C_{\mathrm{N}}^{\mathrm{SD}})$$

SUSY WIMPs を仮定すると

- SI項: $C_{\mathrm{N}}^{\mathrm{SI}} \propto A^2 \sigma_{\chi-\mathrm{n}}$
  → 原子核の質量数Aの二乗に比例
- SD項: $C_{\mathrm{N}}^{\mathrm{SD}} \propto (a_p\langle S_p\rangle_N + a_n\langle S_n\rangle_N)^2 \frac{J+1}{J}$
  → スピンの大きな原子核が有利

WIMPsと原子核との弾性散乱レート



V. Chepel and H. Araujo, arXiv:1207.2292

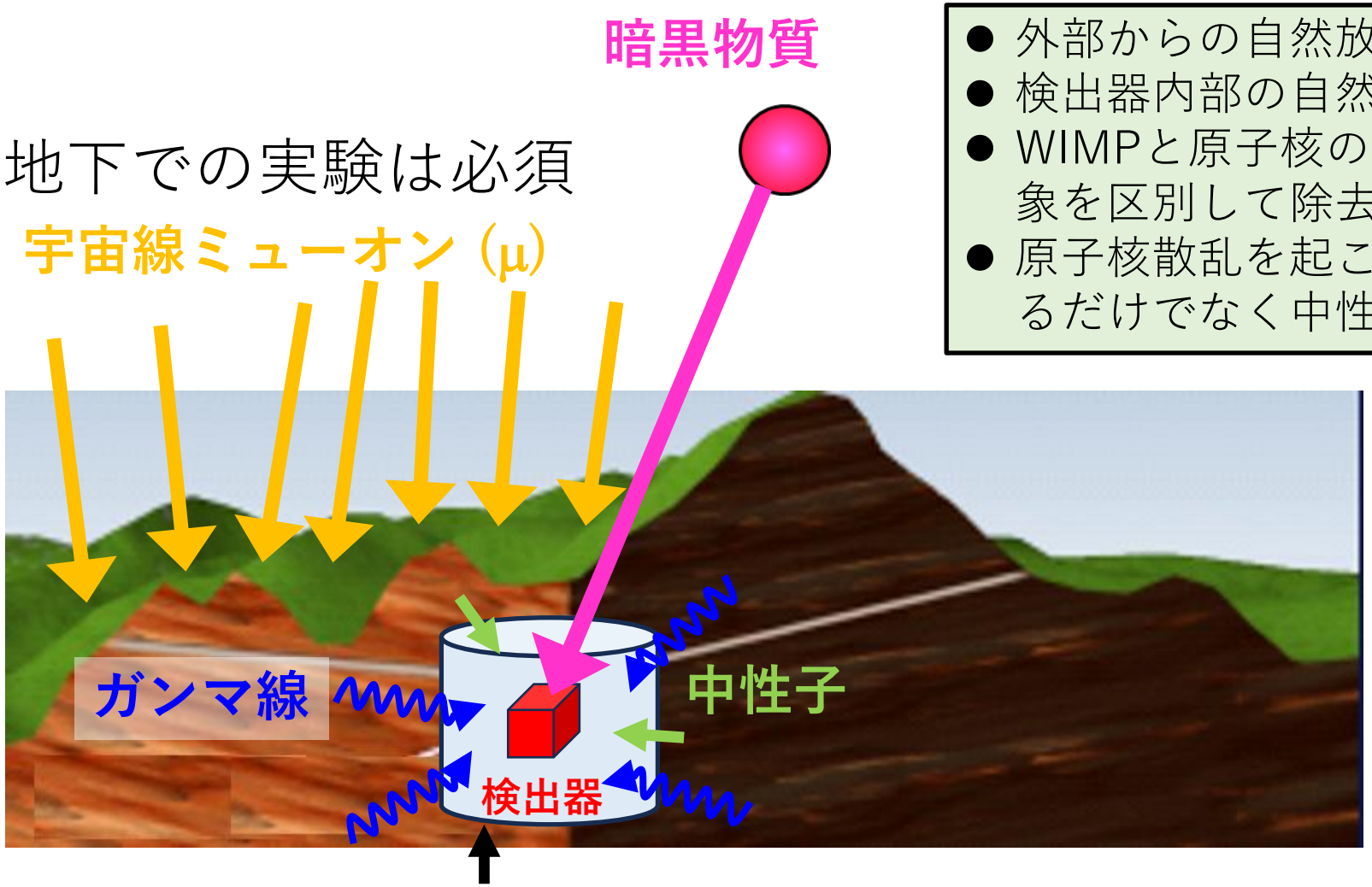
- SI 相互作用を考えて、あるエネルギーしきい値に対する積分された反応レートを計算すると左図のようになる。
- 検出器に付与される散乱エネルギーが~10 keV と非常に小さく特徴的なピーク構造を持たない。
- レートそのものが非常に小さい (< 1 事象/kg/年@10^{-45} cm^2)
- 質量数Aの二乗に比例するので、Aの大きな原子核が有利。

特徴のないスペクトル構造と極端に小さいレートから、自然界のバックグラウンド事象の影響を極限まで下げる必要がある。

バックグラウンド事象を極限まで下げる

- 外部からの自然放射線の遮蔽
- 検出器内部の自然放射線源を除去
- WIMPと原子核の散乱を見る場合は、電子散乱事象を区別して除去
- 原子核散乱を起こす中性子は、シールドで低減するだけでなく中性子検出器で veto する。

地下での実験は必須



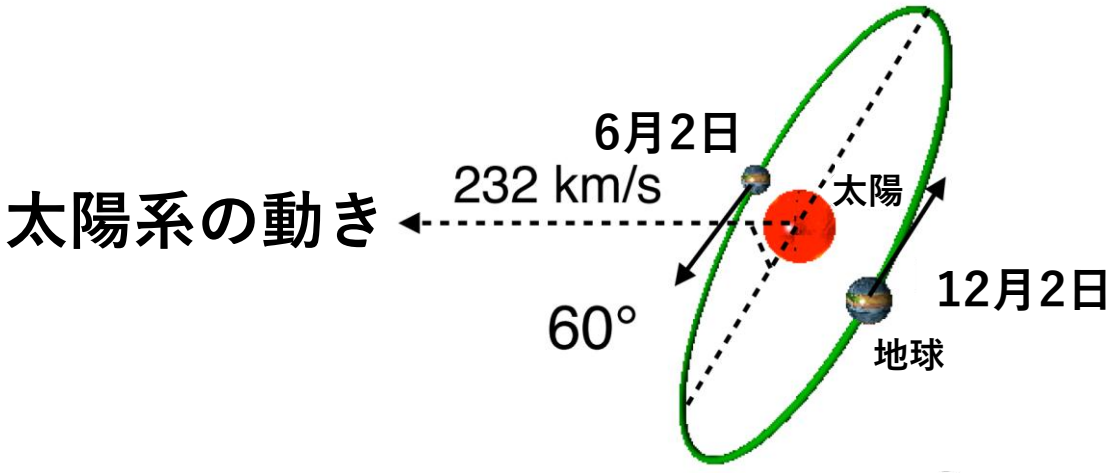
岩盤中の自然放射能(U/Th, K) からの遮蔽も必須
昔は鉛シールドが多かったが最近は水タンクが主流

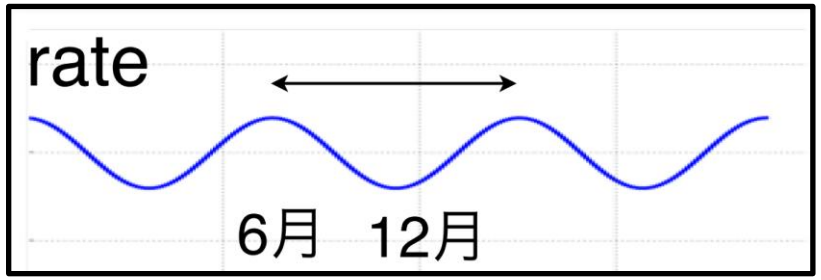
想定されうる自然放射線等による事象を極限まで減らしても、まだ何か信号が残っていれば暗黒物質？

全てのバックグラウンドを評価し尽くせているのか？という疑問が常に残ってしまう。

バックグラウンド事象に起因しない信号をとらえる

最もシンプルな暗黒物質ハローモデルでは、暗黒物質は四方・八方にランダムに飛び回っている。
一方、我々太陽系は、銀河中心に対して秒速約230km で運動しており、さらに地球は太陽の周りを公転しているので、銀河中心に対する地球の相対速度は1年周期で変動している。
その速度の変動が、暗黒物質観測量の変動をもたらす。

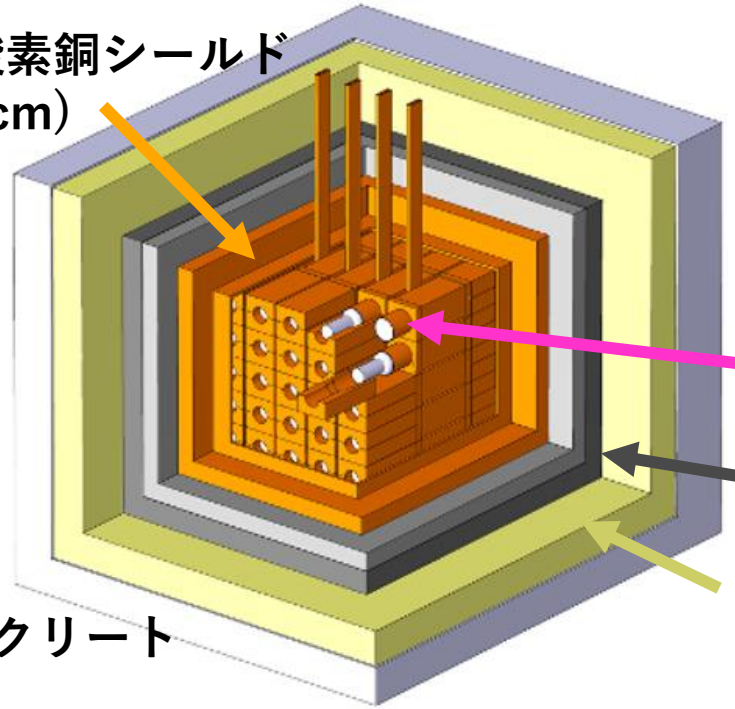




単位時間あたりに観測される個数が
1年周期で変動すると期待される。
6月2日に最大となり、12月2日に最少となる。

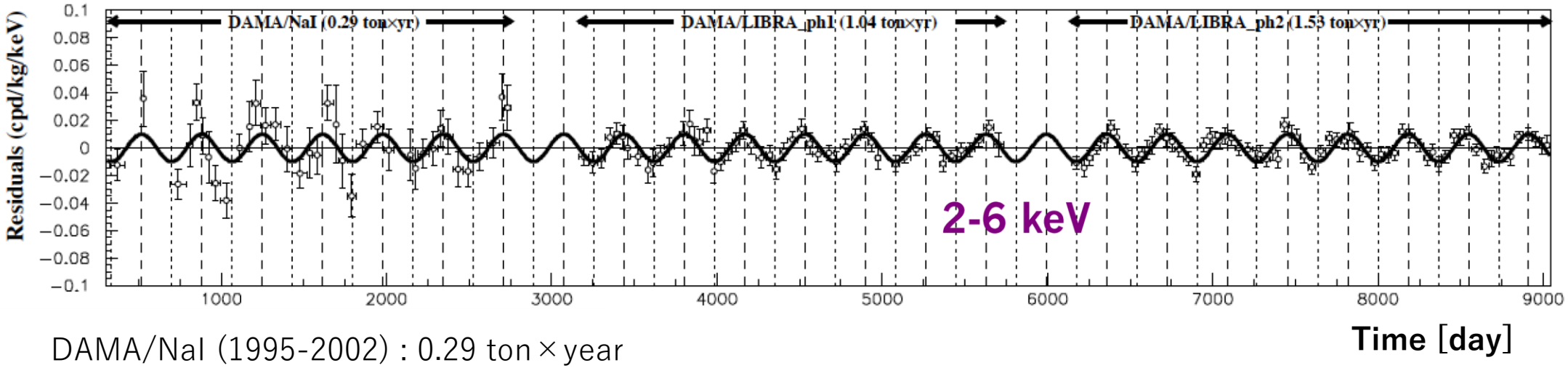
このような変動を、検出器周辺にある放射性不純物等の影響で説明することは困難なため、季節変動は暗黒物質特有の信号として、大きな説得力をもつ。

DAMA/LIBRA



- **NaI 無機結晶シンチレータ**を用いて、イタリアの地下実験室で測定。
- 22年間(実質)の測定で、季節変動する信号を 13.7σ の有意度で観測。

↓1995年から2019年10月までの結果



DAMA/NaI (1995-2002) : 0.29 ton×year
DAMA/LIBRA Phase-I (2003/9～2010/9) : 1.04 ton×year
DAMA/LIBRA Phase-II (2010/12～2019/10): 1.53 ton ×year

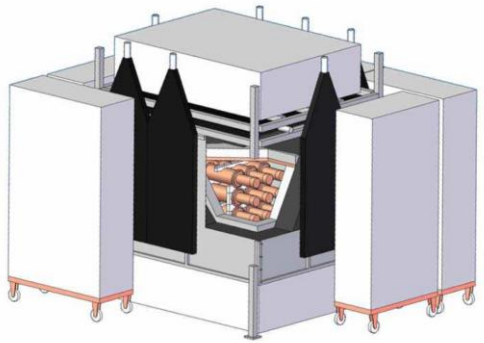
暗黒物質に対する制限

- DAMA/LIBRA が測定している季節変動信号の原因はまだわかってない。

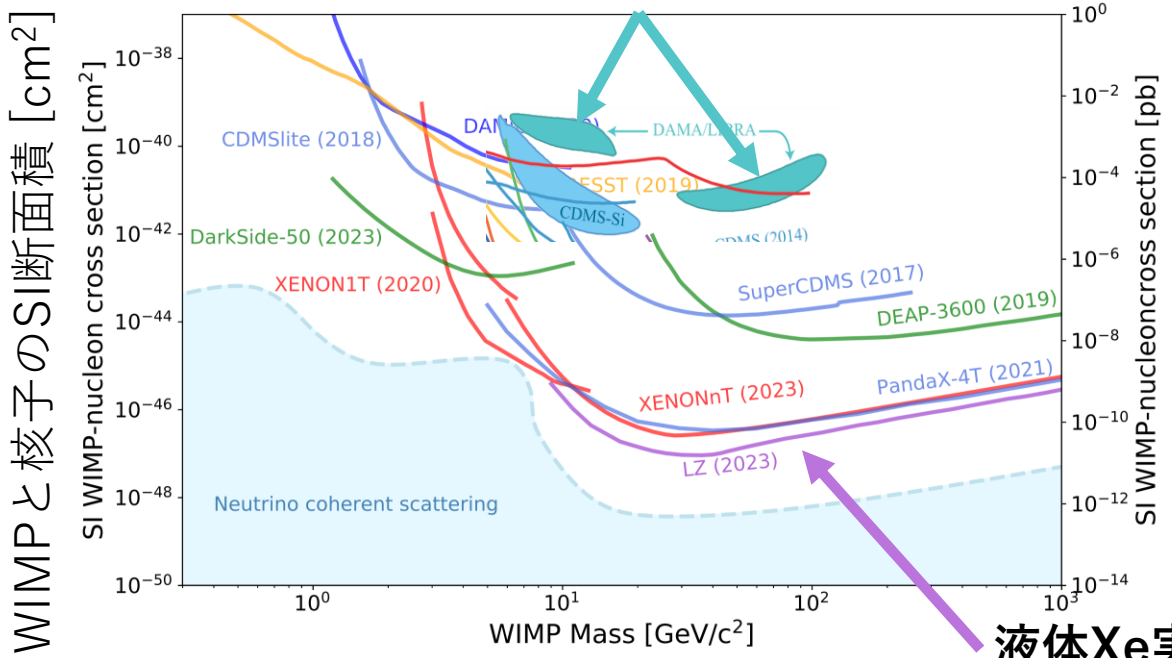
- 季節変動している信号が WIMPs による原子核反跳事象だと仮定して質量と反応断面積を求めると 10〜100 GeV/c^2, 10^{-41}〜10^{-40} cm^2 となり、NaI以外の他の直接検出器実験ですでに何桁も否定されている。
- NaI に特有の信号？

→ 同じ NaI を用いた実験 (ANAIS-112, COSINE-100等)
が世界各地で行われている。今のところ、~3σ で否定的な結果。

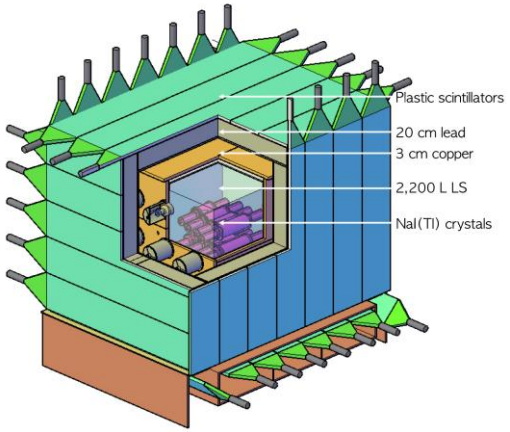
ANAIS-112 (2017/8〜)
スペイン LSC



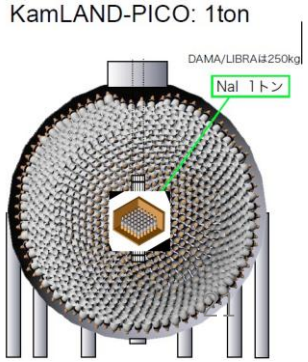
DAMA実験から許される領域



COSINE-100 (2016/9〜)
韓国 YangYnag



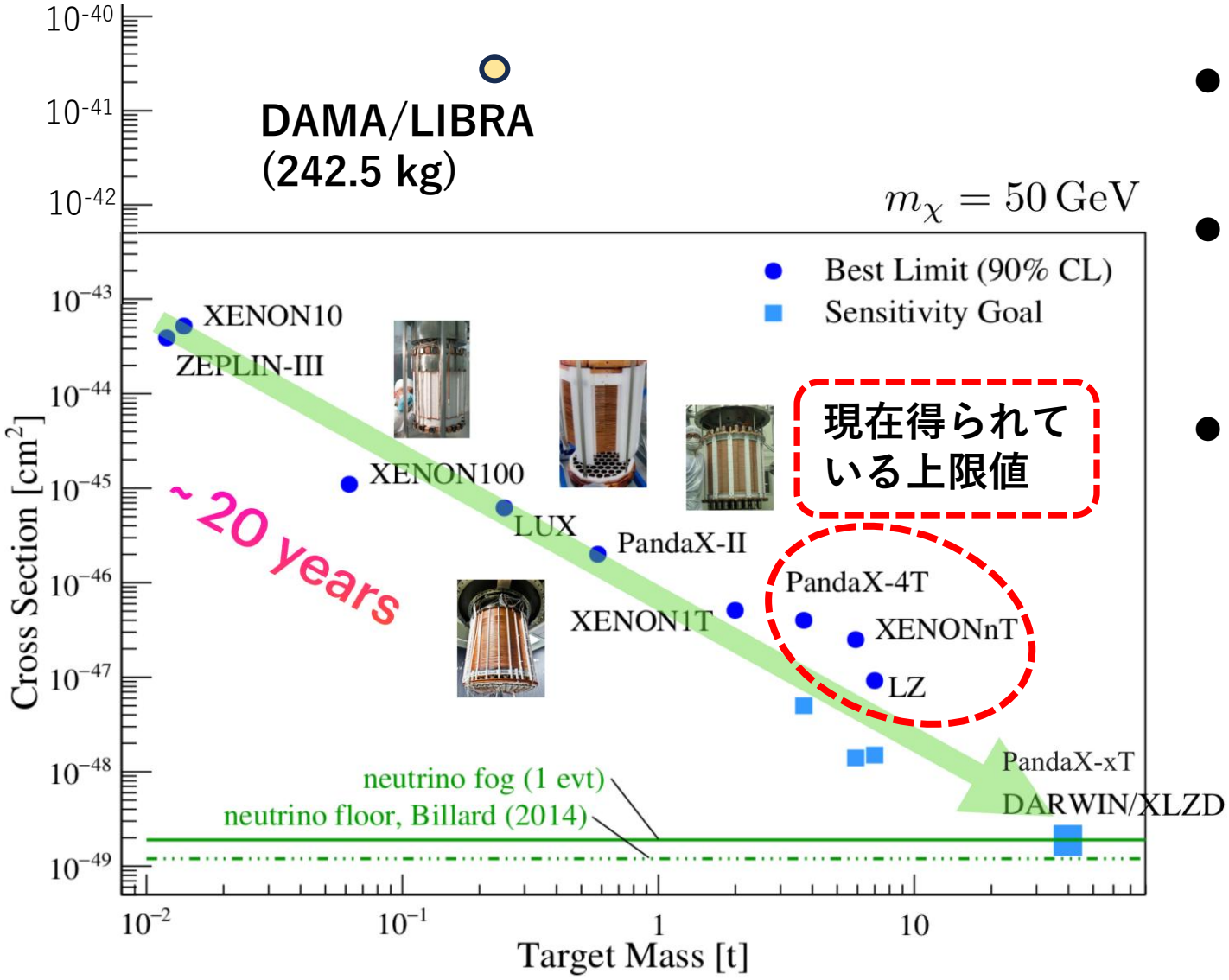
PICOLON (計画中)
日本 神岡



液体Xe実験でこの線より上の断面積はすでに否定されている

"The Review of Particle Physics (2014)", Particle Data Group, Phys. Rev. D 110 (2024)

暗黒物質に対する感度の進化



Snowmass 2021, arXiv:2203.08084, adapted by Baudis 2024

- 左図は、WIMPと原子核のSI相互作用を利用した直接探索にもっとも良い感度を出している液体キセノン検出器の感度進化の変遷。
- 現在、50 GeV/c^2 の質量をもつ WIMPs に対して、~10^{-47} cm^2 といった上限値が得られている。

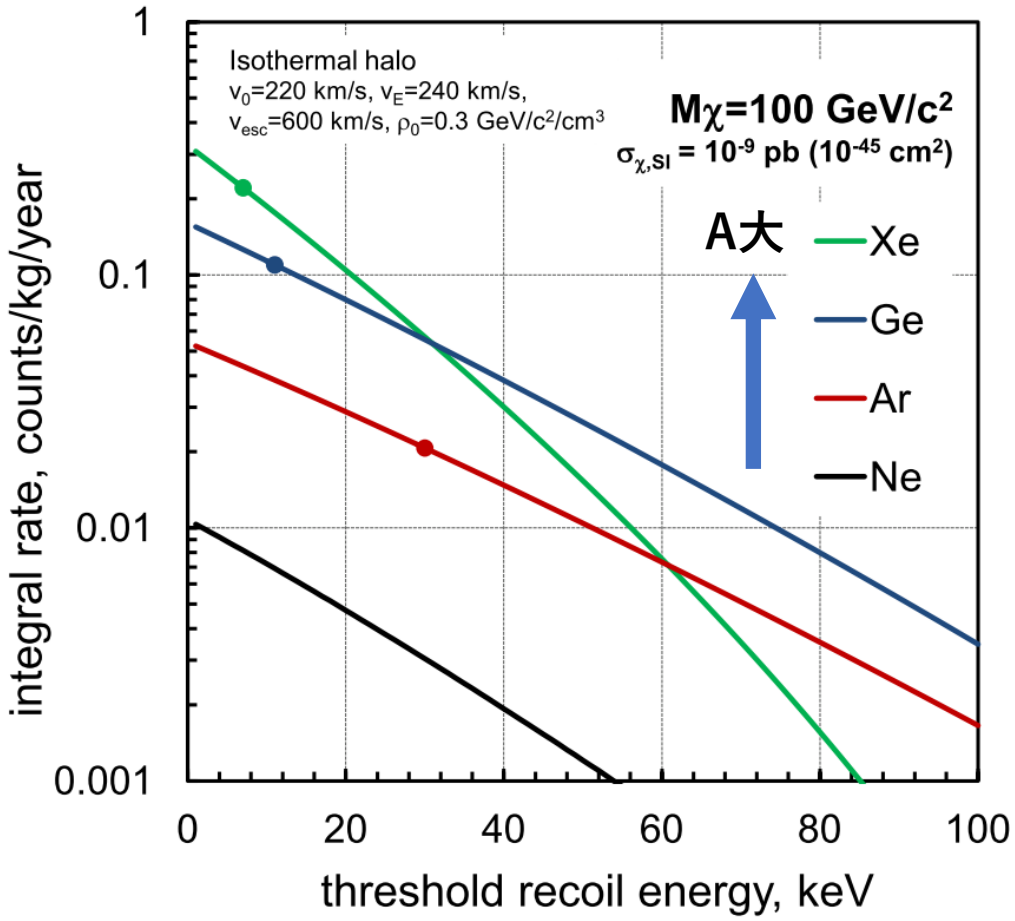
- DAMAの季節変動が受け入れられていない理由に、季節変動しない部分のバックグラウンドレベルがまだまだ高いことがある。
  - 結晶の純化が非常に難しい。
  - 自己遮蔽効果を利用しづらい。
  - 原子散乱と電子散乱事象の区別がつけられない。

  → 液体キセノンは、以上の点について優れており、大質量化・低バックグラウンド化に成功している。

液体キセノンが優れている点

液体キセノンの特性

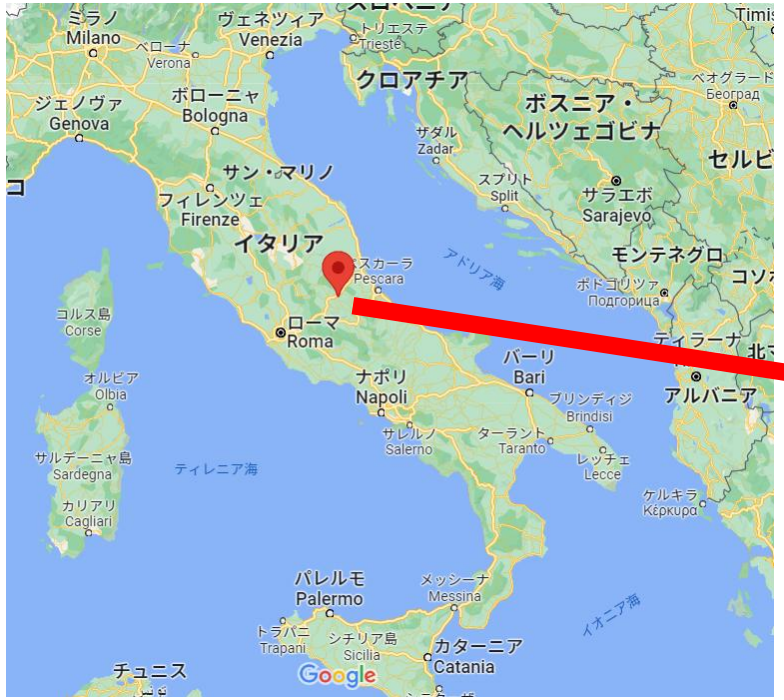
- 質量数(A)が大きい: **~131**
  → SI 相互作用を考えると $\sigma_{\chi-\mathrm{N}} \propto A^2$
- 発光量が多い: **~42 photons / keV**
  → 代表的な無機シンチレータのNaI と同程度
- 高い密度: **~3 g/cm³**
  → 大質量をコンパクトな検出器で実現可能
- 発光波長: **175 nm**
  → PMTで直接検出できる
- 低バックグラウンド実現の条件が良い
  - 長寿命の放射性同位体がない
  - 液体なので循環させて純化が可能
  - 液相・気相・個相を利用しての純化も可能
  - 形状が自由なので体積・表面積比を最大化
  - 事象発生位置を求めて自己遮蔽能力を活用

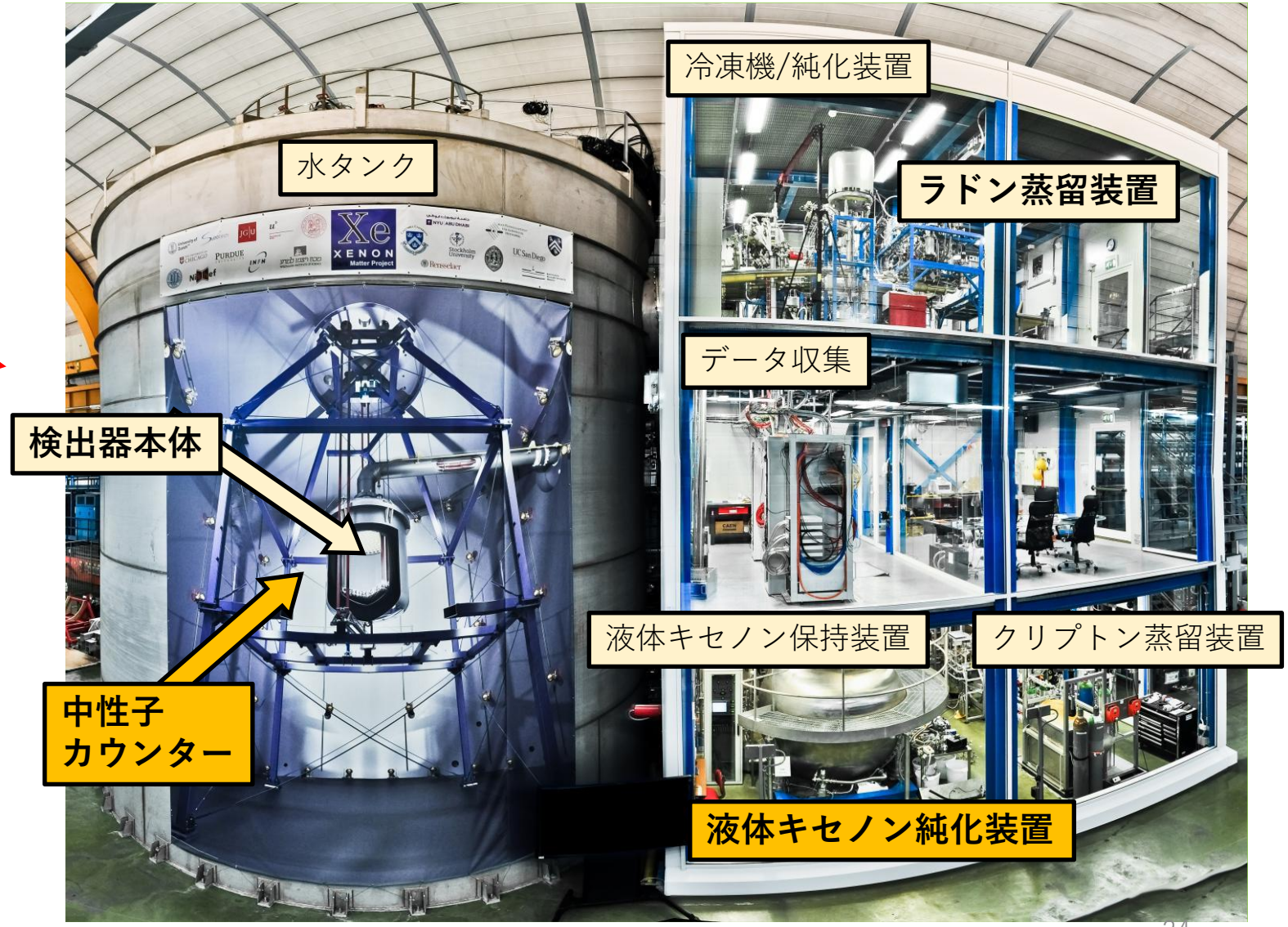


Expected signal rate (counts/kg/year)
V. Chepel and H. Araujo, arXiv:1207.2292

XENONnT 検出器

世界最高感度レベルで暗黒物質探索を遂行中の大質量液体キセノン検出器の一つ

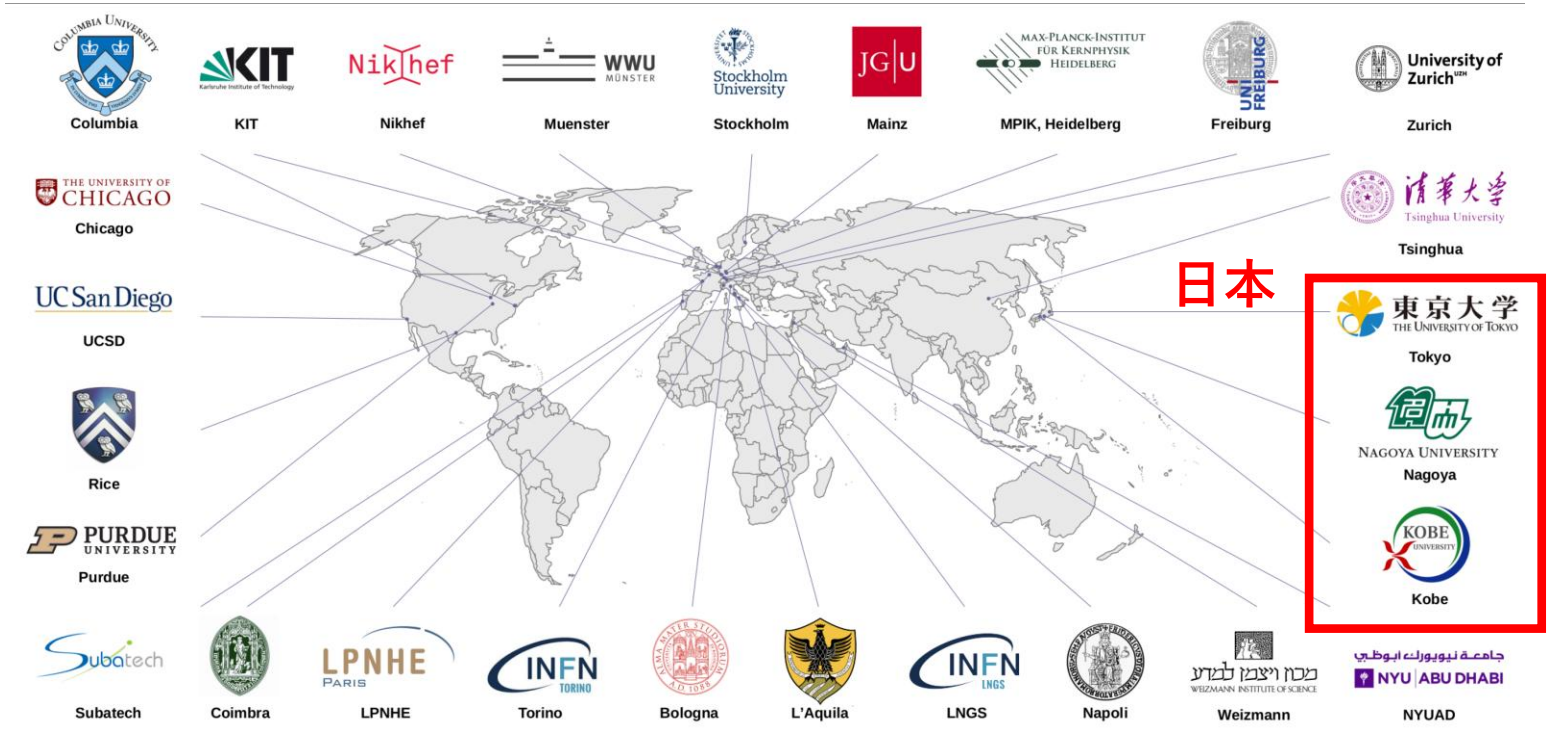




● イタリア・グランサッソ国立研究所 Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) にある地下実験室にある

XENON collaboration

- 国際共同実験 (180 scientists, 29 institution)
- 日本からは 18名 (東大宇宙線研7名、カブリIPMU4名、名古屋大5名、神戸大2名) が参加 (2025/3現在)

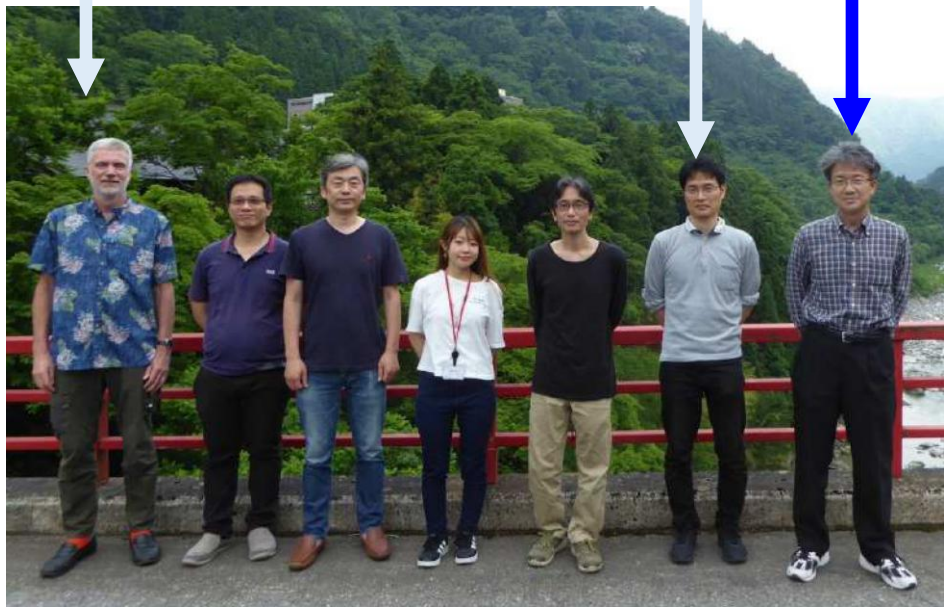


東京大学のXENONグループ

IPMU・Kai先生

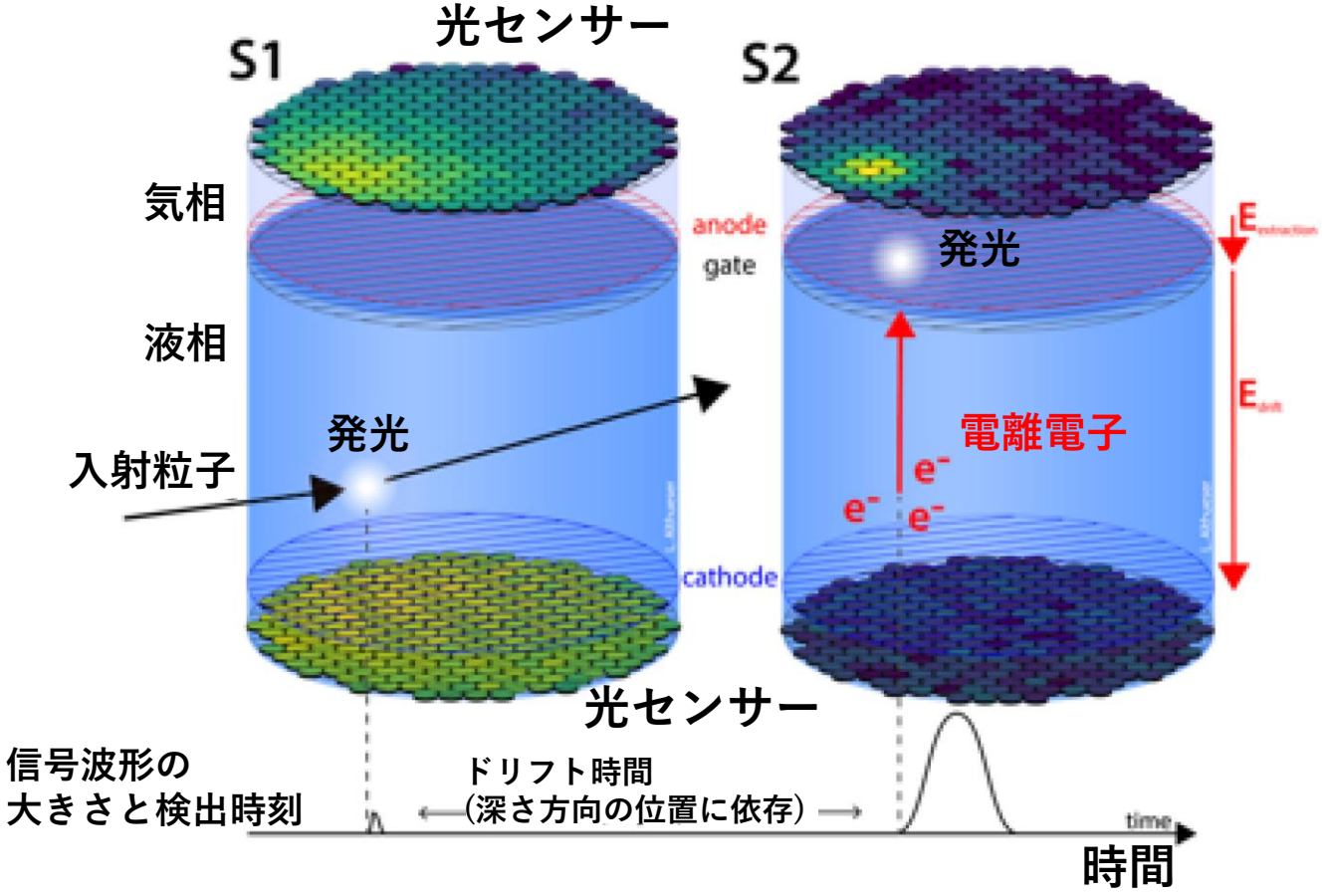
ICRR・竹田

ICRR・森山先生

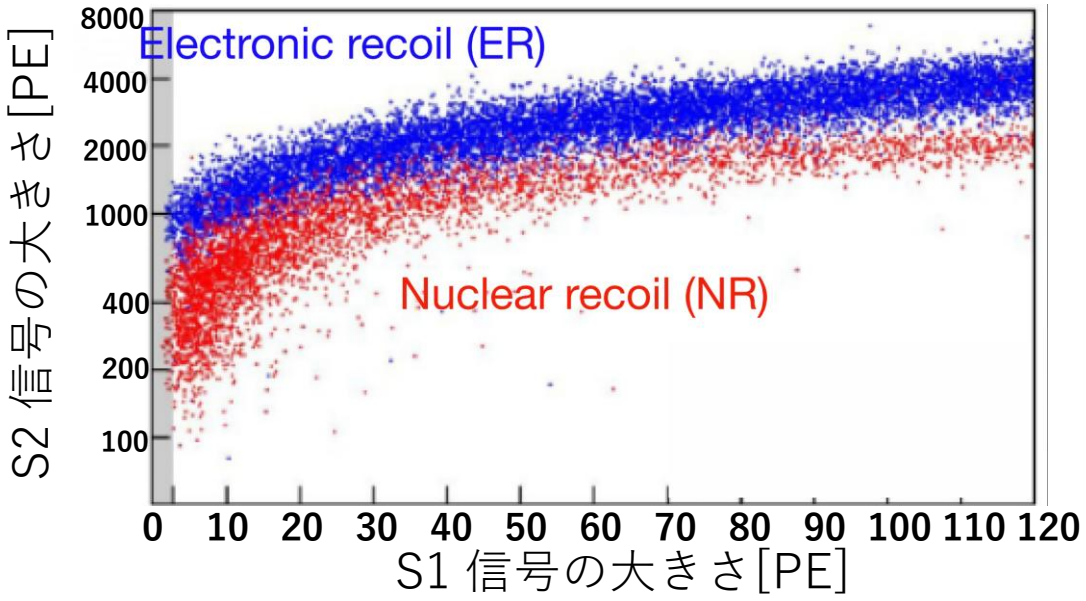


検出器の原理

- **液体キセノンシンチレータ**を液体・気体の2相にして用いている。
- シンチレーション光だけでなく、反応で生じた電子を電場で集めて読み出すタイムプロジェクションチェンバー(TPC)としての機能も持たせている。
  - 事象ごとに**シンチレーション光(S1)**と**電離信号(S2)**の両方を検出する。
  - 電離信号も、気相に引き出された電子が電極付近で放出する比例蛍光を光センサーで検出する。

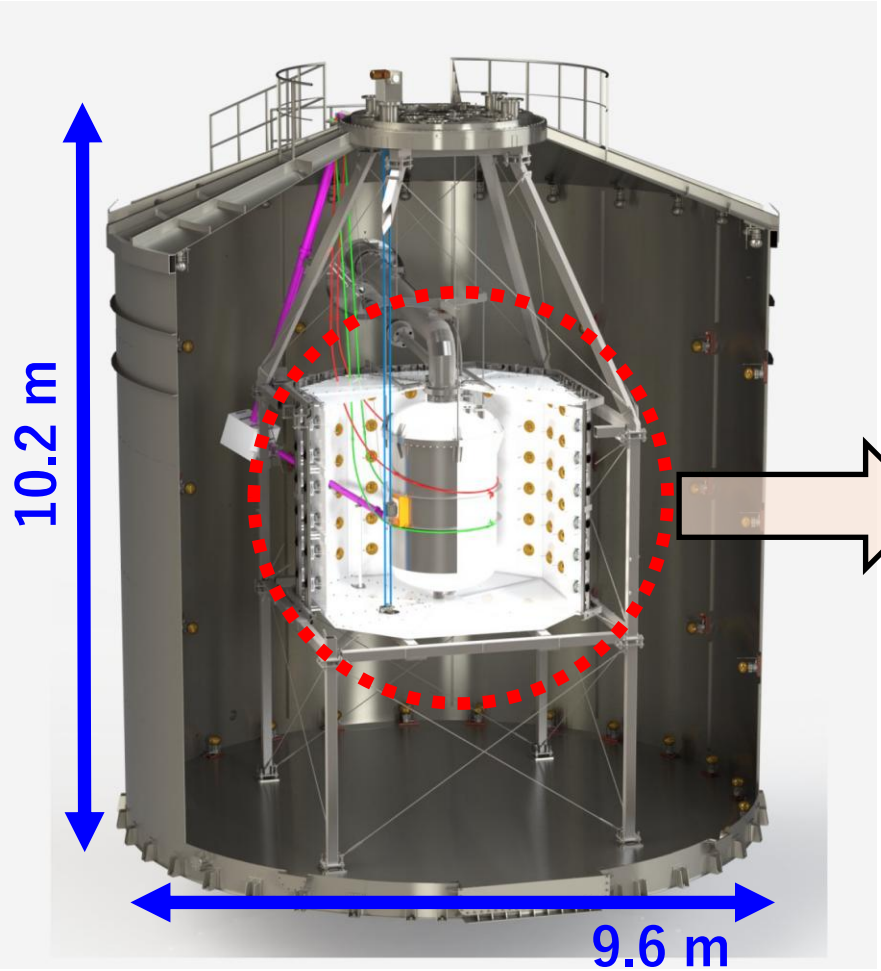


S1とS2の信号の比の違いから、暗黒物質による**キセノン原子核の反跳事象(NR)**と、主なバックグラウンド源のベータ線やガンマ線による**電子散乱事象(ER)**を識別可能。



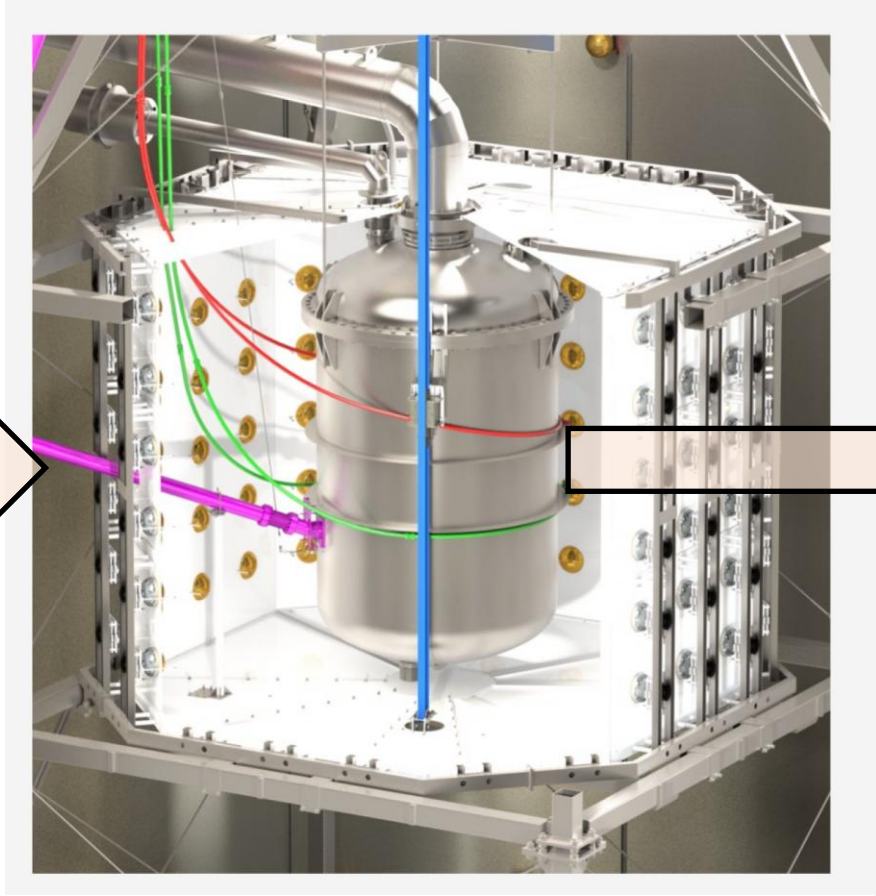
厳重な遮蔽構造

Muon Veto (MV)



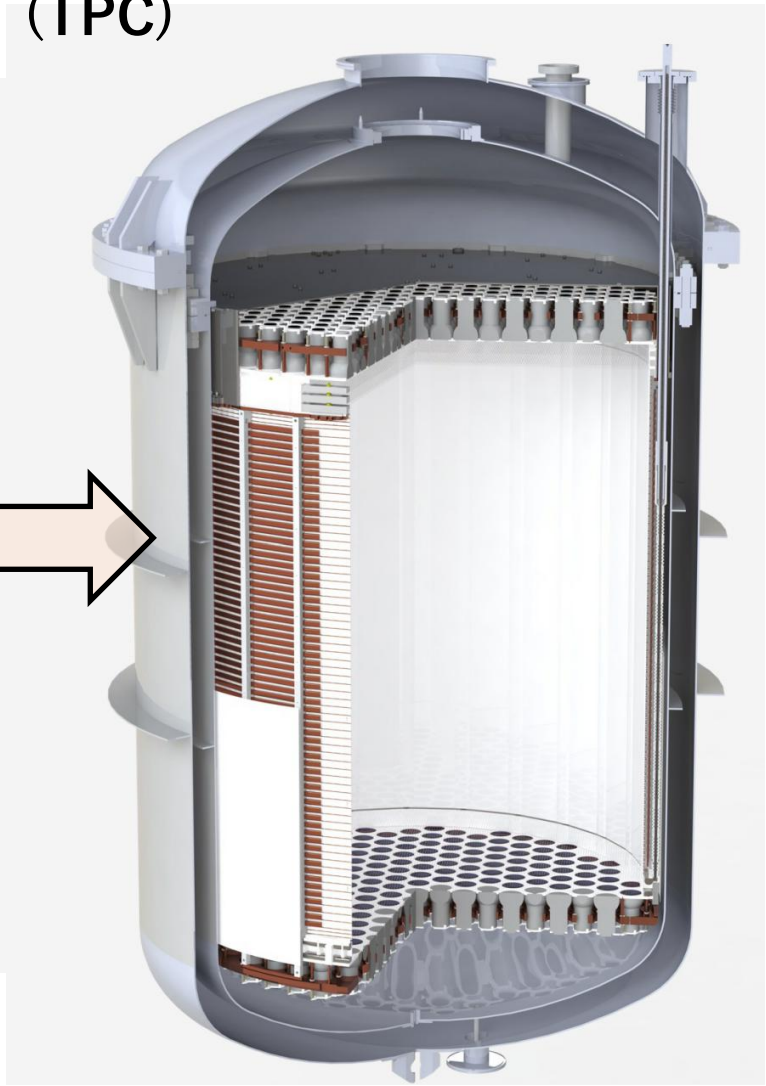
- 700トンの水チェレンコフ検出器
- 8インチPMT×84本
- ミューオンを能動的に除去

Neutron Veto (NV)



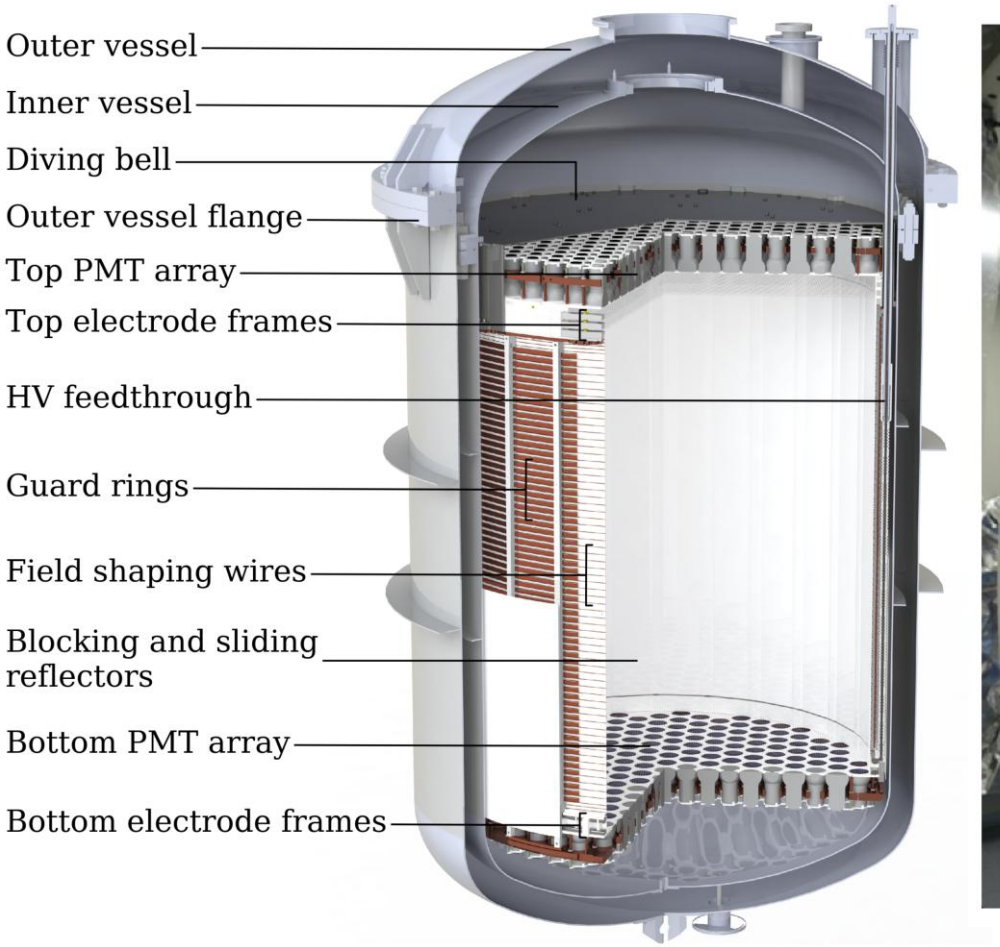
- Gd水チェレンコフ検出器
- 8インチPMT×120本
- 中性子を能動的に除去

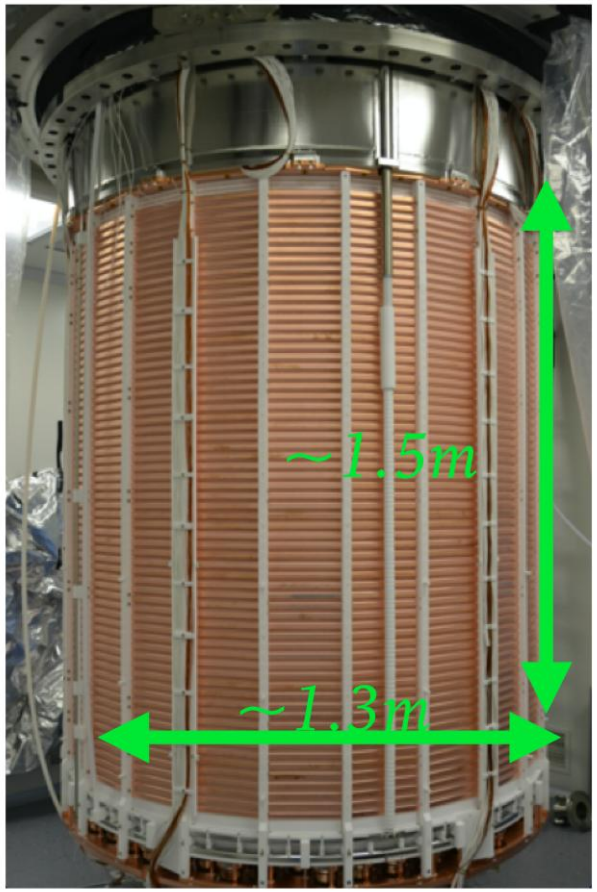
Time Projection Chamber (TPC)



検出器本体

XENONnT TPCの仕様

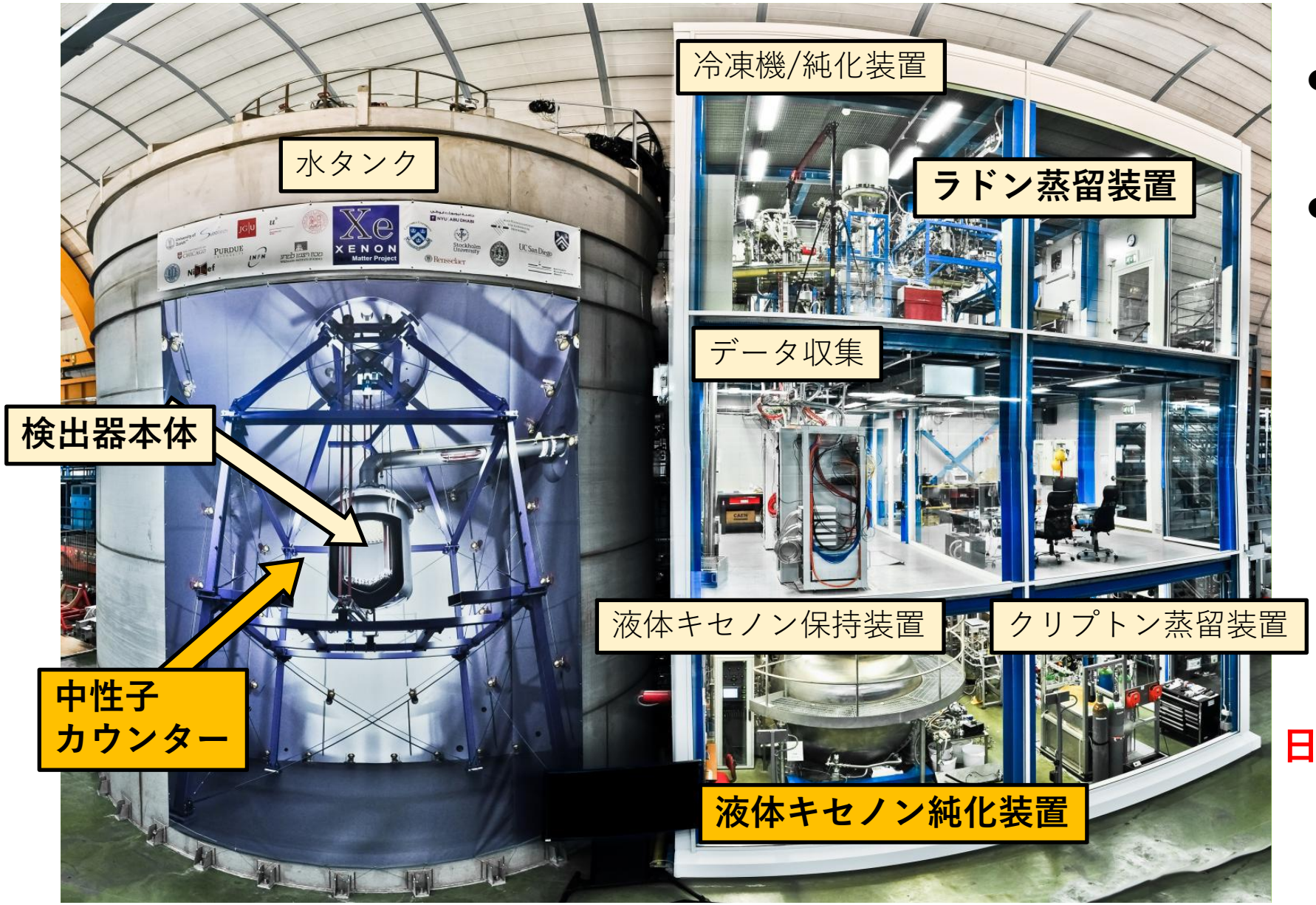




- **直径**: ~1.3 m，高さ: ~1.5 m
- **液体キセノン質量**:
  - 全体: 8.2 ton
  - 感度領域: 5.9 ton
  - 有効質量: 4 ton

  → XENON1Tの3倍以上
- **PMTs**: 253 (上面)/241 (下面)
- **ドリフト電場** (デザイン値): 200 V/cm
- **ガス中電場**: 8 kV/cm

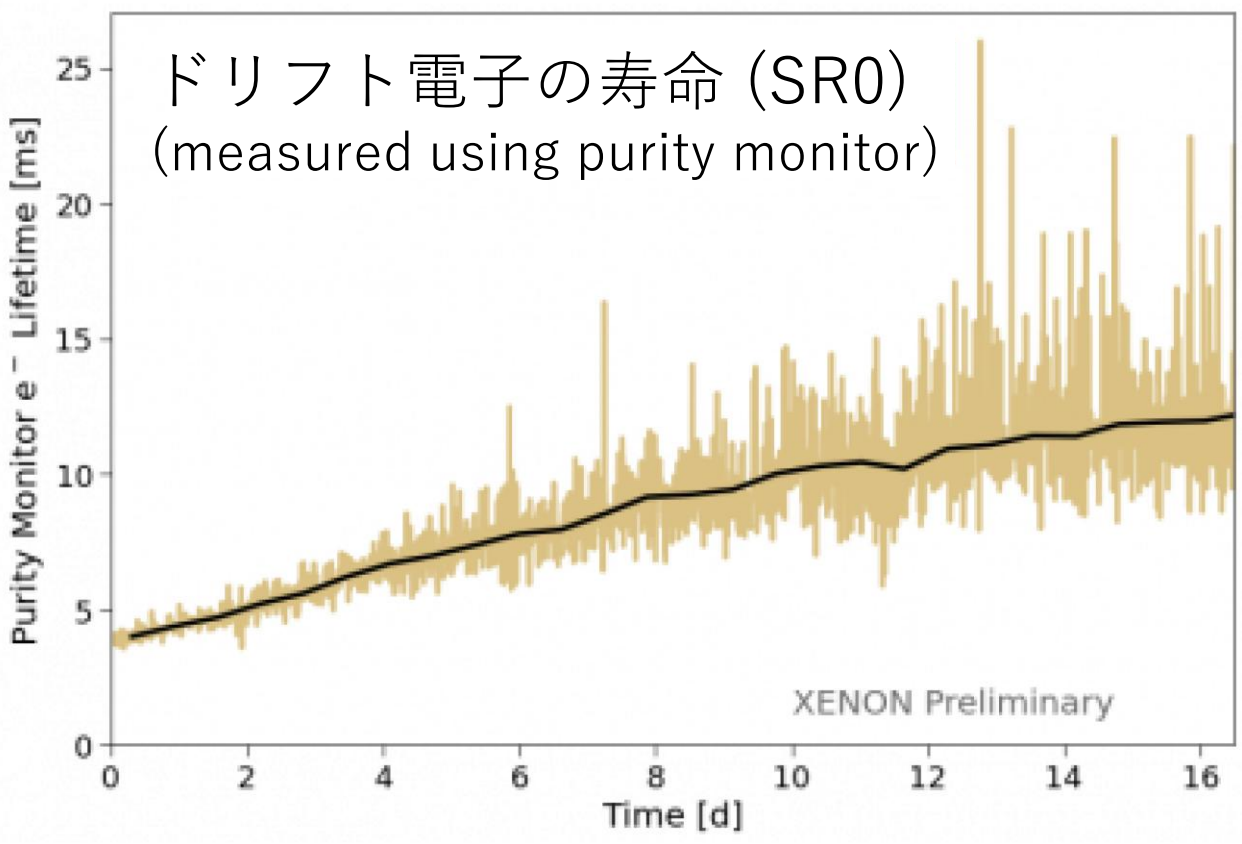
XENONnT 検出器での日本グループの主な貢献箇所



- 検出感度のある液体キセノン
  - **5.9 ton**
- XENONnTから新しく加わった装置
  - **ラドン蒸留装置:** オンライン ^{222}Rn 除去装置。
  - **液体キセノン純化装置**: 処理速度の増強 5 L/分 LXe (2500 slpm)
  - **中性子カウンター**: 120 本の PMTs 0.5%(目標) $Gd_2(SO_4)_3$

日本グループによる主な貢献部分

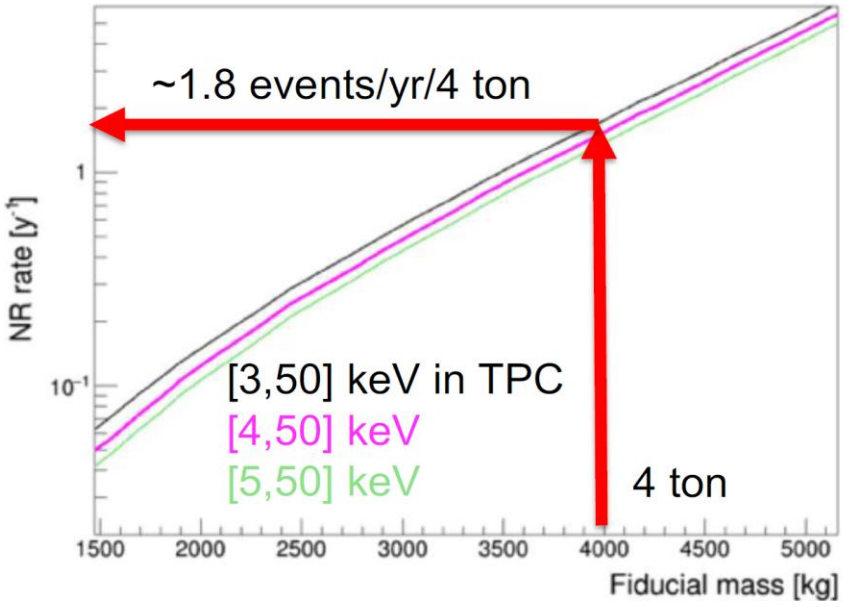
液体キセノン純化システム



- ドリフト電子は液体キセノン中に存在する electronegative 不純物により捕獲され寿命が短くなるため、純化システムで不純物を除去し、寿命を延ばすことが重要。
- ドリフト電子の寿命は、前身検出器のXENON1T時に比べて10倍以上も長くなった。
- Rn 放出レートは、XENON1T時よりも大幅に低くなった。 $< 1\mu Bq/kg$

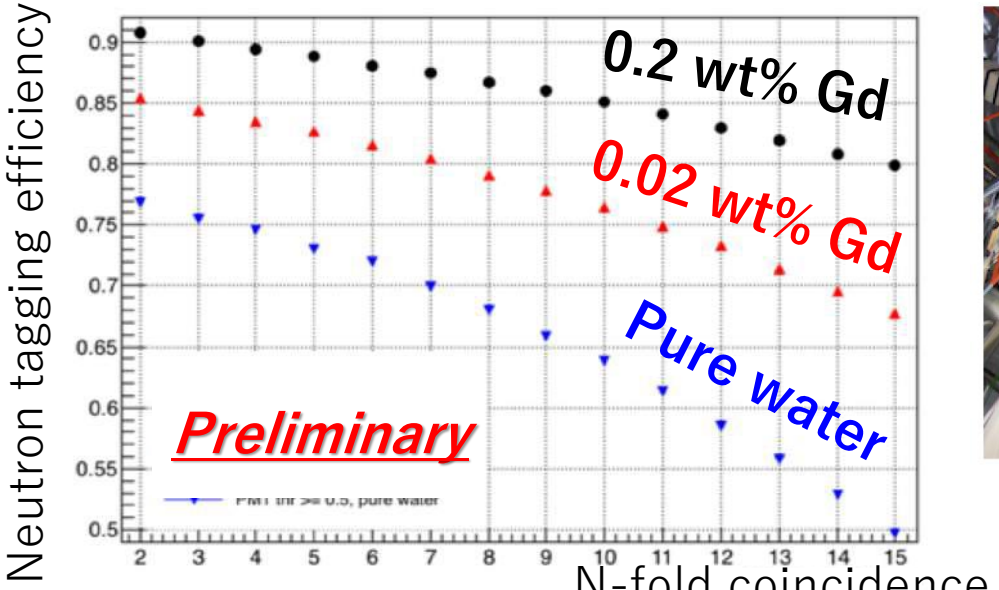
中性子カウンター (nVeto)

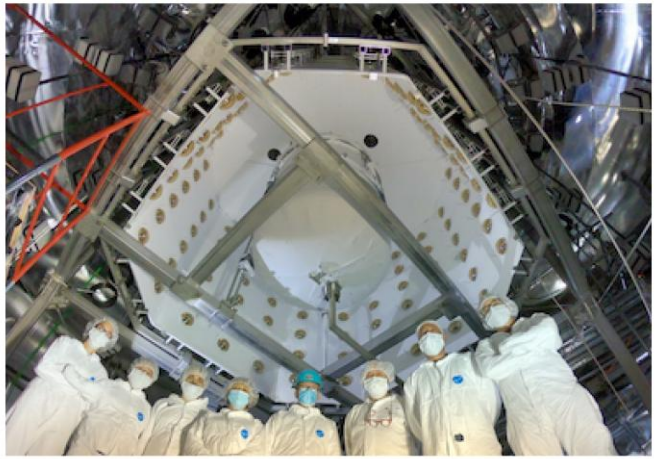
中性子バックグラウンド (neutron veto前)



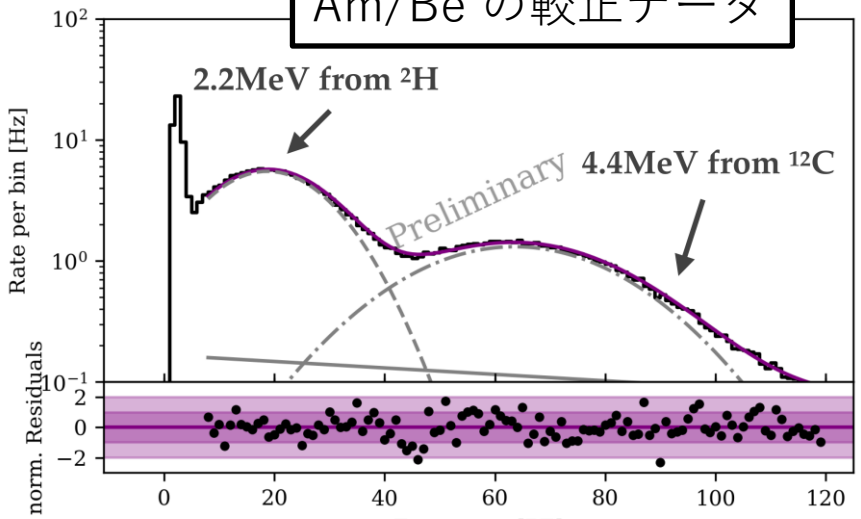
- 中性子は、NR で最も問題となるバックグラウンド事象。
- 有効質量 4トン を使った観測で、~1.8 事象/年 の中性子バックグラウンド が想定される。
- 中性子バックグラウンドの除去能力: **~80–90%**
- ガドリニウム濃度
  - 目標値: 0.5% $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$
  - 現在値: 0.05%

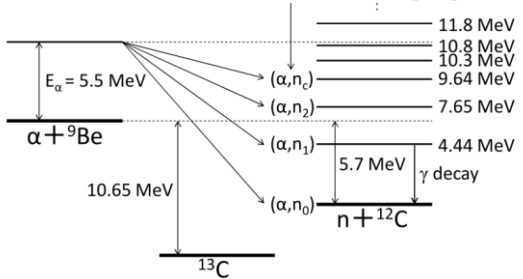
中性子の除去能力





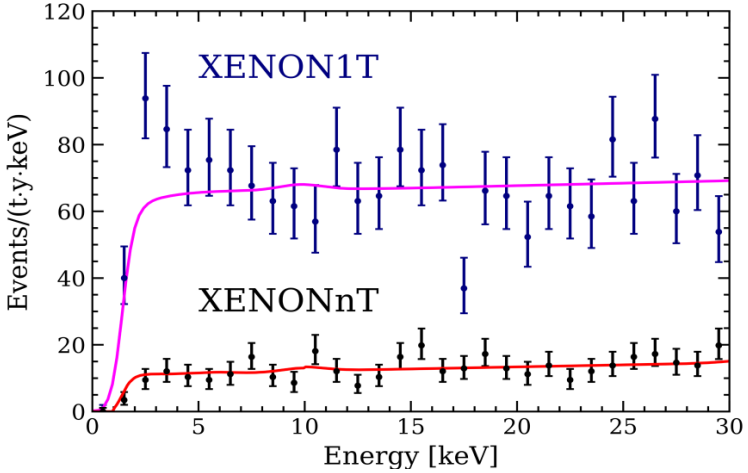
Am/Be の較正データ



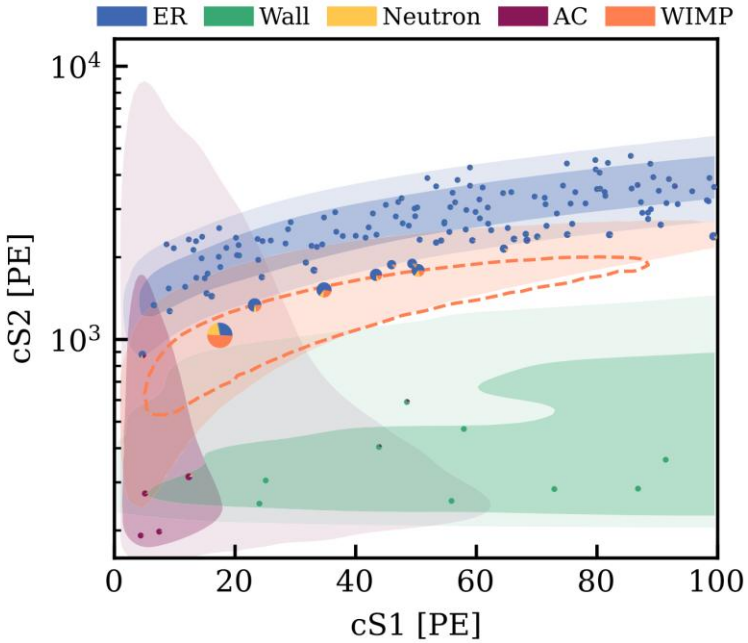


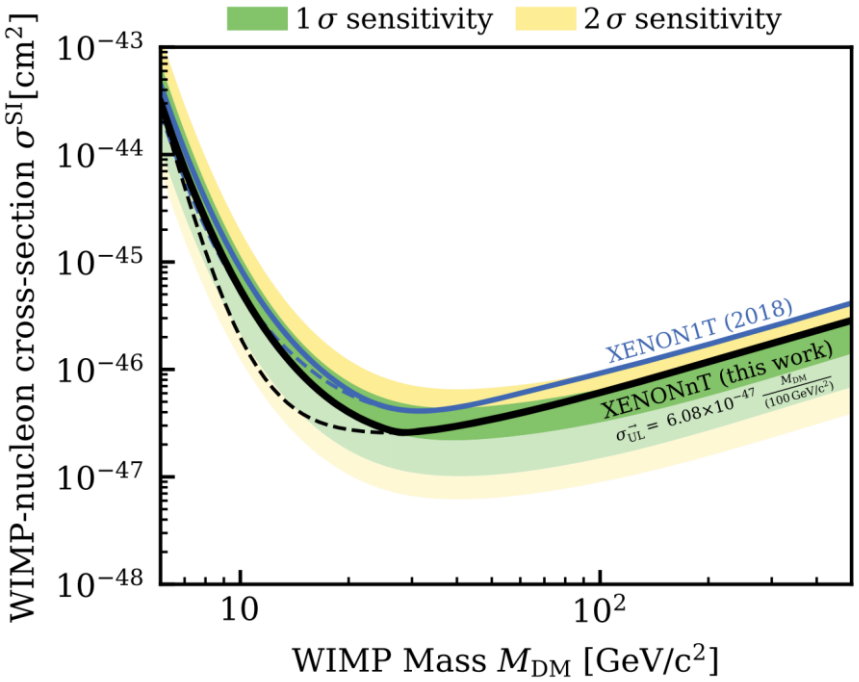
XENONnT 実験の最新結果

- SR0 データ (2021年7月6日～11月10日, 1.1 トン・年)
  - **電子散乱(ER)**: XENONnTの前身検出器である XENON1Tで見えていた低エネルギー領域の信号超過を否定。^{214}Pb (1.31 ± 0.17 μBq/kg)が主要なバックグラウンド 。
  - **核子反跳(NR)**: バックグラウンドを超えた信号超過は見られず、**質量 28 GeV/c^2 の WIMPs に対して 2.58×10^{-47} cm^2 の制限を得た。**
- さらなるデータ取得 (SR1, SR2) を経て、 ^{214}Pb バックグラウンドのさらなる低減に成功 (< 1 μBq/kg) し、検出器の改良を実施中。



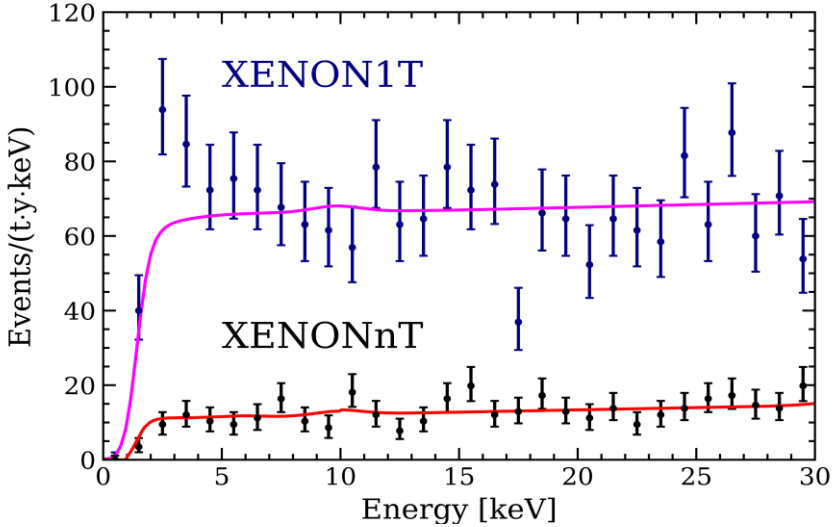
Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 161805



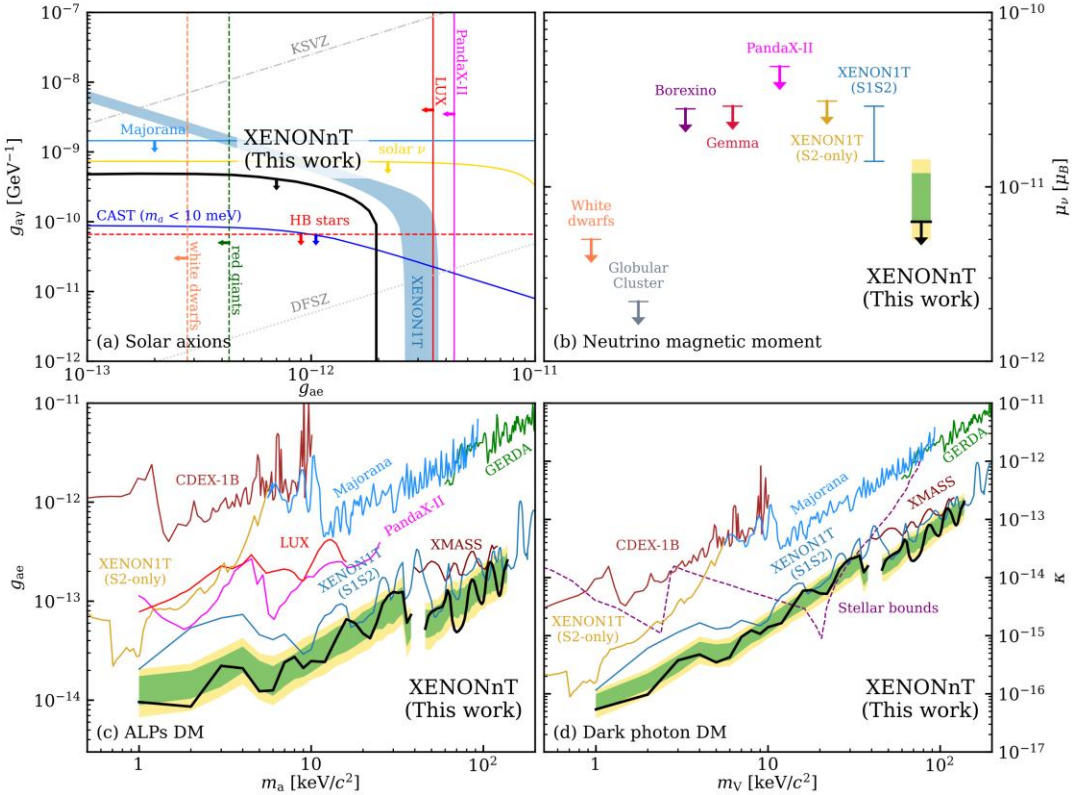


Phys Rev. Lett. 131 (2023) 041003

電子散乱の超過信号

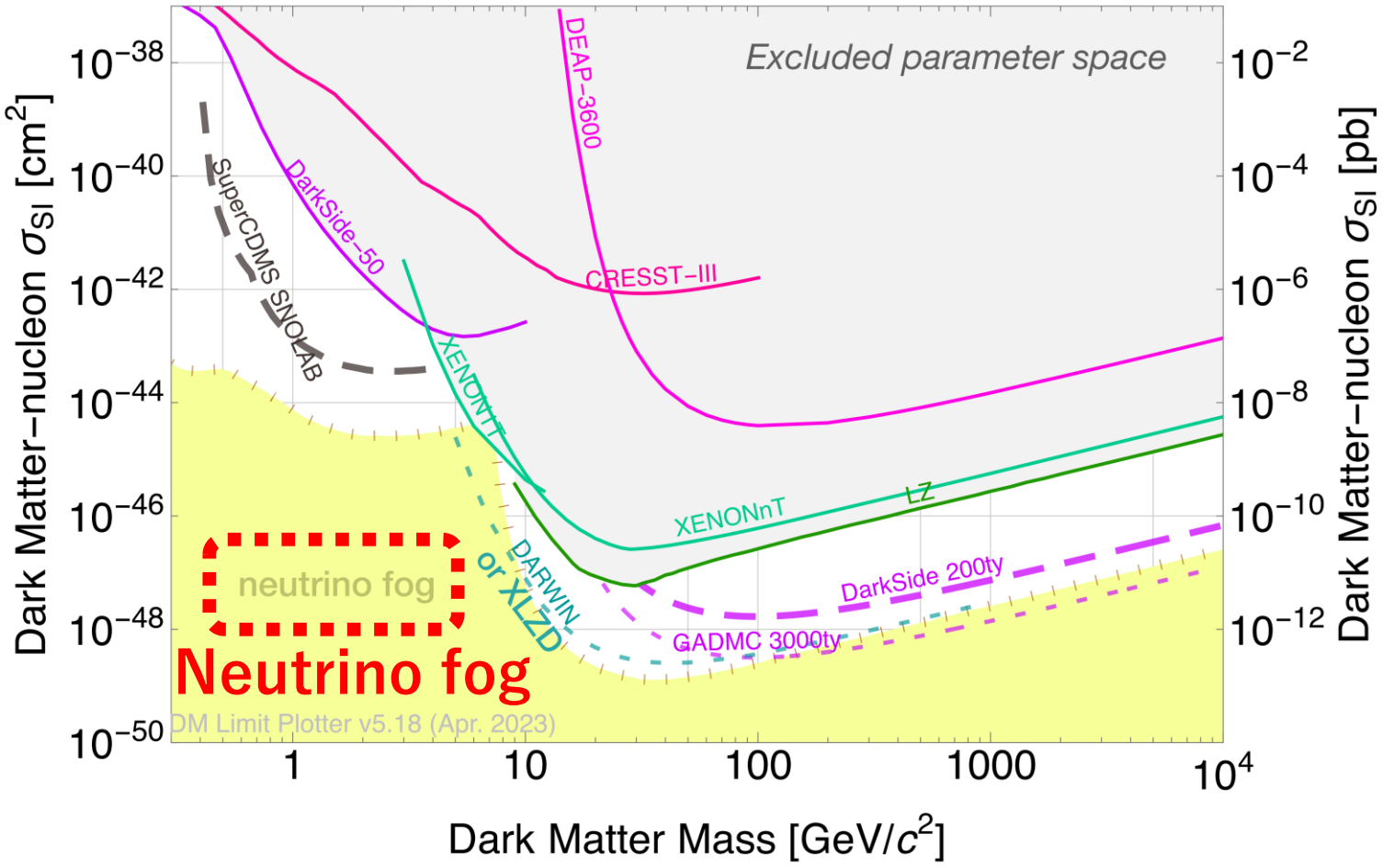


- 2020年に、XENONnT 前身のXENON1T実験で、電子散乱事象の中に、バックグラウンドでは説明のつかない超過信号が見つかった (左上図の3〜5 keVあたり)。
- この信号は、太陽axion、enhanceされたニュートリノ磁気モーメント、Axion Like Particles (ALPs) DM, Dark photon DM 等を仮定すると説明がつくものだったため注目を集めた。



- 2022年に XENONnT 実験で、超過信号は否定され、太陽axion 等により厳しい制限がつけられている (左下)。
- 2020年の信号超過の原因は、液体キセノン中にトリチウム(^{3}H) がわずかに (10^{25}個のキセノン原子に対して数個) 含まれていたと仮定すると説明がつくことが分かっている。XENONnT では、トリチウム除去についても改善された。

今後の検出感度



- XLZD (XENONnT + LZ + DARWIN)
- 2相式液体キセノンTPC
- 液体キセノンを40〜80トン使用
  (40トンから段階的にスケールアップ)
- 2030年前半の実験開始を目指す

- **Neutrino fog** と呼ばれる太陽や大気ニュートリノがバックグラウンドとなる領域に到達する。

→ SK/HK での精密測定でニュートリノフラックス不定性を小さくすることが重要

XENONnT におけるICRR大学院生の活躍

森山研

https://sites.google.com/view/xenon-ut/%E3%82%B0%E3%83%AB%E3%83%BC%E3%83%97

2019年 宇宙線研究所梶田所長修士発表賞受賞

XENONnTのための液体キセノン純度モニターの開発研究(加藤)

2019年 宇宙線研究所梶田所ポスター賞受賞

XENONnTのための中性子検出器のガドリニウムを添加した水の光透過率の測定方法確立(陳)

2023年 SMART2023会議にて優秀ポスター賞受賞

大質量液体キセノン暗黒物質探索実験における純化システムの研究 (神長、後側)

2024年 日本物理学会学生優秀発表賞受賞

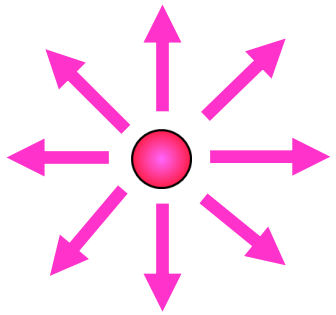
^{85}Krによる背景事象評価 (神長)

2024年 地下宇宙若手研究会で優秀発表賞受賞

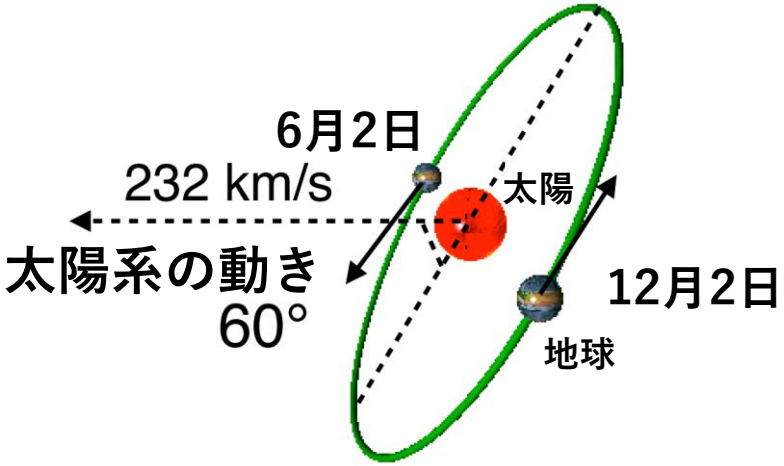
^{85}Krによる背景事象評価 (神長)

方向感度を持った暗黒物質直接探索

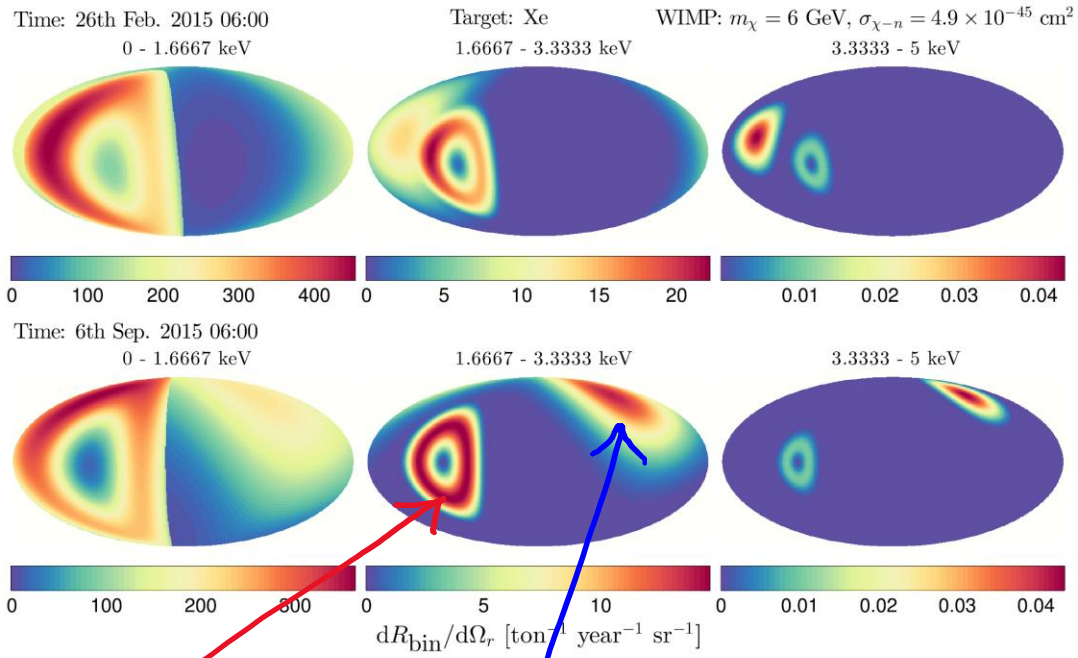
- 暗黒物質の到来方向が分かると、太陽系の進行方向(白鳥座)から暗黒物質の風が検出可能になる。
- 太陽ニュートリノとの区別もつけられる。



暗黒物質
V_0=220 km/s で
Maxwell分布



PHYSICAL REVIEW D 92, 063518 (2015)



^{8}B 太陽ニュートリノ

WIMP

- トンスケールの大質量検出器はまだ実現されていないが、R&D・大質量化・低バックグラウンド化が進められている。
  - 異方性シンチレータ (ICRR 関谷研, $ZnWO_4$)
  - ガス検出器 (神戸大 身内研, NEWAGE)

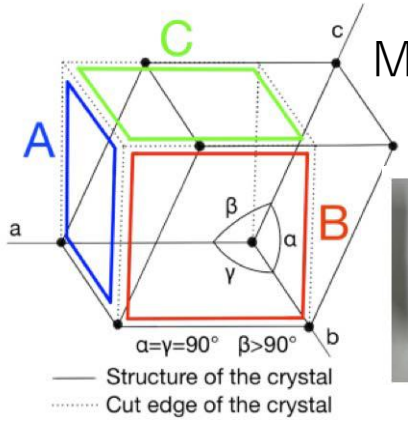
$ZnWO_4$

ICRR 関谷先生

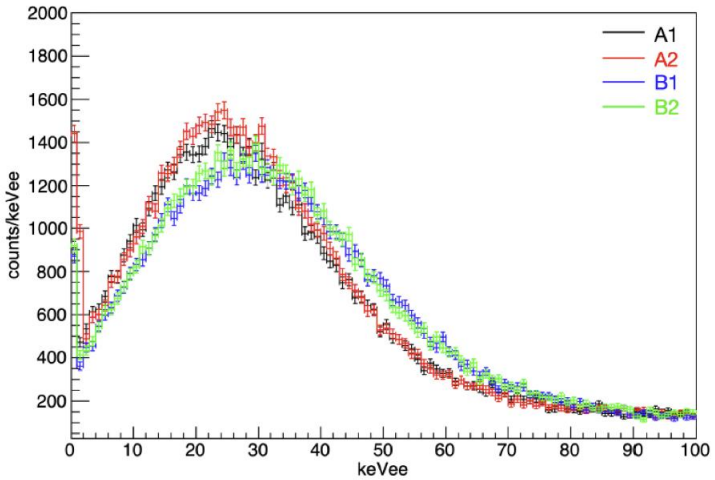
異方性発光シンチレータ

- 単斜晶系
- 光学軸に垂直なB面に粒子が入射する際、発光量が最大となる。
- 中性子ビーム(885 keV)による酸素原子核反跳測定が行われ、15%の違いが確認された。
- 発光時定数が異なる(B面が最大)ことを突き詰めた。

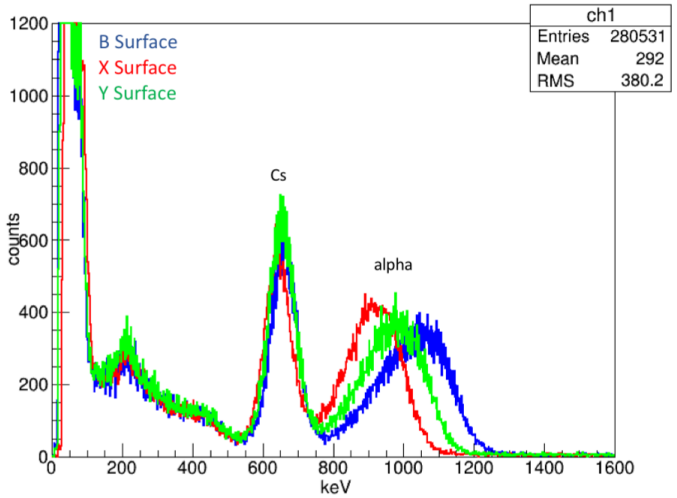
Monoclinic crystal system



Response to 885 keV neutron



Response to gamma and alpha



Juan W Pedersen, H. Sekiya, K. Ichimura, PTEP (2020) 023C01

Comparison of decay Constant

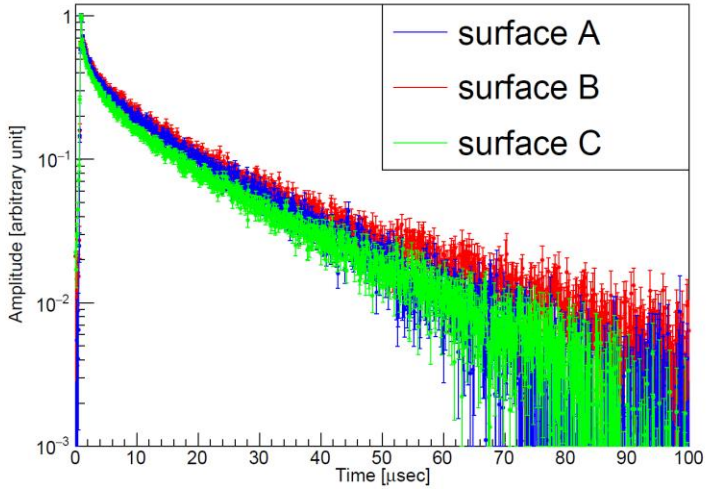
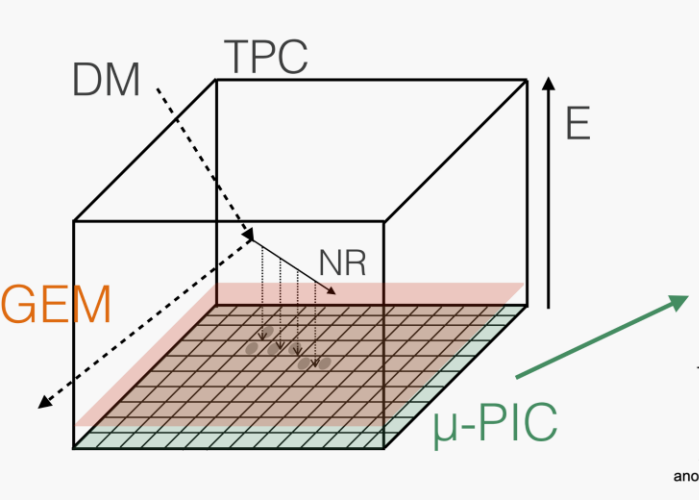


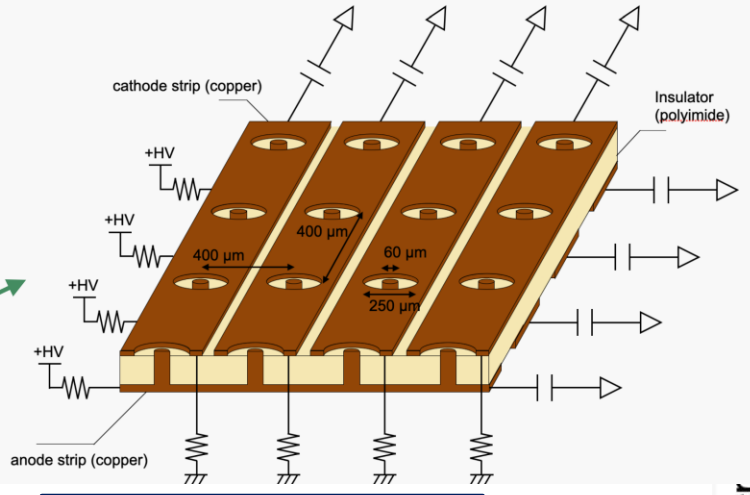
Fig. 5 Averaged waveforms of surfaces A (blue), B (red), and C (green) under α-particle irradiation from ^{241}Am to the surface A, B, and C.

M. Shibata, H. Sekiya, K. Ichimura, PTEP (2021) ptab132

NEWAGE

神戸大学





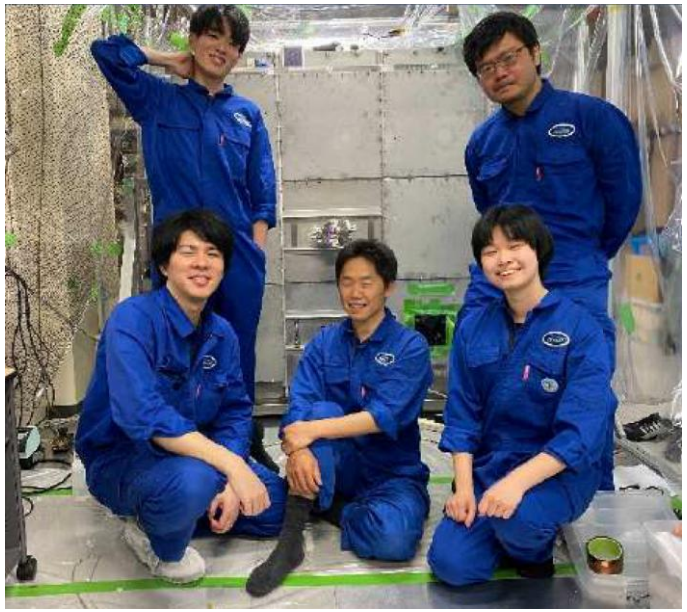
C/N-1.0: 次世代検出器
(有効体積 ~1 m^3)
のコミッショニングが神戸大学で行われている。

低圧ガスTPC
30×30×41 cm^3

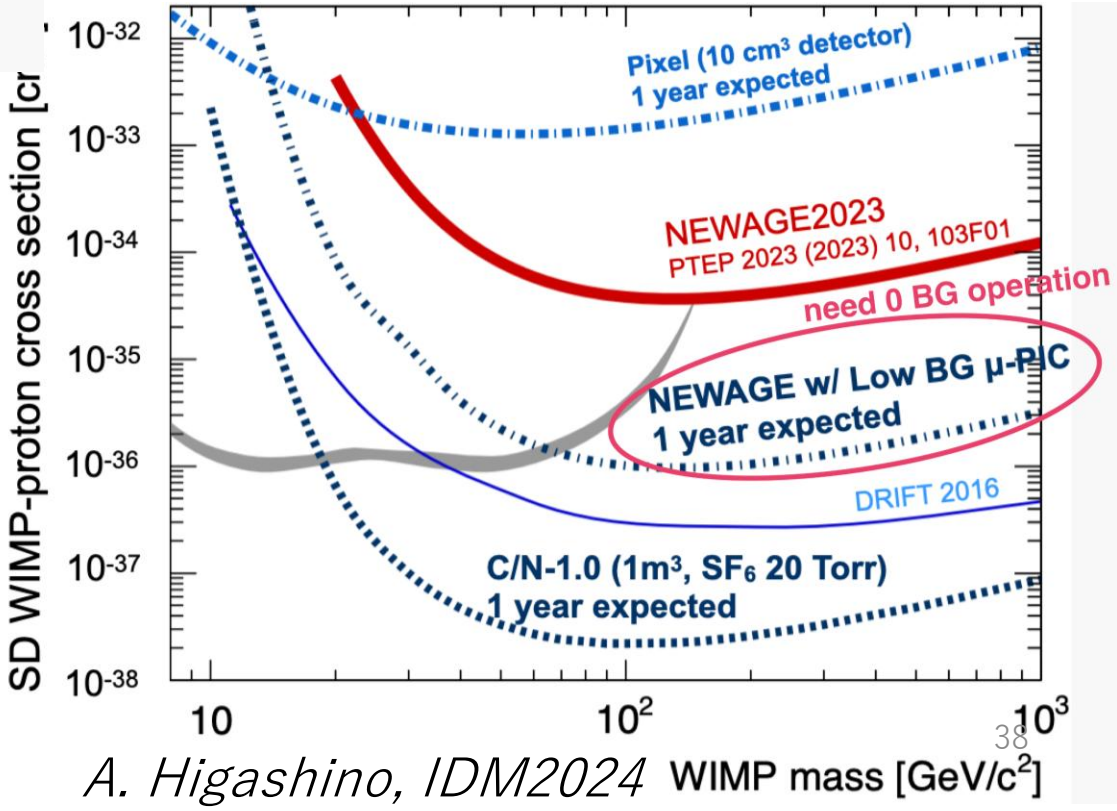
- CF_4 (0.1気圧)
  SD 断面積が大きい
- **GEM**: ガス増幅
- **μ-PIC**: 400 μm ピッチの
  マイクロピクセル読出し

→ 2D + drift time で、
3D の飛跡をとらえる。
神岡地下実験室で暗黒物質探索ランを継続中

NEWAGEメンバー



最新結果と今後の検出感度



A. Higashino, IDM2024

暗黒物質探索 まとめ

- 暗黒物質の存在は確実。
- 正体は全く不明。
- 様々な検出方法が考えられるが、発見したあとの詳細研究を考えると直接検出は魅力的。
- 世界中で発見を目指す熾烈な競争と、大型化に向けた国際共同研究が行われている。
- 暗黒物質特有の信号を引き出すためのアイデア・R&Dも大切。
- 一緒に研究したい人は大歓迎。

東京大学のXENON実験紹介サイト

https://sites.google.com/view/xenon-ut/

XENON実験公式サイト

https://xenonexperiment.org/