

■ 研究紹介

ライトダークマターを探る SENSEI

Fermi National Accelerator Laboratory

上村 翔

suemura@fnal.gov

2022 年 (令和 4 年) 2 月 23 日

1 はじめに

10 年前の話では、ダークマターの正体を粒子と思えば第一候補は WIMP ダークマターだったであろう。現在では、WIMP 以外のダークマター理論が徐々に有力視されている。WIMP 検出実験が大規模化するうち、アクシオンやライトダークマターの探索に興味が増す時代である。

ライトダークマターとは 1 GeV より質量の小さいダークマター粒子を指す。ライトダークマター理論は一般的にダークセクターにもとづく。つまり、ライトダークマターは標準模型以外のゲージ相互作用（ダークフォトンなど）を感じる。あるいは、ダークフォトンなどのゲージボソンがダークマター粒子かも知れない。ライトダークマター粒子は質量が小さいので、数密度が高いであろう。従って、比較的小規模の検出器でも良い感度が可能である。

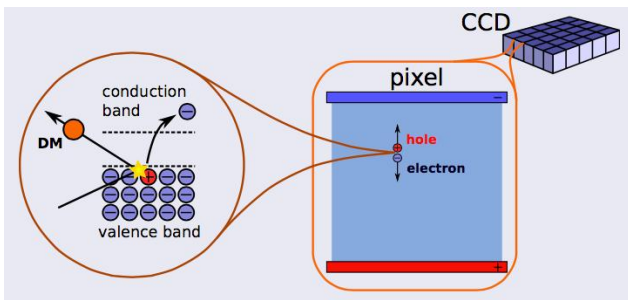


図 1: CCD 検出器の原理。CCD のシリコンはダークマター粒子の電子反跳エネルギーを電子-ホールペアに変換する。そのホールはバイアス電圧によって CCD の表面のピクセルに引き込まれて、のち読み出される。

WIMP 探索は原子核反跳を用いるが、ライトダークマター探索は主にライトダークマターの電子反跳を探す。その理由はキネマティクスである。ライトダークマター粒子は原子核と比べて軽いため、原子核へのエネルギー伝達は極めて小さいであろう。それに比べて、ライトダークマターに近い質量の電子は運動エネルギーを多

く受けられる。多くと言っても、ライトダークマターの電子反跳エネルギーは数 eV 規模であり、検出器はこの小さい信号を捕えなければならない [10]。

SENSEI (Sub-Electron-Noise Skipper-CCD Experimental Instrument) の 2020 年発表のライトダークマター探索結果は世界一の感度を誇る [6]。SENSEI の Skipper-Charge-Coupled-Device (Skipper-CCD) 検出器は一つの電子を測定できる電荷分解能を備える上、バックグラウンドとなる暗電流は世界最小の数値に達する。

2 Skipper-CCD

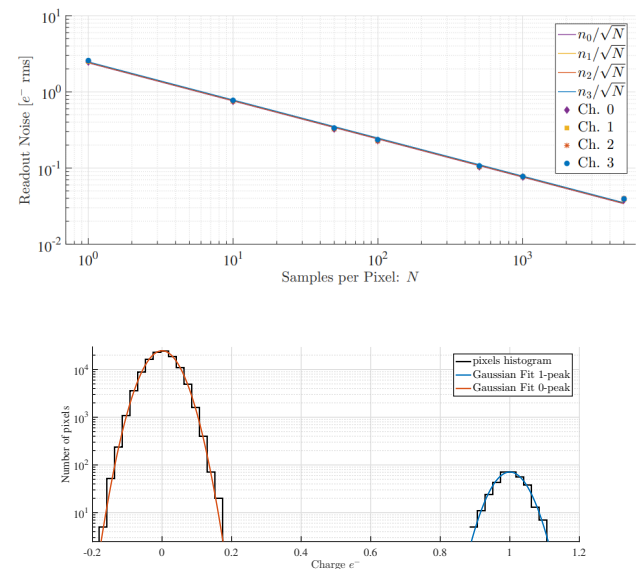


図 2: (上) Skipper-CCD の測定数 N が増すに連れて、ノイズは $1/\sqrt{N}$ 比例で下がる。(下) ノイズを $0.039 e^-$ まで下げれば、 $0 e^-$ と $1 e^-$ のピクセルの区別がきれいになる上、ノイズがガウス分布に正確に従う事が確認できる。

CCD はイメージセンサーとして長らく利用されてい

るが、SLAC の SLD 頂点検出器 (VXD) など、素粒子物理学でも活躍の歴史がある。基本的に、CCD はフォトダイオードの表面に MOS キャパシタを製造し、多数のピクセルに分割したものである。露光後、電圧の制御によってピクセルに収集した電荷を増幅器に送り、比例電圧に変えて読み出す。何万ものピクセルを一つの増幅器で読み出すため、CCD の読み出しは遅い。しかし、イメージセンサー開発のおかげで CCD での電荷の収集と転送は優れており、高い感度のダークマター探索が可能である。

CCD 内に一つの電子-ホールペアを生成するには、最低 1.2 eV、平均 3.8 eV のエネルギーを必要とする。したがって、一つの電子を測定できれば 1.2 eV のエネルギー閾値が可能である。(SENSEI の CCD はホールを収集するが、電荷の単位は単純に電子 (e^-) とする。) CCD を用いるダークマター探索の始まりは DAMIC 実験であった。DAMIC は天体観測用の CCD イメージセンサー技術を使い、10 eV 程度のエネルギー閾値でダークマター探索を行った [3, 2]。このエネルギー閾値は通常の CCD 技術の限界に当たる。

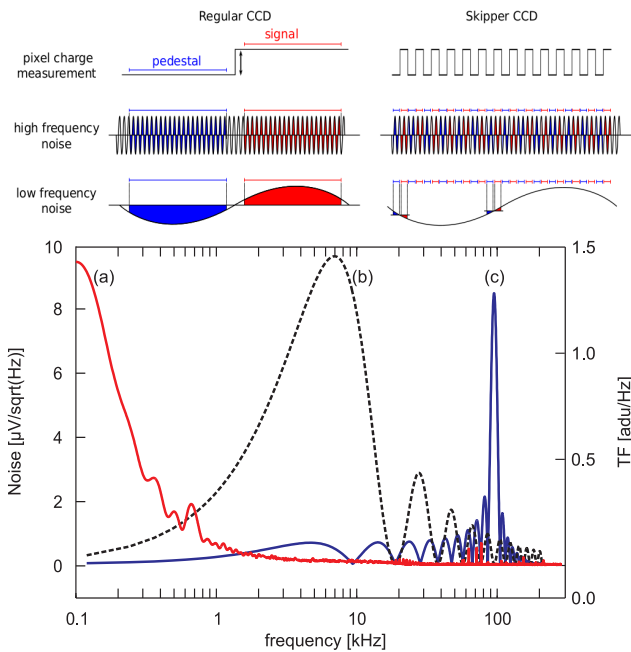


図 3: CCD の電荷測定とノイズの時間領域と周波数領域でのイラスト。(上) 通常の CCD では一ピクセルの測定が一度に限られるが、Skipper-CCD では測定を繰り返し、低周波のノイズの影響を抑える。(下) CCD 増幅器のノイズスペクトル (a) を通常の CCD (b) と Skipper-CCD (c) のスペクトル感度と比べると、Skipper-CCD の利点が明らかである。

通常の CCD では、電荷の分解能は増幅器のノイズにより $2e^-$ 程度に限られる。ピクセルの電荷は測定の際に増幅器のトランジスタゲートへ移転され、測定後に廃

棄される。移転前（ゲートが空の状態）と移転後に測定期間があり、各期間内のトランジスタ電流を積分する。図 3 に示す様に移転前の数値をペデスタル、移転後の数値をシグナルと称し、測定値はその差である。測定値は測定期間に比例し、ホワイトノイズの積分は測定期間の平方根に比例するので、測定期間 T を伸ばせば分解能は $1/\sqrt{T}$ と向上すると思われるが、測定期間が数十 μs を超えるとトランジスタのノイズパワーは周波数に反比例する。この現象はピンクノイズ、あるいは $1/f$ ノイズと呼ばれる。その結果、測定期間を伸ばすに連れてノイズ値も正比例に増し、分解能は向上しない。

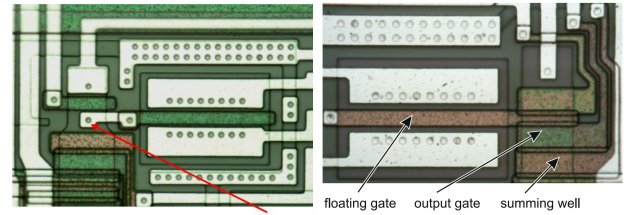


図 4: (左) 通常の floating diffusion 増幅器では、矢印の指すメタル配線により左のピクセルが右のトランジスタゲートに直接接続する。(右) Skipper-CCD の floating gate 増幅器では、ピクセルと floating gate は容量性カップリング関係にあり、電荷は floating gate と summing well の付近へ交互に移転できる。

Skipper-CCD の増幅器は一つのピクセルの電荷を繰り返し測定することによってノイズを大幅に減らす [11, 7]。図 4 に示す様に、Skipper-CCD の場合トランジスタとピクセルの間の直接接続が容量性カップリングに変わる。この floating gate 構造は通常の floating diffusion と比べゲインが低い、電荷のゲートから手前の summing well への逆戻りが可能になり、ペデスタルとシグナルの繰り返し測定ができる。一つ一つの測定期間は短いため、 $1/f$ ノイズの影響を逃れ分解能は $1/\sqrt{N}$ 比例に向上できる。

SENSEI の Skipper-CCD は基本的に DAMIC の CCD の増幅器を Skipper に変えた物である。図 2 で示されるように、SENSEI の Skipper-CCD のノイズはほぼ無制限に下げられる。読み出し時間は測定数に比例するので、通常はスピードと分解能のバランスを取る。本探索ではピクセル 1 つを 300 回測定し、ノイズは約 $0.14e^-$ である。

Skipper-CCD の電荷分解能がいくら良くても、バックグラウンドが多ければダークマター探索には役立たない。SENSEI の「プロトタイプ」Skipper-CCD は純度の低いシリコンから製造されており、Shockley-Read-Hall 生成による暗電流が多い。その訳で、ダークマター探索の感度は限られる [8, 1]。それに代わり、2019 年製造の「科学グレード」センサーには純度の高いシリコンを

使った。

3 SENSEI@MINOS

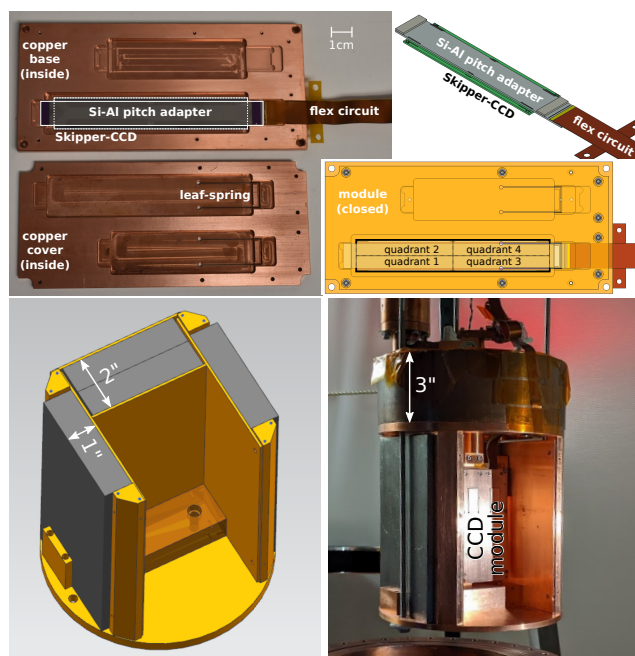


図 5: (上) Skipper-CCD を pitch adapter とフレックスケーブルに接着し、銅のモジュールに組み込む。(下) モジュールを鉛のシールドで囲み、真空容器に入れる。

2020 年に試作機として一つの科学グレード Skipper-CCD を Fermilab の地下施設に設置した。このセンサーのピクセル面積は合計 $9.216 \text{ cm} \times$ 幅 1.329 cm 、厚さは 0.675 cm 、質量は 1.926 g 。 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ のピクセル 5443584 個は 4 つの 443×3072 の quadrant に分けられていて、quadrant は個々の増幅器により読み出される。

センサーは図 5 のようにモジュールに組み込まれる。Skipper-CCD の暗電流を下げるためにはモジュールを冷却し、ガンマ線バックグラウンドを下げるためにはシールドで囲み、宇宙線バックグラウンドを下げるためには地下施設で運転する必要がある。

このモジュールを鉛のシールドで囲み、真空容器内に設置する。CCD のバイアス、制御と読み出しには Skipper-CCD 専用の Low Threshold Acquisition (LTA) ボードを使う。試作機は SENSEI@MINOS と名付け、Fermilab の MINOS トンネル (地下 104m) に設置する。図 6 に SENSEI@MINOS の現場を示す。真空容器の周りには鉛の二次シールド、真空容器の上には FPGA 読み出し回路を取り付ける。中の CCD モジュールはギフォード・マクマホン冷凍機により 135K で保たれる。

用いたデータは 2020 年の 2 月 25 日から 3 月 19 日までに取得されたものである。この間、検出器の運転手順はまず暗電流を下げる erase 操作、それから 20 時間の

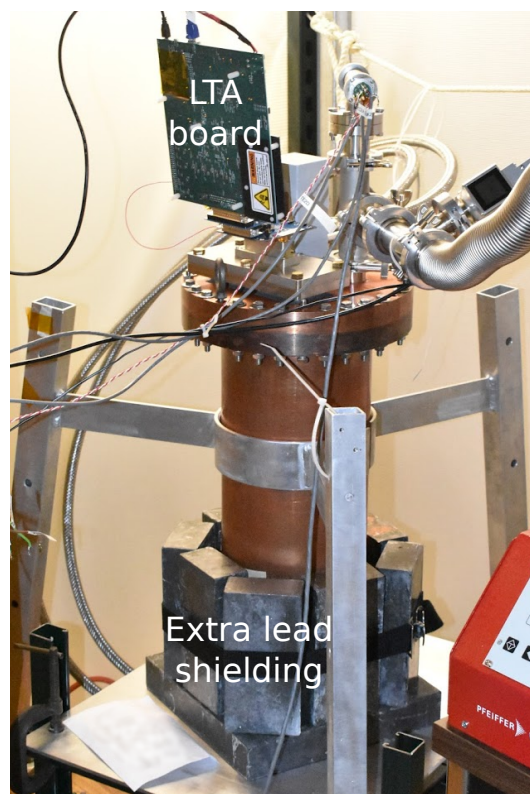


図 6: SENSEI 試作機の現場。

露光、続いて 6 時間の読み出しの繰り返しであり、合わせて 22 枚のイメージを取得した。Blind 解析を行うために、別に取得した 7 枚のイメージを commissioning データと扱い、解析の開発にはこの commissioning データのみを使った。

イメージの例を図 7 に示す。宇宙線のミュオンは直線的な飛跡、ガンマ線による電離電子は曲線的な飛跡を残す。飛跡の幅は電荷の拡散に起因し、CCD の表面からの距離を表す。読み出し中に CCD の周囲に飛跡が当たると、serial register hit と呼ばれる線ができる。

4 解析

本解析はイベントの電荷により $1e^-$ 、 $2e^-$ 、 $3 \cdot 4e^-$ 解析に別れる。 $1e^-$ と $2e^-$ 解析は一つの孤立したピクセルに電子が一つ二つ含まれることをイベントと数える。 $3 \cdot 4e^-$ 解析は隣接したピクセルのクラスターの電荷をイベントと数える。

CCD の四つの quadrant のうち、一つは欠陥により動作不能で、一つは真空容器の外部からの黒体放射フォンのバックグラウンドが多い。 $1e^-$ と $2e^-$ 解析には性能のよい二つの quadrant (exposure 19.93 g-day) を使い、 $3 \cdot 4e^-$ 解析にはバックグラウンドの多い quadrant の一部を追加した (exposure 合計 27.82 g-day)。

イベントセレクションは解析によりちがいが、従ってセレクション効率も違う。SENSEI のバックグラウンドイ

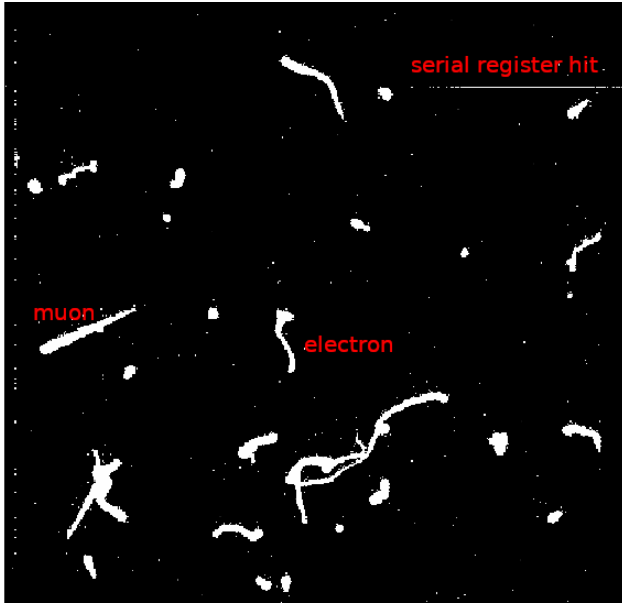


図 7: イメージの一部 (およそ 450×450 ピクセル)。ミューオン飛跡、電子飛跡、serial register hit が見分けられる。広く散らばった点は $1e^-$ ピクセルである。

イベントの大多数は $1e^-$ イベント、あるいは $1e^-$ イベントのコインシデンスで成り立つ $2e^-$ イベントである。従って、バックグラウンドの多い $1e^-$ 解析には比較的厳しいイベントセレクションを用い、バックグラウンドの少ない $2 \cdot 3 \cdot 4e^-$ 解析には比較的緩いイベントセレクションを用いる。 $1e^-$ 解析のセレクション効率率は 6.9%、 $2 \cdot 3 \cdot 4e^-$ 解析のセレクション効率は 45% 程度である。 $2 \cdot 3 \cdot 4e^-$ 解析の検出効率にはセレクション効率のほか、電荷拡散による拡散効率 (4.3 節) が加わる。

本稿では解析の重要なポイントを紹介する。イベントセレクションの詳細に興味のある方は [6] を参照されたい。

4.1 露光不変電荷

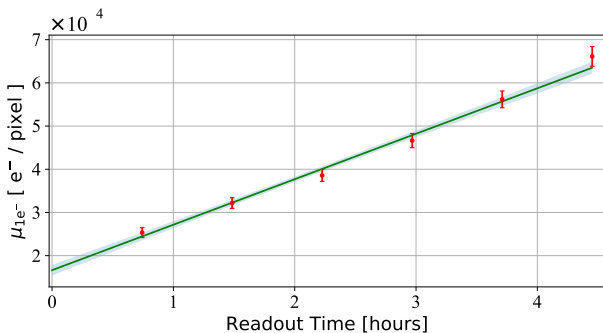


図 8: $1e^-$ イベント密度と読み出し時間の線形回帰。このグラフの y 切片は露光不変電荷に当たる。(傾きは暗電流に依存する。)

SENSEI の $1e^-$ イベント数 (つまり、電荷) と露光時間の関係を一次関数で表せば、二種類の起源が見分けられる [5]。まず、露光時間に比例する電荷はまとめて暗電流と指す。ダークマターによる $1e^-$ イベントは暗電流の一部となるであろう。それに対し、露光時間をゼロに下げても残る電荷は露光不変電荷 (exposure-independent charge) と名付ける。露光不変電荷は一般的に読み出しの際に発生する電荷であり、主な原因は電圧の切り替えによる spurious charge である。図 8 に露光不変電荷の測定を示す。

4.2 ハローと暗電流

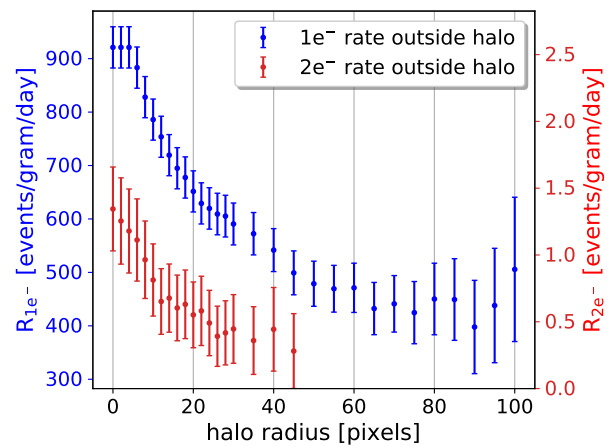


図 9: $1e^-$ (上) と $2e^-$ (下) イベントレートと高エネルギーピクセルからの距離の相関をハローと言う。

図 9 に示すように、 $1e^-$ と $2e^-$ イベントは飛跡の周辺に集中する。この理由にはチェレンコフ放射と放射再結合による低エネルギーフォトンが提案されている [9]。従って、イベントセレクションは高エネルギーピクセル (電荷が $100 e^-$ を超えるピクセル) の周りの「ハロー」を省く。

イベントセレクション後、SENSEI の測定する暗電流は Shockley-Read-Hall 理論による見積りを大幅に上回る (図 10)。真空容器の周りの二次シールドを取り付けた前と後のデータを比べると、暗電流は高エネルギーイベントのバックグラウンドに比例する様子を見せる。従って、ハロー外のピクセルも高エネルギー飛跡の影響を受けていると推理でき、シールドを向上するに連れて暗電流は下がると期待できる。

4.3 拡散

$2 \cdot 3 \cdot 4e^-$ 解析の場合、CCD 内に発生するイベントレートと解析により測定するイベントレートは違う。 $2e^-$ イ

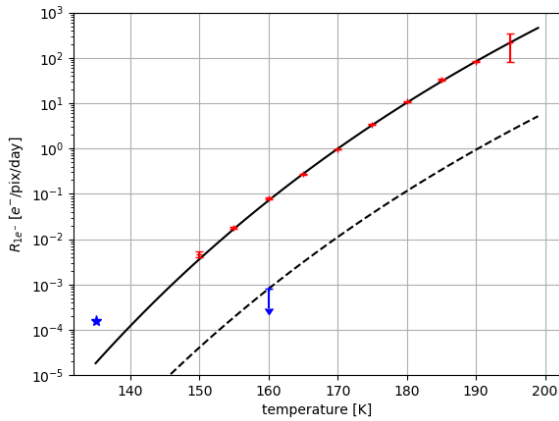


図 10: CCD の温度による暗電流の変化。上の点は erase 前、下の点は erase 後の暗電流で、曲線は Shockley-Read-Hall 理論によるフィット。☆印は SENSEI@MINOS の暗電流で、erase をしながら測定したものである。

イベントが一つのピクセルに当たる、あるいは $3 \cdot 4e^-$ イベントがまとまったクラスターになる確率は拡散効率で表す。この拡散は電荷が CCD の表面までドリフトする間の過程であり、無論イベントの深さによる。ミュオン飛跡は直線なので深さが正確にわかり、ミュオン飛跡の広い端を CCD の裏面、狭い端を CCD の表面と取れば飛跡の幅を使い拡散を測定できる (図 11)。

5 結果

イベントセレクション後のピクセル電荷スペクトルは図 12 に示す。($3 \cdot 4e^-$ 解析のクラスター電荷スペクトルは図に示さないが、 $3 \cdot 4e^-$ のクラスターはない。) この科学グレード CCD センサーの暗電流は $(1.594 \pm 0.160) \times 10^{-4} e^-/\text{pix}/\text{day}$ で、以前のプロトタイプセンサーと比べておよそ 20 分の 1 である。同様に、 $2e^-$ 解析の total exposure が 2019 年に比べ 50 倍に増えたにかかわらず $2e^-$ イベント数は 21 から 5 に下がり、2019 年に見なかった $3 \cdot 4e^-$ イベントは今回もバックグラウンドフリーである。従って、イベントレートに与えられる制限もやはり大幅に向上する。エネルギーの観点から見れば、シリコンのバンドギャップ (1.2 eV) からおよそ 10 eV までの範囲に渡って世界一の制限である。

この結果によるライトダークマターに対する制限を図 1 と図 14 に示す。低いエネルギー閾値と低いバックグラウンドを合わせる事により、SENSEI のライトダークマター感度は世界をリードする。

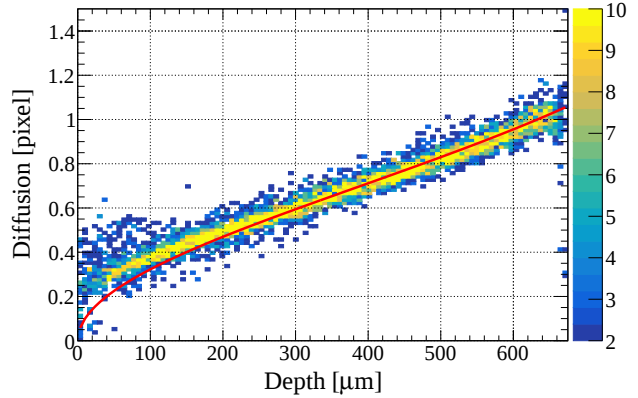


図 11: ミュオン飛跡の幅と深さの相関をヒストグラムに示す。拡散のモデル (線) はこのヒストグラムにフィットしたものである。図の左でのモデルとヒストグラムの差の原因はピクセルによる量子化である。

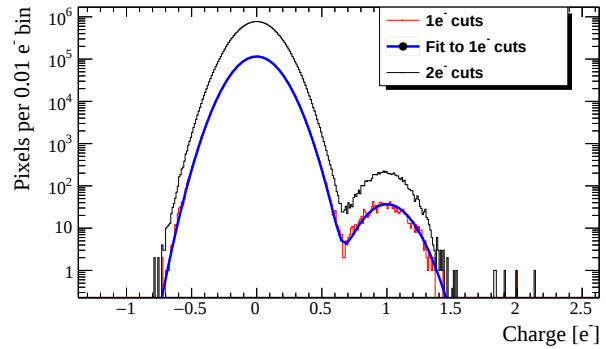


図 12: $2e^-$ (上) と $1e^-$ (下) 解析によるピクセル電荷スペクトル。

6 展望

今回の結果は Skipper-CCD の将来性を証明する事になる。現代技術にはこのエネルギー閾値とバックグラウンドに勝るものはない。今後の目的は大規模化とバックグラウンド削減である。CCD の標的質量を増やしながら、実験をバックグラウンドフリーに維持する見込みである。

第一歩は SENSEI のフルスケール設備、SENSEI@SNOLAB である。この検出器に CCD を 48 枚まで装備する事により標的質量を 100 グラム程度に増加し、銅・鉛・水のシールドで囲む事によりガンマ線バックグラウンドを大幅に削減できる。地下 2100m に置けるカナダの SNOLAB 研究所に設置する事により、宇宙線によるバックグラウンドもほとんど排除できる。4.2 節に述べたように、高エネルギーバックグラウンドの削減により暗電流も削減できると見込んでいる。SENSEI@SNOLAB は 2021 年に試運転を開始し、今年中に初の実験成果を

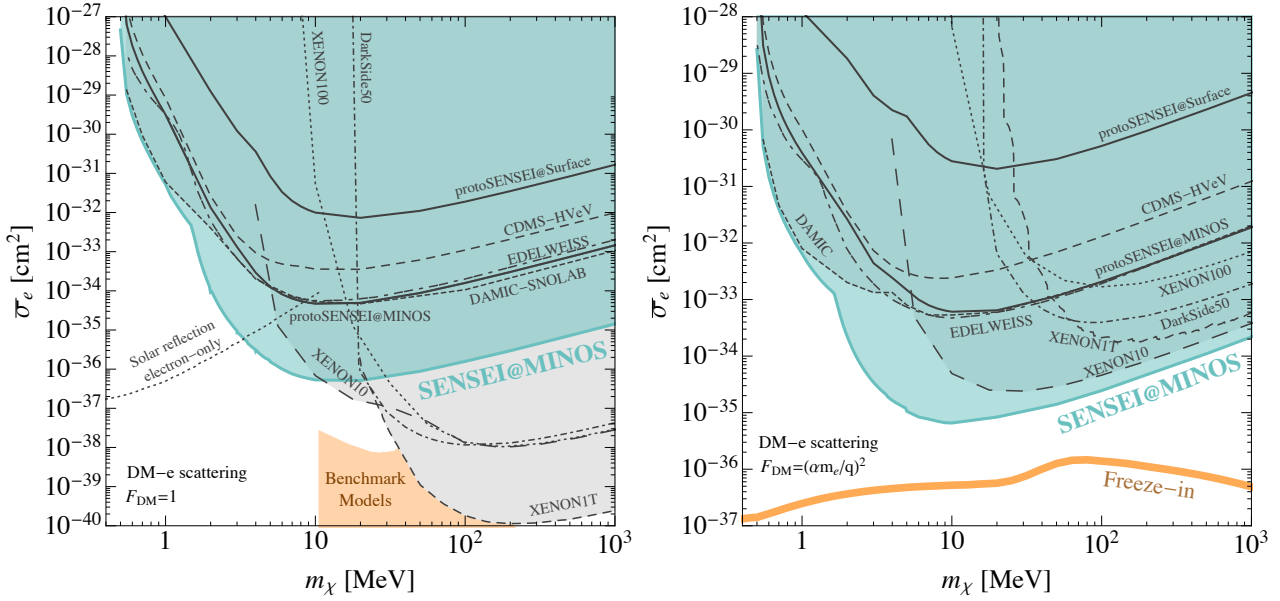


図 13: フェルミオン性ライトダークマターの電子反跳に対する 90% confidence level の制限。電子反跳を媒介するボース粒子の質量が大きい例 (左図) と小さい例 (右図) に分ける。熱的残存量による目標感度は図の下部 (benchmark models, freeze-in) に表す。

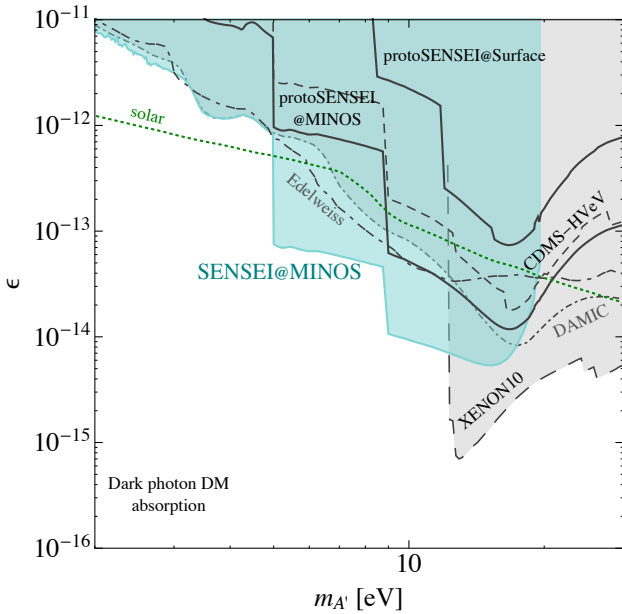


図 14: ボゾン性ライトダークマターの吸収に対する 90% confidence level の制限。

上げる計画である。

続いて次世代実験は DAMIC-M である。DAMIC-M はモダン地下研究所に CCD を 1kg 装備する計画で、今試作機の構築が進んでいる。SENSEI と比べての大進歩は放射性バックグラウンドの削減であり、フレックスケールに含まれる放射性物質などの制御をより厳しく行う。

まだ先には 10kg スケールの OSCURA プロジェクトの夢が見える [4]。この膨大な規模の CCD 検出器を構

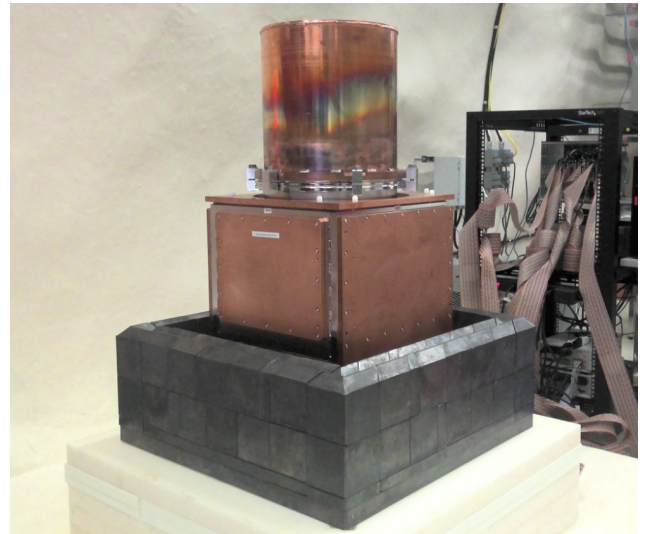


図 15: SENSEI@SNOLAB のシールド設備前の様子。

築する前には様々の点で R&D を必要とする。宇宙線による CCD 内のトリチウム発生への削減又は除去、液体窒素を用いた CCD の液浸冷却、読み出し回路のマルチプレックス、などなど多数の技術の開発が進んでいる。

ここ数年にかけて、Skipper-CCD の発達は素早いものである。今後も成功が続くことを望み、ダークマターの謎に近づけると期待する。

参考文献

- [1] Orr Abramoff, et al. SENSEI: Direct-Detection Constraints on Sub-GeV Dark Matter from

- a Shallow Underground Run Using a Prototype Skipper-CCD. *arXiv:1901.10478 [astro-ph, physics:hep-ex, physics:hep-ph, physics:physics]*, January 2019.
- [2] A. Aguilar-Arevalo, et al. Constraints on Light Dark Matter Particles Interacting with Electrons from DAMIC at SNOLAB. *Physical Review Letters*, Vol. 123, No. 18, p. 181802, October 2019.
 - [3] A. Aguilar-Arevalo, et al. Results on Low-Mass Weakly Interacting Massive Particles from an 11 kg-day Target Exposure of DAMIC at SNOLAB. *Physical Review Letters*, Vol. 125, No. 24, p. 241803, December 2020.
 - [4] Alexis Aguilar-Arevalo, et al. The Oscura Experiment. *arXiv:2202.10518 [astro-ph]*, February 2022.
 - [5] Liron Barak, et al. SENSEI: Characterization of Single-Electron Events Using a Skipper-CCD. *Physical Review Applied*, Vol. 17, No. 1, p. 014022, January 2022.
 - [6] Liron Barak, et al. SENSEI: Direct-Detection Results on sub-GeV Dark Matter from a New Skipper-CCD. *Physical Review Letters*, Vol. 125, No. 17, p. 171802, October 2020.
 - [7] Gustavo Canelo, et al. Low Threshold Acquisition controller for Skipper CCDs. *arXiv:2004.07599 [astro-ph, physics:physics, physics:quant-ph]*, April 2020.
 - [8] The SENSEI Collaboration, et al. SENSEI: First Direct-Detection Constraints on sub-GeV Dark Matter from a Surface Run. *Physical Review Letters*, Vol. 121, No. 6, August 2018.
 - [9] Peizhi Du, et al. Sources of Low-Energy Events in Low-Threshold Dark Matter and Neutrino Detectors. *Physical Review X*, Vol. 12, No. 1, p. 011009, January 2022.
 - [10] Rouven Essig, et al. Direct detection of sub-GeV dark matter with semiconductor targets. *Journal of High Energy Physics*, Vol. 2016, No. 5, p. 46, May 2016.
 - [11] Javier Tiffenberg, et al. Single-electron and single-photon sensitivity with a silicon Skipper CCD. *Physical Review Letters*, Vol. 119, No. 13, September 2017.