# 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。

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 [1]。

SENSEI (Sub-Electron-Noise Skipper-CCD Experimental Instrument) の 2020 年発表におけるライト ダークマター探索は,世界最高感度に達している [2]。 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。

## 2 Skipper-CCD

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 バーテックス検出器 (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の酸化膜上に電極を設け,多 数の MOS キャパシタに分割したものである。これらの MOS キャパシタがピクセルであり,CCD 内で生成した 電荷はバイアス電圧によりピクセルの電極に引き付けら れる。露光後,電極の電圧の制御によって電荷をピクセ ルからピクセルへ転送し,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・転送の 効率は優れており,図1の様に電子反跳検出器として使 用すれば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<sup>-</sup>)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, 4]。このエネルギー閾値は通 常の CCD 技術の限界に当たる。



図 2: 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 の方がノイズの影響が小さい [5]。

通常の CCD では、電荷の分解能は増幅器のノイズに より 2 e<sup>-</sup> 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転送され、測定後に廃 棄される。転送前(ゲートが空の状態)と転送後に測定 期間があり、各期間内のトランジスタ電流を積分する。 図 2 に示す様に転送前の数値をペデスタル、転送後の数 値をシグナルと称し、測定値はその差である。電荷によ るシグナルは一定電圧なので、測定値は測定期間の平方 根に比例する。測定期間 T を伸ばせば分解能は 1/√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つれてノイズ値も 正比例に増し、分解能は向上しない。

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 [6,7]。 図3に示す様に,Skipper-CCDの場合トランジスタとピ クセル電荷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



floating gate output gate summing well

図 3: Skipper-CCD の floating gate 増幅器の等価回路と 写真。(上) CCD 電荷はまず CCD のピクセル部から serial register (H1, H2, H3), summing well (SW), output gate (OG) の電圧の制御により floating gate (FG) へ転 送される。次に電荷を floating gate と summing well へ 交互に転送することにより複数の測定を行い,最終的に drain gate (DG) を通して V<sub>drain</sub> へ廃棄する。トランジ スタ MR はオフなので,FG の電圧,従ってトランジス タ M1 の電流と出力電圧 V<sub>video</sub>,は CCD 電荷との容量 性カップリングの影響を受ける [6]。対照的に,通常の CCD で使う floating diffusion 増幅器では CCD 電荷が トランジスタ M1 のゲートまで直接転送される。(下) CCD の表面の電極の写真。左側には増幅器のトランジ スタ (M1),右側には CCD の電荷を serial register から V<sub>drain</sub> へ転送する電極が見える。 [5]

比ベゲインが低いが,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ので, 1/f ノイズの影響を逃れ分解能は 1/√N に比例して向 上する。

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4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 0.14 e<sup>-</sup> 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



図 4: (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。4つの増幅器のノイズ値 (点) はほぼ同じで,いずれも理想の  $1/\sqrt{N}$  比例 (直線) に近い。(下) ノイズを  $0.039 e^-$ まで下げれば, $0e^-$ と  $1e^-$ のピクセルの区別がきれいにできる上,ノイズがガ ウス分布に正確に従うことが確認できる [7]。

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<sup>1</sup>による暗電流が多い。その訳で, このプロトタイ プで行ったダークマター探索の感度は限られる [9, 10]。 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い, 2020 年発表論文の実 験にはこのセンサーを使った。

## 3 SENSEI@MINOS

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 の厚さは 0.675 cm であり, ピクセル部は 9.216 cm×幅 1.329 cm の面積, 1.926 g の質量を持つ。 $15 \times 15 \ \mu m^2$  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。読み出し時間は一ピクセル一回あたり 42.825  $\mu s$ で,全てのピクセルを 300 回ずつ読み出すには合計 5.15 時間かかる<sup>2</sup>。

センサーは図5のようにモジュールに組み込まれる。



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 [2]。

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)に設置した。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 回路を取り付けた。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 までに収得されたものである。この間,検出器の運転手 順はまず erase 操作<sup>3</sup>,それから 20 時間の露光,続いて 5.15 時間の読み出し<sup>4</sup>の繰り返しであり,合わせて 22 枚 のイメージを収得した。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。宇宙線のミューオンは直線 的な飛跡,ガンマ線による電離電子はmultiple scattering による曲線的な飛跡を残す。飛跡の幅は電荷の拡散に起

ル)の範囲に渡る

<sup>1</sup>不純物などの欠陥により熱エネルギーが電子・ホールペアを生み 出す過程 [8]

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>実は、一行の 443 ピクセルを読み出すにはシフトレジスタを 470 回動かし、470 ピクセル分の読み出し時間を費やす。この余分な読み 出しはイメージの処理とクロスチェックに役立つ物で、overscan と言 う。従って CCD の読み出し時間は 470 × 3072 = 1443840 ピクセル 分に相当する。

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>バイアス電圧の一時的な調整によって暗電流を下げる操作 [11] <sup>4</sup>読み出し時間の間に発生するヒットは露光時間の間に発生する ヒットに加わるので,ピクセル当たりの露光時間は 20 時間(最初に 読み出されるピクセル)から 25.15 時間(最後に読み出されるピクセ



図 6: SENSEI 試作機の現場 [2]。

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<sup>-</sup>,2e<sup>-</sup>,3・4e<sup>-</sup> 解析に別れる。1e<sup>-</sup>と2e<sup>-</sup>解析では孤立した1ピクセ ルのヒットを扱う。1e<sup>-</sup>解析ではこの電荷が1e<sup>-</sup>のも のを,2e<sup>-</sup>解析ではこの電荷が2e<sup>-</sup>のものを解析する。 3・4e<sup>-</sup>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ト ンのバックグラウンドが多い。1e<sup>-</sup> と 2e<sup>-</sup> 解析には性 能のよい二つの quadrant (exposure 19.93 g-day) を使 い,3・4e<sup>-</sup> 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,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 ベントの大多数は1e<sup>-</sup> イベント,あるいは1e<sup>-</sup> イベン トのコインシデンスで成り立つ2e<sup>-</sup> イベントである。 従って,バックグラウンドの多い1e<sup>-</sup> 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・3・4e<sup>-</sup> 解析には比較的緩いイベントセレク



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 1 e<sup>-</sup> ピクセルである。

ションを用いる。1e<sup>-</sup> 解析のセレクション効率は 6.9%, 2・3・4e<sup>-</sup> 解析のセレクション効率は 45%程度である。 2・3・4e<sup>-</sup> 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 [2] を参照され たい。



#### 4.1 露光不変電荷

図 8: 1e<sup>-</sup> イベント密度(ピクセルの中で,1e<sup>-</sup> ピクセ ルが占める割合)と読み出し時間の線形回帰 [2]。これ は露光なしのデータで,この1e<sup>-</sup> イベント密度は露光不 変電荷と読み出し時間中に蓄積した暗電流の和であり, このグラフの y 切片は露光不変電荷に当たる。

Readout Time [hours]

4

イベントセレクション後の1e<sup>-</sup>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 [12]。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<sup>-</sup> 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: 100 e<sup>-</sup> 以上のピクセルから halo radius 以上の 距離に在るピクセルの 1e<sup>-</sup> と 2e<sup>-</sup> イベントレートを示 す [2]。高エネルギーピクセルから遠ざかるに連れてイベ ントレートが下がる。1e<sup>-</sup> 解析では 60 ピクセルの halo radius, 2・3・4e<sup>-</sup> 解析では 20 ピクセルの halo radius を使う。

1e<sup>-</sup> と 2e<sup>-</sup> イベントは飛跡の周辺に集中する。この 現象は「ハロー」と言い,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 [13]。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<sup>-</sup> を超えるピクセル)から halo radius 以内の距離にあるピクセルを省く。図 9 にこのハ ローカットの効果を示す。

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。これはハローカットをかけた 後なので,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

2·3·4e<sup>-</sup> 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<sup>-</sup> の



図 10: SENSEI の科学グレード CCD の温度による暗 電流の変化 [2]。実線は erase 前の暗電流への Shockley-Read-Hall 理論フィットの結果。破線は 160K の測定か ら erase 後の暗電流の外挿である。2020 年発表の DM 探索結果(135K の点)はこの外挿を大きく上回る。



図 11: ミューオン飛跡の幅と深さの相関をヒストグラ ムに示す [2]。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。

電荷が発生し1ピクセル事象として検出される,あるい は3・4e<sup>-</sup>の電荷がまとまったクラスターとして検出さ れ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。ミューオン飛跡は直線なので深さが正確に わかり,ミュー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 を図 12 に示す。3 e<sup>-</sup>, 4 e<sup>-</sup> の解析では, クラスターは 検出されず, バックグラウンドフリーの解析を行った。



図 12: 1e<sup>-</sup>, 2e<sup>-</sup> 解析によるピクセル電荷スペクト ル [2]。1e<sup>-</sup> 解析の方が cut が厳しいのでイベントが少 ない。1e<sup>-</sup> レートの測定にはガウス分布へのフィットを 用いる。

この科学グレード CCD センサーの暗電流は (1.594 ± 0.160) × 10<sup>-4</sup> e<sup>-</sup>/pix/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<sup>-</sup> 解 析の total exposure が 2019 年に比べ 50 倍に増えたにも かかわらず2e<sup>-</sup> イベント数は 21 から 5 に下がり,2019 年に見なかった3・4e<sup>-</sup> 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。エネルギー検出閾値の 面では,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 13 と図 14 に示す。電子反跳の断面積の momentum transfer dependence は DM form factor  $F_{DM}$  と表し反 跳を媒介するボース粒子の質量  $m_{A'}$  による。従って電 子反跳の断面積は  $F_{DM}$  と結合定数などによる平均断面 積 $\bar{\sigma}_e$  の積と表し、電子反跳に対する制限は  $m_{A'}$  の大き い例と小さい例に分かれる。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ことにより、SENSEI のラ イトダークマター感度は世界をリードする。

## 6 展望

今回の結果は Skipper-CCD の将来性を証明すること 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, SEN-SEI@SNOLABである。この検出器に CCDを48枚ま で装備することにより標的質量を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 に位置するカナダの SNOLAB 研究所に設置することにより,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 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 ケーブ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 [14]。この膨大な規模の CCD 検出器を構 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

- Rouven Essig *et al.*, J. High Energy Phys., **2016**, 46 (2016).
- [2] Liron Barak *et al.*, Phys. Rev. Lett., **125**, 171802 (2020).
- [3] Alexis Aguilar-Arevalo *et al.*, Phys. Rev. Lett., 125, 241803 (2020).
- [4] Alexis Aguilar-Arevalo *et al.*, Phys. Rev. Lett., 123, 181802 (2019).
- [5] Guillermo Fernández Moroni *et al.*, Exp. Astron., 34, 43–64 (2012).
- [6] Javier Tiffenberg *et al.*, Phys. Rev. Lett., **119**, 131802 (2017).
- [7] Gustavo Cancelo et al., arXiv:2004.07599 (2020).
- [8] Chih-tang Sah *et al.*, Proc. IRE, **45**, 1228–1243 (1957).
- [9] Michael Crisler *et al.*, Phys. Rev. Lett., **121**, 061803 (2018).
- [10] Orr Abramoff *et al.*, Phys. Rev. Lett., **122**, 161801 (2019).



図 13: ライトダークマターの電子反跳に対する 90% confidence level の制限 [2]。 $m_{A'} \gg m_{e^-}$  (contact interaction, 左図) と $m_{A'} \ll m_{e^-}$ (long-range interaction, 右図) の例を示す。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 [2]。吸収されたダークマターの 質量は全てイベントエネルギーに変換されるので,この 図では 1・2・3・4 e<sup>-</sup> のエネルギー閾値にステップが現 れる。



図 15: SENSEI@SNOLAB のシールド設置前の様子。

- [11] S.E. Holland *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, 50, 225–238 (2003).
- [12] Liron Barak *et al.*, Phys. Rev. Appl., **17**, 014022 (2022).
- [13] Peizhi Du et al., Phys. Rev. X, **12**, 011009 (2022).
- [14] Alexis Aguilar-Arevalo *et al.*, arXiv:2202.10518 (2022).