







<u>代表:中 竜大(東邦大)</u> 分担:身内賢太朗(神戸大) 分担:白石卓也(神奈川大)

学術変革「地下稀事象」第1回領域研究会 2024年7月5-6日@大阪大学

Dark Matter



The nature of dark matter in the galaxy

Dark Matter Distribution

Velocity (速度) Space (空間) Maxwell分布、Dark matter stream, バリオン相互作用による非等方性 等 密度プロファイル、サブハロー

Particle character

- Interaction

Nucleus dependence

- Massolar system



- Spin Independent, Spin Dependent, Fermion, Boson etc.

- Form factor, 物質効果(e.g., クエンチング、格子欠陥、ミグダル効果 etc)

How can we identify the dark matter signal ?



天体の運動に依存した信号情報の取得



- 統計的に> O(100) event以上の必要性
- 季節変動するBGとの切り分け (e.g., cosmic-ray µ, neutrino)



Potential for Direction-sensitive Search

統計的な優位性

130 observed event

100

2× In(L /Lb)

-50

-100

-150

数10 eventsでの地球(太陽系)の運動 に付随する信号を識別 ⇔季節変動に対して100倍の統計的優 位性



Phys. Rev. D 92, 063518 (2015)

Phys. Dark. Univ., 27(2020) 100454 5

WIMP mass [GeV/c2] Eur. Phys. J. C (2018) 78: 578

Background

暗黒物質信号の方向感度



技術的なチャンレンジ

- 超短信号の方向情報の取得
 - O(10-100) nm in solid (liquid)
 - O(0.1-1) mm in gas
- 低バックグラウンド環境下での運用

● 大規模化

さまざまな技術開発の展開が必要不可欠



異なる(日本独自の)技術・性能を持つ方向感度探索実験の推進

ガス検出器

- 圧力(密度)が調整可能 → 同じエネルギーでの飛跡が調整可能
 - → (原理的に)低閾値化が可能 (利点)
 - → 大質量のためには大容積化が必要 (弱点)

時間分解能がある

- → 赤道儀など不要
- → 同じデータではくちょう座以外からの信号も探索できる バイプロ・セレンディピティー (利点)
- → チャンネル読み出し回路は複雑 (弱点)

原子核乾板

固体検出器かつ水素から銀まですべての核種に感度あり

- → 情報を結晶内で処理するため体積の拡張が容易 (利点)
- → 読み出しに時間がかかる(弱点)

パッシブな検出器

→ ノンバイアスでの事象解析(利点)

→ バックグラウンドについての十分な理解と安定性を確保(弱点)

双方の技術基盤を発展さ せ"方向感度"探索の可能 性を切り開く

・「ガス」の世界情勢

- ・ ほぼ終了: DRIFT
- 地下観測 ongoing:
 NEWAGE、CYGNO(伊)、MIMAC(仏)
- R&D: ハワイ、オーストラリア
- strip読み出しがコスパよい という共通見解(2008.12587)
- CYGNOは光学読み出し



NEWAGE概観

- µ-PIC(ストリップ読み出し)を使ったTPC **3-D 飛跡 → スカイマップ**
- CF₄ ガスによる SD 探索
- Proposal PLB 578 (2004) 241
- ・初の方向感度制限 ~10⁴pb PLB654 (2007) 58
- 「地下素核研究」:表面α線の少ない μ-PIC
- •「地下宇宙」:低BGµ-PIC
- 地下実験 ~26pb PTEP(2023) ptad120 26 pb
- DAMA 領域に触り始めた



計画研究 B03:高精度飛跡検出技術を用いた方向感度を持つ暗黒物質探索実験

本研究計画では、"飛跡"情報の取得を可能とする独自の技術によって世界の暗黒物質の方向感度探索実 験をけん引する2つの実験プロジェクトを推進します。 中(代表)が中心として進める超微粒子原子核乾 板を用いたNEWSdm実験は、イタリア・グランサッソ研究所(LNGS)において赤道儀を用いた暗黒物質到 来方向追尾観測を行い、ナノスケールの飛跡検出技術を駆使することで、固体検出器の特徴を活かした大 質量方向感度探索を展開します。 身内(分担)が中心として進めるガスTPCを用いたCYGNUS/NEWAGE 実験は、ガスTPCの低雑音化・大型化を進め、**これまでの10倍の感度**での方向に感度持った暗黒物質探 <mark>索を開始します。</mark> この二つの実験プロジェクトが連携し、**飛跡情報を付与したDAMA/LIBRA領域の検** 証等に向け相補的な役割を担うとともに、方向感度技術をさらに高度化させ、次世代の暗黒物質の精密理 | 解に向けた中心的存在として世界をけん引していきます。 白石(分拍)は、原子核乾板の高精度飛跡検 出能力を生かし、keV領域の反跳原子核の直接的背景事象となる sub-MeV帯以上の地下環境中性子の精 密測定を進めると共に、水素反跳による軽い暗黒物質に対する方向感度探索の技術基盤を構築していきま す。 さらに、本計画研究は、E班、D班と連携した新たな物理探索や技術応用の拡大を図っていきます。

PTEP (2023) ptad120

• 低BG化

- ・現在のBG源の特定・低減
 - 内部BG(ラドン)
 - ・ 外部ガンマ線
 - 外部中性子
- < 1/10を目指す
 µ-PICは現状ではOK
- •大型化
 - 容器:OK
 - μ-PIC:リピートでOK
 - ・フィードスルー基板:低BGの物を要開発
 - ・読み出し回路:要開発





詳細は身内ポスターで

原子核乾板:NEWSdm実験



Demonstration of directional DM search [surface run @ Nagoya University]

Technical test at surface lab.



実験スケールの拡張



Readout system



PTS-3 @ Nagoya



PTS-6 @ Toho ⇒ LNGS



PTS-4 @ Toho



PTS-5 @ Nagoya



Dark matter 探索の推進



Scientific Reports volume 13, Article number: 22813 (2023)

Super-resolution imaging

- 10GeV領域探査の事象識別は、従来の光学 像だけでは不十分
- 超解像顕微鏡システムの実践投入
 ⇒ event by event での精密解析



詳細は、この後の白石(分担者)から

反跳陽子飛跡計測による中性子測定

超微粒子原子核乾板NITを用いた中性子計測

- 反跳陽子飛跡解析におるsub-MeV帯の中性子測定 ⇒フラックス、エネルギースペクトル、方向分布
- 高γ/e 識別能 ⇒ 飛跡検出の強み
- 14N(n,p) 等から幅広いエネルギーレンジの中性子 計測が可能

LNGS地上環境中性子計測



Neutron elastic scattering





学術変革

なパラメータスペースの開拓

◆ その他、技術応用

D班連携⇒神岡などのマルチサイト計測の検討 地下中性子BGの精密理解

理論-実験連携(B-E連携)

速度分布の非等方性の方向感度を用いた_®______ 決定精度の研究_______。Directionality only

Discrimination of anisotropy in dark matter velocity ⁶⁰ distribution with directional detectors ⁴⁰

K. I. Nagao, Tomonori Ikeda, Ryota Yakabe, Tatsuhiro Naka, Kentaro Miuchi, Phys. Dark. Univ. , 27(2020) 100454

銀河中心で加速されたDMに対する銀河中心プロファイルによる探索 精度と密度プロファイルの決定

300

400

200

m, (GeV)

100

Directional direct detection of light dark matter up-scattered by cosmic-rays from direction of the Galactic center

Keiko I. Nagao, Satoshi Higashino, Tatsuhiro Naka, Kentaro Miuchi, JCAP07(2023)061



Dark Matterの現象論的モデル+直接検出モデルの探求

- Dark matterの性質と反応モデル
- 天の川銀河の分布・反応モデル
- 検出器内での終状態

トラッキング検出器 〜 の強み



After recent dark matter search experiments, boosted dark matter has been the focus of much attention. Since the boosted dark matter has high momentum, it may not be treated by simple elastic scattering in direct detection experiments. In this workshop, in order to deepen our understanding of inelastic scattering in the detection of boosted dark matter, overviews of inelastic scattering between nuclei and various particles, including neutrinos and neutrons, will be given, and the inelastic scattering of boosted dark matter will be discussed.



+E01 長尾さんトーク

方向感度検出の普遍的理解

神奈川大学イオン加速器 @白石(分担)



加速器による直接検証

Quenching effect β~10-3の重粒子が及ぼす物質効果 e-h recombination Channeling

Diffusion

Columnar recombination

Crystal defect

Plasmon

Anisotropic crystal

方向情報取得に向けた物質 効果と検出器応答

中性子による直接検証



ニュートリノフロアを 超える方向感度探索 の可能性検討

Conclusion

高精度飛跡検出器を用いた方向感度を持った暗黒物質探索

- 低エネルギー反跳原子核飛跡検出による暗黒物質探索の推進
- 低バックグラウンド化技術の開発による継続的感度向上
- 大型化に向けた技術開発



将来の大型実験に向け技術と知見の蓄積と発展