暗黒物質の検出に向けて

中山和則(東北大 & QUP/KEK)

2023/5/17 @ 大阪公立大セミナー

専門外の人、これから学ぶ人に、最近の 暗黒物質の研究について雰囲気を伝える

1. 素粒子標準模型と暗黒物質

2. 暗黒物質の様々な検証方法

3. 暗黒物質検出と物性物理

1. 素粒子標準模型と暗黒物質

クォーク・レプトンx3世代

強い相互作用 弱い相互作用 電磁相互作用

を媒介

ヒッグス場

ゲージ場・物質場に質量を与える

[Figure from Wikipedia]

標準模型:以下のラグランジアンを持つ場の量子論

 $\mathcal{L} = -\sum \frac{1}{4}$ 4 $F^a_{\mu\nu}F^{\mu\nu a}$ $+$ $\sum i\bar{\psi}\gamma^{\mu}D_{\mu}\psi$ + *|Dµ|* ² *^V* () ヒッグス場 ゲージ場の質量 $+$ \sum $y\phi\psi\psi$ + h.c.

ゲージ場

物質場+ゲージ相互作用

湯川相互作用 物質場の質量

この世界のほとんど全てを正しく記述する "神の数式"

暗黒物質

物質反物質非対称性

インフレーション

標準模型は究極理論ではない!

標準模型の問題点

階層性問題 強いCP問題 世代構造 量子重力 ゲージ構造

宇宙論的問題 理論的問題

暗黒エネルギー $-70%$

暗黒物質の観測的証拠

<u>...............</u>

2500

2000

通常の物質~5%

暗黒物質について分かっていること

- 宇宙の全エネルギーの約20%
- \bullet 地球近傍では質量密度 $\rho \simeq 0.4 \, \mathrm{GeV/cm^3}$
- 重力を及ぼす
- "冷たい" (速度が小さい)
- 質量 $10^{-22} eV 10^{52} eV$ (ほぼ全く決まってない!)

単位 $meV = 10^{-3} eV$ $GeV = 10^9 eV$ $TeV = 10^{12} eV$ $\#V$ 1 GeV ~陽子1個の質量

現在の存在量と合致するか? 宇宙の構造形成がうまくいくか?

暗黒物質の研究

理論的重構 弦理論? 大統一理論? 弦理論? etc ...

地上実験(加速器実験、直接検出実験 …) 宇宙観測(宇宙線、宇宙背景放射、重力波、星の進化 …)

アクシオン

典型的には質量 1TeV 程度で、弱い相互作用程度の相互作用の大きさを持つ

超対称性理論のニュートラリーノなどが代表例 ━━▶ 標準模型の<mark>階層性問題</mark>を解決

暗黒物質の代表的な模型

WIMP (Weakly-Interacting Massive Particle)

標準模型の強い**CP**問題を解決 典型的には質量 1μeV - 1meV 程度で、相互作用はすごく弱い

ALP (Axion-Like Particle), ダークフォトン

典型的には質量 << 1eV で、相互作用はすごく弱い

弦理論から多数のALP, ダークフォトンが予言される? [Arvanitaki et al. (2009)]

[Peccei, Quinn (1977)]

2. 暗黒物質の様々な検証方法

2-1. WIMP暗黒物質

2-2. アクシオン暗黒物質

直接検出

- 暗黒物質のフラックス $\sim 10^4\,{\rm cm^{-2}s^{-1}}$
- 暗黒物質が検出器中の原子にたまにぶつかる
- 典型的な反跳エネルギー

 $\sim 100 \,\text{keV} \left(\frac{m_N}{100 \,\text{G}} \right)$ 100 GeV \setminus

-ション、温度上昇など

$$
E \sim \frac{m^2 m_N}{(m + m_N)^2} v^2 \sim 100 \,\text{k}
$$

相互作用の大きさ(散乱断面積)の情報が得られる

液体キセノンの場合

the WIMP analysis selections. The selection eciency

Fright Confidential (The Second Confidential Lines) for the spin-[LZ collaboration (2022)]

[Hisano, Ishiwata, Nagata (2015)] Figure 6: Wino-proton SI scattering cross section. Blue dashed and red solid lines represent LO and NLO results, respectively, with corresponding bands show perturbative [Hisano, Ishiwata, Nagata (2015)]

WIMP暗黒物質の直接・間接検出

間接検出

- などが宇宙線として地球に届く ガンマ線、ニュートリノ、陽電子
- 銀河系内成分+銀河外成分
- 質量・対消滅断面積に制限

暗黒物質はたまに対消滅する

IceCube

Super-Kamiokande

AMS-02

HESS

(銀河系外) 様々な宇宙線 観測データから 暗黒物質模型に 対して制限が付く

 10^{-5} Fermi 10^{-6} **Galactic IC** 10^{-7} **Eextragalactic** 10^{-8} 10^{-9} $10⁰$ $10⁻$

 $d\Phi/\text{dE}$ [GeV cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$]

 $\sum_{i=1}^{n}$

[K.Nakayama, PhD thesis]

宇宙背景放射

宇宙論・天体物理からの制限

[Kawasaki, Nakatsuka, Nakayama, Sekiguchi (2021)]

[Kanzaki, Kawasaki, Nakayama (2009)] FIG. 6. CMB constraints on the annihilation cross section for four DM annihilation channels. We

[Padmanabhan, Finkbeiner (2005)]

太陽からのニュートリノ

- 暗黒物質はたまに太陽の中の水素と散乱して エネルギーを失い太陽内部に溜まっていく 溜まった暗黒物質は対消滅してニュートリノを出す
- - → Super-Kamiokande, IceCubeなどから強い制限

宇宙論・天体物理からの制限

中性子星の**heating**

- 暗黒物質の対消滅が中性子星を温める → 中性子星の温度に下限が与えられる Fujiwara, Hamaguchi, Nagata, Zheng (2022)] [Kouvaris (2008), Baryakhtar et al. (2017),
	-
	- → 低い温度の中性子星が見つかれば、断面積に上限が与えられる

2. 暗黒物質の様々な検証方法

2-1. WIMP暗黒物質

● 2-2. アクシオン暗黒物質

アクシオン/ダークフォトン暗黒物質 典型的なアクシオン/ダークフォトン暗黒物質: $m ≪ $1\,{\rm eV}$$ ● 質量が軽い ―→ 数密度が大きい ―→ 「波」のように振る舞う 重 軽 \vec{v} · \overline{x} *x*)) \bullet アクシオン暗黒物質: $a(\vec{x},t)$ \bar{H} \bar{H} ダークフォトン暗黒物質: *H* $(\vec{x}, t) = H$ \overline{x} *x*))

このような振動場の下での特徴的な反応を探す

$$
= a_0 \cos(m(t - \vec{v} \cdot \vec{x}))
$$

$$
\vec{I}(\vec{x}, t) = \vec{H}_0 \cos(m(t - \vec{v} \cdot \vec{x}))
$$

Axion haloscope [Sikivie (1983)]

磁場の下でアクシオンは光子に変換する

 $\mathcal{L} = -\frac{g_{a\gamma}}{4}$ $\frac{a\gamma}{4}aF_{\mu\nu}F$ $\widetilde{F}^{\mu\nu} \simeq -g_{a\gamma} a \vec{E}$

- Cavity 周波数とアクシオン質量が 等しいとき、共鳴が起こる
- 周波数をスキャンすることで、 広いアクシオン質量領域を探索

$$
\frac{10^{-10}}{\sum_{\substack{1 \text{odd } \\ \text{odd } \\ 0}} 10^{-12}}
$$

 10^{-9}

 10^{-15}

[AxionLimits, C.O'Hare]

ADMX experiment

[Kahn, Safdi, Thaler (2016)] \sim ADD

 $\mathbf{J}_{\text{eff}}=g_{a\gamma\gamma}\sqrt{2\rho_{\text{DM}}}\cos(m_at)\mathbf{B}_0.$

––→ アクシオンが振動磁場を励起

CASPEr [Budker et al. (2013)] • ABRACADABRA [Budker et al. (2013)]

● アクシオン暗黒物質が 核スピンの歳差運動を励起 (~核磁気共鳴)

 $[O$ uellet et al. (2018)] FIG. 1. *Left:* Rendering of the ABRACADABRA-10 cm setup. The primary magnetic field is a superconducting windings around a POM support frame (*green*).

 FAvhas at a (2021) and the community polarized along the community polarized along the cylinder axis, indicated with the black arrow. The black arrow of the black arrow. The community of the cylinder axis, indicated with the black arrow of t 0211 nificant experimental interest \mathcal{I} interest \mathcal{I} and \mathcal{I} and \mathcal{I} are all \mathcal{I} and \mathcal{I} and \mathcal{I} are all \mathcal{I} and \mathcal{I} are all \mathcal{I} and \mathcal{I} and \mathcal{I} are all \mathcal{I} and [Ouellet et al. (2018)] [Aybas et al. (2021)]

$\frac{1}{2}$ discussed in matrix $\frac{1}{2}$ \Box $\overline{1111}$. In the presence of \Box アクシオン暗黒物質 直接探索

● アクシオンは2光子へ崩壊

 $\tau \sim 10^{22} \sec \left(\frac{1 \text{ eV}}{m} \right)$ *m* $\bigwedge^3 / 10^{-9} \,\text{GeV}^{-1}$ $g_{a\gamma}$ $\sum_{}^{2}$

● 可視・赤外背景放射に寄

望遠鏡による天文観測が 暗黒物質探索に使える!

[Nakayama, Yin (2022)] 背景光の非等方性の 観測から特に強い制限

アクシオン-光子結合に対する制限

["AxionLimits", C.O'Hare, https://cajohare.github.io/AxionLimits/]

<u>ダークフォトン結合定数に対する制限</u>

[Kitajima, Nakayama (2022)]

重力波とダークフォトン暗黒物質

 $(|\Phi|^2 - v^2)^2$, (1)

 $\mathcal{L} = (D_\mu \Phi)^*$ $D^{\mu}\Phi - \frac{1}{4}$ 4 $F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}-\frac{\lambda}{4}$ 4

 \mathbf{f} ていますがい クライトソ座単物

ダークフォトンが質量を持つ

- where is the dark Higgs field, *D^µ* = @*^µ ieA^µ* is the covariant derivative operator with *A^µ* **being the dark photon field of a consort is the field strength tensor is the field strength tensor, and all are finally** 初期宇宙で自発的対称性の破れ
- \longrightarrow 位相欠陷 (cosmic string) \cap 生成 IKitajima Nal cient dark photon in the strings of the strings of the string has also been reported. Phenomenology cosmology 位相欠陥 (cosmic string) の生成
- Γ comic string π Cosmic string がダークフォトンを生成 [Long, Wang (2019)]
	- 2 Cosmic string は同時に重力波も生成

重力波でダークフォトン暗黒物質シナリオの一つを検証可能

● いろんな種類の暗黒物質に対して、 いろんな観測方法が考案されている

● 先に進むには

- これまでの手法をさらに突き詰める
- 新しいアイデアを考える

● この後は、最近のアイデア(のごく一部)を紹介します

3. 暗黒物質検出と物性物理

暗黒物質と物質との反応

固体中には様々な準粒子が存在 暗黒物質との反応に利用可能

$\boldsymbol{\mathsf{X}}$ if $\boldsymbol{\mathsf{E}}$ if $\boldsymbol{\mathsf{I}}$ 真空中の粒子の分散の分散の分散の分散のある

固体電子による暗黒物質の吸収

- 暗黒物質が電子を励起状態に (光による励起と同じような原理) [Hochberg, Lin, Zurek (2016)]
	- 典型的な半導体のギャップ エネルギー ~ 1eV
		- 1eVより重い暗黒物質であれば可能
- 超伝導体のギャップ ~ 1meV

[Hochberg et al (2015), Hochberg, Lin, Zurek (2016)]

Dirac 物質のギャップ ~ 10meV [Hochberg et al (2017), Geilhufe, Kahlhoefer, Winkler (2019)]

 \overline{a} アクシオン暗黒物質の場合

 \mathbf{F}_{1} und radice constraints \mathbf{F}_{2} . [Mitridate et al. (2021)]

● ギャップエネルギー以下でも光が吸収されることがある ——→ (光学) フォノンを励起

フォノンによる暗黒物質の吸収

-
-

典型的なフォノンエネルギー ~ 0.1eV **1464** *D Strauch and B Dorner* 0.1eV 程度のダークフォトン暗黒物質検出などに有効

Exercise 12017 FK hapen, Lin, Pyle, Zurek (2017)1 Shaded regions are stellar constraints [48, 49], and direct [Knapen, Lin, Pyle, Zurek (2017)]

軽い散乱型の暗黒物質の場合

calculation at \sim 1 \sim $[G$ riffin et al., $(2019)]$ superior is the same as for the light hadrophilic mediator model. A detector threshold of 1 meV is used for the phonon

ダークフォトン暗黒物質の場合

SPICE-HeRALD project

Kamioka Cryolab project

Kamioka Cryolab development

Awarded US-Japan Proposal

Collaborators: Koji Ishidoshiro (Tohoku, JP PI), Masaya Hasegawa (KEK, QUP Co-Pi), Aritoki Suzuki (LBNL & QUP), O. Tajima (Kyoto), K. Kiuchi (U-Tokyo), A. Kusaka (LBNL & Tokyo), J. Suzuki (Kyoto), K. Ichimura (Tohoku), S. Yoshida (Osaka)

• Title: "New Kamioka underground facility for quantum sensing and low mass dark matter searches"

Dec 14, 2022 **Dec 14, 2022 COLLET ACCORD EXAMPLE AT A COLLET A** QUP Low Temperature — M. Garcia-Sciveres

[Talk by M. Garcia-Sciverse]

[Barbieri et al (1989), Chigusa, Moroi, Nakayama (2020)] Eurbieri et al (1989), Chigusa, Moroi, Nakayama (2020)]
European Annual II de la constantin Hamiltonian Hamiltonian Hamiltonian Hamiltonian Hamiltonian Hamiltonian H

 $\overline{\mathbf{L}}$ 2 (@*µa*)

マグノンによる暗黒物質の吸収 \rightarrow \overline{C} *m*² *^aa*² ⁺ (*i*@/ *^me*) ⁺ ²*f ^µ*⁵ *,* (21) where denotes the electron and *f* is of the order of the Peccei-Quinn symmetry breaking

 $\mathcal{L} =$ $\partial_{\mu}a$ $\frac{\partial \mu}{\partial f} \overline{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi$

-
- *a*(~*x, t*) = *a*⁰ cos(*mat m^a* ~ *va* - コン・ヒン シ_/

*
旅性休の*フピン/波 *(マグノ*ン) を励起

$$
H_{\rm int} = \frac{1}{f} \sum_{\ell} \vec{\nabla} a(\vec{x}_{\ell}) \cdot \vec{S}_{\ell}
$$

YIG

 $[Chigusa, Moroi, Nakayama (2020)]$ [Chigusa, Moroi, Nakayama (2020)] [Chigusa, Moroi, Nakayama (2020)]

X \mathbf{y} **QUAX experiment**

Use of Qubit

Fig. 11. Ikeda, Ito, Miuchi, Soda, Kurashige, Shikano (2020)] section, and the qubit spectrum in the qubit spectrum in the qubit spectrum in the qubit spectrum in the qubit s
The qubit spectrum in the qubit spectrum in the qubit spectrum in the qubit spectrum in the qubit spectrum in Layions, the ends are considered by \sim

!*g*

the presence of a dispersive interaction with the Kittel

[Kane, Mele (2005), Fu, Kane, Mele (2007)]

固体中のアクシオン準粒子

● トポロジカル絶縁体

● 磁性体における "アクシオン"の存在可能性 AI 100 000 Z 0 Z² Z² Z

 $\bigcap_{i=1}^n A_i$ $\theta \rightarrow \theta(t,\vec{x})$

● トポロジカル磁性体における "アクシオン" CII 1 1 1 Z 0 Z² Z² Z 000 Fe-doped Bi2Se3 [Li, W

$$
\mathcal{L} = \theta \frac{\alpha_e}{4\pi} F_{\mu\nu} \widetilde{F}^{\mu\nu} \qquad \theta = 0
$$

$$
\theta = \pi
$$

 $\mathcal{F} \cup \mathcal{F} \cup \mathcal{F} \cup \mathcal{F}$ Fig. Fig. and Mele (2010) in the spin Hall insulation. (2010) in the spin Hall instrument \mathcal{F} shows the interface between a $\mathcal{L}_{\mathcal{L}}$ and an ordinary insula-definition $\mathcal{L}_{\mathcal{L}}$

[Li, Wang, Qi, Zhang (2009)] model, in which up and down spins propagate in opposite

例:Fu-Kane-Mele-Hubbard 模型 \mathcal{L}_{max} , we briefly review the \mathcal{L}_{max} model on the diamond lattice \mathcal{L}_{max} , \mathcal{L}_{max} <u>例 .Fu-Kane-Mele-Hubbard 俣坐</u> [Sekine, Nomura

$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{1$ lattical distribution (red and blue), and a first \mathcal{A} and \mathcal{A} is a first contribution (b) \mathcal{A} Brillouin zone of a fcc lattice. Green circles represent the *X* points. $\overline{\mathbf{C}}$ F and F and F and F and F and the two sub- U) \mathbb{R} the conduction \mathbb{R} is the form and function \mathbb{R} for \mathbb{R} この模型では反強磁性マグノン~ "アクシオン"

[Marsh et al (2018), Chigusa, Moroi, Nakayama (2021)]

1.0

 $\overline{\mathcal{L}}$

 $\overline{}$

固体アクシオンを利用した暗黒物質検出

[Schutte-Engel et al. (2021)]

- 物質の種類によって色んな準粒子が存在する \bullet
- 比較的軽い暗黒物質の検出に向いている \bullet
	- 吸収型の暗黒物質: 1 meV ~ 1 keV ぐらい
	- 散乱型の暗黒物質:1 keV ~ 1 GeV ぐらい
- 暗黒物質の種類によって、反応のし易さが違う
	-
	- アクシオン…電子/核子スピンと結合 ––→ マグノン ダークフォトン … 電子/核子電荷と結合 フォノン
- こうしたアイデアに基づいた実験計画も進行中

暗黒物質検出と物性物理

 \equiv \equiv \rightarrow \rightarrow \rightarrow \equiv \rightarrow \equiv es de la provincia de la contradición de la contradición de la contradición de la contradición de la contradició
En el contradición de la contradi ● ダイヤモンドセンサー

C. Diamond synthesis and high pressure high temperature

- N D. Electron is a series of the series of 電子の量子状態を制御 F. Other common impurities in synthetic or treated single Nitrogen-Vacancy (NV) 中心の
	- (2 雷子のspin triplet state)
- $\frac{1}{2}$ 磁場、温度、圧力などの
	- 高感度センサーとして利用
	- ●アクシオン倍里物質検出へ応用 D. Techniques for the strong NV--NV- interaction regime 46 アクシオン暗黒物質検出へ応用

DSCHIED, MIZUOCHI, INAKAYAHIA, (ZUZJ)] [Chigusa, Hazumi, Herbschleb, Mizuochi, Nakayama, (2023)]

量子センサーと暗黒物質検出 2017), and industrial vector magnetometry (Grosz *et al.*, 27

NV中心による磁場検出 Wu *et al.*, 2016), nuclear magnetic resonance (NMR) (Wu *et al.*, 2016), Earth and planetary science (Glenn *et al.*,

Ramsey sequence:

- 初期状態: |0)
- most magnetic sensing applications, *H*⁰ can be taken as the π/2-パルス:
	- $\overline{1}$ $= (|0\rangle + |+1\rangle)$ $\sqrt{2}$ ~ 1 $\overline{\sqrt{2}}$ $(|0\rangle + |+1\rangle)$
	- \mathbf{b} 時間発展に影響 **尾の** Free precession 磁場があると状態の
- \bullet $\pi/2$ - $/$ ຶ $/$ \ltimes
	- with eigenstates *|m^s* = 0i, *|m^s* =1i, and *|m^s* =+1i and 終状態を読み出す(蛍光)

gaee me me $\vec{\nabla}$ $\nabla a \cdot$ \vec{S} S_e , *me ≤e* $\overline{}$ $\vec{\nabla}$, $\nabla a \cdot \dot{S}_e$ \vec{S}_e \vec{C}

$$
\times \text{ }\overline{\mathbb{Z}}^{12}
$$

- $\vec{v}_{\rm DM}$ for axion, \int or axion
- *S* \times *H*) for dark photon, $\frac{1}{2}$ for dark photon, $\sqrt{2}$ \hat{H} for dark photon $\sqrt{2\rho_{DM}}v_{DM} \approx 1.3 \times 10^{-8} T$ X *H*) for dark photon,

Effects of dark matter Let us discuss effects of dark mat- $H\ddot{\equiv} \equiv 4\mathcal{U}$ in vuit like \sim field. An example is the axion *a*(~ *x*,*t*), whose interaction La- $\frac{1}{2}$ find $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{$ grand the resulting effective the resulting effective $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ 2*me me Se* being the electron spin. Another example is the dark

 \rightarrow $\frac{\text{g}_{\text{det}}}{\text{g}_{\text{det}}}$ θ *eB* ϵ $\binom{v}{ }$ $\overline{\text{I}}$ $\sqrt{2\rho_{\rm DM}} \times \sqrt{2\rho_{\rm DM}}$ ~ eff *·* $\frac{CC}{T}$ *Se* cos(*mt +±*), (6) *B* $\vec{B}_{\text{eff}} = \sqrt{2\rho_{\text{DM}}} \times$ (*gaee e ≤* $\overline{\sqrt{25}}$ $\vec{v}_{\rm DM} \times \vec{H}$ ˆ

$$
\mathcal{L} = g_{aee} \frac{\partial_{\mu} a}{2m_e} \bar{\psi} \gamma^{\mu} \gamma_5 \psi \rightarrow H_{\text{eff}} = \frac{g_{aee}}{m_e} \vec{\nabla} a \cdot \vec{S}_e,
$$

$$
\mathcal{L} = -\frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu} H^{\mu\nu} \rightarrow H_{\text{eff}} = \frac{\epsilon e}{m_e} (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot \vec{S}_e
$$

 \overline{a} ! *H*eff *=* n 中文
In both cases of the effect Hamiltonian is expressed as with the second second in the second second in the second second in the second second in the second second second in the second second second in the second sec 暗黒物質が電子に及ぼす "磁場"

Note that a little typically a little to the single of the single o *e*°*ⁱ* R*ø* ⁰ *^H*eeff*d t* ' **^I**°*ⁱ e*°*ⁱ* R*ø* <u>n/约只</u> $\sqrt{3}$ are rapidly of $\overline{3}$ *S*(*±*) *=* $\frac{1}{4}$ → $\frac{1}{4}$ 2 *Fµ∫Hµ[∫]* ! *H*eff *= ≤e me* 暗黒物質のNV中心への影響

 \mathcal{F} and the resulting effective Hamiltonian are given a resulting effective Hamiltonian are given as \mathcal{F} by [20] *@µa* photon *Hµ*(~ *x*,*t*) with the kinetic mixing with the Standard $\mathcal{L} \cup \mathcal{L} \cup \mathcal{L}$ アクシオン

アクシオン ダークフォトン

ion and *≤* for dark photon are shown in Fig. 1. We Herbschieb, Mizuochi, Nakayama, (*Z*0*Z3*)] umi, Herbschleb, Mizuochi, Nakayama, (2023)] electron. (Bottom) The case of dark photon dark matter with ki-[Chigusa, Hazumi, Herbschleb, Mizuochi, Nakayama, (2023)]

● 暗黒物質の研究は多岐に渡る

今日紹介したものはほんの一部!

● 検出のための色んなアイデアが求められている

まとめ

-
-

- 宇宙物理・物性物理の応用や、検出器のテクノロジーの進展など
- たぶんまだ誰も思い付いていないアイデアがたくさんある