

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 量子場計測システム国際拠点 (QUP) 研究員 梅本 篤宏

第1回 学術変革「地下稀事象」若手研究会 富山大 2025/03/06

QUPの紹介

https://www2.kek.jp/qup/



International Center for Quantum-field Measurement Systems for Studies of the Universe and Particles

WPI research center at KEK

2021年12月16日発足



量子センサを用いた検出器開発・新粒子探索・量子場計測の研究を専門

QUPの

www2.kek.jp/qup/

若手研究者向け QUP インターンシッフ フログラム QUPPP

QUPは、未知の量子場を探索するために、 既知の量子場を使った新しい計測システムの開発を進めています。 QUPの研究者と、未知の量子場を見つめるための、新しい眼を研究しませんか?

2021年12

量子センサ

概要

■対象研究者:大学院生或いはポスドク或いはそれに相当する身分 ■滞在先:KEK つくばキャンパス、

QUP のサテライトの設置教育機関(UC バークレー校)、 他 QUP PI の所属先研究機関(オックスフォード大学、LBNL) ■滞在期間:1ヶ月から3ヶ月までの間(場合によっては延長の可能性あり) ■研究内容:QUP PI やシニア研究員の進める研究。 ■サポート内容:旅費及び滞在費(KEK の旅費規程に従います) ■応募〆切:随時受け付けます。

> ※詳細は以下 URL をご覧ください。 https://www2.kek.jp/qup/jobs/qupip.html



の研究を専門





2018 Planck Results

宇宙のエネルギー密度の26%を占める未知の何か

- 宇宙年齢以上に長寿命で安定
- 重力相互作用をする
- 非相対論的粒子
- 電気的に中性 などを満たす新粒子



宇宙観測の結果は重力を介して作用する暗黒物質の集団的な性質を捉えた ⇒暗黒物質の正体は明らかにされていない

Dark matter Candidates



US Cosmic Visions: New Ideas in Dark Matter 2017 : Community Report



様々な手法・検出器技術を用いた暗黒 物質探索が世界各地で展開中



宇宙観測の結果は重力を介して作用する暗黒物質の集団的な性質を捉えた ⇒暗黒物質の正体は明らかにされていない



ダイヤモンド量子センサ を用いた探索



ダイヤモンドは異なる測定手法で複数の暗黒物質モデルの直接検出が期待

Light dark matter search

Light Dark Matter Search with Nitrogen-Vacancy Centers in Diamonds

So Chigusa,^{1,2} Masashi Hazumi,^{3,4,5,6,7} Ernst David Herbschleb,⁸ Norikazu Mizuochi,^{8,9,3} and Kazunori Nakayama^{10,3}

arXiv:2302.12756

Axion Like Particle (ALP) などの軽い波状DMに感度を持つ → DM が spin に対して古典場のようにふるまうことを利用

axion $\mathcal{L}_{=} - ig_{aee}a(x)\overline{\psi}\gamma_{5}\psi(x) \quad \text{interaction with Spin 1/2 particle}$ $i\hbar \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^{2}}{2m}\nabla^{2} - \frac{g_{aee}\hbar}{2m}\vec{\sigma}\cdot\vec{\nabla}a \right]\varphi \quad \text{non-relativistic approximation}$ $-\frac{g_{aee}\hbar}{2m}\vec{\sigma}\cdot\vec{\nabla}a = -2\left(\frac{e\hbar}{2m}\right)\left(\frac{1}{2}\vec{\sigma}\right)\cdot\left(\frac{g_{aee}}{e}\vec{\nabla}a\right)$ $spin \quad \text{Axion Magnetic field}$

ダイヤモンド NV center の磁気センシングを用いた測定手法が有用

Diamond nitrogen vacancy (NV) center



- 炭素を置換した窒素と隣接する空孔からなる欠陥 - 窒素イオンや電子線照射により形成 (ダイヤモンドの製造過程で勝手に生成されることも)

> spin-triplet S = 1 $e_x \rightarrow e_v$ — a₁ excited state <u>⊢</u> a'₁ e_x – - e, - a_1 ground state <u>−</u> a'₁

> > 周囲の炭素や窒素から電子6つが供給され 電子スピンがスピン三重項を取る

4 directions of NV center Sasaki, 20210603_natsugaku_text.pdf (2021)

[111]

[111]

 $[1\bar{1}\bar{1}]$

Diamond nitrogen vacancy (NV) center



Optical property and response to external field



発光強度比からスピン状態を読み取る

磁場のみならず温度、電場、圧力に反応

two level system as a quantum sensor



Magnetometry using NV center









Schematic image of input magnetic field

Experimental data



Reconstructed magnetic field

Nature Materials, 8, 383 (2009)

Magnetic sensitivity



 $\eta \propto \frac{1}{\sqrt{n_{NV}T_2}}$ ideally, determined by the number of NV (n_{NV}) and the spin coherence time (T₂).

| NV | temperature | sensitivity | n _{NV} | T ₂ | |
|----------|-------------|------------------------|---|----------------------|----|
| Single | RT | 9.1 nT/VHz *1 | 1 | 2.4 ms ^{*1} | |
| ensemble | RT | 9 pT/vHz ^{*2} | $1.4 	imes 10^{11}$ / ($8.5 	imes 10^{-4}$ mm ³) ^{*2} | 40 μs ^{*3} | |
| Single | 77 K | | 1 | 0.6 s*4 | 25 |

*1 : Nat Commun 10, 3766 (2019), *2: Phys. Rev. X 5, 041001 (2015)

*3 : npj Quantum Inf 8, 95 (2022) ([P1] 5 ppm, NV ensemble, $T_2 = 40 \,\mu s$), *4 : Nat Commun 4, 1743 (2013)

低温かつ ensemble NV center を用いた測定 (世界でもほとんどやられていない)で磁気感度向上が期待



0.4 g diamond (NV 1 ppm ~1.6 × 10¹⁷/cc) x 1yr の測定で XENONnT (solar axion search, with 5.9 ton LXe detector)の結果に一部触れ始める ⇒ 2030年頃までに XENONnT に到達する実験感度の実現を目指す

Experimental setup at KEK





Measurement setup

冷凍機Chamber内にダイヤモンドを設置



Demonstration result



先行研究と無矛盾な共鳴周波数の温度変化を観測

暗黒物質探索に向け低温測定系を構築中

実験計画

- 2025年度
- 量子重ね合わせ状態を用いた磁気センシング
- ⇒低温 ensemble NV での感度評価とALP探索(t_{obs}~1 sec, n_{NV} = 10¹²)
- 2026年度

感度向上のための磁気ノイズ対策、DMの方向情報を用いた解析

• 2027年度

ダイヤモンド素子のアレイ化、標的質量の増大

シンチレーティングボロメータに関して



Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima



Diamondの発光量 $5.5 \times 10^4 \text{ ph/MeV}$ を実験的に確認

Basic characteristics of synthetic-diamond scintillator Atsuhiro Umemoto^{a,*,1}, Takashi Iida^b, Masao Yoshino^c, Akira Yoshikawa^{c,d}, Shintaro Nomura^a https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168789

MKID array on diamond substrate



暗黒物質探索に向けて少しずつ検出器開発を推進



- ダイヤモンドはAxion Like Particle などの波状暗黒物質やWIMPなどの粒子的暗黒物質の直接検出が期待できる検出器になり得る
- Axion Like Particle 探索では、ensemble NV center を用いた低温での磁気センシングが有用
 ⇒KEKで測定系構築・2025年度に最初の探索結果示す
- WIMP探索のためのダイヤモンドデバイスの開発も推進中

謝辞

本研究は多くの方々に協力いただいております。感謝の意を示します。

• NV center を用いたAxion 探索に関して

N. Mizuochi (Kyoto University), H, Iizuka and K. Yatsugi (Toyota Central R&D labs), Y. Kondo (KEK), K. Nakayama and S. Chigusa (QUP)

- Diamond scintillating bolometerに関して
- T. lida (Tsukuba University), M. Yoshino, S. Kurosawa, A. Yoshikawa and
- K. Ishidoshiro (Tohoku University), T. Oshima and Y. Murayama (NAOJ),
- T. Taniguchi, M. Miyakawa and C.Shinei (NIMS), Y. Miyamoto (AIST)
- Diamond を用いた暗黒物質の方向探索に関して
- S. Nomura (Tsukuba University), S. Sasaki (Niigata University)