

平成 30 年 6 月 23 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05099

研究課題名(和文) 干渉計を用いたエキゾチック素粒子の探索のための基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental research to detect exotic particles using interferometer

研究代表者

山元 一広 (Yamamoto, Kazuhiro)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・准教授

研究者番号：00401290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：存在が予言されながら、いまだ検出されていない粒子(エキゾチック素粒子)の探索そして発見は素粒子物理学及び宇宙論にとって非常に大きな意味を持つ。本研究の目的は、マイケルソン干渉計を用いたエキゾチック素粒子探索の基礎技術の確立である。従来の検出方法は素粒子が検出器にエネルギーを落とすことを利用していたが、ここでは新たな方法、素粒子が運動量を落とすことを利用する。従来の方法より感度は1桁高い。干渉計の構成要素に関する研究(鏡とその懸架系の組立、冷却試験、雑音の見積もりなど)はほぼ終わった。干渉計を組み立てて、試験観測運転を行うのが次のステップである。

研究成果の概要(英文)： Search and discovery of exotic particles, which is predicted but not detected yet so far are significant in particle physics and cosmology. Main purpose of this study is research and development of key technologies to detect such particles using Michelson interferometer. In previous methods, signal of detector is generated by energy deposition by exotic particles. In this investigation, new method (by momentum deposition) is considered. The sensitivity is 10 times better than those of previous methods. Research and development of components of detector (assembly of mirror and its suspension, cooling test, estimation of noise and so on) was almost finished. The next step is to assemble Michelson interferometer and test run for observation.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線(実験) 未知素粒子探索 低温 精密測定 干渉計

1. 研究開始当初の背景

磁気単極子のようにその存在が予言され、かつ実験的な探索が行われながら、いまだ検出されていない粒子は多数ある。このような粒子をここではエキゾチック素粒子と呼ぶ。**エキゾチック素粒子の探索そして発見は素粒子物理学及び宇宙論にとって非常に大きな意味を持つ。**

具体的なエキゾチック素粒子の例をあげると磁気単極子(モノポール)や Nuclearite(up, down, strange の3種類の quark からなる系 Phys. Rev. D 30(1984)272., Nature 312(1984)734)がある。

既に様々な方法でエキゾチック素粒子の探索が行われている。これらの方法はエキゾチック素粒子が検出器内にエネルギーを落とすことを利用している。申請者は干渉計型重力波検出器の開発を行ってきたが、干渉計を用いてエキゾチック素粒子を探索できる可能性を見出した。懸架された鏡で構成されたマイケルソン干渉計(図1)において、エキゾチック素粒子が鏡を通過すると鏡内で運動量を落とし、懸架された鏡の振り子振動が励起される。この振り子の振動を干渉計で検出する。**従来のものとは原理が異なりうえ、感度を1桁向上させることができる。**

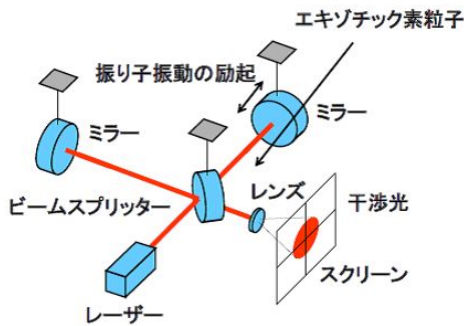


図1: マイケルソン干渉計を利用したエキゾチック素粒子検出器の概略

2. 研究の目的

干渉計を利用したエキゾチック素粒子検出器の**基礎開発**を行う。まず鏡とその振り子を一個組み立てて、基礎試験(組立手順の確立、強度試験、冷却試験、機械的散逸の測定など)を行う。そのあと、マイケルソン干渉計を組み立てる。そして試験的に観測運転をし、エキゾチック素粒子探索解析を行い、ノウハウを得る。

3. 研究の方法

- (1) 概略: 本研究の実験原理は単純であるが、振り子の振動を極限まで低減しなければエキゾチック素粒子による振り子の励起

振動は見えない。原理的な限界は振り子振動が熱的に励起される熱雑音である。揺動散逸定理によると熱雑音は振り子の機械的散逸と絶対温度の積に比例するため、低温で散逸の少ない**サファイアで鏡とファイバを作る(モノリシック振り子)**そしてこれは**冷却**する。ファイバ自体が冷却するための熱経路となっている。このような振り子をもとにマイケルソン干渉計を組立て、観測運転する。

- (2) 熱雑音低減のための低温モノリシック振り子の開発: ファイバ自体と接合の品質評価は既に重力波検出器(KAGRA)の開発のために行われている。このため次に必要となるのは組み上げたうえでの性能試験である。モノリシック振り子は重力波検出器(KAGRA)の鏡の懸架系とは異なる形態となるので別個の試験が必要となる。確認すべき点は以下ようになる。

**組み上げ手順と強度:** 安全に組み上げることが可能か、及び想定される揺れに対する強度は十分か。

**冷却及び熱負荷試験:** 短い時間で目標の温度までの冷却が可能か、そして冷却後、想定される入熱量を加えたとき温度を維持できるか。また冷却や昇温を繰り返したときに熱収縮などで破損しないか。

**熱雑音の見積もり:** 冷却したうえで、振り子の機械的散逸を測定し、測定結果と揺動散逸定理を用いて熱雑音を見積もる。その結果は十分に小さいか。

- (3) 以上の単体での評価のあとに**マイケルソン干渉計を組み、運転を行う。そして実際に解析を行い、**様々なノウハウを得る。

4. 研究成果

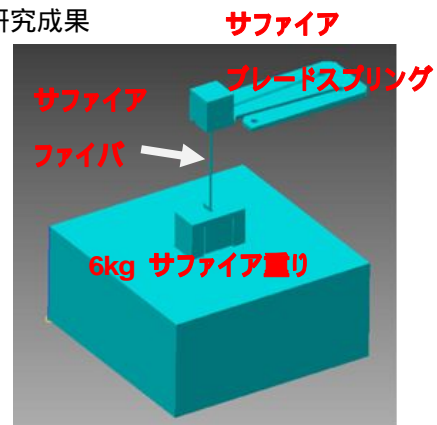


図2: サファイアモノリシック振り子

- (1) **モノリシック振り子の概略:** 図2のように直方体の**サファイア重りを一本のサファイアファイバ**(図3上)で吊っている。さらに縦方向の振動を低減するためにサファイアでできたブレードスプリング(図3中)で全体を懸架している(このスプリングは金属でできたサポートで支持される;図3下)。これらの部品の接合は

重力波検出器のために開発された Hydroxide Catalysis Bonding と Indium bonding を用いた。

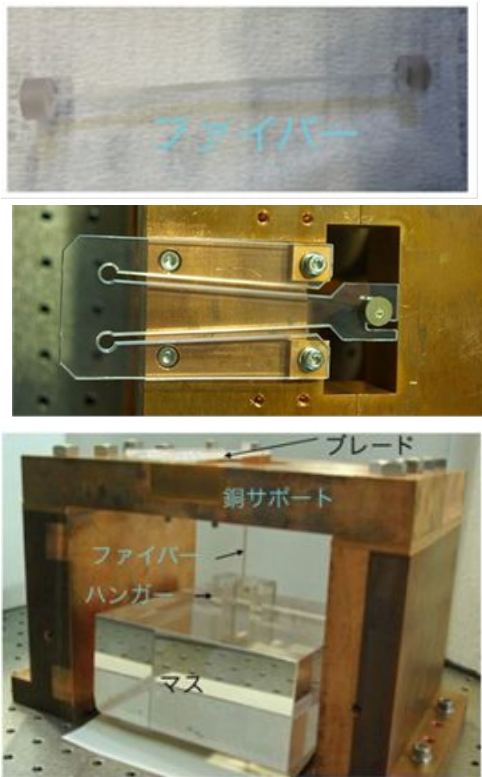


図 3：サファイアモノリシック振り子の写真（上：ファイバ、中：ブレードスプリング、下：全景）

- (2) **組み上げ手順と強度**：まず組立のためのジグなどを開発し、実際に低温モノリシック振り子を組み立てた。無事終了し、また組み立て方のノウハウを習得した。組み立てたのちに何回かの地震がおこったが、破損しなかった（大きな揺れを回避する保護装置をいれていたため）。以上のことから **安全に組立られること、またよほどの大きな地震や事故がない限り破損しないことが確認**された。
- (3) **サファイアファイバとサファイアブレードスプリングの破損**：以上のような確認を行ったにも関わらずファイバとブレードスプリングを交換し再組立を行ったさいに破損する事故が起きた。干渉計を組み立てる（複数本のファイバやブレードスプリングが必要）ことを鑑み、**手持ちのものすべての強度試験**を行った（本来の荷重の倍程度の重りをぶら下げて、それに耐えうるか調べた）。幸いなことに強度が足りないものはごく一部であった。よって **組立自体には問題はない**。またファイバに関しては製作工程上の問題が理由であることがわかったので、さらに追加発注するときにはこのような問題は起きないと考えている。

- (4) **冷却および熱負荷試験**：まず組み立てたモノリシック振り子を冷却した。10K 程度以下まで冷却でき、予期せぬ大きな熱負荷はないことを確認した。冷却時間は数日である。これはクライオスタット自体の冷却より少し長い程度で予想通りである。また長期観測において深刻な問題とならない。さらに振り子につけたヒーターに電流を流し、ヒーターによる熱と振り子の各場所の温度の関係を調べた。振り子内部に大きな温度差は生じなかったが、振り子の支持機構とブレードスプリングの間に比較的大きな熱抵抗があることがわかった。このためこの部分を改良し熱抵抗を減らした。これにより熱負荷によって大きく温度が上がることを防ぐことができた。またこれらの測定のため 10 回以上の冷却と昇温を繰り返したが、熱収縮などによって振り子が破損することはなかった。以上のことから長期運転において **深刻な問題はない**と考えている。
- (5) **熱雑音の見積もり**：モノリシック振り子の機械的散逸を測定して熱雑音を見積もった。残念ながら散逸（熱雑音）は目標より大きかった。調べてところ **ブレードスプリングの散逸が大きい**ことがわかった。散逸の低減のためには表面研磨が必須である。しかしブレードスプリングは複雑な形状をしているので研磨を行うところが難しい部分がある。この部分の散逸が大きい可能性がある（他の可能性としてはブレードスプリング自体のサファイア基材の散逸が大きいことが考えられる）。そこでシンプルな形状（円板）のサファイアを 2 枚購入した。研磨工程は片方は最善のもので、もう片方はブレードスプリングに準じている。これらのサンプルを測定することで散逸の原因を特定することができるかと期待している。
- (6) 今後の予定：モノリシック振り子単体の評価は終了したので、**マイケルソン干渉計を組み立てて、振り子を冷却し、試験観測運転を行う**予定である。さらに(5)のサファイア円板の機械的散逸を測定し、**ブレードスプリングの改良**を試験観測と平行して進める。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- Yuta Michimura, Tomofumi Shimoda, Takahiro Miyamoto, Ayaka Shoda, Koki Okutomi, Yoshinori Fujii, Hiroki Tanaka, Mark A Barton, Ryutaro Takahashi, Yoichi Aso, Tomotada Akutsu, Masaki Ando, Yutaro Enomoto,

- Raffaele Flaminio, Kazuhiro Hayama, Eiichi Hirose, Yuki Inoue, Takaaki Kajita, Masahiro Kamiizumi, Seiji Kawamura, Keiko Kokeyama, Kentaro Komori, Rahul Kumar, Osamu Miyakawa, Koji Nagano, Masayuki Nakano, Naoko Ohishi, Ching Pin Ooi, Fabian Erasmo Pena Arellano, Yoshio Saito, Katsuhiko Shimode, Kentaro Somiya, Hiroki Takeda, Takayuki Tomaru, Takashi Uchiyama, Takafumi Ushiba, Kazuhiro Yamamoto, Takaaki Yokozawa and Hirotaka Yuzurihara  
 “Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope”  
 Classical and Quantum Gravity 34 (2017) 225001.  
 (DOI:10.1088/1361-6382/aa90e3 査読有)
2. K. Haughian, D. Chen, L. Cunningham, G. Hofmann, J. Hough, P. G. Murray, R. Nawrodt, S. Rowan, A. A. van Veggel, and K. Yamamoto  
 “Mechanical loss of a hydroxide catalysis bond between sapphire substrates and its effect on the sensitivity of future gravitational wave detectors”  
 Physical Review D 94 (2016) 082003.  
 (DOI:10.1103/PhysRevD.94.082003 査読有)
3. G Hofmann, D Chen, G Bergmann, G D Hammond, M Hanke, K Haughian, D Heinert, J Hough, A Khalaidovski, J Komma, H Lück, E Majorana, M Masso Reid, P G Murray, L Naticchioni, R Nawrodt, S Reid, S Rowan, F Schmidl, C Schwarz, P Seidel, T Suzuki, T Tomaru, D Vine and K Yamamoto  
 “Indium joints for cryogenic gravitational wave detectors”  
 Classical and Quantum Gravity 32 (2015) 245013.  
 (DOI:10.1088/0264-9381/32/24/245013 査読有)
4. K Haughian, R Douglas, A A van Veggel, J Hough, A Khalaidovski, S Rowan, T Suzuki and K Yamamoto  
 “The effect of crystal orientation on the cryogenic strength of hydroxide catalysis bonded sapphire”  
 Classical and Quantum Gravity 32 (2015) 075013.  
 (DOI:10.1088/0264-9381/32/7/075013 査読有)
- 〔学会発表〕(計 11 件)
1. 山元一広、井上優貴、上田綾子、牛場崇文、越智聡郎、木村誠宏、Rahul Kumar、鈴木敏一、高田卓、田中宏樹、寺嶋眞一、都丸隆行、生井義、萩原綾子、長谷川 邦彦、福永真士、Helios Vocca、宮本昂拓、村上巖、山田智宏、宍戸高治、吉岡 聡也、内山隆、梶田隆章、三代木伸二  
 “KAGRA 低温系の現状 III(KAGRA siteでの低温鏡懸架系のインストールと冷却)”、  
 日本物理学会第 73 回大会年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018 年 3 月 22 日
2. Kazuhiro Yamamoto,  
 “Status of KAGRA cryogenic suspension”,  
 the New Windows on the Universe project (NEWS) General Meeting 2018 INFN Pisa, Pisa, Italy, 14 March 2018
3. 山元一広、Kieran Craig、梶田隆章、宮本昂拓、田中宏樹、萩原綾子、木村誠宏、Rahul Kumar、鈴木敏一、都丸隆行、上田綾子、牛場崇文、粕谷順子、高田卓、灰野禎一、井上優貴、Ettore Majorana、Helios Vocca、  
 “KAGRA 低温系の現状 II”、  
 日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎大学、2016 年 9 月 22 日
4. Kazuhiro Yamamoto,  
 “Overview of the 20K configuration”,  
 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop,  
 Isola d’Elba, Italy, 23 May 2016
5. 山元 一広  
 “KAGRA の低温懸架系”、  
 平成 27 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、  
 東京大学 柏キャンパス、2015 年 12 月 18 日
6. Kazuhiro Yamamoto,  
 “Cryogenic Payload Issues”,  
 ELiTES: 4th general meeting,  
 Ookayama campus, Tokyo Institute of Technology, Mugeru-ku, Tokyo, Japan,  
 2 December 2015
7. 山元一広、宮本昂拓、田中宏樹、内山隆、Simon Zeidler、萩原綾子、木村誠宏、R. Kumar、久米達哉、村上巖、鈴木敏一、寺嶋眞一、都丸隆行、高田卓、E. Majorana、L. Naticchioni、K. Craig、A. Cumming、R. Douglas、G. Hammond、K. Haughian、I. Martin、P. Murray、

S. Rowan, D. Heinert, G. Hofmann,  
J. Komma, S. Kroker, R. Nawrodt,  
C. Schwarz, KAGRA collaboration  
“KAGRA 用低温懸架装置の開発 VII”、  
日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市  
立大学、2015 年 9 月 27 日

8. Kazuhiro Yamamoto,  
“Cryo-payload”,  
KAGRA face to face meeting,  
University of Toyama, Toyama, Japan,  
27 August 2015
9. Kazuhiro Yamamoto,  
“Pros and cons of cryogenics for  
Einstein Telescope and Cosmic  
Explorer”,  
Gravitational Wave Advanced Detector  
Workshop,  
Alyeska Resort, Girdwood, Alaska,  
U.S.A., 22 May 2015
10. Kazuhiro Yamamoto,  
“Cryogenic interferometer  
technologies”,  
Gravitational Wave Advanced Detector  
Workshop,  
Alyeska Resort, Girdwood, Alaska,  
U.S.A., 19 May 2015
11. Kazuhiro Yamamoto,  
“Thermal Noise and Materials,  
Coatings, Optics, Cryogenics”,  
Gravitational Wave Advanced Detector  
Workshop,  
Alyeska Resort, Girdwood, Alaska,  
U.S.A., 18 May 2015

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

山元 一広 (YAMAMOTO, Kazuhiro)  
富山大学大学院・理工学研究部 (理学)・  
准教授  
研究者番号 : 00401290