

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20921

研究課題名（和文）真空のゼロ点エネルギーの未解明な成分に対する実験的検証の試み

研究課題名（英文）Experimental study of the unknown component of the vacuum energy

研究代表者

嶋 達志（Shima, Tatsushi）

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：10222035

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：量子真空の自己エネルギーは系の幾何条件に依らず一定の斥力を生み出すため、宇宙のダークエネルギーとの関連が示唆されている。自己エネルギーは空間の境界面が持つ遮断周波数に依存するため、境界面に作用する圧力の遮断周波数依存性を検知することで、その実在が確認できると期待される。実際には圧力は極めて小さいため、遮断周波数の操作と圧力による変位の測定を非接触で行うことが鍵となる。そこで境界面の材料として光半導体（CdTe）を用い、さまざまな強度の制御光を照射することで電気伝導度、従って遮断周波数を制御する手法を開発し有効性を確認した。また境界面の変位を静電容量の変化として非接触で測定する方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空の自己エネルギーは、宇宙背景放射の観測から推測されているダークエネルギーとの関連が示唆されており、その性質を調査することは基礎物理学における重要課題であるが、これまでは繰り込みの処理によって省かれ、より深い考察があまり為されていなかった。自己エネルギーは系の境界面の遮断周波数に依存すると考えられ、その性質を利用して実在が確かめられれば量子場の理論や宇宙論に対する大きなインパクトとなる。本研究では、自己エネルギーの検出に置いて鍵となる、非接触での遮断周波数の操作および圧力変化の検知方法について原理的妥当性が確認され、自己エネルギーの検出に向けての重要な足掛かりが得られた。

研究成果の概要（英文）：Self energy of quantum vacuum generates positive pressure independent of geometrical boundary condition of the space, and therefore it is suggested to be related to the cosmic dark energy. Since the self energy depends on the cutoff frequency ( $F_c$ ) of the boundary, its effect is expected to be detected as the change of the pressure on the boundary according to  $F_c$ . Since the pressure should be very small, it is essential to change  $F_c$  and measure displacement of the boundary by pressure without contact. For that purpose we employed optical semiconductor (CdTe) as the material for the electrode of the boundary, and confirmed  $F_c$  can be controlled by changing the illuminance onto the electrode. For detection of the pressure onto the boundary, we developed the method of measuring displacement of the electrode as the change of its capacitance with the input RF signal. At present, the accuracy of the measurement is about 3%, which will be improved with longer measuring time of the RF signal.

研究分野：素粒子実験・原子核実験

キーワード：真空の自己エネルギー ダークエネルギー 光半導体 CdTe

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙背景放射の揺らぎの精密観測から、宇宙のエネルギー密度の 68.3% がダークエネルギー、26.8% がダークマター、4.9% がバリオンであることが突き止められている。ダークマターについては過去 30 年以上にわたって直接検出の努力が続けられているが、ダークエネルギーについては実験的研究がほとんど進んでいない。理論的には、恒常的な斥力を示すという定性的な性質に着目し、真空の自己エネルギーとの関連が議論されてきた。また近年は、クインテッセンス場と呼ばれる未知の量子場を導入することでダークエネルギーの性質を説明することも試みられている。

### 2. 研究の目的

本研究は、前述のダークエネルギー候補のうち、真空の自己エネルギーについて、その物理的効果を検出するための開発研究を行うことを目的とする。

標準的な場の量子論では、真空がゼロではない  $P_V$  エネルギーを持ちうる。帯電していない 2 枚の平行な極板を考えると、極板間の電磁場のゼロ点エネルギーは単位面積当たり

$$\varepsilon = \frac{3\hbar c}{\pi^2} \cdot \Lambda^4 a - \frac{\hbar c}{2\pi} \cdot \Lambda^3 - \frac{\pi^2 \hbar c}{720} \cdot a^{-3} \quad (1)$$

である ( $a$  は極板間距離、 $\hbar$  は換算プランク定数、 $c$  は真空中での光速)。 $\Lambda$  は極板間の電磁場に対するカットオフパラメータであり極板の電気伝導率で決まる遮断周波数  $f_c$  から  $\Lambda = 2\pi f_c / c$  で与えられる。式(1)の右辺の各項は各々真空の自己エネルギー  $V_V$ 、極板に対する輻射補正  $V_R$ 、極板間に働くカシミール力のポテンシャル  $V_C$  であり、図1の(a), (b), (c)に対応する。

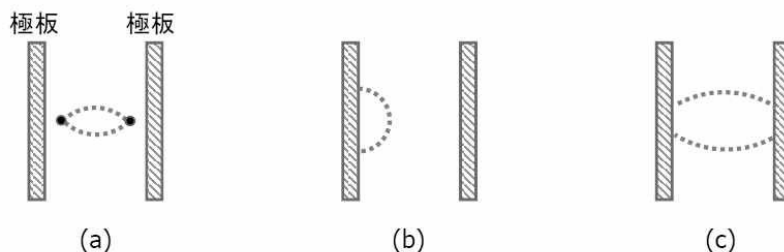


図1. 2枚の平行電極面の間に現われる電磁場のゼロ点振動の寄与。点線は仮想光子を表す。

極板に働く圧力は式(1)から

$$P = -\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = -\frac{3\hbar c}{\pi^2} \cdot \Lambda^4 - \frac{\pi^2 \hbar c}{240} \cdot a^{-4} = -P_V(\Lambda) - P_C(a) \quad (2)$$

と求められる。第2項はカシミール力 ( $P_C$ ) として知られており、実験的にも確認されている。一方、第1項は  $a$  に依存しない一定の圧力を意味し、極板が完全導体 ( $\Lambda \rightarrow \infty$ ) の場合は発散するが、通常のカシミール力に関する議論では、極板の裏表両面に同じ強さの圧力が (逆向きに) 作用するため互いに相殺し、観測されないものとして省略される。しかしこの項は、そのエネルギーが体積に比例するという点でダークエネルギーと大きな類似性を持っており、実験的な検証はダークエネルギーの理解に向けて大きなヒントを与えるものと期待される。我々は、 $P_V$  が  $\Lambda$  に依存することに着目し、その寄与が極板の両側で相殺しないような実験条件を設定することで直接検出を目指しており、本研究ではそのための技術開発をおこなった。

### 3. 研究の方法

図2は実験装置の上面図である。電極 A、B の向かい合った面の間には通常のカシミール力が働く。電極 B はアームの一端に接続されており、外力が作用すると回転中心の周りにトルクが発生する。アームの反対側には変位検出・補正電極が設置され、トルク信号を検出する。電極 A は圧電アクチュエータによって移動可能であり、電極 A-B 間の距離の関数として極板間の力を

測定できる。この手法は基本的に従来のカシミール力測定実験の手法を踏襲しているが[1]、本研究ではさらに電極 B の背面に光半導体の蒸着層を設け、照射する LED 光の強度を変えることで蒸着層の電気伝導率を制御する。これによって極板 B の右側での遮断周波数  $f_c$  を変化させ、極板の内外で式(2)の第 1 項の相殺が起こらない状況を作る。蒸着層の厚さ  $10\mu\text{m}$  の場合の  $P_V$  と  $P_C$  の比較を図 3 に示す。

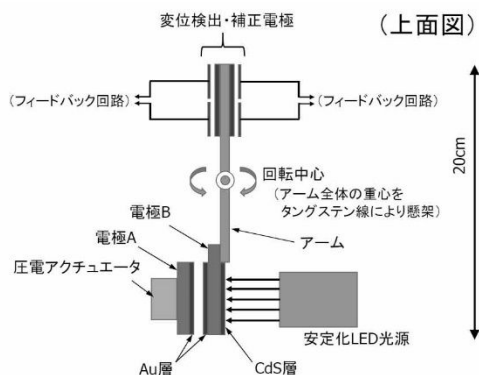


図 2 . 実験装置の概要 (上面図)。

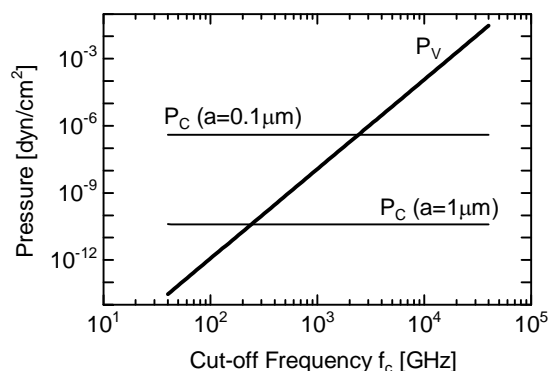


図 3 .  $P_V$  とカシミール力  $P_C$  との比較。

このように、極板間の力の  $a$  および  $\Lambda$  に対する依存性を精密に測定することで  $P_C$  と  $P_V$  との分離が可能となる。この測定における技術的な鍵は、

- ・ 外部制御光による非接触での光半導体電極の遮断周波数制御
- ・ ミクロンオーダーの極板間距離の測定手法

であり、この 2 点について重点的に研究を進めた。

#### 4 . 研究成果

##### (1) 外部制御光による光半導体電極の遮断周波数制御

光半導体の材料として、本研究ではまずカドミウム-テルル化合物半導体 (以下 CdTe) に着目した。これは、大気中でも酸化されにくく安定であること、放射線検出器用デバイスとして高品質の材料が普及していること、等の理由によるものである。

一般に、物質の表面における角振動数  $\omega (=2\pi f)$  の電磁波に対する反射率  $R(\omega)$  は式(3)で表すことができる。

$$R(\omega) = \frac{(1 - c\alpha)^2 + (c\beta)^2}{(1 + c\alpha)^2 + (c\beta)^2}, \quad \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{\mu^2 \varepsilon^2 + \frac{\mu^2 \sigma^2}{\omega^2}} + \mu \varepsilon} \\ \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{\mu^2 \varepsilon^2 + \frac{\mu^2 \sigma^2}{\omega^2}} - \mu \varepsilon} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  は物質の透磁率、誘電率、電気伝導度である。また  $c$  は真空中の光速を表す。すなわち、電気伝導度  $\sigma$  を制御することで、反射率を変化させることが可能である。ただし CdTe 半導体については、光伝導特性の報告例がほとんどないため、今回実際に測定を行った。測定に用いた CdTe 試料は、株式会社アクロラド製・ピクセル検出器用素子であり、 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times$  厚さ  $1\text{mm}$  のウェハーである。図 4 に示すように、様々な光量の LED 光をウェハー面に垂直に照射し、対角線方向の電気抵抗を測定した。各測定における照射光量は分光光度計を用いて計測された(図 5)。

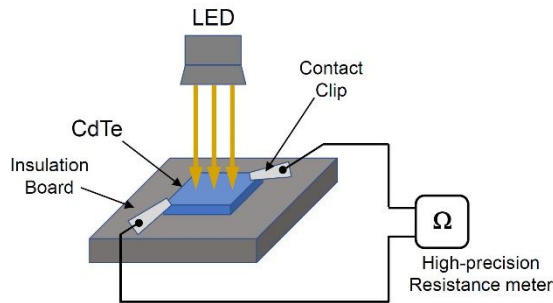


図4 . CdTe 試料の光伝導特性測定セットアップ

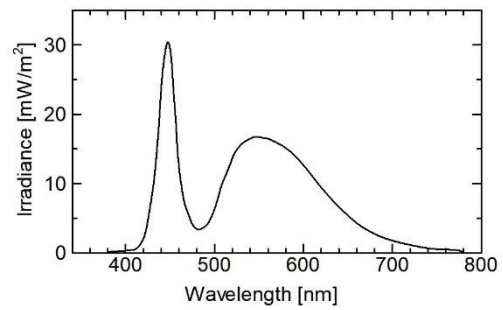


図5 . 照射光の分光放射照度の例

この測定から求められた照度-電気伝導度 $\sigma$ の関係を図6に示す。無照射の状態では $\sigma=(1.6\pm 0.2) \times 10^{-6}$  [S/m]、照度 200 [W/m<sup>2</sup>]では $\sigma=(7.84\pm 0.04) \times 10^{-4}$  [S/m]となり、500 倍近い変化率が確認された。

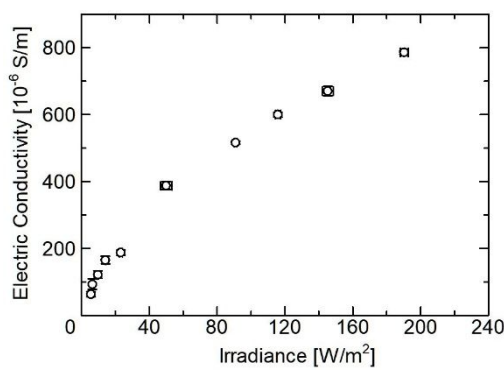


図6 . 電気伝導度の照度依存性

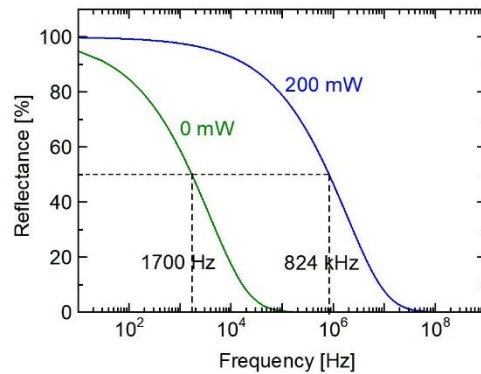


図7 . 異なる制御光照度における反射率

測定された電気伝導度を用い、それぞれの照度における反射率を式(3)に基づいて求めると、図7に示すように遮断周波数に対して約 500 倍の変化を与え得ることがわかった。

## (2) ミクロンオーダーの極板間距離の測定手法

真空の自己エネルギーが発生する圧力は微小であるため、図2中の変位検出電極に生じる変位も極めて小さく、数 $\mu\text{m}$ ~数十 $\mu\text{m}$ 以下と予想される。このような微小な変位を検出する方法として、極板間の静電容量の変化に着目した。図8に示すように、変位検出電極 ME (可動) と向かい合わせに固定電極 FE<sub>a</sub>、FE<sub>b</sub> を置き、静電容量を持たせる。ME-FE<sub>a</sub>間、ME-FE<sub>b</sub>間の静電容量  $C_a$ 、 $C_b$  は  $C_a = C_b = \epsilon_0 S / x$  ( $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $S$  は FE<sub>a</sub>、FE<sub>b</sub> の面積) で表され、全静電容量は  $C = C_a C_b / (C_a + C_b) = \epsilon_0 S / (2x)$  で与えられる。この静電容量  $C$  を RC 直列回路に組み込み、外部交流電源にて交流電圧  $V_s(t) = V_0 \sin \omega t$  を与える。抵抗  $R$  の両端に現れる電圧  $V_R(t)$  の  $V_s(t)$  に対する位相差は  $C$  の大きさ、したがって極板間距離  $x$  に応じて

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\omega RC} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{2x}{\omega R \epsilon_0 S} \right) \quad (4)$$

で与えられる。

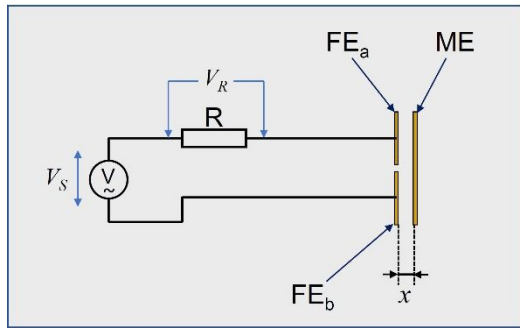


図8. 変位検出システム(概念図、記号は本文を参照)

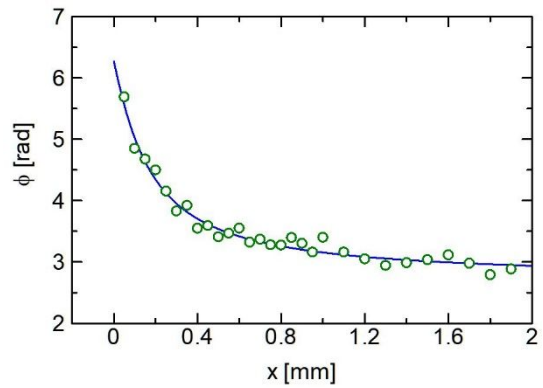


図9. 極板間距離  $x$  に対する位相差  $\phi$

ファンクションジェネレータを用いて発生した  $V_S$  と抵抗両端の電位差  $V_R$  の波形を二次元波形デジタイザによって同時に計測し、極板間距離  $x$  のさまざまな値に対して記録した。10 周期分のサンプリングデータから求められた位相差  $\phi$  の  $x$  依存性を図9に示す。緑の丸印は測定データ、青の曲線は式(4)を用いてフィッティングした結果である。真空の自己エネルギーの効果を測定する際には逆に  $\phi$  の測定値から  $x$  を決定するが、今回の結果で測定原理の正しさが確認された。ただし今回の結果から推定される  $x$  の精度は  $x=10 \mu\text{m}$  の領域で  $10 \mu\text{m}$  程度であり、十分とは言えない。現状では波形のサンプリングデータから求められた位相差  $\phi$  自体の誤差が支配的であることがわかっており、サンプルする波形を 1000 周期分に増やすことで、誤差の低減を試みている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中井創, 嶋達志
2. 発表標題 真空の自己エネルギーの検出(3)
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井創, 嶋達志
2. 発表標題 真空の自己エネルギーの検出(2)
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------