

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654095

研究課題名(和文)電子ビーム駆動超大強度超音波源の開発による動のカシミール効果の検証

研究課題名(英文)Dynamical Casimir effect using electron beam driven high power ultrasonic source

研究代表者

吉田 光宏 (Yoshida, Mitsuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号：60391710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：動のカシミール効果は、真空のゼロ点エネルギーを直接的に電磁波として観測できる唯一の方法であり、過渡的な境界の変動に伴う量子場の零点エネルギーの変化による電磁波の放射である。本研究では、電子管内の密度変調された電子ビームを用いて従来技術を遥かに凌駕する高周波で大強度の超音波による動のカシミール効果の検証を行う。従来の圧電素子などを遥かに凌駕できるGHz帯の電子ビーム駆動の超大強度超音波源を、電子管により生成し、これを超伝導空洞に照射し、冷却低雑音アンプで増幅して空洞からの高周波の測定を行った。

研究成果の概要(英文)：The dynamical Casimir effect is the only way to observe the electromagnetic wave from the vacuum by oscillating the boundary wall of the RF cavity. However the existing technology such as piezo electric device to obtain the ultrasonic wave is much less than the required power. In this research, the electron driven high power ultrasonic source was developed to oscillate the wall of the superconducting cavity. The RF output from the vacuum was measured using ultra low noise amplifier.

研究分野：素粒子(実験)

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

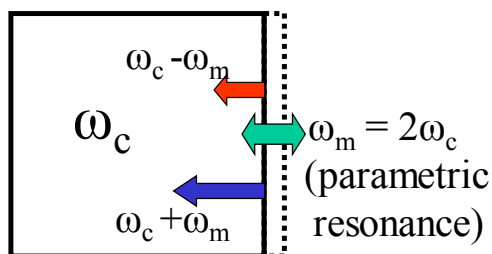
キーワード：カシミール効果

1. 研究開始当初の背景

近年宇宙背景放射の観測から、ダークエネルギーが宇宙の組成の 73 %を占める事が示された。ダークエネルギーは宇宙定数で表される真空エネルギーである可能性が挙げられている。

しかし、真空中の電磁波のゼロ点エネルギーを波数無限大まで積分すると発散する事が知られており、プランクスケールまで積分するとエネルギー密度は 10^{106} J/m^3 となり、宇宙定数の観測値から計算されるエネルギー密度である 10^{-11} J/m^3 と 117 桁もかけ離れてしまう事が smallness problem として良く知られている。逆に観測値から電磁波のゼロ点エネルギーのカットオフを計算すると 90 THz (0.4 eV) となり、仮にダークエネルギーが真空エネルギーであれば、この辺りのニュートリノの質量などがある領域に、何らかの新しい根幹の物理がある事を示唆している。

動的カシミール効果は、過渡的な境界の変動に伴う量子場の零点エネルギーの変化による電磁波の放射である。真空中で共振器の壁を急激に動かすと、真空から光子が生成されることが理論的に予想されている。しかし、従来技術では、共振器の壁を高速に動かす方法が無く、最近提案されている実験方法は擬似的な方法によるものである。



$$N_{\text{photon}} = Q\omega T \beta^2$$

図 1 : 動的カシミール効果の原理

動的カシミール効果が実験的に検証できていなかった原因は、共振器の壁を量子場の真空の定義が変わるほど高速に、かつ高周波で動かすことが難しいからである。圧電素子は 10 MHz までが、それなりの電力が得られる限界であり、また耐圧の関係から低電力の超音波しか得られない。このような背景から、近年は直接壁を動かす方法ではなく、レーザーで誘電率を制御する方法や、超伝導量子回路中の磁束量子に対するポテンシャルを変化させる方法、またはボーズ=アインシュタイン凝縮をレーザーで励起し、そこを通った光子による誘導放射で信号を増幅しようとするものなど、擬似的な方法へと移行しているが、それも成功していなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上記のような擬似的な方法に頼らず、従来の圧電素子などを遙かに凌駕できる電子ビーム駆動の超大強度超音波源を開発し、直接的な本来の動的カシミール効果の検証を行うものである。超音波による導体壁の速度は、周波数によらず、弾性波のエネルギーの平方根のみに依存し、さらに、動的カシミール効果で生成される光子数は、周波数に比例する。そこで超音波の周波数と強度を上げるために、パンチした低エネルギーの電子ビームを標的に衝突させた際に生じる超音波を使用する事を選択する。特にクライストロン電子管内の高周波パンチした電子ビームは非常に大強度であり、これを金属ターゲットに衝突させて超音波を生成する事

得られる

GHz 帯という超音波としては非常に高い周波数が発生できる

という利点を利用し、圧電素子等の超音波デバイスでは不可能であった、共振器の導体壁を動かすという最も基本的かつ直接的な方法で動的カシミール効果の検証を行う。

3. 研究の方法

動的カシミール効果の検証において、パラメトリック発振により生成されるフォトン電力は $P_{\text{photon}} = Q\omega\beta^2$ で表される。ここで Q は空洞の Q 値と角振動数、 β は高速に対する音波の振動の速度の比である。従って、周波数を高くし、かつ大強度の超音波が必要となるが、電子管ではこのどちらも圧電素子を凌駕でき、原理的には任意にパラメーターを変化できる。ただし、既存の電子管デバイスであるクライストロンを利用する場合、電子の運動エネルギーから超音波エネルギーへの変換板で、電子の飛程が超音波の半波長以下となる必要があり、最適なパラメーターが決定される。超音波変換ターゲットとしては、飛程を短く波長を長くするためには、 Z が大きく音速が速い材料であり、さらに高融点なタングステンが最適な材料である。電子のエネルギーを 30 kV とすれば、飛程が数 μm となり、結果 1 GHz 程度の超音波源が可能となる。例えば 30 kV の電子管では 100 kW 程度の電子ビームであるので、変換効率が仮に 1 % しかないとしても 1 kW の出力が得られる事になる。このパラメーターで光子数は 10^7 個/s となり、 10^{-17} W となり、冷却 HEMT でも検出可能なレベルとなり、冷凍機等も簡単である。

図 2 は電子ビーム駆動超音波源の概念図と、動的カシミール効果を検出する空洞の模式図である。クライストロン電子管内を

走行する電子ビームは、入力空洞に与えられたマイクロ波により速度変調され、タングステンターゲット位置まで走行する間に高周波のバンチに集群される。集群された電子はタングステンターゲット中で波長より十分に短い数 μm の飛程で、タングステンターゲットの原子に運動量を移行し、弾性波となって伝達する。この弾性波を熱伝導率が小さく超音波は伝達する物質（例えばG10）などを伝達させ、超伝導空洞の壁へ導く。動的カシミール効果の光子を生成する超伝導空洞の壁へは低い結合度で結合させ、さらに熱伝達を極力抑えた状態で、振動を、空洞壁面を含む振動の共振構造に弾性波エネルギーを閉じこめ、壁面の振動を増大させる。この方法で、1 GHz という弾性波としては非常に高い周波数で、壁面速度を光速に対する速度比 $=v/c \sim 10^{-6}$ 程度にでき、先の検出可能なレベルの出力が得られる計算である。

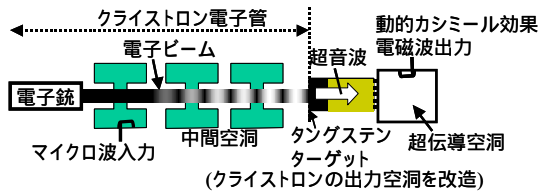


図 2 : 概念図

4 . 研究成果

従来の圧電素子などを遥かに凌駕できる電子ビーム駆動の超大強度超音波源の開発を行った。図 3 は超音波ターゲット中の電子の飛程と超音波の波長の関係である。

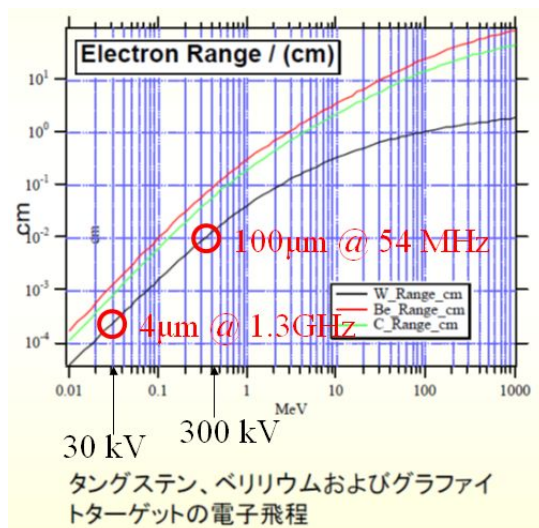


図 3 : 電子の飛程と超音波の波長

電子の飛程は超音波の波長より十分に短い必要があり、そのためには周波数を下げる必要があるが、周波数を下げると、クライストロンも空洞も大型化してしまう上に、空洞の電磁波の変化量も減ってしまう。今回はそれ

らの関係から、50MHz を選択した。

50MHz ではクライストロンでは入力空洞や中間空洞が必要となり、装置全体が大型化してしまう。そこでレーザーフォトカソードを用いた電子管を製作した。

フォトカソード用のレーザーとしては図 3 のように連続出力で高出力の得られる Yb ファイバーレーザーで 50MHz でモードロックをかけ、これを増幅する事で 20W 程度の出力が得られた。

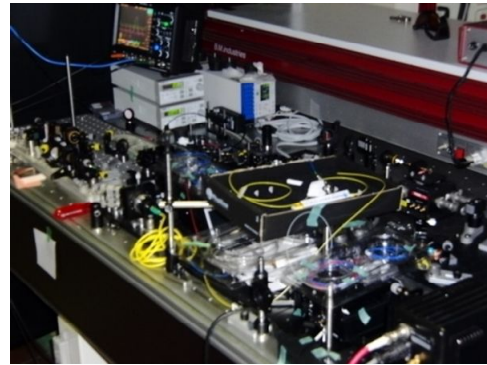


図 3 : Yb ファイバーレーザー

この 50MHz 繰り返しの赤外線レーザーを非線形光学素子である BBO で高調波に変換して、図 4 のカソードに照射し、超音波を発生させるための電子を得るようにした。

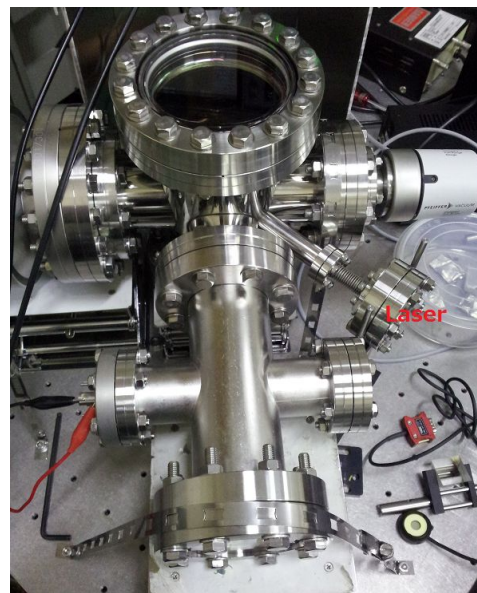


図 4 : フォトカソード用真空チェンバー

これにより 50MHz 繰り返しの電子ビームを超音波発生ターゲットに当て、超音波発生を行った。

超伝導空洞としては、50MHz では通常の空洞では非常に大型になってしまうため、シリコンウェハー上に Nb 薄膜でメアングラーのキャパシタンスとインダクタンスを構成し、キャパシタンスの幅を超音波で振動させる事で超伝導空洞の壁を変化させるようにした。

この高周波空洞の真空から出力される高周波は低温の超低雑音増幅器で増幅し、それをさらに常温の高周波増幅器で増幅して、外部からの超音波を低周波で ON/OFF しロックインアンプで観測したが、今の所動的カシミアール効果の信号は検出できていない。

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 0件)

〔学会発表〕(計 0件)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 光宏 (YOSHIDA, Mitsuhiro)

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授

研究者番号： 60391710

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：