

～ASTROセミナー～

最近のフィールド推進機関開発状況 ～ Quantum Drive (量子ドライブ) ～



Oct.19 2025

Toshihide Yamamoto

1. Quantum Drive 考案者 Mike McCulloch

・所属

イギリス・プリマス大学 (University of Plymouth) の
コンピューティング・エンジニアリング
数学学科所属。Senior Lecturer (上級講師)

・専門

「地球観測と宇宙科学」(大学サイトで紹介)
もともとは海洋学・地球物理学で、人工衛星データ
を使った地球観測(海面高度計など)を研究してい
た。

・Quantum Drive研究の流れ

天体物理・宇宙力学の問題に関心を持ち、特に「銀河回転曲線の異常(暗黒物質で説明される現象)」に対して“Quantised Inertia(量子化慣性, QI)”という独自理論を提唱。

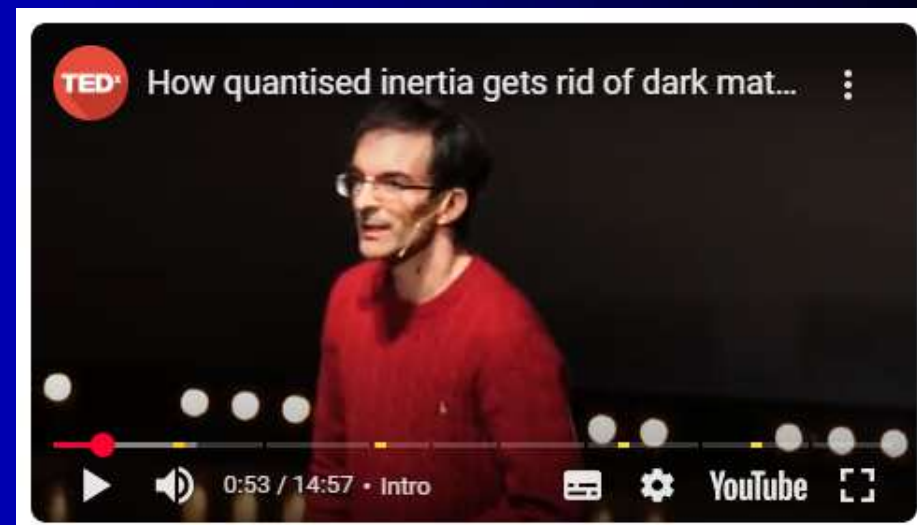
この QI を銀河スケールから小スケールに適用し、

⇒ 銀河回転曲線を暗黒物質なしで説明できるか？

⇒ 宇宙加速(ダークエネルギー)とつながるか？

⇒ 人工的に利用すれば推進器(スラスタ)になるのではないか？

という研究へ展開している。



2. Quantum Drive 推進原理概要(1)

(1) 根本仮定

慣性は物体が加速したときに生じる Unruh 放射(加速する観測者が見る熱的な場)と宇宙的/境界的效果(カシミール様効果)が関係しており、これが不均衡になると慣性力に差が生じるという考えに基づく(Quantised Inertia の基本)。

(2) 推進原理の要点

加速体の周囲で発生する Unruh 波長は加速度に依存する。

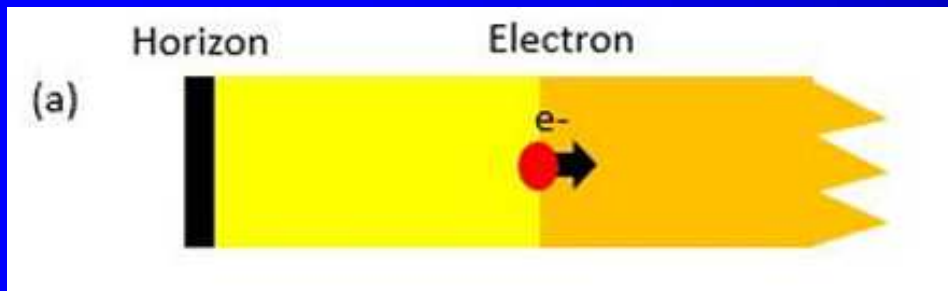
McCulloch の主張では、周囲に金属や導体構造、あるいは共振器を置くと(または電磁場で特定の励起を行うと)その Unruh 放射のモードが境界条件で変化し、一方向に有利な放射モードの抑制・増強が生じ、結果として慣性に方向性の差が出る。

この慣性の差が観測上の推力と等価に振る舞う、と説明している。

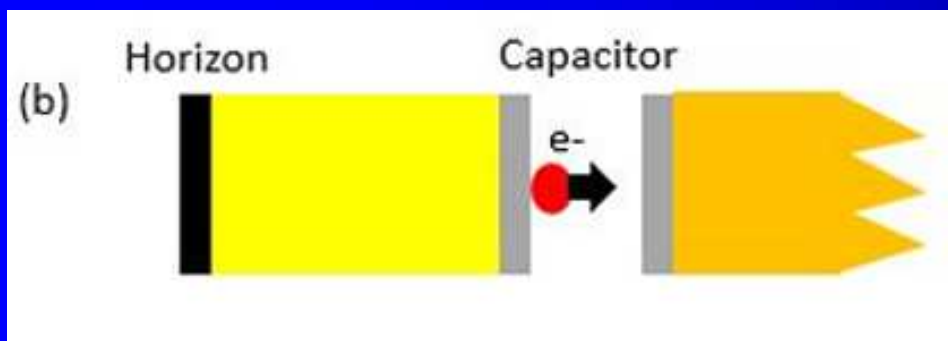
(3) 具体的なデバイス案

- ① 非対称コンデンサ(asymmetric capacitors)や対称コンデンサを特定の条件で駆動して推力を得る案。
- ② EMDrive 等の共振キャビティで観測したとされる小さな推力を QI で説明する試み(または類似の光学・電磁共振系を使えば大きくできる可能性の論議)
- ③ 光(レーザー)を利用する光学共振体を使えば効率を上げられる、という理論的提案

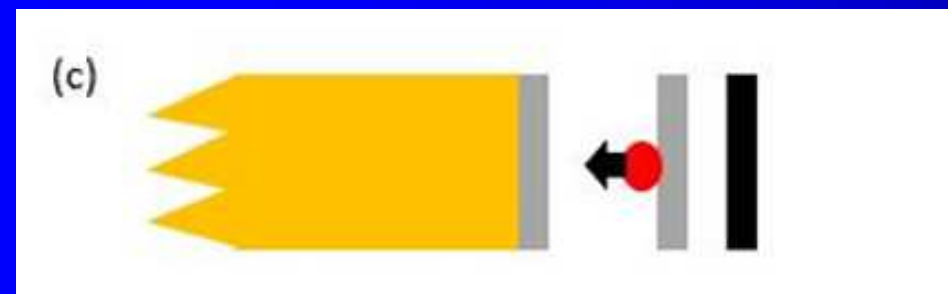
3. Quantum Drive 推進原理概要(2)



(a) 量子化慣性下で右方向に加速する電子の模式図。電子の前方(オレンジ色)には地平線が存在しないため、より多くのウンルー放射を受ける。左側(黄色)にはリンドラー地平線(黒線)により放射が減衰するため、受けるウンルー放射は少なくなる。この放射の不均衡により、電子は加速度に逆らって押され、慣性が生じる。

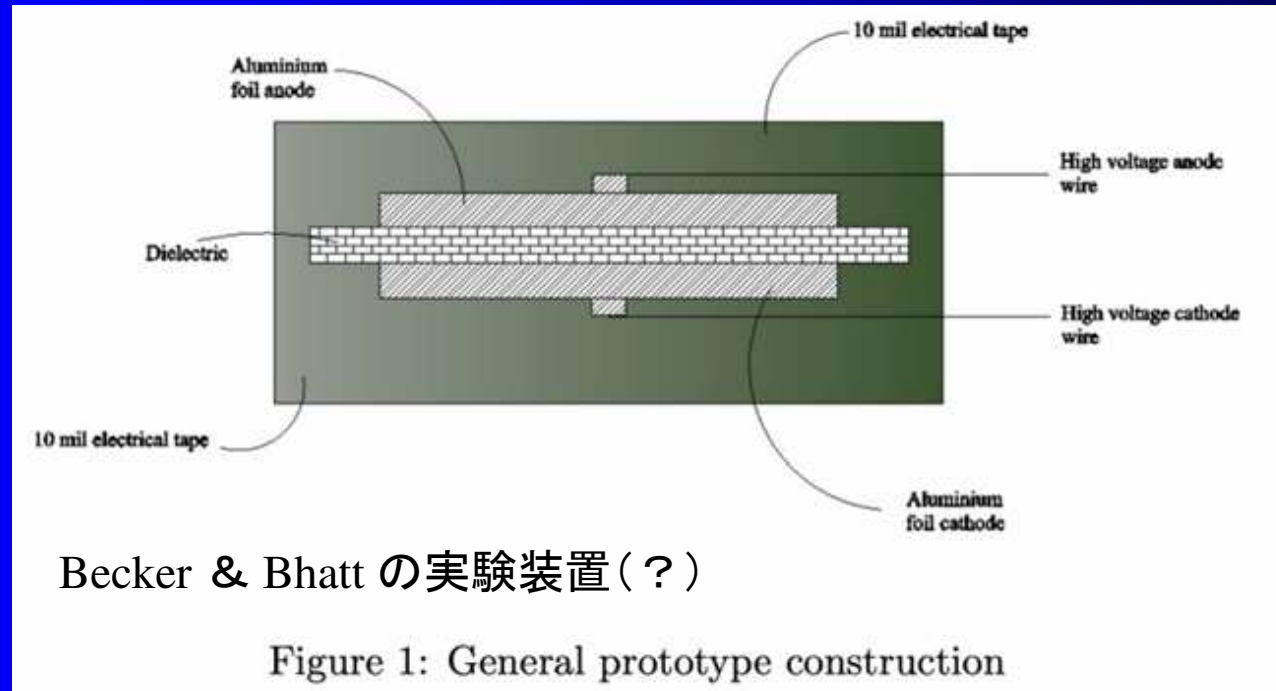


(b) キャパシター内では逆の現象が起こる。加速中の電子は前方では極板によりウンルー波が減衰するため(白色領域)、受ける波は少なく、後方(黄色)では波が多いため、電子は通常よりも前方に押され、アノード板を押し。



(c) 電子がアノードに衝突する際の減速はより急であり、これが右方向の推力を増大させる。

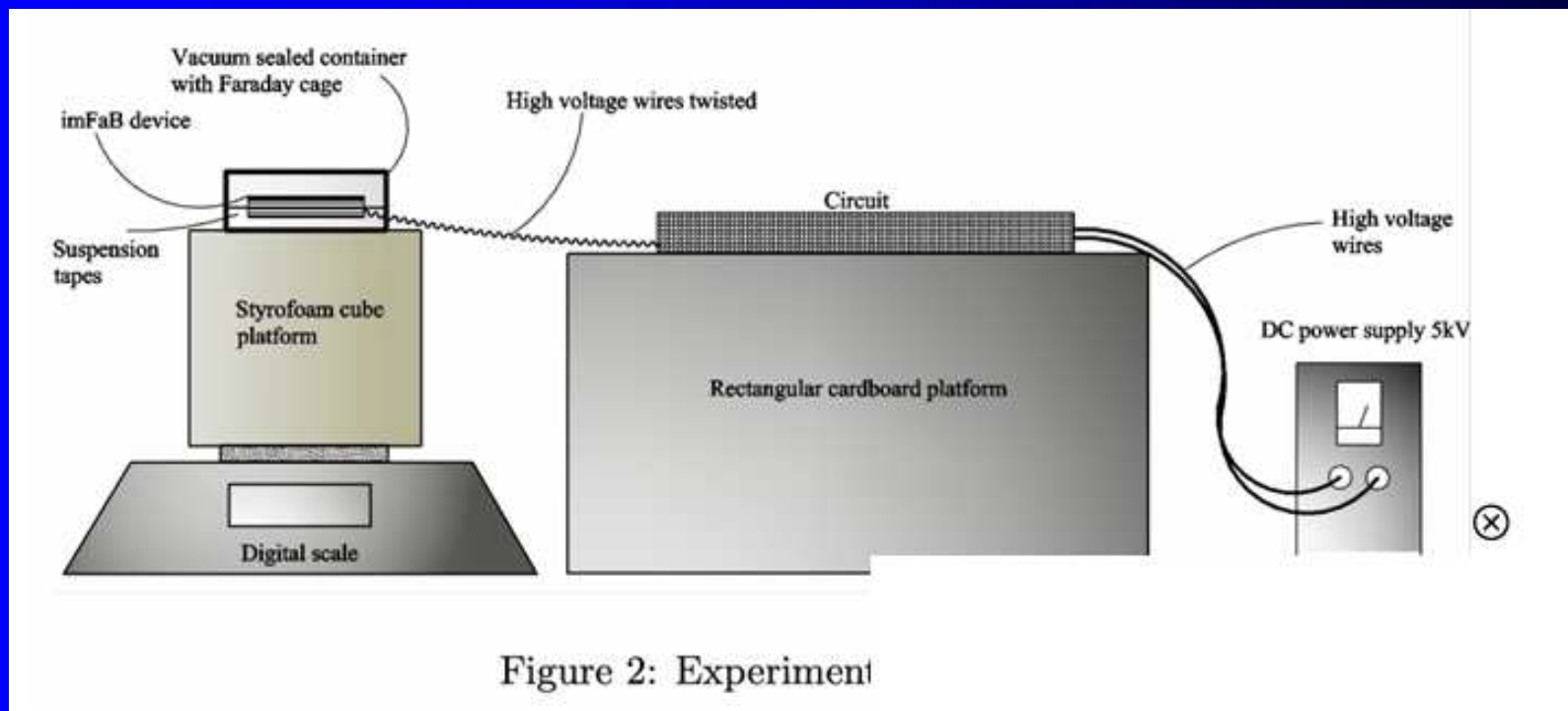
4. Quantum Driveの実験概要(1)



Quantum Driveの研究は、複数グループあり、以下の結果が報告されている。

- (1) **McCulloch研究室** (一時的にDARPAが約130万ドルの資金援助したとのこと)
アルミニウム製電極板とカプトン誘電体を使用 ⇒ 推力0.5ミリN(入力1W時)
- (2) **IVO社**: 固体誘電体を採用 ⇒ 推力50ミリN(入力1W時)
- (3) **Becker & Bhatt** ⇒ 推力0.4 [N/kW](=0.4ミリN/W)

5. IVO Ltd. Quantum Driveの実験概要(2)

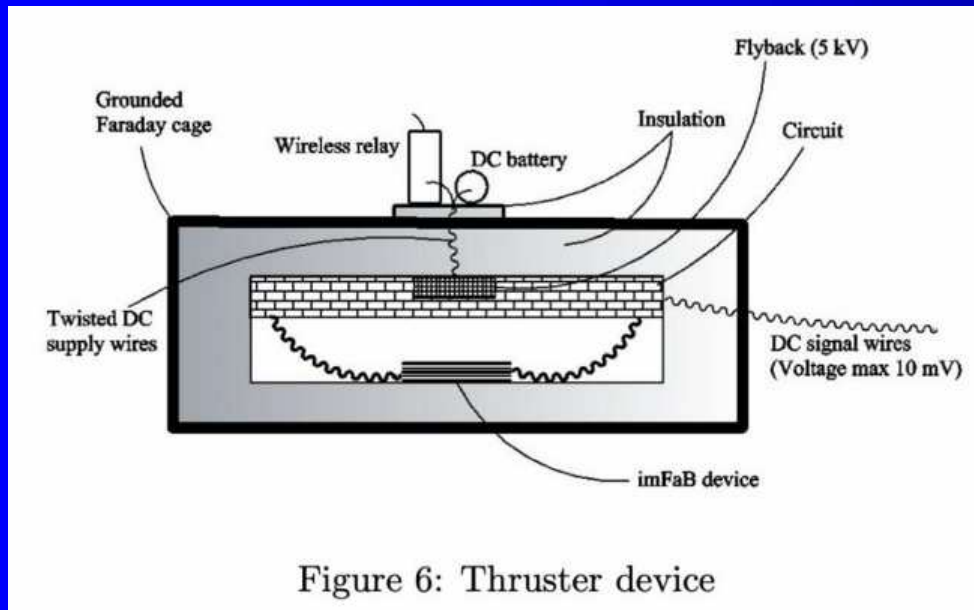


Becker & Bhatt の実験装置(?)

特に高い推力値と関連する試験においては、測定装置に設置する前にキャパシタ全体を約50 °Cまで予熱した上で実施された。これは、低い周囲温度下で予熱を行わずに試験を実施した場合、推力が検出限界以下となる可能性があることを示唆している。

この実験における一つの問題点は、高電圧をデジタル式の天秤で測定していたため、誤作動が生じる可能性があった。

6. IVO Ltd. Quantum Driveの実験概要(3)



IVO Ltd. の Richard Mansell はアナログ方式による測定を試み、その結果がBecker & Bhattと一致することを確認した。

Mansellのグループは、キャパシタの電極板間に 5 kV の電位差を与え、誘電体によって8~10マイクロメートル程度隔てるといものである。その上で、電子が極めて小さな電流(1マイクロアンペア)であるが極めて大きな加速度を伴って量子トンネル効果によりギャップを通過するようにした。

QI理論によれば、電子は至る所で強い Unruh 輻射の場を受けるが、キャパシタの電極板間だけは、Casimir 効果と同様にそれが存在しない。このため電極板間に量子的な「空隙」が生じ、電子は予想以上に速く陰極から引き出され、その結果として系に運動量が付加され、陽極方向に推力が生じる。

7. IVO BARRY-1 Mission

-2022年4月7日 Military-Aerospace Electronics記事より

IVO Ltd.は、燃料をゼロにした衛星用電動スラスタ「IVO Quantum Drive」を発表した。

- ★ IVOによると、同社のQuantum Drive は、「熱真空試験を通じて正当性を達成する世界初の商業的に実行可能で利用可能な純粋な電気推進技術」である。
- ★ IVO Ltd. は、バージニア州フレデリックスバーグの E-Labs と協力して、宇宙で見られる厳しい条件下でスラスタを検証した。真空チャンバーは、量子化慣性によって発生する推力を検証するのにも役立った。
- ★ IVO Quantum Driveは、わずか 1 ワットで 45mN の推力を達成した。これは、-100° Cから100° C の範囲の温度サイクルで 9×10^{-6} Torrで行われた。スラスタは性能にばらつきがなく、期待どおりに機能した。

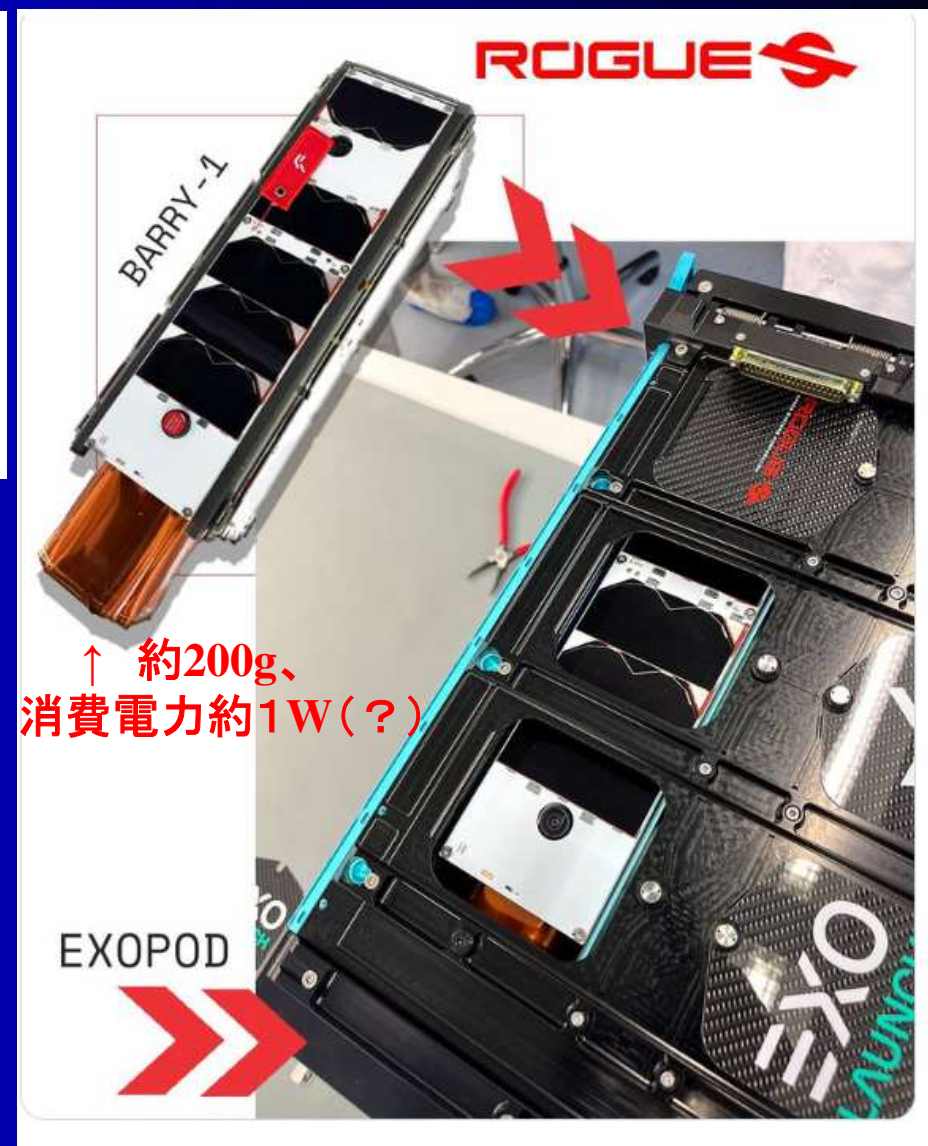


8. IVO BARRY-1 打ち上げ



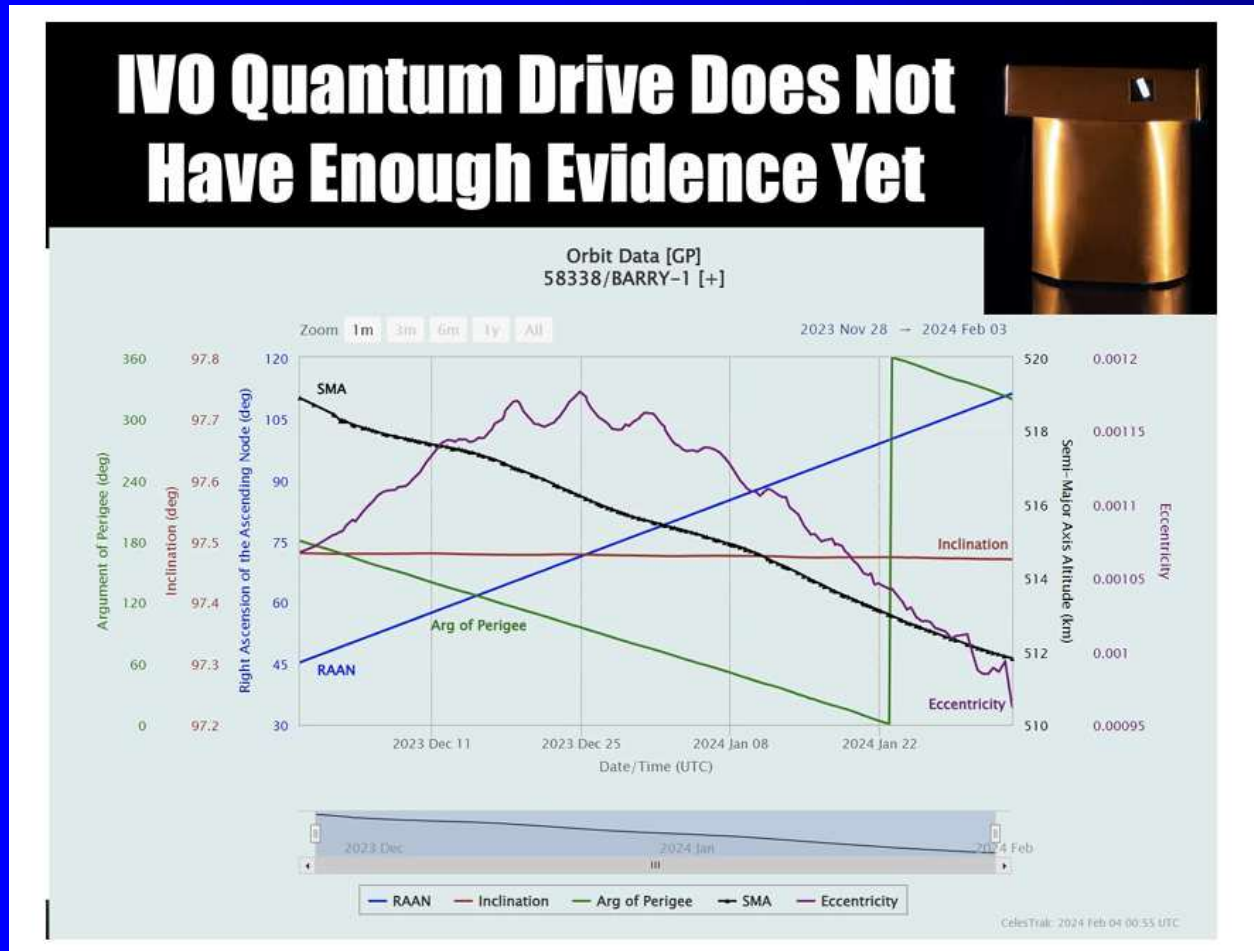
-Rogue Space Systems (Barry-1 の打ち上げ責任主体) 記事より

- ★ IVO Ltd.の、Barry-1 (BARRY-1、OTP-1) は **2023年11月11日** に打ち上げられた。
- ★ 打ち上げは SpaceX の Falcon 9 (Transporter-9 ライドシェア)
- ★ 発射場はカリフォルニア州ヴァンデンバーグ (Vandenberg、SLC-4E)



この写真は、Falcon 9に搭載された実機なのか？

9. IVO BARRY-1 衛星の動作不調



・NORAD識別コード;58338

・軌道上 7.6km/sで移動

・打上げ後、1か月以上ドライブを動作させ軌道を約100km上昇させる計画であった

- ★実運用では打ち上げ後に電力(バス)系の問題が続き、2024年2月に通信を喪失してIVOの Quantum Drive を使った軌道上テストは実施できなかった/十分に実施できなかったと報じられた。
- ★つまり、打ち上げは確認されているが、「宇宙での推進テスト成功を示す独立した公開データは存在しない」という状況。
- ★IVO創設者のMansel氏は、「今回の挫折にめげることなく、そして物理法則にもめげることなく、IVOは 量子ドライブの軌道テストをさらに実施する予定」と語った。

10. IVO BARRY-1搭載Quantum Driveとは？

★ 「Barry-1」に搭載されたという「IVO Quantum Drive」とは実際どのようなものか？

⇒ 公開されている画像の大半は「概念図(レンダリング)」「回路・構成図」「プロモーション用の合成画像」などで、実際にFalcon 9に搭載された実機を鮮明に写した公式写真はない。

⇒ IVO公式プレスリリースの画像

IVO の公式プレスリリース(製品発表・搭載発表)には画像が複数添付されているが、本文や画像キャプションの記述を見る限り「製品レンダリング」「試験室内の試験写真／プロモ用写真」が中心で、搭載済みの飛行ユニットを明確に示す「搭載前後の現場写真(搭載作業時や搭載完了後に撮られた飛行ユニットのクローズアップ)」の明示的な掲載は確認できない。

⇒ Rogue Space(ホスト事業者)公式発表の画像

Rogue の Barry-1 ミッション紹介・打ち上げ報告には「衛星のイメージ」「打ち上げ時の写真」「統合(integration)に関する記述」があり、記事内に使われている画像もある。しかしこれらは主に衛星全体のイメージ／打ち上げ写真／ミッション広報用の画像で、内部に搭載された IVO 製ユニットの“取り付け状況のクローズアップ写真”という形での公開は見つからない。宇宙空間での動作実験が確認できていないとはいえ、普通感覚なら、自社PRのため公表すれば良い筈である。

★2025年10月時点で、IVO社のWebサイトには、Quantum Driveに関する続報は何もない。
今後の動向を調査し、「Ivo Quantum Drive」の動作の真偽を確認する。

補足.Quantum Drive 論文

<McCulloch Quantised Inertia(QI:量子化慣性) 関連論文>

1. Can the Emdrive Be Explained by Quantised Inertia?
PROGRESS INPHYSICS Volume 11 (2015)
2. Quantised inertia from relativity and the uncertainty principle
October 24, 2016
3. **Thrust from Symmetric Capacitors using Quantised Inertia**
Preprint ▪ December 2018 DOI: 10.13140/RG.2.2.22922.52165
4. Propellant-less Propulsion from Quantised Inertia
Preprint ▪ December 2018 DOI: 10.13140/RG.2.2.22922.52165
5. Thrust from Symmetric Capacitors using Quantised Inertia: Version 2
Preprint ▪ July 2021 DOI: 10.13140/RG.2.2.16916.01921
6. Modelling the Pioneer anomaly as modified inertia
November 26, 2024

<QI理論に対する反論>

A sceptical analysis of Quantized Inertia

Michele Renda , Departament of Elementary Particle Physics, IFIN-HH
MNRAS 000, 16 (2019)

補足.Quantum Drive 推進原理(1)

McCulloch は Quantised Inertia (QI: 量子化慣性) に基づいて、「加速によって出現する Unruh 波(放射)を周囲の構造や境界で不均一に抑制(ダンプ)すると、その不均一性が慣性に差を作り、見かけ上の一方向の力(推力)を生む」と主張している。論文*はその主張を不確定性原理のスケールアップ $\Rightarrow$ エネルギー E に対する力の不均衡(式(6))という形で導出し、EMDrive や Woodward 効果、非対称コンデンサ実験などの数値に近い推力を「同じ式」で説明できると示している。

* 「3. Thrust from Symmetric Capacitors using Quantised Inertia」

出発点: 不確定性原理を「集合(エネルギー E)」に拡張

不確定性原理: $\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$

これを「力の時間積分 (= 運動量)」に置き換え、さらに単一量子 $\hbar$ ではなく系全体のエネルギー E (例: 共振器内の電磁場エネルギー) に拡大して扱っている(式(1)~(4))。

その結果、方向ごとに不確かさ Δx が異なれば、方向ごとの「不確定性由来の力差」 ΔF が生じると表現している(式(4))。

系内に留まるエネルギー E を表す時間 τ の導入 $\rightarrow Q, L$ の導入

系に一時的に留まるエネルギー $E = P\tau$ (P は入力電力)。ここで τ を「エネルギーが往復する回数 Q (品質因子) $\times$ 往復時間 (L/c)」とみなし、 $\tau = QL/c$ とする (L は系の典型長さ)。これにより式(4)が式(5)に書き換わる:

$$\Delta F = \frac{PQL}{2c \Delta x}.$$

補足.Quantum Drive 推進原理(2)

左右差(両側の Δx の違い)が「純推力」になる

左右で Δx が違えば、左右の ΔF の差が純推力になる。これが式 (6):

$$F = \Delta F_{left} - \Delta F_{right} = \frac{PQL}{2c} \left(\frac{1}{\Delta x_{left}} - \frac{1}{\Delta x_{right}} \right) .$$

これが論文の「主要な推力予測式」である。

QI的には Δx は「その方向で Unruh 波が遮られるまでの有効距離(=境界で切られる空間)」
「キャビティ壁までの距離の半径」などで置き換えられる。

* ここで、品質係数(Quality factor) $Q = 2\pi fE/P$ 、

f :キャビティの共振周波数

E :コンデンサに蓄積されたエネルギー

P :入力電力

品質係数 Q は、共振系の「エネルギー保持能力」や「共振の鋭さ」を示す指標。

物理的には、ある共振器にエネルギーを与えたときに、そのエネルギーがどれくらい効率的に保持されるかを示す。

- ・ Q が大きい $\rightarrow$ エネルギーが長時間保持され、共振が鋭くなる(損失が少ない)
- ・ Q が小さい $\rightarrow$ エネルギーがすぐ失われ、共振が鈍くなる(損失が大きい)

補足.Quantum Drive 推進原理の仮定・問題点

論文の主要な仮定と弱点

論文は一貫して「不確定性原理を系全体のエネルギーに拡大解釈」し、「Unruh 放射のモードが境界で剪定される(Δx を方向依存にする)」ことをキーメカニズムにしているが、ここに議論の焦点となる仮定がまとまる。

1. 不確定性原理の“直截的拡張”

$\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$ を一個の量子から系全体のエネルギー E にスケールアップして扱う点(式(3)→(4))。この操作の妥当性(古典的なマクロエネルギーに量子不確定性をそのまま当てはめること)は物理的に議論の余地がある。

2. Δx の定義(Unruh 波の遮断距離 = 壁までの距離)

論文では Δx を「その方向で Unruh 波が切られる距離(=キャビティ壁までの距離)」として具体化しているが、Unruh 波の性質と物体の幾何学的境界がそのまま「 Δx として単純化」できるかは問題である。波動モードの扱いはより厳密な場の量子論的解析が必要である。

3. 運動量保存や反作用の扱い

マクロな推力が出るなら反作用をどこに与えているのかという古典的な疑問(運動の第3法則)は、QI 的には「量子真空(Unruh場)との相互作用」による反作用で説明されるが、これを観測的に追跡できる独立測定が必要である(論文では主に推力の大きさ比較に注力)。

4. パラメータ($Q, L, \Delta x$)の扱い

Q (品質因子)や L の取り方が推力を大きく左右するため、実測に対する感度が高い。実験での Q の実効値、電磁場と物体のどちらを「振動体」とみなすか、エネルギーの散逸と「滞留時間 τ 」の取り扱いが結果を左右する。これらは実験誤差や解釈問題の源になり得る。

導出は複数の非自明な仮定(不確定性原理の拡張、 Δx の取り扱い、 Q と τ の扱い)に依存しており、これらが現実の物理にどこまで対応するかは独立検証が必要。

補足.Quantum Drive 公表数値検証(1)

論文中の式(6)を使って、実際の幾つかの幾何学(たとえば IVO が公表している寸法想定や、EMdrive の代表例)を入れてワット当たりの推力(mN/W)を再計算し、IVO が主張する「~45 mN/W」という値と比較し、公表数値の真偽を検証する。

検証に使用する式(論文の式(6))

$$F = \frac{P Q L}{2c} \left(\frac{1}{\Delta x_{\text{left}}} - \frac{1}{\Delta x_{\text{right}}} \right)$$

ここで、

F は推力(N)、 P は入力電力(W)、 c は光速(2.9979×10^8 m/s)、
 Q は品質因子、 L は系の典型長さ(m)、
 Δx は各方向の「Unruh波が遮断される有効距離(m)」

を表すと論文で扱われている。式は「N当たりW」を出すので、 F/P (N/W) = ワット当たり推力になる。

補足.Quantum Drive 公表数値検証(2)

仮定した代表例と結果(F/P を N/W, mN/W で表示)

注: McCulloch 論文では Δx をキャビティ内での“壁までの距離”等で扱うので、ここでも壁まで距離＝半径等で代用する(単純化)

EMdrive: truncated-cone(先細り筒)形状で、左右の Δx を「内部半径(半径の違い)」で置き換え、既報の実験パラメータ(P, Q, L, Δx)を入れると、式(6)は観測されたオーダーの推力を「同程度」で予測すると主張している(論文の数値例では数 mN 程度の予測している)。

Case1. Emdrive に近いパラメータを想定した場合

- $Q = 1 \times 10^4$ (電子レンジ帯の典型的な共振器オーダーを使用する)
- $L = 0.30 \text{ m}$ (往復長等をこのスケールと仮定する)
- $\Delta x_{\text{left}} = 0.05 \text{ m}$ (小端半径 $\doteq 5 \text{ cm}$)、 $\Delta x_{\text{right}} = 0.20 \text{ m}$ (大端半径 $\doteq 20 \text{ cm}$)
→ 結果

$$F/P \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{ N/W} = 0.075 \text{ mN/W.}$$

< 解釈 >

Emdrive 実験の典型的パラメータ($Q \sim 10^3 - 10^4$, $L \leq 1 \text{ m}$, Δx の差が数倍)を入れると、式(6)からの推力予測は **0.01 ~ 0.1 mN/W** より小さい領域になり、IVO が公表する **45 mN/W** と比べると数百倍～数万倍の差が出る。つまり、EMdrive 程度の Q では式(6)で IVO の値は再現できない。

補足.Quantum Drive 公表数値検証(3)

Case2. 高 Q ・小空間(理想寄り)とした場合

$Q = 1 \times 10^6$ (非常に高 Q の共振器／光学キャビティに近い値)

$L = 1.0 \text{ m}$

$\Delta x_{\text{left}} = 0.01 \text{ m (1 cm)}$ 、 $\Delta x_{\text{right}} = 0.02 \text{ m (2 cm)}$

→ 結果:

$$F/P \approx 8.34 \times 10^{-2} \text{ N/W} = 83.4 \text{ mN/W.}$$

ただし、ここで、IVO が主張する $\approx 45 \text{ mN/W}$ を出すために必要な $Q \times L$ (同じ小 Δx 差を仮定) を、次のように求めてみる。

- ・ 目標 $F/P = 45 \text{ mN/W} = 4.5 \times 10^{-2} \text{ N/W}$
- ・ $\Delta x_{\text{left}} = 0.01 \text{ m}$, $\Delta x_{\text{right}} = 0.02 \text{ m}$ (差は $1/0.01 - 1/0.02 = 50$)

とした場合、式を変形して必要な $Q \times L$ を求めると、

$$QL \approx 5.396 \times 10^5 \text{ m.}$$

つまり、もし $L = 1 \text{ m}$ なら $Q \approx 5.4 \times 10^5$ 、 $L = 0.3 \text{ m}$ なら $Q \approx 1.8 \times 10^6$ となる。

< 解釈 >

式(6)で 45 mN/W を達成するには非常に高い Q 、あるいは非常に大きな L 、または Δx 差が極端に大きい(短側が極小) 必要がある。いずれも「実機でそのまま達成できるのか？」は疑問である。

McCulloch の論文では Δx を“Unruh波の遮断距離”として扱うが、現実の共振器中での Unruh 放射の扱いは高度に量子場論的であり、単純に幾何学的距離で置き換えて良いか、という議論がある(=前提の妥当性問題)。従って「式(6)に実寸を入れて一致すれば実証済み」という単純な結論にはならない。

補足.Quantum Drive 公表数値検証結果

IVO の主張する推力 約 **45 mN/W** を McCulloch の式(6) で「そのまま再現」するには、式から逆算しても **かなり高い Q (数 $10^5 \sim 10^6$ 程度) や長い L が必要になる。**

一般的なマイクロ波共振器や実験用の EMdrive 型装置のパラメータでは式(6)からは到底出てこないため、IVO が実際に 45 mN/W を測定したのであれば、彼らは、

- (a) 非常に高 Q の装置を用いている、または
- (b) Δx を非常に小さく取っている、あるいは
- (c) 測定解釈に誤りがある、のいずれかを検討する必要がある。

したがって、IVO の主張を技術的に評価するには、実際のフライト／地上ユニットについて以下の情報が不可欠である

実効 Q (測定値)、実効 L (どう定義しているか)、幾何 ($\Delta x_{\text{left}}, \Delta x_{\text{right}}$ の定義)、キャリブレーションデータ (熱・電磁ノイズ除去、バックグラウンド校正)

< 結論 >

McCulloch の式(6)に現れる主要因は Q (品質因子)・ L (典型長さ)・そして左右の Δx 差である。現実的な microwave 共振器 ($Q \sim 10^4$ 程度、短い L) では、式から得られる推力は **0.1 mN/W** よりかなり小さい (例: **0.075 mN/W**) $\Rightarrow$ **IVO の主張 45 mN/W は桁違いに大**ただし非常に高い Q (例: $Q \sim 10^6$) か、極めて小さい Δx (壁までの距離が数 mm $\sim$ 1 cm) を使うと、式上は 45 mN/W を達成できる組合せは存在する。しかしそのパラメータが「実機で達成可能か」、「Unruh波の物理にそのまま適用できるか」は別問題である。

補足. Unruh効果について

Unruh 効果とは・・

- ・ **加速度運動**している観測者が真空中にいる場合でも、その観測者にとっては「熱的な粒子(温かい放射)が存在する」と観測される現象。
- ・ 普通の慣性系(加速していない観測者)では真空は「粒子がない空間」だが、加速系では「粒子が存在するように見える」、**温度は加速度に比例する**。

⇒ 真空は絶対的に同じではなく、観測者の運動状態によって「温かく見えることもある」という現象。

・Unruh効果の温度：

$$T_U = \frac{\hbar a}{2\pi c k_B}$$

ここで、

$\hbar$: 換算プランク定数 $\approx 1.054 \times 10^{-34}$ Js、 a : 観測者の加速度、

c : 光速 $\approx 3.0 \times 10^8$ m/s、 k_B : ボルツマン定数 $\approx 1.381 \times 10^{-23}$ J/K

例

- ① 地球重力加速度 $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$ では、 $T_U \sim 4 \times 10^{-21} \times 9.8 \approx 4 \times 10^{-20} \text{ K}$
- ② もし $a = 10^{20} \text{ m/s}^2$ という極端な加速度なら、 $T_U \sim 4 \times 10^{-21} \times 10^{20} \approx 400 \text{ K}$