

Supplementary Information for “Observational Evidence for a Cosmic Quadrupole Anisotropy: ...”

Hiroto Iwasaki

July 10, 2025

S1. #1 点構造の頑健性評価の詳細

本補足資料では、論文 E 本体の § 2 で要約された #1 点構造の頑健性評価について、その詳細な手法と結果を記述する。

S1.1. 幾何学的構造の再現性：t-SNE による検証

論文 C で UMAP を用いて発見された、準励起点のクラスター形成と #1 点の空間的相関という幾何学的構造が、特定の次元削減アルゴリズムのアーティファクトではないことを確認するため、異なる非線形次元削減手法である t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding) を用いて再解析を行った。

解析対象の 4 次元特徴空間（情報ポテンシャル、零点間隔、 $\kappa(p)$ 、対数化素数）を t-SNE で 2 次元に投影した結果を、[図1](#)に示す。

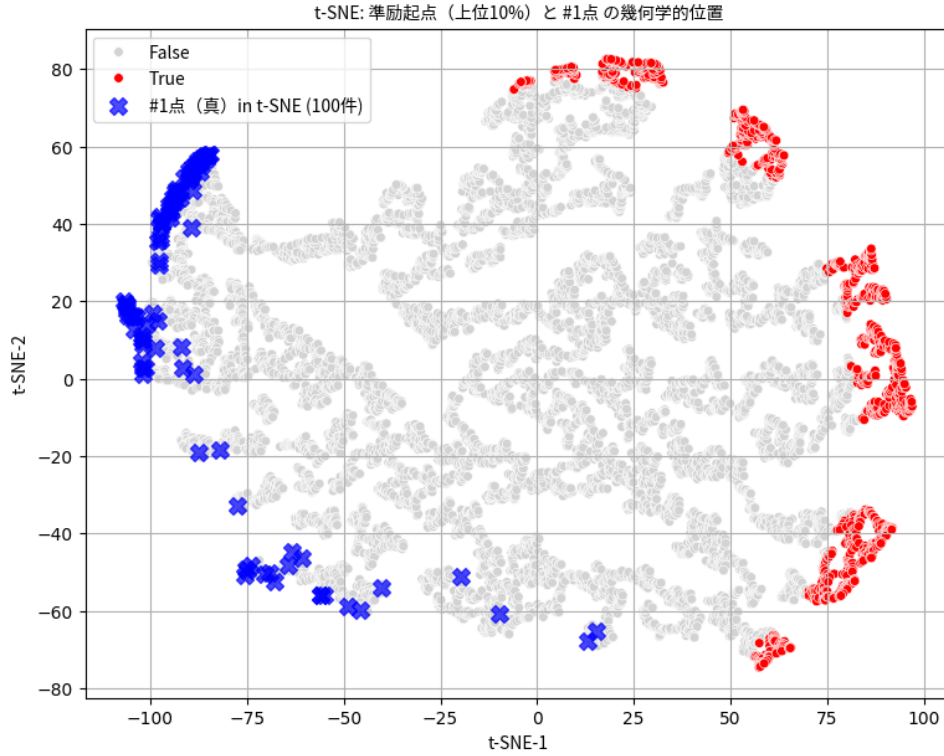


Figure 1. t-SNE による 2 次元投影結果。赤点は準励起点、青い X マーカーは #1 点を示す。準励起点が明確なクラスターを形成し、#1 点はそのクラスターの内部または近傍に局在する傾向が明瞭に観測され、これは UMAP による結果と定性的に一致する。

図1が示すように、準励起点（赤点）はランダムに分布せず、複数のクラスターを形成している。さらに、#1 点（青い X マーカー）の多くは、これらの準励起点クラスターと強く関連した位置に存在する。この主要な幾何学的特徴が UMAP と t-SNE の両方で一貫して観測されたことは、この構造がデータに内在する本質的なものであることの強力な証拠となる。

S1.2. 動的同期の普遍性：複数領域での FFT 解析

次に、t-SNE 空間（図1）上で特定された、準励起点および #1 点が特徴的な分布を示す 4 つの候補領域（候補領域 ①～④）からデータシーケンスを抽出し、指標間の動的同期が普遍的な特徴であるかを検証した。各シーケンスは、対応する情報ポテンシャルの値で昇順にソートした上で FFT 解析を行った。

図2に、4 つの各候補領域における三指標（情報ポテンシャル、 dc/dt 、 $\kappa(p)$ ）の FFT スペクトルを示す。また、各解析から得られた卓越周波数と位相の値を、表1にまとめる。

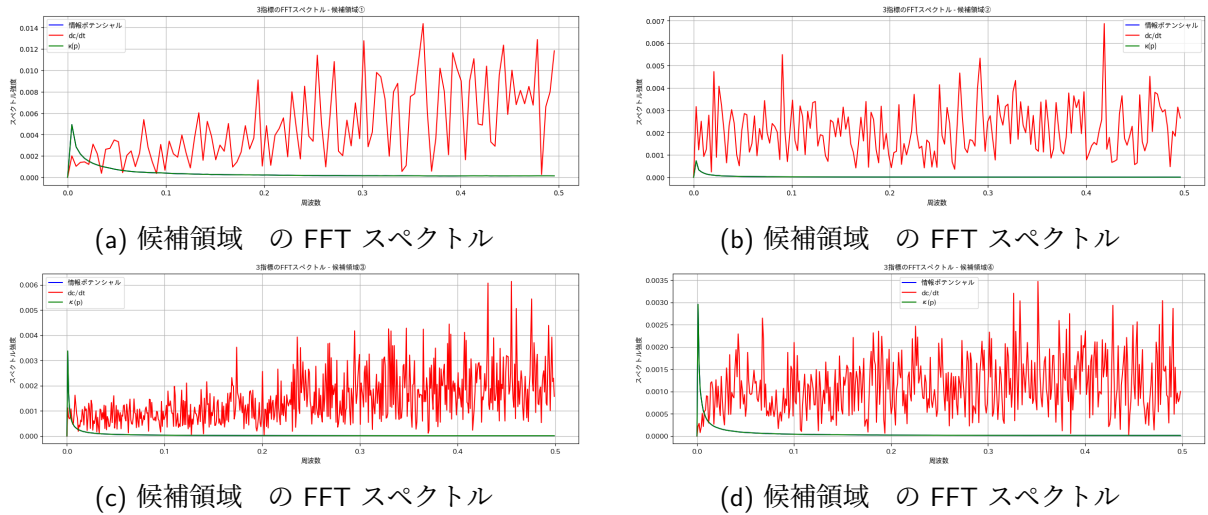


Figure 2. 4 つの異なる候補領域から抽出されたシーケンスにおける三指標の FFT スペクトル。

Table 1. 各候補領域における三指標の卓越周波数と位相

候補領域	指標	卓越周波数	位相 [deg]
領域 ①	情報ポテンシャル	0.0043	105.25
	dc/dt	0.3621	106.76
	$\kappa(p)$	0.0043	105.27
領域 ②	情報ポテンシャル	0.0026	92.35
	dc/dt	0.4186	40.17
	$\kappa(p)$	0.0026	92.35
領域 ③	情報ポテンシャル	0.0008	94.59
	dc/dt	0.4553	41.32
	$\kappa(p)$	0.0008	94.59
領域 ④	情報ポテンシャル	0.0011	98.46
	dc/dt	0.3515	-144.86
	$\kappa(p)$	0.0011	98.46

表1が明確に示すように、解析した4つの候補領域全てにおいて、情報ポテンシャルと $\kappa(p)$ は共通の非常に低い卓越周波数を示し、かつその位相差はほぼゼロであった。これは、これら二指標が特定の低周波モードで強く結合し、同位相で振動するという動的同期が、局所的な現象ではなく、#1点に関連する構造において普遍的に見られる特徴であることを強く示唆している。

S1.3. 階層的同期： dc/dt 卓越周波数での応答

§ S1.2では、情報ポテンシャルと $\kappa(p)$ が低周波で強く同期する一方で、 dc/dt は異なる高周波で卓越するという、階層的なダイナミクスが示唆された。この階層性をさ

らに調査するため、 dc/dt が卓越する周波数において、他の二指標がどのように応答するかを評価した。

候補領域 ① および ② において、それぞれの dc/dt の卓越周波数をターゲット周波数とし、その周波数ビンにおける情報ポテンシャルと $\kappa(p)$ のスペクトル強度および位相を再評価した。結果を図 3 および表 2 に示す。

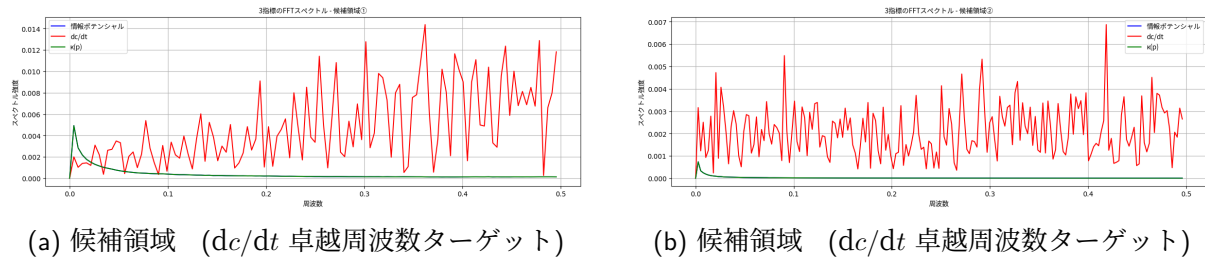


Figure 3. 候補領域 および において、各領域の dc/dt の卓越周波数をターゲットとした三指標の FFT スペクトル。

Table 2. dc/dt の卓越周波数における各指標の応答

候補領域 @ Target Freq.	指標	強度 [a.u.]	位相 [deg]
領域 ① @ 0.3621 Hz	情報ポテンシャル	1.32×10^{-4}	154.32
	dc/dt	1.44×10^{-2}	106.76
	$\kappa(p)$	1.35×10^{-4}	154.32
領域 ② @ 0.4186 Hz	情報ポテンシャル	6.10×10^{-6}	166.76
	dc/dt	6.87×10^{-3}	40.17
	$\kappa(p)$	6.12×10^{-6}	166.51

表2が示すように、 dc/dt が卓越する周波数において、情報ポテンシャルと $\kappa(p)$ のスペクトル強度は dc/dt 自身の強度と比較して2桁以上小さいものの、これら二つの指標は互いにほぼ完全に同位相で応答している（位相差は領域 ① で 0.00° 、領域 ② で 0.25° ）。

この結果は、系の基本的な状態を記述する情報ポテンシャルと $\kappa(p)$ が、 dc/dt によって引き起こされるより高周波な「揺さぶり」に対しても、足並みを揃えて応答することを示唆している。これは、低周波での強い同期と合わせて、「渦巻き位相」構造が持つ階層的で安定した動的特性を裏付けるものである。

0.1 Ia 型超新星データ単独でのパラメータ推定

DIRT Quadrupole モデルのパラメータを制限する最初のステップとして、Ia 型超新星 (Pantheon+) の全 1701 個のデータのみを用いた MCMC 解析を実行した。

図4に、この SNe 単独解析で得られた各パラメータの事後確率分布を示す。また、得られた最も確からしい値（中央値）と 1 シグマ (68%) 信頼区間は以下の通りである。

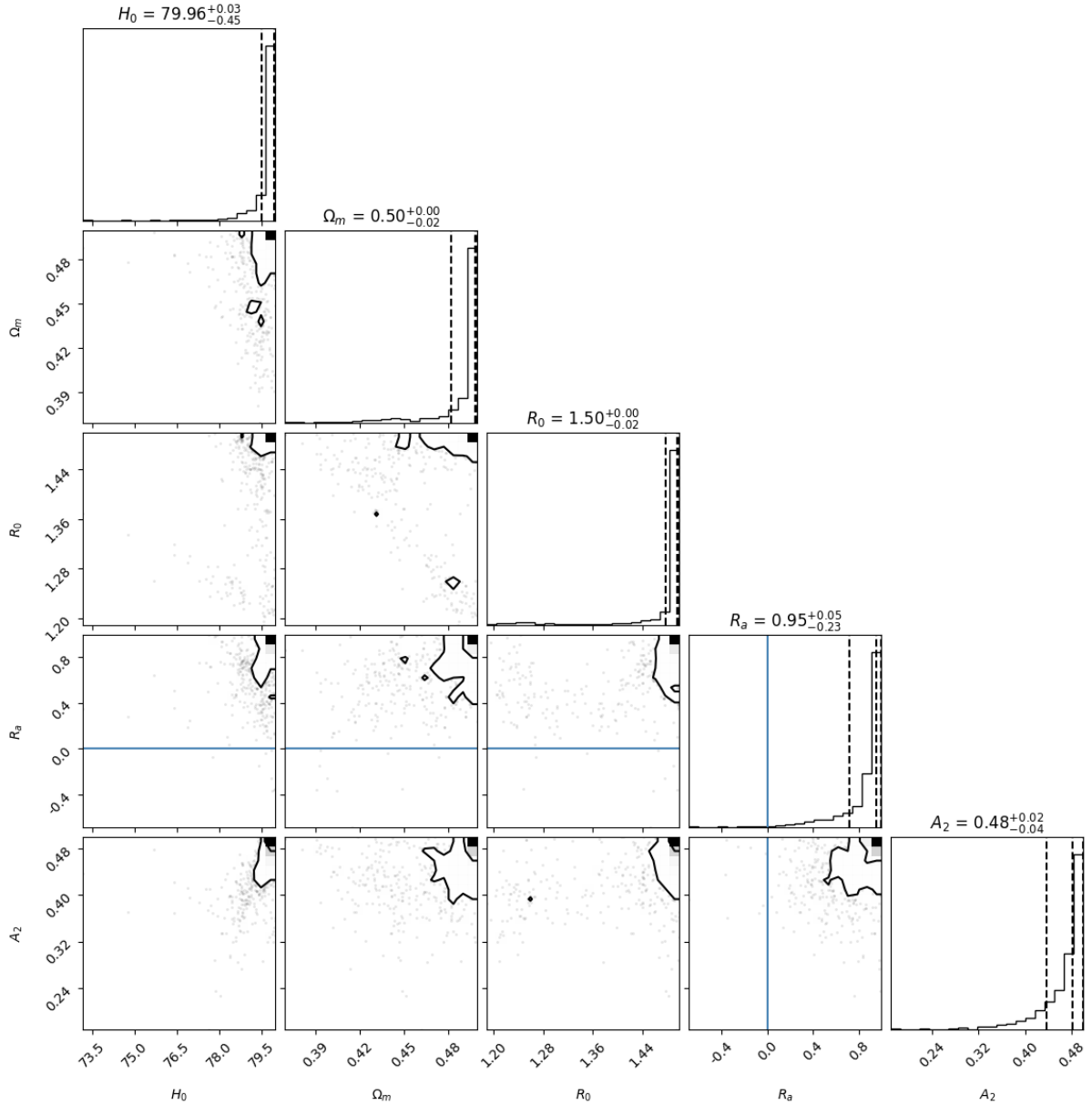


Figure 4. SNe Ia データ単独での MCMC 解析によって得られたパラメータのコーナープロット。

- $H_0 = 79.958^{+0.034}_{-0.448}$ km/s/Mpc
- $\Omega_m = 0.499^{+0.001}_{-0.017}$
- $R_0 = 1.497^{+0.003}_{-0.019}$
- $R_a = 0.951^{+0.047}_{-0.229}$
- $A_2 = 0.481^{+0.018}_{-0.044}$

この結果から、SNe Ia データは、大きな非等方性の振幅 ($A_2 \approx 0.48$) を持つモデルを強く支持することがわかる。しかし、同時に H_0 や Ω_m といった宇宙論の基本パラメータが、標準 Λ CDM モデルの推定値から大きく乖離しており、このモデルが他の観測と整合的であるかを検証する必要性が示唆された。これが、次節で述べる BAO データとの比較、そして最終的な統合解析へと繋がる動機である。

0.2 統合解析との比較と BAO データの役割

§ 0.1 で示した SNe 単独解析の結果は、大きな非等方性 A_2 を強く示唆した。本節では、この結果が BAO データを加えた統合解析によってどのように変化したかを比較し、BAO データが我々のモデルのパラメータ制限に果たした役割を考察する。

表3に、SNe 単独解析と、SNe+BAO 統合解析（論文 E 本体統合解析と非等方性の決定的証拠参照）で得られた各パラメータの 1 シグマ信頼区間付きの最尤値を示す。

Table 3. SNe 単独解析と SNe+BAO 統合解析のパラメータ推定値の比較

パラメータ	SNe 単独 (1701 点)	SNe+BAO (統合解析)
H_0 [km/s/Mpc]	$79.958^{+0.034}_{-0.448}$	$79.956^{+0.034}_{-0.148}$
Ω_m	$0.499^{+0.001}_{-0.017}$	$0.499^{+0.001}_{-0.004}$
R_0	$1.497^{+0.003}_{-0.019}$	$1.198^{+0.002}_{-0.008}$
R_a	$0.951^{+0.047}_{-0.229}$	$0.981^{+0.016}_{-0.090}$
A_2	$0.481^{+0.018}_{-0.044}$	$0.488^{+0.011}_{-0.064}$

この比較から、以下の重要な点が明らかになる。

1. **非等方性 A_2 の堅牢性:** これが最も重要な知見である。BAO という、宇宙の膨張史に対して非常に強力な制限を与えるデータを加えても、非等方性の振幅 A_2 の最尤値は ≈ 0.48 からほとんど変化せず、その信頼区間は依然として 0 を全く含まない。これは、SNe Ia データが見出した非等方性のシグナルが、見かけの効果ではなく、BAO データとも整合的な、極めて頑健な特徴であることを示している。
2. **R_0 の再調整:** 最も顕著な変化が見られたのは、 R_{lock} の等方成分の現在値である R_0 である。SNe 単独では ≈ 1.5 という大きな値が好まれたのに対し、統合解析では ≈ 1.2 へと有意にシフトした。これは、BAO が要求する厳密な膨張史と、SNe が要求する非等方性を両立させるため、モデルが内部パラメータを「再調整」した結果と解釈できる。モデルは、 R_0 の値を下げることで、BAO データへのフィットを改善しつつ、大きな A_2 を維持するという、絶妙なバランス点を見つけ出したのである。
3. **他パラメータの制限向上:** H_0 , Ω_m , R_a の各パラメータのエラーバーは、統合解析によって顕著に縮小した。これは、SNe と BAO という異なるプローブを組み合わせることが、パラメータ間の縮退を解消し、モデル全体の制限を大幅に向上させることを示している。

総じて、この比較は、我々の DIRT Quadrupole モデルの妥当性をさらに強固にするものである。BAO データは非等方性の存在を否定するどころか、モデルの内部パラメータの値をより精密に決定するのに貢献し、SNe と BAO の両方を整合的に説明する非等方な宇宙像を、より高い信頼度で支持したのである。

S3. 実験的検証の提案（チェックリスト ②）

本研究の理論的・観測的成果、特に情報ロック係数 R_{lock} の重要性を物理的に確立するためには、実験室スケールでの直接的な検証が不可欠である。本セクションでは、そのための具体的な光学卓上実験の計画を提案する。

S3.1. 実験コンセプトと目的

本実験の目的は、情報ロック係数 R_{lock} を実験的に 0 から 1 の範囲で能動的に制御し、その変化に応じて物理系が示す「慣性」あるいは「有効質量 m_{eff} 」の様相が、DIRT 理論の予測に従って連続的に遷移するかを観測することである。この検証は、 R_{lock} の物理的実在性と、情報と質量・エネルギーの間の動的な連続性を実証する上で極めて重要となる。

S3.2. R_{lock} の定義と実験的制御

本実験においては、論文 D で定義された情報ロック係数の基本式を用いる。

$$R_{lock} = \frac{\tau_{det}}{\tau_{det} + \tau_{path}} (1 - \beta_{scat}) \quad (1)$$

ここで、当面は理想的な状況として散乱がない真空系 ($\beta_{scat} \approx 0$) を想定し、 $R_{lock} \approx \tau_{det} / (\tau_{det} + \tau_{path})$ の制御を目指す。 τ_{path} (光子の伝搬時間) と τ_{det} (検出・情報確定時間) は、それぞれ可変光ファイバ遅延線と後段の可変電子遅延モジュールを用いて、独立に制御する。この二段階スキャンにより、 R_{lock} の全動作範囲を実験的にカバーする。

S3.3. 提案実験系と測定量

提案する実験系の主要構成要素を図 5 の概念図に示す。

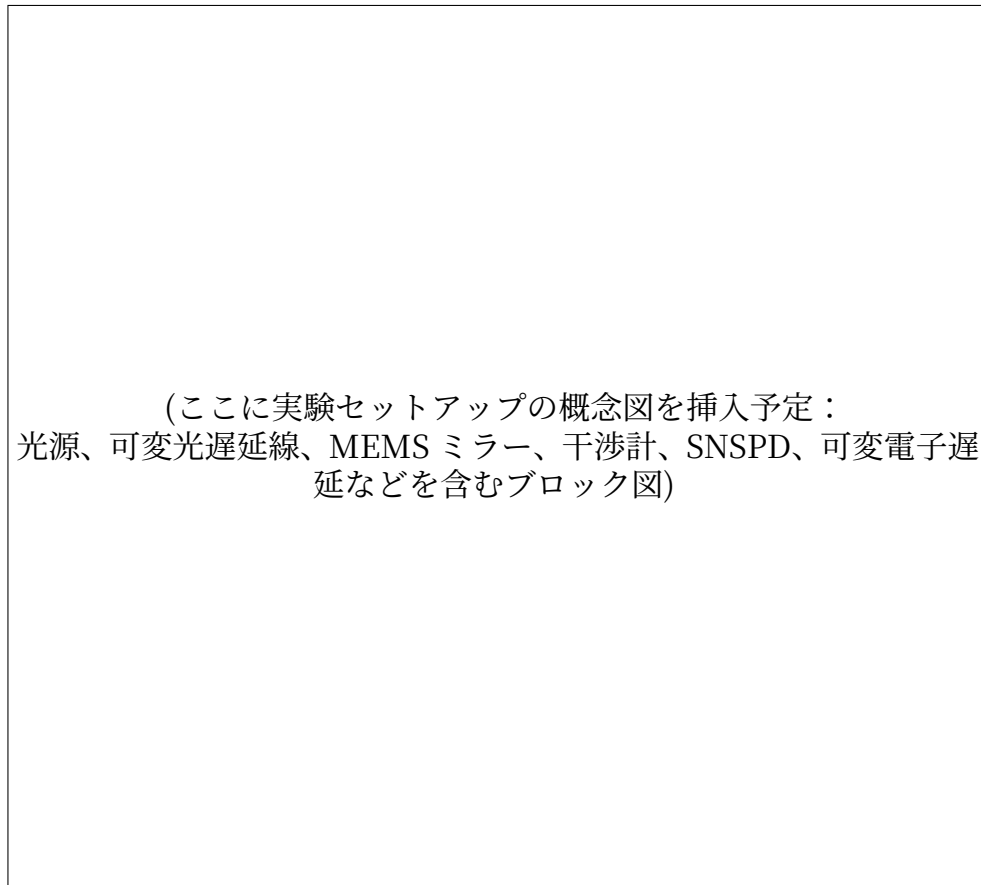


Figure 5. 提案される光学卓上実験の概念図 (イメージ)。

- **** 光源 ****: 単一光子レベルに減衰されたピコ秒パルスレーザー（例：1550 nm 帯）。
- **** R_{lock} 制御系 ****: 可変光ファイバ遅延線（ τ_{path} 制御用）および可変電子遅延モジュール（ τ_{det} 制御用）。
- **** 慣性プローブ ****: 高 Q 値 MEMS カンチレバーまたは薄膜ミラー。光パルスからの運動量移行（光圧）を受けて微小変位する。
- **** 変位検出系 ****: MEMS ミラーの微小変位を高感度で読み出すための光干渉計。
- **** 光子検出器 ****: SNSPD。光子の到達時刻を高精度で記録、あるいは実験全体のトリガー／同期に使用。

測定する主要な物理量は、MEMS ミラーが受ける光圧による運動量移行である。各 R_{lock} 値において、一定エネルギーの光パルス列を MEMS ミラーに入射し、その変位応答を精密に測定する。測定された力積（運動量 p ）や系の応答特性を、「有効質量 m_{eff} 」あるいは「慣性の指標」の代理変数と定義し、横軸に R_{lock} 、縦軸に m_{eff} をプロットすることで、 $m_{eff}(R_{lock})$ の連続遷移曲線の作成を目指す。

DIRT 理論は、 $R_{lock} \rightarrow 0$ （エネルギー優勢極限）で $m_{eff} \rightarrow 0$ 、 $R_{lock} \rightarrow 1$ （質量優勢極限）で m_{eff} がある有限値に飽和する、という連続的な遷移を予測する。この実験的曲線と理論予測を比較することが、本実験の最終目標である。