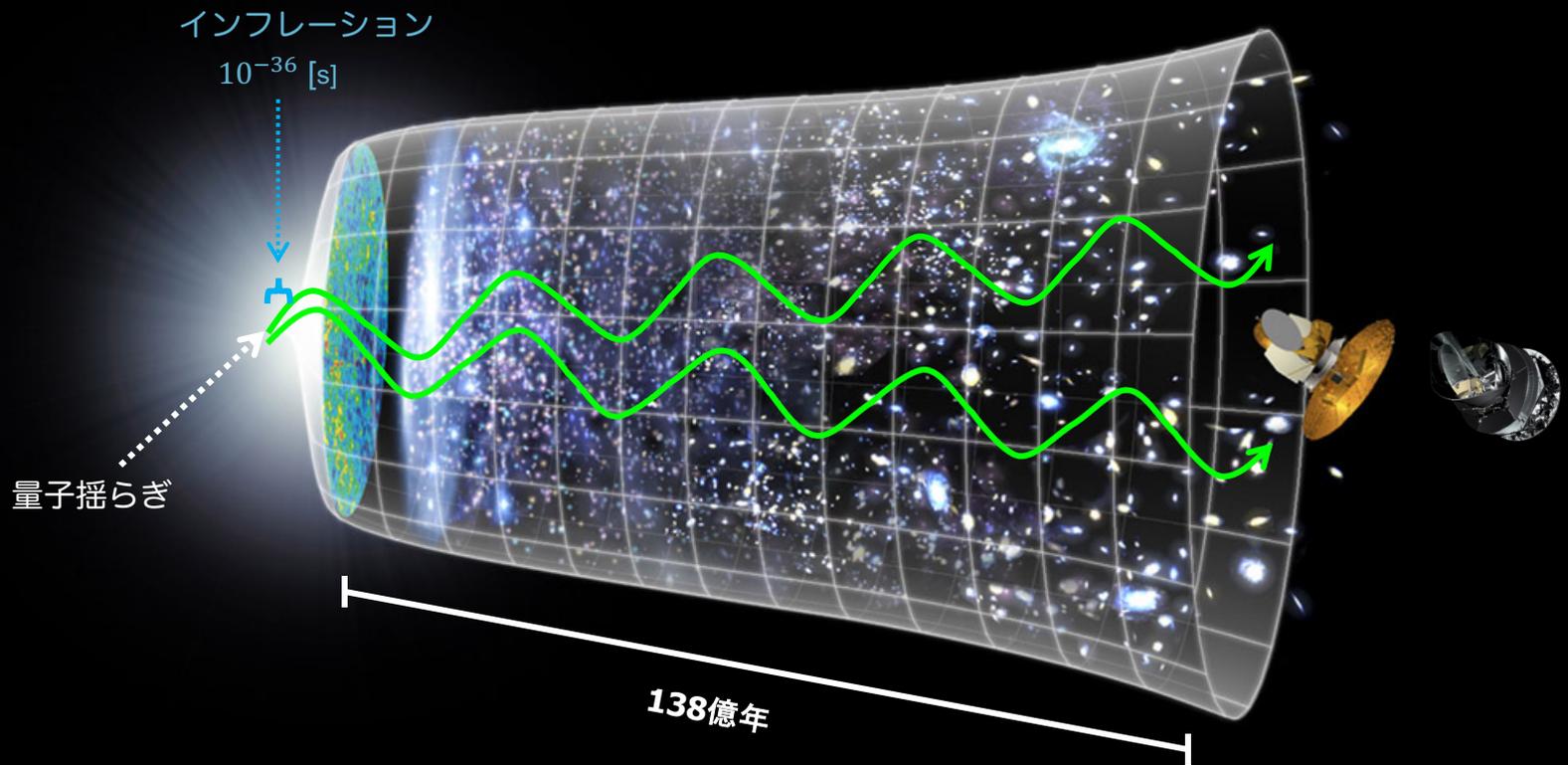


初期宇宙とグラビトン探索

九州大学理学研究院 菅野 優美

着目するもの：原始重力波

インフレーション中に量子揺らぎから直接生成される重力波



原始重力波は物質との相互作用が弱く、透過性が高いため、生成された際の量子揺らぎをそのまま伝搬していき、検出されることが期待される。測定するには

… インフレーション宇宙のみが実現可能

もし原始重力波が観測されたら

原始重力波が教えてくれるものは、、、



宇宙の起源の情報

インフレーション宇宙を証明することになる

グラビトン（重力子）の発見につながる

グラビトンをどうやって発見したら良いか？



1 : 量子光学の知識を応用して直接発見できないか？

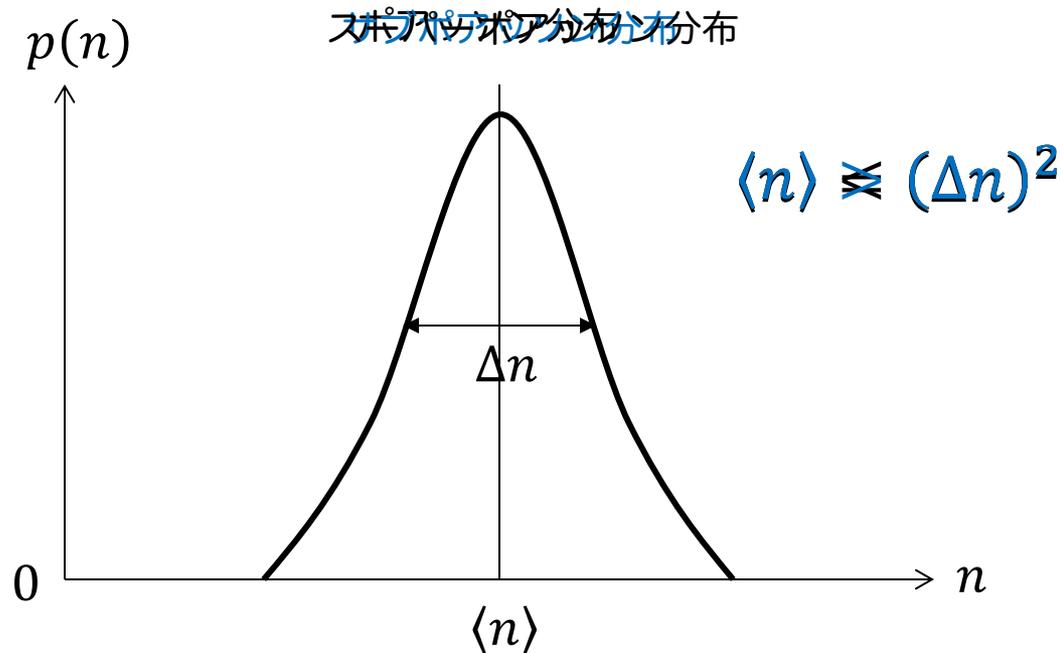
Kanno & Soda (2018), Kanno (2019)

2 : グラビトンのノイズによるデコヒーレンス時間を測ることで間接的に発見できないか？

Kanno, Soda & Tokuda (2020), (2021)

量子光学の知識を応用してみる

与えられた状態におけるフォトン（光子）の統計性で特徴づける



$$\text{ファノファクター} : F = \frac{(\Delta n)^2}{\langle n \rangle} \approx 1$$

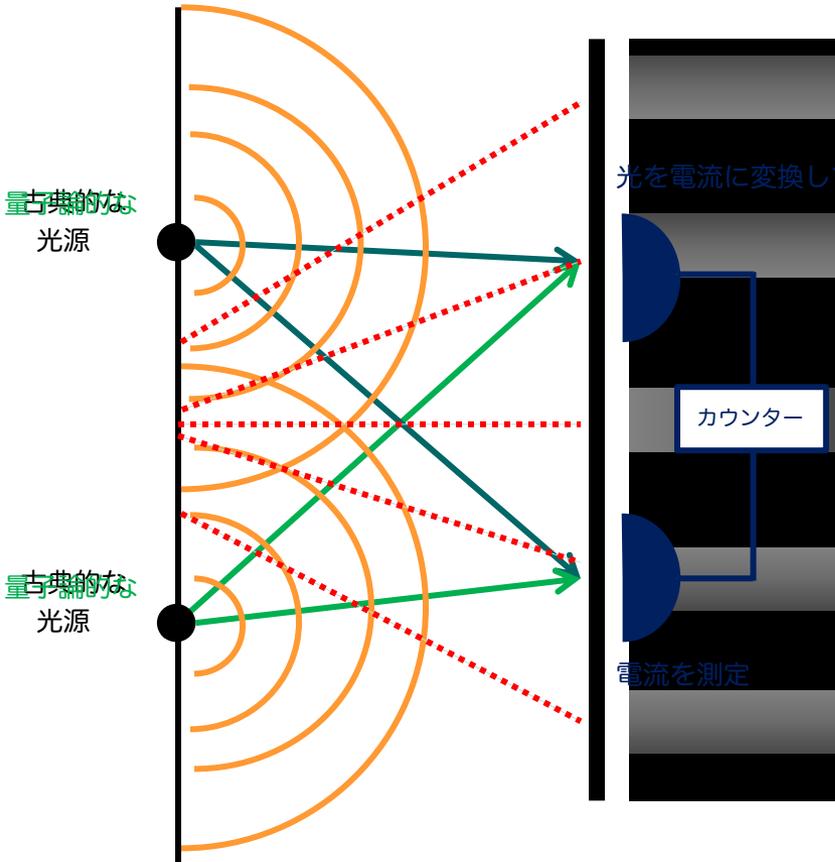
古典的なフォトン数の分布は必ずスーパーポアソン分布で $F > 1$

↓ 対偶

サブポアソン分布 ($F < 1$) であれば、フォトン は量子状態にある

ハンブリー・ブラウンとトゥイス(HBT)の干渉計

光の量子論的な性質を調源する方法



空間的強度相関を測定

2次のコヒーレント関数

$$\begin{aligned}
 g^{(2)}(\tau) &= \frac{\langle a^\dagger(t)a^\dagger(t+\tau)a(t)a(t+\tau) \rangle}{\langle a^\dagger(t)a(t) \rangle \langle a^\dagger(t+\tau)a(t+\tau) \rangle} \\
 &= 1 + \frac{(\Delta n)^2 - \langle n \rangle}{\langle n \rangle^2} \\
 &= 1 + \frac{F - 1}{\langle n \rangle}
 \end{aligned}$$

光源が古典的な場合

$$F \approx 1 \rightarrow g^{(2)} \approx 1$$

100%変調%変調まで法がる

強度相関から光子が古典的な状態なのか、量子論的な状態なのかが区別できる



原始重力波（グラビトン）に応用してみる

どんな量子状態ならグラビトン粒子統計がサブポアソン分布になるか？

コヒーレント状態はどうか？

定義： $|\xi\rangle = \exp(\xi \hat{b}^\dagger - \xi^* \hat{b})|0\rangle \equiv \hat{D}(\xi)|0\rangle$

ユニタリ変換演算子

固有値方程式
 $\hat{b}|\xi\rangle = \xi|\xi\rangle$

コヒーレントパラメーター

$\hat{n} = \hat{b}^\dagger \hat{b}$

ファノファクター： $F = \frac{(\Delta \hat{n})^2}{\langle \hat{n} \rangle} = \frac{\langle \xi | \hat{n}^2 | \xi \rangle - \langle \xi | \hat{n} | \xi \rangle^2}{\langle \xi | \hat{n} | \xi \rangle} = \frac{|\xi|^2}{|\xi|^2} = 1$ ポアソン分布

グラビトンがコヒーレント状態になる例

重力波と物質場の線形相互作用を考える

$H_{\text{int}} = \frac{1}{2} \int d^3x \overset{\text{スケールファクター}}{a^2(\eta)} \underset{\text{重力波}}{h_{ij}(\eta, \mathbf{x})} \underset{\text{物質場}}{T_{ij}(\eta, \mathbf{x})}$

真空の時間発展を考えると

$\exp\left(-i \int d\eta H_{\text{int}}\right) |0\rangle = \sum_{\mathbf{k}} \sum_A \exp(\xi_{\mathbf{k}} b_{\mathbf{k}}^\dagger - \xi_{\mathbf{k}}^* b_{\mathbf{k}}) |0\rangle = |\xi_{\mathbf{k}}\rangle$

$\xi_{\mathbf{k}} = -\frac{i}{\sqrt{2} M_{\text{pl}}} \int d\eta a(\eta) \underset{\text{偏光テンソル}}{e_{ij}^A(\mathbf{k})} \underset{\text{負振動数モード}}{v_{\mathbf{k}}^*(\eta)} T_{ij}(\eta, -\mathbf{k})$

重力波が物質場と結合するとグラビトンの状態はコヒーレント状態になる

スクィーズ状態はどうか？

定義： $|\zeta\rangle = \exp(\zeta^* \hat{c} \hat{c} - \zeta \hat{c}^\dagger \hat{c}^\dagger) |0\rangle \equiv \hat{S}(\zeta) |0\rangle$

エルミート演算子

スクィージングパラメーター $\zeta = r e^{i\varphi}$

$$\hat{n} = \hat{c}^\dagger \hat{c}$$

ファノファクター： $F = \frac{(\Delta n)^2}{\langle n \rangle} = \frac{\langle \zeta | \hat{n}^2 | \zeta \rangle - \langle \zeta | \hat{n} | \zeta \rangle^2}{\langle \zeta | \hat{n} | \zeta \rangle} = 2 \sinh^2 r + 2 > 1$

スーパーポアソン分布

グラビトンがスクィーズ状態になる例

バンチ・デイビス真空は放射優勢時代から見るとスクィーズ状態に見える

$$|0\rangle_I = \prod_k \exp(\zeta^* \hat{c}_k \hat{c}_{-k} - \zeta \hat{c}_k^\dagger \hat{c}_{-k}^\dagger) |0_k\rangle_R \otimes |0_{-k}\rangle_R$$

Inflation

Radiation

$$\zeta = e^{i\varphi} \sinh^{-1} \frac{1}{2k^2 \eta_1^2}$$

インフレーション終了時間

インフレーションがあるとグラビトンはスクィーズ状態になる

スキューズ・コヒーレント状態はどうか？

定義： $|\zeta, \xi\rangle = \hat{S}(\zeta) \hat{D}(\xi) |0\rangle$

スキューズ演算子 変位演算子

ファノファクター： $F = \frac{|\xi|^2 e^{-4r} + 2\sinh^2 r + 2\sinh^4 r}{|\xi|^2 e^{-2r} + \sinh^2 r} < 1$ サブポアソン分布

グラビトンがスキューズ・コヒーレント状態になる例

$\xi \gg 1, r > 1$ \longrightarrow インフレーション中に物質場が存在すれば可能

宇宙ノーヘア定理 Gibbons & Hawking (1977) \longrightarrow 物質場 空間曲率 非等方性

宇宙ノーヘア定理の反例となるモデルが必要

非等方インフレーションモデル： $H_{\text{int}} \sim f(\phi) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$ Watanabe, Kanno & Soda (2009)
インフラトン

アキシオンインフレーションモデル： $H_{\text{int}} \sim \phi F \tilde{F}$ Barnaby & Peloso (2011)
アキシオン

これらのモデルがインフレーション中に実現されていれば、原始重力波が量子性を示す

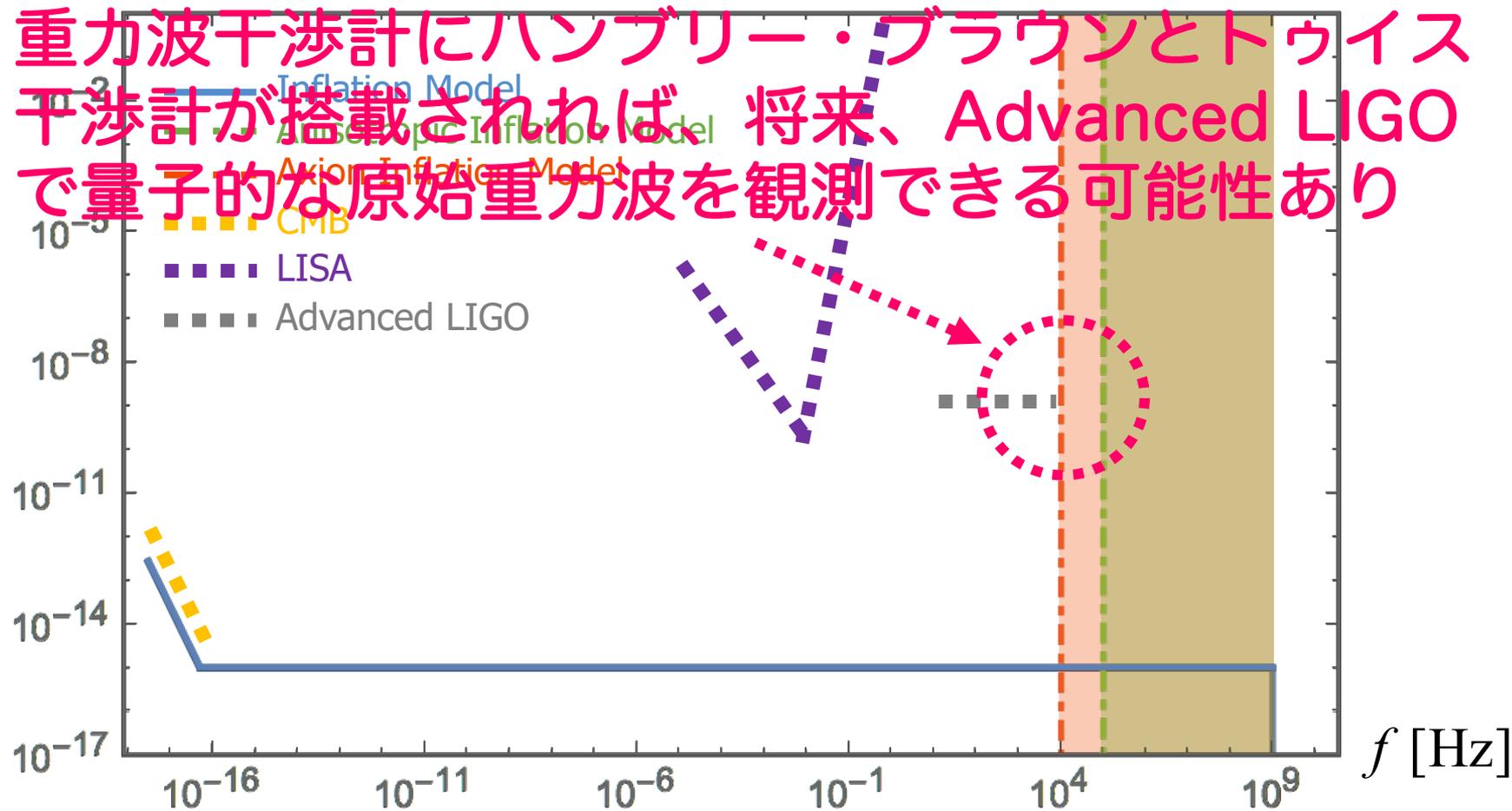
量子性を示す原始重力波の振動数領域

Kanno & Soda (2018)

Kanno (2019)

Ω_{GW} (振幅の大きさ)

重力波干渉計にハンブリー・ブラウンとトウイス干渉計が搭載されれば、将来、Advanced LIGOで量子的な原始重力波を観測できる可能性あり



← 長波長

短波長 →

グラビトンをどうやって発見したら良いか？



1 : 量子光学の知識を応用して直接発見できないか？

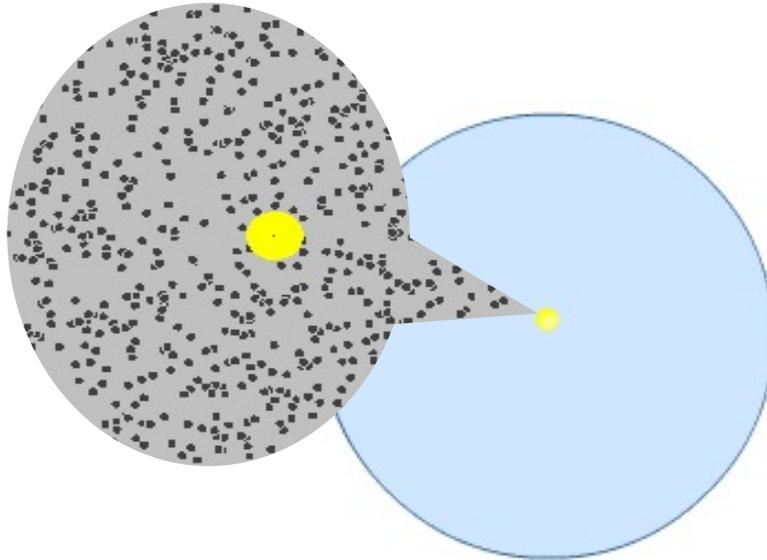
Kanno & Soda (2018), Kanno (2019)

2 : グラビトンのノイズによるデコヒーレンス時間を測ることで間接的に発見できないか？

Kanno, Soda & Tokuda (2020), (2021)

間接的にグラビトンを発見できないか？

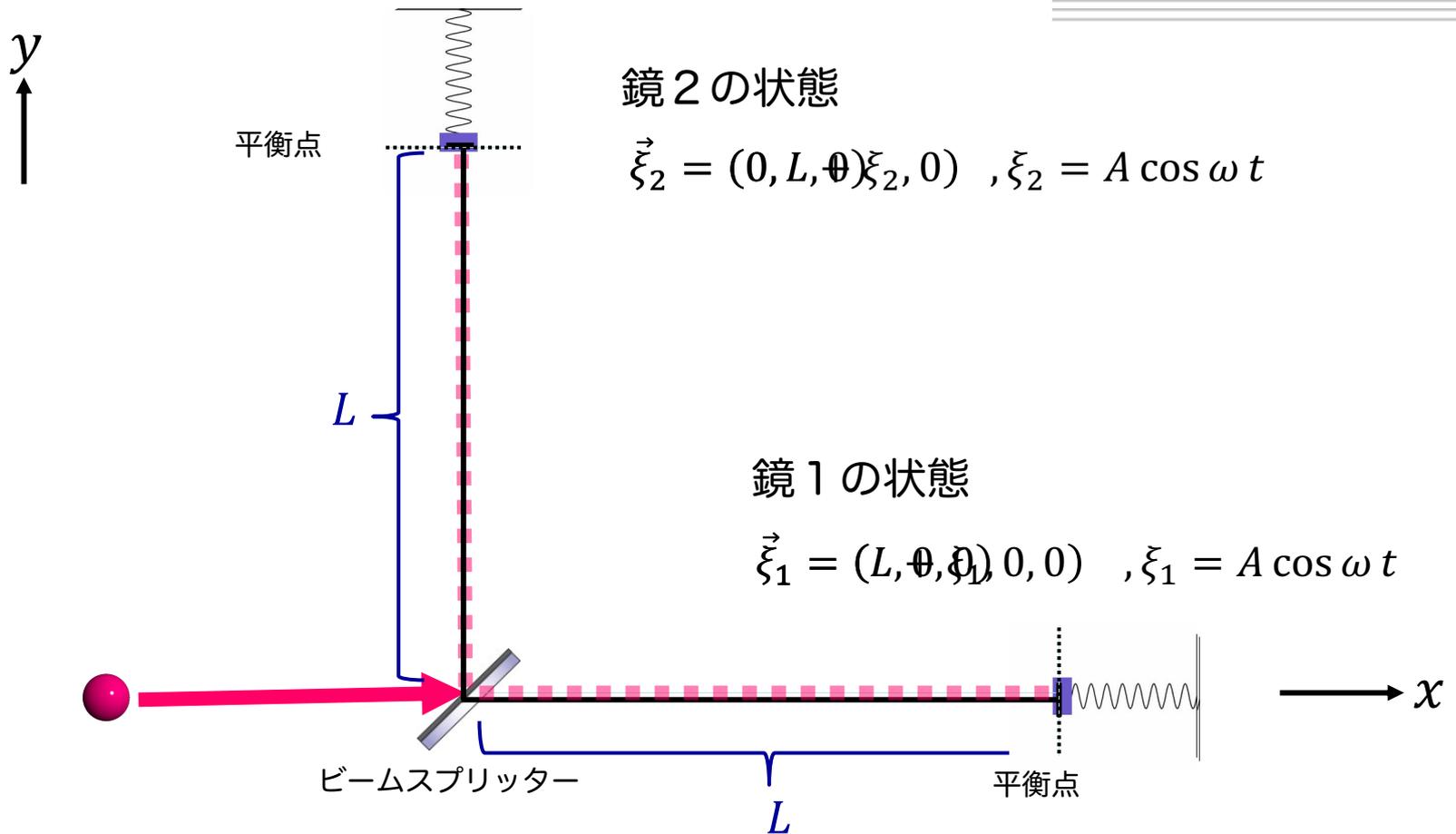
ブラウン運動



花粉から出た微粒子のランダムな運動を通して、その周りにある水分子が間接的に発見された

この微粒子に相当する何かを通してグラビトンを間接的に発見できないか？

セットアップ



入射光鏡の状態は最側の腕を通る重ね合わせ状態で存在する
 ただし、どちらかの鏡で振動が測定されるまで

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\vec{\xi}_1\rangle |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle |\vec{\xi}_2\rangle , |0\rangle \equiv \text{基底状態}$$

初期状態

もしグラビトンが周りにあったら？



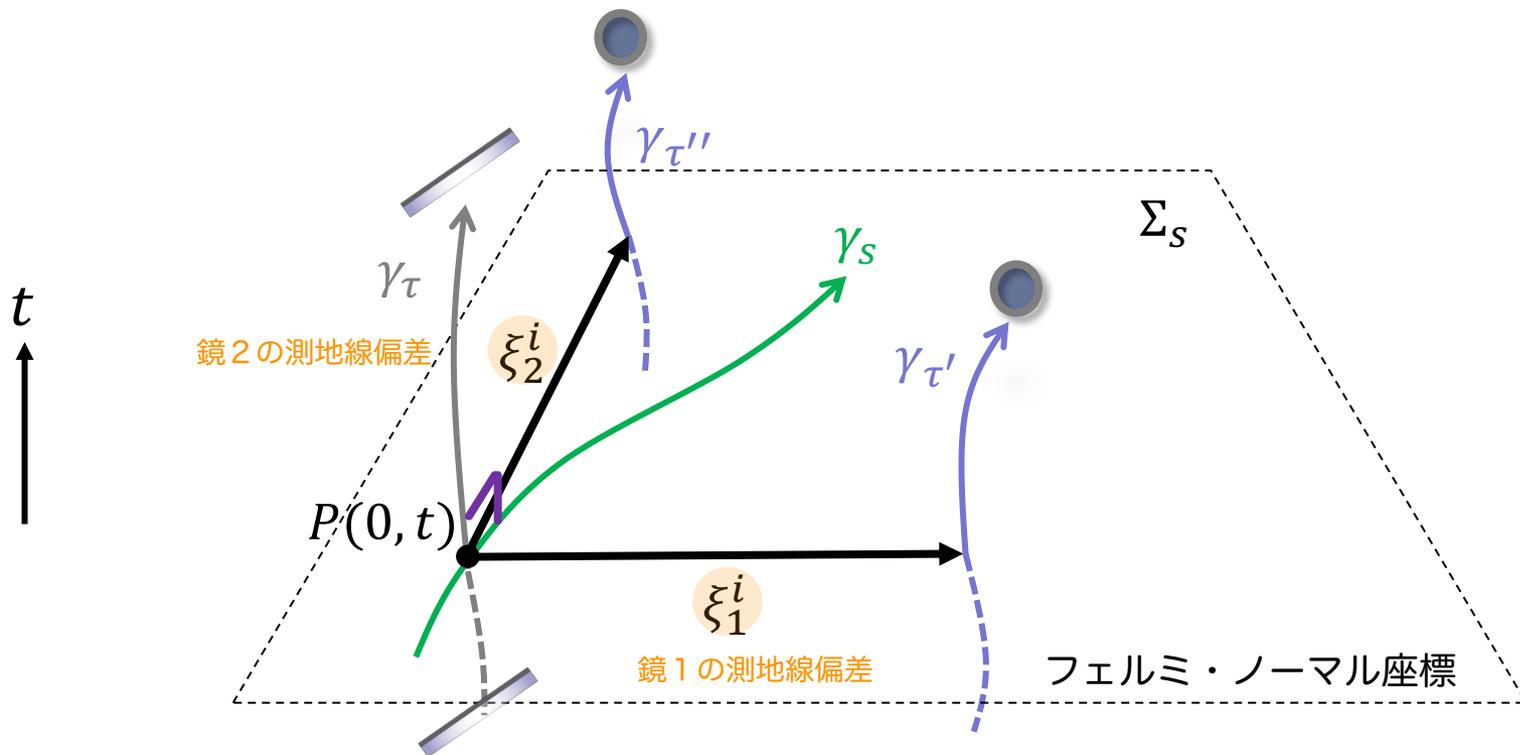
ブラウン運動のセットアップと同じ状況



グラビトンによってエンタングルした鏡がデコヒーレンスを起こすはず
鏡のデコヒーレンス時間を測ることによって、グラビトンの存在
を間接的に証明できるかもしれない

鏡はどのように重力(グラビトン)を感知するのか？

鏡は測地線偏差を通して重力（グラビトン）を感じる



ビームスプリッターと鏡の間の測地線偏差 ξ_1^i, ξ_2^i を通して鏡に対するノイズの正体を明らかにする

どのようにデコヒーレンスが起こるか？

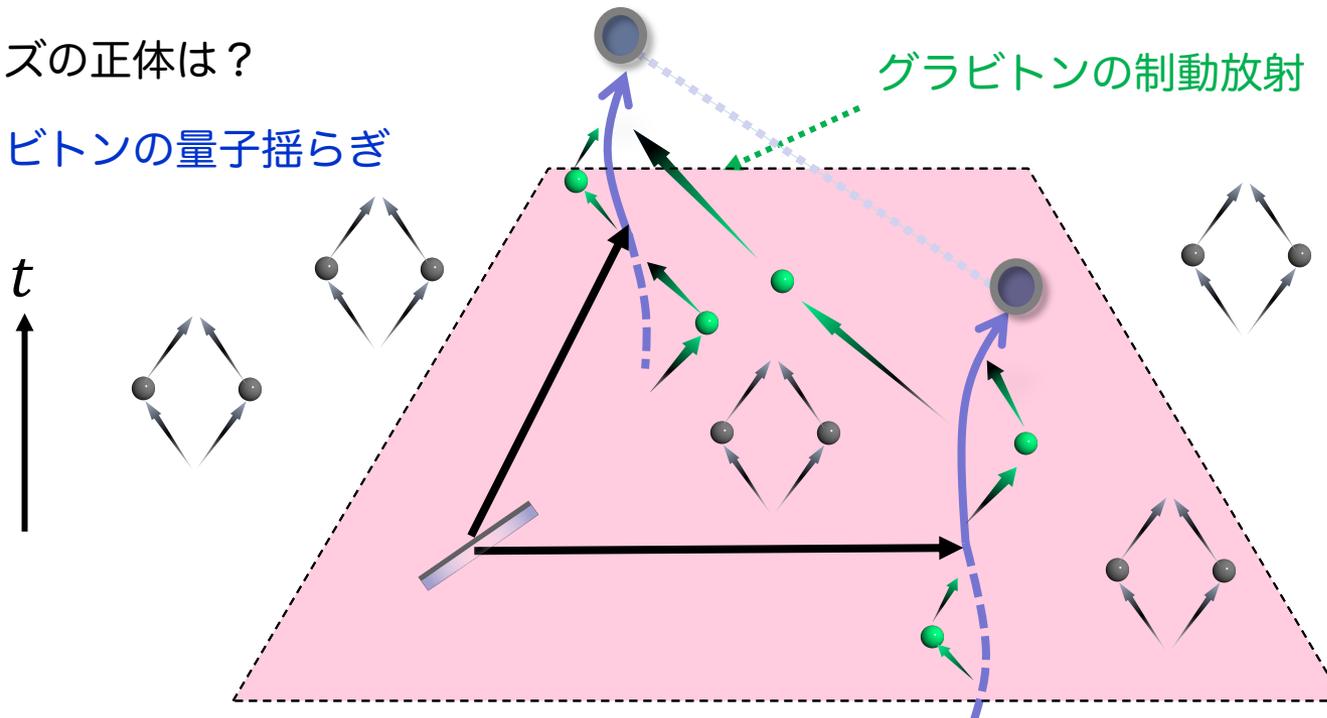
グラビトンと鏡の相互作用

$$S_{\text{int}} = \int dt \left[\frac{1}{2} \frac{m}{M_{\text{pl}}} \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{k,A} \left[e_{ij}^A(\mathbf{k}) \underbrace{\ddot{h}_k^A \xi^i \xi^j}_{\text{3次の相互作用}} \right] \right], \quad M_{\text{pl}}^2 = \frac{1}{8\pi G}, \quad \xi^i = \xi_1^i \text{ or } \xi_2^i$$

鏡の質量 (pointing to m)

ノイズの正体は？

グラビトンの量子揺らぎ



デコヒーレンス汎関数

$$\Gamma = \frac{m^2}{32} \int_0^{t_f} dt \underbrace{\Delta(\xi^i \xi^j)(t)}_{\text{鏡の重ね合わせ状態の差}} \int_0^{t_f} dt' \underbrace{\Delta(\xi^k \xi^\ell)(t')}_{\text{グラビトンの相関}} \left\langle \left\{ \ddot{h}_{ij}(t), \ddot{h}_{k\ell}(t') \right\} \right\rangle \sim 1$$

← スクィーズ状態

デコヒーレンス時間



Large quantum objects: two of LIGO's mirrors, each weighing 40 kg. (Courtesy: Caltech/MIT/LIGO Lab)

熱的光子、空気分子によるデコヒーレンスは？

Kanno, Soda & Tokuda (2021)

典型的なデコヒーレンスの要因: 熱的光子、空気分子

熱的光子によるデコヒーレンス < 空気分子によるデコヒーレンス

デコヒーレンス率

$$\Lambda = \frac{8}{3\hbar^2} n \sqrt{2\pi M} R^2 (k_B T)^{\frac{3}{2}} A^2$$

空気分子の質量 $\sim 0.5 \times 10^{-25}$ kg

空気分子の数密度 $\sim 1 \text{ m}^3$ あたり 10^{12} 個 (ultrahigh vacuum 10^{-10} Pa)

R : 鏡の半径 ~ 0.17 meter (LIGO)

$$\text{デコヒーレンス時間} = \Lambda^{-1} \approx 1200 \left(\frac{R}{0.17 \text{ meter}} \right)^{-2} \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{-\frac{2}{3}} \text{ s} \gg 20 \text{ s}$$

グラビトンが起こすデコヒーレンスの方が空気分子によるデコヒーレンスより早い

古典的な重力波によるデコヒーレンスは効かない

Kanno, Soda & Tokuda (2020)

このモデルでは他のデコヒーレンス要素は問題にならない

まとめ

グラビトンを発見する方法を考えた。

1：粒子の統計性から量子性を判別する量子光学の知識を原始重力波に応用した。

インフレーション中に物質が存在していれば、粒子統計的にグラビトンとして存在していることが分かった。

2：グラビトンのノイズによるデコヒーレンス時間を測ることでグラビトンを間接的に発見する実験的セットアップを考えた。

グラビトンがインフレーション中にスクィーズ状態になったために、40kmの腕の長さ、40kgの鏡の干渉計に対してデコヒーレンス時間が20秒になる。

実際に実験が可能になった場合に、予言したデコヒーレンス時間が測定されれば、グラビトンの発見になる