



早稲田大学 ダークマターの懇談会, 2019.7.6

AXION理論

重力波とアクションの切っても切れない関係

早田次郎

神戸大学理学研究科

なんでアクション？

- 2006年頃からCMBアノーマリーとゲージ場の関係を研究
- 2009年にゲージ場でCMB温度揺らぎの統計的非等方性を説明して一段落
- 次は、アクションインフレーションで重力波生成!
 - > 2012年にいくつかのグループに先を越された
- 戦略練り直し
 - > LHCで超対称性がみつからなかった
 - 2014年頃からアクションダークマターにシフト
- アクション研究を重力波の視点から

いろんなものをアクションと呼ぶことにする

PQ アクション

Peccei–Quinn 1977 Weinberg 1978; Wilczek 1979

アクション質量 $m_a = 5.70 \mu\text{eV} \left(\frac{10^{12} \text{GeV}}{f_a} \right)$ f_a : 崩壊定数

オリジナルなモデルは実験と矛盾するので ``隠れたアクション'' が必要

DFSZ アクション Dine, Fischler, Srednicki 1981; Zhitnitsky 1980

KSVZ アクション Kim 1979; Shifman, Vainshtein, Zakharov 1980

ストリングアクション

Arvanitaki et al., 2010

$$m_a \approx \frac{\mu^2}{f_a} e^{-\# \text{moduli}/2}$$
 質量は対数的に等間隔で分布

質量と崩壊定数が独立というのが QCD axion とは違う

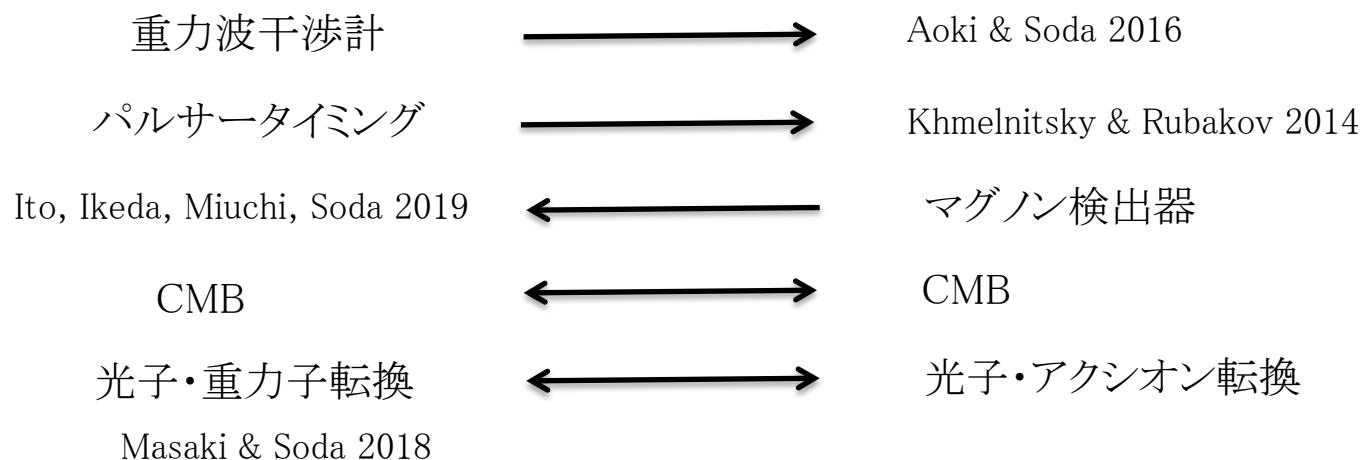
アクション=シフト対称性をもった擬スカラー

アクションと重力波の双対性

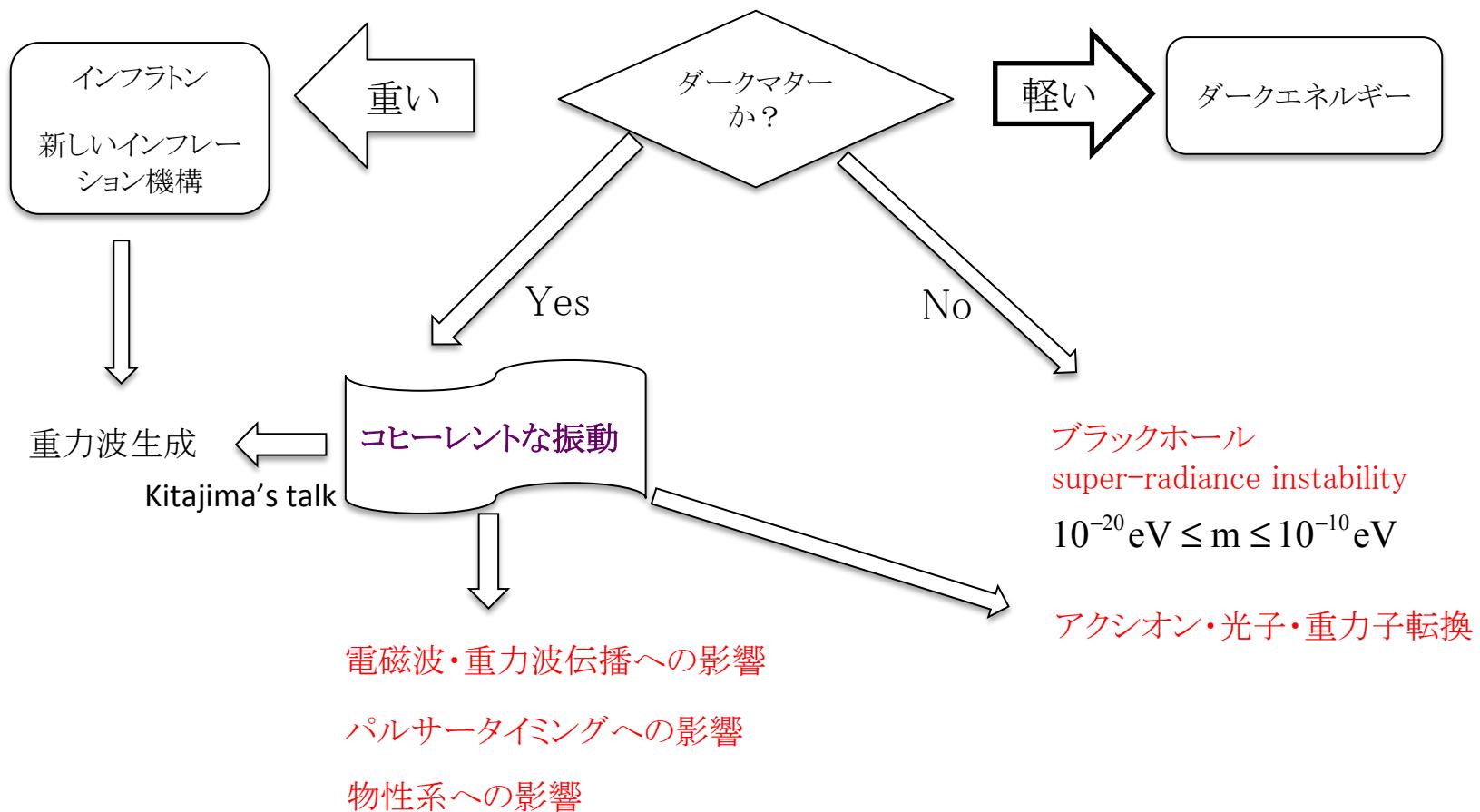
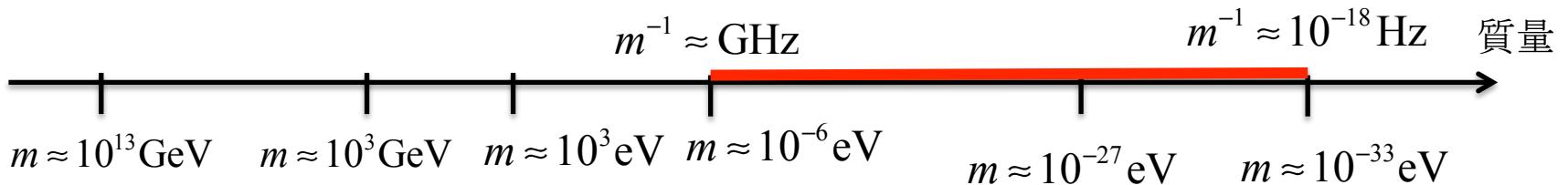


アクション検出に有効な検出装置は
重力波検出に有効

重力波検出に有効な検出装置は
アクション検出に有効



アクションと重力波の連関性



アクション・光子・重力波

ダークマターでなくても面白い

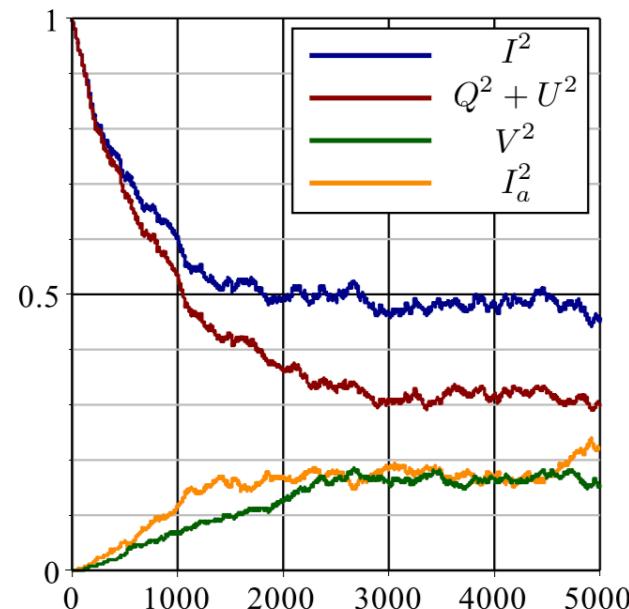
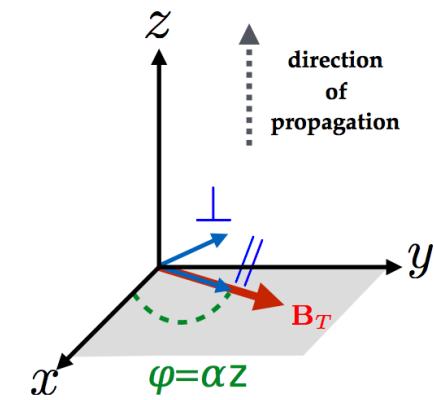
アクション・光子 転換

アクション・光子 混合

$$\left[(\omega + i\partial_z) - \frac{m_a^2}{2\omega} \right] a = -\frac{1}{2} g_{a\gamma} B_T A_{||}$$

$$(\omega + i\partial_z) A_{||} = -\frac{1}{2} g_{a\gamma} B_T a$$

$$(\omega + i\partial_z) A_{\perp} = 0$$



ドメインごとに磁場はランダムに配位されているとした場合

アクション探索装置:回転ブラックホール

Super-radiance instability

Penrose 過程がくりかえされて回転エネルギーが引き抜かれる

もし高速回転しているブラックホールがみつかればアクションはない

エネルギーを得たアクションの雲が崩壊して重力波をだす

$$\left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \approx \left(\frac{R_s}{3\text{km}} \right) \approx \left(\frac{m}{10^{-10}\text{eV}} \right)^{-1}$$

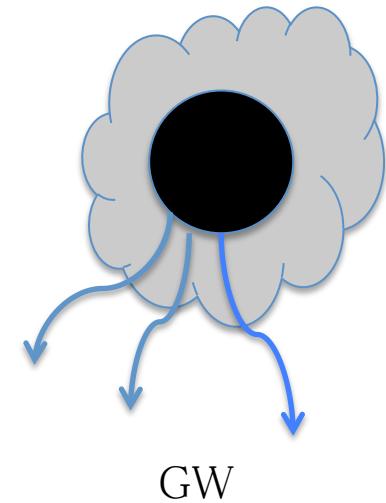
なので

$$1M_{\odot} \leq M \leq 10^{10} M_{\odot}$$

の間に高速で回転するブラックホールが見つかれば

$$10^{-20}\text{eV} \leq m \leq 10^{-10}\text{eV}$$

の対応するアクションは存在しない



やっぱりダークマターが旬

大スケールではCDMと区別つかない

アクションはコヒーレントな振動をしている

$$a = a_0 \cos mt$$

エネルギー密度は

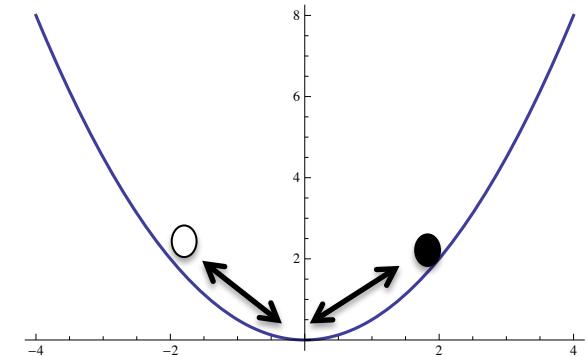
$$\rho_{DM} = \frac{1}{2} \dot{a}^2 + \frac{1}{2} m^2 a^2 \approx \frac{1}{2} m^2 a_0^2$$

圧力は

$$p_{DM} = \frac{1}{2} \dot{a}^2 - \frac{1}{2} m^2 a^2 \approx -\frac{1}{2} m^2 a_0^2 \cos(2mt)$$

宇宙年齢に比べると圧倒的に早く振動しているので平均するとゼロ
宇宙論的なスケールではダークマターとして振る舞う

$$H_0 \approx 10^{-33} \text{ eV}$$

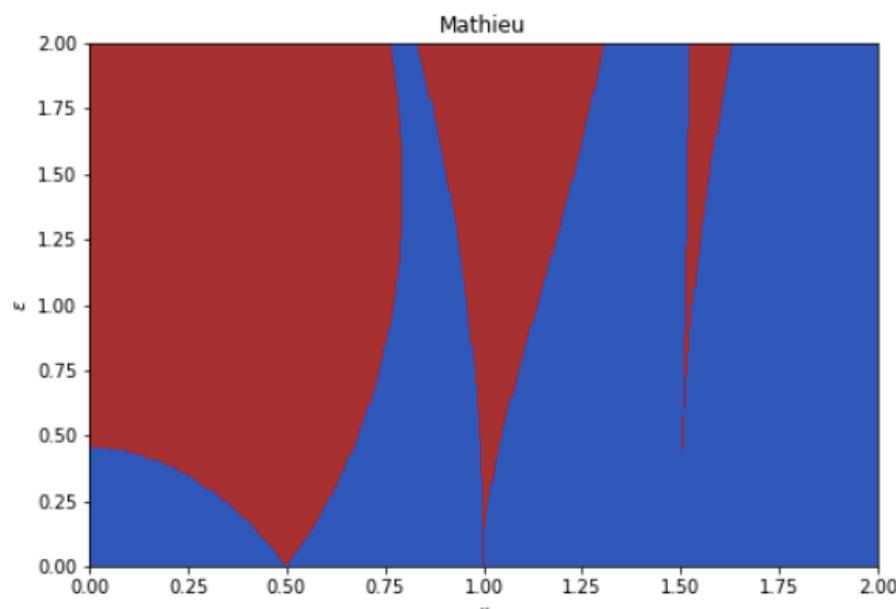
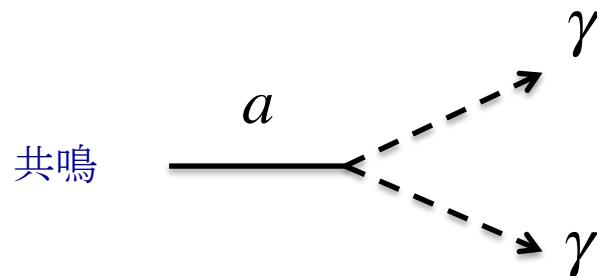


$$\left(\frac{m}{10^{-23} \text{ eV}} \right) \approx \left(\frac{f}{10^{-8} \text{ Hz}} \right)$$

すなわち、宇宙論的観測でアクションだというのは難しい

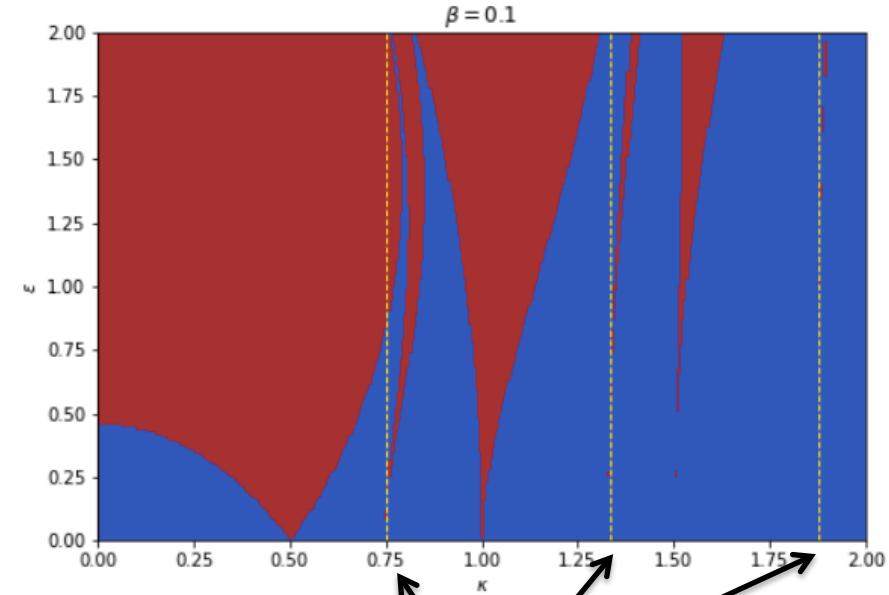
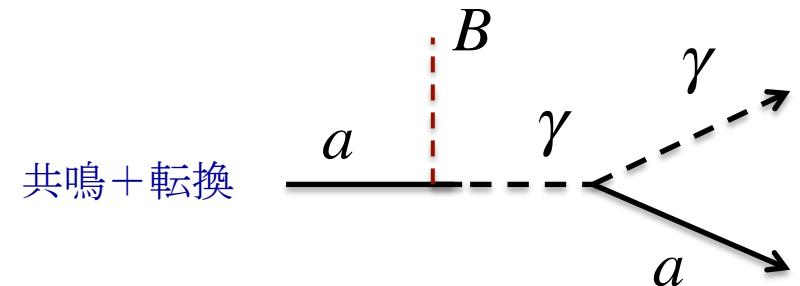
ダークマター背景でのアクシオン・光子転換

Masaki, Aoki, Soda 2019



ダークマターなしの共鳴バンド

$$\beta \equiv \frac{g_{a\gamma\gamma} B}{m}, \quad \kappa \equiv \frac{k}{m}, \quad \varepsilon \equiv \frac{g_{a\gamma\gamma} k \sqrt{2\rho}}{m^2}$$



新しい共鳴バンド

パルサーフタイミングアレイ探索

nHz重力波探索

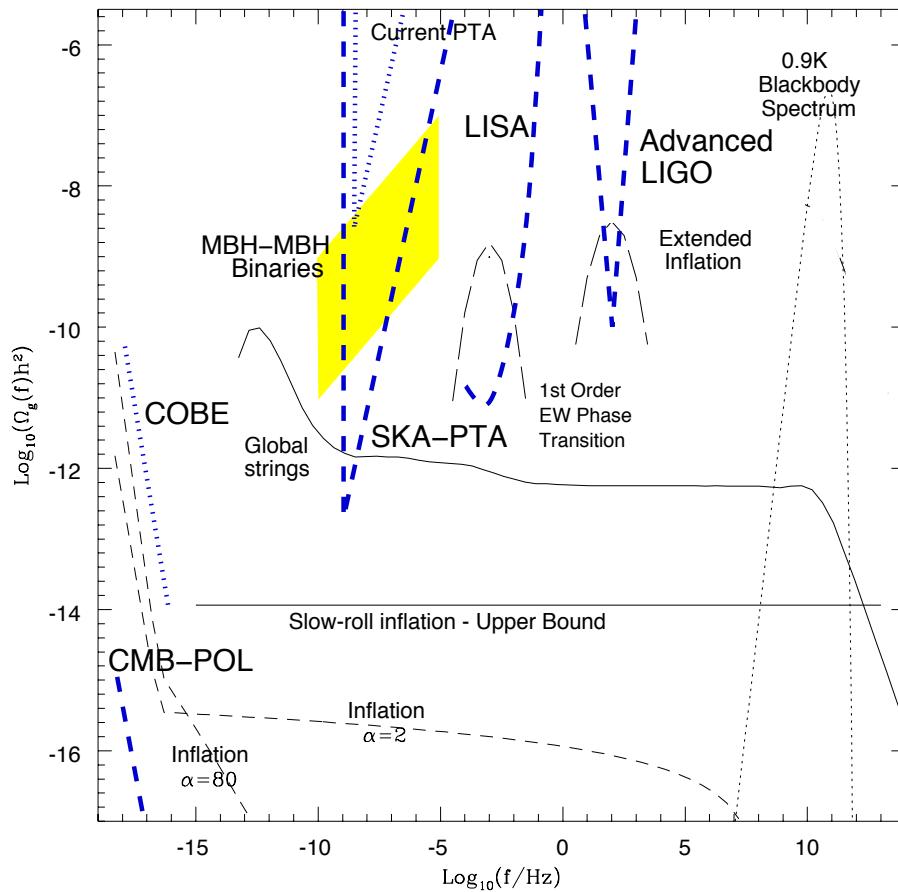
Detweiler 1979

背景重力波

$$h_{ij} = \int d^2\hat{\mathbf{n}} h_{ij}(t - \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{x}) \quad \hat{\mathbf{n}} : \text{direction of wave propagation}$$

パルサー周期のズレ

$$\Delta t \equiv \int_0^t dt_e z(t_e, \hat{\mathbf{n}}) \quad z \equiv \frac{v_0 - v(t_e)}{v_0} = \frac{1}{2} \int d^2\hat{\mathbf{n}} \frac{\hat{p}^i \hat{p}^j}{1 + \hat{\mathbf{n}} \cdot \hat{p}} \Delta h_{ij}(\hat{\mathbf{n}}) = \int d^2\hat{\mathbf{n}} z(t_e, \hat{\mathbf{n}})$$



New Astron. Rev. 48 (2004) 993–1002,
PoS MRU (2007) 020

アクション探索

銀河スケールでは宇宙膨張は無視できる

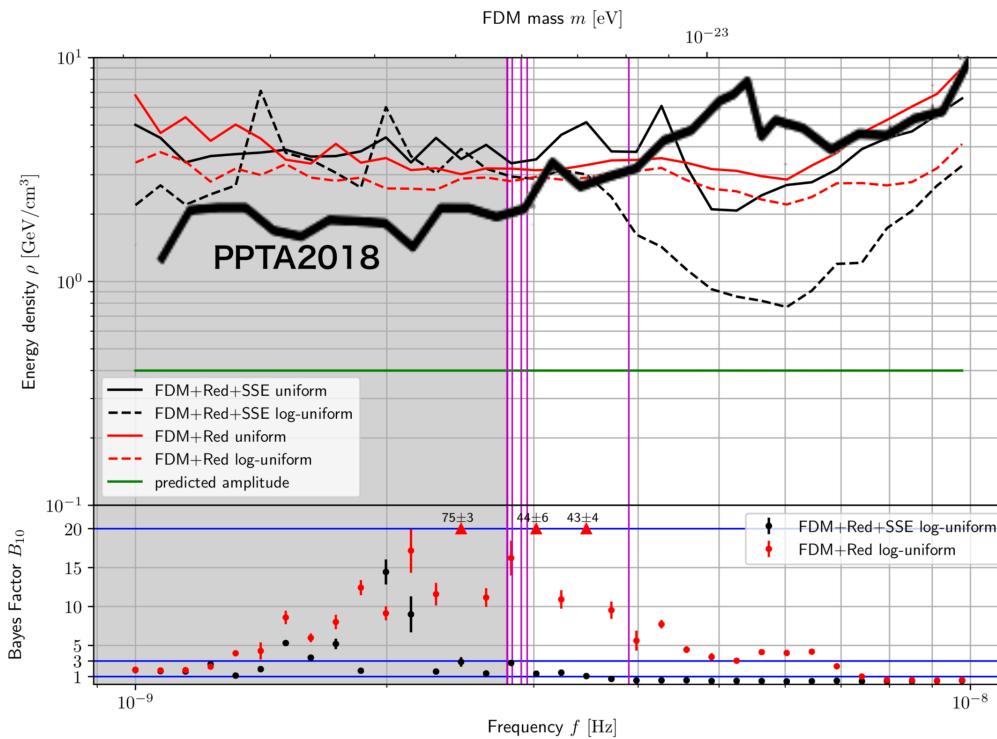
Khmelnitsky & Rubakov 2014

$$ds^2 = -(1+2\Phi)dt^2 + (1-2\Phi)\delta_{ij}dx^i dx^j$$

時間に依存する部分しか関係なくて $\Phi = \frac{\rho_{DM}}{8m^2} \cos(2mt)$

ハルサー周期のズレ

$$\Delta t = - \int_0^t \frac{\Omega(t') - \Omega_0}{\Omega_0} dt' \quad \frac{\Omega(t) - \Omega_0}{\Omega_0} = \Phi(\mathbf{x}, t) - \Phi(\mathbf{x}_p, t')$$



NANOGrav 11year data

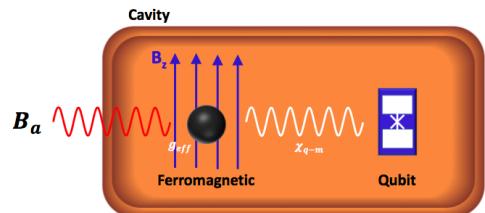
Kato & Soda 2019

実験室で。。。

マグノン検出器

Ikeda et al. 2019

$$L_{\text{int}} = -ig_{aee}a\bar{\psi}\gamma_5\psi \simeq -\frac{g_{aee}\hbar}{2m_e}\hat{\sigma}\cdot\nabla a = 2\mu_B\hat{S}\cdot\left(-\frac{g_{aee}}{e}\nabla a\right) \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$



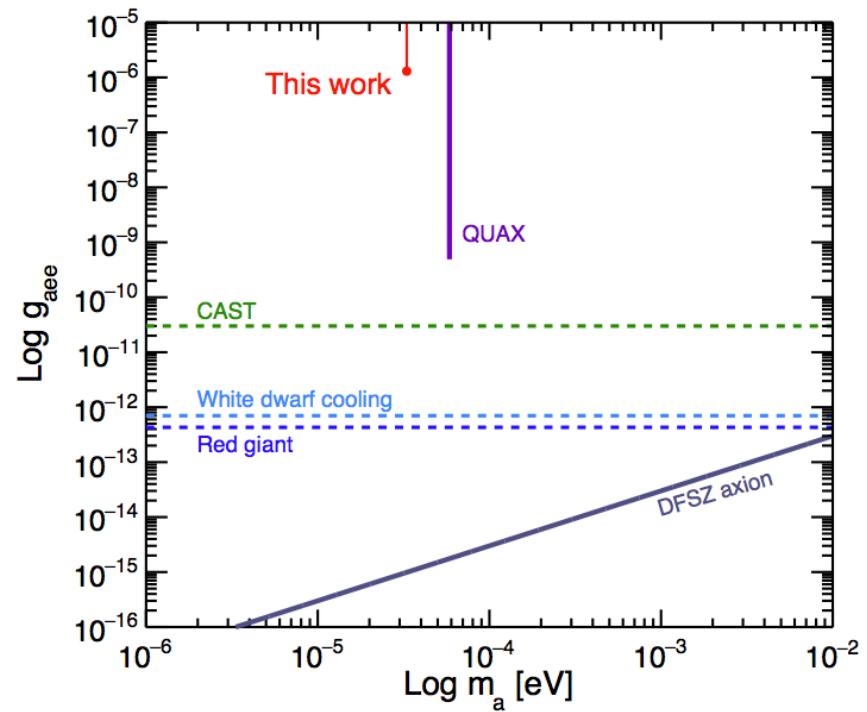
$$f_a = \frac{\omega_a}{2\pi} = \frac{m_a c^2}{h} = 0.24 \left(\frac{m_a}{1.0 \mu\text{eV}} \right) \text{GHz}$$

$$\begin{aligned} B_a &= -\frac{g_{aee}}{e}\nabla a \\ &\simeq 4.4 \times 10^{-8} g_{aee} \left(\frac{\rho_{DM}}{0.45 \text{GeV/cm}^3} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{300 \text{km/s}} \right) [\text{T}] \end{aligned}$$

アクシオン・電子結合への制限

$$B_a < 4.1 \times 10^{-14} [\text{T}]$$

$$\longrightarrow \quad g_{aee} < 1.3 \times 10^{-6}$$



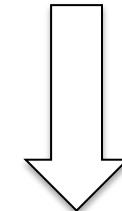
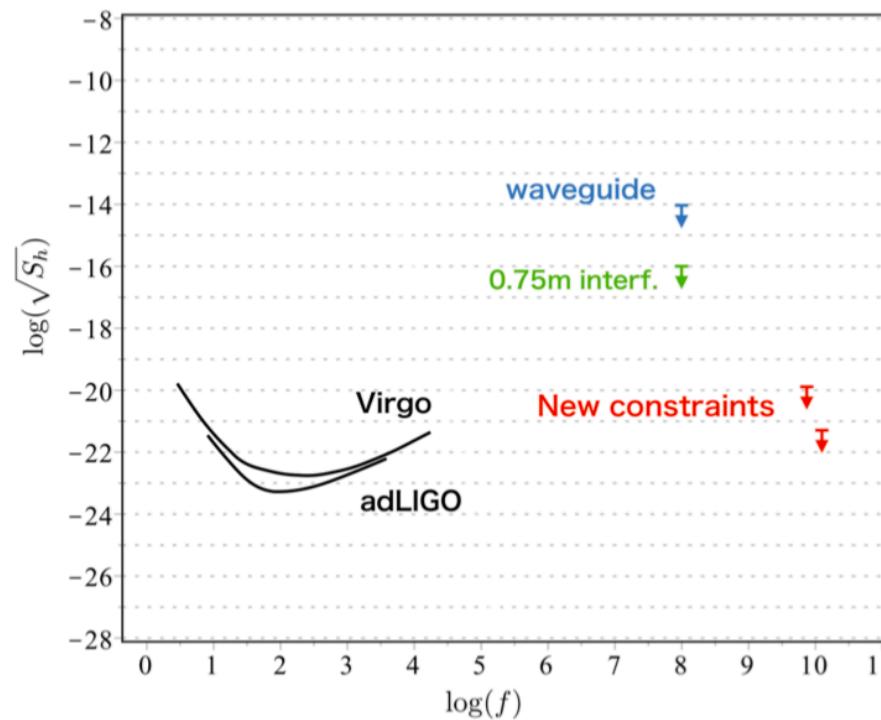
GHz重力波探索

Ito et al. 2018

$$H \simeq -\mu_B (2\delta_{ij} + h_{ij}) S^i B^j$$

$$g_{eff} < \begin{cases} 3.5 \times 10^{-12} \text{ eV} & \text{QUAX, Crescini et al. 2018} \\ 3.1 \times 10^{-11} \text{ eV} & \text{Flower et al. 2018} \end{cases}$$

$$g_{eff} = \frac{1}{4\sqrt{2}} \mu_B B_z \sin\theta \sqrt{N} \left[\cos^2\theta (h^{(+)})^2 + (h^{(\times)})^2 + 2\cos\theta \sin\theta h^{(+)} h^{(\times)} \right]^{1/2}$$



$$\sqrt{S_h} < \begin{cases} 7.6 \times 10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2} & \text{at 14 GHz} \\ 1.2 \times 10^{-20} \text{ Hz}^{-1/2} & \text{at 8.2 GHz} \end{cases}$$

アクションンダークマター中を
伝搬する電磁波と重力波

アクシオンダークマター中の電磁波伝播

Yoshida & Soda 2018

アクシオンがダークマターとして存在すると

円偏光基底で波動方程式は $\ddot{A} + k^2 \left[1 + \varepsilon \lambda \frac{\sqrt{\rho}}{k} \sin mt \right] A = 0$, $\varepsilon = \pm 1$

共鳴幅が狭い

パラメータ共鳴周波数は $f_r = 1.2 \times 10^4 \left(\frac{m}{10^{-10} \text{eV}} \right) \text{Hz}$ $\Delta f = 2.6 \times 10^{-14} \frac{\lambda}{(10^{16} \text{GeV})^{-1}} \sqrt{\frac{\rho}{0.3 \text{GeV/cm}^3}} \text{ Hz}$

アクシオンダークマター密度への制限

ダークマター中を $30 \frac{(10^{12} \text{GeV})^{-1}}{\lambda} \sqrt{\frac{0.3 \text{GeV/cm}^3}{\rho}} \text{ pc}$

アクシオンの残存量

$$\frac{\rho_{axion}}{\rho_{DM}} \leq 10^{-12}$$

だけ伝播すると振幅が10倍になる

30Mpc 伝播するとして、このような成長が見られないとすると

アクションダークマター中の重力波伝播

$$S = \frac{M_p^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} R + \frac{M_p}{8} \ell^2 \int d^4x \sqrt{-g} a(x) \varepsilon^{\mu\nu\lambda\rho} R_{\alpha\beta\mu\nu} R^{\alpha\beta}_{\lambda\rho} - \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} (\partial a)^2 + \frac{1}{2} m^2 a^2 \right]$$

$$\ell \leq 10^8 \text{ km} \quad \text{Y.Ali-Haimoud \& Y.Chen 2011}$$

宇宙膨張は無視できて

$$a = a_0 \cos mt \quad h_{ij} = h_R e_{ij}^R(\mathbf{n}) + h_L e_{ij}^L(\mathbf{n})$$

アクション背景での重力波の伝播は

$$\ddot{h}_A + \frac{m \varepsilon_A \delta \cos mt}{m + \varepsilon_A k \delta \cos mt} k \dot{h}_A + k^2 h_A = 0 \quad \varepsilon_A = \begin{cases} 1 & \text{for R} \\ -1 & \text{for L} \end{cases} \quad \delta = m^2 \ell^2 \frac{a_0}{M_p}$$

共鳴が起きる

$$k_{\text{res}} = \frac{m}{2} = 1.2 \times 10^4 \left(\frac{m}{10^{-10} \text{ eV}} \right) \text{ Hz}$$

Chern-Simons 重力への制限

Yoshida & Soda 2018

アクションがダークマターの全てと仮定する

重力波は

$$10^{-8} \left(\frac{10^{-10} \text{eV}}{m} \right) \left(\frac{10^8 \text{km}}{\ell} \right)^2 \sqrt{\frac{0.3 \text{GeV/cm}^3}{\rho}} \text{pc}$$

だけ伝播すると振幅が10倍になる。

10kpc 伝播するごとに、10kHzの重力波の振幅は $10^{10^{12}}$ だけ増大する。

しかし、こんな現象は観測されていない

したがって、 100Mpc だけ伝搬してきたとすると、強い制限を得ることができる

$$\ell \leq 1\text{km}$$

アクションダークマター探索

Yoshida & Soda 2018

重力波の観測で、結合定数が $\ell = 100\text{km}$ と決まったと仮定する

アクション背景を重力波が

$$1.0 \times \left(\frac{10^{-10} \text{eV}}{m} \right) \left(\frac{100\text{km}}{\ell} \right)^2 \sqrt{\frac{10^{-29} \text{g/cm}^3}{\rho}} \text{ Mpc}$$

だけ伝播すると振幅が10倍になる。

アクションダークマターは重力波を観測することで $\Omega_a = 0.01$ まで観測できる

同時に、重力セクターでのparity の破れも観測できる

まとめ

- アクションと重力波の双対性は作業仮説として有効
- アクションは重力波と関係が深い
- アクションがダークマターなら素晴らしいが、
ダークマターでなくても面白い
- ダークマターならコヒーレントな振動を観測しなくては
- テーブルトップの実験でもっと面白いことがきっとある