

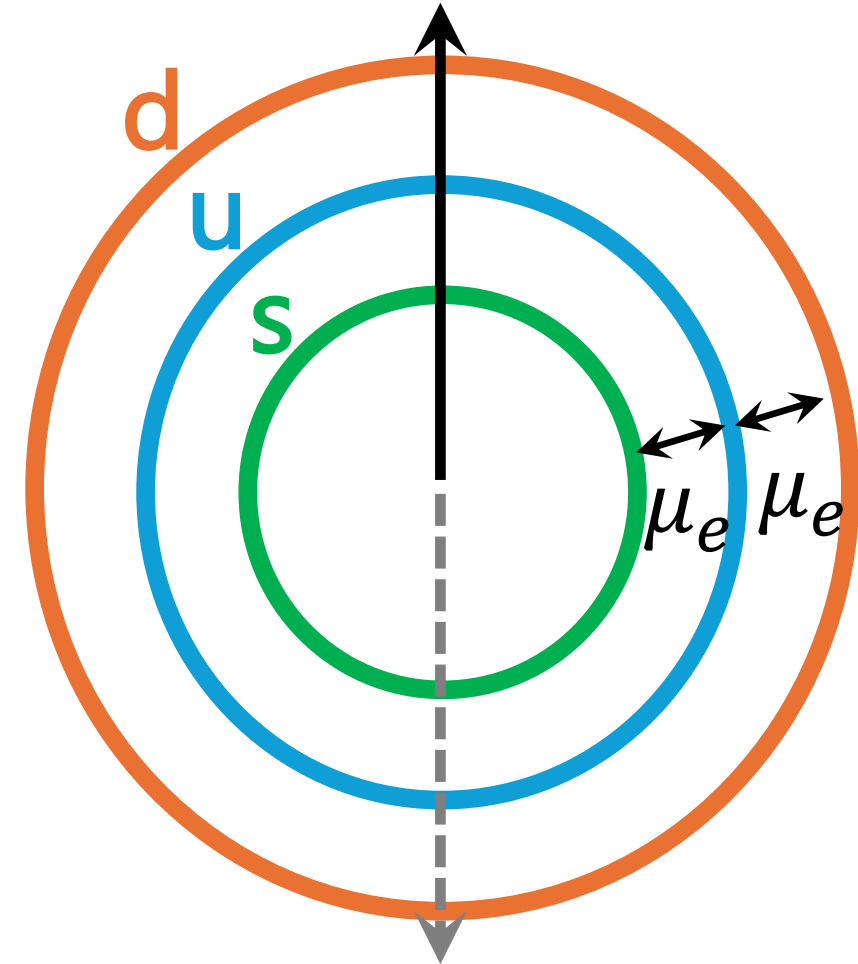
結晶カラー超伝導相の渦間の相互摩擦とパルサーグリッチ

湊 修平(東大)

1. Motivation

結晶カラー超伝導相というものがある

- 高密度クォーク物質のクォークのフェルミ面近傍には引力相互作用があるので超伝導になるのは自然
- 特に中性子星の内部では追加で β 平衡, 電気中性条件などが課されてフレーバーごとのフェルミ面がズレる(右図)



Fermi面のズレにより有限運動量の pairing が選ばれ, 凝縮が空間変調する:

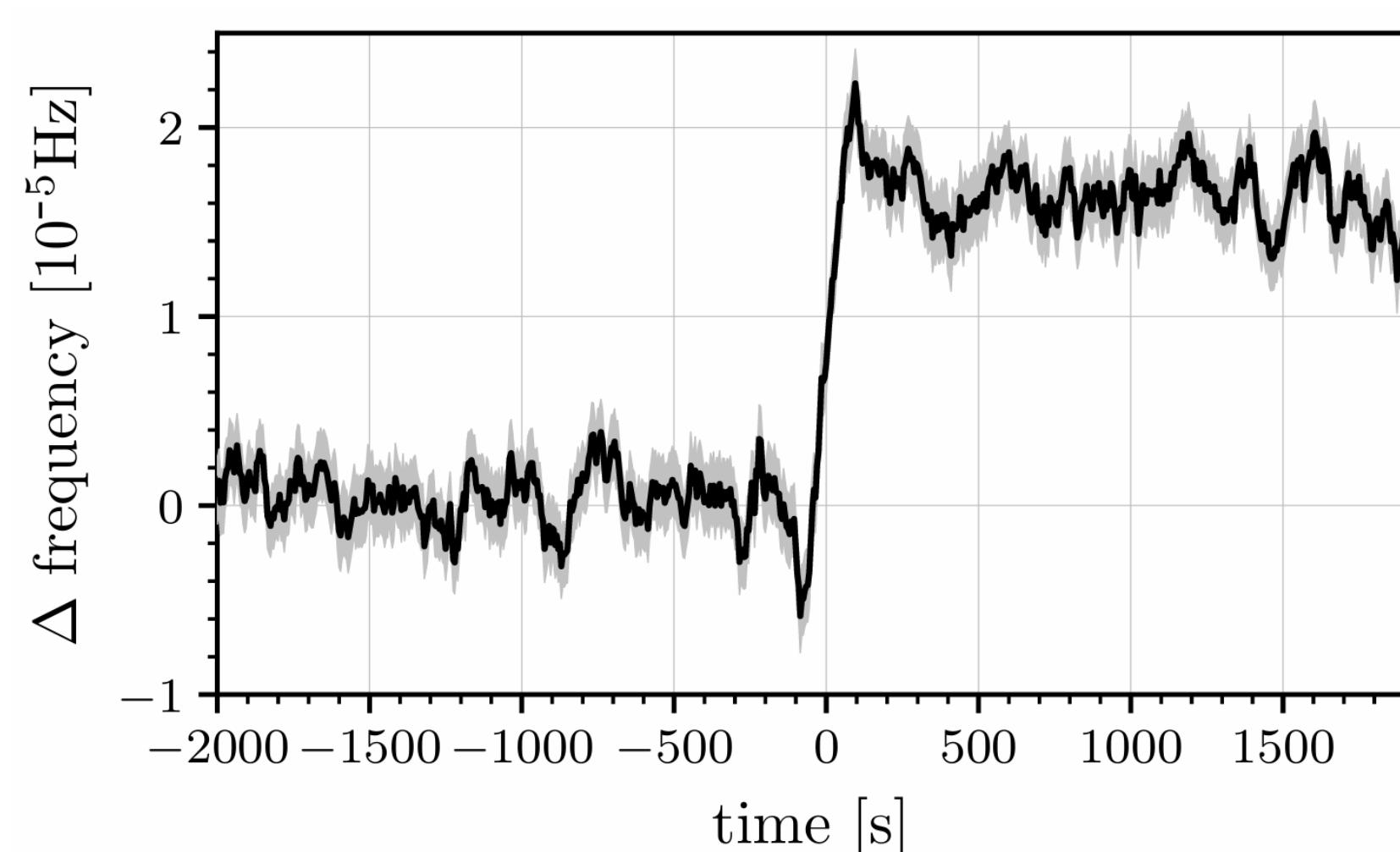
$$\langle \psi_{i\alpha} C \gamma^5 \psi_{j\beta} \rangle \propto \sum_I \epsilon_{I\alpha\beta} \epsilon_{Iij} \Delta_I \sum_{\mathbf{q}_I^a} \exp(2i\mathbf{q}_I^a \cdot \mathbf{r})$$

Alford+(2007)

こういう pairing を持つカラー超伝導相を結晶カラー超伝導相という

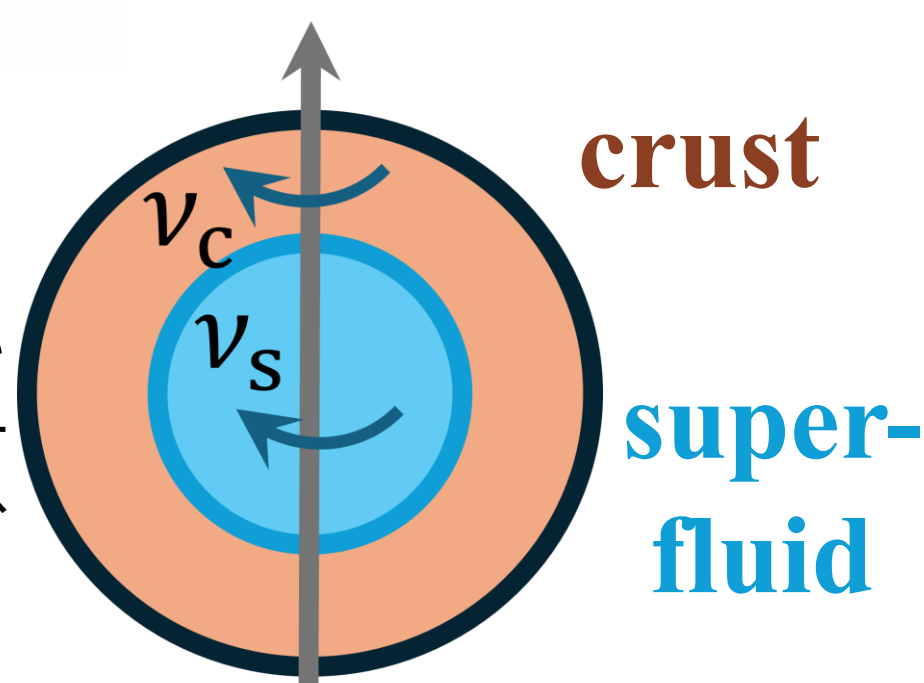
パルサーグリッチというものがある

パルサーの自転角速度を観測していると, 突然角速度が急激に上昇することがある



Vela Data, Ashton+(2019)

グリッチは超流動渦のピン止めという現象で説明できるとされていて, 結晶カラー超伝導相もグリッチ源の候補 Baym+(1969), Rajagopal+(2007)

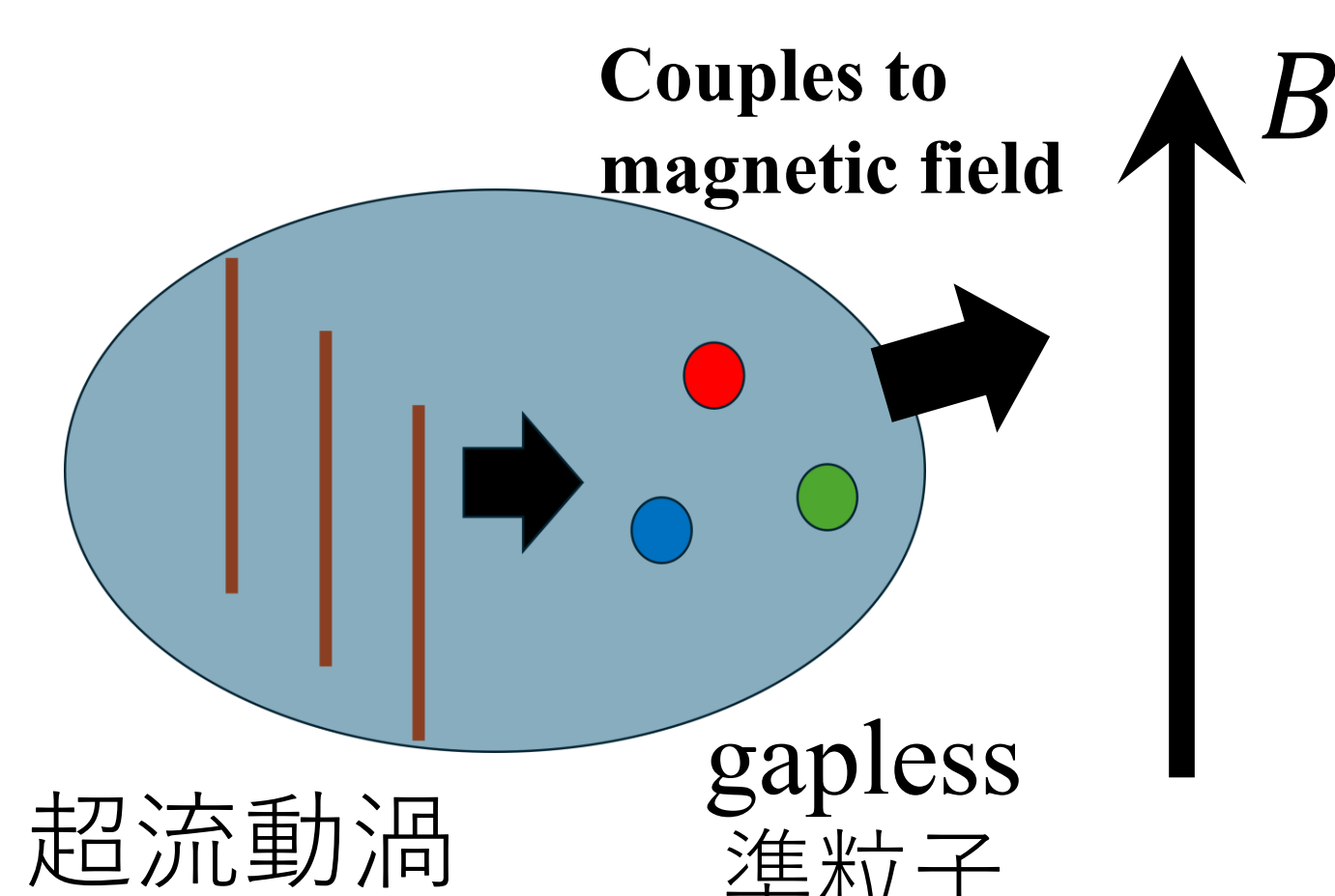


他方, 上のような観測データから読み取れること:

- 解放される角運動量のスケール $\propto \Delta\Omega$ [Hz]
結晶CSCの先行研究有り, Review: Anglani+(2014)
- 立ち上がりの時間スケール: 10s – 100s
結晶CSCの先行研究無し

2. Physics

こんな感じのことを考えたい



超流動渦と gapless 準粒子の散乱で, 超流動成分から準粒子成分へ角運動量に移る. さらに荷電成分は磁場を介して角運動量をクラストへ伝達する

この過程にかかる時間スケールは?

3. Formalism

渦に働く準粒子由来の摩擦力を計算して, 摩擦係数から準粒子に角運動量が逃げる時間スケールを見積もる

超流動渦 $\rightarrow$ gapless 準粒子

仮定: $U(1)_B$ vortex, CubeX相

quasiparticle-vortex 散乱を考える

例: Aharonov-Bohm 散乱

$$\psi(\theta + 2\pi) = e^{2\pi i \nu} \psi(\theta)$$

準粒子の波動関数

AB位相

散乱を考えるために波動関数を部分波展開する:

$$\psi(r, \theta) = \sum_m R_m(r) e^{im\theta},$$

$$R_m(r) \propto J_{|m-\nu|}(k_\perp r).$$

遠方での自由波の漸近形とのズレ

$$R_m(r) \sim (k_\perp r)^{-\frac{1}{2}} \cos\left(k_\perp r - \frac{\pi|m|}{2} - \frac{\pi}{4} + \delta_m\right),$$

から位相シフトは

$$\delta_m = \frac{\pi}{2} (|m| - |m - \nu|).$$

散乱振幅は

$$f(\theta) = (2\pi i k_\perp)^{-1/2} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (e^{2i\delta_m} - 1) e^{im\theta}.$$

で定義されるので, 輸送断面積は,

$$\sigma = \frac{2}{k_\perp} \sin^2(\pi\nu).$$

渦にはたらく力

$$\frac{f}{L} = -\rho_s \kappa [d \hat{z} \times (\hat{z} \times \mathbf{w}) + d' \hat{z} \times \mathbf{w}]$$

Dissipation

$\sim$ AB effect

Hall effect

$\sim$ Berry phase

Shelankov(1998)

Kopnin-Volovik(1995)

• d は渦と準粒子の散乱断面積から決まる

• d' は渦芯を流れる spectral flow から決まる

摩擦係数

$$\alpha_{mf} := \frac{d}{d^2 + (1 - d')^2}$$

Time scale of friction $\sim (2\nu\alpha_{mf})^{-1}$

4. Result

$$\alpha_{mf} = 0.02 - 0.84 \Rightarrow \tau_{mf} = 10 - 300 \text{ ms}$$

同じくグリッチで良く議論される npe 物質の場合, 摩擦の時間スケールは $\sim 10\text{s}$ 程度

参考:

$$\text{準粒子から磁場} \sim 6\text{s} \left(\frac{L}{5\text{km}}\right) \left(\frac{\rho_{eff}}{10^{15}\text{gcm}^{-3}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{10^{13}\text{G}}{B_{core}}\right) \sim \mathcal{O}(10\text{s})$$

Future work:

Alfvén(1942), Mendell(1998)

こういうグリッチの時間発展の中に結晶CSCに固有の観測にかかるシグナルを予言できると嬉しい