



アンドロメダ銀河領域における  
重力マイクロレンズ効果による  
宇宙ひもの探査

東京大学/カブリIPMU

D2 新倉広子

Collaborators: Masahiro Takada, Naoki Yasuda (Kavli IPMU),  
Robert Lupton (Princeton), Takahiro Sumi (Osaka), Sachiko Kuroyanagi (Nagoya).



アンドロメダ銀河領域における  
重力マイクロレンズ効果による  
原始ブラックホール探査

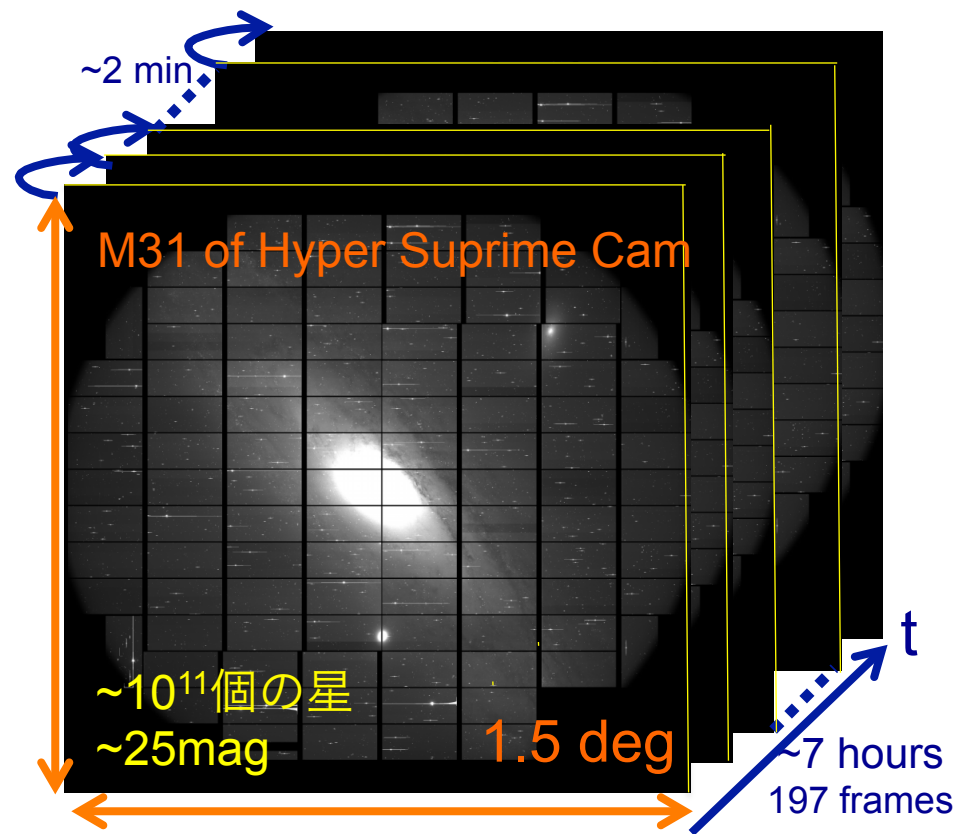
東京大学/カブリIPMU

D2 新倉広子

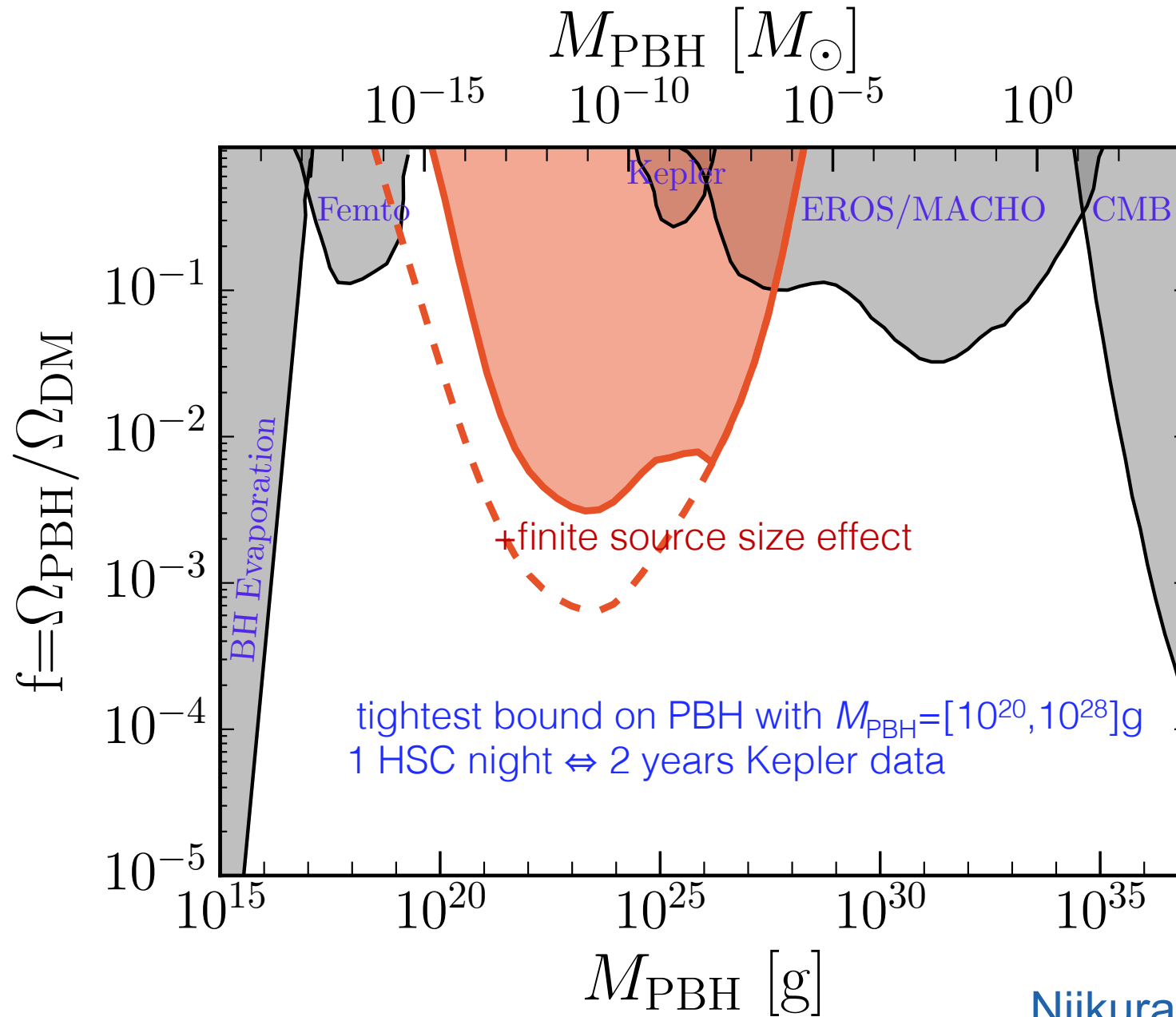
Collaborators: Masahiro Takada, Naoki Yasuda (Kavli IPMU)  
Robert Lupton (Princeton), Takahiro Sumi (Osaka),...

# 観測: 原始ブラックホールによる 重力レンズ候補天体の広天域探索

- ダークマターの候補の1つである**原始ブラックホール (PBH)**による重力レンズ候補天体の探索。および**PBHの存在量の制限**を導出
- すばる広視野カメラ(Hyper Suprime-Cam; HSC)により
  - ★ 短いタイムスケールかつ暗い時間変動天体の**広域**探索が初めて可能
- アンドロメダ銀河(M31)領域で、**2分間隔で7時間分**のデータ取得 (r-band)



# Results: New bound on PBH abundance





アンドロメダ銀河領域における  
重力マイクロレンズ効果による  
宇宙ひもの探査

東京大学/カブリIPMU

D2 新倉広子

Collaborators: Masahiro Takada, Naoki Yasuda (Kavli IPMU),  
Robert Lupton (Princeton), Takahiro Sumi (Osaka), Sachiko Kuroyanagi (Nagoya)..

# Outline

---

HSCでアンドロメダ銀河 (M31)領域を時間軸変動サーベイ

- イントロ: 宇宙ひもと重力レンズ
- 観測: すばるHSCでの探査可能性
- 考察: 宇宙ひもの存在量への制限

# Intro. 宇宙ひも

宇宙ひも: 1次元の位相欠陥。初期宇宙で生成  
(Kibble, Zeldovich, Vilenkin, ...1970-1980's)

## ★ 生成メカニズム

- Phase transition

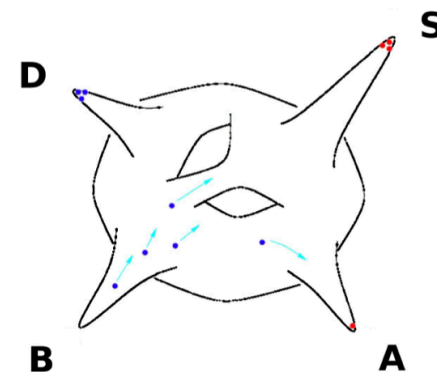
CMB観測により宇宙の構造形成の種となる可能性 ( $G\mu \sim 10^{-6}$ ) は棄却 (COBE, 1990's)

Inflationの間に生成される可能性 (Kibble 2004, Plank, 2013)

- Cosmic superstrings

Dブレーン起源説 etc.

→ ビックバン直後の初期宇宙の情報



Tye & Chernoff 2014

# Intro. 宇宙ひもパラメータと観測的制限

宇宙ひもを記述するパラメータ

- $G\mu$ : tension (= 線密度)
- $p$ : 再結合する確率  
(phase transition:  $p=1$ , cosmic superstring:  $p=10^{-3}-1$ )

観測による探査

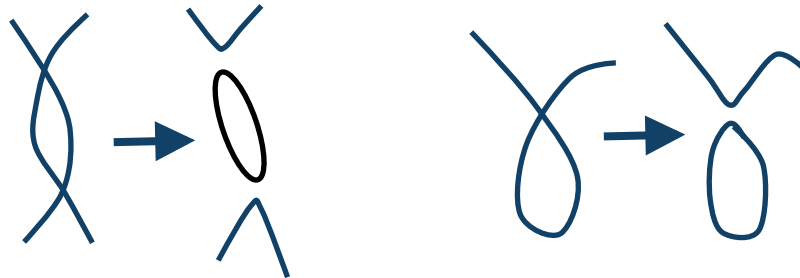
- CMB温度ゆらぎ  $G\mu < \sim 10^{-7}$
- 重力レンズ (infinite string)  $G\mu < \sim 10^{-6}$
- 重力波生成 (pulsar timing, LIGO GWB)  $G\mu < \sim 10^{-9}, 10^{-7}$

→ 宇宙ひもループの重力マイクロレンズ:  $G\mu < \sim 10^{-10}$

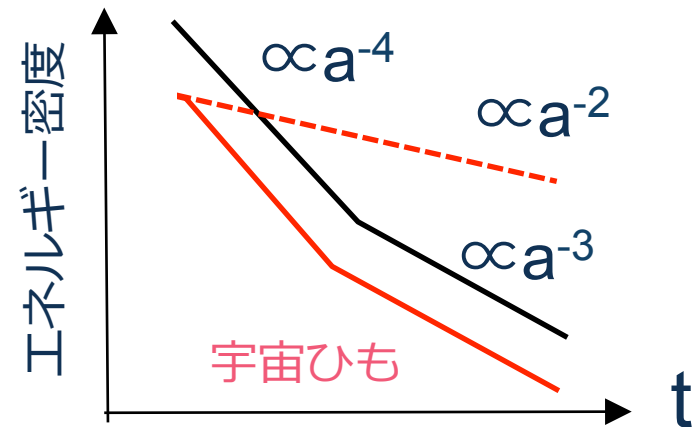
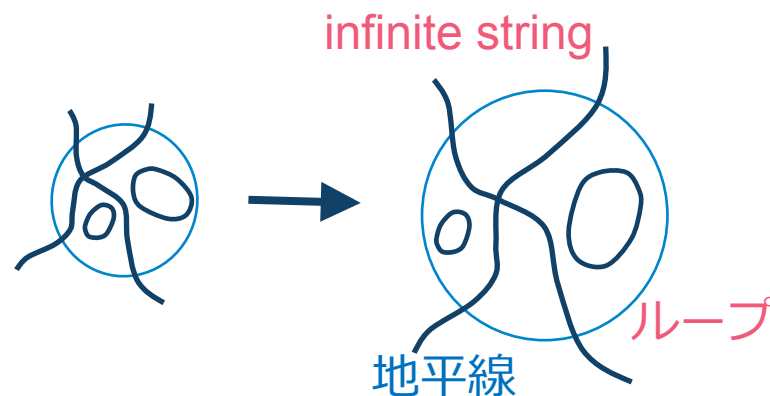


# Intro. 宇宙ひもの進化

- スケーリング則: 再結合してloop生成。
- 重力波生成: ループは振動してエネルギー減少



- 自己相似的な進化を示し、宇宙の地平線内に常に $O(0-10)$ 個の長いひもが存在 (Vilenkin et al. 2000)



# Intro. 宇宙ひもループの性質

- ループの長さ  $l_g = \Gamma_R G \mu t_{\text{today}} = 41 \text{pc} \left( \frac{\Gamma_R G \mu}{10^{-8}} \right) \left( \frac{t_{\text{today}}}{13.5 \text{Gyr}} \right)$  (最小長)

$$l(t, t_i) = \underbrace{\alpha t_i}_{\text{初期長}} - \underbrace{\Gamma G \mu (t - t_i)}_{\text{重力波放出}}$$

- 典型的な質量

$$M_g = 1.7 \times 10^5 \odot \left( \frac{G \mu}{2 \times 10^{-10}} \right) \left( \frac{\Gamma_R}{50} \right)$$

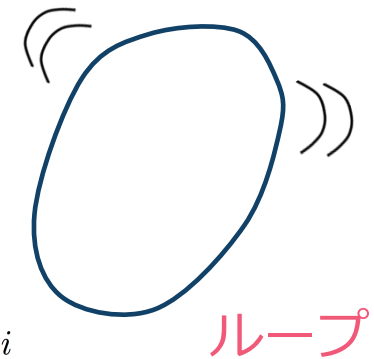
- ループの寿命

$$\frac{\text{(initial loop energy)}}{\text{(energy release per time)}} = \frac{\mu \alpha t_i}{\Gamma G \mu^2} = \frac{\alpha t_i}{\Gamma G \mu}$$

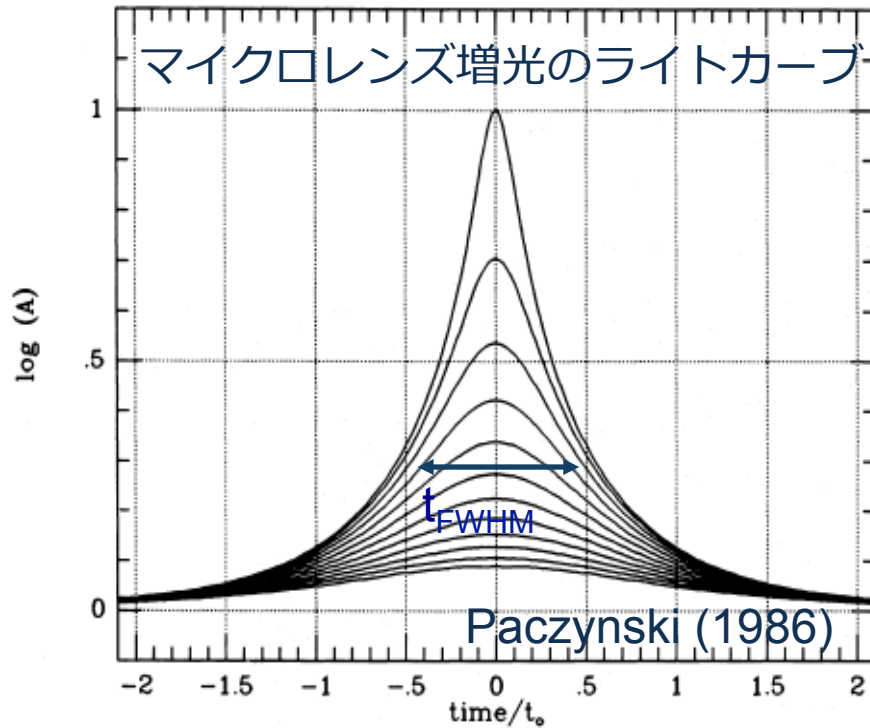
- 存在比

ex.  $\frac{\Omega_{\text{long}}}{\Omega_{\text{loop}}} = 4.4 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{G \mu}{10^{-10}}}$  Olum et al. (2006)

小さいtensionでは **ループ** >> infinite strings



# Intro. 重カレンズマイクロレンズ効果



## 点源によるマイクロレンズ増光

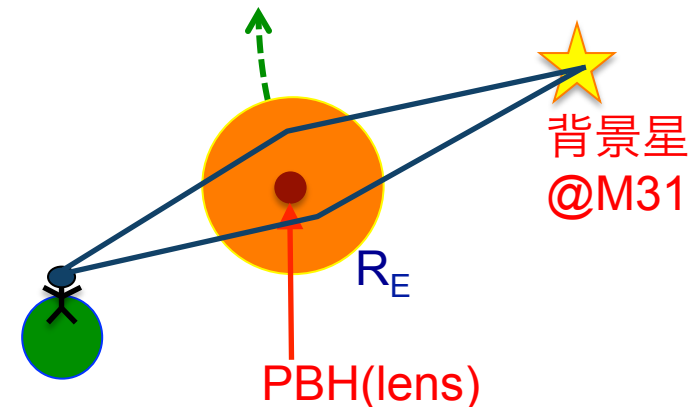
- タイムスケールはMACHO( $1M_{\text{sun}}$ )だと典型的に数ヶ月、PBH ( $10^{-7}M_{\text{sun}}$ )は1時間もありうる
- たくさん背景星がある領域でレートが高くなることが期待される

## タイムスケール

$$t_0 = \frac{R_E}{v} \simeq 1.6 \text{hours} \left( \frac{M}{10^{-7}M_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{x D_s}{100 \text{kpc}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{220 \text{km/sec}}{v} \right)$$

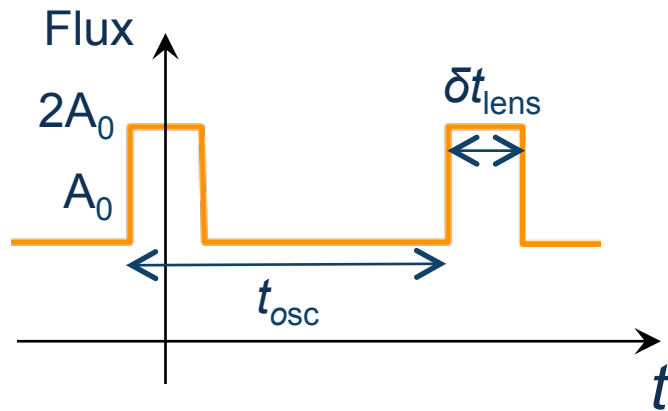
$t_{\text{FWHM}}$  : イベントのタイムスケール

$\beta (=d/R_E)$  : インパクトパラメータ



# 宇宙ひもによるマイクロレンズ効果

マイクロレンズ増光のライトカーブ



宇宙ひもループによる増光

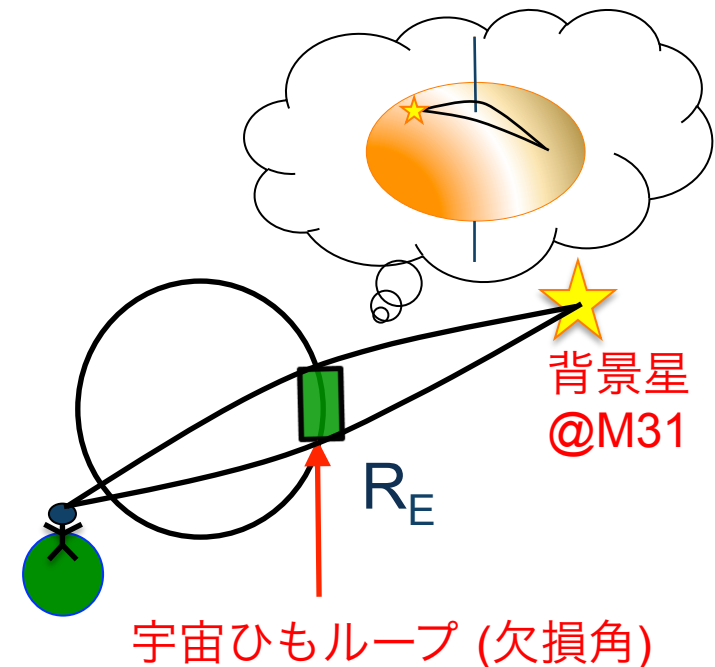
- ひもの欠損角により空間が変形  
2つ像が出来るため増光率は2倍
- 振動により反復的な増光を生じる

増光タイムスケール

$$\delta t_{\text{lens}} = \frac{R\theta_E}{c} = 6.3 \times 10^3 \text{sec} \left( \frac{R}{100 \text{kpc}} \right) \left( \frac{G\mu}{2 \times 10^{-10}} \right)$$

反復周期 (>> 増光タイムスケール)

$$t_{\text{osc}} \sim \frac{l_g}{c} \sim 135 \text{yrs} \left( \frac{\Gamma_R G\mu}{10^{-8}} \right)$$



# モデル: M31観測でのマイクロレンズ増光

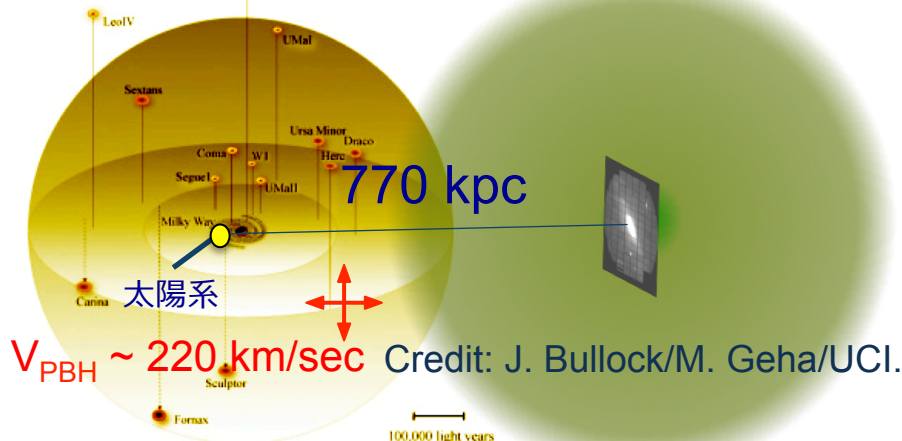
宇宙ひも分布  $\propto$  ダークマター分布

- MWおよびM31銀河ハローの質量プロファイル (Klypin 2002) に伴う overdensity (Tye & Chernoff 2014)

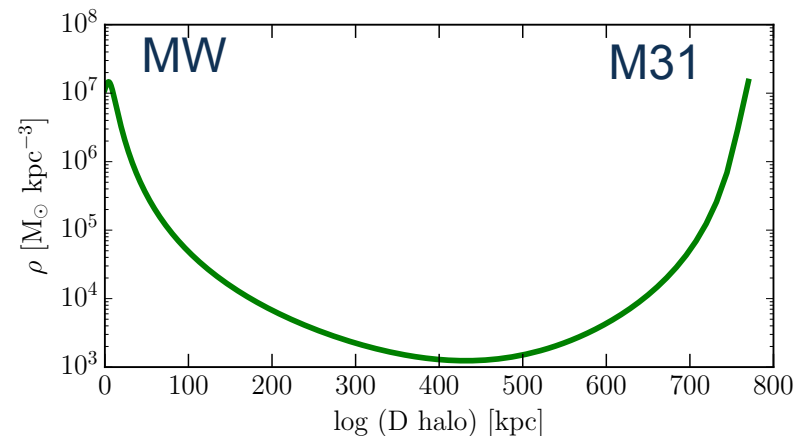
$$\left(\frac{dn}{dl}\right)_{\text{local}}(\vec{r}) = \mathcal{F}(\vec{r}) \left(\frac{dn}{dl}\right)_{\text{homog}} = \mathcal{F}(\vec{r}) \mathcal{G} \left(\frac{dn}{dl}\right)_{\text{baseline}}$$

DMプロファイル依存性      再結合確率依存のenhancement  
 $10^2-10^6$  for  $p=10^{-1}-10^{-3}$

銀河ハロー = ダークマター領域  
 Milky Way(MW)      M31



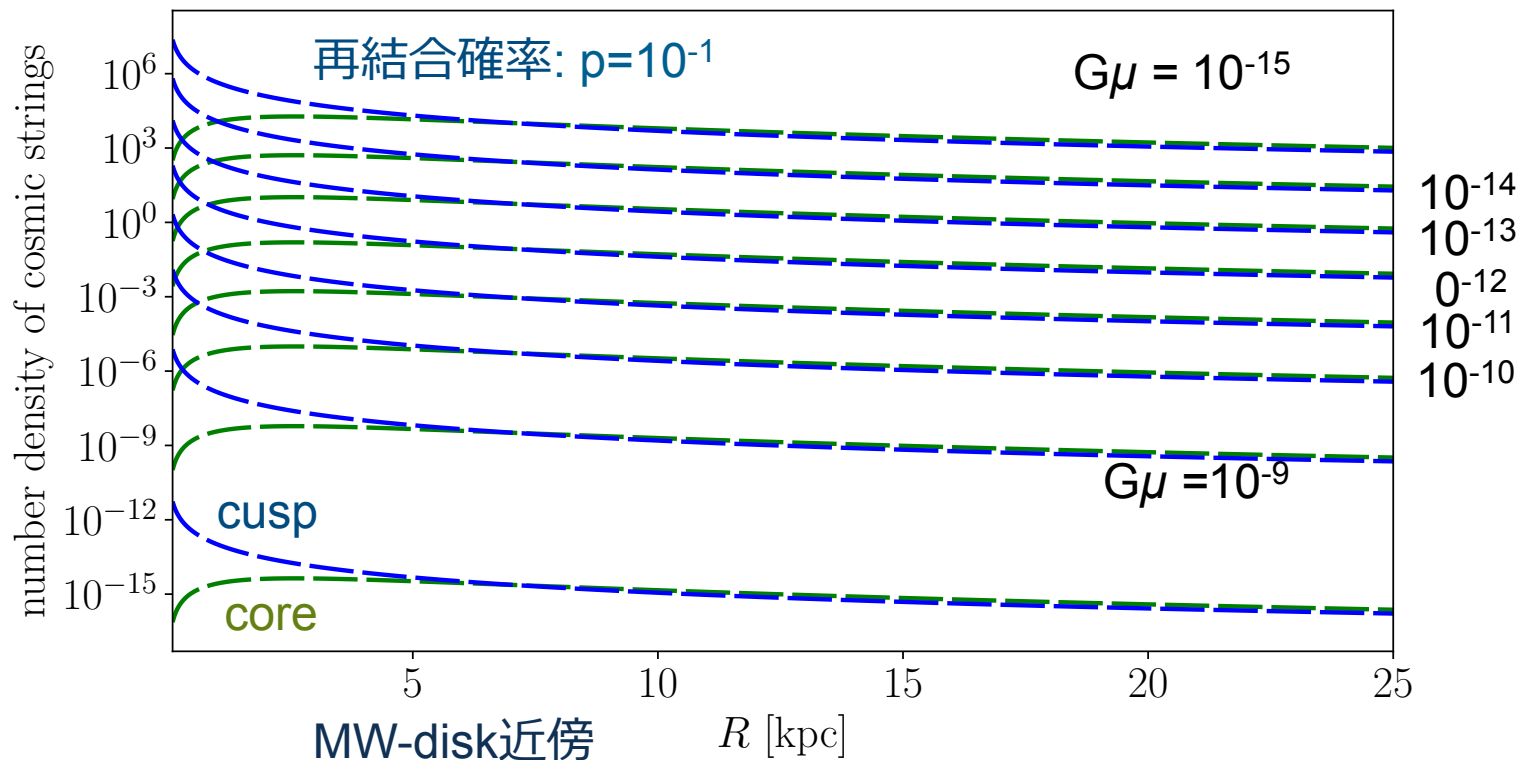
密度プロファイル



# モデル: 宇宙ひもの数密度

ループの数密度:  $\bar{n} = \frac{\rho_{loop}}{\mu l_g} = \int dl \frac{dn}{dl} \frac{l}{l_g} \propto \mu_{-13}^{-3/2} 10^{(-2\log_{10}(p))}$

tension ( $G\mu$ ) が小さいほど、再結合確率 ( $p$ ) が小さいほど数密度が高くなる (Chernoff & Tye 2014)

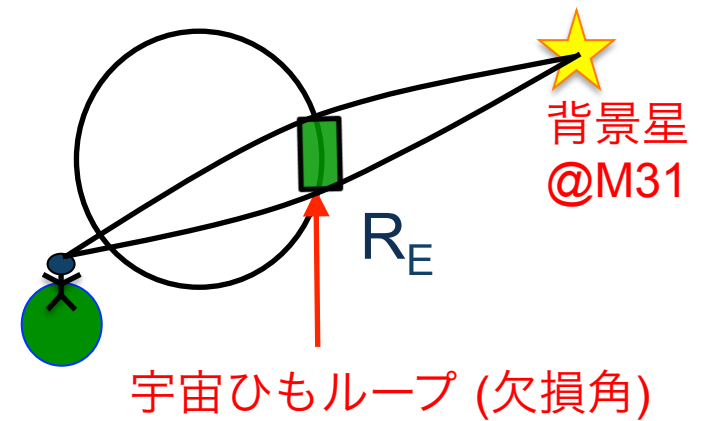
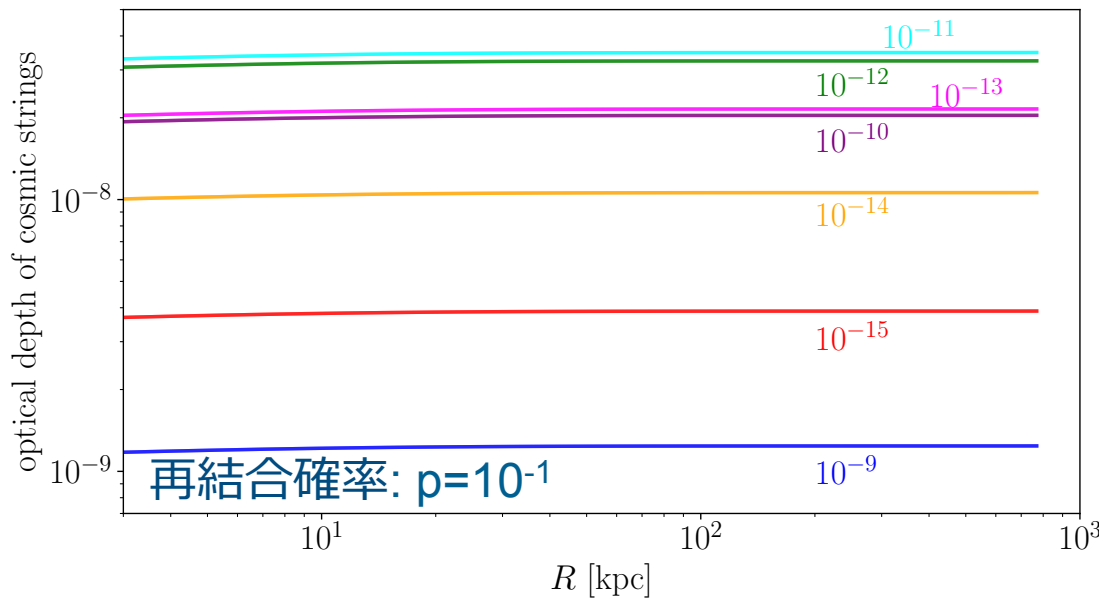


# 宇宙ひもマイクロレンズのoptical depth

Optical depth: アンドロメダ銀河の星 (770kpc) 1個が手前のループのアインシュタイン半径に入る、ある瞬間での確率

$$\tau = \int_0^{D_s} dr \int_{l_g}^{\infty} dl l \left( \frac{dn}{dl} \right) \times R_E \times 2$$

数密度                      cross section



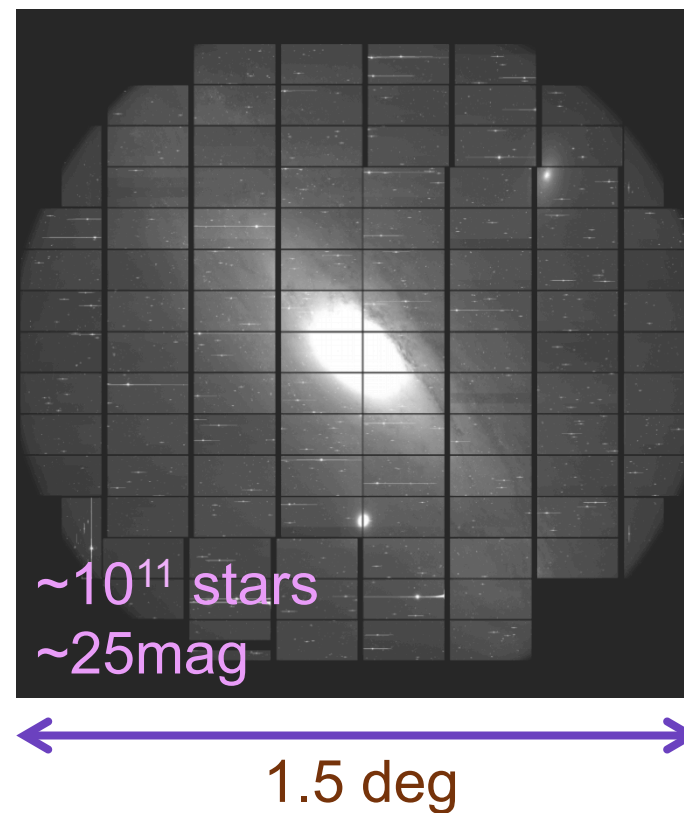
10<sup>8</sup>個の星を観測するとO(1)個受かる可能性

## Observation: M31-disk周りの宇宙ひも探査

---

### すばるHyper Suprime-Cam (HSC)による広視野探査

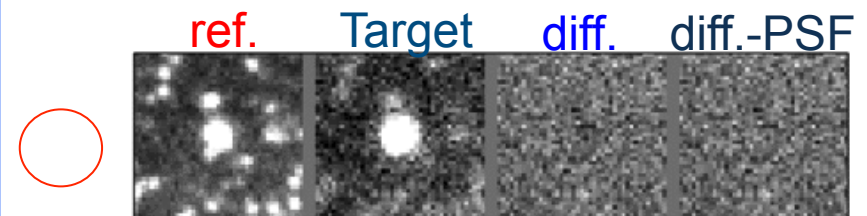
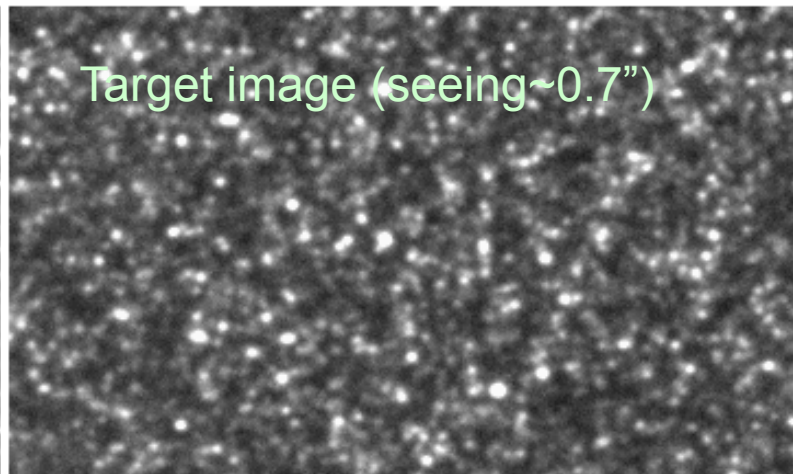
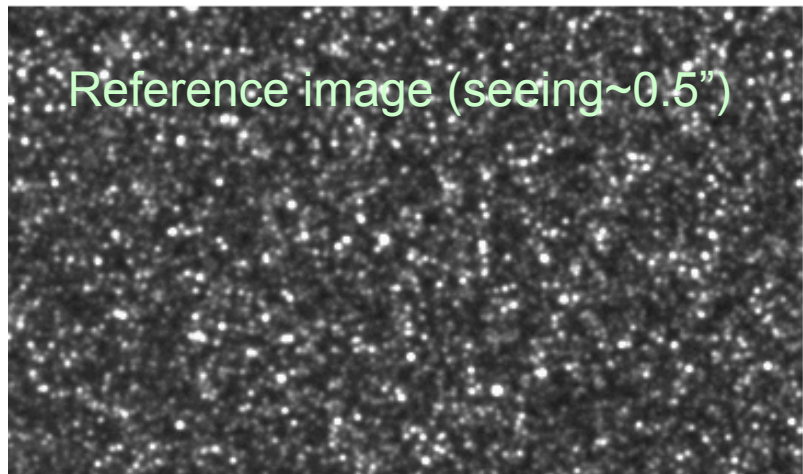
- 1視野でM31のディスクとバルジの全体をカバー。
- 高解像度で深い画像を活かして統計的な宇宙ひも探査を初めて達成
- アンドロメダ銀河(M31)領域で、2分間隔で7時間分のデータ取得 (r-band)



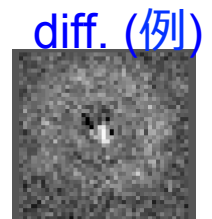


# Analysis: 変光天体の検出 (差分画像法)

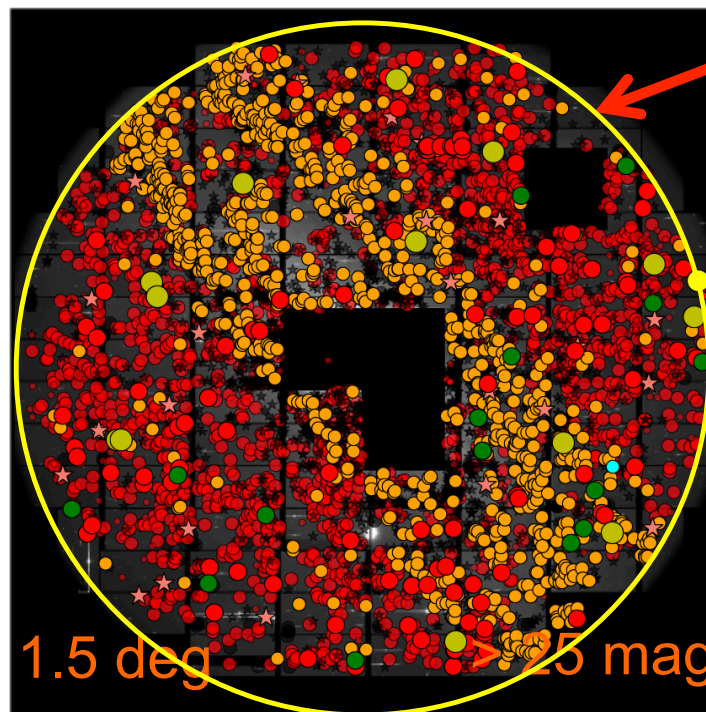
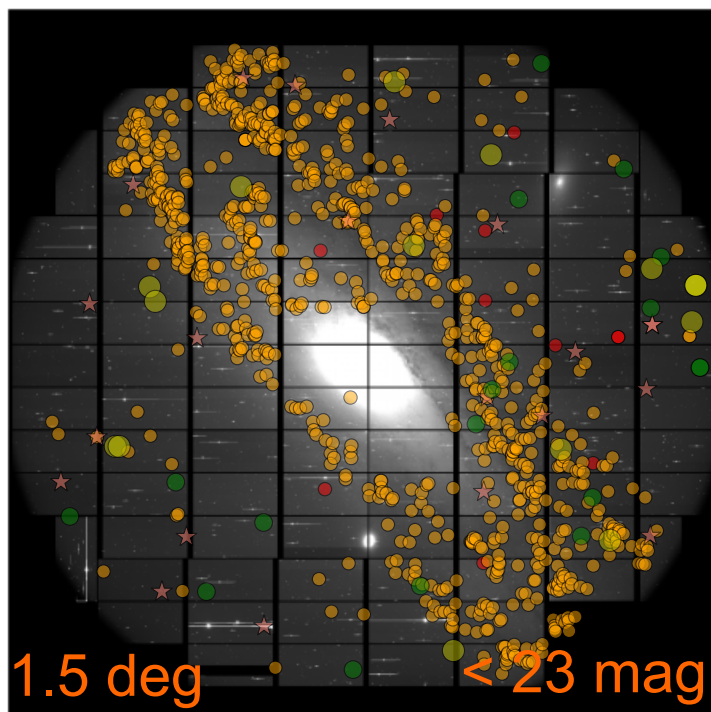
Pixel lensing regime: M31領域では各pixelに $O(100)$ の星



ピクセルサイズの天体  
歪んだ天体  
Fluxが星らしくない天体



# Analysis: M31-disk周りの変光天体の分布

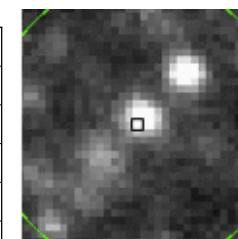
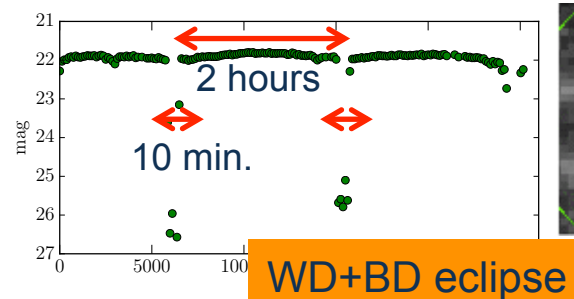
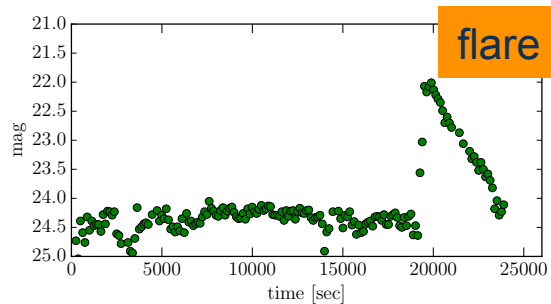
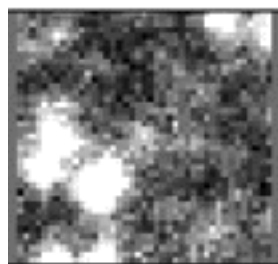


HSC-M31 focal plane

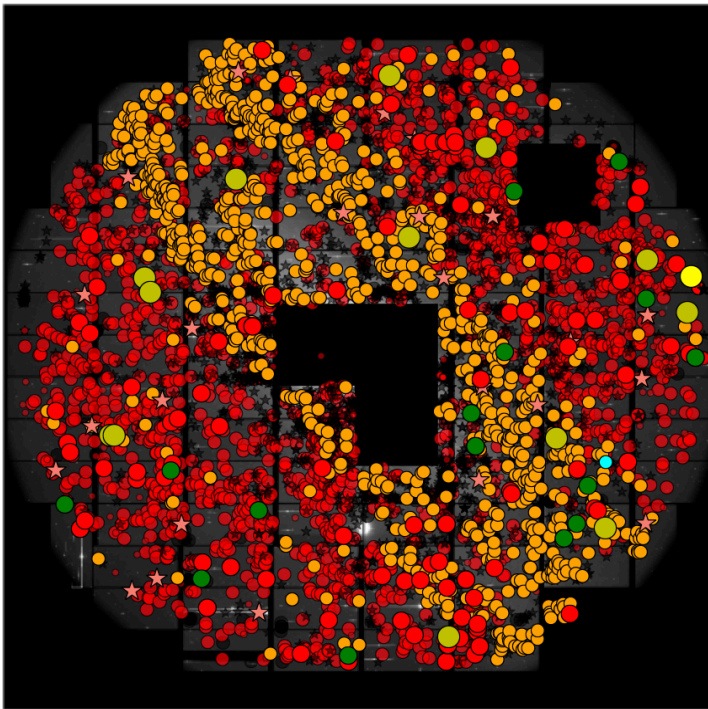
More than 10,000 transient candidates in one field-of-view of HSC.

(6 min<sup>-1</sup>)

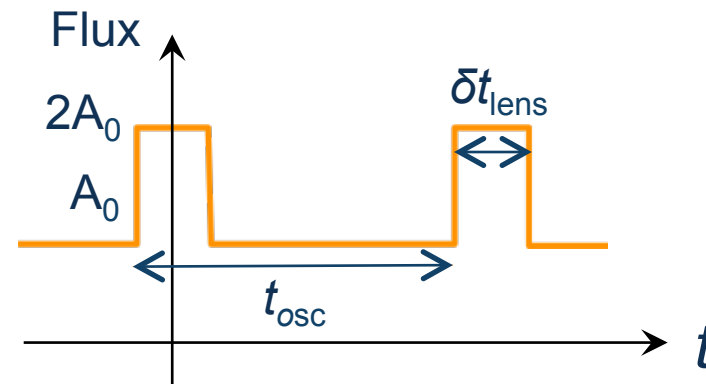
- flare (incl. RR-Lyrae)
- Cepheid variable
- asteroid
- ★ stellar flare
- eclipsing binary
- contact binary



# Analysis: 宇宙ひもマイクロレンズの探査



HSC-M31の観測でtop-hat型の  
ライトカーブを探査



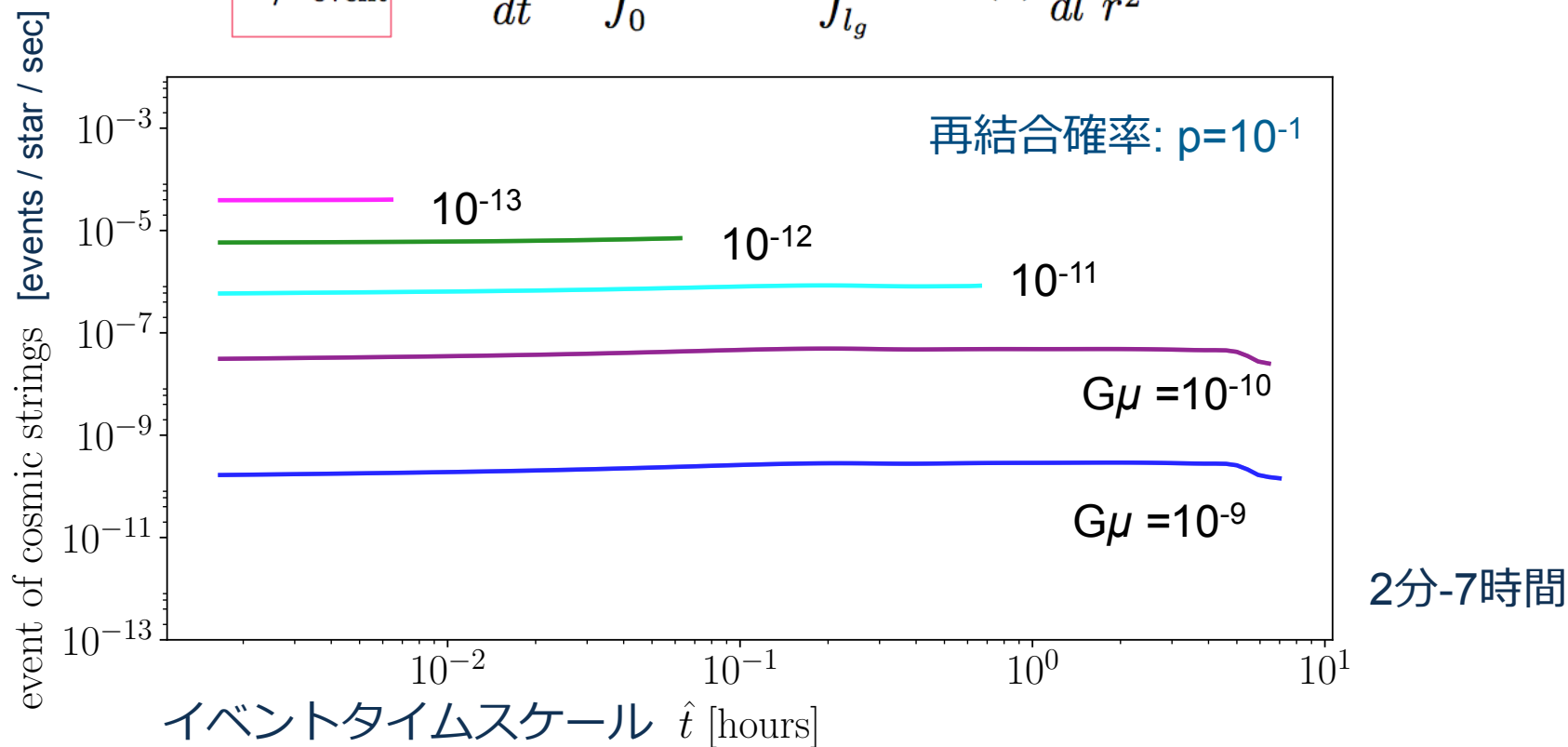
タイムスケール:  $\delta t_{\text{lens}} = \frac{R\theta_E}{c} = 6.3 \times 10^3 \text{sec} \left( \frac{R}{100 \text{kpc}} \right) \left( \frac{G\mu}{2 \times 10^{-10}} \right)$

2分–3時間のイベントに感度 (反復性はなし)

今のところマイクロレンズイベントは0個と仮定 (analysis ongoing...)

# 考察：宇宙ひもマイクロレンズのイベントレート

$$\tau / \hat{t}_{\text{event}} \sim \frac{d\Gamma}{d\hat{t}} = \int_0^{d_{\text{lens}}} r^2 dr \int_{l_g}^{r_H} \mathcal{G}\mathcal{F}(r) \frac{dn}{dl} \frac{cl}{r^2} dl$$



- MW-M31間 (-770kpc) に宇宙ひもが存在する条件
- M31の1つの星を観測したときに、あるタイムスケールのイベントが単位時間あたりに受かるレート (M31では $10^8$ 個の星を観測)

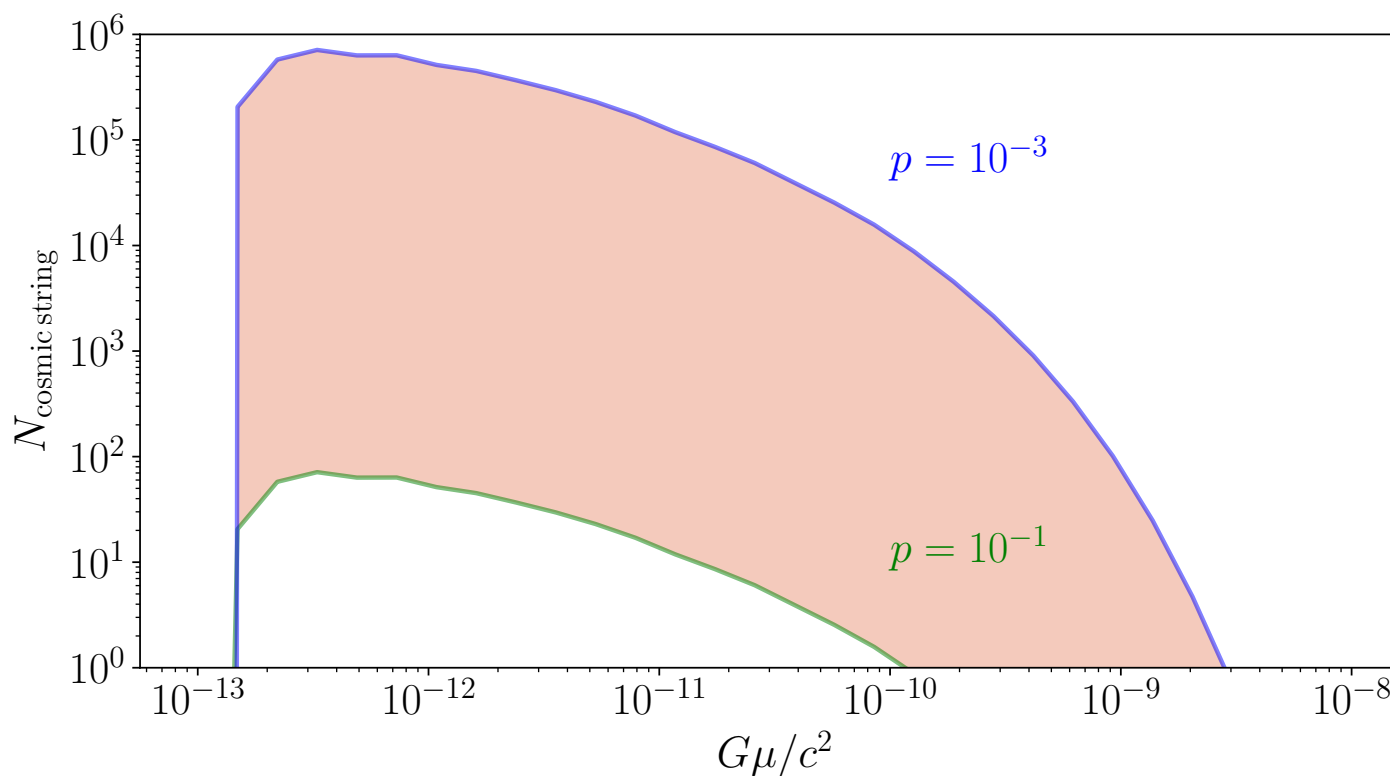
# 考察: 宇宙ひもマイクロレンズイベントの期待値

$$N_{\text{exp}}(M) = E \int_0^{\infty} \frac{d\Gamma}{d\hat{t}}(\hat{t}, M) \epsilon(\hat{t}) d\hat{t}$$

M31領域内の星の数  
× 観測時間[7 hours]

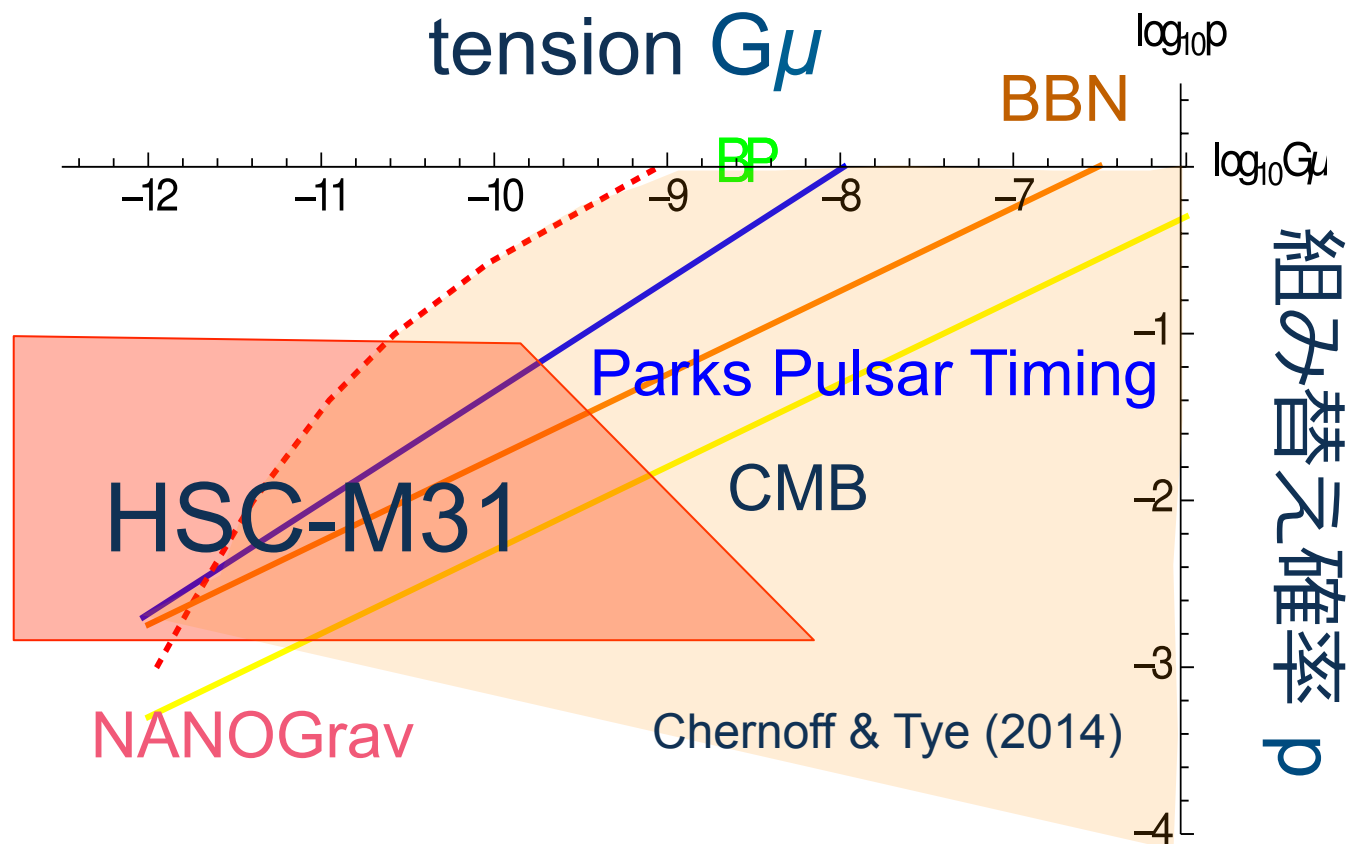
イベントレート

検出効率



$G\mu = 10^{-13}$ - $10^{-9}$  の宇宙ひもへの感度！

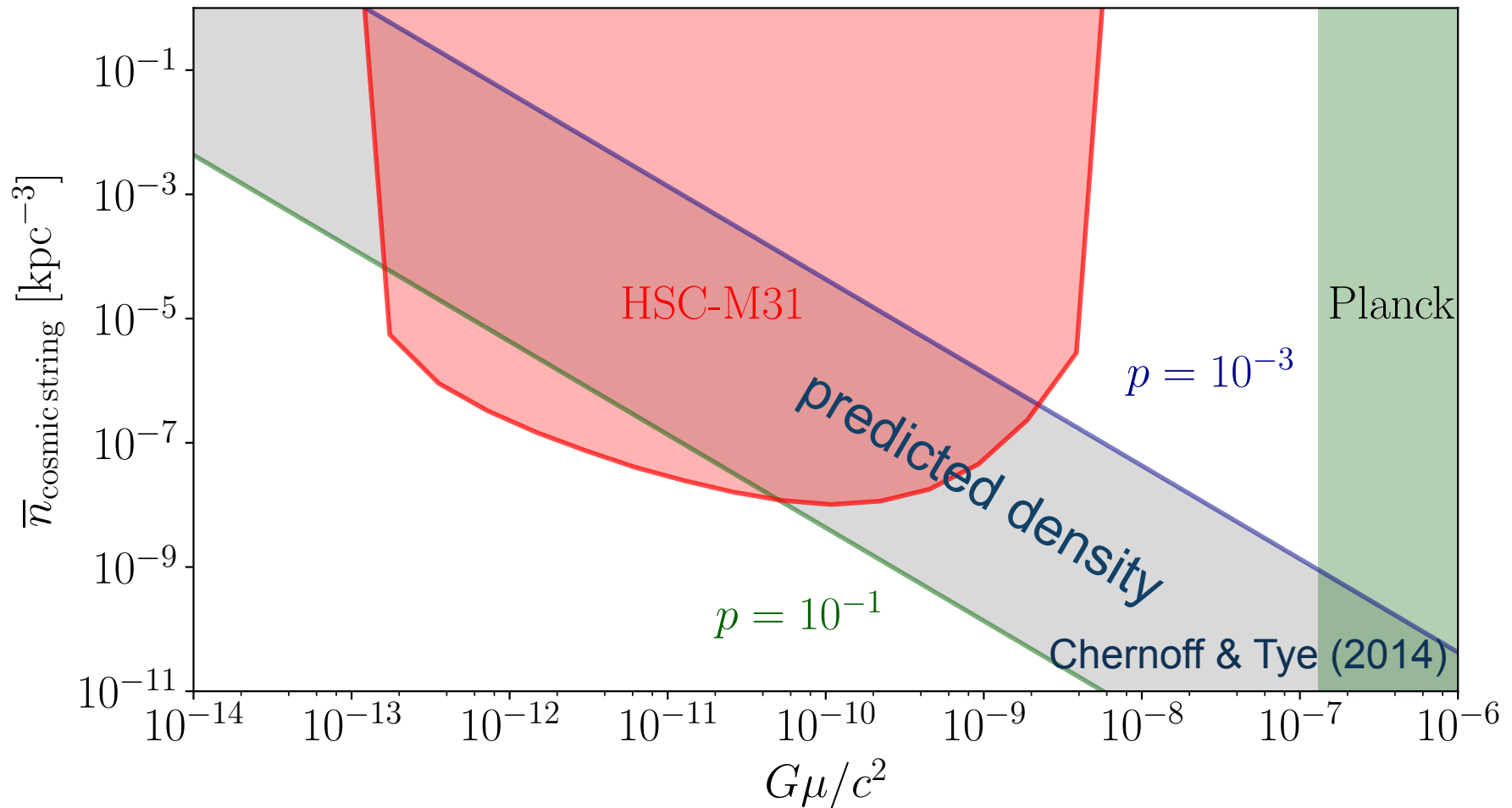
# Prediction: 宇宙ひもパラメータへの制限



宇宙ひもの観測に対する新たな制限の可能性！

# Prediction: 宇宙ひもの数密度への制限

$$\bar{n}_{\text{cosmic string}} = \int_1^{r_{\text{H}}} dx \boxed{1.15 \times 10^{-6}} \frac{x}{(1+x)^{5/2}} \mu_{-13}^{-3/2} \times \underline{\underline{\mathcal{G}}} \times \mathcal{F}(z)$$



宇宙ひもの観測に対する新たな制限の可能性！



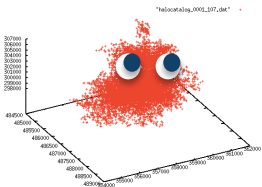
## まとめ

- 宇宙ひもマイクロレンズ効果の観測可能性の検証
- 広視野カメラHSCによるM31観測でのマイクロレンズイベントの期待値の見積もりから、**tensionが $G\mu = 10^{-13}$ - $10^{-9}$ 程度のsuperstring起源 ( $p = 10^{-3}$ - $10^{-1}$ ) の宇宙ひもの存在量に対して初めて観測的制限を得た**



## Future works :

- HSC-M31データでの詳細なイベント探査



ご清聴ありがとうございました!