

Independent discoveries of a tidally disrupting dwarf galaxy around NGC 253

“A Tidally Disrupting Dwarf Galaxy in the Halo of NGC 253”

Toloba, E. et al. 2016, ApJL, 816, L5 (hereafter **TI6**, accepted 2015.12.07)

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016ApJ...816L...5T>)

“Satellite accretion in action: a tidally disrupting dwarf spheroidal around the nearby spiral galaxy NGC 253”

Romanowsky, A. J. et al. 2016, MNRAS, 457, L103 (hereafter **RI6**, accepted 2015.12.20)

(<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.457L.103R>)

Journal Club 2016.07.08.

Ryo Ando (IoA, UTokyo)

ABSTRACT (T16)

We report the discovery of Scl-MM-Dw2, a new dwarf galaxy at a projected separation of ~ 50 kpc from NGC 253, as part of the Panoramic Imaging Survey of Centaurus and Sculptor project (PISCeS). We measure a tip of the red giant branch (RGB) distance of 3.12 ± 0.30 Mpc, suggesting that Scl-MM-Dw2 is likely a satellite of NGC 253. We qualitatively compare the distribution of RGB stars in the color–magnitude diagram with theoretical isochrones and find that it is consistent with an old, ~ 12 Gyr, and metal-poor, $-2.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.1$, stellar population. We also detect a small number of asymptotic giant branch stars consistent with a metal-poor 2–3 Gyr population in the center of the dwarf. Our non-detection of HI in a deep Green Bank Telescope spectrum implies a gas fraction $M_{\text{HI}}/L_V < 0.02 M_{\odot}/L_{\odot}$. The stellar and gaseous properties of Scl-MM-Dw2 suggest that it is a dwarf spheroidal galaxy. Scl-MM-Dw2 has a luminosity of $M_V = -12.1 \pm 0.5$ mag and a half-light radius of $r_h = 2.94 \pm 0.46$ kpc, which makes it moderately larger than dwarf galaxies in the Local Group of the same luminosity. However, Scl-MM-Dw2 is very elongated ($\epsilon = 0.66 \pm 0.06$), and it has an extremely low surface brightness ($\mu_{0,V} = 27.7 \pm 0.6$ mag arcsec $^{-2}$). Its elongation and diffuseness make it an outlier in the ellipticity–luminosity and surface brightness–luminosity scaling relations. These properties suggest that this dwarf is being tidally disrupted by NGC 253.

ABSTRACT (R16)

We report the discovery of NGC 253-dw2, a dwarf spheroidal (dSph) galaxy candidate undergoing tidal disruption around a nearby spiral galaxy, NGC 253 in the Sculptor group: the first such event identified beyond the Local Group. The dwarf was found using small-aperture amateur telescopes, and followed up with Suprime-Cam on the 8 m Subaru Telescope in order to resolve its brightest stars. Using g - and R_c -band photometry, we detect a red giant branch consistent with an old, metal-poor stellar population at a distance of ~ 3.5 Mpc. From the distribution of likely member stars, we infer a highly elongated shape with a semimajor axis half-light radius of (2 ± 0.4) kpc. Star counts also yield a luminosity estimate of $\sim 2 \times 10^6 L_{\odot,V}$ ($M_V \sim -10.7$). The morphological properties of NGC 253-dw2 mark it as distinct from normal dSphs and imply ongoing disruption at a projected distance of ~ 50 kpc from the main galaxy. Our observations support the hierarchical paradigm wherein massive galaxies continuously accrete less massive ones, and provide a new case study for dSph infall and dissolution dynamics. We also note the continued efficacy of small telescopes for making big discoveries.

Introduction

- Λ CDM model — **銀河の階層的形成**を支持
 - 小さな銀河が集まり、ダークマターハローが合体していくことにより、大きな銀河が形成される
 - **Halo substructure** (多様な形状の矮小銀河や stellar streams) が存在するはず
- Local Group や系外銀河の**伴銀河 (矮小銀河)** の観測とモデルとの比較が重要
 - e.g. M81, NGC3109, M101; 多数の伴銀河 (矮小銀河) の発見
 - ⇔ サンプル数は不足
 - Milky Way の伴銀河は random infall での予想より少ない
 - 銀河形成モデルに修正の必要性?
- 矮小銀河の検出方法
 - 近傍銀河の low-surface brightness imaging + resolved stellar maps
 - 小口径 (10 - 50 cm) 望遠鏡 + 市販の最新CCDカメラによる撮像

Discovery of Scl-MM-Dw2 (T16)

- **PISCeS Survey**

(Panoramic Imaging Survey of Centaurus and Sclptor)

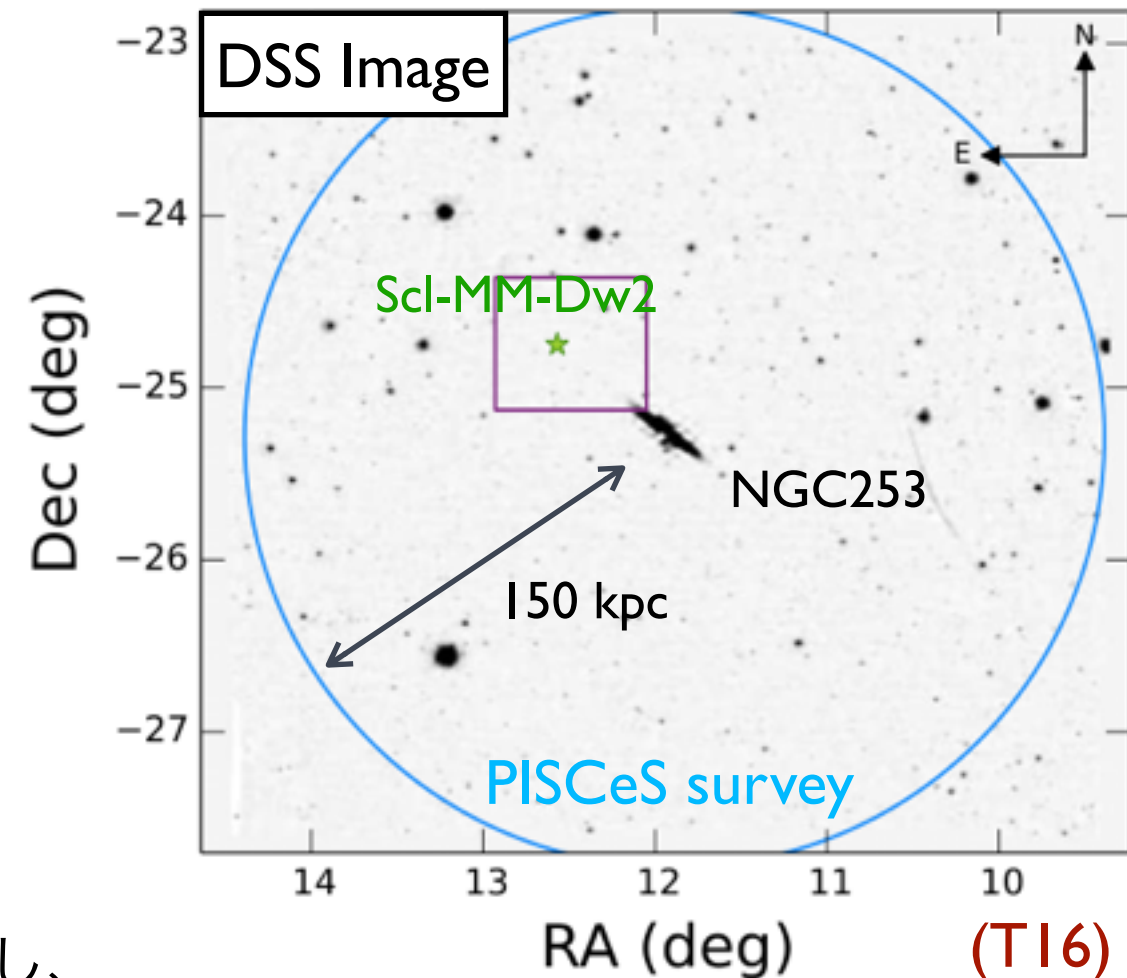
- **Magellan Clay 6.5 m Telescope** (Las Campanas)
- **Megacam** (FoV: 24' x 24' / 0".16 pixel)
- Observation: 2011 - 2014
- PSF: 0".65 - 1".0
- g & r band, 6 x 300 s — 26 - 27 mag

- **矮小銀河の検出**

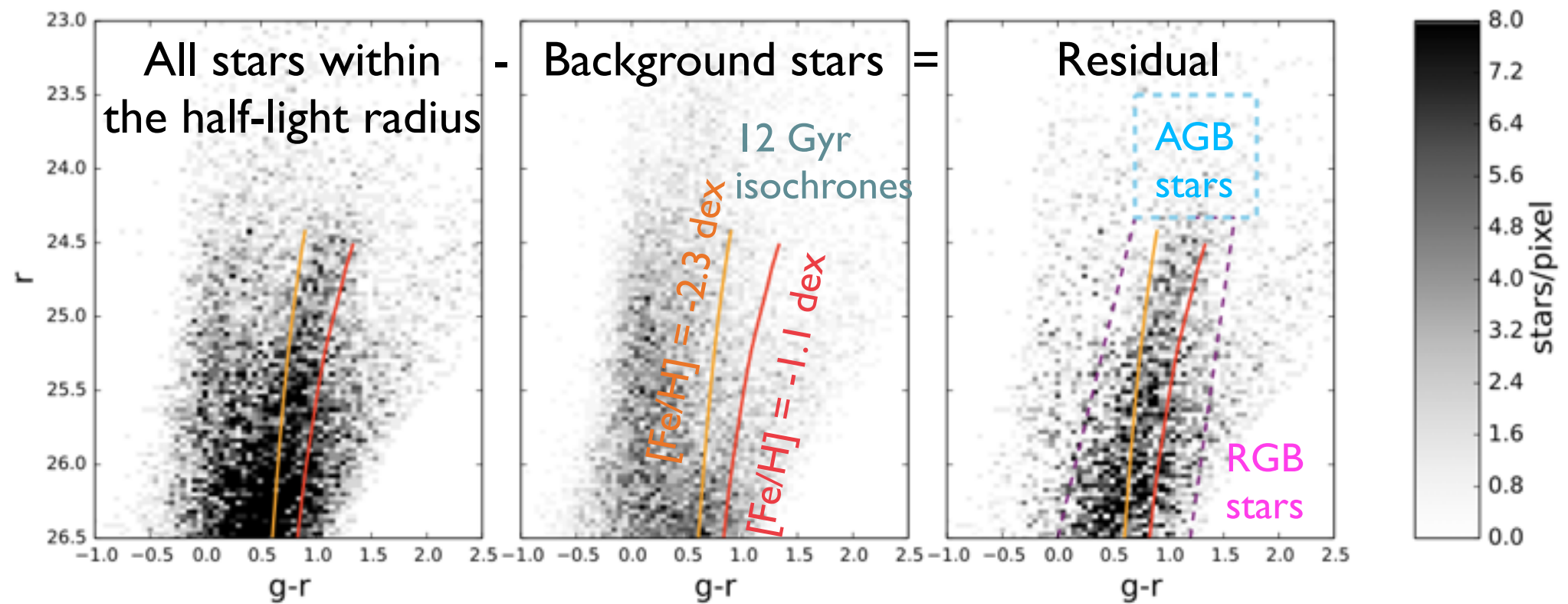
1. 小さな高密度領域 (w/ diffuse light) を目視で探す
2. RGB stellar map を点源の測光カタログから作成し、
NGC 253と同距離にある天体を抽出

- **Scl-MM-Dw2** — 新たに見つかった **NGC 253 の伴銀河**

- NGC 253の北東方向にあり、引き延ばされた形状
- half-light radius より内側の星から**色等級図**を作成
→ background field を引いた差分
(矮小銀河に属する星) を抽出



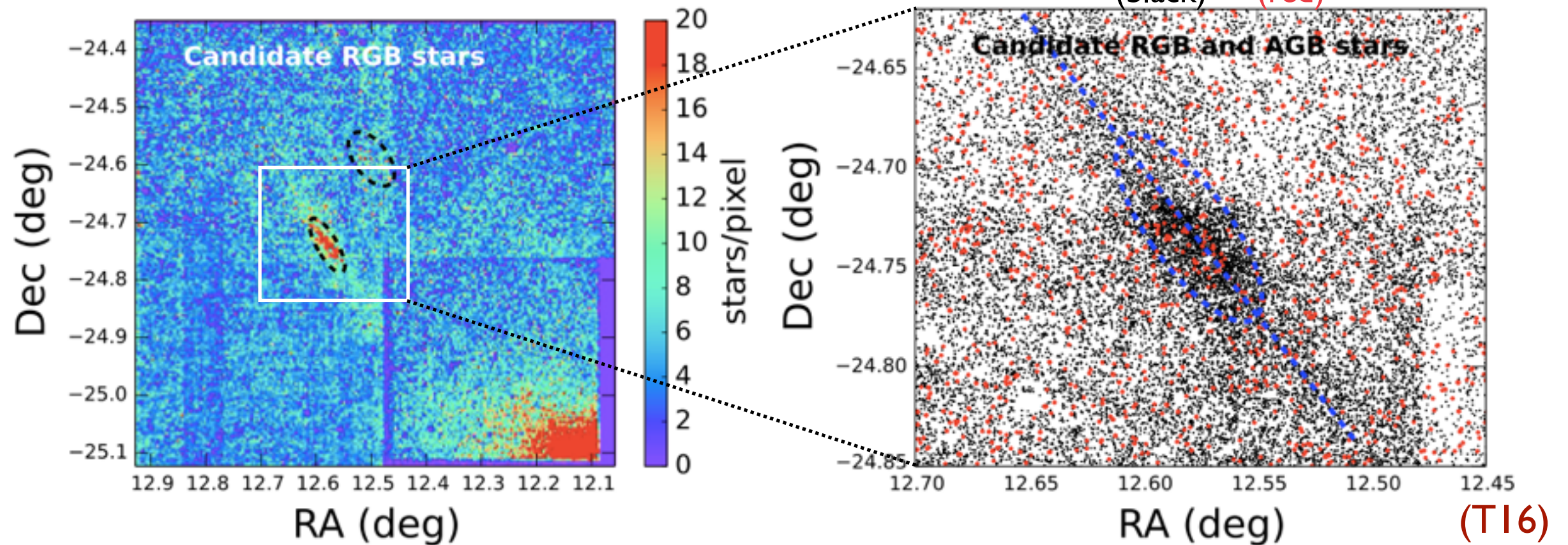
Color-magnitude diagram (T16)



(T16)

- Half-light radius 内の全ての星 - 背景の星 = 矮小銀河に属する星
- Sci-MM-Dw2 までの距離： 3.1 ± 0.2 Mpc (NGC 253と consistent)
 - **TRGB** (Tip of Red Giant Branch) 法
 - 赤色巨星分枝での最高光度 (金属量に依らない) を利用
- CMD (色等級図) 上の isochrone (等時線：同じ年齢の星を結ぶ線)
 - Age = 12 Gyr, $[Fe/H] = -2.3$ dex / -1.1 dex
 - AGB星・RGB星を抽出 → 分布をプロット

Stellar distribution (T16)



- Sci-MM-Dw2 の位置にRGB星が密集
- AGB星/RGB星 の比は、銀河の外側ほど低くなる
 - 若く (2-3 Gyr) 低金属量 ($-2.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.1$) の星 @中心部
 - 年老いた (~ 12 Gyr) 低金属量の星 @全体
- NGC 253 halo を向いた細長い形状
- Total stellar mass $\sim (1.0 \pm 0.4) \times 10^7 M_{\odot}$

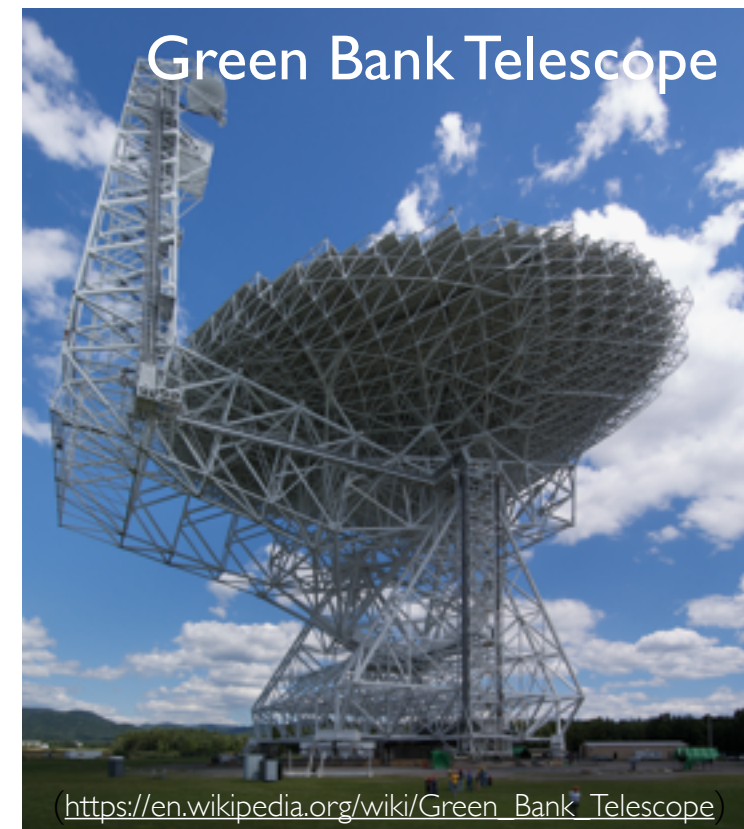
Properties of the dwarf (T16)

- 中性水素ガス観測

- HIPASS (HI Parkes All Sky Survey) data — $\sim 3.7 \sigma$ emission peak?
- GBT (Green Bank Telescope, 100 m) DDT 観測 — **non-detection**
 - HIPASS での detection はノイズか人工的要因に依るもの
 - HI mass 上限値 $\sim 1.2 \times 10^5 M_{\odot}$, gas fraction $M_{\text{HI}}/L_V < 0.02 M_{\odot}/L_{\odot}$
 - 他の矮小銀河と同様に、**gas poor** な銀河

- **Structural parameters**

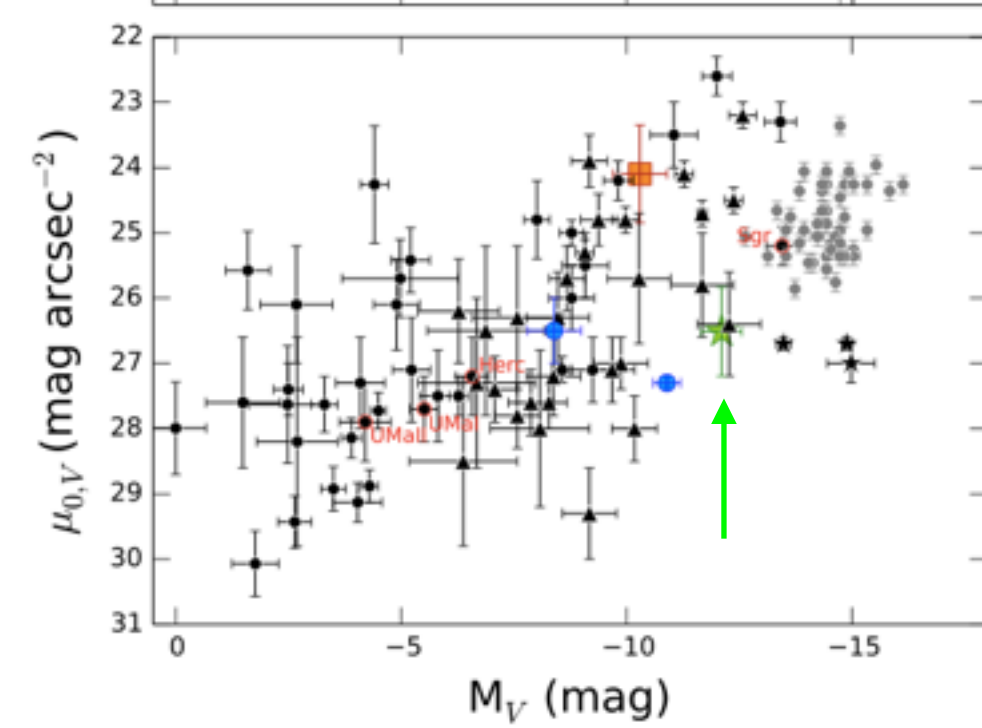
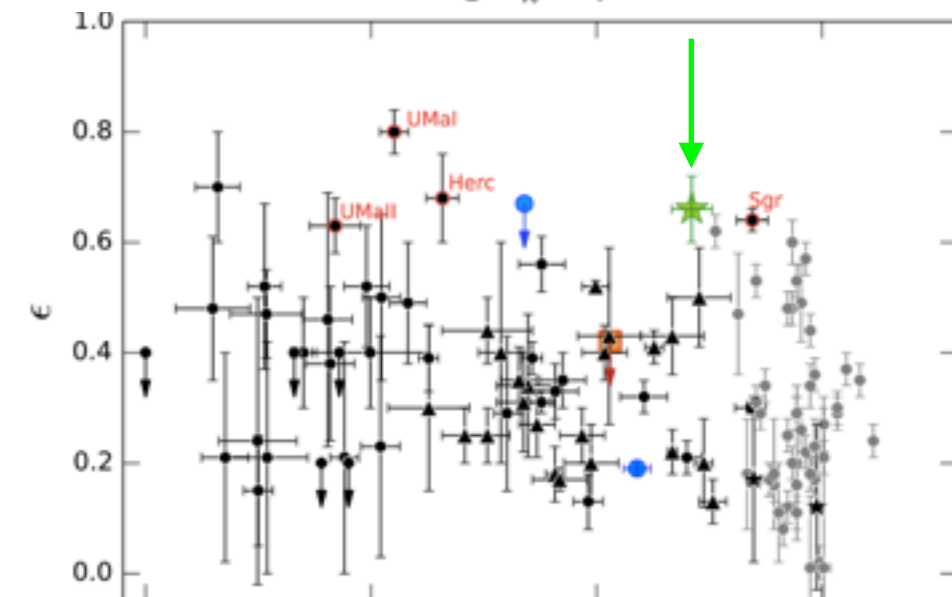
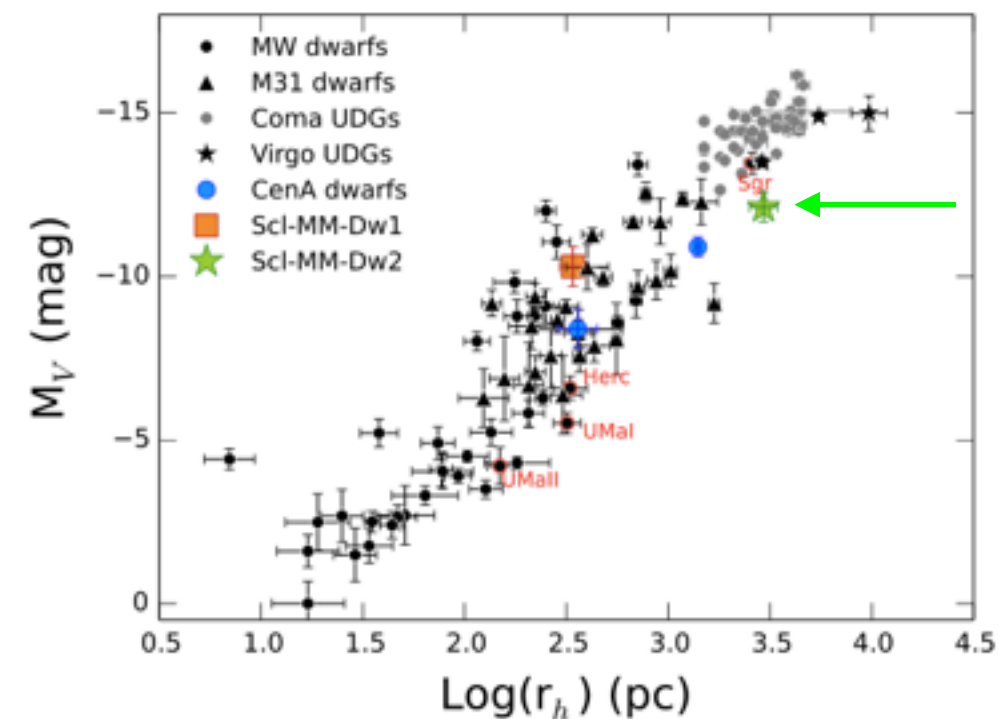
- 全RGB星の分布を指数関数プロファイルでフィッティング
- Free parameters: (RA, DEC), PA, ϵ , r_h , Σ_b
- Large, elongated, very diffuse
- 扁平率 $\epsilon \sim 0.66$ の引き延ばされた形状
 - Sagittarius dwarf と同等
 - **潮汐破壊**を受けている



Parameter	(T16)	Value
R.A. ₀ (hh:mm:ss)		00:50:17.06 $\pm$ 4"00
Decl. ₀ (dd:mm:ss)		−24:44:58.58 $\pm$ 7"30
$m - M$ (mag)		27.47 $\pm$ 0.21
D (Mpc)		3.12 $\pm$ 0.30
M_V (mag)		−12.1 $\pm$ 0.5
r_h (arcmin)		3.24 $\pm$ 0.51
r_h (kpc)		2.94 $\pm$ 0.46
ϵ		0.66 $\pm$ 0.06
PA (N to E; deg)		31.0 $\pm$ 3.3
$\mu_{0,V}$ (mag arcsec ^{−2})		27.7 $\pm$ 0.6
$\langle \mu_{h,V} \rangle$ (mag arcsec ^{−2})		28.8 $\pm$ 0.6
$M_{\star}$ ($M_{\odot}$)		$1.0 \pm 0.4 \times 10^7$
M_{HI} ($M_{\odot}$)		$< 1.2 \times 10^5$
M_{HI}/L_V ($M_{\odot}/L_{\odot}$)		< 0.02

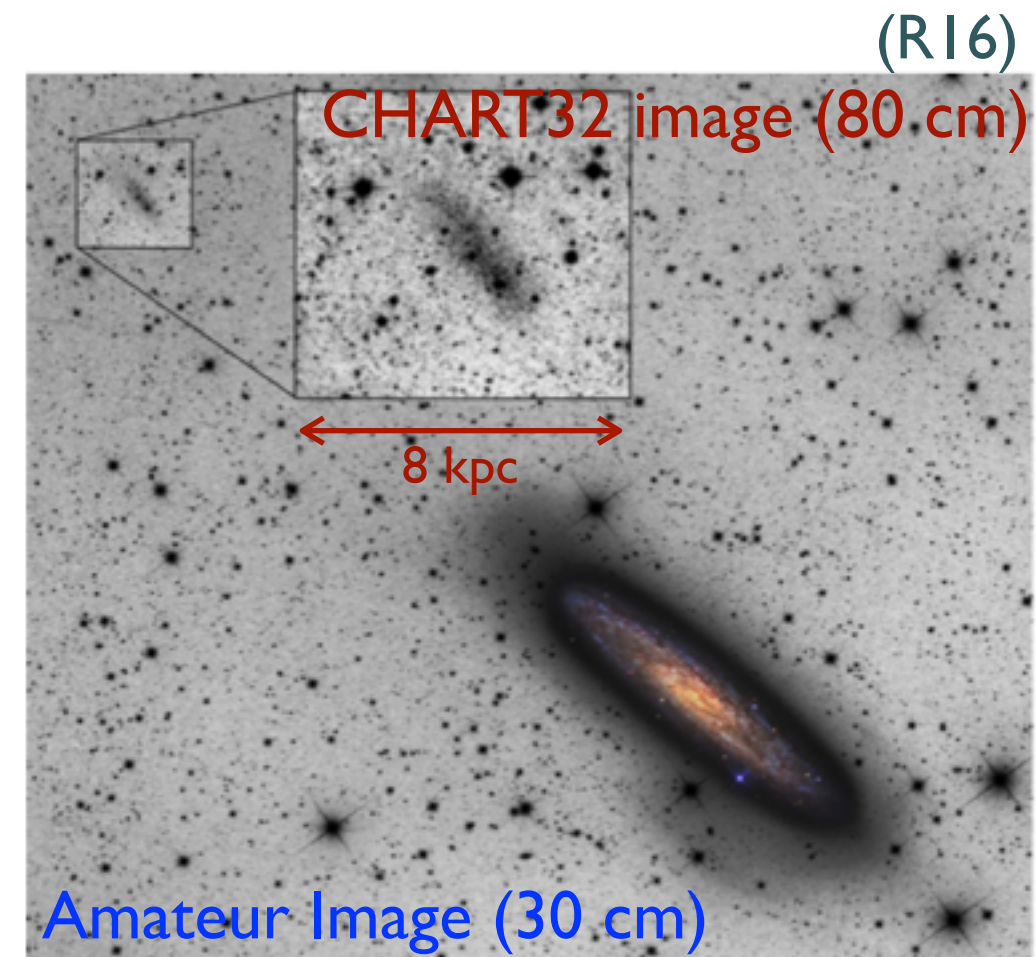
Scaling Relations (T16)

- **Total luminosity** — $M_V = -12.1 \pm 0.5$
 - 半長軸 r_h , 半短軸 $r_h(1-\epsilon)$ の楕円内での aperture photometry から導出 (同領域での背景を差し引き)
- **Luminosity scaling relations** における Scl-MM-Dw2 (同等光度での比較)
 - **Size** — 大半の矮小銀河より**大きい**
 - **Ellipticity** — 非常に**細長い**形状 (潮汐破壊を受けている Sgr dwarf と同等)
 - **Surface brightness** — 特に**表面輝度が低い** (ultra-diffuse galaxies と同程度)
 - **Large, elongated, very diffuse**



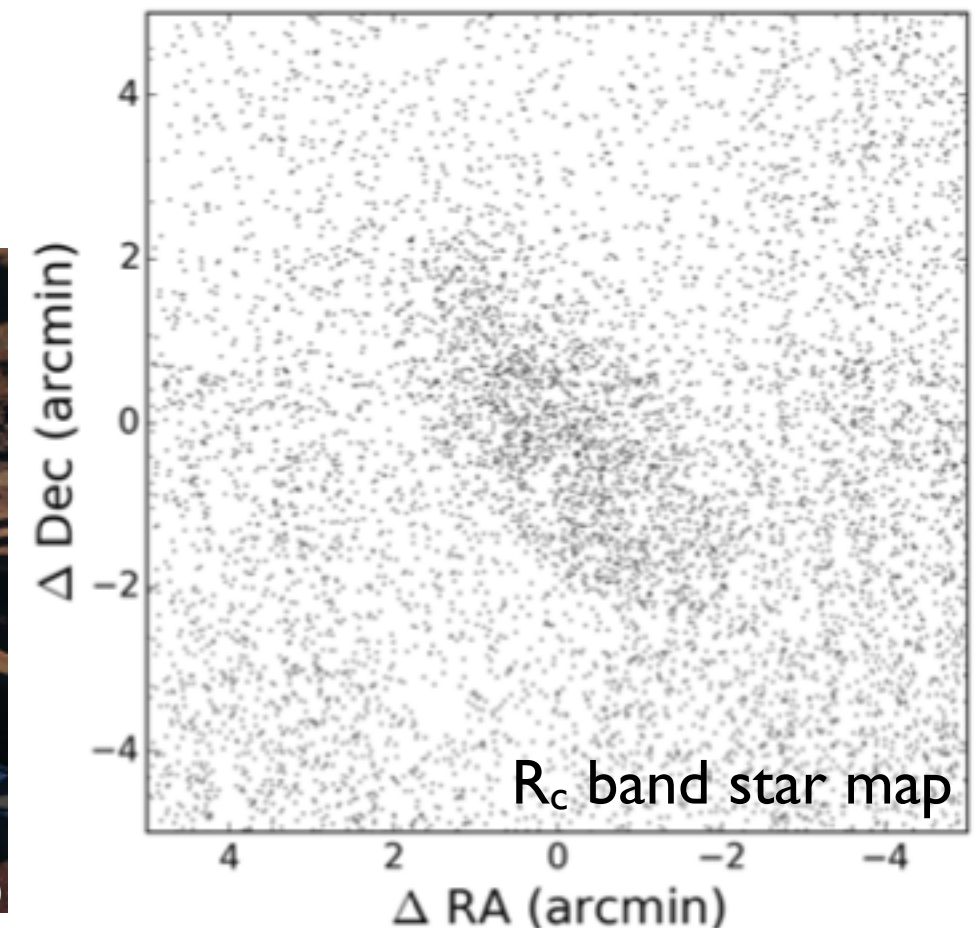
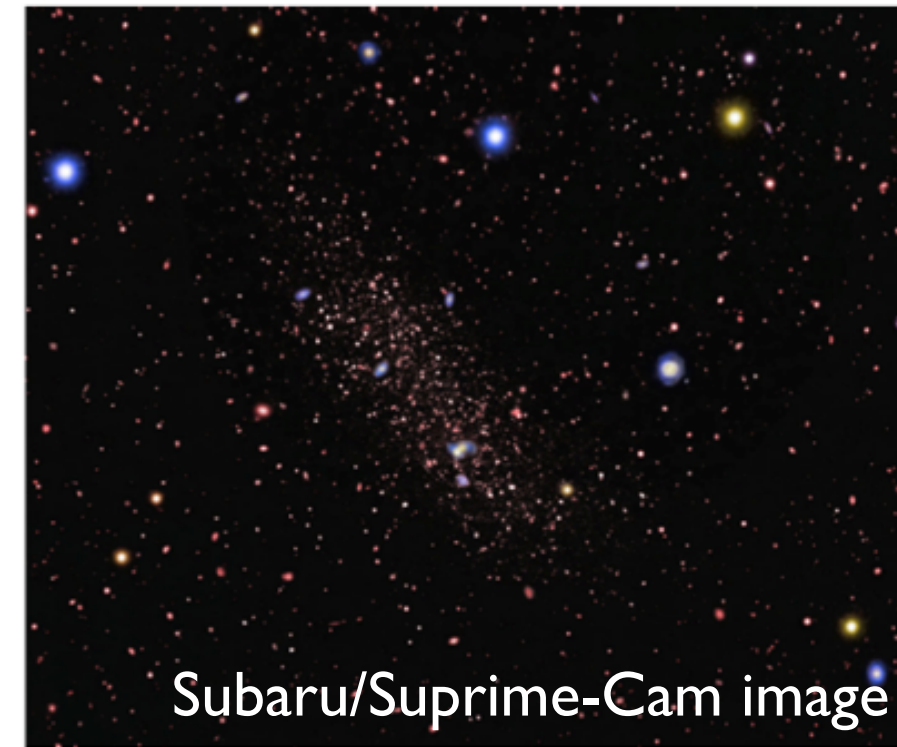
Discovery of NGC 253-dw2 (R16)

- インターネット上のアマチュア写真で発見
 - 口径：18 cm 及び 12 inch (30 cm)
 - 細長い形状が見えたが、real ではない可能性
- 大口径望遠鏡での追観測 (80 cm 鏡 & Subaru 8 m)
 - **CHART32** (Chilean Advanced Robotic Telescope)
 - 80 cm @ Cerro Tololo
 - FoV: 22' x 22' / 0".331 pixel
 - Observation: 2013
 - total exposure: 48000 s
 - **diffuse 矮小楕円銀河 (dSph) に見える**
(ノイズや背景銀河ではない)
 - 細長い形状のため、
Galactic cirrus の可能性もある



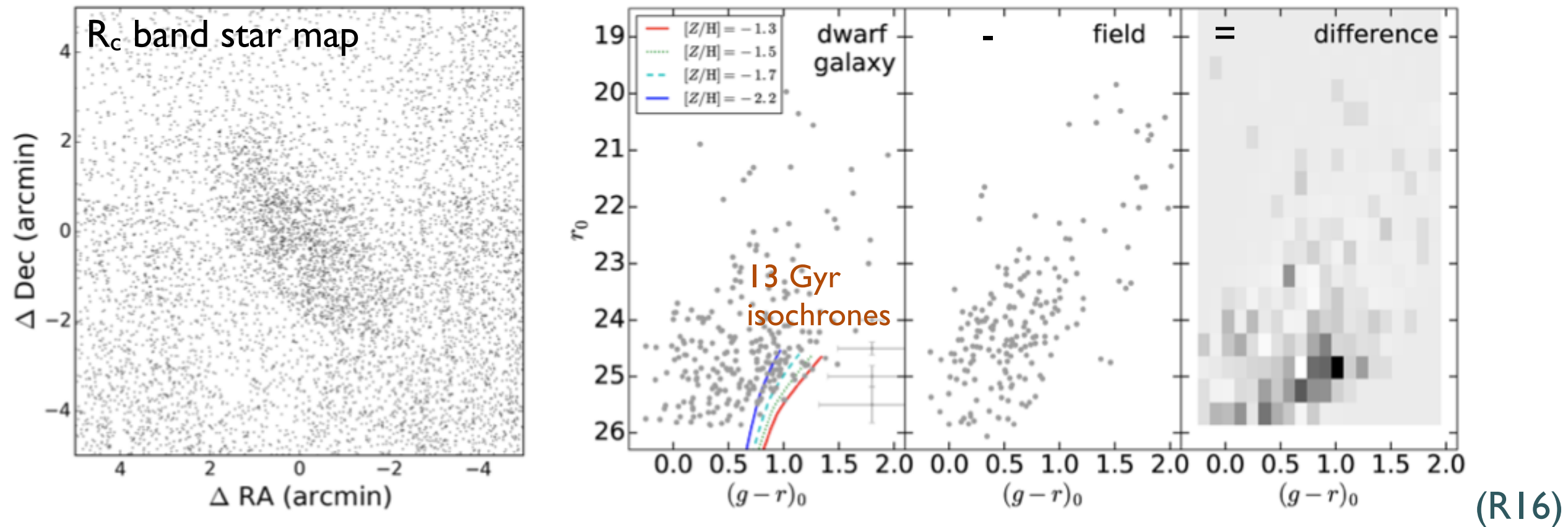
Discovery of NGC 253-dw2 (R16)

- 大口径望遠鏡での追観測 (80 cm 鏡 & Subaru 8 m)
 - Subaru Suprime-Cam
 - g band (5 x 114 s) & R_c band (5 x 120 s)
 - Observation: 2014
 - 細長い形状の天体を個々の星に分解
 - 赤い星が大部分を占めている
 - 楕円状の高密度領域 (5' x 18') から星を抽出
→ 減光補正した色等級図を作成



(http://subarutelescope.org/Gallery/j_tele_dome.html)

Color-magnitude diagram (R16)

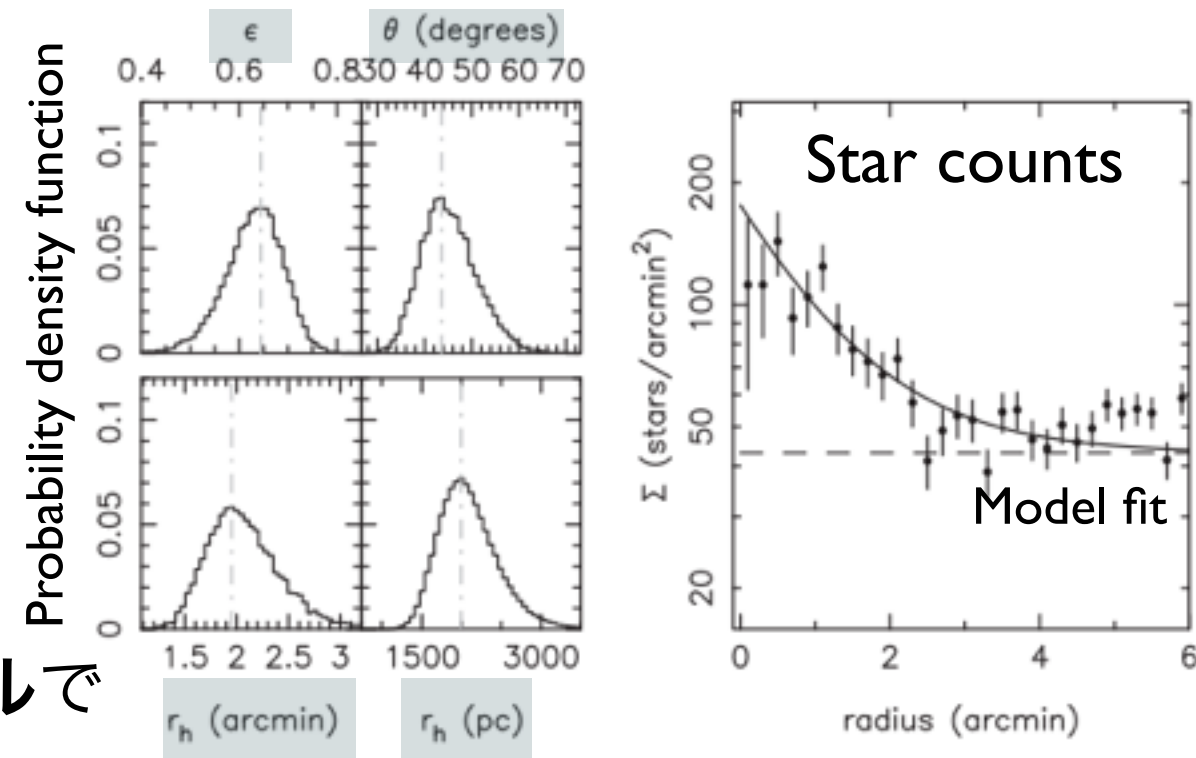


- Half-light radius 内の全ての星 - 背景の星 = 矮小銀河に属する星
 - $r_0 \sim 25$, $(g-r)_0 \sim 1.0 \rightarrow$ 距離 3.5 Mpc (NGC 253と consistent) のRGB星に相当
- NGC 253 の halo (年老いた低金属量の種族) と類似した矮小銀河 — dSph - dlrr
 - RGB星の存在 (1 Gyr 以上)
 - 青色主系列星 (過去 600 Myr の星形成をトレース) が見られない
 - isochrone $\rightarrow$ 金属量 $[Z/H] \sim -2.0 \pm 0.5$

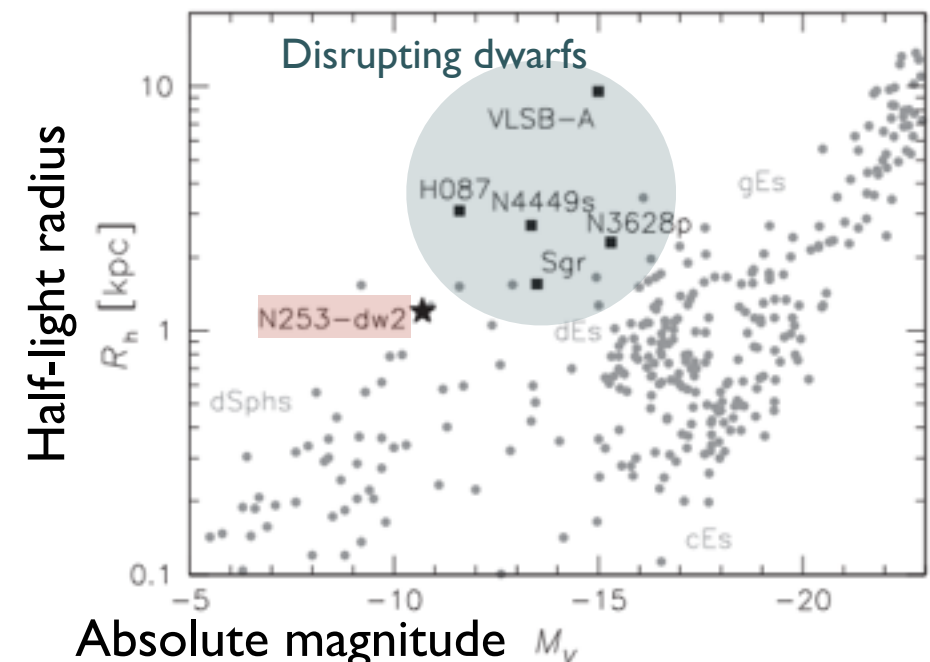
Properties of the dwarf (R16)

- **Structural parameters**

- 星の空間分布を**指数関数密度プロファイル**でフィッティング
- free parameters: (RA, DEC), PA, ϵ , a_h , N_*
(**確率密度関数 (PDF)** が最大になる値を採用)
- $a_h = 2.0 \pm 0.4$ kpc の**引き延ばされた楕円形**
($\epsilon \sim 0.6 - 0.7$)
- $L_V = (1.6 \pm 0.3) \times 10^6 L_\odot$ ($M_V = -10.7 \pm 0.4$ に相当)
 - 他の矮小銀河などと比較すると、**NGC 253-dw2** は**光度の割にサイズが大きい**
(同等光度の dSph の約2倍の大きさ)
 - **Disrupting dwarfs** と同様に外れた位置

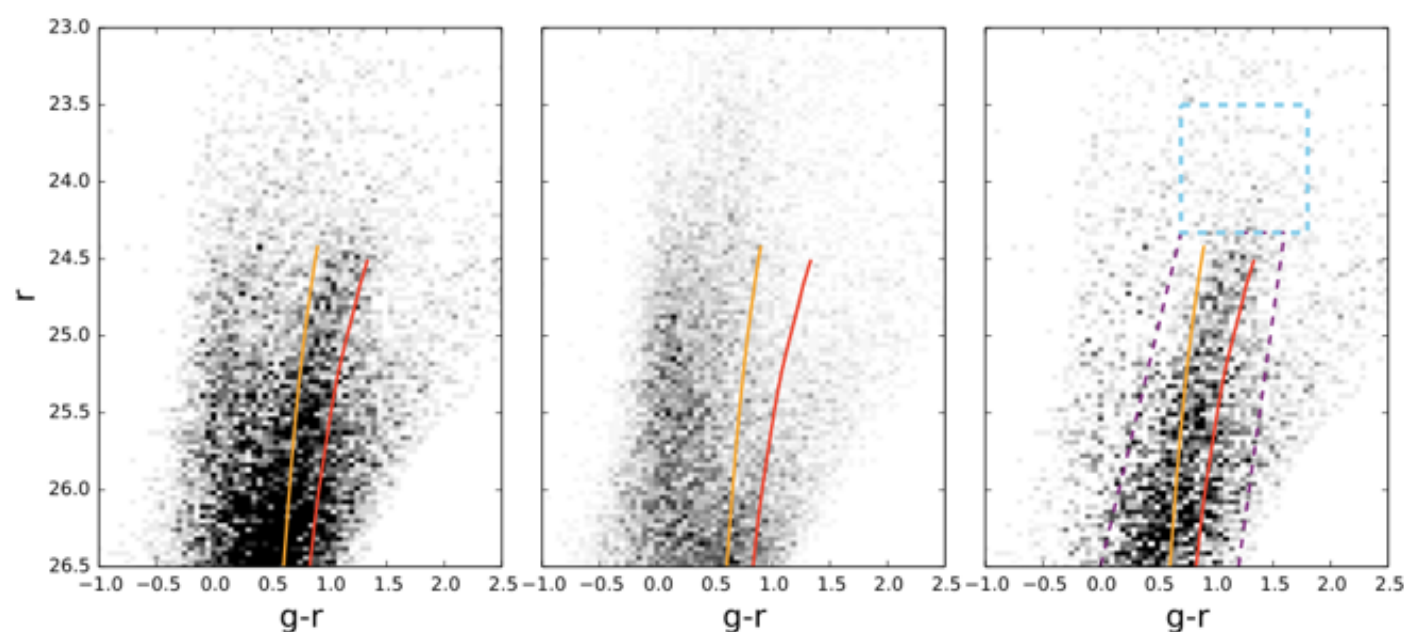


Property	(R16)	Value
α (J2000)		00:50:17.9 ^{+0.5} _{-0.6}
δ (J2000)		-24:44:25.8 ^{+6.7} _{-8.4}
Ellipticity ϵ		0.64 ^{+0.05} _{-0.07}
Position angle (deg E of N)		44 $\pm$ 6
M_V		-10.7 $\pm$ 0.4
a_h (arcmin)		2.0 ^{+0.4} _{-0.3}
a_h (kpc)		2.0 $\pm$ 0.4
R_h (kpc)		1.1 $\pm$ 0.2
$\mu_{0,V}$ (mag arcsec ⁻²)		26.2 $\pm$ 0.8



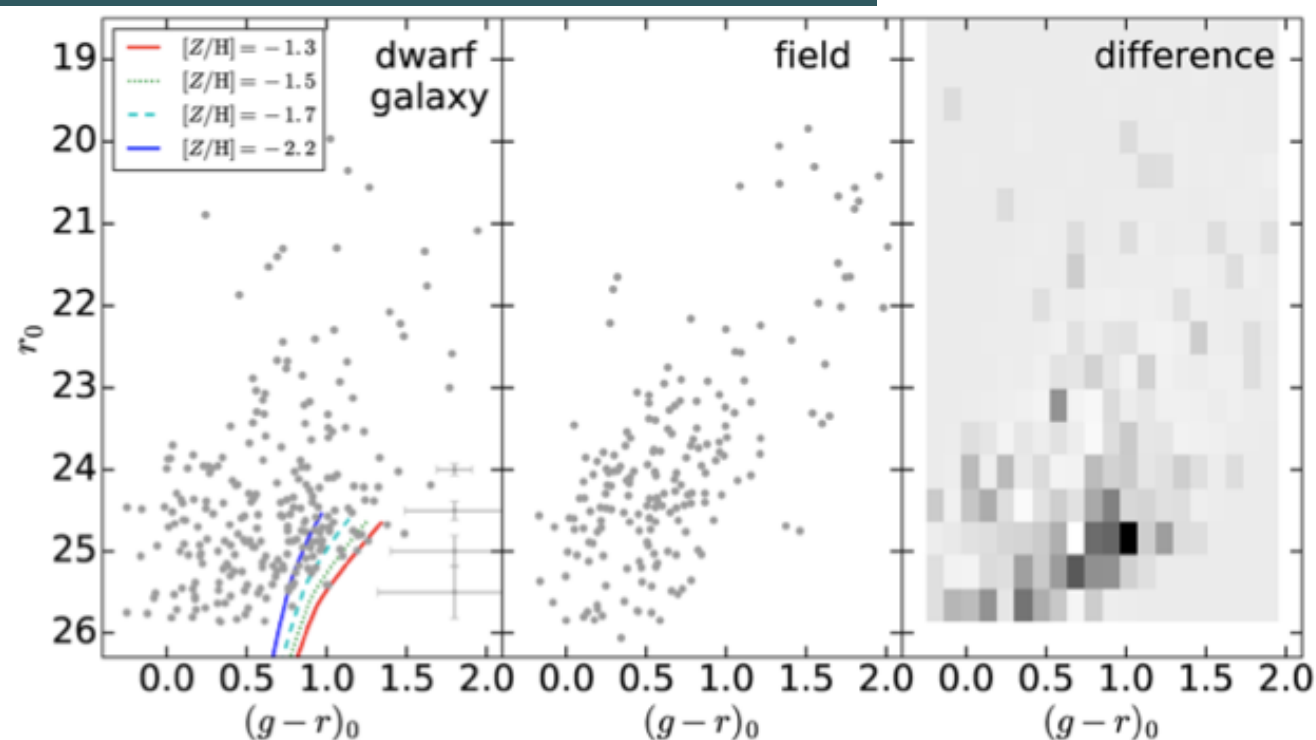
Analyses and Results

Toloba et al. 2016



Parameter	Value
R.A. ₀ (hh:mm:ss)	00:50:17.06 ± 4"00
Decl. ₀ (dd:mm:ss)	-24:44:58.58 ± 7"30
$m - M$ (mag)	27.47 ± 0.21
D (Mpc)	3.12 ± 0.30
M_V (mag)	-12.1 ± 0.5
r_h (arcmin)	3.24 ± 0.51
r_h (kpc)	2.94 ± 0.46
ϵ	0.66 ± 0.06
PA (N to E; deg)	31.0 ± 3.3
$\mu_{0,V}$ (mag arcsec ⁻²)	27.7 ± 0.6
$\langle \mu_{h,V} \rangle$ (mag arcsec ⁻²)	28.8 ± 0.6
M_* ($M_\odot$)	$1.0 \pm 0.4 \times 10^7$
M_{HI} ($M_\odot$)	$< 1.2 \times 10^5$
M_{HI}/L_V ($M_\odot/L_\odot$)	< 0.02

Romanowsky et al. 2016



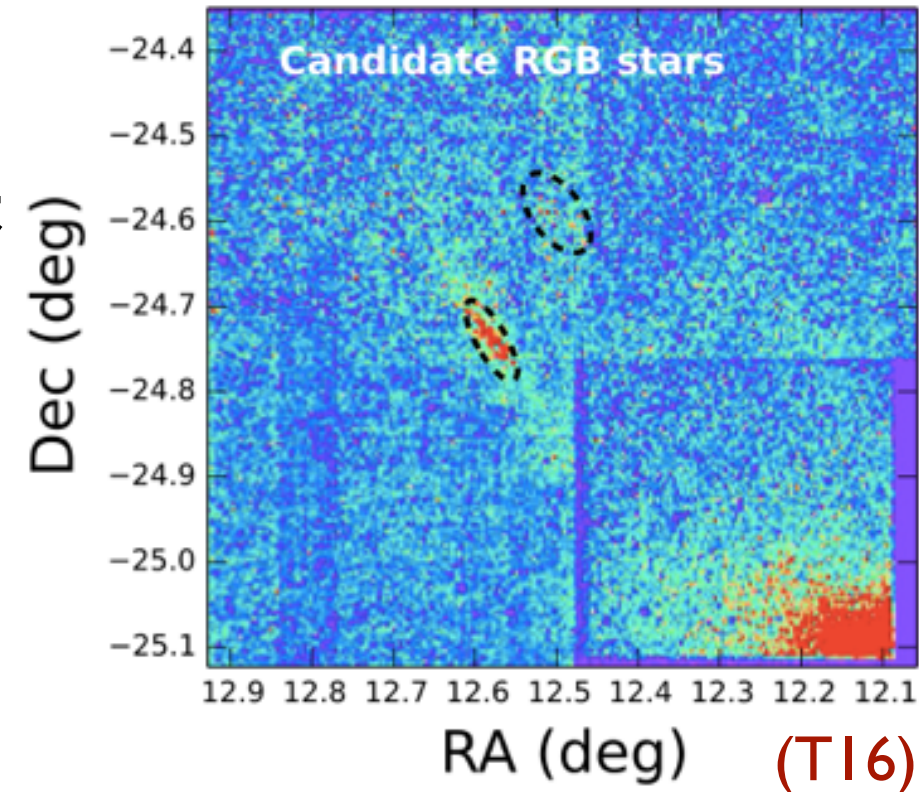
Property	Value
α (J2000)	00:50:17.9 ^{+0.5} _{-0.6}
δ (J2000)	-24:44:25.8 ^{+6.7} _{-8.4}
Ellipticity ϵ	0.64 ^{+0.05} _{-0.07}
Position angle (deg E of N)	44 ± 6
M_V	-10.7 ± 0.4
a_h (arcmin)	2.0 ^{+0.4} _{-0.3}
a_h (kpc)	2.0 ± 0.4
R_h (kpc)	1.1 ± 0.2
$\mu_{0,V}$ (mag arcsec ⁻²)	26.2 ± 0.8

(T16)

(R16)

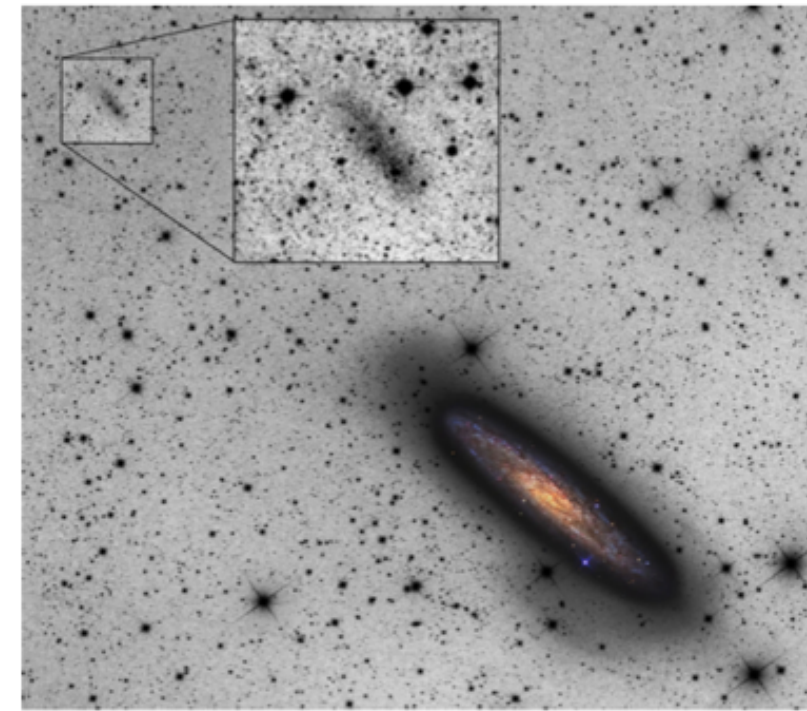
Discussion & Conclusion

- Gas-poor dwarf spheroidal satellite galaxy (T16)
 - 低金属量・中年齢の星 @中心部 + 年老いた星 @全体
 - Low gas fraction ($M_{\text{HI}}/L_V < 0.02 M_{\odot}/L_{\odot}$)
 - Large, elongated, diffuse
 - Tidal disruption (潮汐破壊)
 - 矮小楕円銀河 (dSph) としては異様に細長い形状
 - $\varepsilon > 0.6$ の dSph はいずれも潮汐破壊を受けている (e.g. Sgr, Her, UMa I & II)
 - 中心軸が NGC 253 中心部を向いている
 - NGC 253 のごく近傍を通過して elongation を受けた可能性
- Sci-MM-Dw2 / NGC 253-dw2 は母銀河 NGC 253 による潮汐破壊を受けている
- 北西側の高密度領域 — tidal tail の可能性 (T16)
 - 90% 以上の星質量が失われたはず — 大部分の星は観測から漏れている? (R16)
 - 潮汐破壊前の光度 $> 2 \times 10^7 L_{\odot}$



Discussion & Conclusion

- NGC 253 の伴銀河の発見・追観測 (R16)
 - 銀河の階層的形成を支持する結果
 - 潮汐破壊を受ける矮小楕円銀河 (disrupting dSph) の研究
 - 動力学 (dissolution dynamics)
 - ダークマター分布 (モデルとの比較)
 - infall 方向と大規模な shear field との比較
- 伴銀河が母銀河に及ぼす影響 (R16)
 - NGC 253 が recent unidentified interaction を経験した可能性
 - 証拠となる性質 — central starburst, kinematic twisting, stellar halo ‘shelf’
 - Pre-infall virial mass ($1-4 \times 10^{10} M_{\odot}$, Λ CDM model) $\sim M_*$ of NGC 253 ($1.7 \times 10^{10} M_{\odot}$)
 - NGC 253 と相互作用したのは NGC 253-dw2?
 - 銀河ハローの deep/wide-field 観測から、矮小銀河による ‘stealth attacks’ がさらに見つかる可能性がある



(R16)