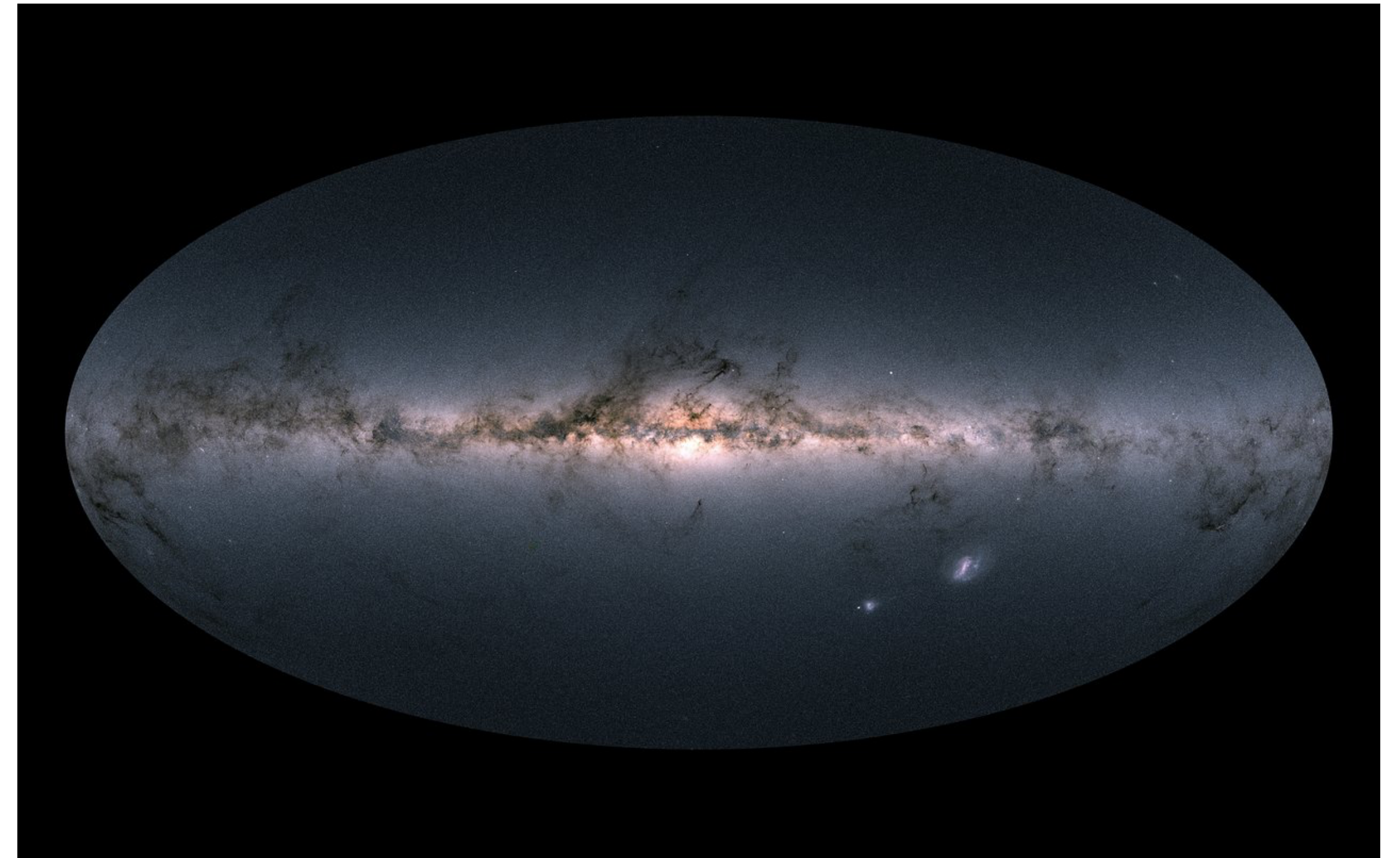


# 天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限

ガイア衛星が観測した銀河中心方向  
credit: ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO



東京大学理学系研究科 鈴木昭宏

# 講義のアウトライン

- 第1回: ~~天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体~~
- 第2回: ~~電磁波による宇宙の観測~~
- 第3回: ~~太陽系内天体と天体の運動~~
- 第4回: ~~天体の距離、明るさ、色~~
- 第5回: ~~恒星1 - 恒星のエネルギー源と核反応-~~

# 講義のアウトライン

- 第6回: ~~恒星2 -恒星の分類と進化-~~
- 第7回: ~~星の誕生と星間物質~~
- 第8回: **銀河1 -銀河系の構成要素-**
- 第9回: ~~銀河2 -銀河の分類と進化-~~
- 第10回: ~~超新星爆発と元素の起源~~

# 講義のアウトライン

- 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- 第15回: 系外惑星の世界



# 第8回:

## 銀河1

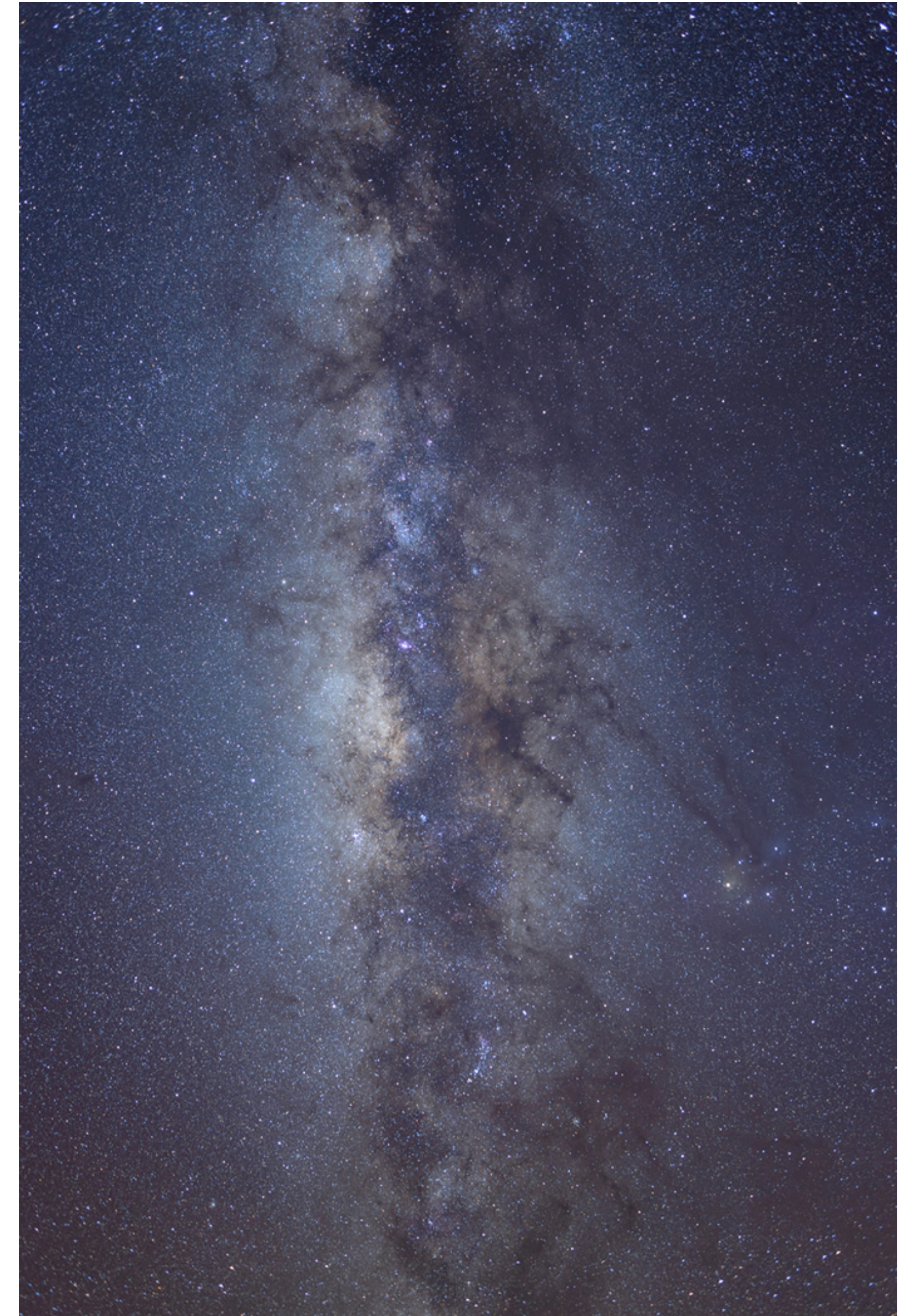
### -銀河系の構成要素-

- 天の川銀河とその構成要素
- 銀河系と暗黒物質(ダークマター)
- 銀河系の進化史に迫る



# 天の川と星の分布

- 夜空に見えるうっすらと明るい帯
- 星が混んでいる

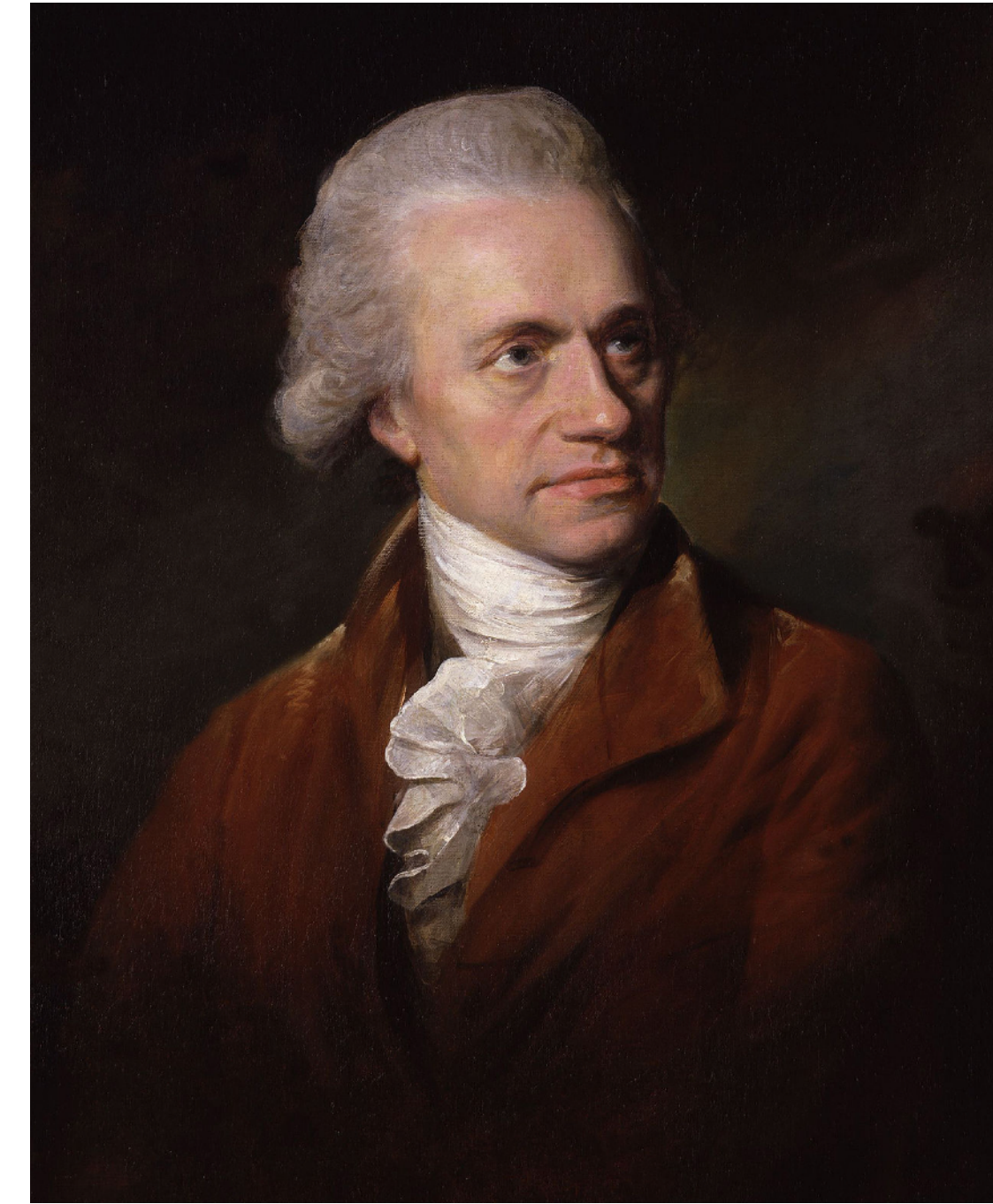


ハワイ・マウナケア山から観た天の川  
credit: 国立天文台、長山省吾



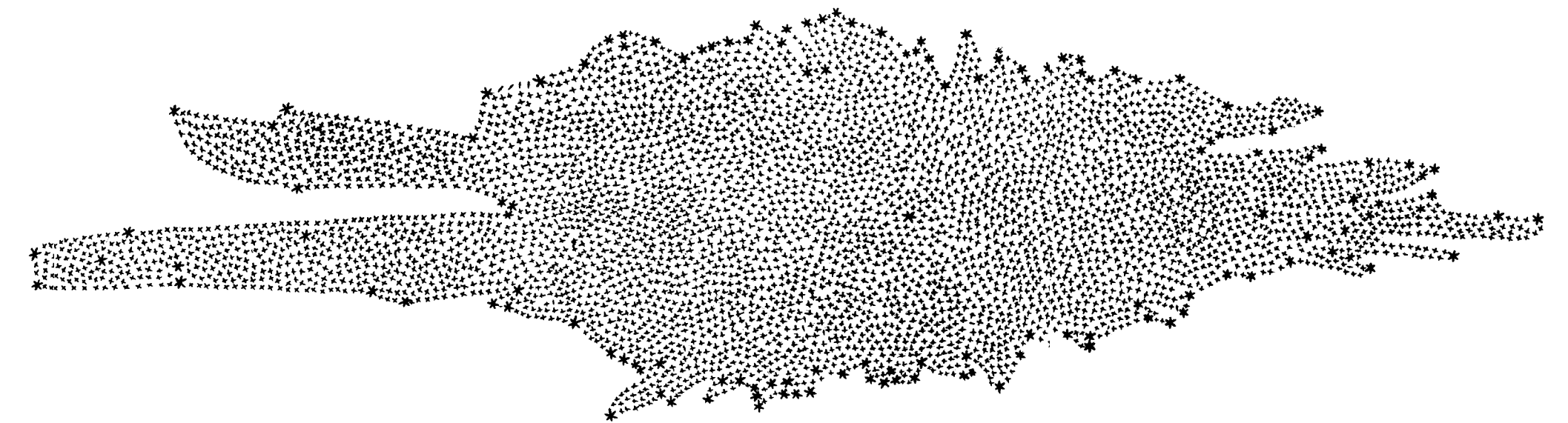
# ハーシェルの恒星分布図

- ウィリアム・ハーシェル(1738-1822)
- 天の川の三次元地図を作ろうとした
- 全ての星の光度が同じという仮定
- ある方向に向かって星の数が減る
- 円盤状の宇宙？



William Herschel (1738-1822)

[https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Herschel](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Herschel)



Herschel, W. (1785)



# 天の川は唯一の恒星集団か？

- 太陽が近傍に多数存在する恒星集団(天の川)の一つであることは早い時期から分かっていた
- 一方で、淡く広がる天体(星雲)が太陽が属する恒星集団と同じように太陽近傍に分布するのか、あるいはまったく別の集団を観ているのかは天文学者の間でも意見が分かれていたらしい
- 1920年の大討論(The Great Debate): シャプレー vs カーティス



春の夜空

credit: H. Fukushima Y. Ishibashi, NAOJ

# 天の川は唯一の恒星集団か？

- H. シャプレー: 星雲はすべて天の川の中にある  
(天の川≡宇宙)
- H. カーティス: 星雲は天の川と別の、もっと遠くにある恒星集団である
- 決着は1922年、E. ハッブルによるアンドロメダ銀河の距離測定



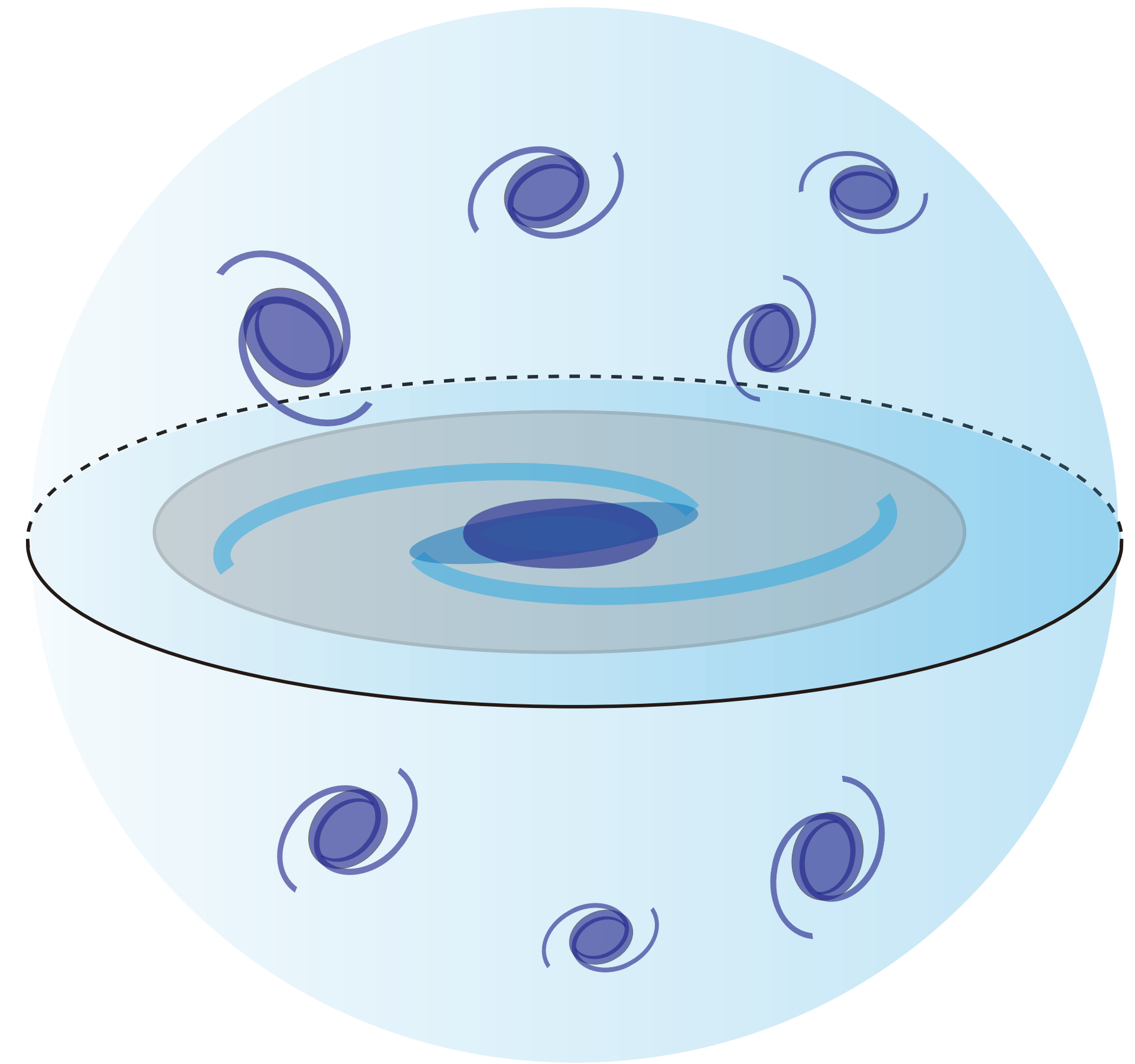
H. シャプレー(左)とH. カーティス(右)

<https://www.aps.org/publications/apsnews/200004/history.cfm>



# 天の川は唯一の恒星集団か？

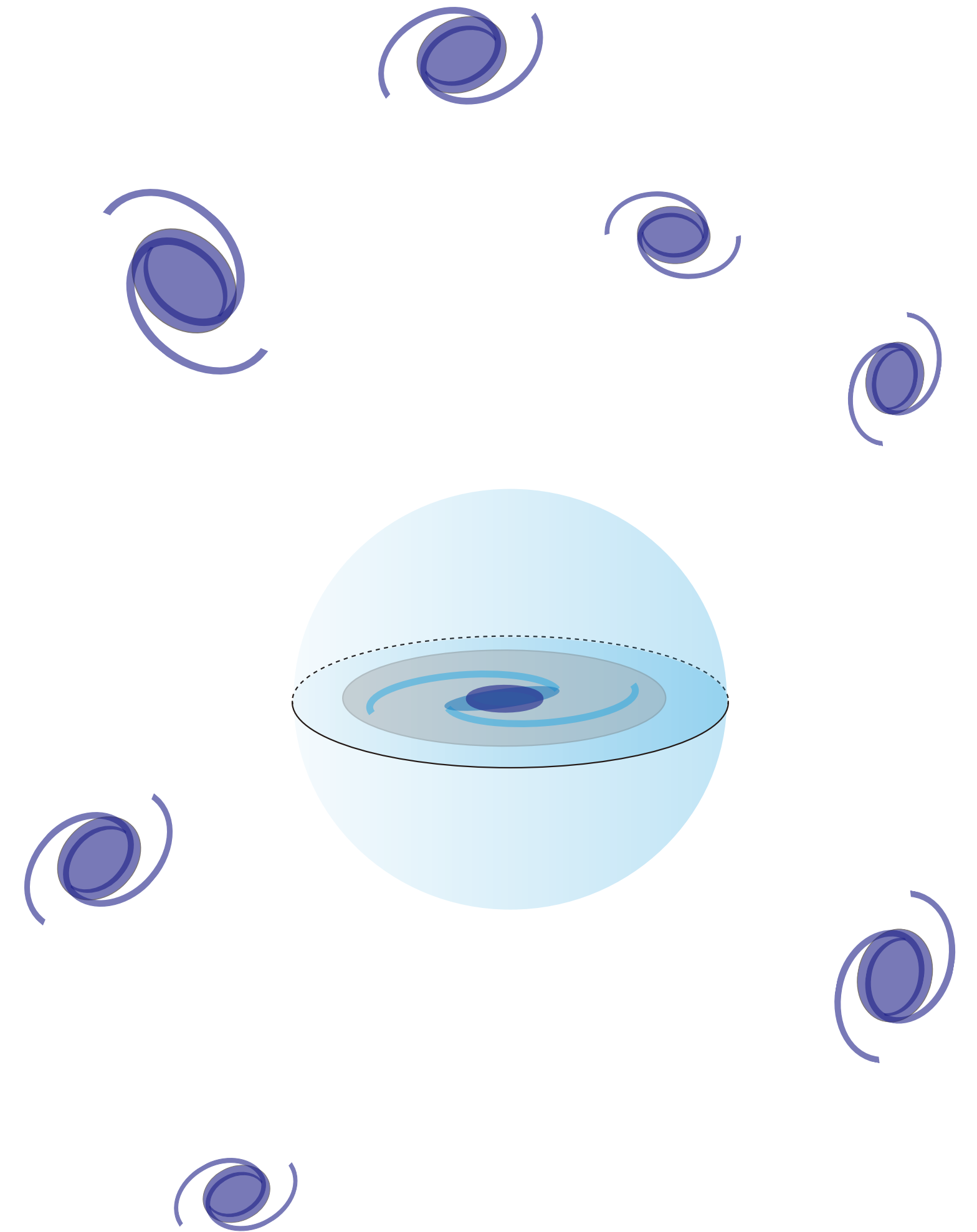
- H. シャプレー: 星雲はすべて天の川の中にある (天の川≡宇宙)
- H. カーティス: 星雲は天の川と別の、もっと遠くにある恒星集団である
- 決着は1922年、E. ハッブルによるアンドロメダ銀河の距離測定



シャプレー的な宇宙像

# 天の川は唯一の恒星集団か？

- H. シャプレー: 星雲はすべて天の川の中にある (天の川≡宇宙)
- H. カーティス: 星雲は天の川と別の、もっと遠くにある恒星集団である
- 決着は1922年、E. ハッブルによるアンドロメダ銀河の距離測定



カーティス的な宇宙像

# 天の川は唯一の恒星集団か？

- H. シャプレー: 星雲はすべて天の川の中にある (天の川≡宇宙)
- H. カーティス: 星雲は天の川と別の、もっと遠くにある恒星集団である
- 決着は1922年、E. ハッブルによるアンドロメダ銀河の距離測定



E. ハッブル

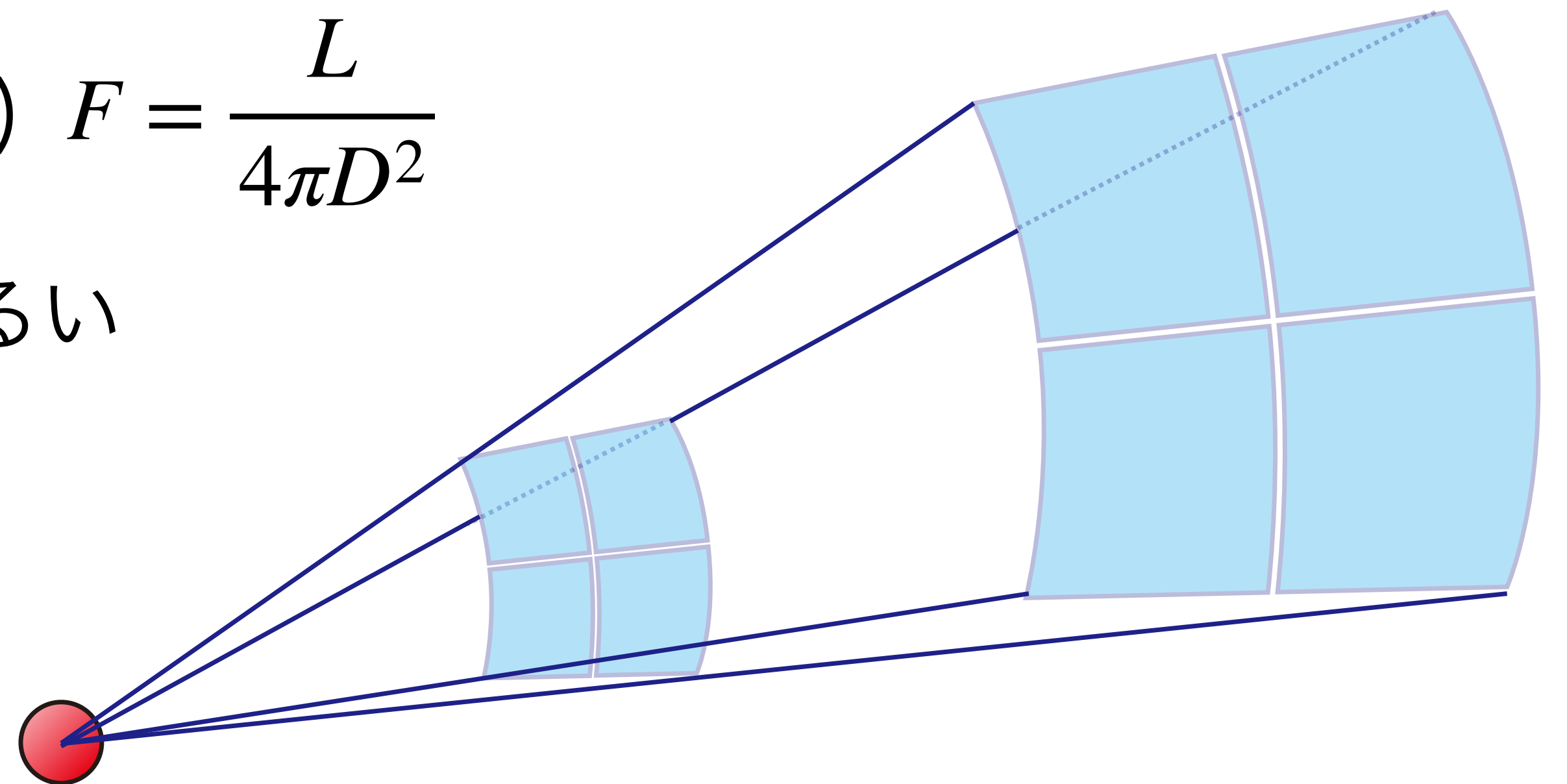
[https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin\\_Hubble](https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble)

# 宇宙の距離はしご(cosmic distance ladder)

- 異なる手法で天体までの距離を測り、それをつなぐ
- ステップ1: レーダー距離測定(太陽系内 ~au)
- ステップ2: **年周視差(parallax)**による距離測定(太陽近傍~銀河系内)
- ステップ3: **セファイド変光星(Cepheid)**や**こと座RR星型変光星(RR Lyra)**の周期-光度関係(近傍銀河 <数10Mpc )
- ステップ4: 銀河の光度-速度分散関係や**la型超新星(Type-Ia Supernova)**(遠方銀河)

# 恒星の明るさと距離

- 星からのエネルギー放出率=**光度(luminosity)**  $L$  [ $\text{J s}^{-1}$ ]
- 地球で観測される**エネルギー流束(flux)**  $F$  [ $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]
- 距離 $D$ の2乗(表面積)で薄まる(**逆2乗則**)  $F = \frac{L}{4\pi D^2}$
- (当たり前だけれど、)距離が近いと明るい
- しかし、真の明るさ( $L$ )を反映していない

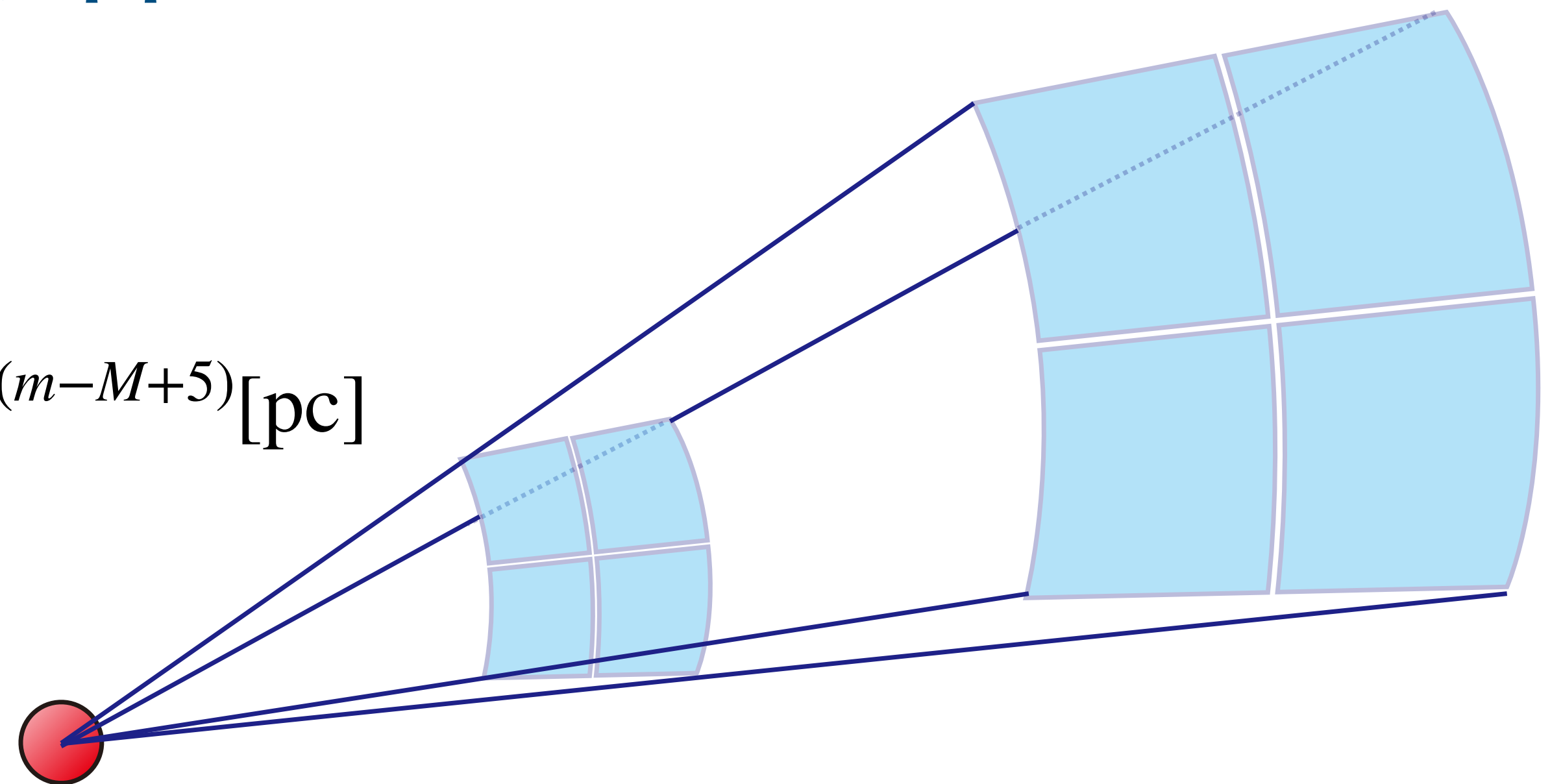




# 恒星の明るさと距離

- 全ての星を平等に10pcの距離に置いたとして、等級を定義する: **絶対等級(Absolute magnitude)**
- これまでの等級の定義は**見かけの等級(Apparent magnitude)**
- 絶対等級 $M$ と見かけの等級 $m$ の関係:

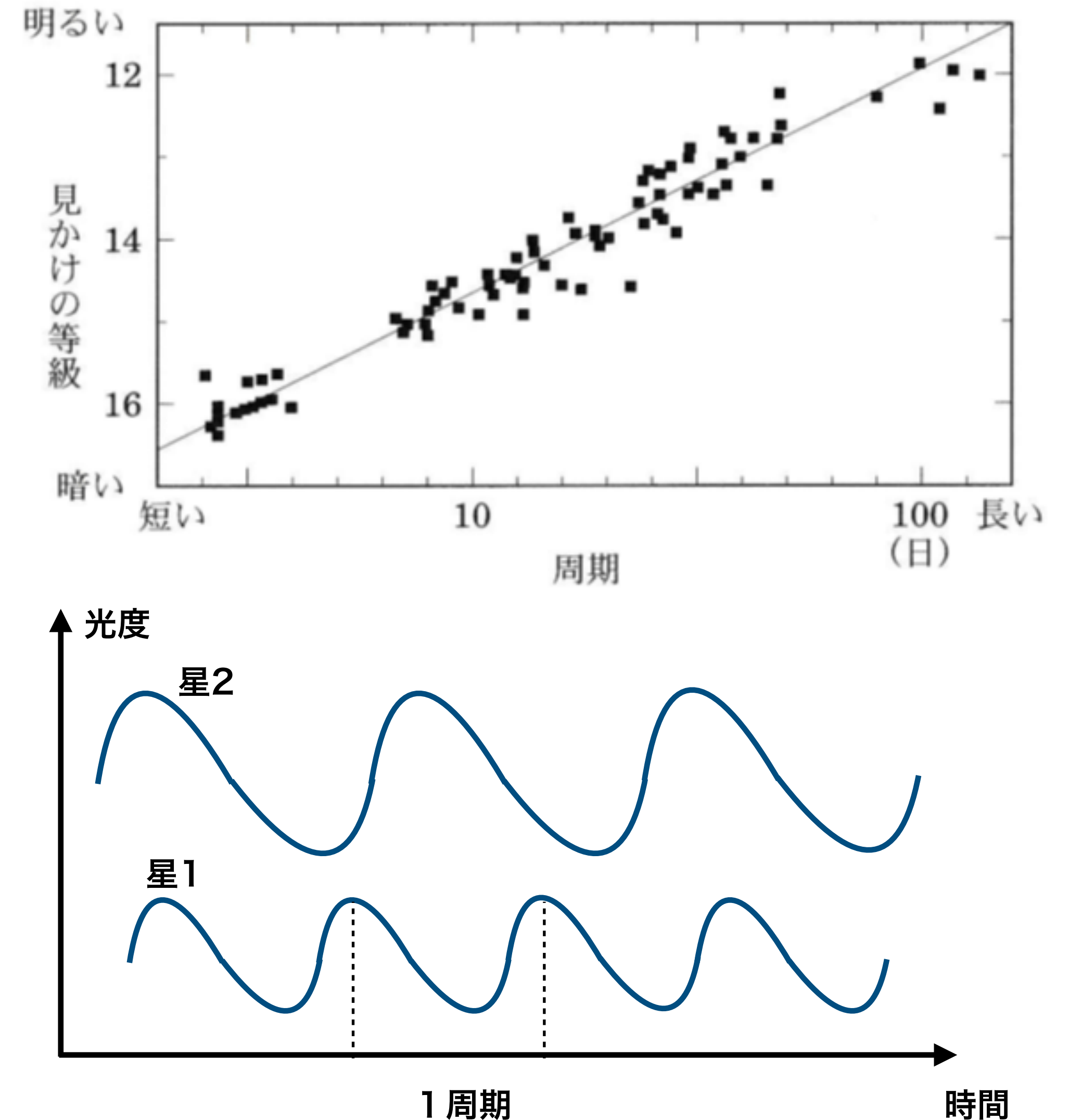
$$m - M = 5 \log_{10}(D/[pc]) - 5 \text{ or } D = 10^{0.2(m-M+5)}[pc]$$



# 標準光源と距離

岡村・池内・海部・佐藤・永原編『人類の住む宇宙』第2版 2.4節 図2.18

- 逆に言えば、絶対等級Mが分かっている天体の見かけの等級mを測れば、距離Dが分かる
- **セファイド変光星(Cepheid)**の周期-光度関係: 周期を測ると光度(絶対等級M)が大体分かる
- 近傍銀河(個々の星を分解して観測できる)まで有効



# 天の川は唯一の恒星集団か？

- H. シャプレー: 星雲はすべて天の川の中にある  
(天の川≡宇宙全体)
- H. カーティス: 星雲は天の川と別の、もっと遠くにある恒星集団である
- 決着は1922年、E. ハッブルによるアンドロメダ銀河の距離測定 → 250万光年
- 当時知られていた天の川に属する星までの距離より随分遠い

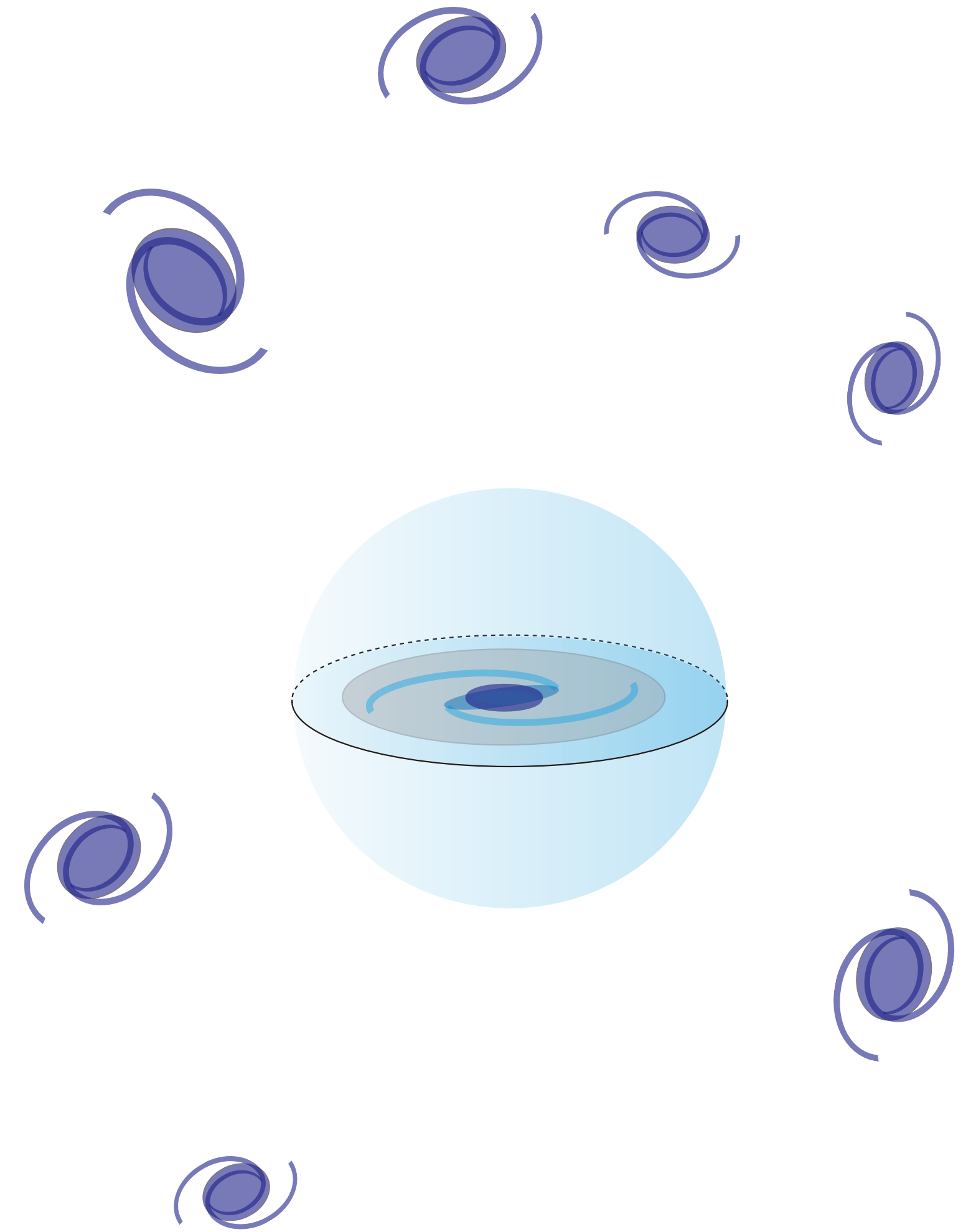


E. ハッブル

[https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin\\_Hubble](https://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Hubble)

# 天の川は唯一の恒星集団か？

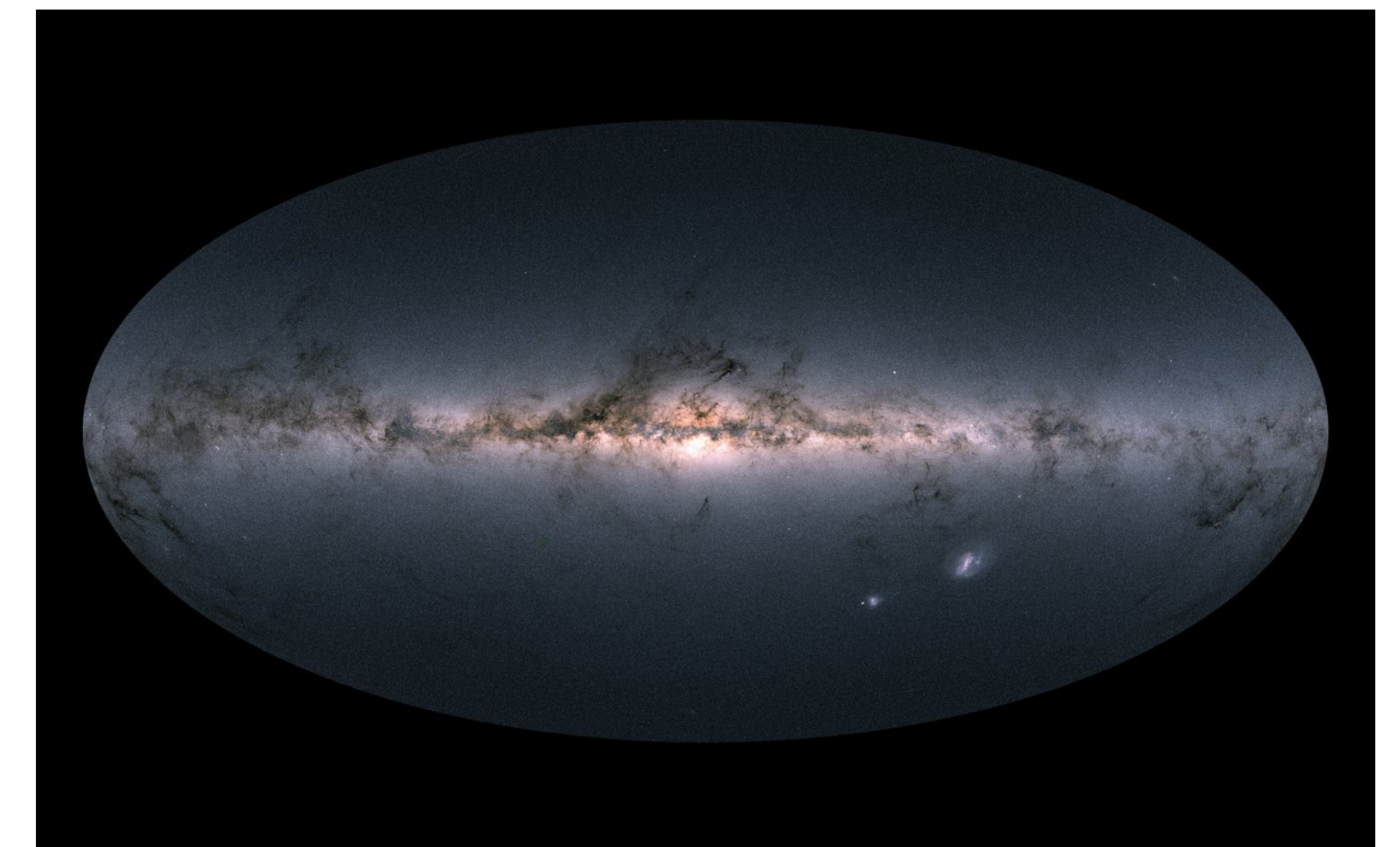
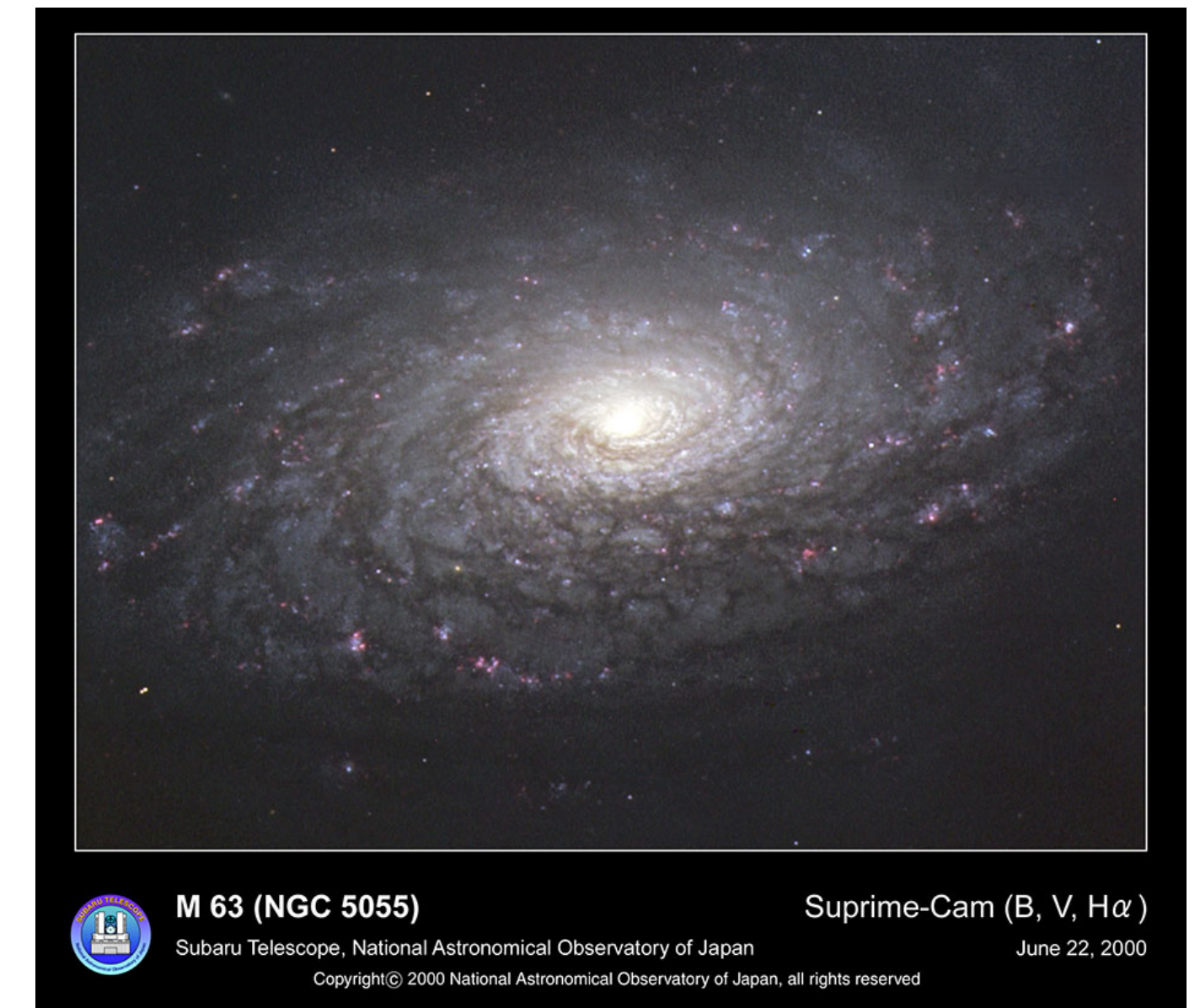
- 宇宙には天の川のような恒星集団(銀河)が多数離れて存在している
- (科学に基づいた)宇宙観のアップデート
- では銀河はどんな構造なのか？
- まずは我々の天の川銀河から





# 天の川銀河の構造

- **円盤構造(ディスク)**: 厚いディスク + 薄いディスク, 直径約30kpc, 厚み数100pc-1kpc
- **渦状腕**: 特徴的な渦巻き構造, 若い星が集中して分布している
- **バー構造**: 中心付近にある渦状腕をつなぐような構造
- **ハロー**: ディスクや渦状腕を取り巻く球状に星が分布した構造, 比較的古い星から成る

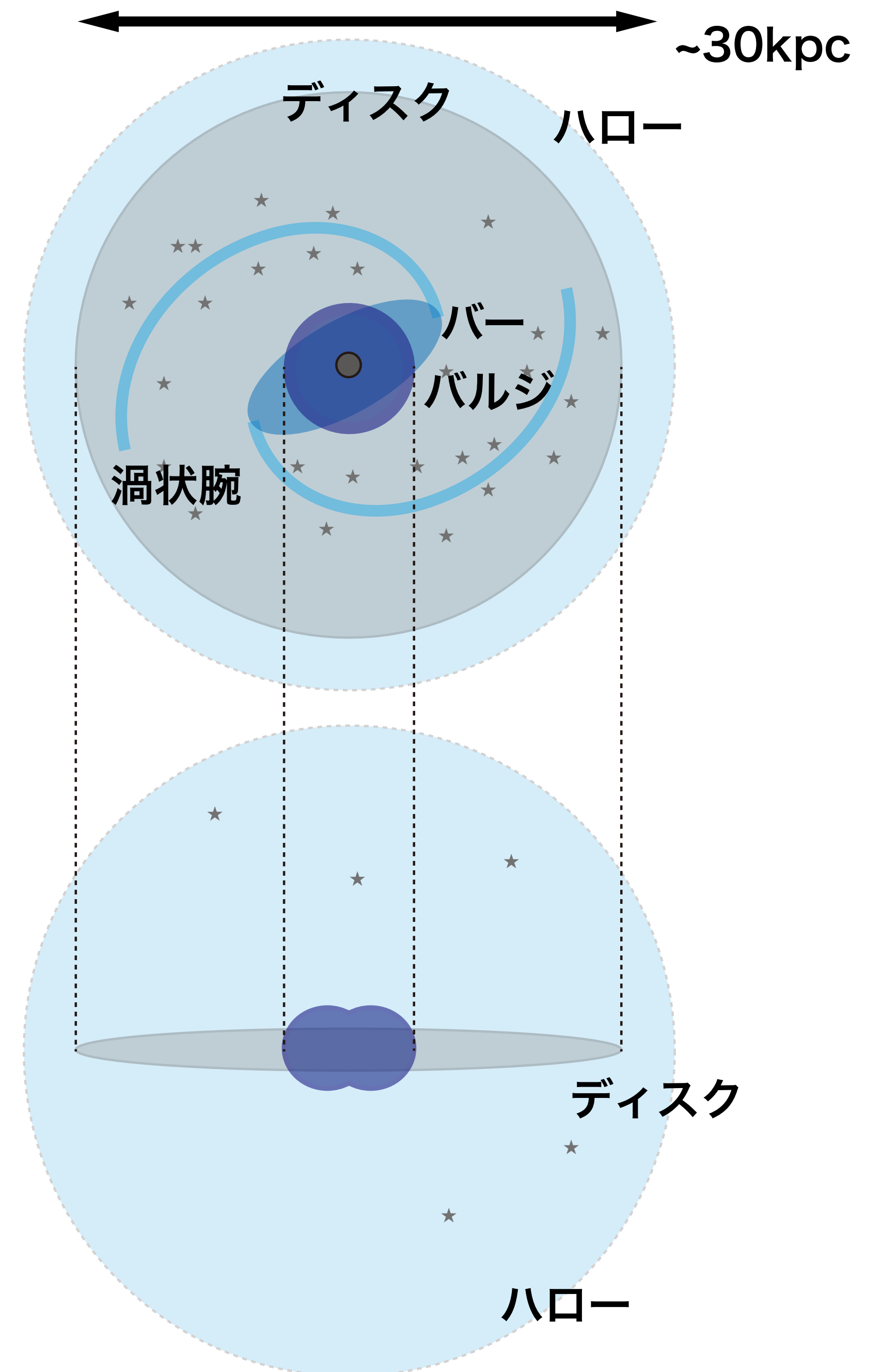


銀河中心方向の様子



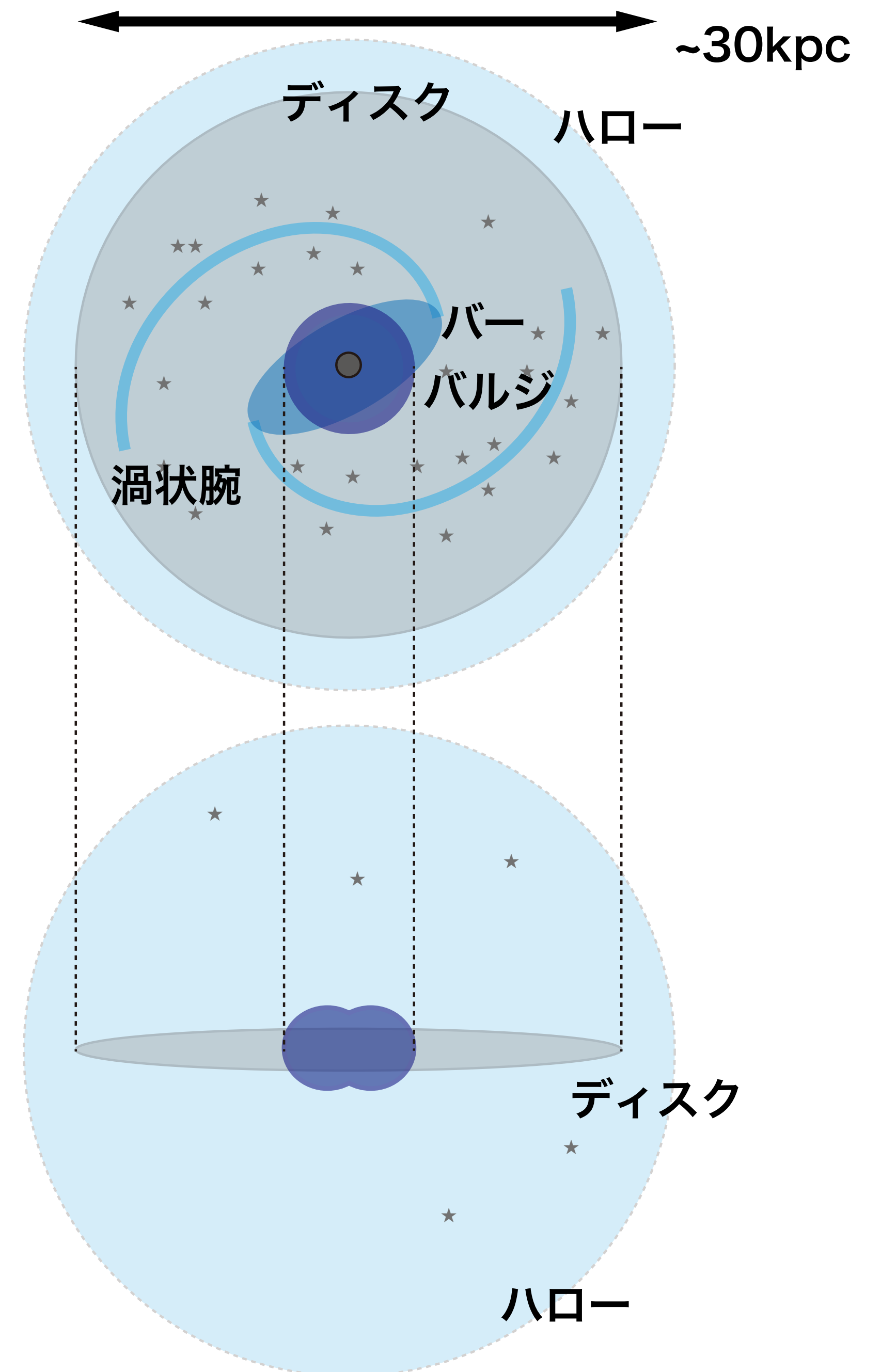
# 天の川銀河の構造

- **円盤構造(ディスク)**: 厚いディスク + 薄いディスク, 直径約30kpc, 厚み数100pc-1kpc
- **渦状腕**: 特徴的な渦巻き構造, 若い星が集中して分布している
- **バー構造**: 中心付近にある渦状腕をつなぐような構造
- **ハロー**: ディスクや渦状腕を取り巻く球状に星が分布した構造, 比較的古い星から成る



# 天の川銀河の構造

- 星質量 =  $(5-7) \times 10^{10} M_{\odot}$  (1000-4000億個)
- ガス質量  $\doteq 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$  (星質量の~10%程度)
- 中心の超大質量BH = 約  $4 \times 10^6 M_{\odot}$
- 力学的質量 = 約  $2 \times 10^{12} M_{\odot}$
- 現在の星形成率 = 約  $1 M_{\odot}/\text{yr}$



# 第8回:

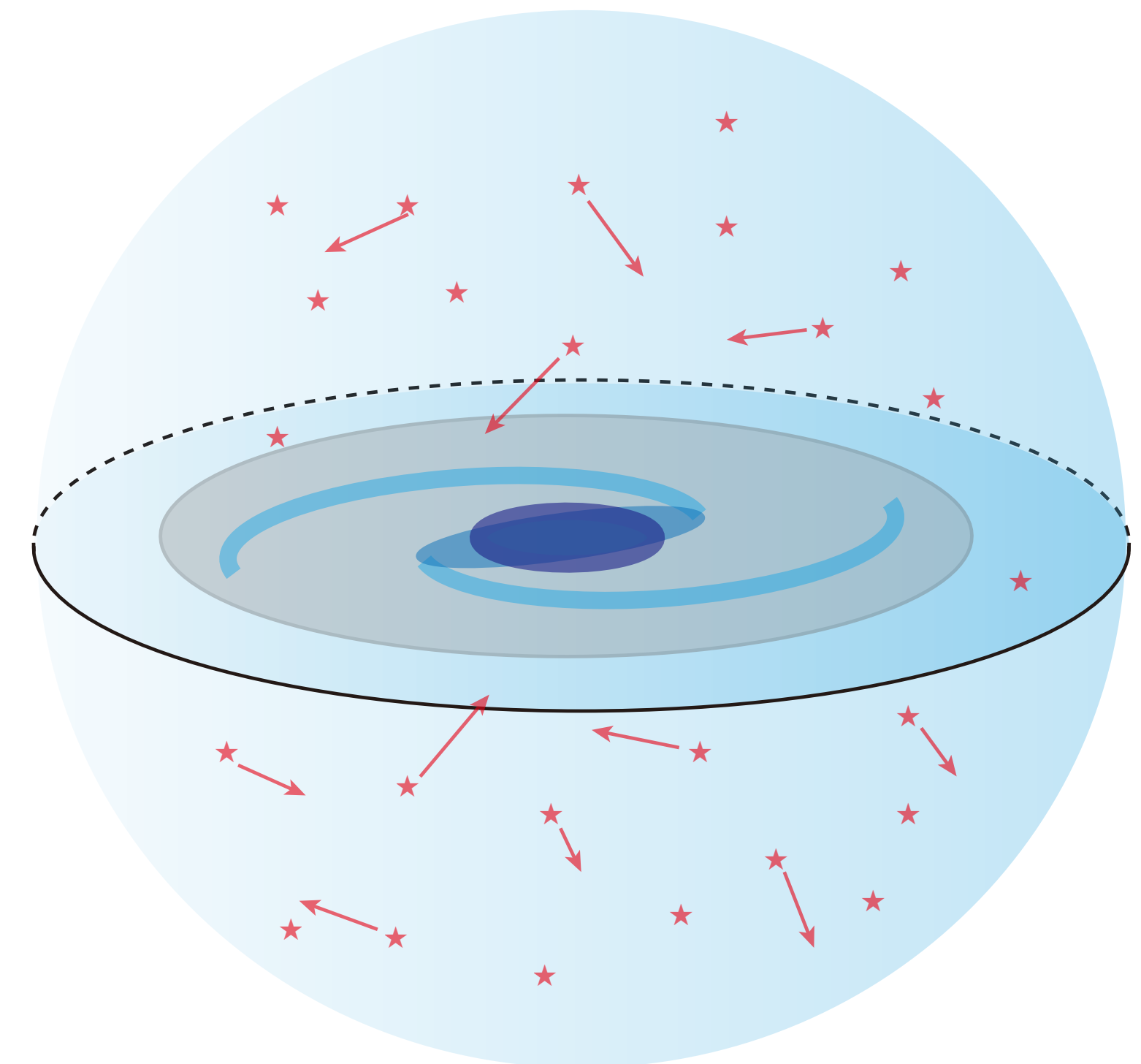
## 銀河1

### -銀河系の構成要素-

- 天の川銀河とその構成要素
- 銀河系と暗黒物質(ダークマター)
- 銀河系の進化史に迫る

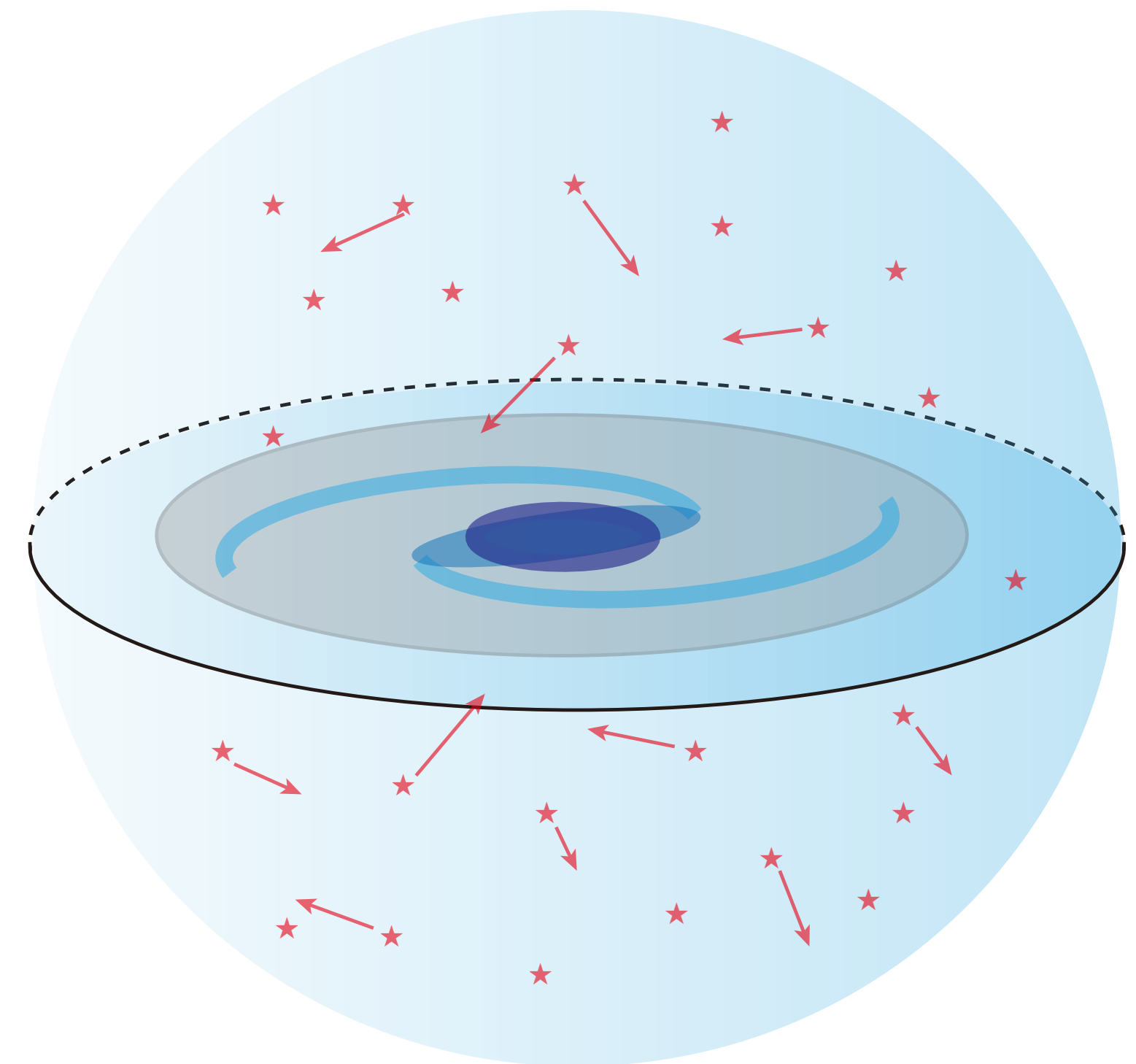
# 銀河系は回転している

- 1871年 H. Gilden, 1914年 B. Boss, W.S. Adams, A. Kohlschutterなど
- 太陽の周りの一部の星(高速度星)が太陽に対して一定の方向に運動している(+ランダムな運動)
- 太陽がハローにいる星に対して回転運動をしている



# 銀河系の回転速度

- 円盤内の星はどの程度の速さで回転している？
- 太陽の位置: 半径 約8kpc= $2.5 \times 10^{17}$  [km]
- 太陽の回転速度: 約220 [km s<sup>-1</sup>]
- 50億年で銀河系を約20回転
- それでは中心付近あるいは中心から遠く離れた星やガスはどうだろうか？





# ケプラーの法則の復習

シリーズ現代の天文学「太陽系と惑星」付表より

- 太陽系惑星だと回転速度はどうなっているか？
- 簡単のため円運動を仮定(離心率 $e=0$ )
- 軌道長半径= $a$ , 円周= $2\pi a$ , 周期= $P$
- 速度  $v=2\pi a/P$

惑星	軌道長半径 $a$ [au]	公転周期 $P$ [年]	速度 $v$ $2\pi a/P$
水星	0.3871	0.24085	
金星	0.7233	0.61521	
地球	1.0000	1.00004	
火星	1.5237	1.88089	
木星	5.2026	11.8622	
土星	9.5549	29.4578	
天王星	19.2184	84.0223	
海王星	30.1104	164.774	



0.24085^2/0.3871^3



# ケプラーの法則の復習

シリーズ現代の天文学「太陽系と惑星」付表より

- 太陽系惑星だと回転速度はどうなっているか？
- 簡単のため円運動を仮定(離心率 $e=0$ )
- 軌道長半径= $a$ , 円周= $2\pi a$ , 周期= $P$
- 速度  $v=2\pi a/P$

惑星	軌道長半径 $a$ [au]	公転周期 $P$ [年]	速度 $v$ $2\pi a/P$
水星	0.3871	0.24085	10.1
金星	0.7233	0.61521	7.39
地球	1.0000	1.00004	6.28
火星	1.5237	1.88089	5.09
木星	5.2026	11.8622	2.76
土星	9.5549	29.4578	2.04
天王星	19.2184	84.0223	1.44
海王星	30.1104	164.774	1.15



0.24085^2/0.3871^3

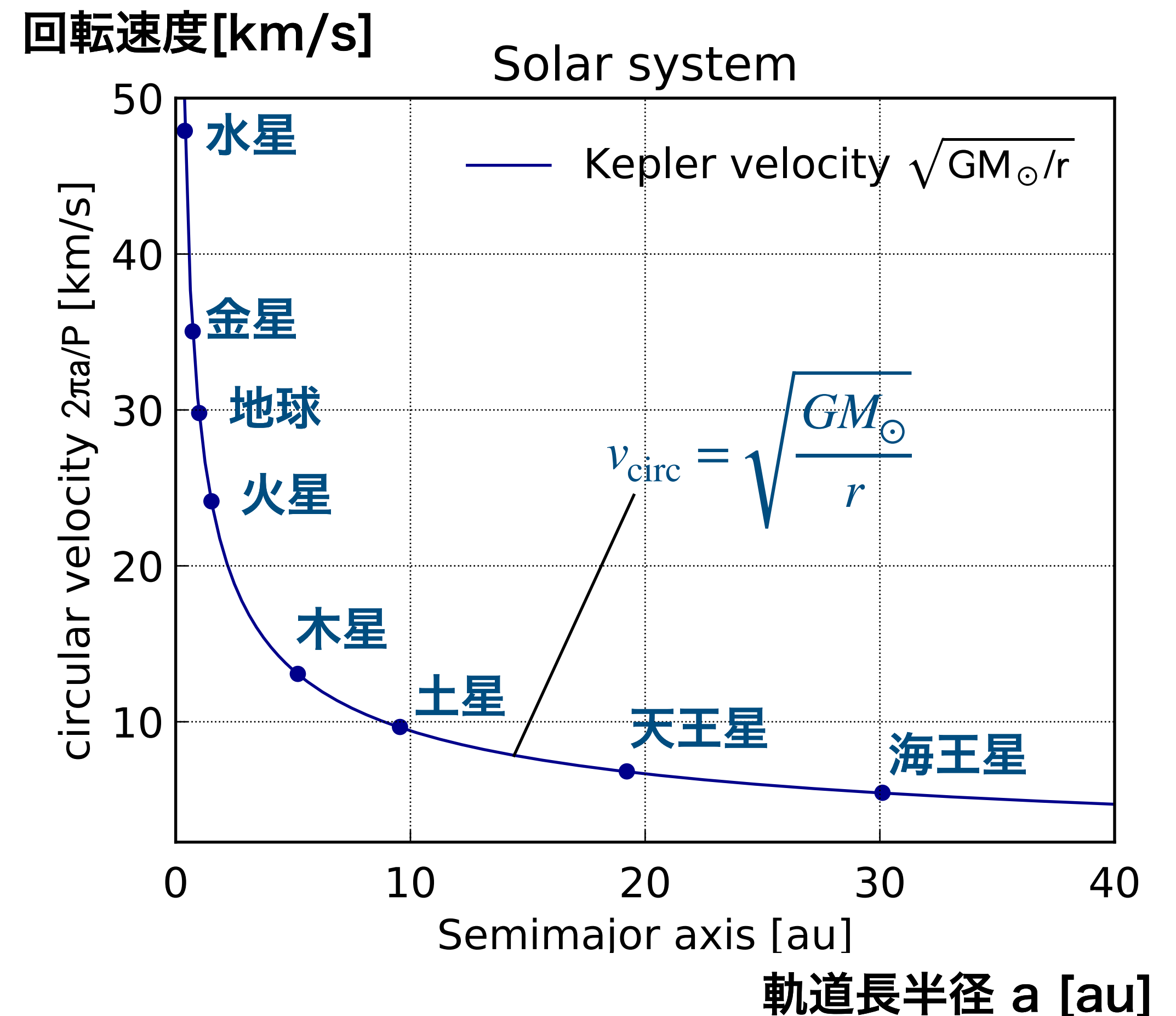


# ケプラーの法則の復習

- 太陽系惑星だと回転速度はどうなっているか？
- 簡単のため円運動を仮定(離心率 $e=0$ )
- 軌道長半径= $a$ , 円周= $2\pi a$ , 周期= $P$
- 速度  $v=2\pi a/P$



0.24085^2/0.3871^3

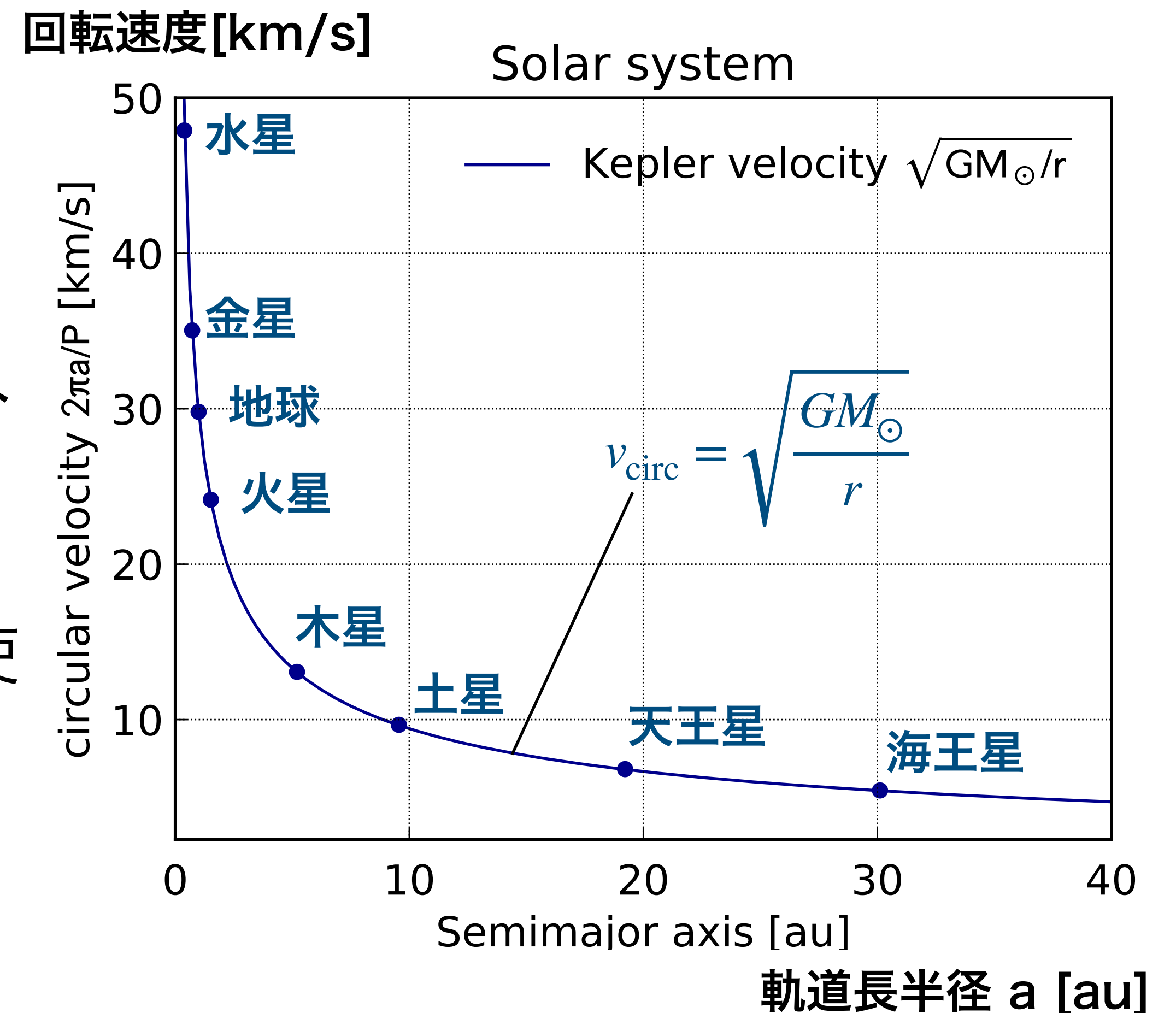




# ケプラーの法則の復習

- ケプラーの法則:  $P = Ca^{3/2}$
- 回転速度  $v_{\text{circ}} = 2\pi a/P \propto 1/\sqrt{a}$
- 外側へいくほど回転速度は半径のルートで遅くなる
- より正確には万有引力と運動方程式を使って、

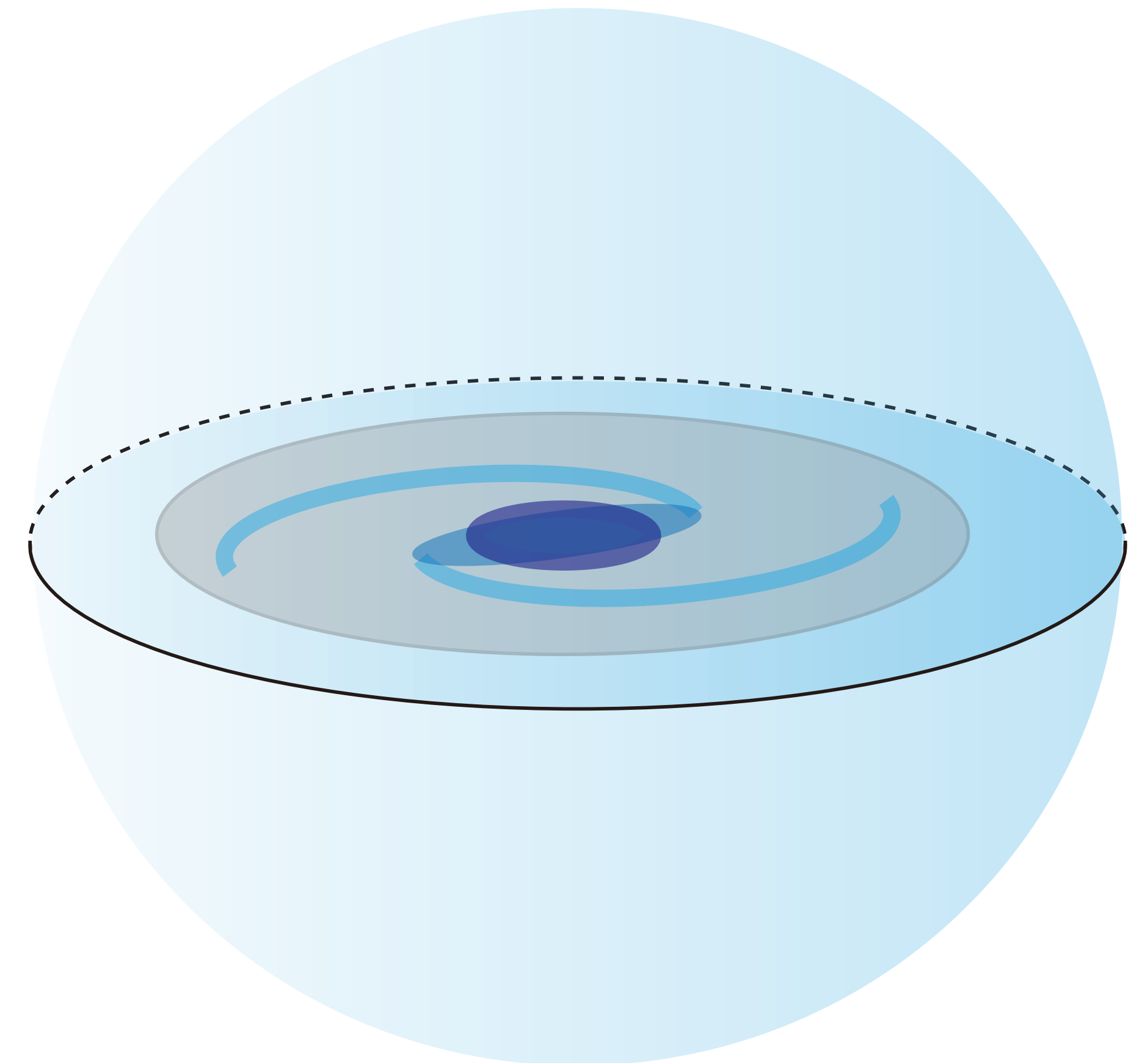
$$v_{\text{circ}} = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}} \quad (\text{ケプラー速度})$$



# 銀河の回転曲線

- 重要なのは、内側にある質量(重力源)が回転速度から推定できる: **力学質量 (dynamical mass)**  
$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{circ}}^2 r}{G}$$

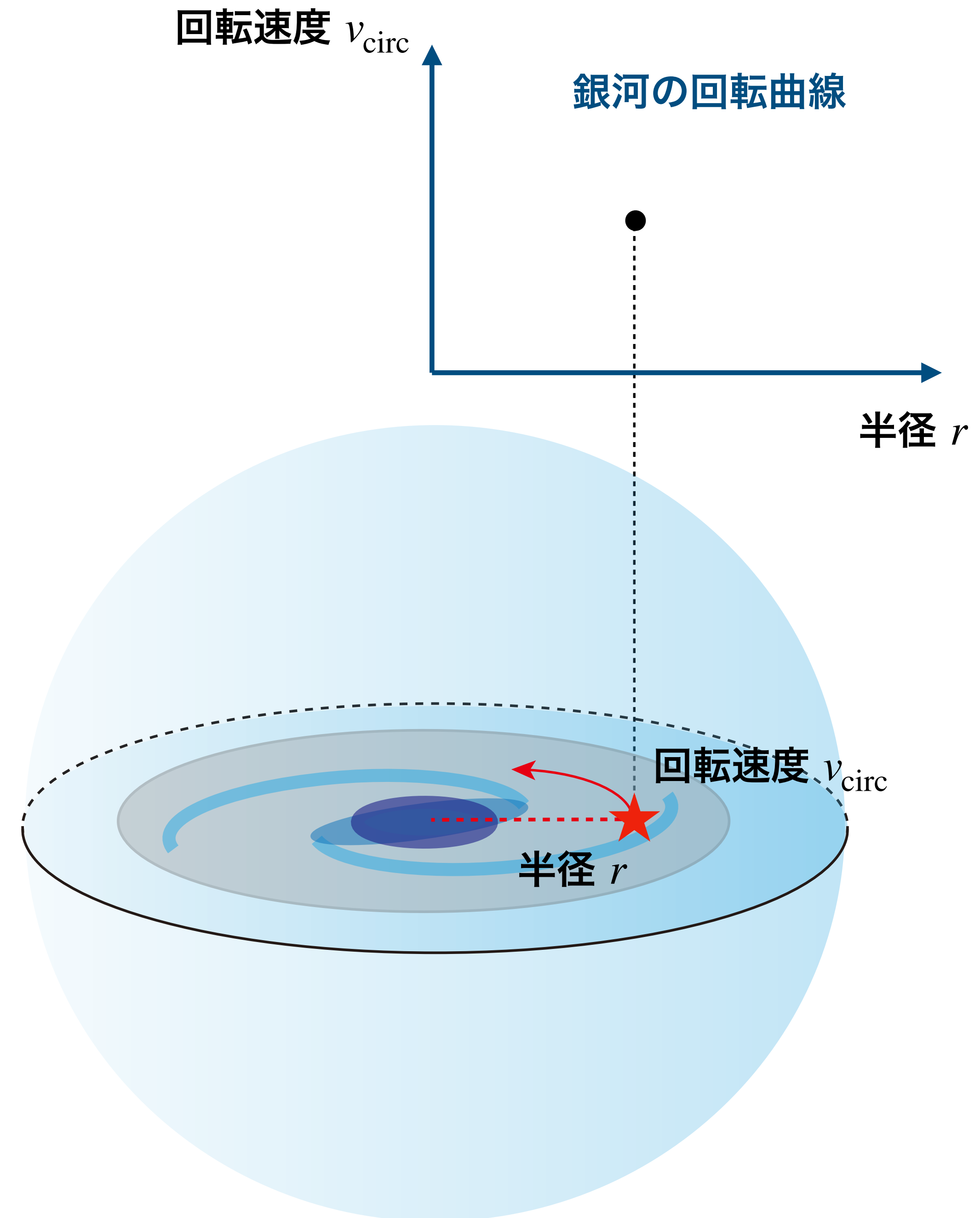
(実際にはもっと複雑だが…)
- 銀河円盤の星やガスから推定される力学質量の分布はどうなっているのか？



# 銀河の回転曲線

- 重要なのは、内側にある質量(重力源)が回転速度から推定できる: **力学質量 (dynamical mass)**  
$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{circ}}^2 r}{G}$$

(実際にはもっと複雑だが…)
- 銀河円盤の星やガスから推定される力学質量の分布はどうなっているのか？

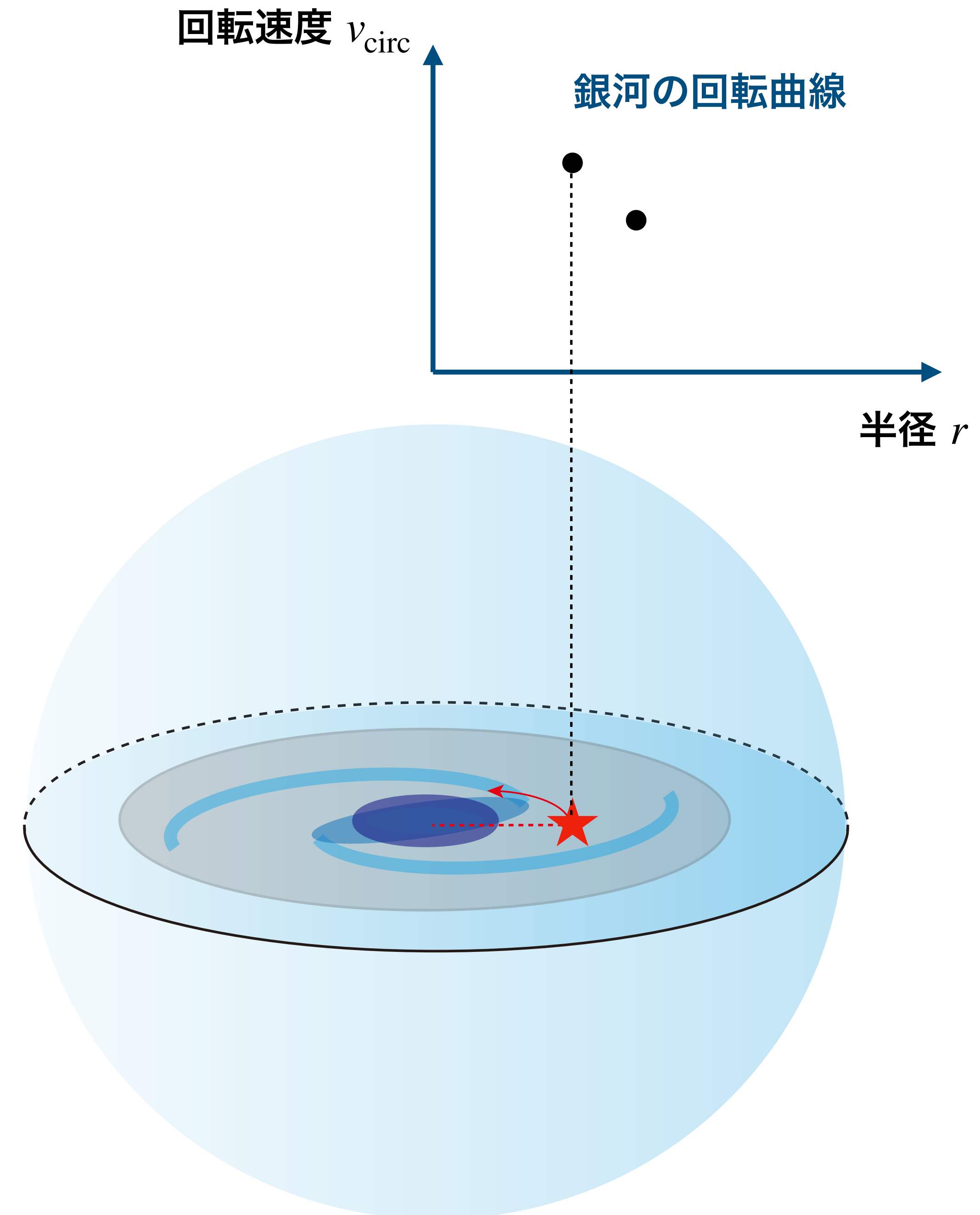




# 銀河の回転曲線

- 重要なのは、内側にある質量(重力源)が回転速度から推定できる: **力学質量 (dynamical mass)**  
$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{circ}}^2 r}{G}$$

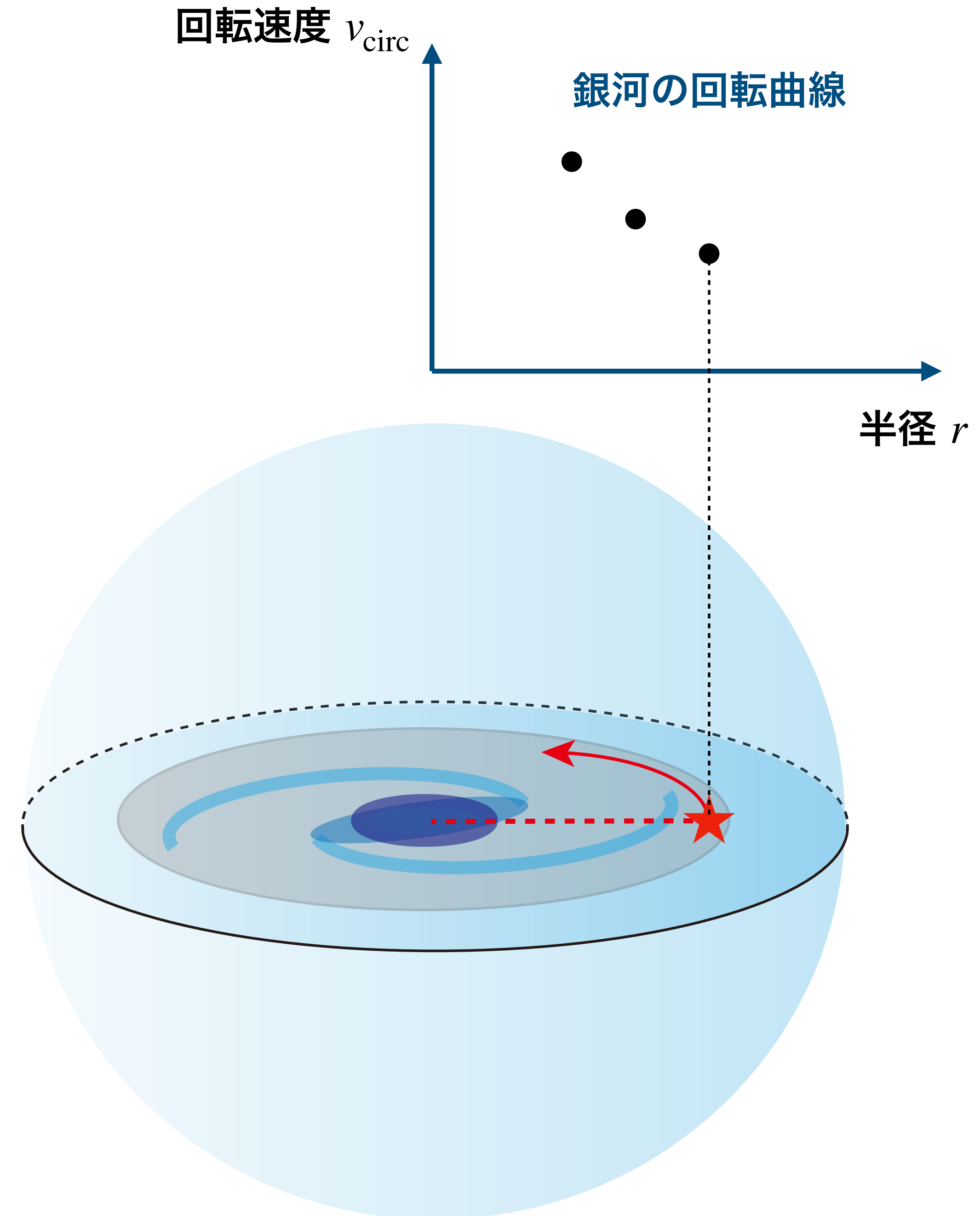
(実際にはもっと複雑だが…)
- 銀河円盤の星やガスから推定される力学質量の分布はどうなっているのか？



# 銀河の回転曲線

- 重要なのは、内側にある質量(重力源)が回転速度から推定できる: **力学質量 (dynamical mass)**  
$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{circ}}^2 r}{G}$$

(実際にはもっと複雑だが…)
- 銀河円盤の星やガスから推定される力学質量の分布はどうなっているのか？



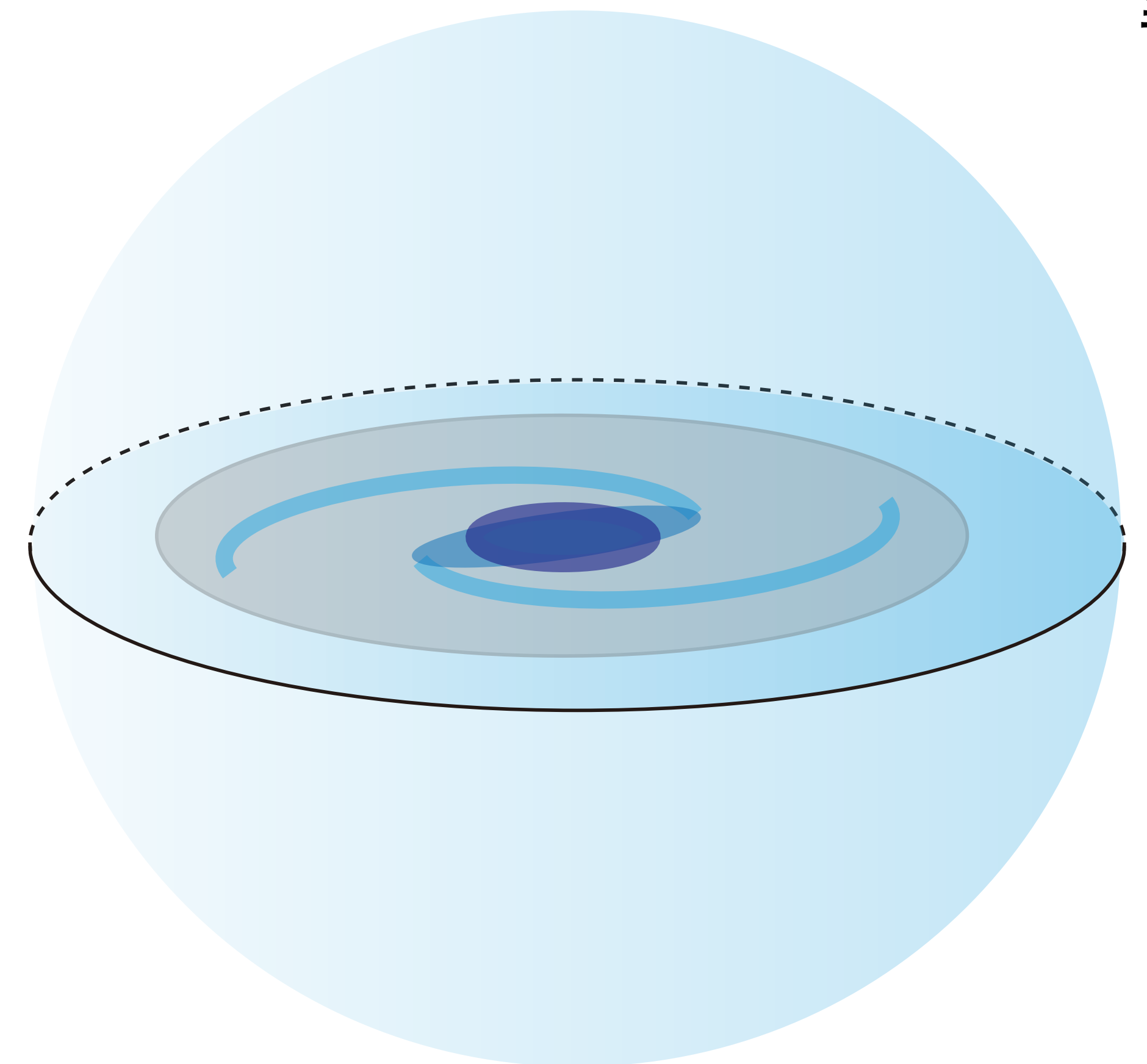
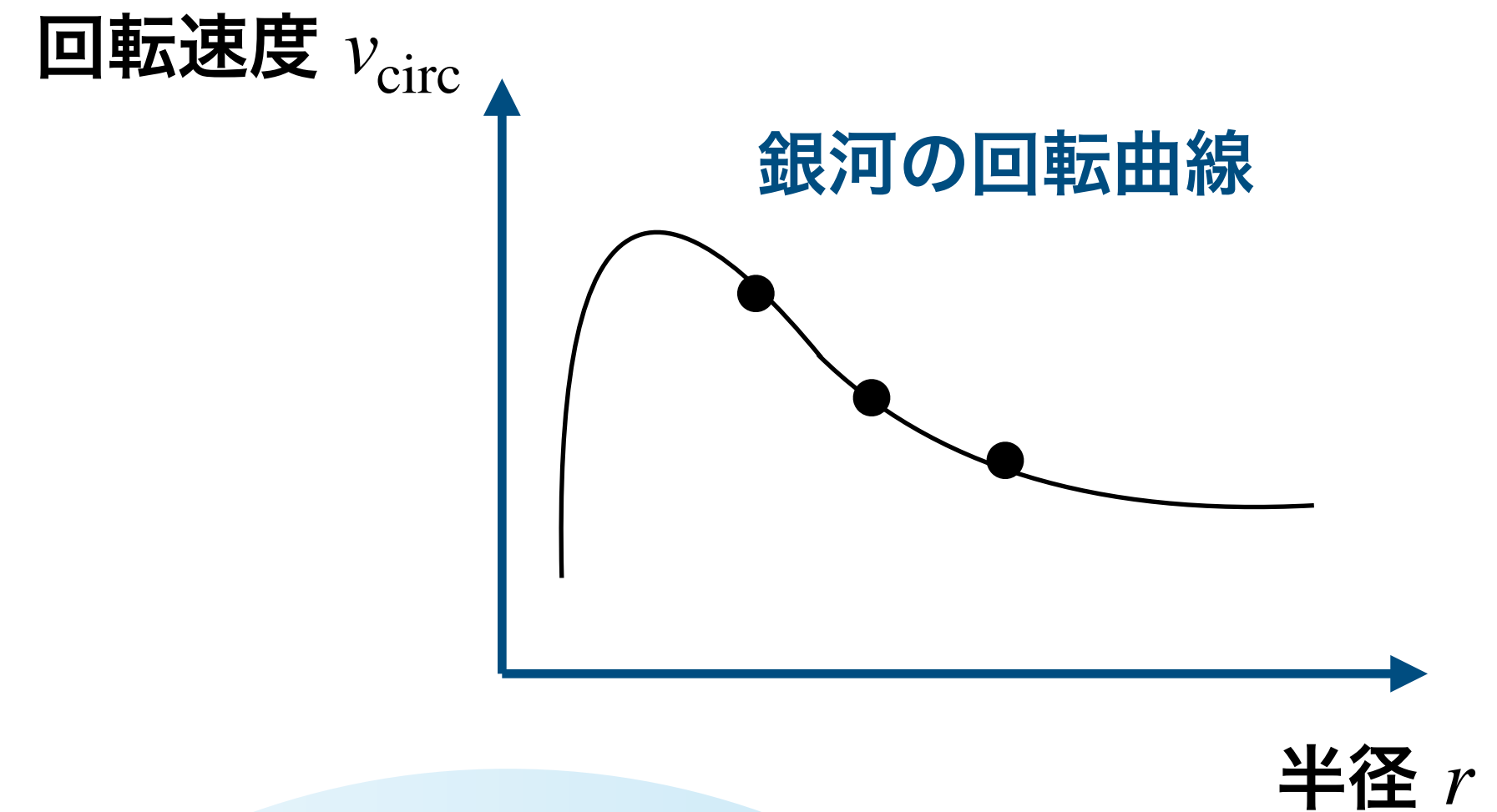
# 銀河の回転曲線

- 重要なのは、内側にある質量(重力源)が回転速度から推定できる: **力学質量 (dynamical mass)**

$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{circ}}^2 r}{G}$$

(実際にはもっと複雑だが…)

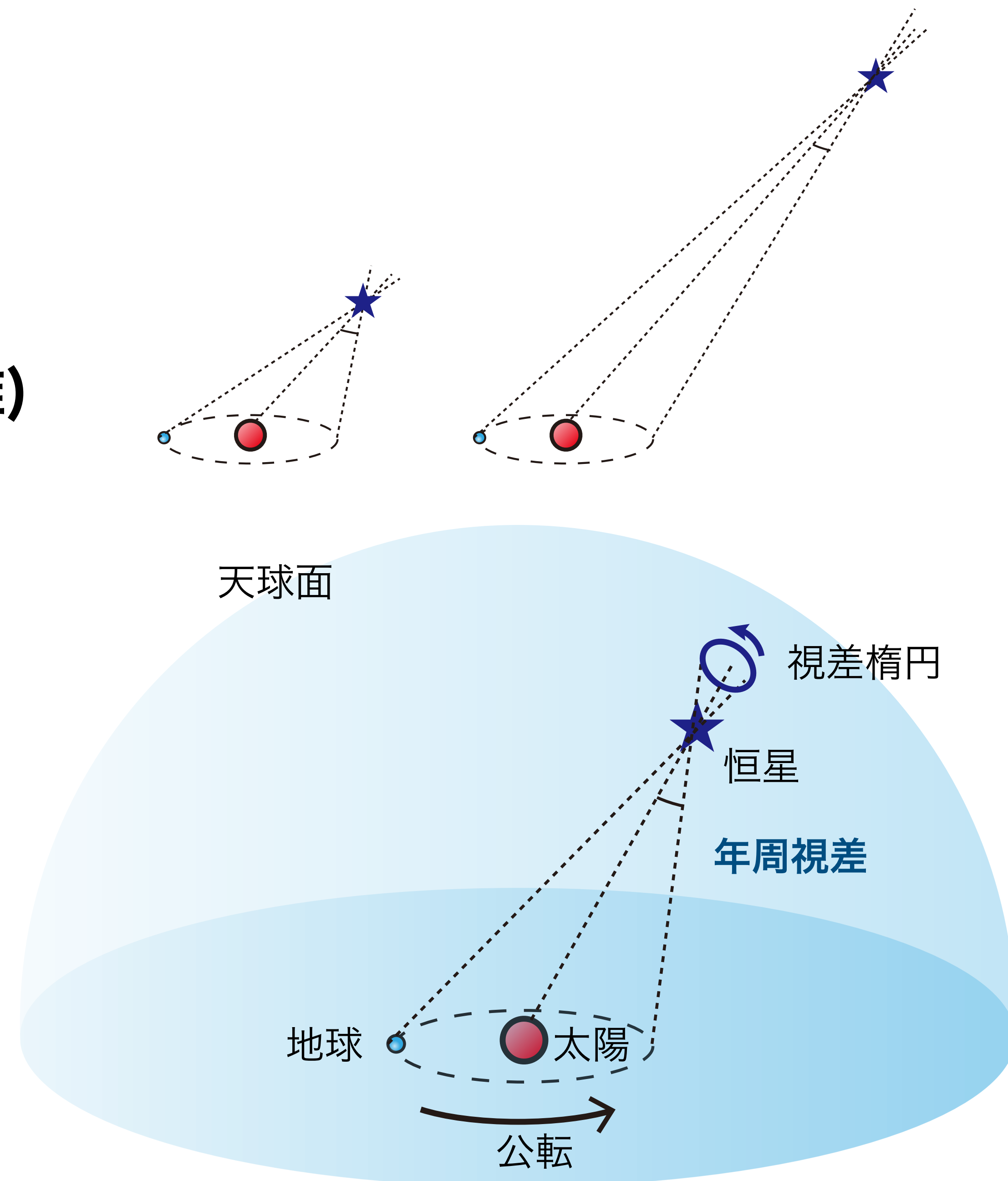
- 銀河円盤の星やガスから推定される力学質量の分布はどうなっているのか？





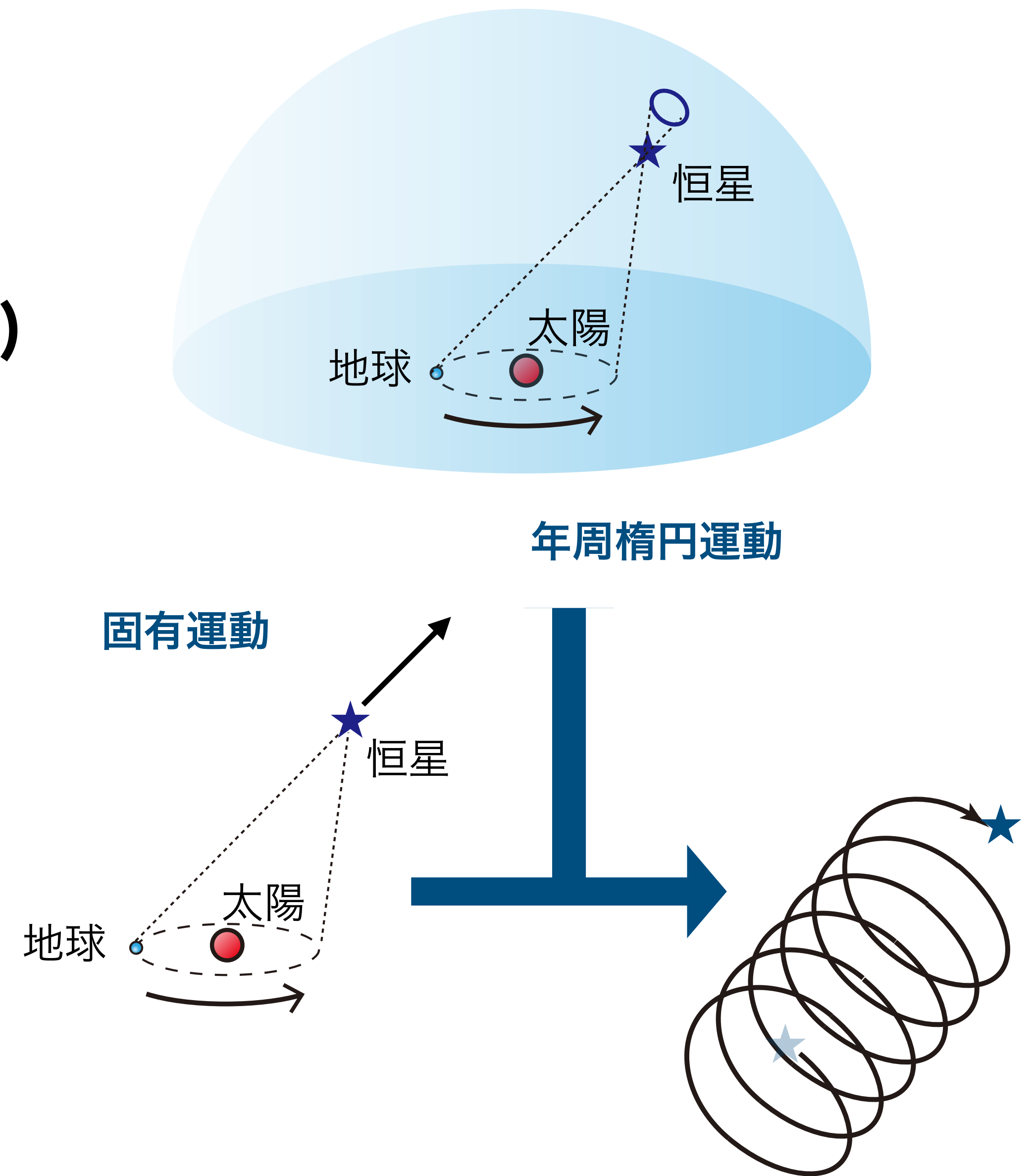
# 銀河回転の観測

- 銀河内での **3次元的な星の位置(方向と距離)** と **速度(3成分)** が必要
- **年周視差** による距離決定(第4回)
- **固有速度** の測定
- **ドップラー法** による視線方向速度の測定
- これらを駆使して観測的に求める



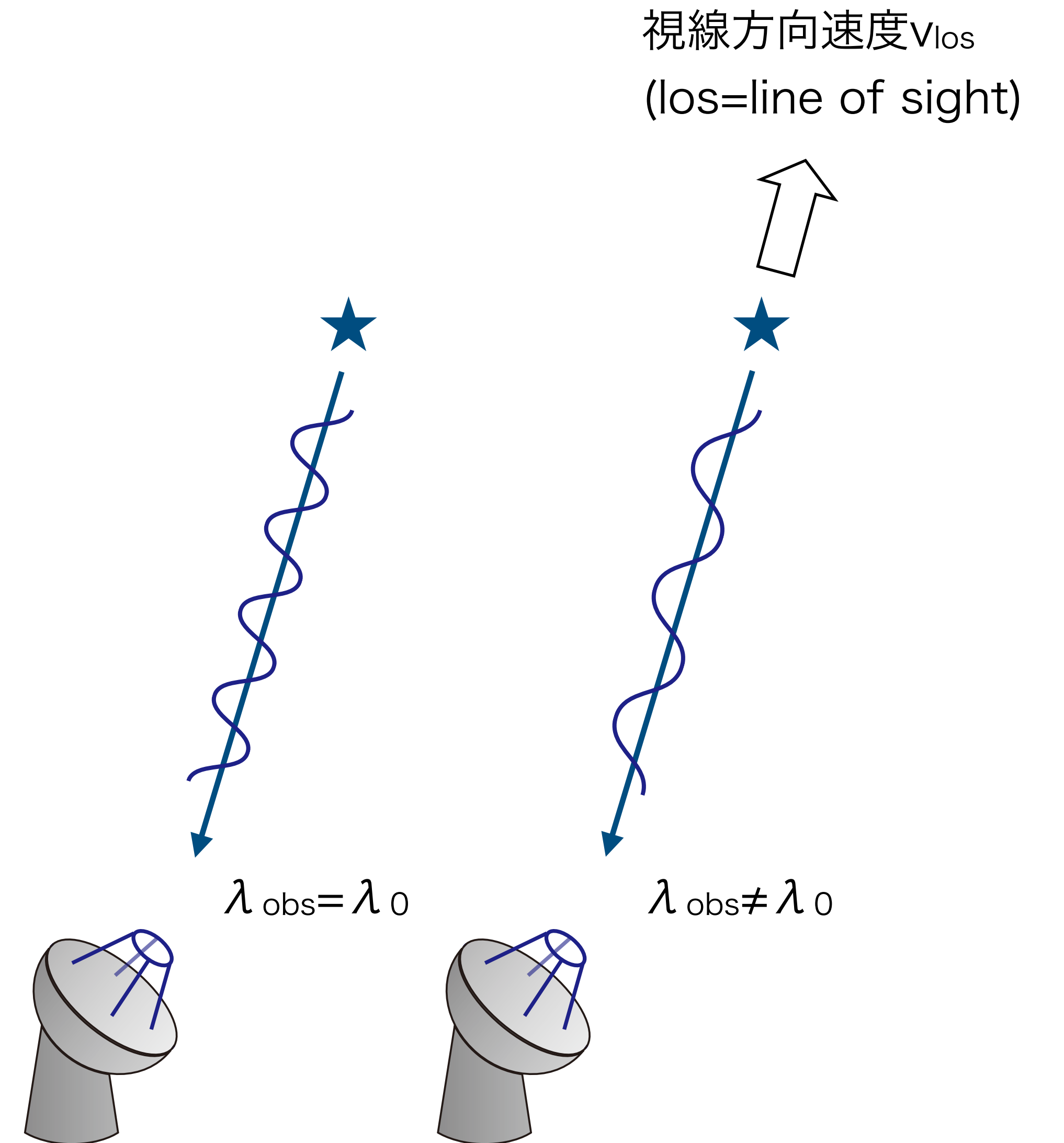
# 銀河回転の観測

- 銀河内での**3次元的な星の位置(方向と距離)**と**速度(3成分)**が必要
- **年周視差**による距離決定(第4回)
- **固有速度**の測定
- **ドップラー法**による視線方向速度の測定
- これらを駆使して観測的に求める



# 銀河回転の観測

- 銀河内での**3次元的な星の位置(方向と距離)**と**速度(3成分)**が必要
- **年周視差**による距離決定(第4回)
- **固有速度**の測定
- **ドップラー法**による視線方向速度の測定
- これらを駆使して観測的に求める



$$\lambda_{\text{obs}} = \left(1 + \frac{v_{\text{los}}}{c}\right) \lambda$$

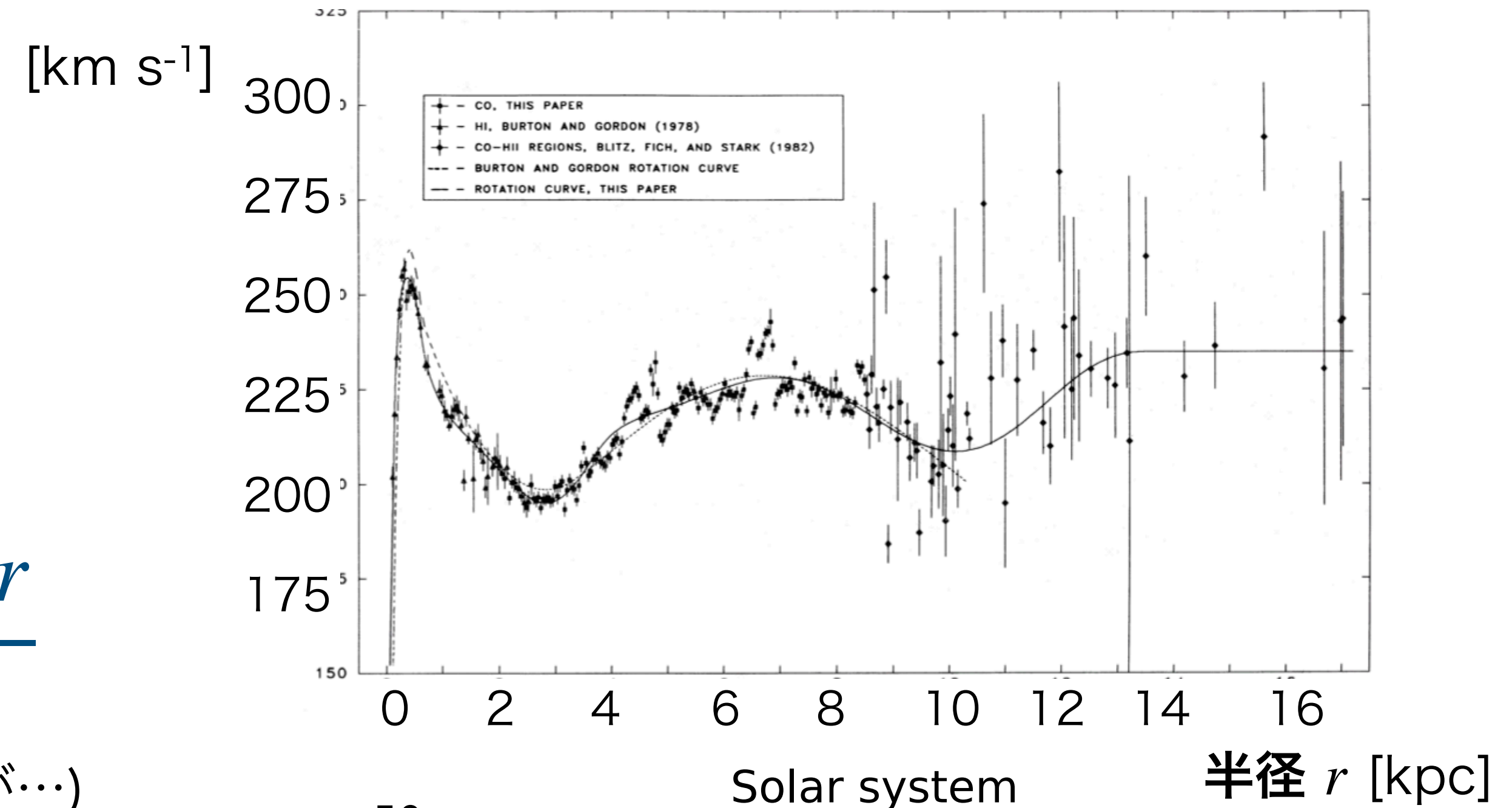
(非相対論極限:  $v_{\text{los}} \ll c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ )

# 銀河の回転曲線

COガスによる銀河系の回転曲線

Clemens (1985) ApJ, 295, 422

回転速度  $v_{\text{circ}}$  <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985ApJ...295..422C>

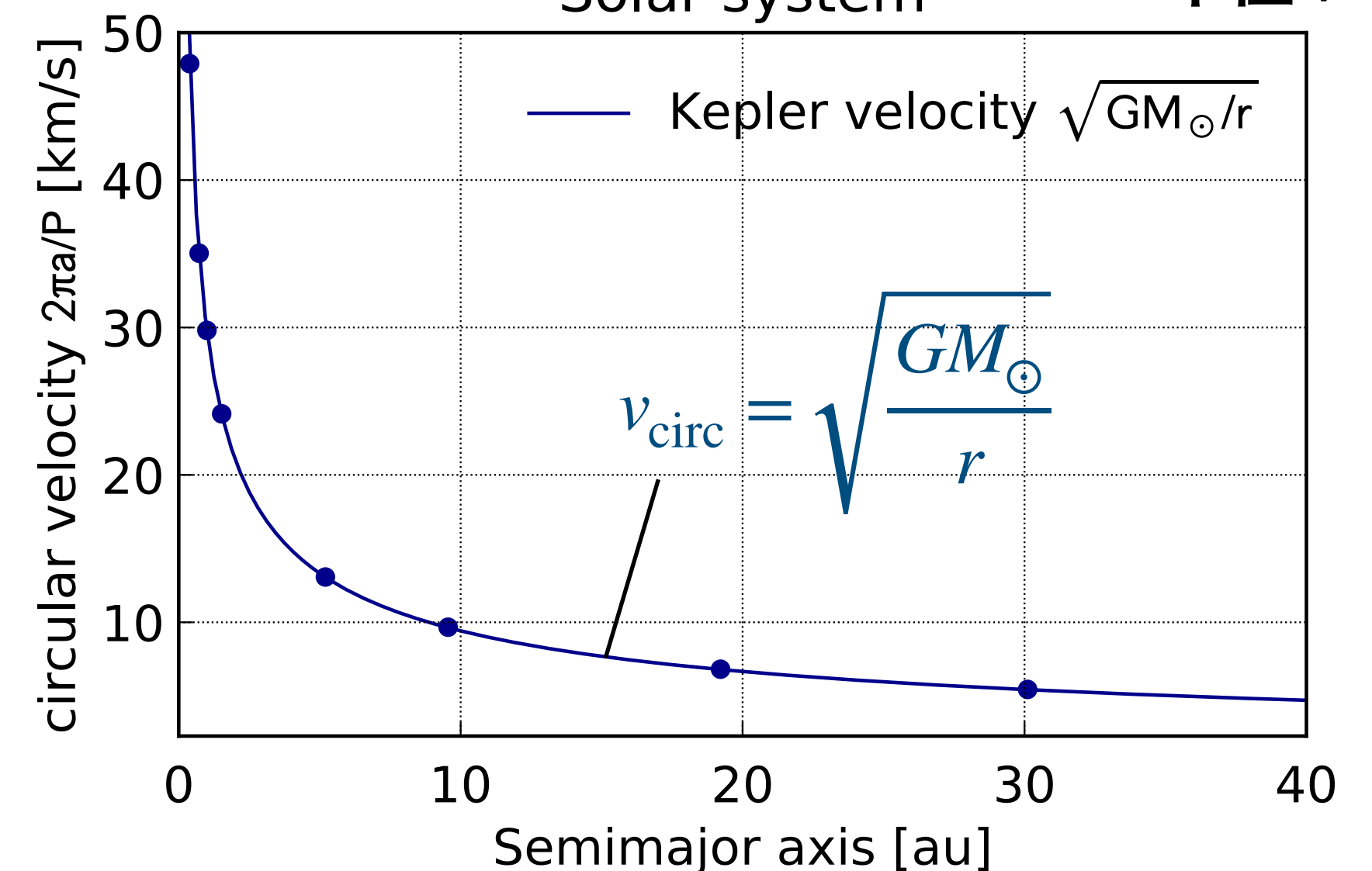


- 重要なのは、内側にある質量(重力源)が回転速度から推定できる: **力学質量 (dynamical mass)**

$$M(< r) \simeq \frac{v_{\text{circ}}^2 r}{G}$$

(実際にはもっと複雑だが...)

- 銀河円盤の星やガスから推定される力学質量の分布はどうなっているのか?
- 太陽系と違い、外側へ行っても遅くならない?





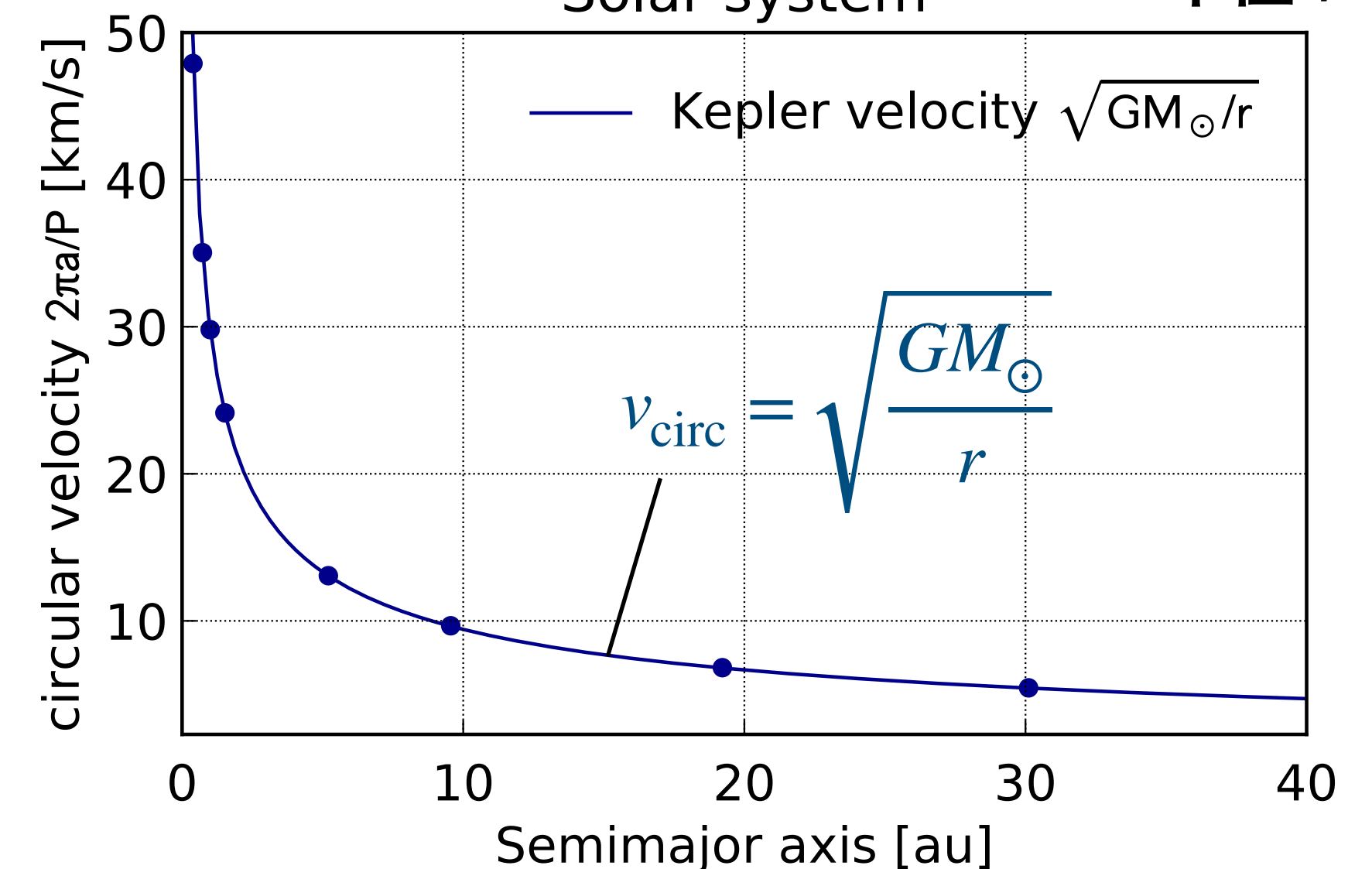
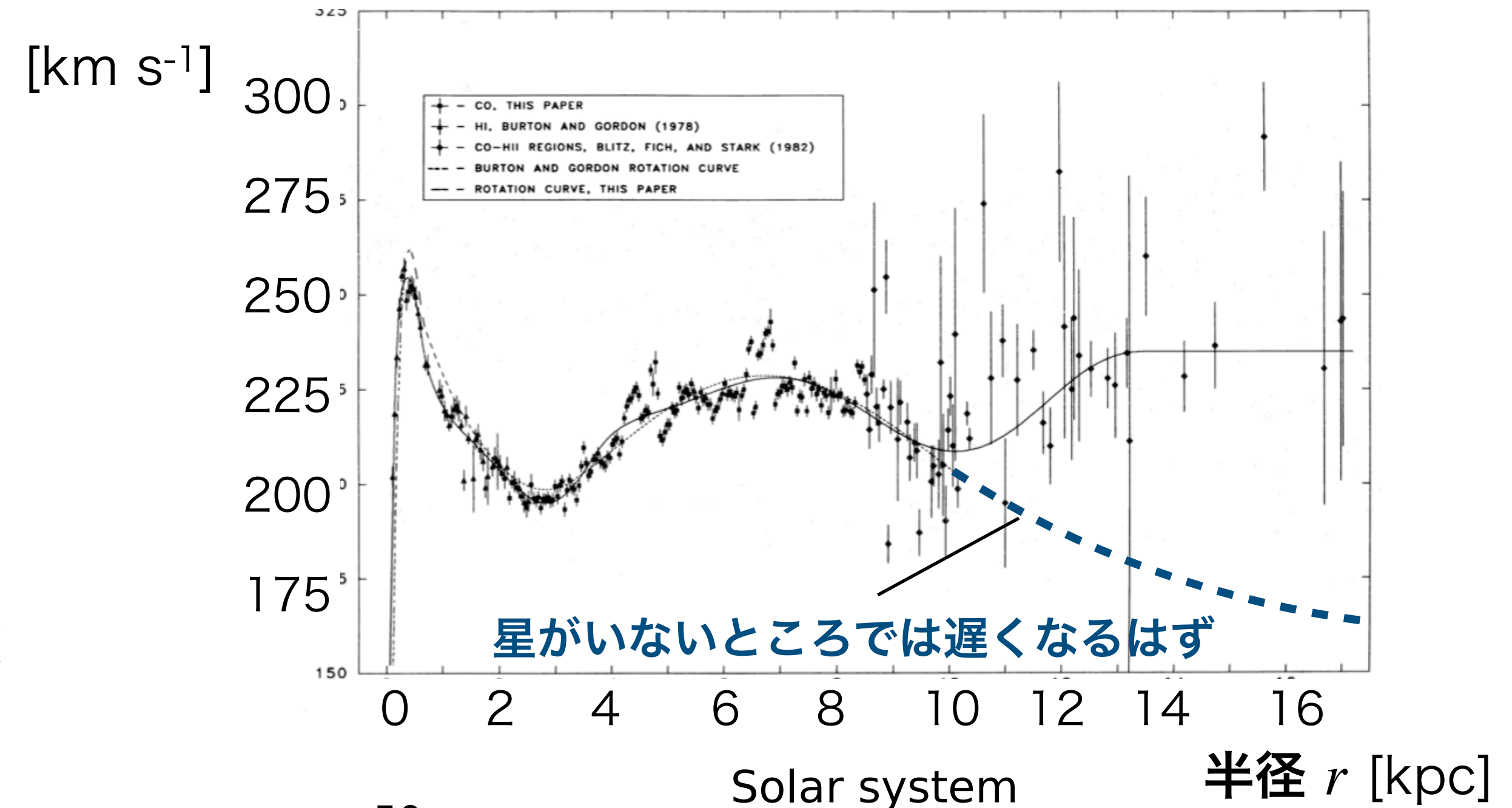
# 銀河の回転曲線

- スケールは違うが、支配している物理法則は同じ(万有引力)
- 太陽系と銀河系では質量の分布が異なる
- しかし、観測されている星の質量とその広がりを考慮してみても…
- 予想と観測が合致しない！

COガスによる銀河系の回転曲線

Clemens (1985) ApJ, 295, 422

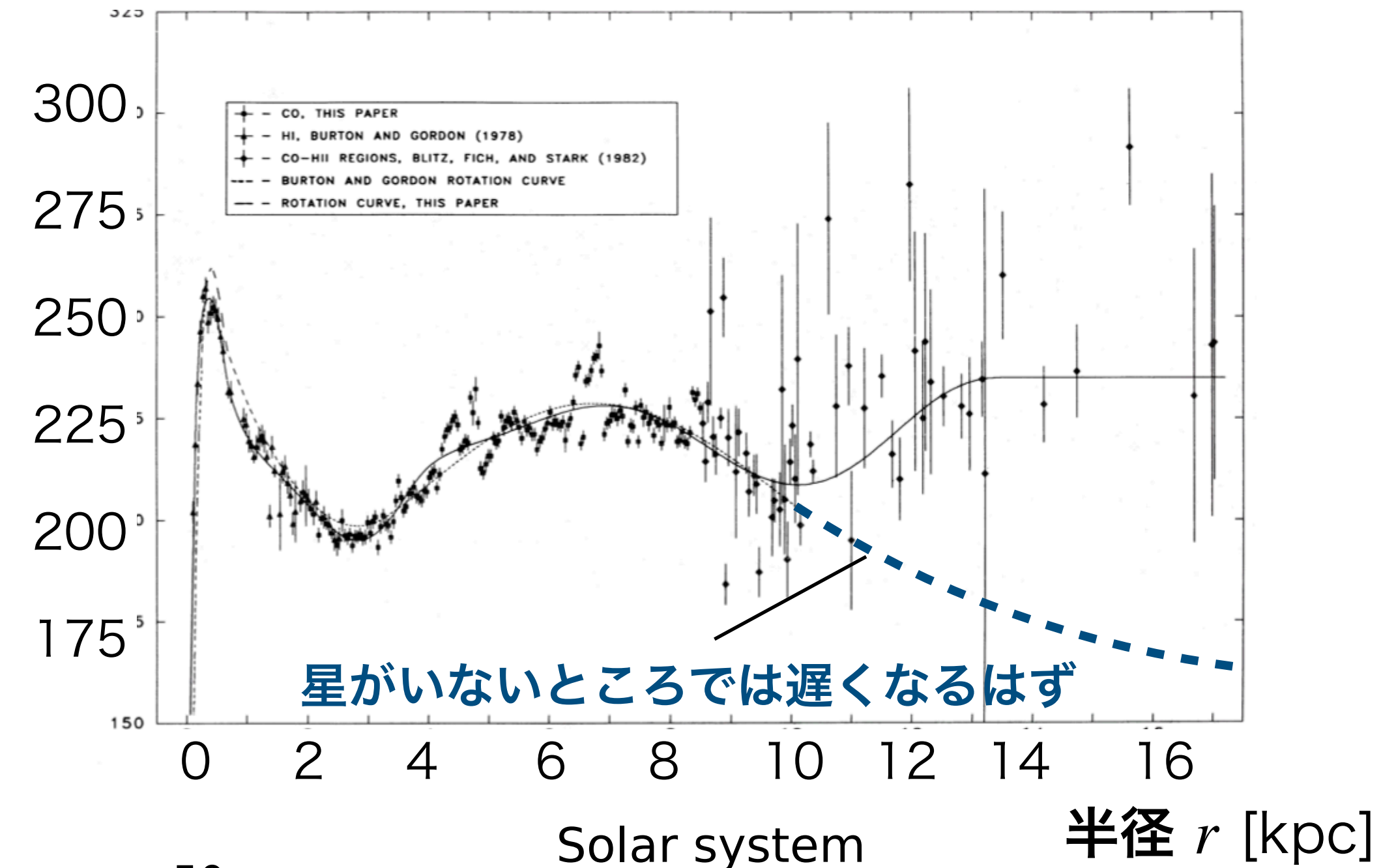
回転速度  $v_{\text{circ}}$  <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985ApJ...295..422C>



# 暗黒物質 (dark matter)

回転速度  $v_{\text{circ}}$  <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985ApJ...295..422C>

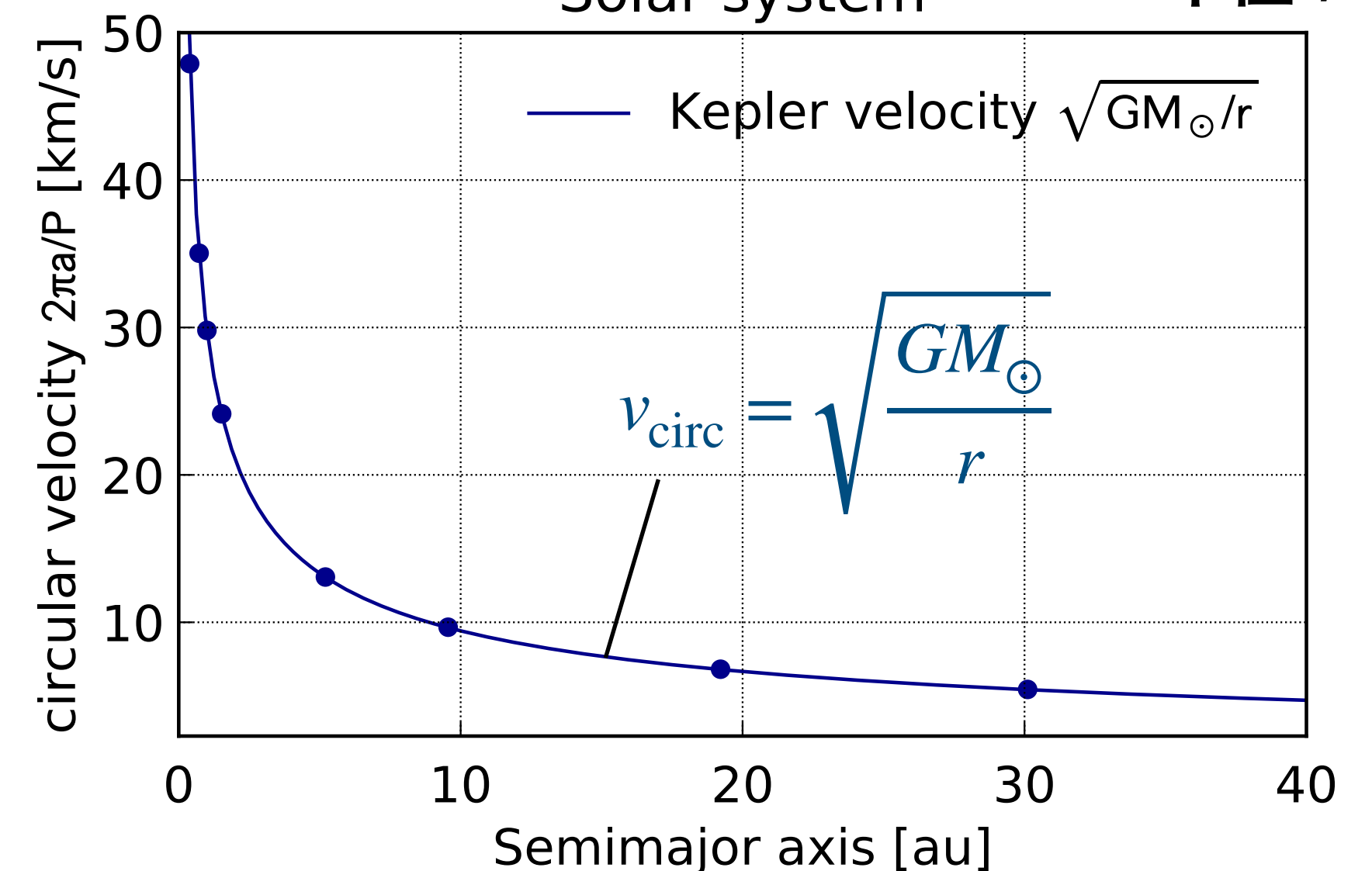
[km s<sup>-1</sup>]



- 銀河系には半径の大きなところでも星やガスを速く回転させている”**広がった見えない重力源**”が存在する

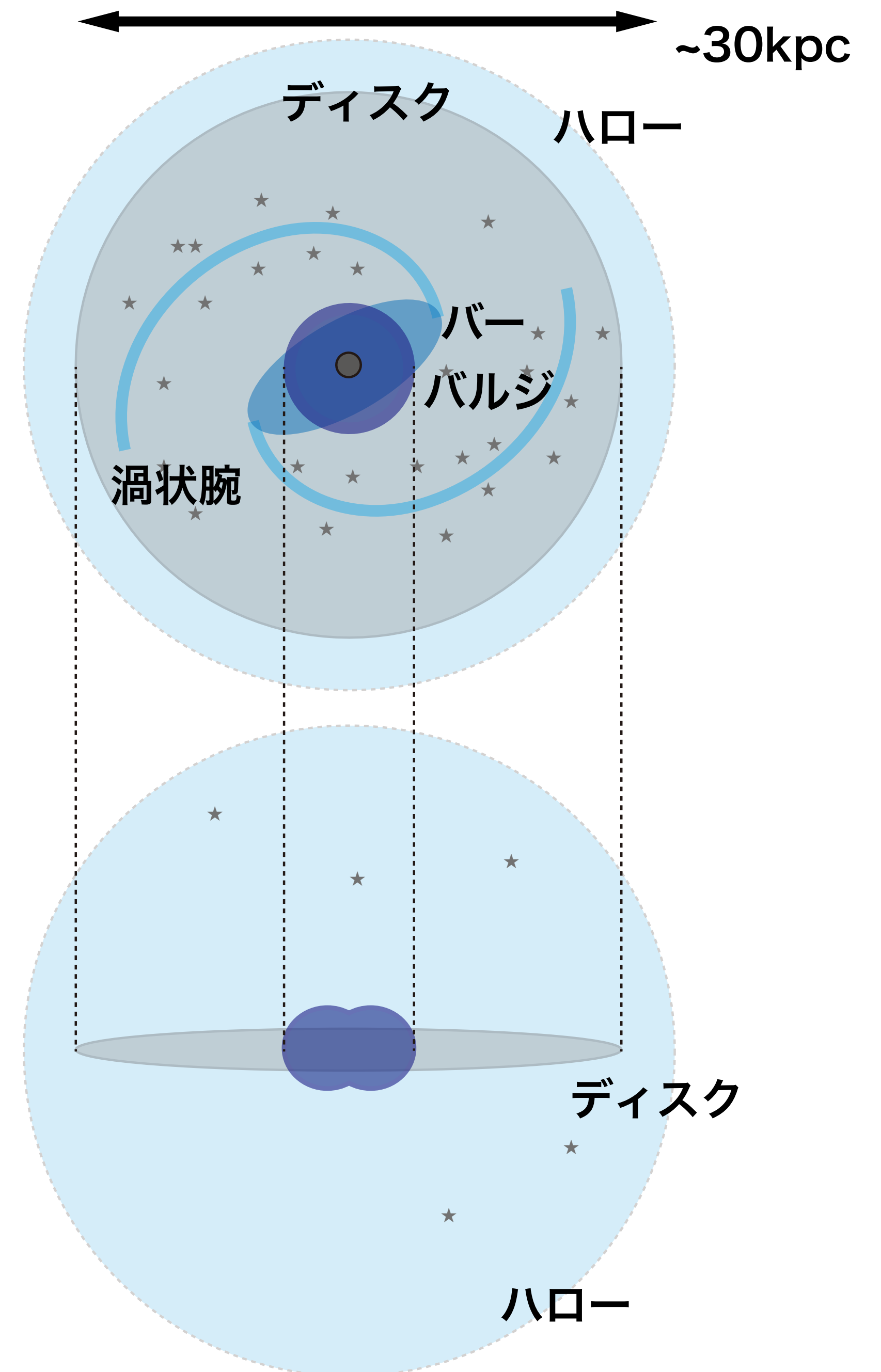
- 暗黒物質 (dark matter)**: 現在の電磁波による観測では見えないが、重力を及ぼす

- どのくらいの質量が？



# 天の川銀河の構造

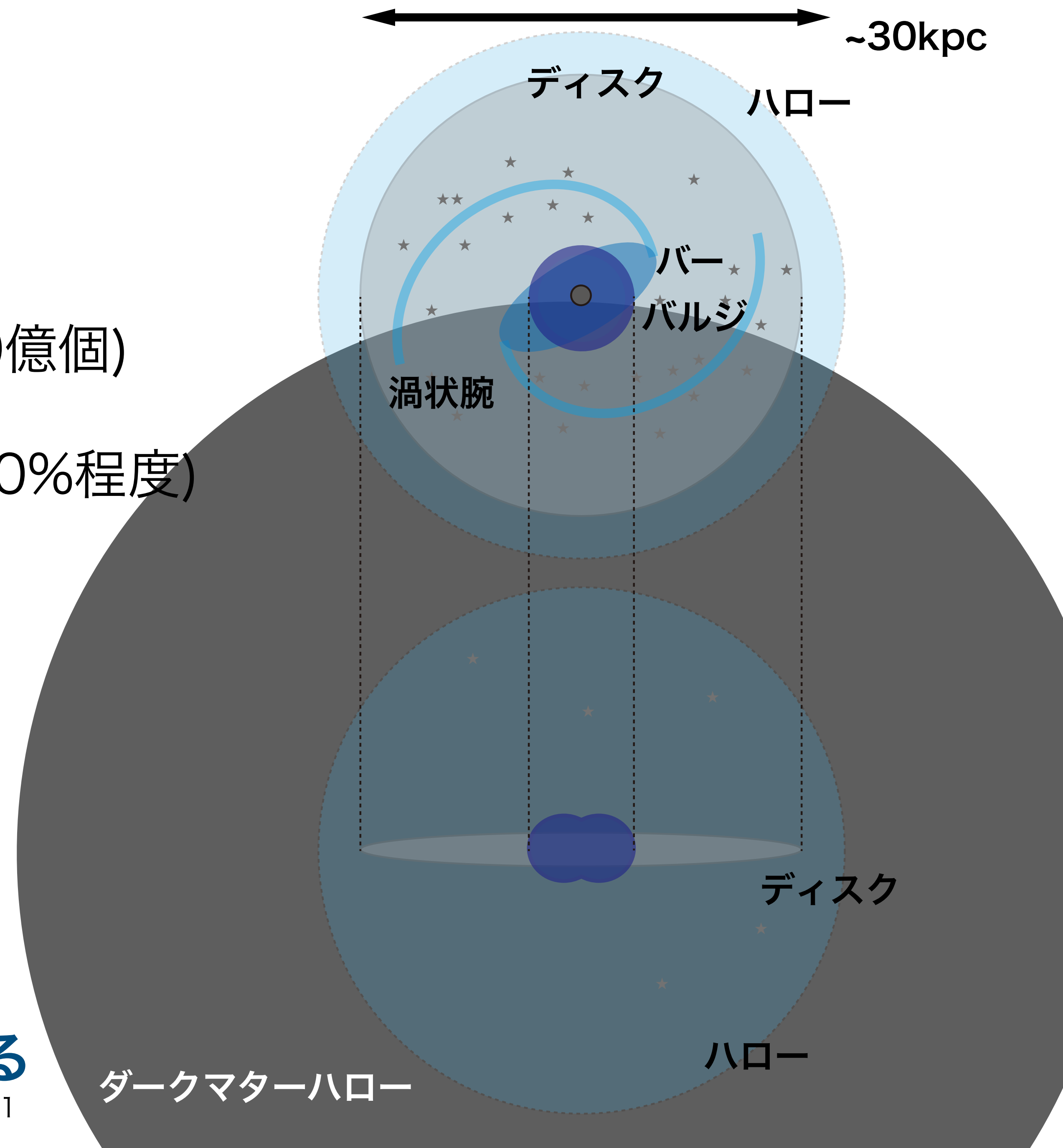
- 星質量 =  $(5-7) \times 10^{10} M_{\odot}$  (1000-4000億個)
- ガス質量  $\approx 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$  (星質量の~10%程度)
- 中心の超大質量BH = 約  $4 \times 10^6 M_{\odot}$
- **力学的質量 = 約  $2 \times 10^{12} M_{\odot}$**
- 現在の星形成率 = 約  $1 M_{\odot}/\text{yr}$



# 天の川銀河の構造

- 星質量 =  $(5-7) \times 10^{10} M_{\odot}$  (1000-4000億個)
- ガス質量  $\approx 10^9 - 10^{10} M_{\odot}$  (星質量の~10%程度)
- 中心の超大質量BH = 約  $4 \times 10^6 M_{\odot}$
- **力学的質量 = 約  $2 \times 10^{12} M_{\odot}$**
- 現在の星形成率 = 約  $1 M_{\odot}/\text{yr}$

**銀河系には星質量+ガス質量の  
数10倍にも及ぶ暗黒物質が存在する**





# 暗黒物質 (dark matter)

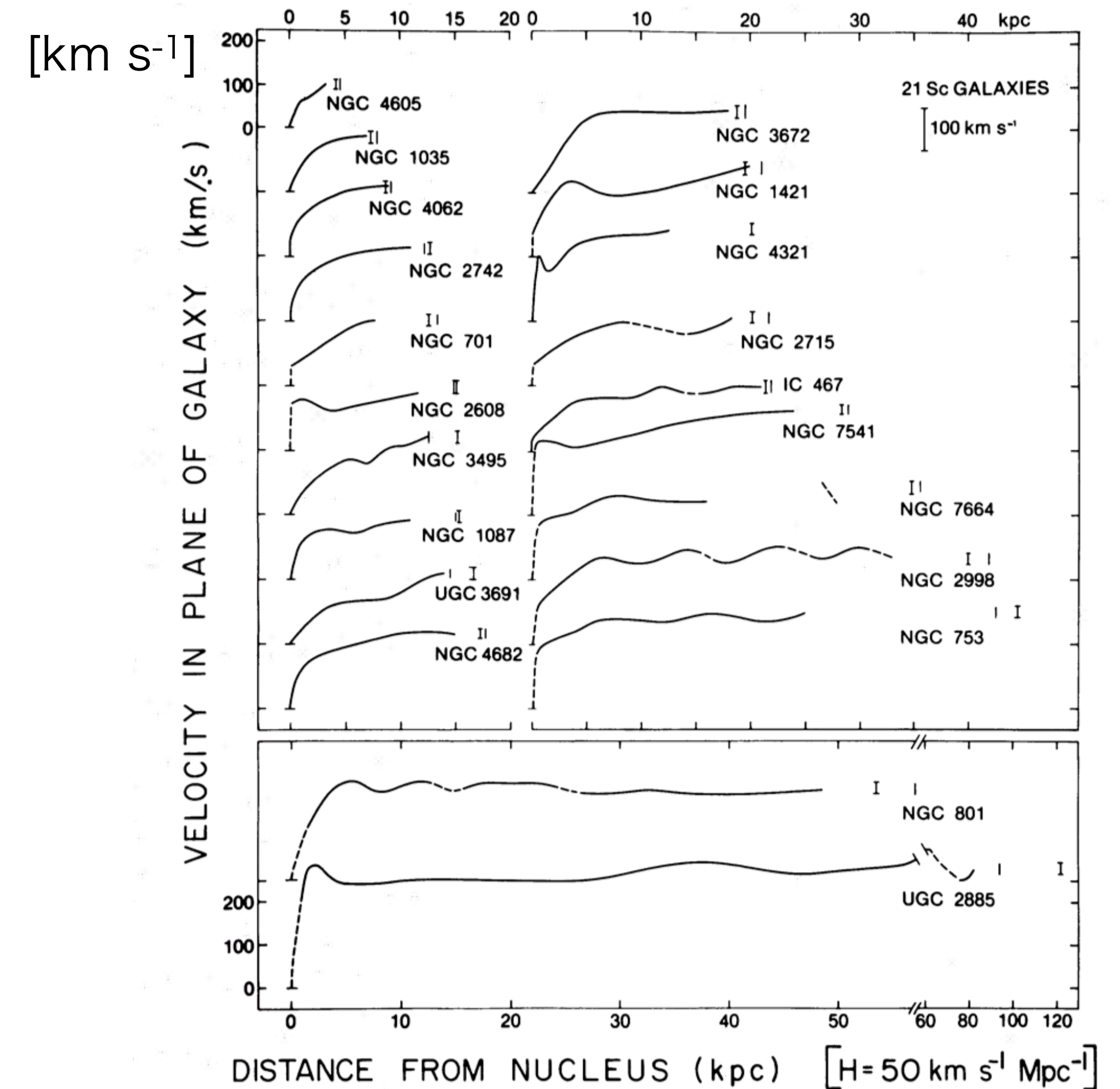
- 銀河系には半径の大きなところでも星やガスを速く回転させている”広がった見えない重力源”が存在する
- 暗黒物質 (dark matter):** 現在の電磁波による観測では見えないが、重力を及ぼす
- おそらく全ての銀河に普遍的に

様々な銀河の回転曲線

Rubin, V.C. et al. (1980) ApJ, 238, 471

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980ApJ...238..471R>

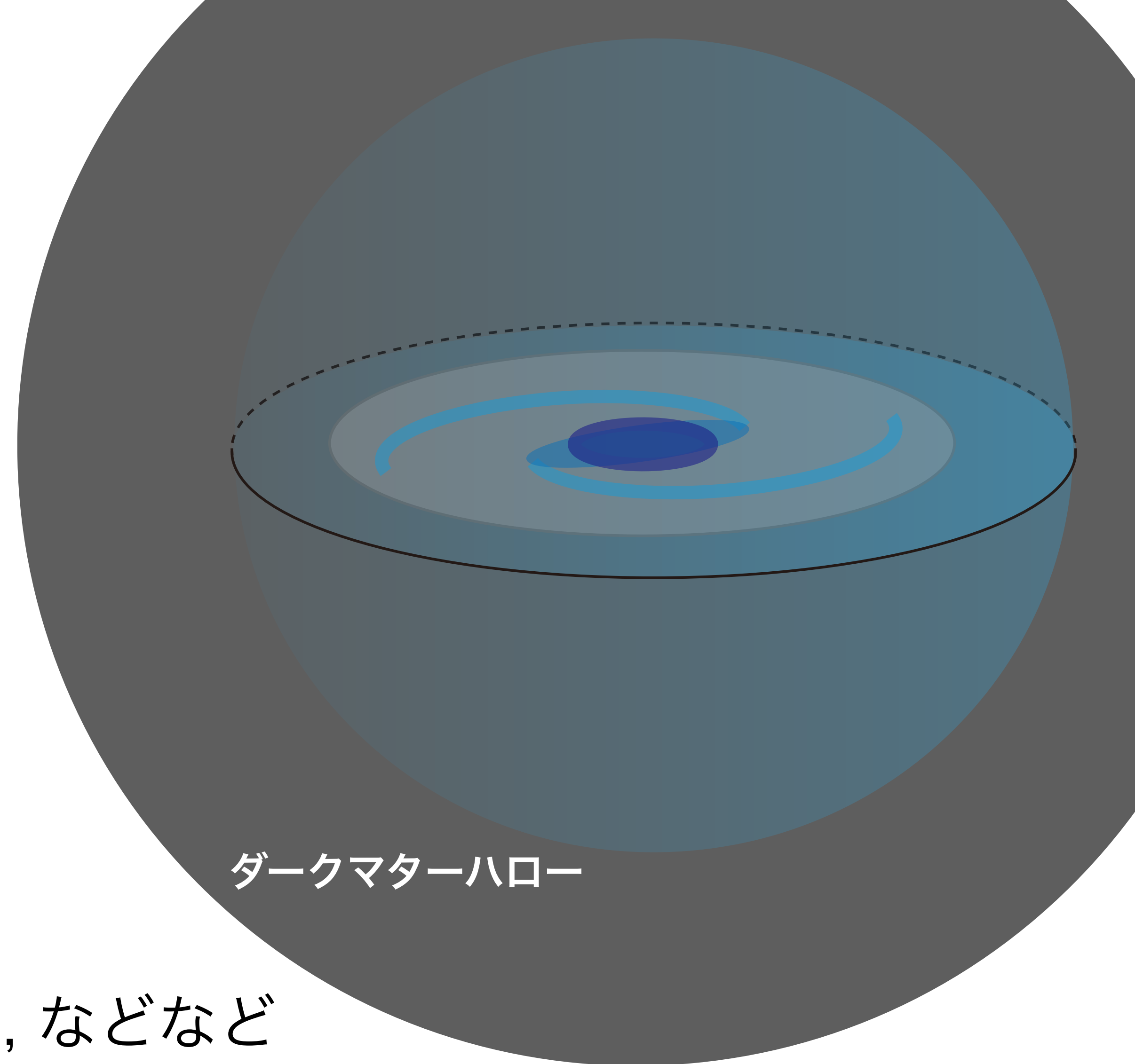
回転速度  $v_{\text{circ}}$



半径  $r$  [kpc]

# 暗黒物質(dark matter)

- 正体は一体なんなのか？
- わかりません
- 現代天文学における最重要問題の一つ
- 様々な起源が提唱されている段階
- 天体起源: 原始ブラックホール, 褐色矮星, などなど
- 素粒子起源: 超対称性粒子, アクシオン, などなど



# 第8回:

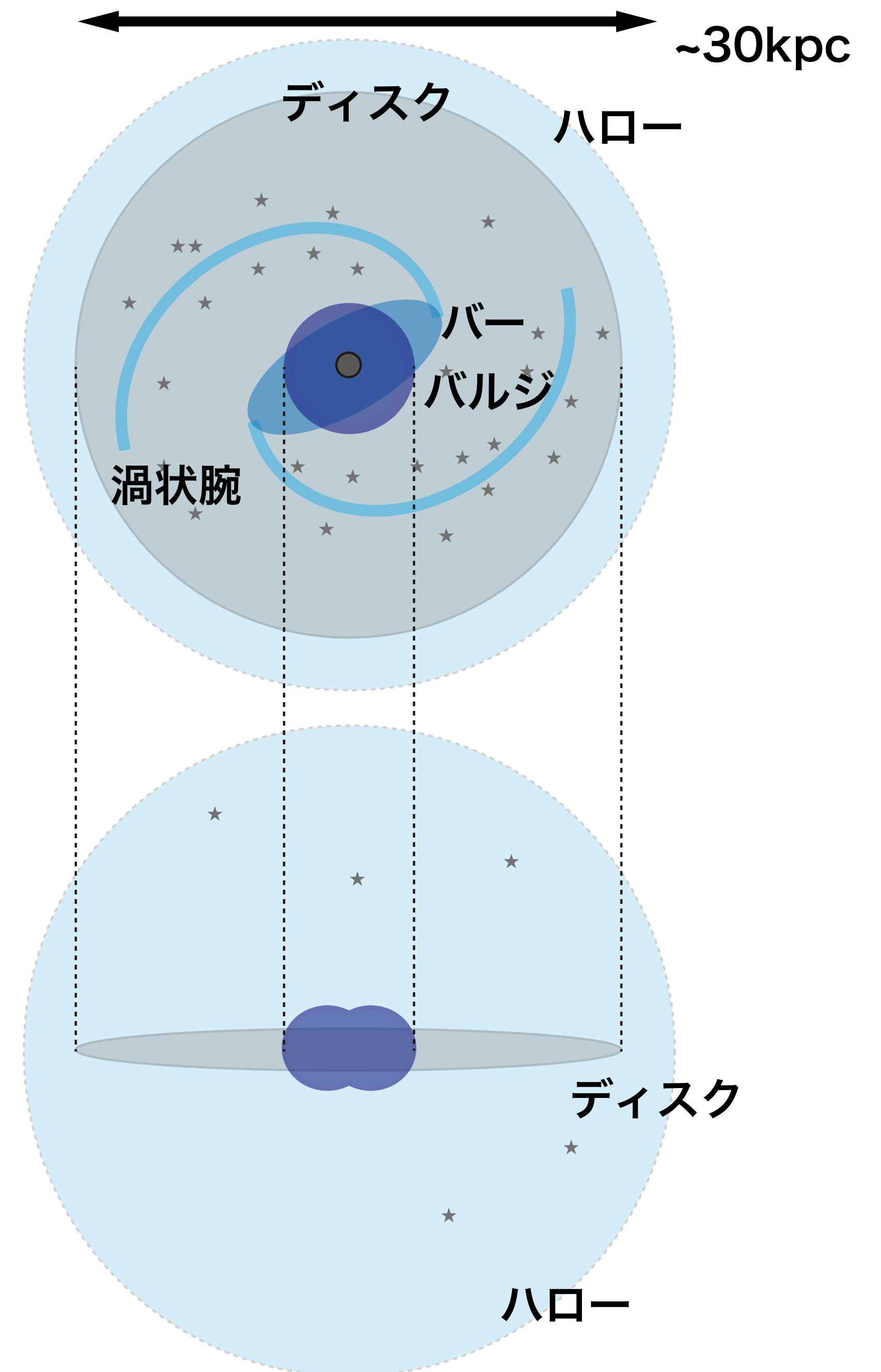
## 銀河1

### -銀河系の構成要素-

- 天の川銀河とその構成要素
- 銀河系と暗黒物質(ダークマター)
- **銀河系の進化史に迫る**

# 天の川銀河の構造

- **円盤構造(ディスク)**: 厚いディスク + 薄いディスク, 直径約30kpc, 厚み数100pc-1kpc
- **渦状腕**: 特徴的な渦巻き構造, 若い星が集中して分布している
- **バー構造**: 中心付近にある渦状腕をつなぐような構造
- **ハロー**: ディスクや渦状腕を取り巻く球状に星が分布した構造, 比較的古い星から成る





# 銀河は成長・合体する

- 銀河の外からのガスの降り積もり (**降着: accretion**)
- 銀河同士の合体 (**galaxy merger**)
- 銀河系の成長はどのようにして起こってきたのか？
- 銀河系内の星の分布やその年齢・力学的特性を調べる



ハッブル宇宙望遠鏡による合体する銀河Arp 87の画像

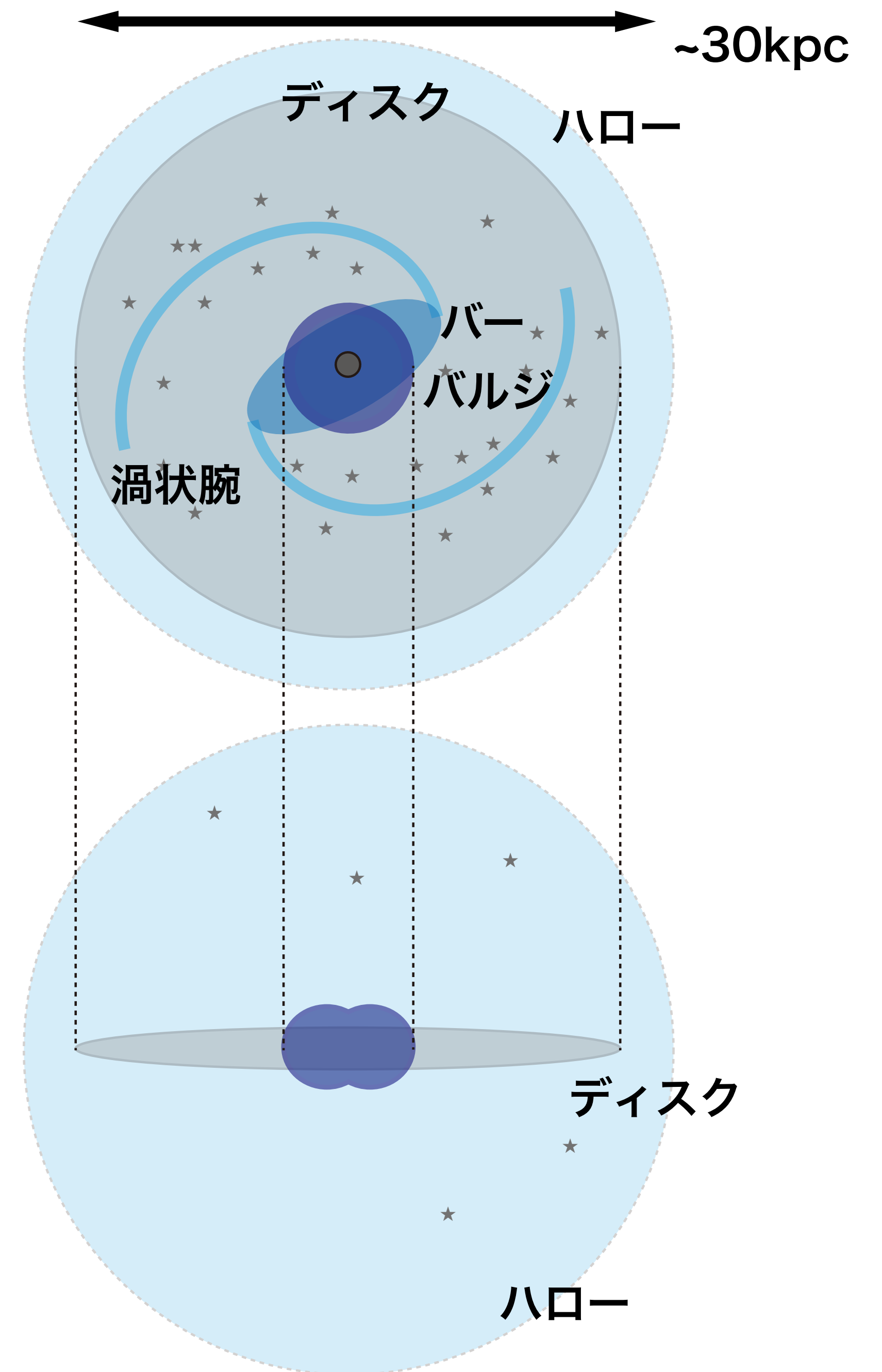
Credit: NASA, ESA, Hubble Space Telescope;

Processing: Douglas Gardner

<https://apod.nasa.gov/apod/ap151209.html>

# 銀河系ハロー内の古い星

- 古い星=早い段階で形成された星
- 含まれる金属(H,He以外の元素)の量が少ない
- 古い星の運動を調べることで、その起源を探ることができる
- 位置天文衛星ガイア(2013-)

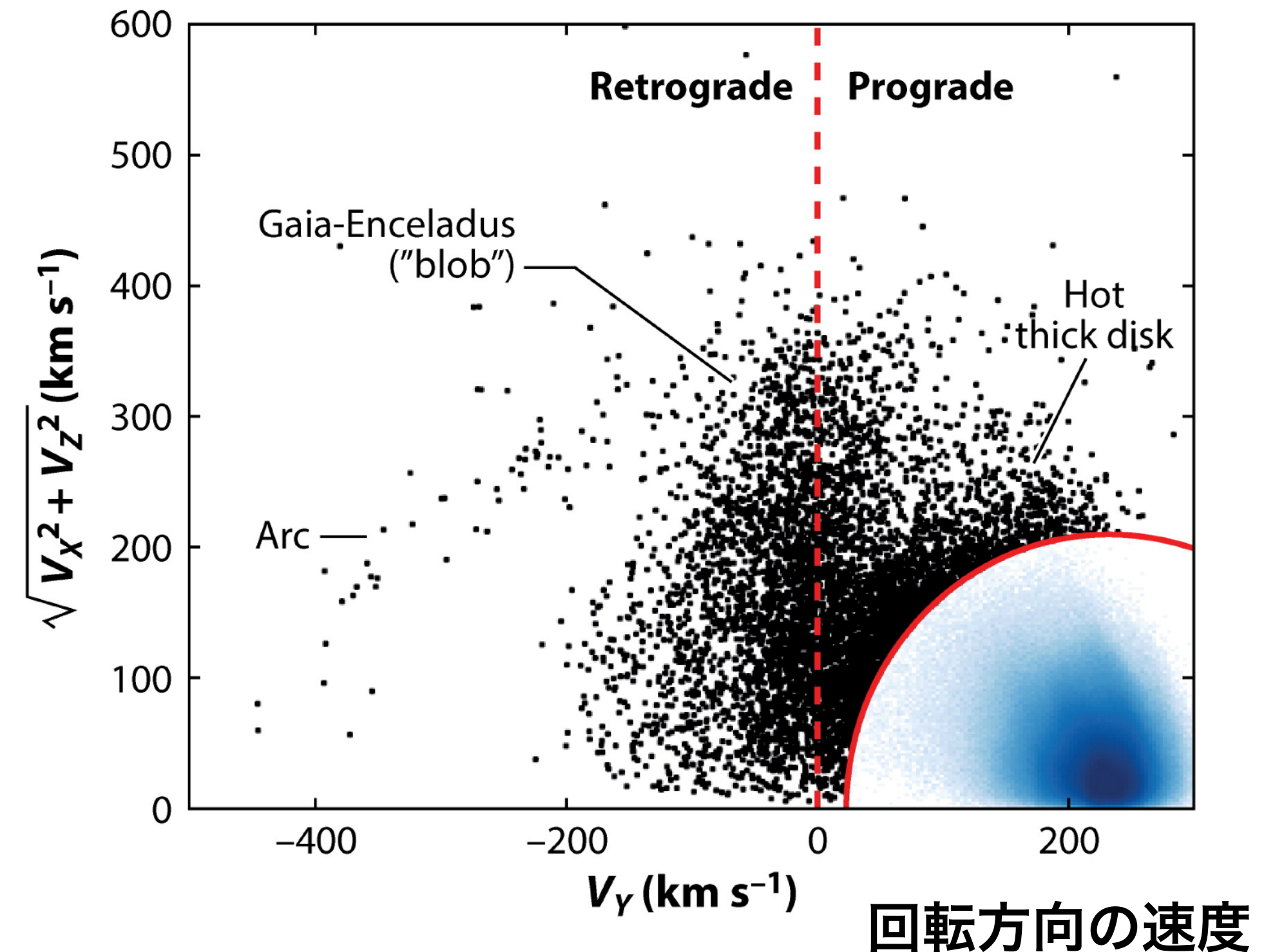




# 銀河系ハロー内の古い星

- 太陽近傍では、多くの星が約200km/sで回転している(円盤成分)
- 一方で、ハローに含まれる星の中には、ほぼ回転していないものや、円盤の回転に逆行している星の集団がいる
- それらの星を調べてみると、どれも古い

b 動径,鉛直方向の速度



ガイア衛星によって得られた、太陽近傍の星の速度マップ

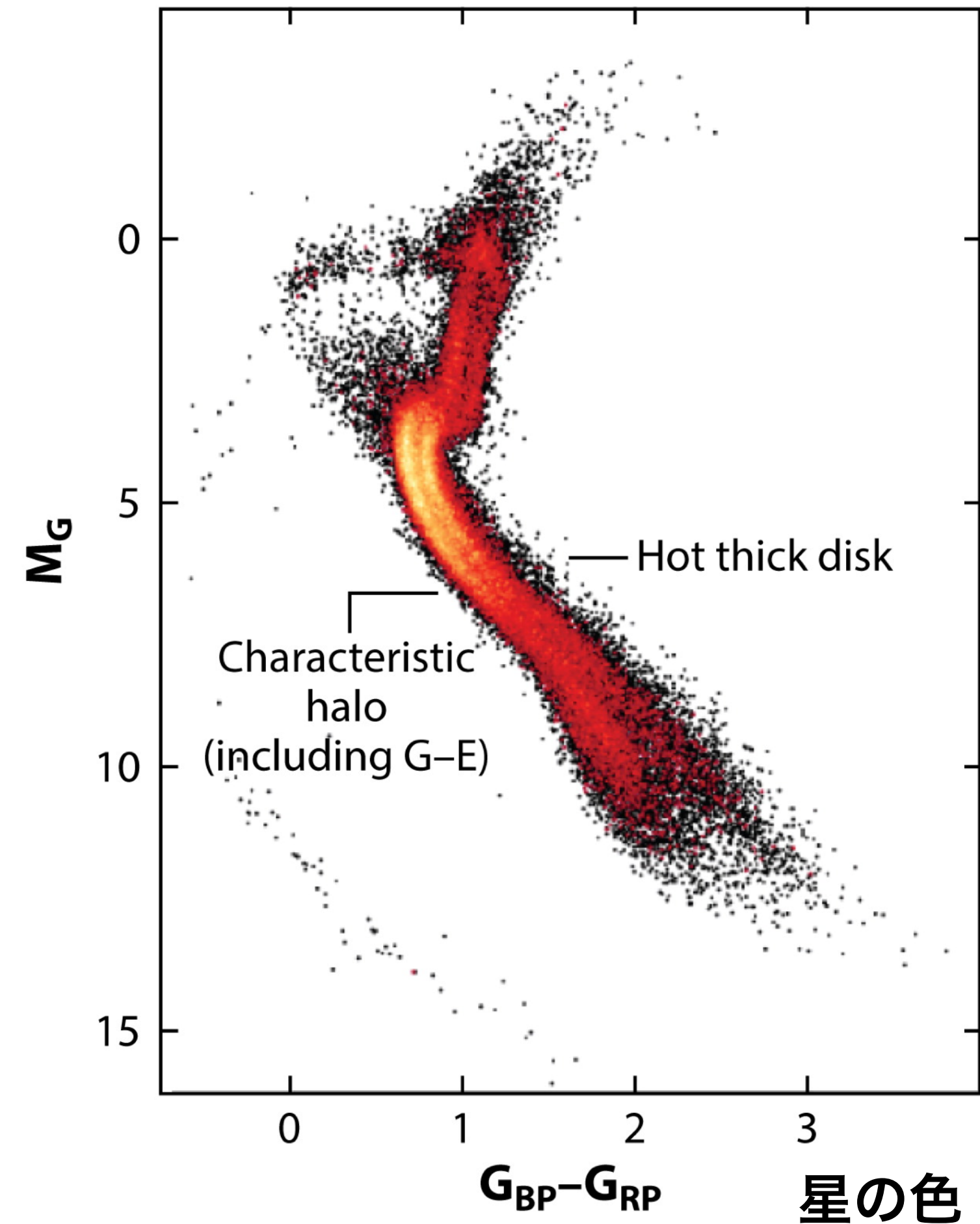
Credit: Helmi (2020) ARA&A 58 205

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ARA%26A..58..205H>

# 銀河系ハロー内の古い星

- 太陽近傍では、多くの星が約200km/sで回転している(円盤成分)
- 一方で、ハローに含まれる星の中には、ほぼ回転していないものや、円盤の回転に逆行している星の集団がいる
- それらの星を調べてみると、どれも古い
- HR図に主系列が2本？

a 星の明るさ



ガイア衛星によって得られた、銀河系ハローのHR図

Credit: Helmi (2020) ARA&A 58 205

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ARA%26A..58..205H>



# 銀河系ハロー内の古い星

- 銀河系の古い星は、起源の異なる複数の成分が存在する
- 過去に銀河系が別の矮小銀河と合体し、混ざったものが現在まで生き残っているという説が有望
- **Gaia-Enceladus (ガイア=エンケラドス)**: 約100億年前に起こった銀河系と別の銀河との合体イベント



ハッブル宇宙望遠鏡による合体する銀河Arp 87の画像

Credit: NASA, ESA, Hubble Space Telescope;

Processing: Douglas Gardner

<https://apod.nasa.gov/apod/ap151209.html>