



# **Astronomia Galáctica** **Semestre: 2019.1**

Sergio Scarano Jr  
27/08/2019

## As Constantes de Oort

O resultado final é então:

$$A = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Theta_0}{R_0} - \left( \frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right] \quad B = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\Theta_0}{R_0} + \left( \frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} \right]$$

De modo que:

$$A = -\frac{1}{2} R_0 \left( \frac{d\Omega}{dR} \right)_{R_0} \quad e \quad B = A - \Omega_0$$

E também:

$$\Omega_0 = \frac{\Theta_0}{R_0} = A - B \quad e \quad \left( \frac{d\Theta}{dR} \right)_{R_0} = -(A + B)$$

# Valores da Velocidade Rotacional Local

90

Table 4.

|                                                                                |                               |                                | (km s <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1974                                                                           | Cruz-Gonzalez                 | Stars < 25 pc                  | 228 ± 24              |
| 1974                                                                           | Mathewson <i>et al.</i>       | Magellanic Stream data         | 220                   |
| 1974                                                                           | Isobe                         | High-velocity stars            | 275                   |
| 1975                                                                           | Woltjer                       | Globular cluster motions       | 200–225               |
| 1978                                                                           | Knapp <i>et al.</i>           | H I at edges of disc           | 220                   |
| 1978                                                                           | Hartwick & Sargent            | Dwarf spheroidals              | 220                   |
| 1979                                                                           | Einasto                       | Best fit of galactic constants | 225 ± 10              |
| 1979                                                                           | Einasto <i>et al.</i>         | Halo globular clusters         | 212                   |
| 1979                                                                           | Einasto <i>et al.</i>         | Disc population objects        | 230                   |
| 1979                                                                           | Einasto <i>et al.</i>         | Oort limiting velocity         | 225                   |
| 1979                                                                           | Einasto <i>et al.</i>         | Companions of Galaxy           | 220                   |
| 1980                                                                           | Clube & Dawe                  | RR Lyraes                      | 250                   |
| 1980                                                                           | Frenk & White                 | Globular clusters              | 200–225               |
| 1981                                                                           | Lynden-Bell & Frenk           | Globular cluster motions       | 212 ± 16              |
| 1981                                                                           | Shuter                        | H I and CO                     | 184 ± 9               |
| 1985                                                                           | Jackson                       | H I at edges of disc           | 250                   |
| 1983                                                                           | Ostriker & Caldwell           | Model solution                 | 238                   |
| 1984                                                                           | Pier                          | Halo field stars               | ≥ 212                 |
| 1985                                                                           | Rohlf (private communication) | H I                            | 184                   |
| 1985                                                                           | Alvarez                       | CO                             | 214                   |
| Straight mean and the standard deviation<br>(standard error of the mean = 4.9) |                               |                                | 222.2 ± 20            |

## Interpretação de A e B

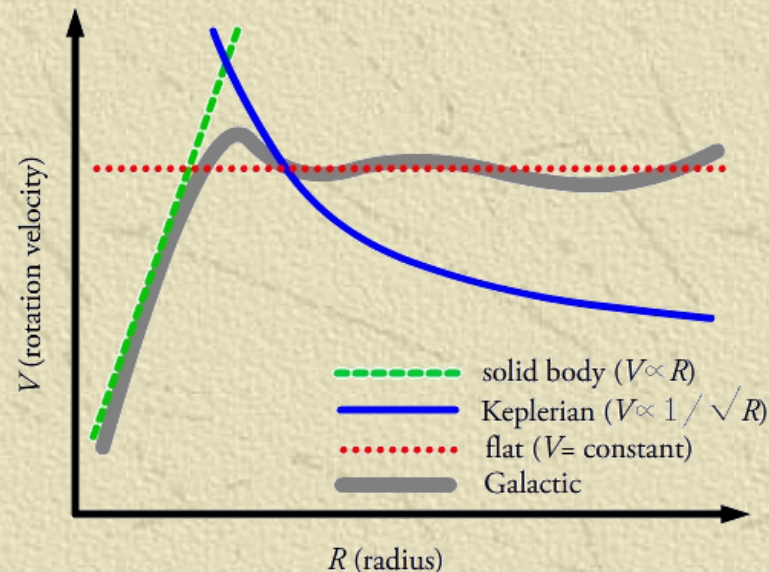
A constante A descreve o cisalhamento em relação ao grupo, enquanto a constante B descreve o gradiente do momento angular nas proximidades solares.

Para corpo rígido:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{v}{r} = \Omega$$

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{\Omega_0 R_0}{R_0} - \Omega|_{R_0} \right) = 0$$

$$B = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Omega_0 R_0}{R_0} + \Omega|_{R_0} \right) = -\Omega_0$$



Para Kepleriana:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{GM}{R^3}} = -\frac{1}{2} \frac{v}{R}$$

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{V_0}{R_0} + \frac{v}{2r}|_{R_0} \right) = \frac{3V_0}{4R_0}$$

$$B = -\frac{1}{2} \left( \frac{V_0}{R_0} - \frac{v}{2r}|_{R_0} \right) = -\frac{1V_0}{4R_0}$$

Usando  $\Theta_0 = V_0 = 218$  km/s e  $R_0 = 8$  kpc:

A = 20 km/s  
B = -7 km/s

Para Constante:

$$\frac{dv}{dr} = 0$$

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{V_0}{R_0} - 0|_{R_0} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{V_0}{R_0} \right)$$

$$B = -\frac{1}{2} \left( \frac{V_0}{R_0} + 0|_{R_0} \right) = -\frac{1}{2} \left( \frac{V_0}{R_0} \right)$$

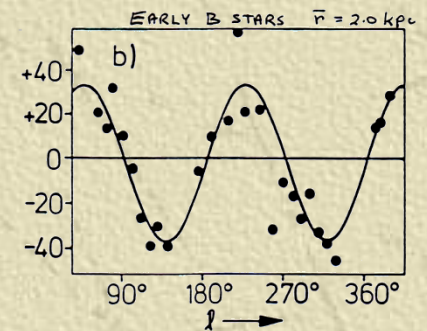
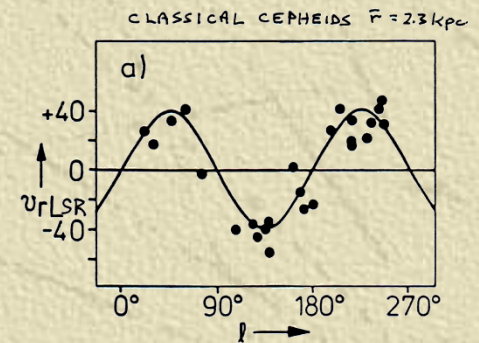
Usando  $\Theta_0 = V_0 = 218$  km/s e  $R_0 = 8$  kpc:

A = 13,6 km/s  
B = -13,6 km/s

# Valores de A e B

Table 5. A and B from proper motions.

|                            | Author                   |                         | A/km s <sup>-1</sup> kpc <sup>-1</sup> | B/km s <sup>-1</sup> kpc <sup>-1</sup> | A-B/km s <sup>-1</sup> kpc <sup>-1</sup> |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 1928                       | Oort                     |                         | (19)                                   | (-24)                                  |                                          |
| 1951                       | Morgan & Oort            |                         | 20.0                                   | -7.0                                   | +27.0                                    |
| 1967                       | Fricke                   | FK4                     | 14.2±1.9                               | -11.8±1.9                              | +26.0                                    |
|                            | Fricke                   | N30                     | 17.1±1.9                               | -10.0±1.9                              | +27.1                                    |
| 1968                       | Dieckvoss                |                         | 14.8±0.7                               | -11.3±0.6                              | +26.1                                    |
| 1968                       | Filin                    |                         | 12.1                                   | -12.0                                  | +24.1                                    |
| 1971                       | Vasilevskis<br>& Klemola | AGK3 rel<br>galaxies    | 8.9±3.6                                | -12.5±4.0                              | +21.4                                    |
| 1974                       | Cruz-Gonzalez            | Nearby stars            | -                                      | -10.7±2.3                              | -                                        |
| 1975                       | Fricke &<br>Tsoumis      | FK4                     | 15.6±0.7                               | -11.4±2.8                              | +27.0                                    |
| 1977                       | Asteriadis               | AGK3                    | 16.1±1.9                               | -9.0±1.9                               | +25.1                                    |
| 1977                       | Fricke                   | 4 catalogues            | 15.6±2.8                               | -10.9±2.8                              | +26.5                                    |
| 1977                       | du Mont                  | FK4                     | 16.1±3.8                               | -12.7±2.8                              | +28.8                                    |
| 1977                       | Corbin                   | AGK3R                   | 13.5±2.3                               | -12.1±2.2                              | +25.6                                    |
| 1978                       | du Mont                  | AGK3                    | 13.7                                   | -15.2                                  | +28.9                                    |
| 1978                       | Dieckvoss                | AGK3                    | 13.4±0.7                               | -14.8±1.8                              | +28.2                                    |
| 1979                       | Tsoumis &<br>Fricke      | (stars<br>0.6-3 kpc)    | 13.0±3.8                               | -13.3±2.9                              | +26.3                                    |
| 1982                       | Dieckvoss                | AGK3 1 kpc<br>A-K stars | 11.6                                   | -18                                    | +29.6                                    |
| Straight mean±S.D.         |                          |                         | 14.4±2.7                               | -12.0±2.8                              | 26.4±1.9                                 |
| Standard error of the mean |                          |                         | ±0.7                                   | ±0.7                                   | ±0.5                                     |
| 1964 IAU values            |                          |                         | 15                                     | -10                                    | 25                                       |



(from Feast and Thackeray, 1958)

Com Hipparcos: A = 14,82 +/- 0,84 km/s; B = -12.37 +/- 0.64 km/s

# Valores de A e B com o Gaia

## Galactic rotation in *Gaia* DR1

Jo Bovy<sup>\*†</sup>

*Department of Astronomy and Astrophysics, University of Toronto, 50 St. George Street, Toronto, ON M5S 3H4, Canada*  
and

*Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute, 162 5th Ave, New York, NY 10010, USA*

30 January 2017

[astro-ph.GA] 9 Feb 2017

### ABSTRACT

The spatial variations of the velocity field of local stars provide direct evidence of Galactic differential rotation. The local divergence, shear, and vorticity of the velocity field—the traditional Oort constants—can be measured based purely on astrometric measurements and in particular depend linearly on proper motion and parallax. I use data for 304,267 main-sequence stars from the *Gaia* DR1 Tycho-*Gaia* Astrometric Solution to perform a local, precise measurement of the Oort constants at a typical heliocentric distance of 230 pc. The pattern of proper motions for these stars clearly displays the expected effects from differential rotation. I measure the Oort constants to be:  $A = 15.3 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ ,  $B = -11.9 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ ,  $C = -3.2 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  and  $K = -3.3 \pm 0.6 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ , with no color trend over a wide range of stellar populations. These first confident measurements of  $C$  and  $K$  clearly demonstrate the importance of non-axisymmetry for the velocity field of local stars and they provide strong constraints on non-axisymmetric models of the Milky Way.

**Key words:** Galaxy: disk — Galaxy: fundamental parameters — Galaxy: kinematics and dynamics — stars: kinematics and dynamics — solar neighborhood

<https://arxiv.org/pdf/1610.07610.pdf>

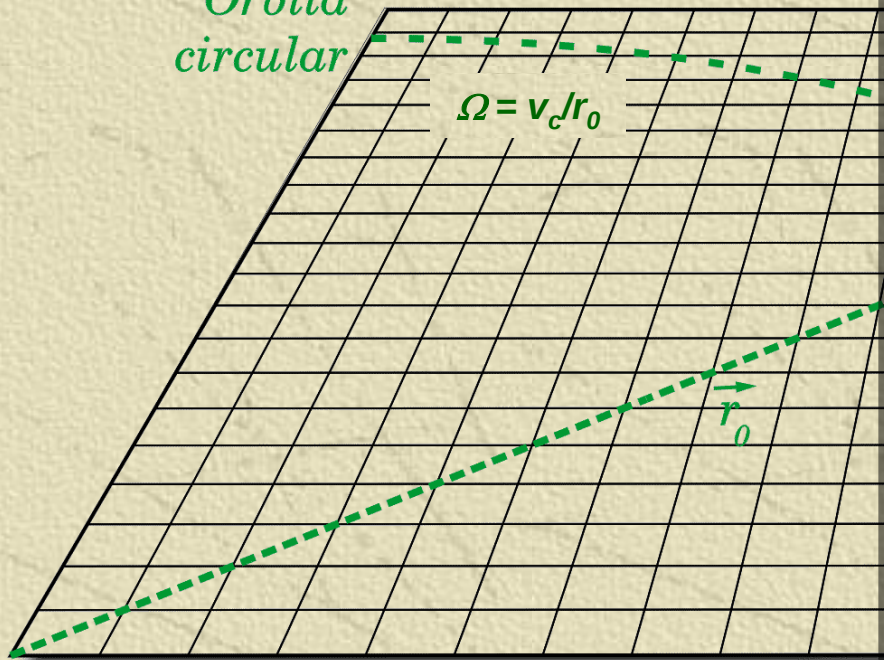
# Epicíclolos e as Constantes de Oort

Uma primeira alternativa para uma descrição mais completa do movimento no plano de uma galáxia é feita pela introdução da teoria de pequenas perturbações.

No referencial que acompanha a órbita circular:

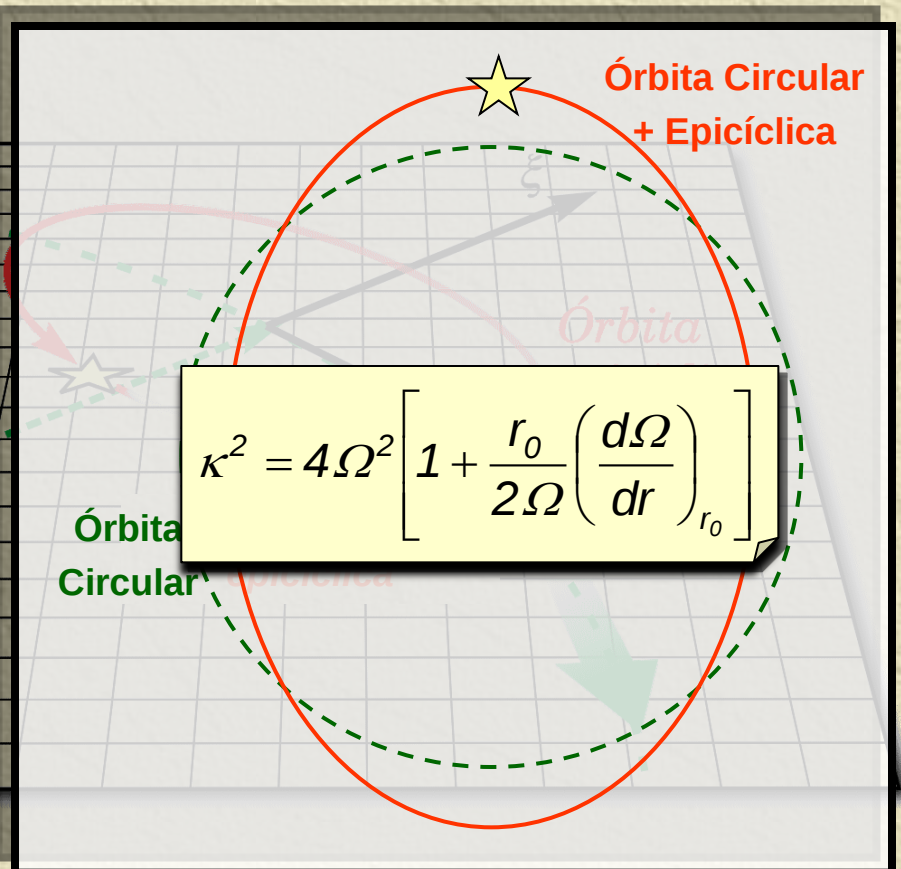
Órbita circular

$$\Omega = v_c / r_0$$



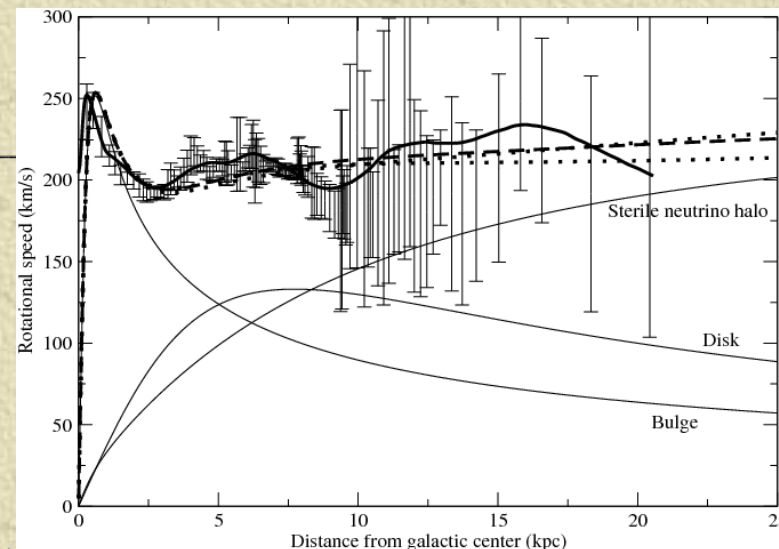
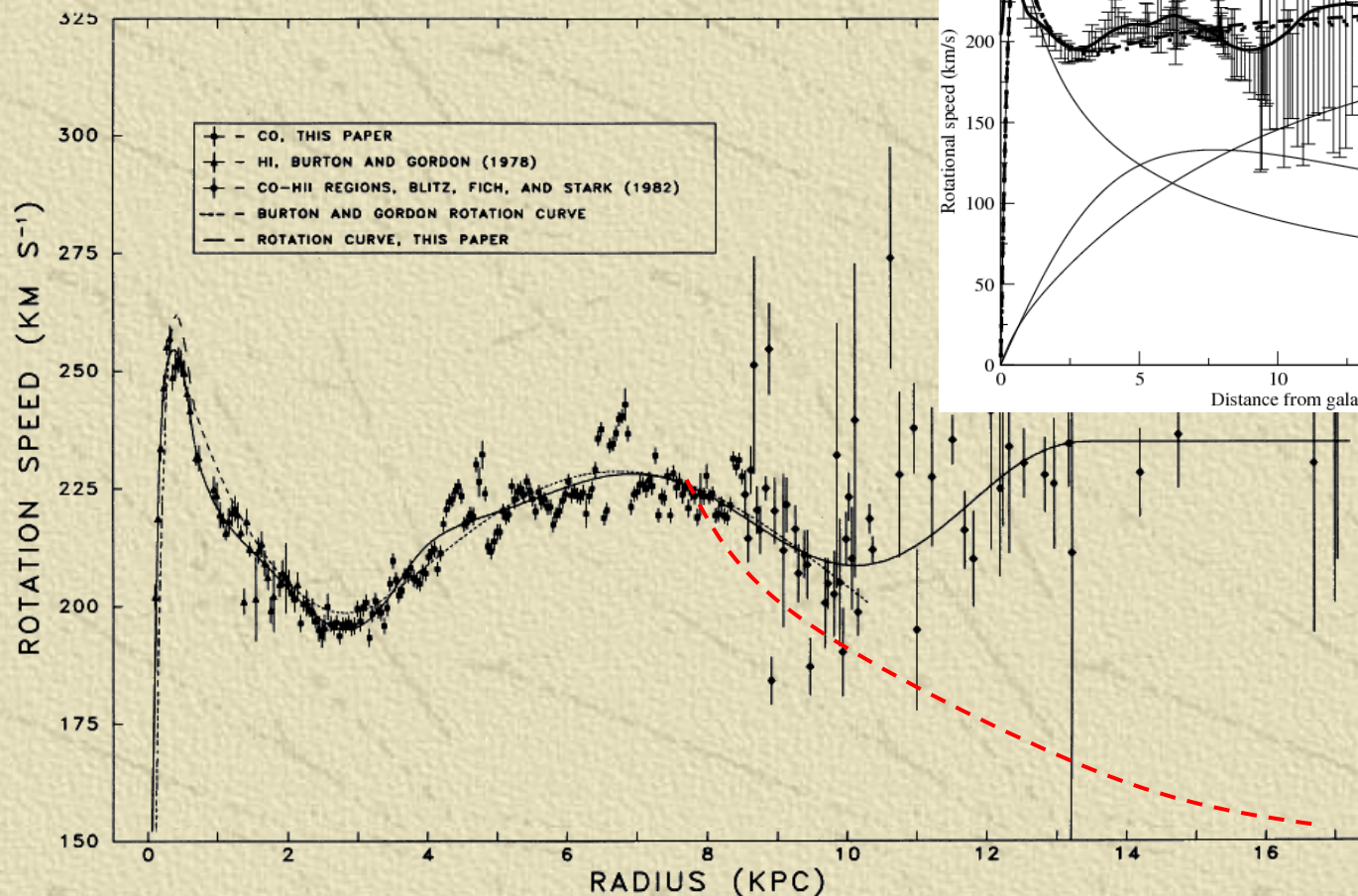
$$\kappa^2 = -4B\Omega$$

No referencial da galáxia:



# Indícios de Matéria Escura na Nossa Galáxia

Proximidade de valores da constante de Oort são tomados como indícios de que curva de rotação é plana como de outras galáxias e portanto nossa galáxia conteria matéria escura.



**Aguardar resultados do GAIA!!!**

## *O exemplo da Galáxia Anã de Sagitário*

A Via Láctea possui várias galáxias satélites: LMC, SMC, Sagittarius, Canis Major, Ursa Minor, Draco, Carina, Sextans, Sculptor, Fornax, Leo I, Leo II, Ursa Major, ???



## ***O exemplo da Galáxia Anã de Sagitário***

**Sagittarius: distante ~16kpc do Centro Galáctico, muito próxima do borda do disco estelar, forte interação gravitacional**

**Sgr está sendo destruída pela Via Láctea: grupos de estrelas de baixa metalicidade encontradas em sua órbita foram canibalizadas pela Via Láctea**



## *E As Nuvens de Magalhães?*



## **Galáxias satélites da MW – Nuvens de Magalhães**

O primeiro registro conhecido das Nuvens de Magalhães é do ano de 964, do astrônomo persa Al Sufi, nomeadas “al-Bakr”, ou seja “As ovelhas dos árabes do sul”



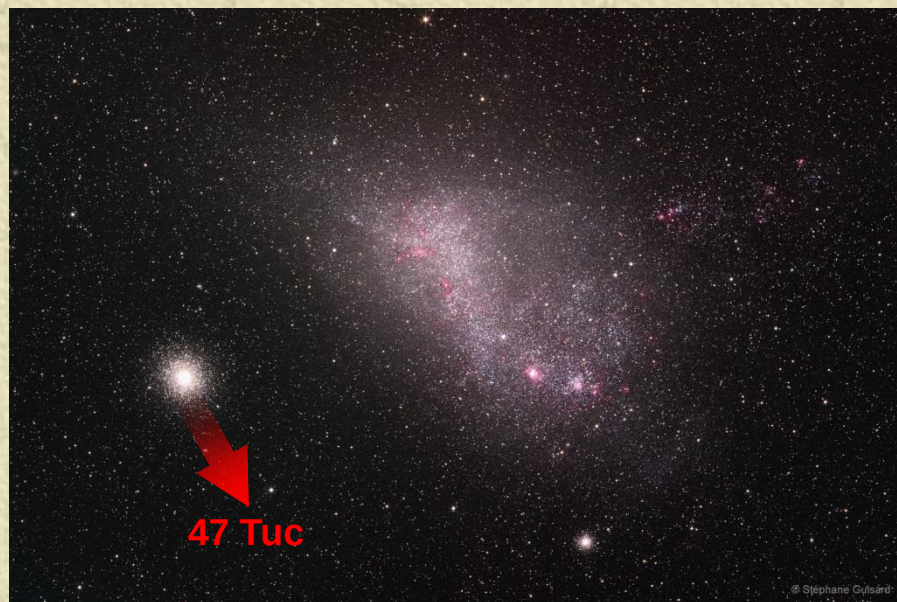
Na Europa, as nuvens foram observadas pelos exploradores italianos Peter Martyr d'Anghiera e Andrea Corsali. O nome de “Nuvens de Magalhães” é atribuído a Antonio Pigafetta, que acompanhou a expedição de circunavegação de Fernão de Magalhães (1519-1522)

# Galáxias satélites da MW – Nuvens de Magalhães

As chamadas “Nuvens de Magalhães” são duas galáxias satélites da Via Láctea. Tanto a Pequena (SMC) quanto a Grande Nuvem (LMC) são geralmente classificadas como galáxias Irregulares (Irr)



A LMC está a 50 kpc e é uma galáxia anã irregular vista quase “face-on”. Algumas vezes classificada como uma espiral de tipo tardio, rica em gás e com ativa formação estelar. Tem apenas uns poucos kpc de espessura ao longo da linha de visada.



A SMC se encontra a uma distância de 61 kpc. A SMC é também uma galáxia anã irregular com alta inclinação, algumas vezes mencionada tb como uma galáxia esferoidal anã. Possui uma estrutura mais complexa, e poderia estender-se até 20kpc ao longo da linha de visada.

Até a descoberta da Galáxia anã de Sagitário ( $d=24\text{kpc}$ ), as Nuvens de Magalhães eram as galáxias satélites mais próximas conhecidas.

# Galáxias satélites da MW – Nuvens de Magalhães

Usando a base de dados do Vizier;

| method                  | distance to LMC |     |       |                              |
|-------------------------|-----------------|-----|-------|------------------------------|
| RR Lyrae                | 45 kpc          | +/- | 7 kpc |                              |
|                         | 46              |     | 4     |                              |
|                         | 51              |     | 10    | double-mode (Kovacs 2000)    |
| main-sequence fitting   | 52              | +/- | 3     |                              |
| eclipsing binary stars  | 48              | +/- | 3     | HV 2274 (Nelson et al 2000)  |
|                         | 44              | +/- | 6     | HV 2274 (Udalski et al 1998) |
|                         | 41              | +/- | 13    | a different system           |
| tip of red giant branch | 52              | +/- | 5     |                              |
|                         | 51              |     | 6     | DENIS (Cioni et al. 2000)    |
| red clump               | 44              | +/- | 6     |                              |
|                         | 52              | +/- | 5     |                              |
| Mira variables          | 50              | +/- | 9     |                              |
| SN 1987A                | 52              | +/- | 4     |                              |
|                         | <= 47           | +/- | 2     |                              |

# Observações com o Gaia

APJ LETTERS, SUBMITTED, SEPTEMBER 14, 2016  
Preprint typeset using L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X style emulateapj v. 5/2/11

## FIRST GAIA LOCAL GROUP DYNAMICS: MAGELLANIC CLOUDS PROPER MOTION AND ROTATION

ROELAND P. VAN DER MAREL

Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218

JOHANNES SAHLMANN

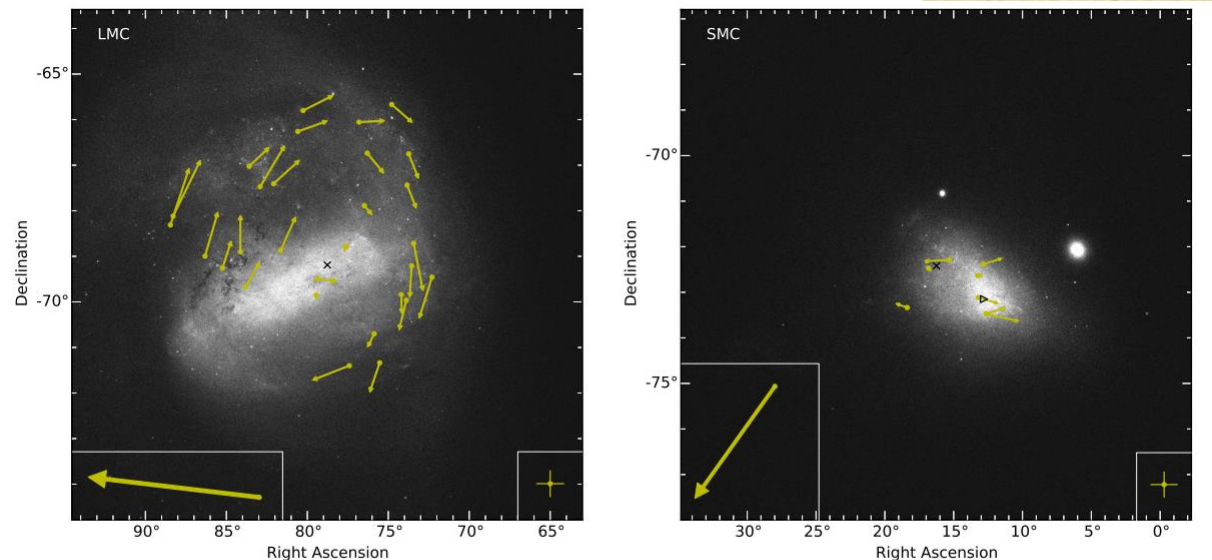
European Space Agency, Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA

*ApJ Letters*, submitted, September 14, 2016

### ABSTRACT

We use the *Gaia* data release 1 to study the proper motions (PMs) for 29 *Hipparcos* stars in the Small Magellanic Clouds (SMC). The mean PM directions is inferred to be  $(\mu_W, \mu_N) = (-0.874 \pm 0.060, -0.100 \pm 0.060)$  mas yr<sup>-1</sup>, which agree to within the uncertainties with the results from *HST* and *TGAS*. Since *TGAS* uses different data sets and their results, but the *HST* agree with the *TGAS* prior *HST* studies, the *TGAS* results are confirmed though it takes the LMC distance modulus  $m - M = 18.54 \pm 0.04$  mag. Comparison of the *TGAS* results with the first results from *Gaia* on the LMC data releases will revolutionize our understanding of the LMC. *Subject headings:* proper motion, Magellanic Cloud) —

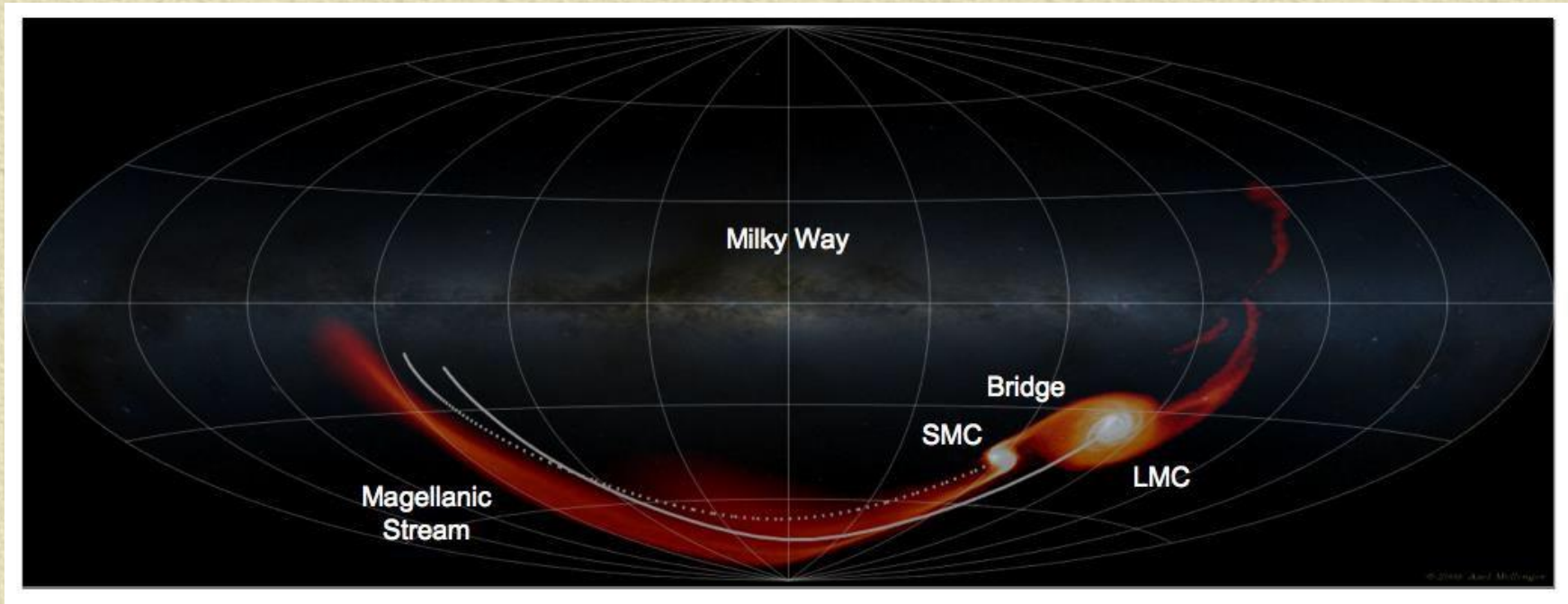
### 1 INTRODUCTION



**Figure 1.** Spatially variable component of the observed TGAS PM fields for the LMC (left) and SMC (right), overlaid on a representation of the Gaia DR1 source density. Each panel is centered on the dynamical center (cross; a triangle for the SMC indicates the photometric center of the old stars), with the horizontal and vertical extent representing an equal number of degrees on the sky. Solid dots show the positions of the sample stars. The PM vector for each star is the observed PM from Table 1, minus the best-fit COM PM from Tables 2 and 3 (bottom left inset). PM vectors have a size that indicates the mean predicted motion over (arbitrarily) the next 7.2 Myr. For the LMC, clockwise rotation is clearly evident. The bottom right inset shows the median random PM errors for the sample.<sup>a</sup> The  $\chi^2$  values of our model fits suggest that these may be overestimated by a factor  $\sim 1.85$  (confirmed visually by the good agreement between the PMs of adjacent stars). Overestimated errors have also been suggested for Gaia DR1 parallax values (Casertano et al. 2016).

# **Galáxias satélites da MW – Nuvens de Magalhães**

Podemos na verdade considerar o sistema “Nuvens de Magalhães”, com 4 componentes: a SMC, a LMC, a “Ponte” (bridge) e a “Cauda” (stream)



O sistema de Magalhães é pobre em metal, com metalicidade de cerca de:

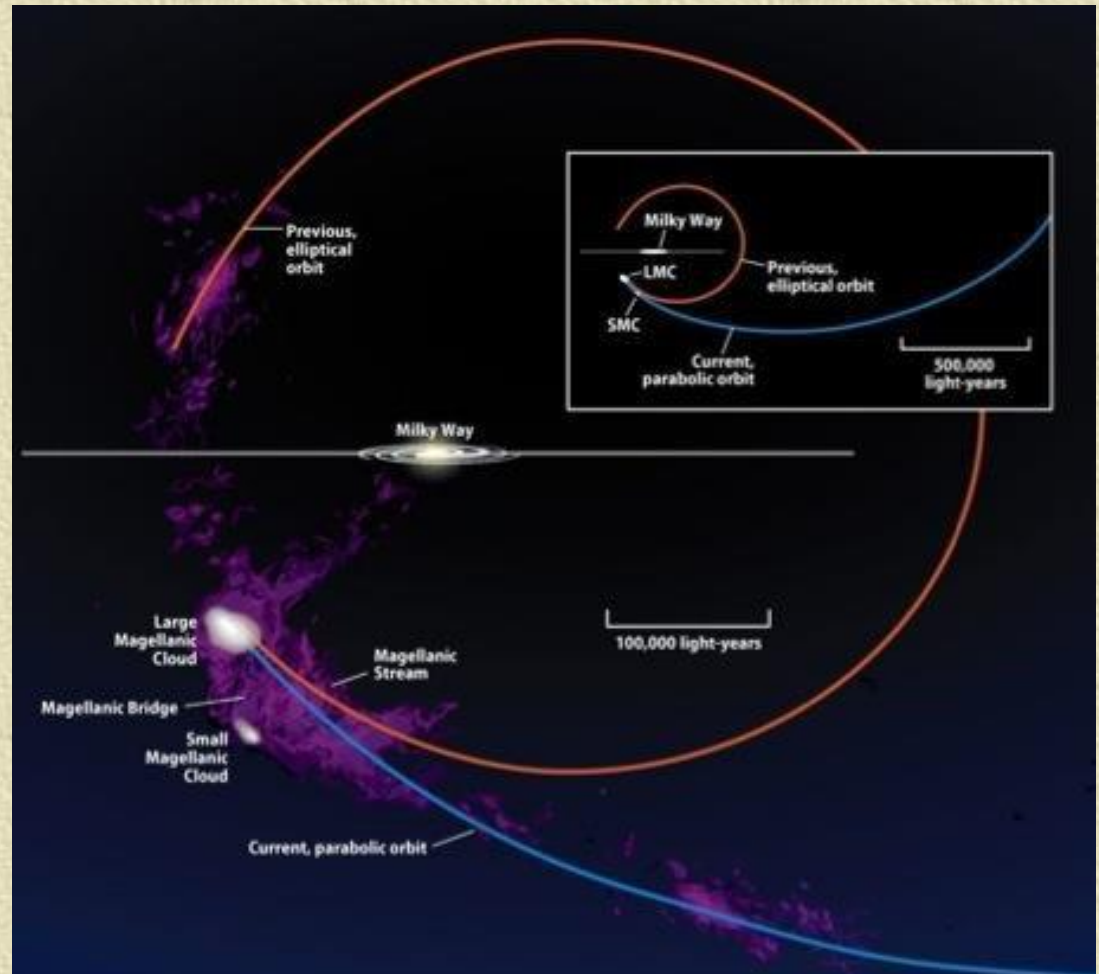
- $1/2$  para a LMC
- $1/4$  para a SMC
- $1/10$  para a ponte

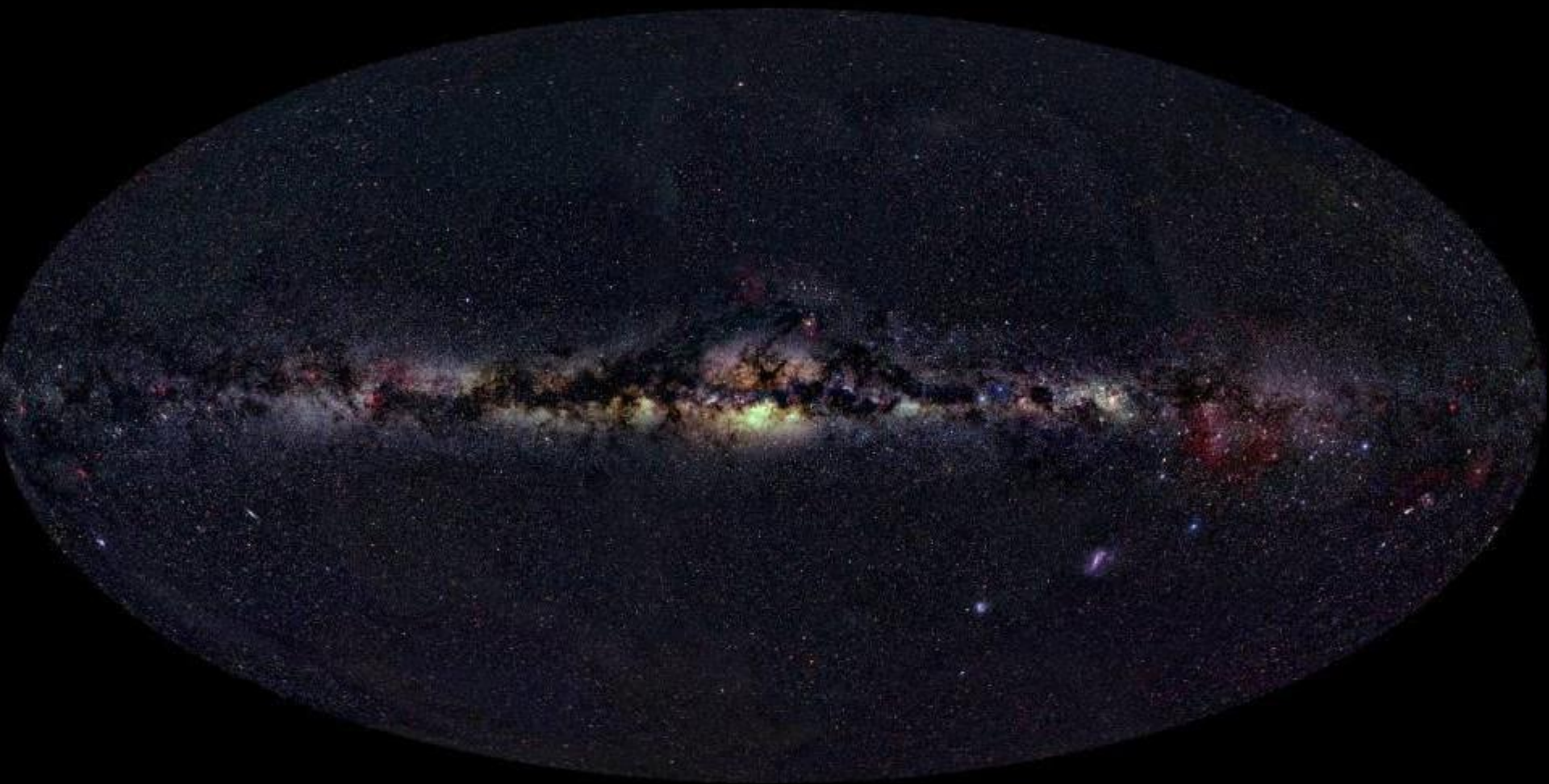
As Nuvens de Magalhães tem experimentado uma extensa história de formação estelar.

# *Galáxias Satélites da MW – Nuvens de Magalhães*

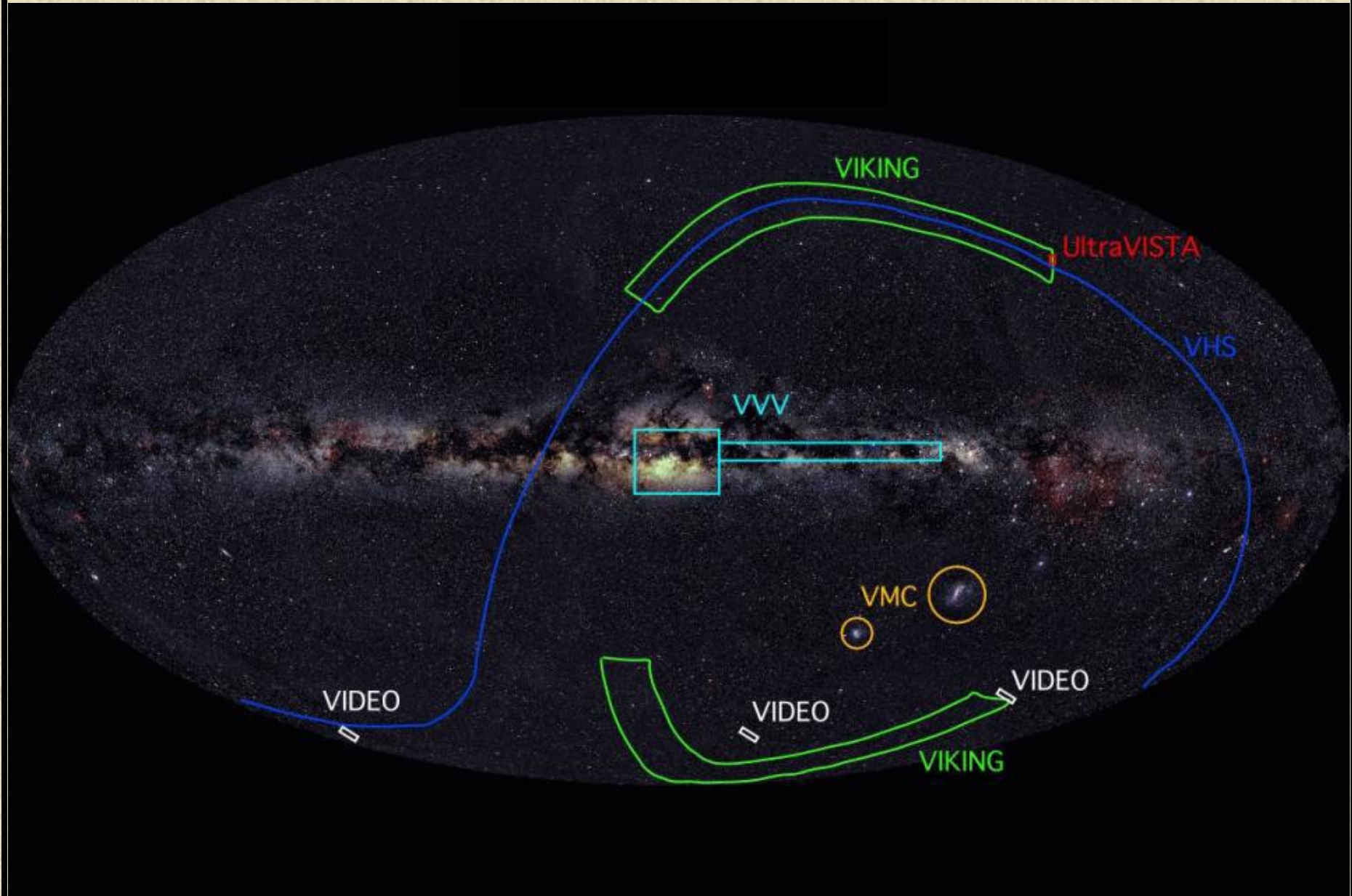
A interação dinâmica entre as Nuvens de Magalhães pode ser a responsável pelos vários episódios de formação estelar e a criação da Ponte. A Ponte que conecta as duas galáxias é possuí estrelas jovens associadas a esta.

O Cauda aparece (hoje) sendo constituída puramente de gás, e se estende por mais de 100 graus no hemisfério sul. A origem da Cauda deve-se a efeitos de maré (interação gravitacional) entre a MW e as Nuvens.





# ESO/VISTA Public Surveys



## **Formação Galáctica**

**Entretanto, não podemos concluir que a Galáxia seja formada simplesmente pelo agrupamento de sistemas estelares pré-existentes.**

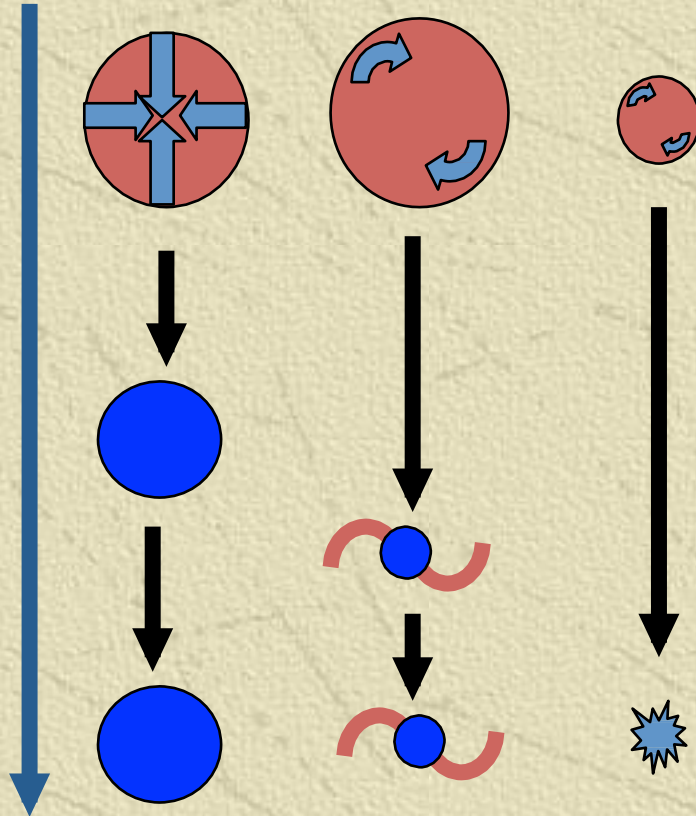
**Talvez para o halo, porém não é provável que as estrelas do disco fino e espesso, e os aglomerados globulares do disco tenham sido formados fora da galáxia como nos modelos mais simples de merging.**

**A origem do halo é bastante incerta, porém é possível que o material do qual é formado entrou na Galáxia como gás ao invés de estrelas.**

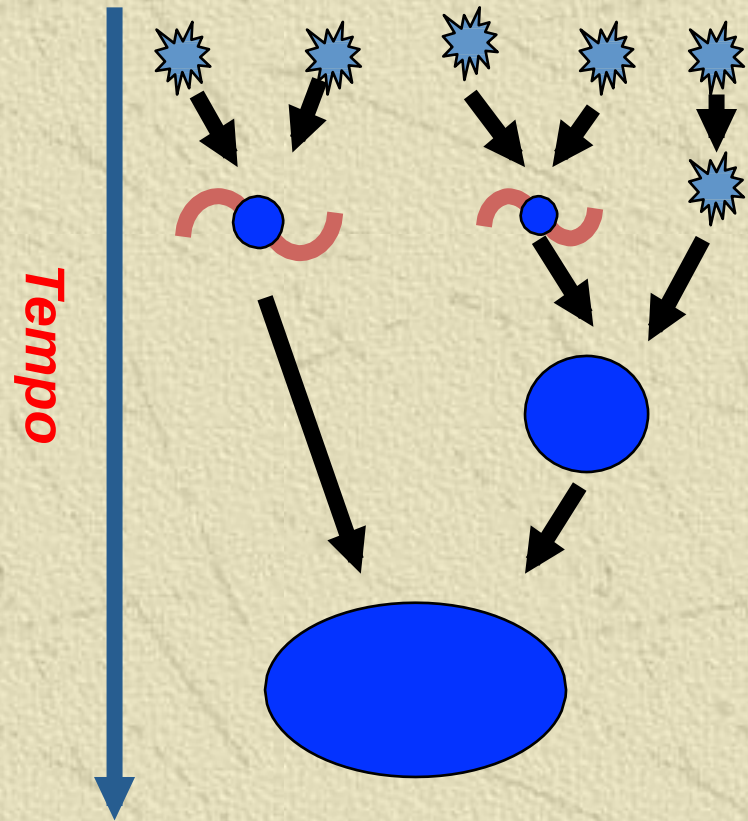
# Cenários para Formação de Galáxias

Dois cenários que competem entre si:

- **Cenário Monolítico (Top-down)**



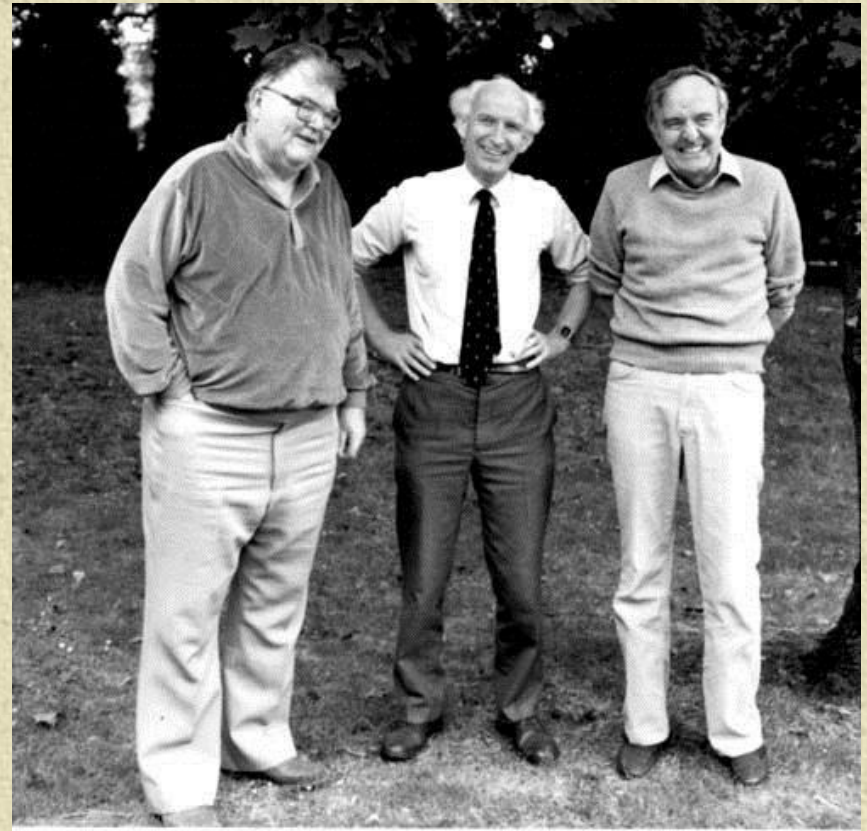
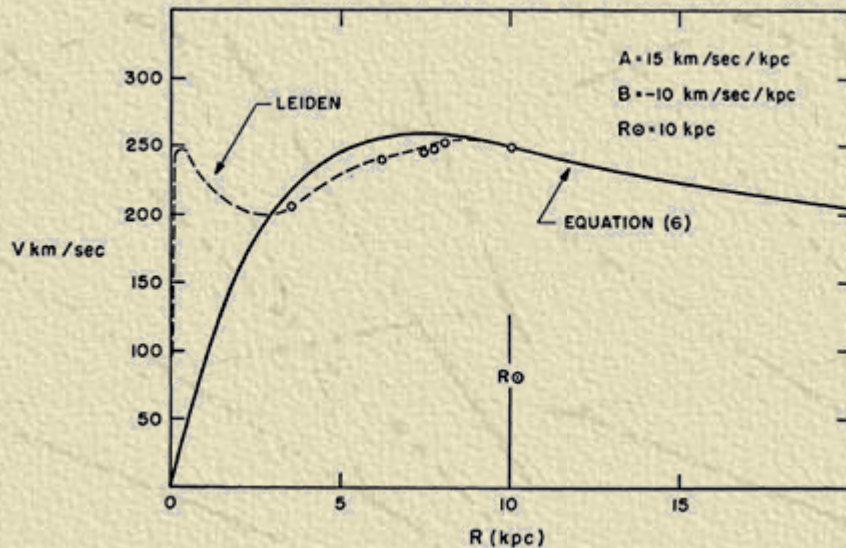
- **Cenário Hierárquico (Bottom-up)**



# Formação Galáctica

O que podemos inferir da observação do disco, bojo e halo da Via Láctea?

Artigo “seminal” sobre a formação da Via Láctea de Eggen, Lynden-Bell & Sandage (1962) “Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed” => Modelo ELS ou ELS62



# Artigo do ELS62

Órbitas de estrelas na vizinhança solar:

- Roman (1955): estrelas de maior velocidade (na vizinhança solar) tendem a ser mais pobres em metal.
- ELS: Conforme a metalicidade diminui, estrelas tem maior oscilação vertical ( $E_z$ ) e menor momento angular ( $L_z$ )

Essas evidências sugerem que (i) a Via Láctea teve uma história de formação violenta ou (ii) as estrelas mais pobres em metal não foram formadas em um disco suportado por forças centrífugas.

1962ApJ...136..

## EVIDENCE FROM THE MOTIONS OF OLD STARS THAT THE GALAXY COLLAPSED

O. J. EGGEN, D. LYNDEN-BELL,\* AND A. R. SANDAGE

Mount Wilson and Palomar Observatories

Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology

*Received May 17, 1962*

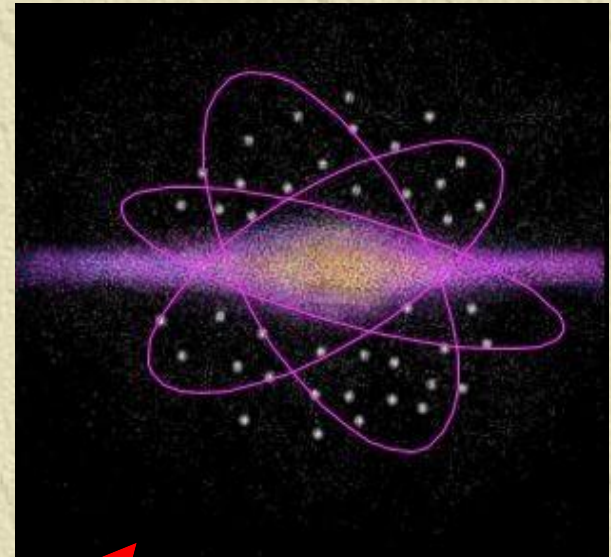
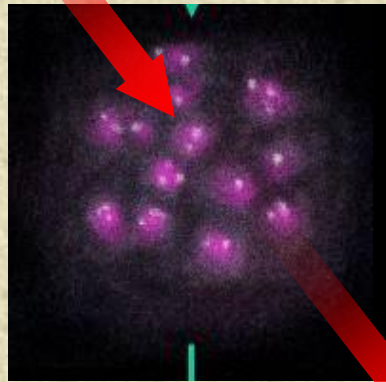
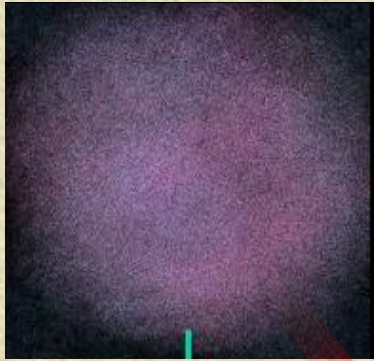
### ABSTRACT

The ( $U$ ,  $V$ ,  $W$ )-velocity vectors for 221 well-observed dwarf stars have been used to compute the eccentricities and angular momenta of the galactic orbits in a model galaxy. It is shown that the eccentricity and the observed ultraviolet excess are strongly correlated. The stars with the largest excess (i.e., lowest metal abundance) are invariably moving in highly elliptical orbits, whereas stars with little or no excess move in nearly circular orbits. Correlations also exist between the ultraviolet excess and the  $W$ -velocity. Finally, the excess and the angular momentum are correlated; stars with large ultraviolet excesses have small angular momenta.

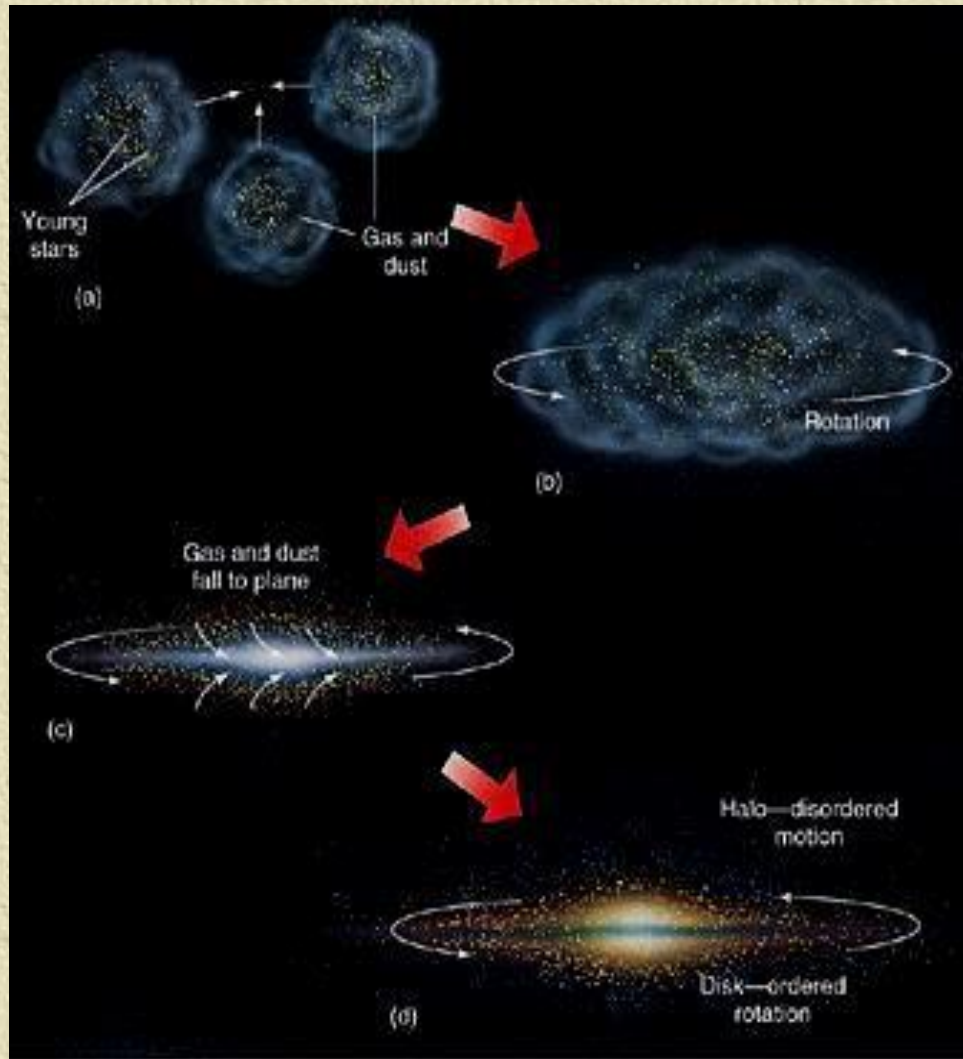
These correlations are discussed in terms of the dynamics of a collapsing galaxy. The data require that the oldest stars were formed out of gas falling toward the galactic center in the radial direction and collapsing from the halo onto the plane. The collapse was very rapid and only a few times  $10^8$  years were required for the gas to attain circular orbits in equilibrium (i.e., gravitational attraction balanced by centrifugal acceleration). The scale of the collapse is tentatively estimated to be at least 10 in the radial direction and 25 in the  $Z$ -direction. The initial contraction must have begun near the time of formation of the first stars, some  $10^{10}$  years ago.

# *Panorama da Formação das Estrutura na Galáxia*

Estrelas do Halo se formam primeiro durante o colapso do gás. Hoje temos órbitas com orientações randômicas.



## Formação Galáctica (ELS)



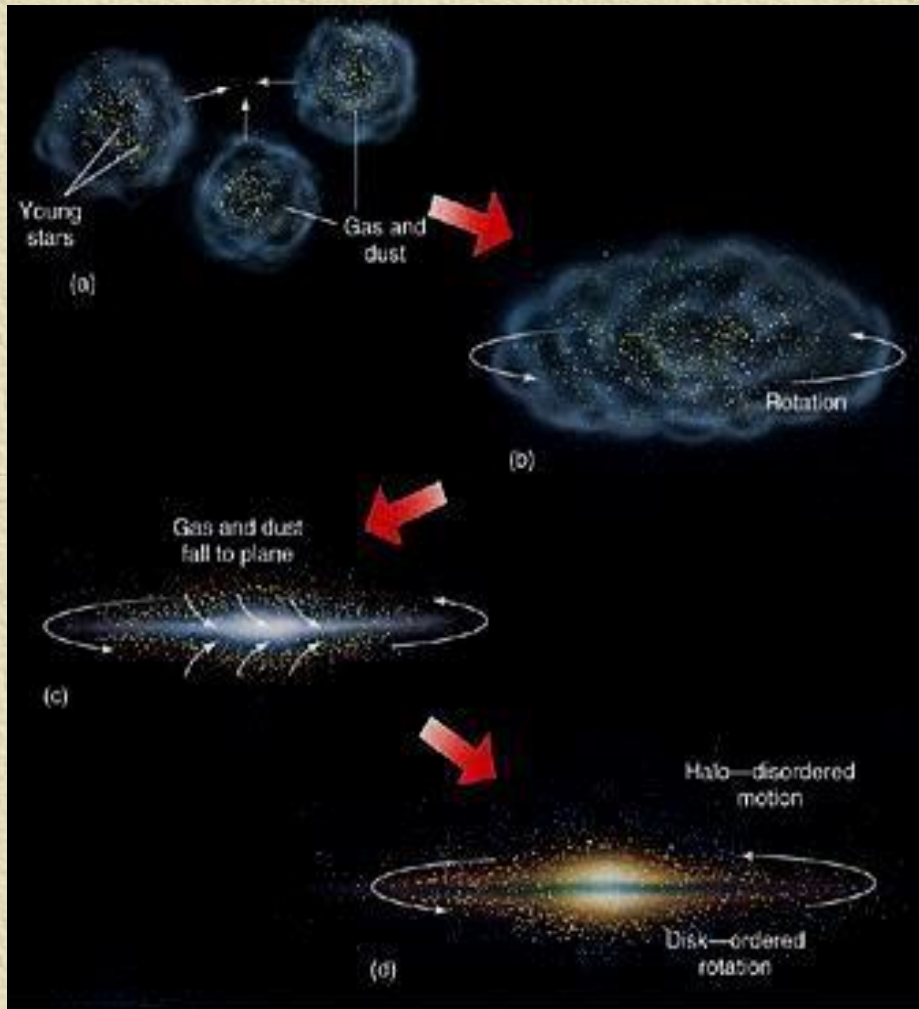
Nuvem protogaláctica aproximadamente esférica e com algum movimento de rotação.

Inicialmente a nuvem é pobre em metais, e “near free-fall”.

Conforme a nuvem colapsa, a taxa de rotação aumenta, de maneira a conservar seu momento angular.

Estrelas mais pobres em metal, e os aglomerados globulares do halo são formados.

## **Formação Galáctica (ELS)**



As presentes órbitas destes objetos são uma consequência direta da queda-livre da nuvem protogaláctica.

A idades encontradas para os aglomerados globulares são consequência de seu rápido colapso.

Depois de diminuir em raio por um fator 10, a nuvem se torna mais rica em metais e 'achata' em um disco devido a forças centrífugas.

Neste momento se inicia a formação do disco e a Via láctea se estabelece com uma configuração parecida com a atual.

## Formação Galáctica (Searle 1977)

Baseado na descoberta de que a distribuição em metalicidade dos aglomerados globulares do halo é larga e somente de forma aproximada independente do raio Galactocêntrico.

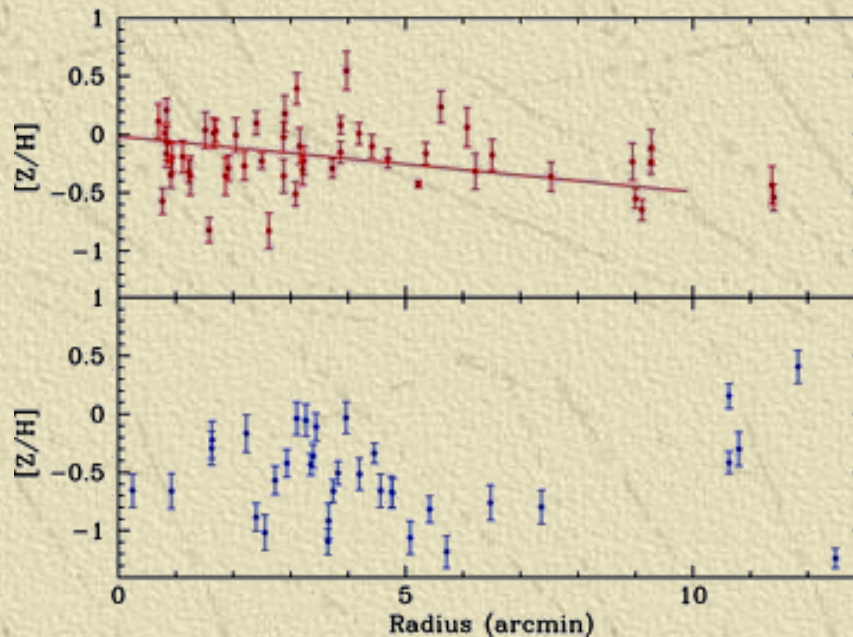


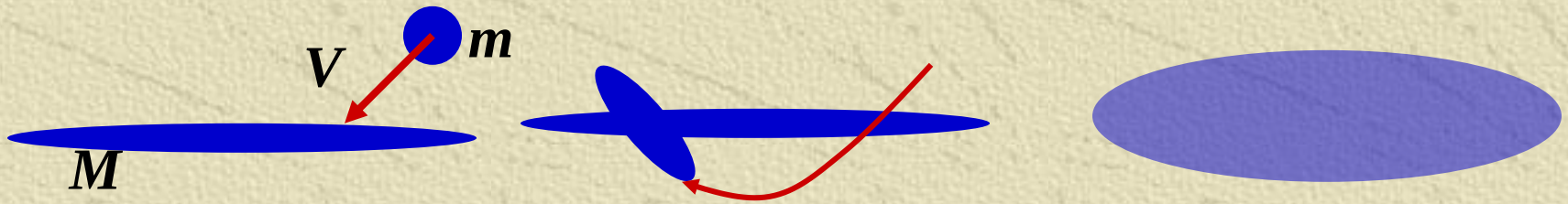
Figure 4: Globular cluster metallicity-radial distribution derived from... - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/48191248\\_fig1\\_Figure-4-Globular-cluster-metallicity-radial-distribution-derived-from-calcium-triplet](https://www.researchgate.net/figure/48191248_fig1_Figure-4-Globular-cluster-metallicity-radial-distribution-derived-from-calcium-triplet) [accessed Oct 13, 2016]

- Este fenômeno poderia ser explicado se o halo foi formado por um grande número de 'fragmentos' independentes de  $\sim 10^8 M_{\text{sol}}$ , e que evoluíram de maneira independente.
- A metalicidade de um dado 'fragmento' é determinado pelo número de 'eventos de enriquecimento' que aconteceram antes de explosões de supernova limparem o gás.
- Searle previa que um evento de enriquecimento consistia na formação de um aglomerado globular inteiro. Essa suposição garante que cada fragmento experimentaria somente um pequeno número de eventos de enriquecimento.

## Formação Hierárquica

Menores estruturas seriam as primeiras a se formarem e por meio de interações se formariam os objetos maiores:

- *Bottom-up: Aquecimento dinâmico seria o resultado de uma interação mais antiga*



$$\Delta\sigma_W^2 \approx \frac{m}{M} V_{Sat}^2$$

$$V \approx 200 \text{ km/s} , m/M \approx 0.10 \Rightarrow \sigma_W \approx 60 \text{ km/s}$$

- *Top-down: o disco espesso poderia ser uma componente intermediária entre o halo e o disco. Hipótese: fase dissipativa da fase de nuvens protogalácticas no final do colapso do halo (Jones & Wise 1983)*

# Simulações de $N$ corpos

Sistemas estelares estão constantemente se agrupando para formar estruturas maiores: os fragmentos de Searle?

Nas simulações, conforme os fragmentos são agrupados, o potencial da galáxia sendo formada não é axissimétrico, assim que os momentos angulares de estrelas individuais não seriam conservados.

Assim que na sua forma original, os modelos de ELS e Searle são hoje obsoletos.

