

# Galáxias: da Via Láctea ao tecido cósmico

Curso de Inverno 2025 - Observatório Nacional

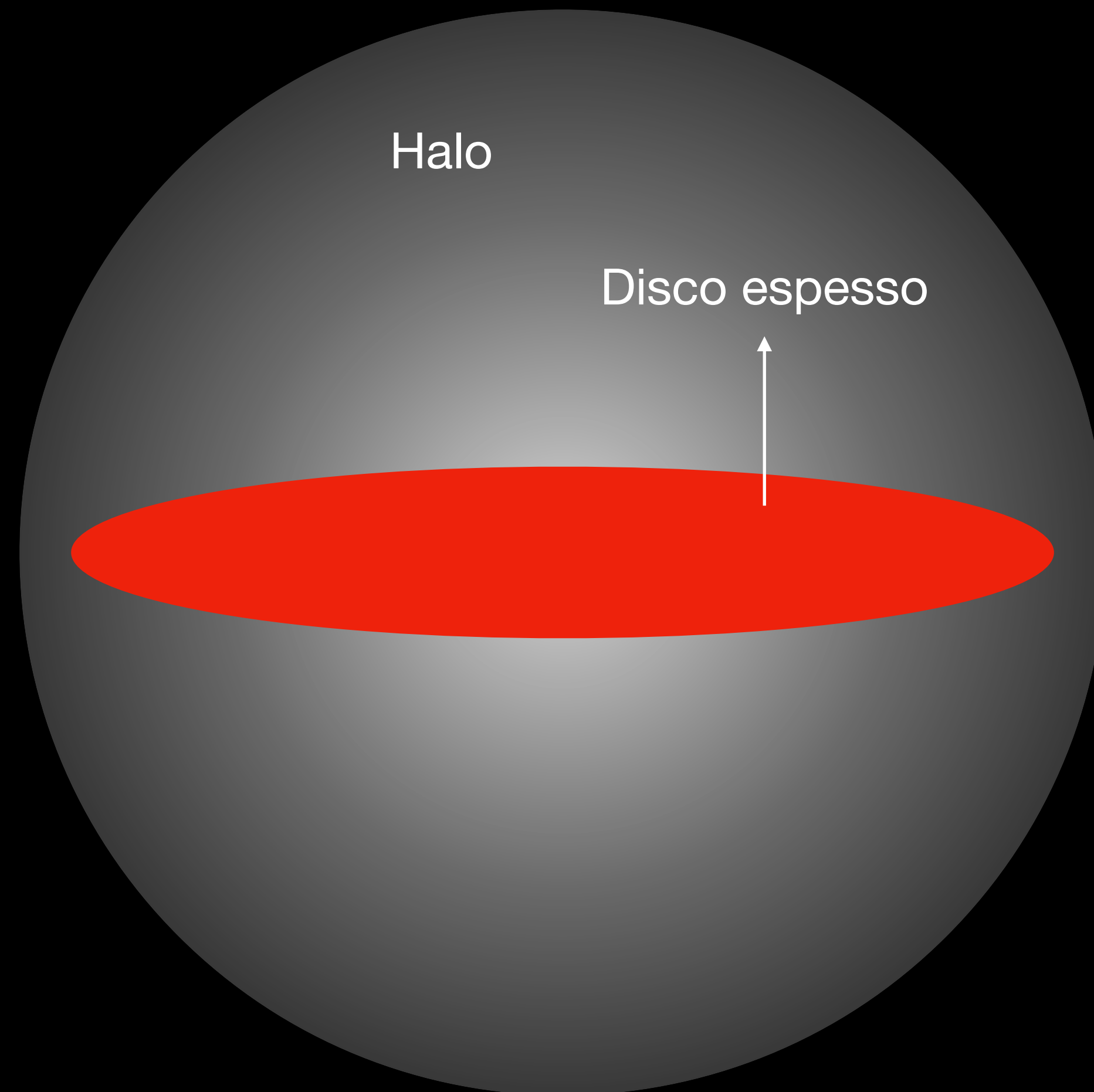
Leandro Beraldo e Silva - [lberaldoesilva@on.br](mailto:lberaldoesilva@on.br)  
[lberaldoesilva.github.io](https://lberaldoesilva.github.io)

# A estrutura da Via Láctea

# A estrutura da Via Láctea

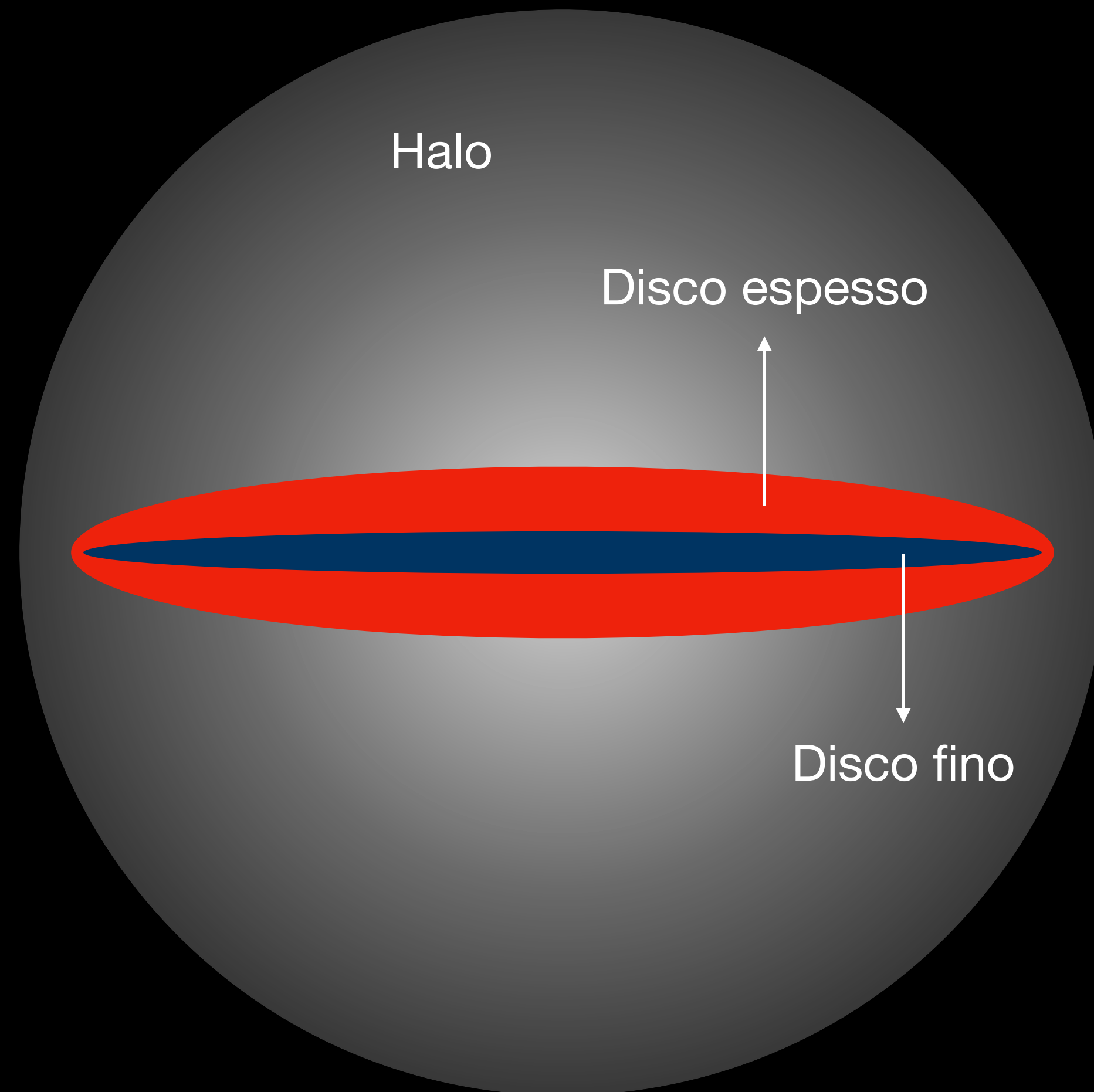


# A estrutura da Via Láctea

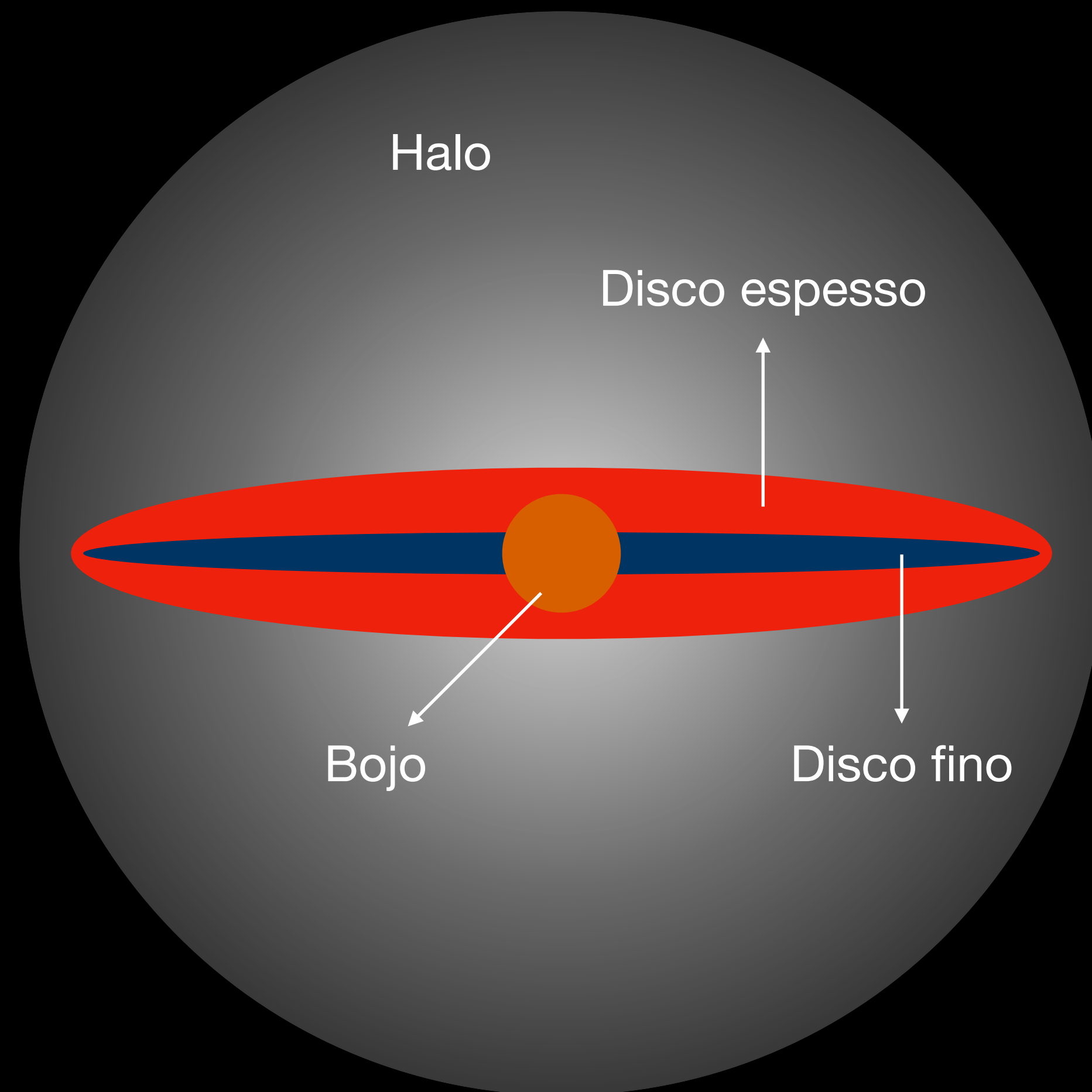




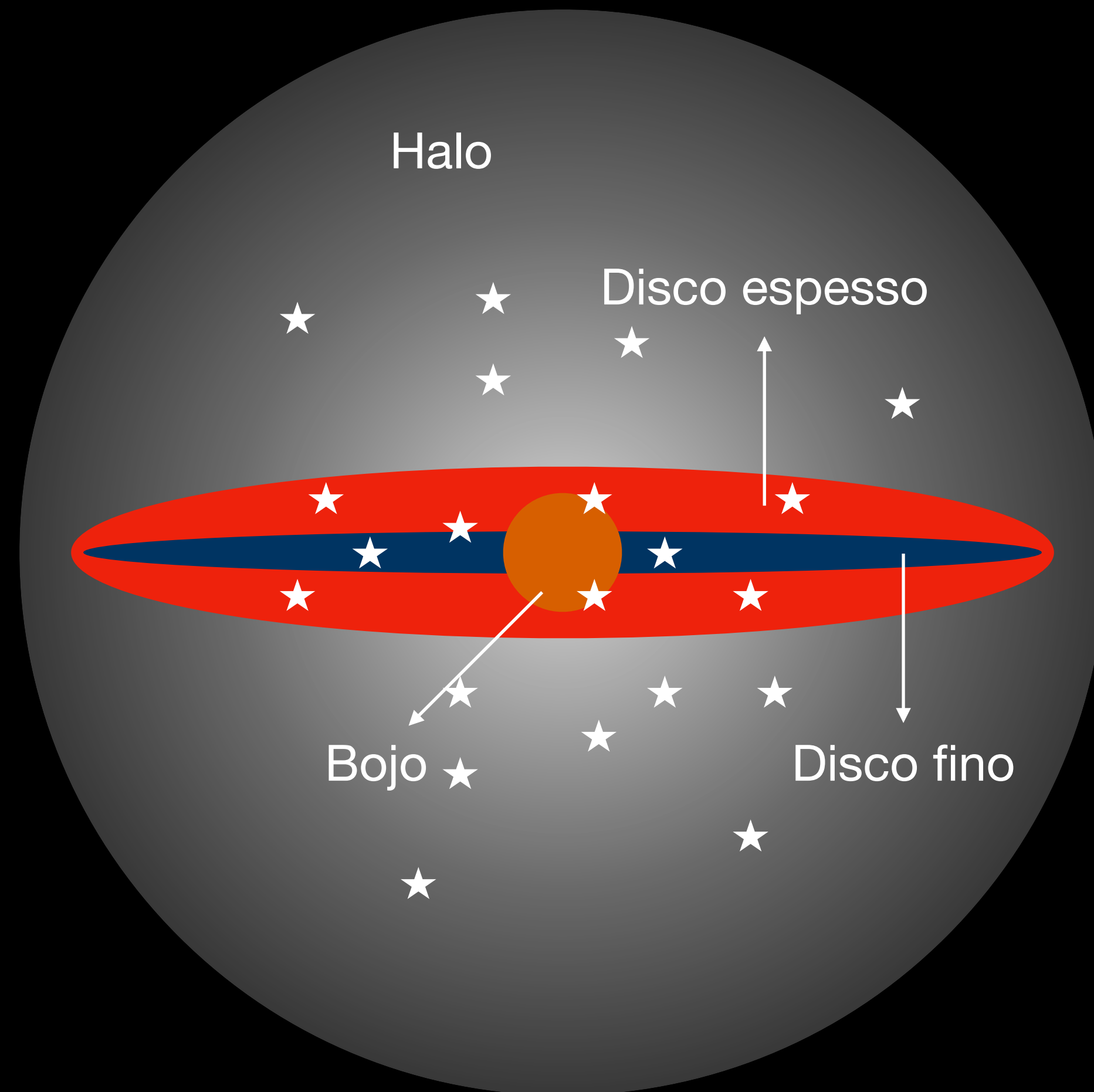
# A estrutura da Via Láctea



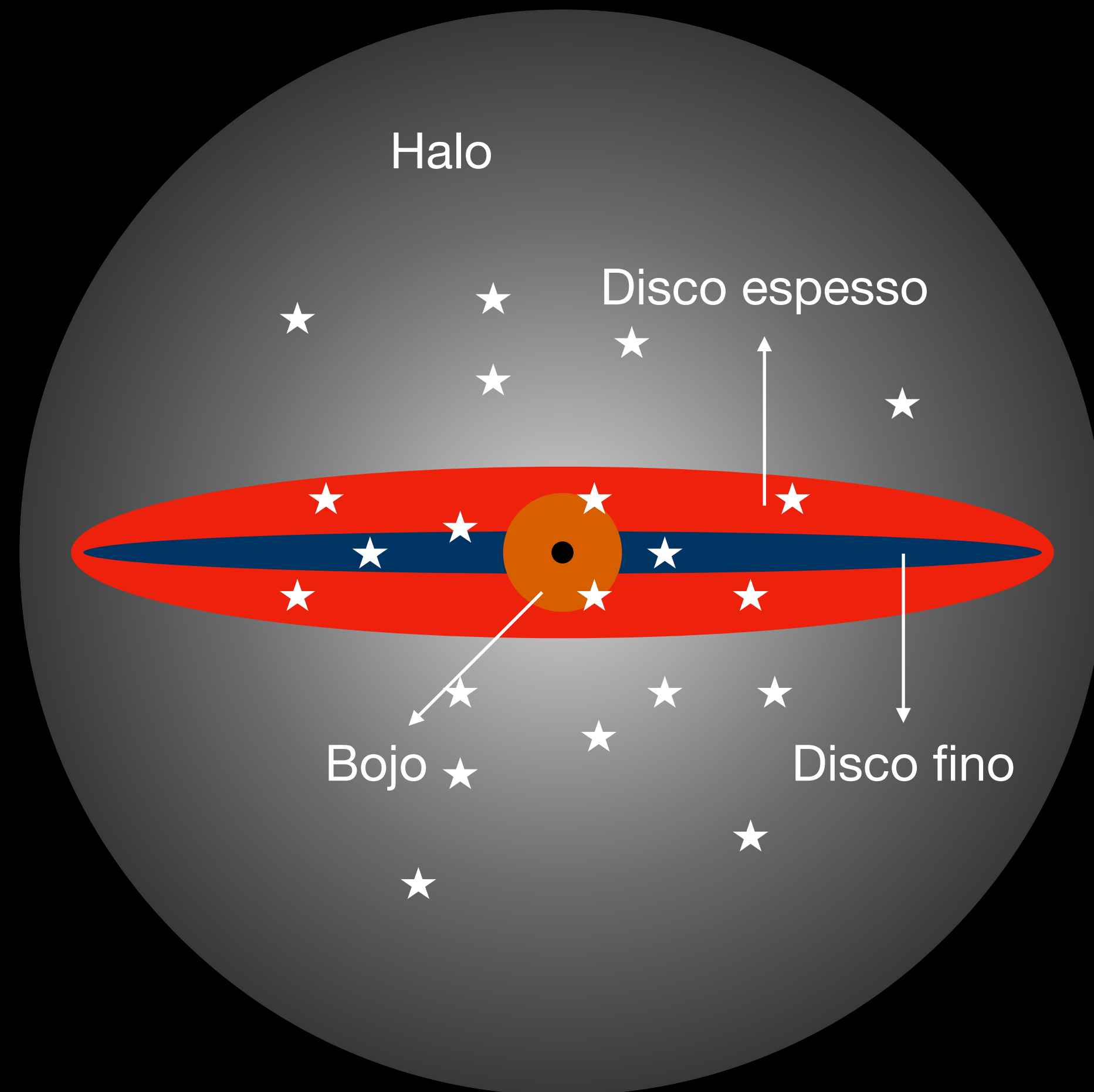
# A estrutura da Via Láctea



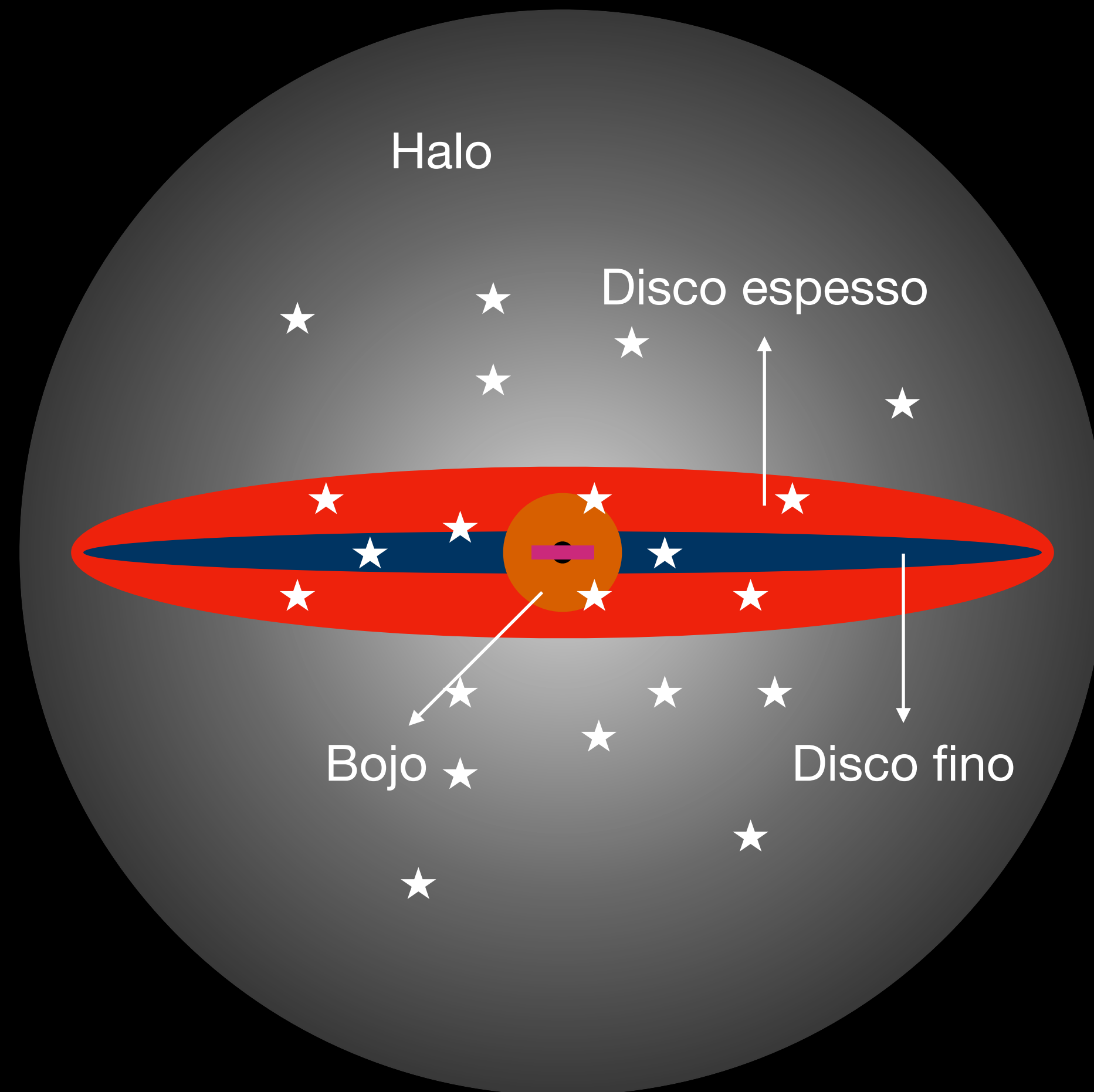
# A estrutura da Via Láctea



# A estrutura da Via Láctea



# A estrutura da Via Láctea



# O que é a Via Láctea?



Fotografia de celular



# O que é a Via Láctea?



Fotografia de celular



Credit: ESO/Z. Bardon

# O que é a Via Láctea

Introdução histórica



# O que é a Via Láctea

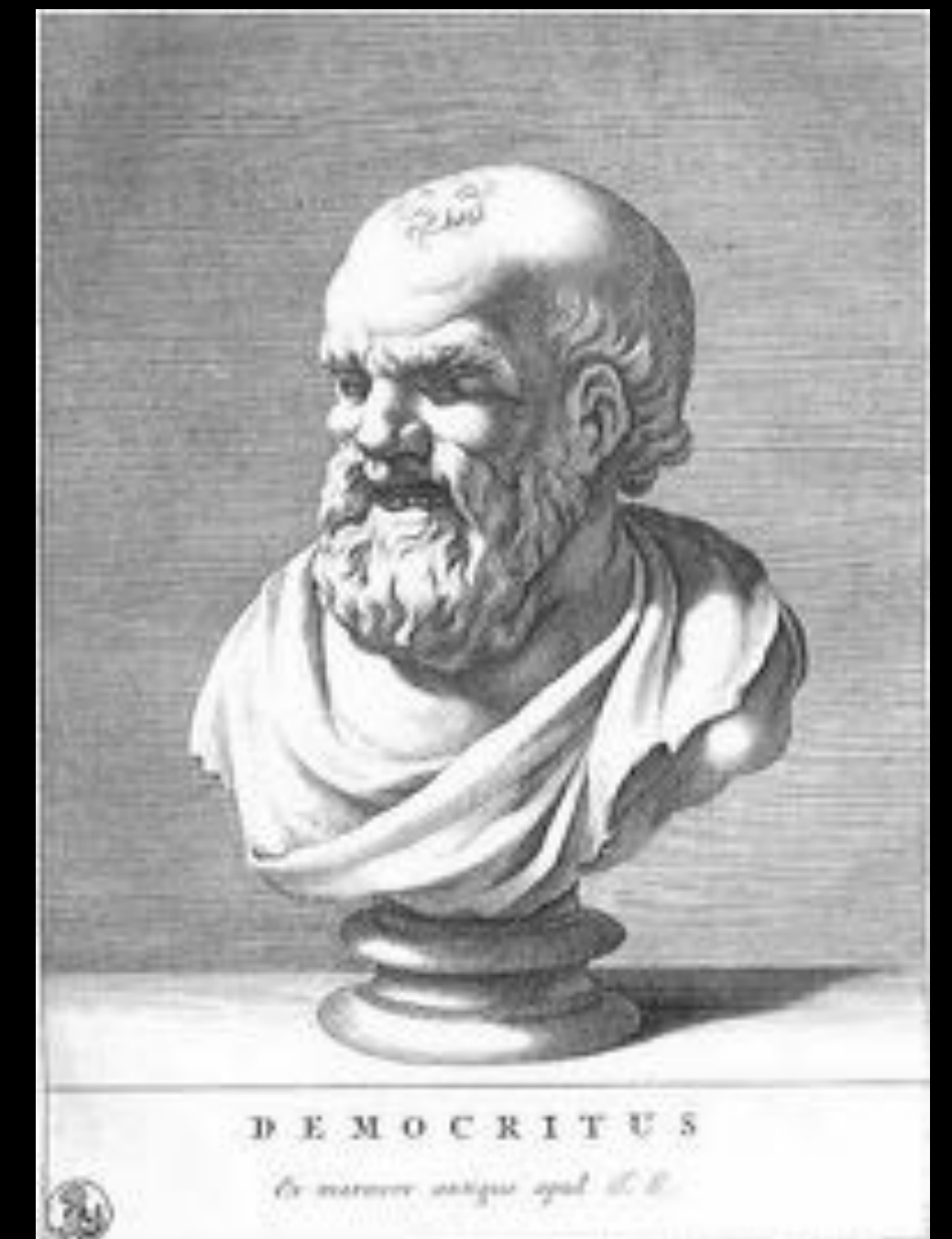
## Introdução histórica

- “Caminho de leite”

# O que é a Via Láctea

## Introdução histórica

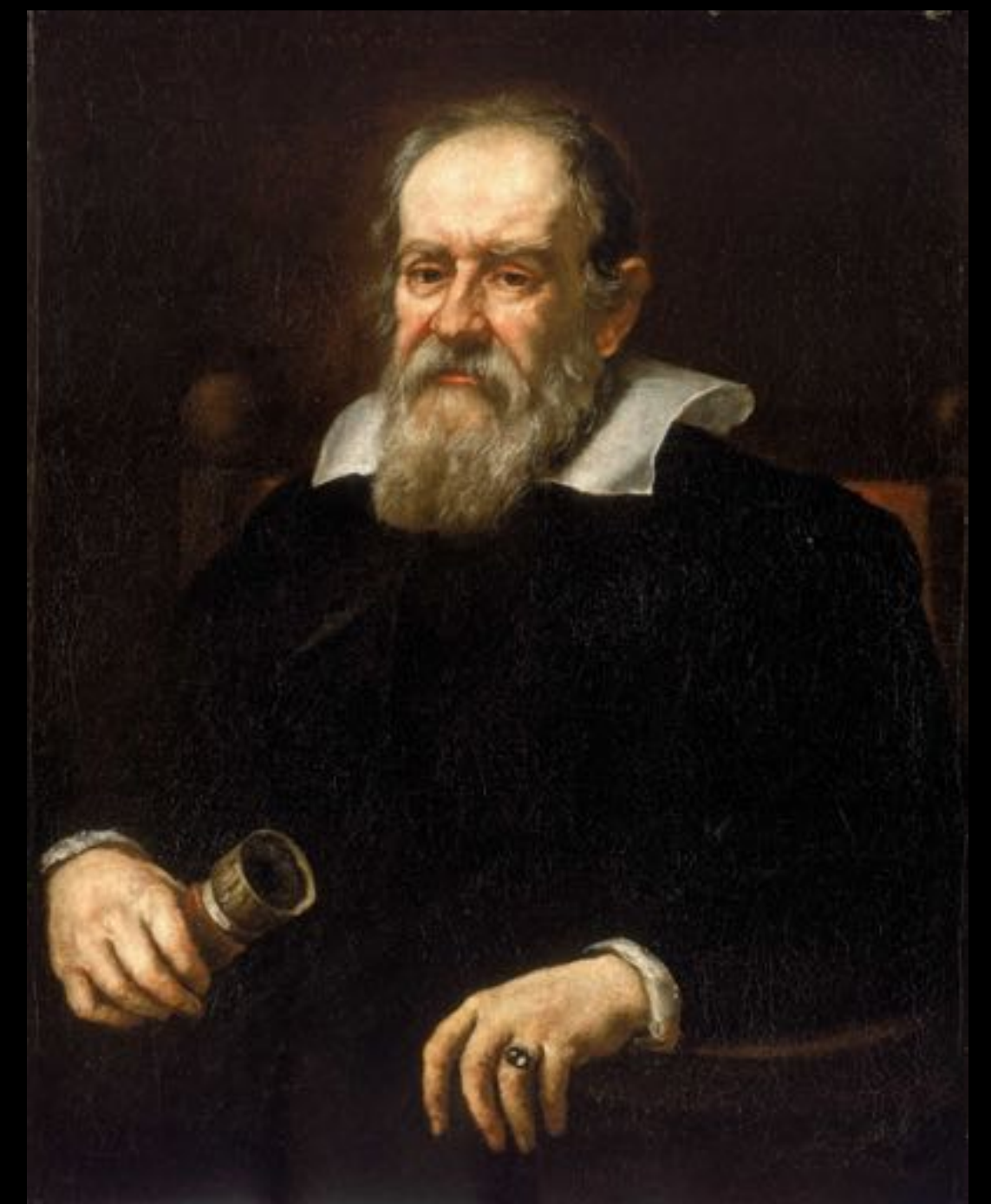
- “Caminho de leite”
- Demócrito (460-370 a.C.): não-contínua, feita de estrelas



# O que é a Via Láctea

## Introdução histórica

- “Caminho de leite”
- Demócrito (460-370 a.C.): não-contínua, feita de estrelas
- Galileu (1609): confirmação com telescópio (luneta)



# O que é a Via Láctea

## Introdução histórica

- “Caminho de leite”
- Demócrito (460-370 a.C.): não-contínua, feita de estrelas
- Galileu (1609): confirmação com telescópio (luneta)
- Immanuel Kant (1755): disco de estrelas, em rotação; universos-ilha





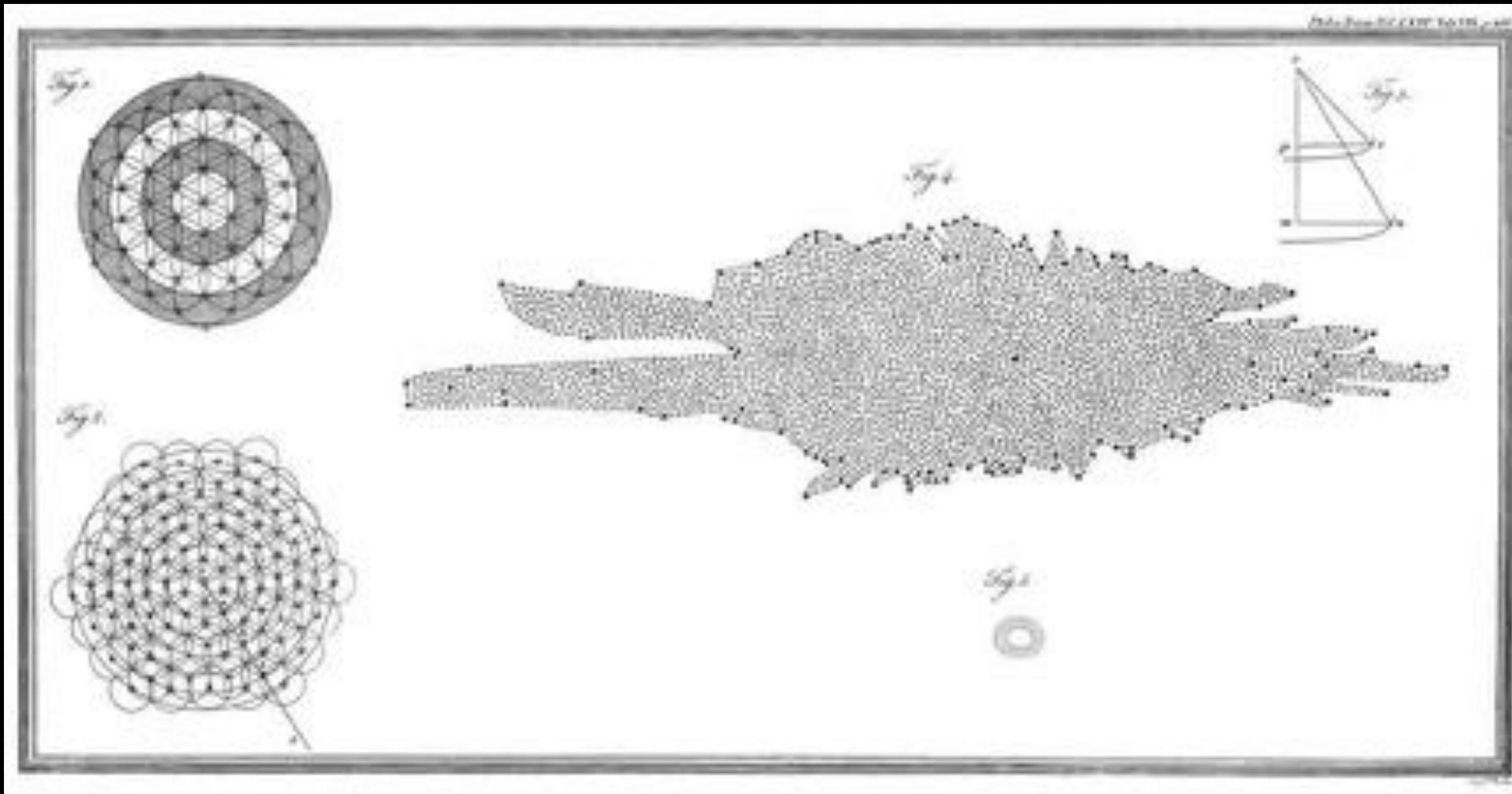
# O que é a Via Láctea

## Introdução histórica

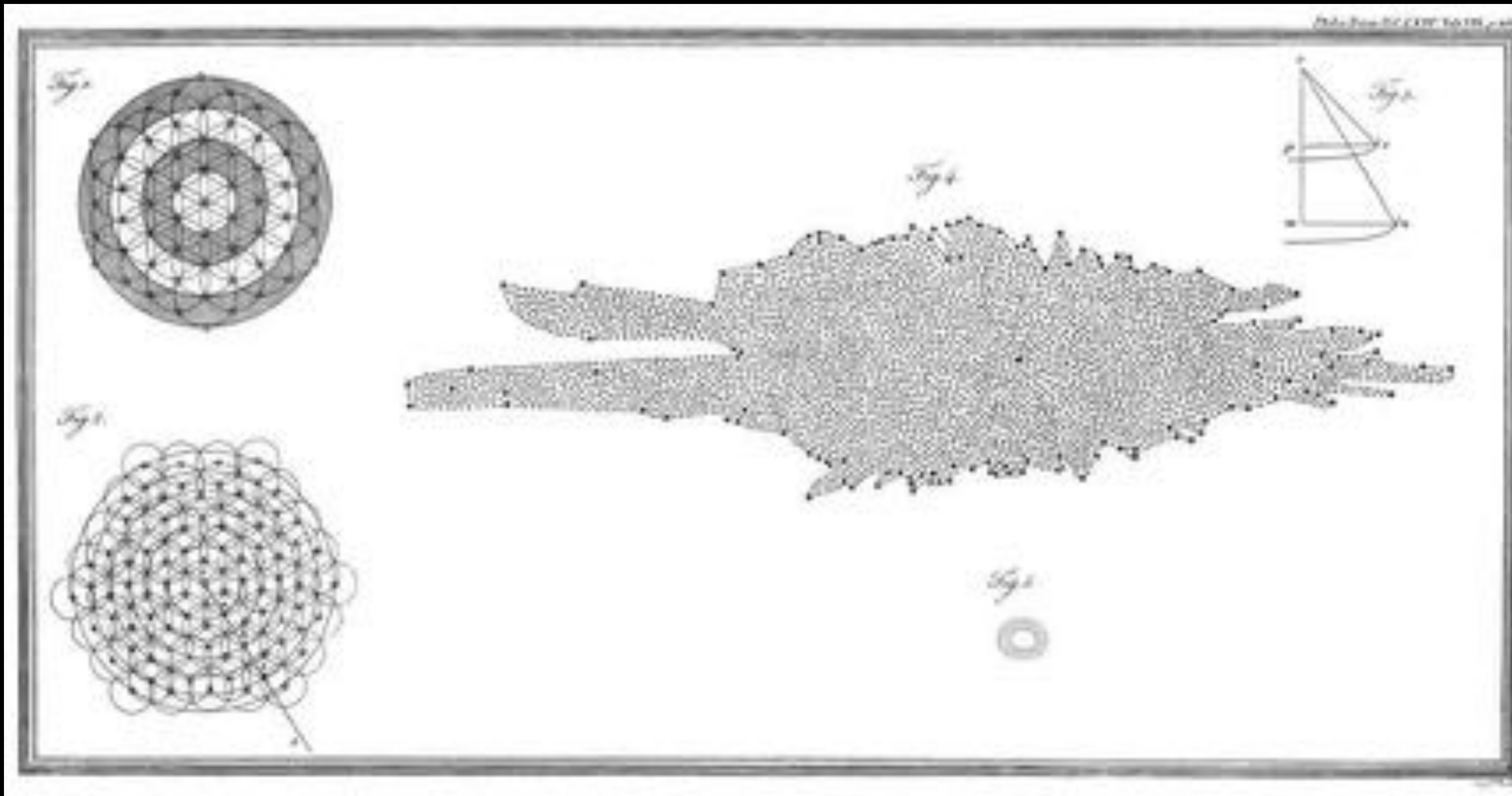
- “Caminho de leite”
- Demócrito (460-370 a.C.): não-contínua, feita de estrelas
- Galileu (1609): confirmação com telescópio (luneta)
- Immanuel Kant (1755): disco de estrelas, em rotação; universos-ilha
- William Herschel (1785):
  - “grande” telescópio (0,5 m);
  - 1º levantamento galáctico



# Modelo de Herschel - 1785



# Modelo de Herschel - 1785



- Distâncias relativas
- Disco, 1:4
- Sol próximo ao centro
- Hipótese: meio interestelar é transparente

# O Universo de Kapteyn

1896, 1900, 1920, 1922





# O Universo de Kapteyn

1896, 1900, 1920, 1922

- Jacobus Kapteyn - novo levantamento galáctico



# O Universo de Kapteyn

1896, 1900, 1920, 1922

- Jacobus Kapteyn - novo levantamento galáctico
- Duas vantagens (em relação a Herschel):



# O Universo de Kapteyn

1896, 1900, 1920, 1922

- Jacobus Kapteyn - novo levantamento galáctico
- Duas vantagens (em relação a Herschel):
  - Paralaxes - 1ª detecção em 1838 (Bessel)





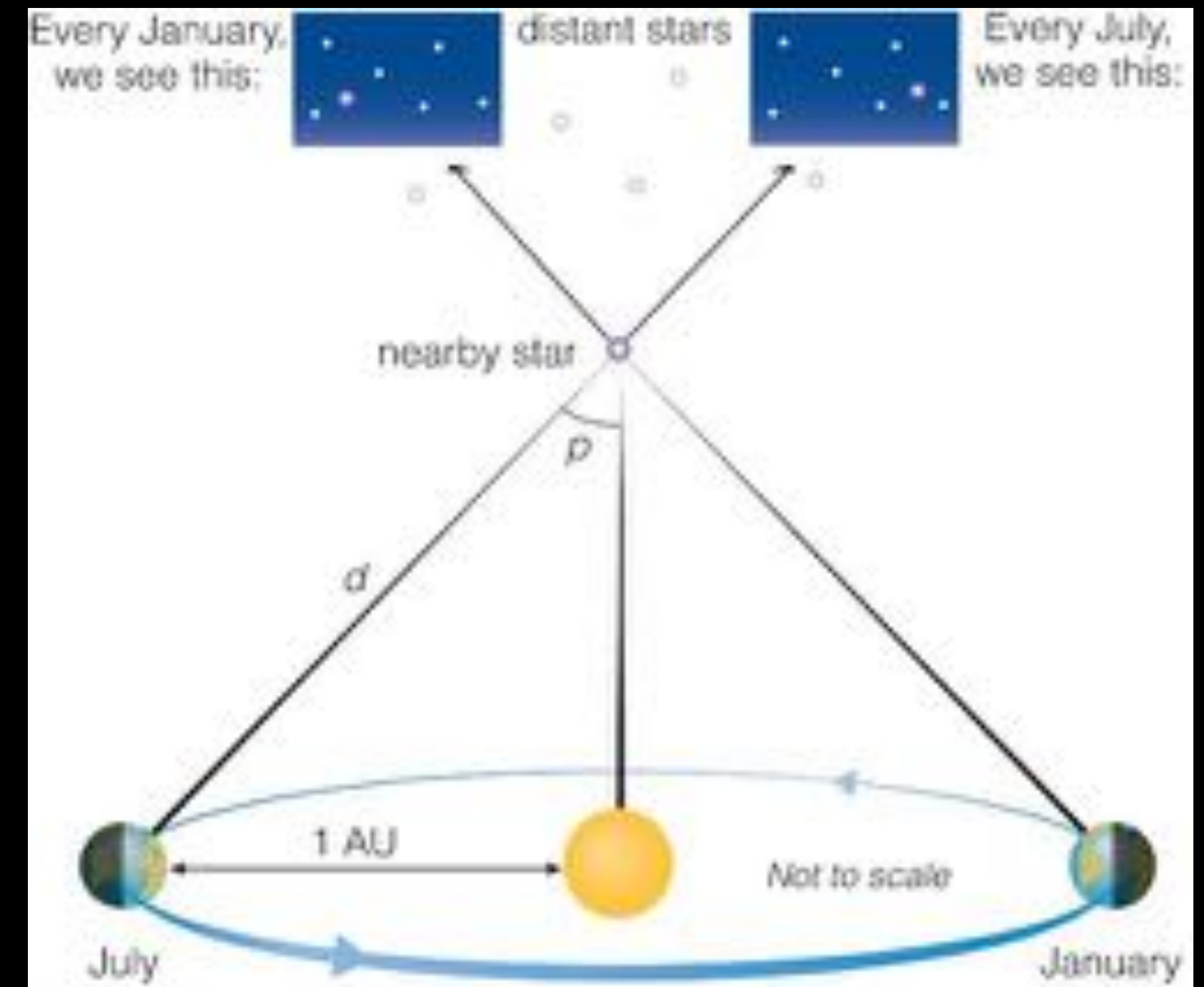
# O Universo de Kapteyn

1896, 1900, 1920, 1922

- Jacobus Kapteyn - novo levantamento galáctico
- Duas vantagens (em relação a Herschel):
  - Paralaxes - 1ª detecção em 1838 (Bessel)
  - Fotografia - inventada em ~ 1850

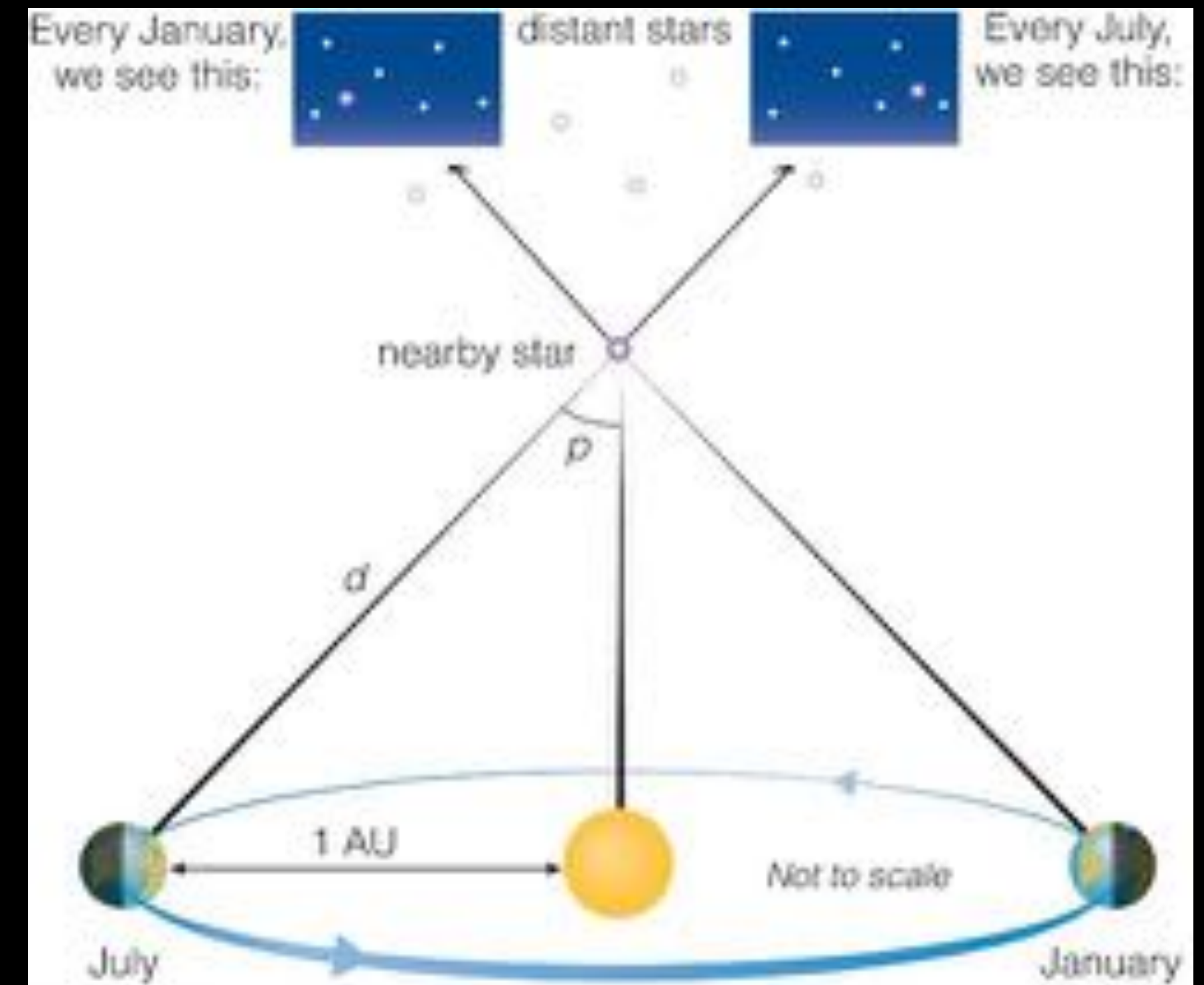


# Paralaxe



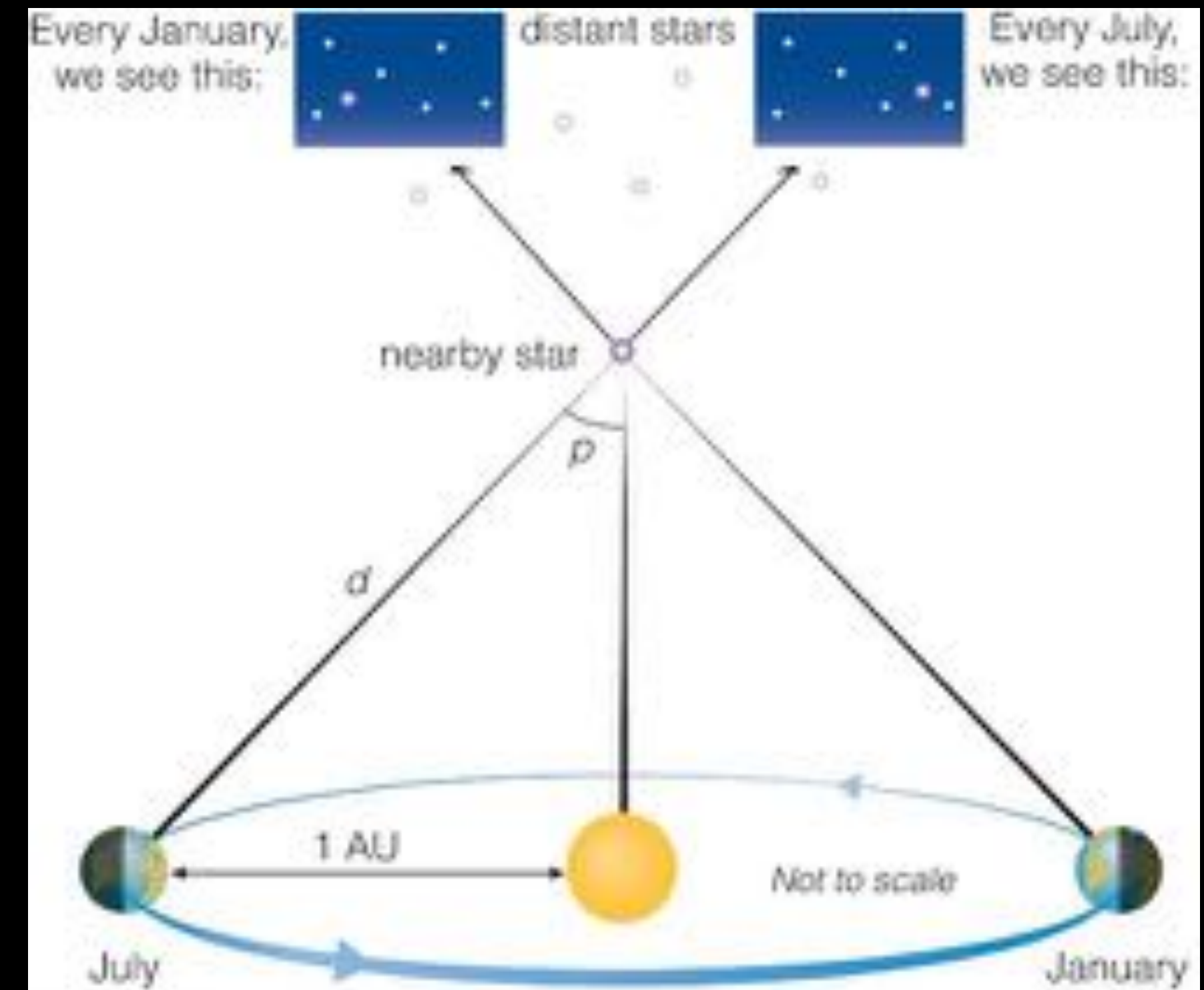
# Paralaxe

- Heliocentrismo proposto por Aristarco (~300 a.C.)



# Paralaxe

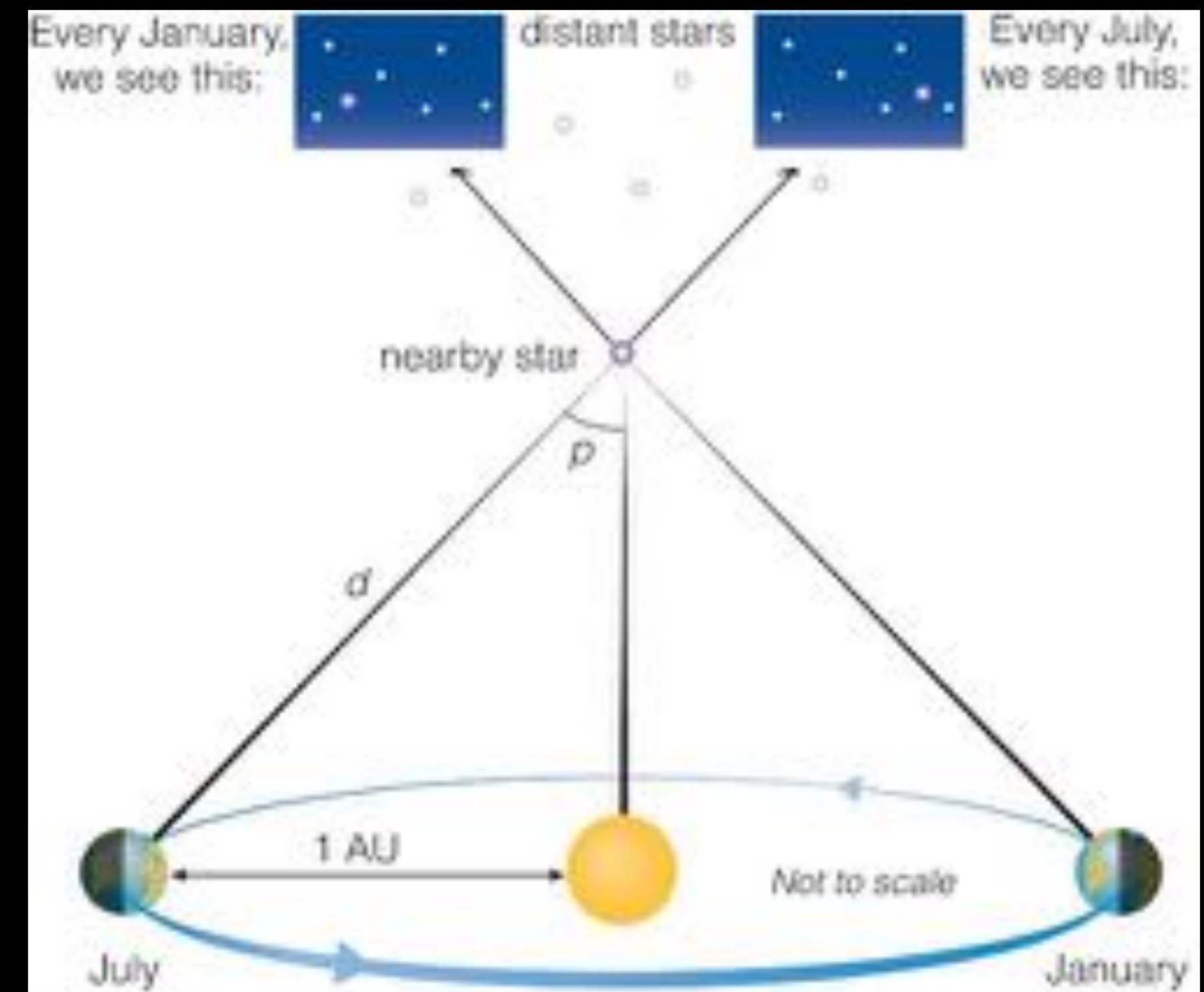
- Heliocentrismo proposto por Aristarco (~300 a.C.)
- Aceito na Europa apenas no séc. XVI





# Paralaxe

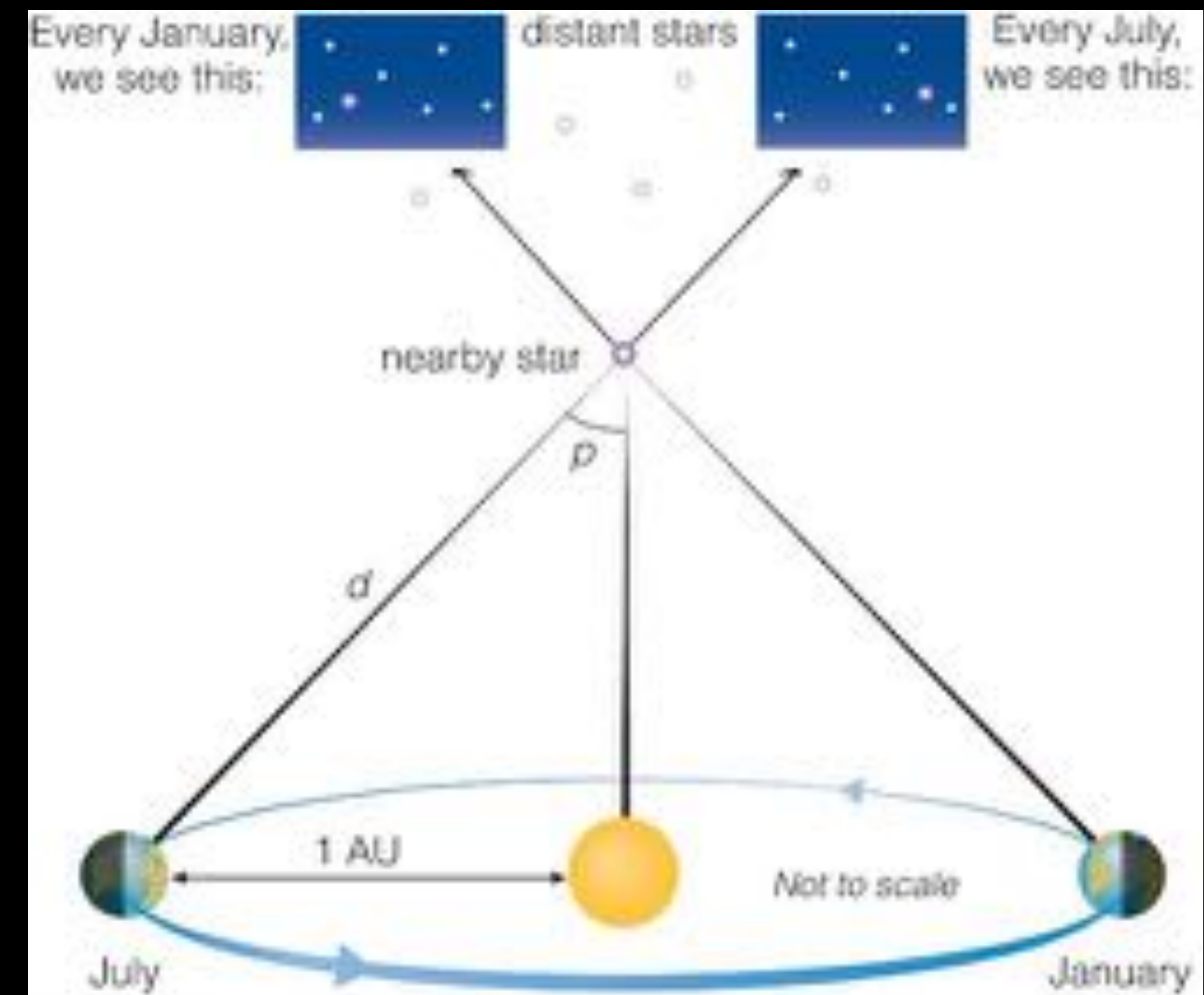
- Heliocentrismo proposto por Aristarco (~300 a.C.)
- Aceito na Europa apenas no séc. XVI
- Argumento contrário: ausência de paralaxes (p. ex. Tycho Brahe)





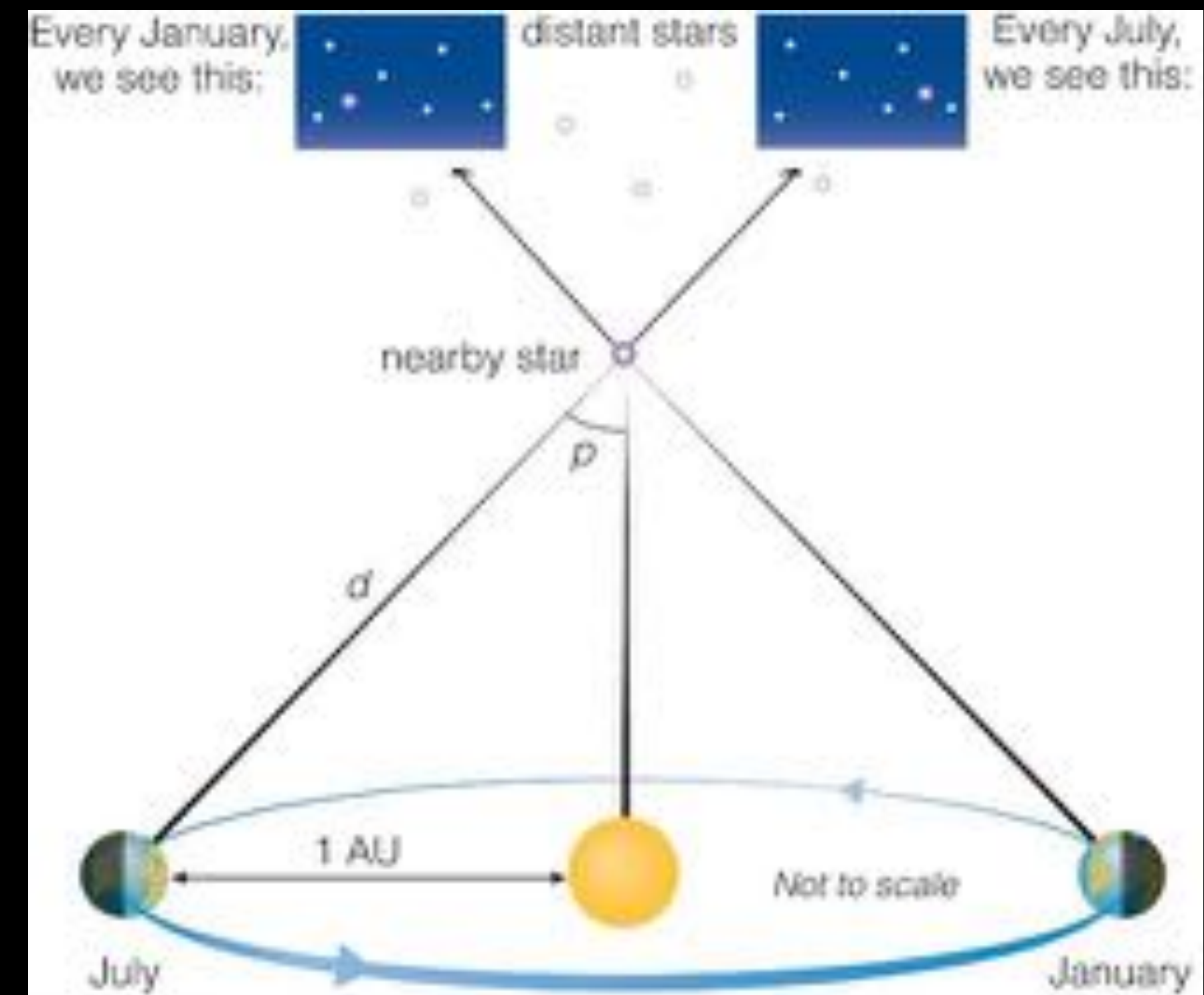
# Paralaxe

- Heliocentrismo proposto por Aristarco (~300 a.C.)
- Aceito na Europa apenas no séc. XVI
- Argumento contrário: ausência de paralaxes (p. ex. Tycho Brahe)
- Estabelecido o Heliocentrismo: paralaxes?



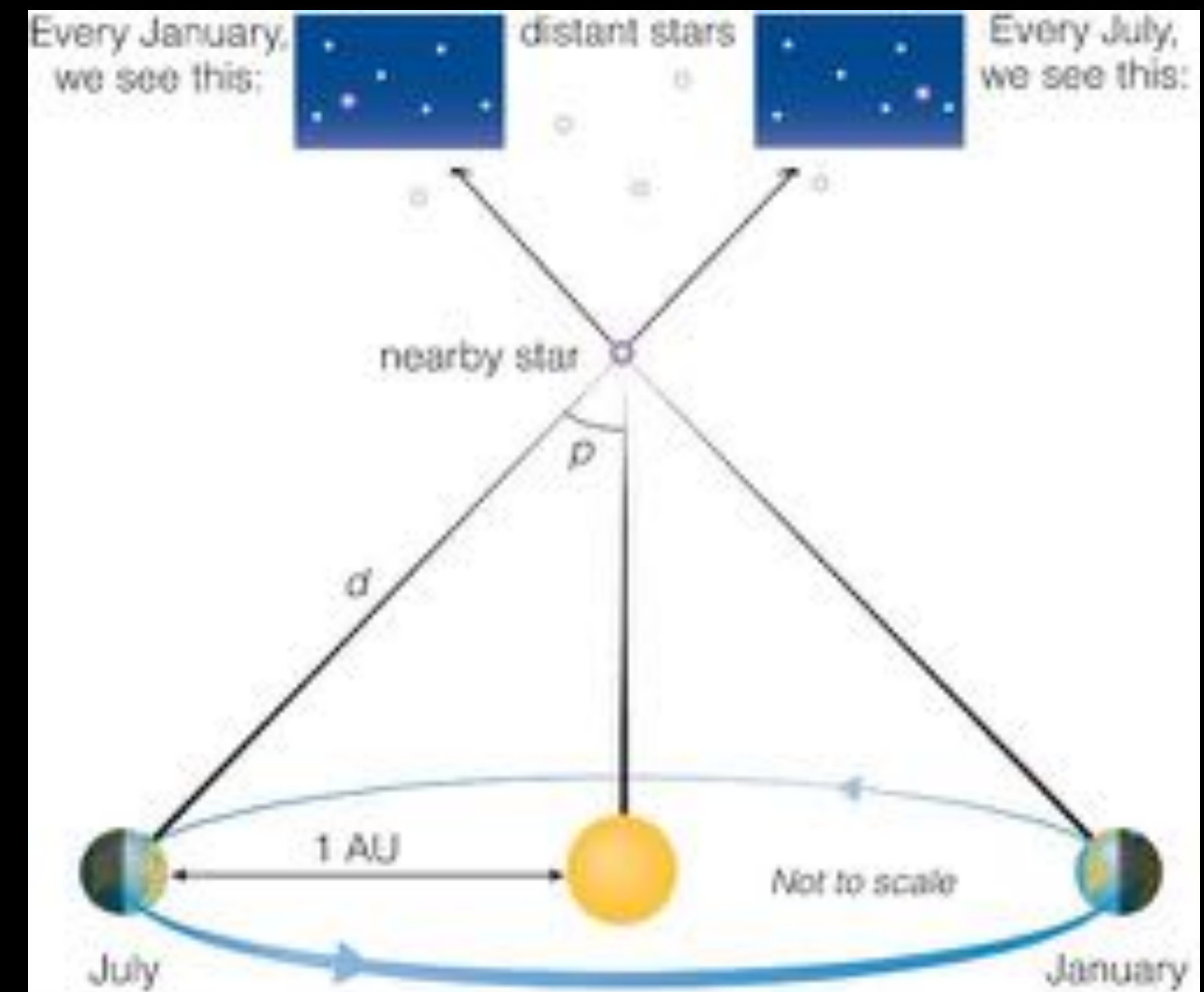
# Paralaxe

- Heliocentrismo proposto por Aristarco (~300 a.C.)
- Aceito na Europa apenas no séc. XVI
- Argumento contrário: ausência de paralaxes (p. ex. Tycho Brahe)
- Estabelecido o Heliocentrismo: paralaxes?
- 1ª paralaxe: F. Bessel (1838)- 61 Cygni -  $p \approx 0.3''$



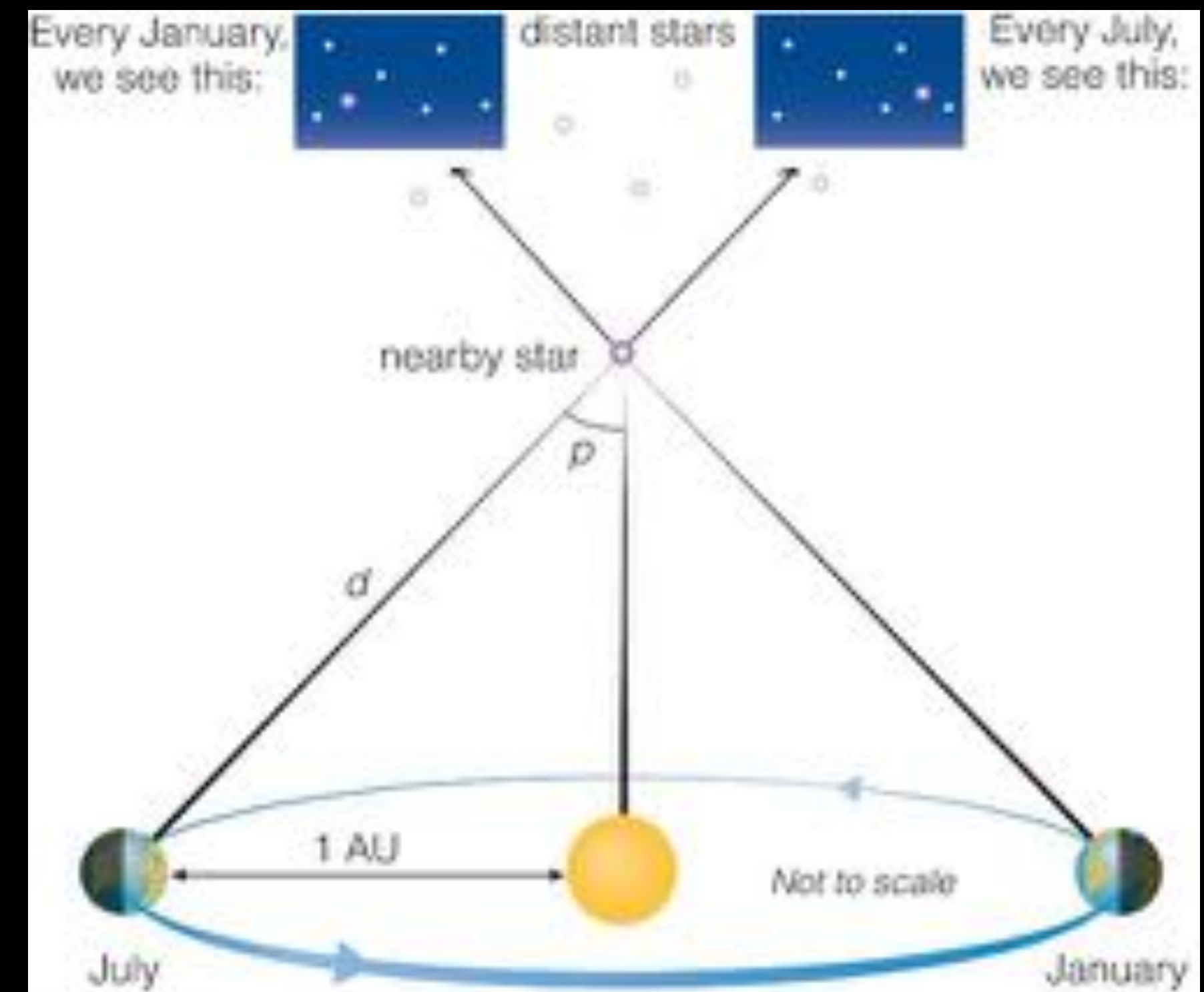
# Paralaxe

- Heliocentrismo proposto por Aristarco (~300 a.C.)
- Aceito na Europa apenas no séc. XVI
- Argumento contrário: ausência de paralaxes (p. ex. Tycho Brahe)
- Estabelecido o Heliocentrismo: paralaxes?
- 1ª paralaxe: F. Bessel (1838)- 61 Cygni -  $p \approx 0.3''$
- $d \approx 100$  trilhões de km!



# Paralaxe

- Heliocentrismo proposto por Aristarco (~300 a.C.)
- Aceito na Europa apenas no séc. XVI
- Argumento contrário: ausência de paralaxes (p. ex. Tycho Brahe)
- Estabelecido o Heliocentrismo: paralaxes?
- 1ª paralaxe: F. Bessel (1838)- 61 Cygni -  $p \approx 0.3''$
- $d \approx 100$  trilhões de km!
- $d \approx 600,000 \cdot d_{\text{sun}}$





# Parênteses: Missão Gaia



Paralaxes de  $10^9$  de estrelas!

Como Gaia mede paralaxes?

<https://youtu.be/m1ZNSPrH0q8>



# Fotografia



A Lua em uma das 1<sup>a</sup>s fotos astronômicas, J. Whipple (1851)

# Fotografia

- Medida mais objetiva de brilho e posição



A Lua em uma das 1<sup>a</sup>s fotos astronômicas, J. Whipple (1851)

# Fotografia

- Medida mais objetiva de brilho e posição
- Longos tempo de exposição -> objetos invisíveis a olho-nu



A Lua em uma das 1<sup>a</sup>s fotos astronômicas, J. Whipple (1851)



# O Universo de Kapteyn



# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições



# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições
- Primeiros catálogos: 1896, 1900, ~400 mil estrelas!



# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições
- Primeiros catálogos: 1896, 1900, ~400 mil estrelas!
- 1920-1922: resultados finais (206 áreas do céu)





# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições
- Primeiros catálogos: 1896, 1900, ~400 mil estrelas!
- 1920-1922: resultados finais (206 áreas do céu)
  - Distâncias (paralaxe) e movimento próprio para pequena fração



# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições
- Primeiros catálogos: 1896, 1900, ~400 mil estrelas!
- 1920-1922: resultados finais (206 áreas do céu)
  - Distâncias (paralaxe) e movimento próprio para pequena fração
  - Via Láctea é um disco em rotação





# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições
- Primeiros catálogos: 1896, 1900, ~400 mil estrelas!
- 1920-1922: resultados finais (206 áreas do céu)
  - Distâncias (paralaxe) e movimento próprio para pequena fração
  - Via Láctea é um disco em rotação
  - Raio: ~ 8 kpc (metade do valor atual)



# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições
- Primeiros catálogos: 1896, 1900, ~400 mil estrelas!
- 1920-1922: resultados finais (206 áreas do céu)
  - Distâncias (paralaxe) e movimento próprio para pequena fração
  - Via Láctea é um disco em rotação
  - Raio: ~ 8 kpc (metade do valor atual)
  - Sol próximo ao centro



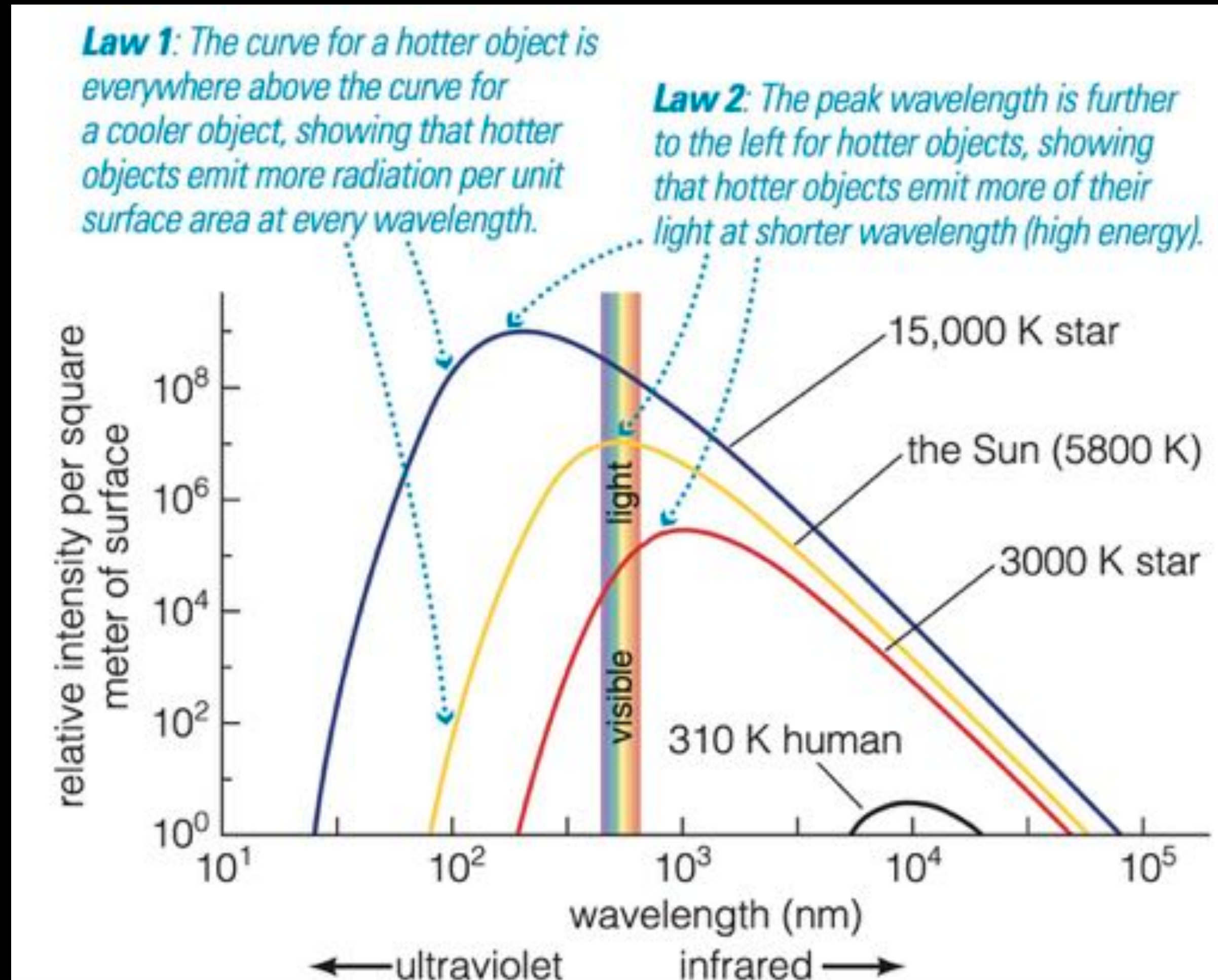
# O Universo de Kapteyn

- Números de estrelas em diferentes posições
- Primeiros catálogos: 1896, 1900, ~400 mil estrelas!
- 1920-1922: resultados finais (206 áreas do céu)
  - Distâncias (paralaxe) e movimento próprio para pequena fração
  - Via Láctea é um disco em rotação
  - Raio: ~ 8 kpc (metade do valor atual)
  - Sol próximo ao centro
  - Assumindo ausência de extinção! (poeira estelar)



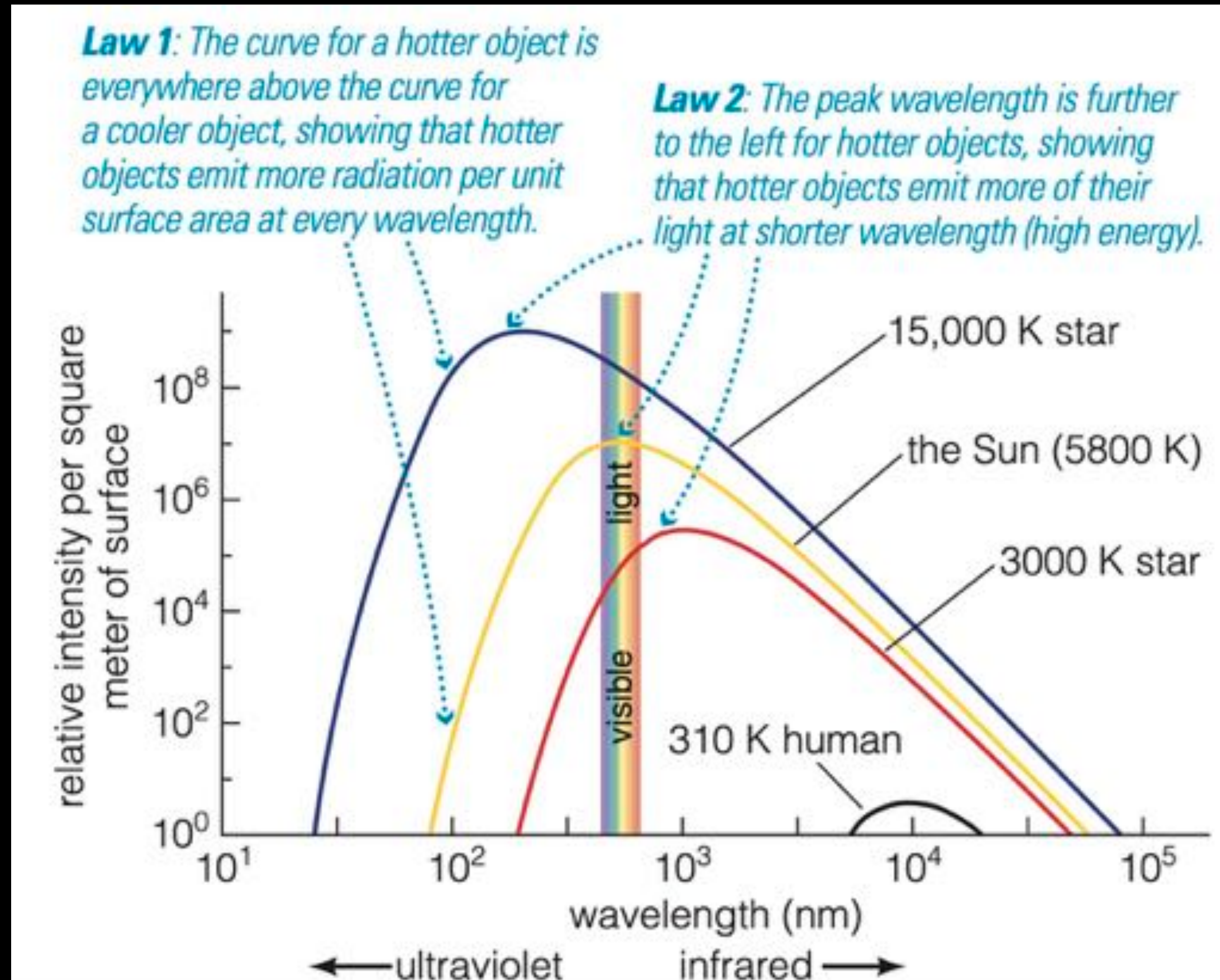


# Absorção e avermelhamento





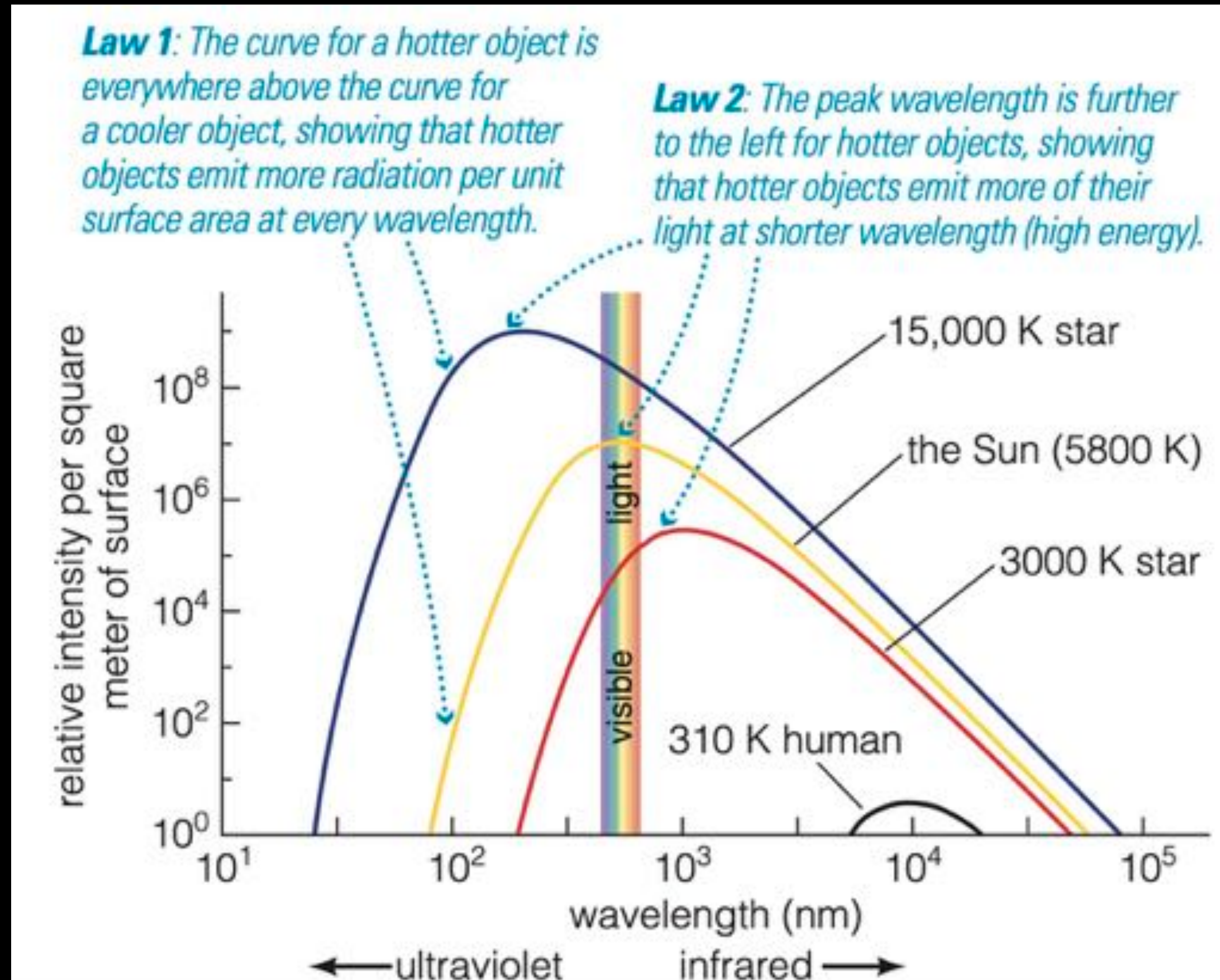
# Absorção e avermelhamento



- Grãos de poeira:  $\ell \sim 10 - 100$  nm



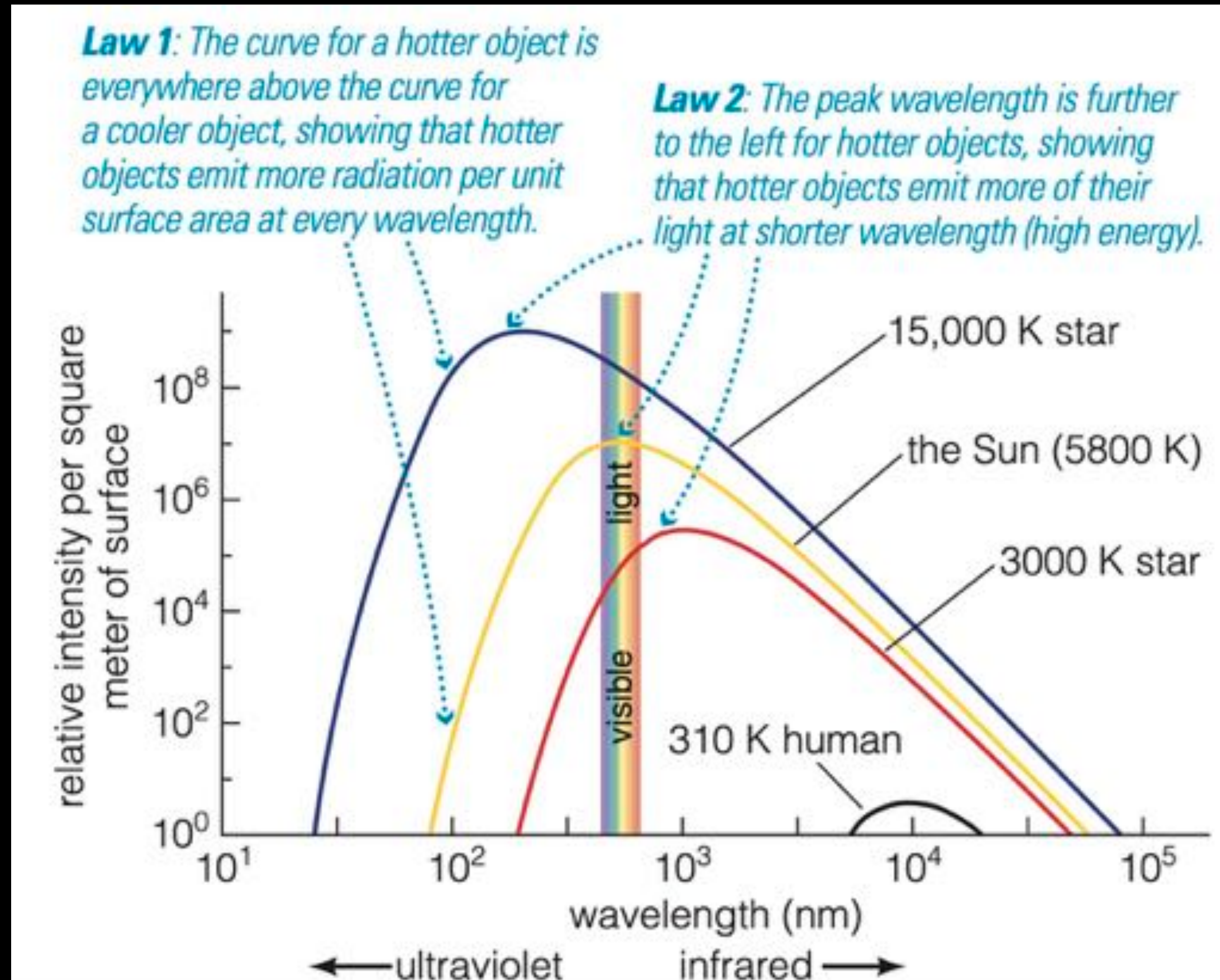
# Absorção e avermelhamento



- Grãos de poeira:  $\ell \sim 10 - 100$  nm
- Absorve radiação com  $\lambda \sim \ell$



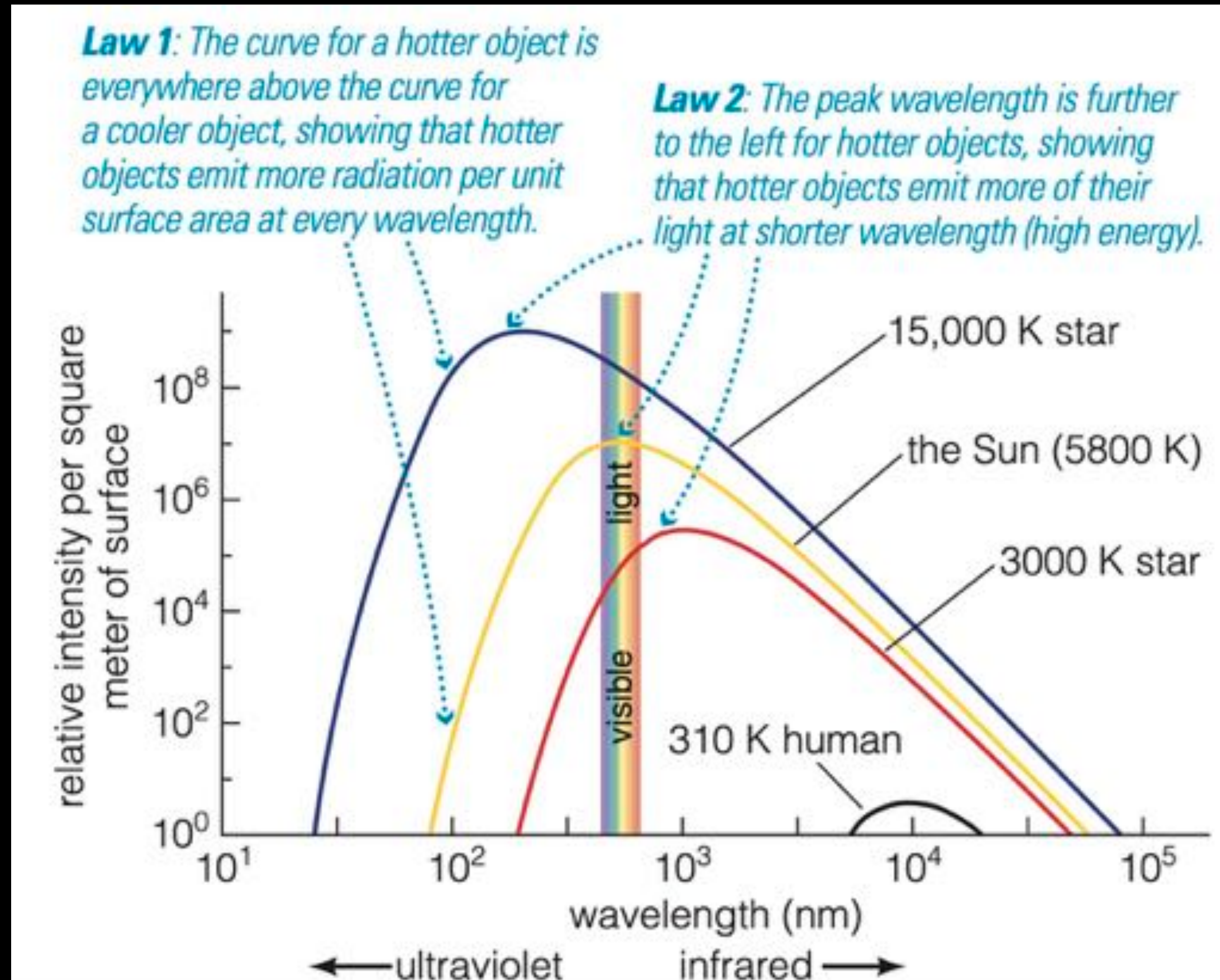
# Absorção e avermelhamento



- Grãos de poeira:  $\ell \sim 10 - 100$  nm
- Absorve radiação com  $\lambda \sim \ell$
- Absorve parte azul do espectro



# Absorção e avermelhamento



- Grãos de poeira:  $\ell \sim 10 - 100$  nm
- Absorve radiação com  $\lambda \sim \ell$
- Absorve parte azul do espectro
- Estrela parece mais vermelha

# O Universo de Kapteyn



# O Universo de Kapteyn

- Meio interestelar?

# O Universo de Kapteyn

- Meio interestelar?
- 1914: estrelas mais distantes parecem mais vermelhas

# O Universo de Kapteyn

- Meio interestelar?
- 1914: estrelas mais distantes parecem mais vermelhas
- 1922: resultados de Harlow Shapley com aglomerados globulares

# O Universo de Kapteyn

- Meio interestelar?
- 1914: estrelas mais distantes parecem mais vermelhas
- 1922: resultados de Harlow Shapley com aglomerados globulares
- 1922: Kapteyn volta a defender ausência de extinção



# O Universo de Kapteyn

- Meio interestelar?
- 1914: estrelas mais distantes parecem mais vermelhas
- 1922: resultados de Harlow Shapley com aglomerados globulares
- 1922: Kapteyn volta a defender ausência de extinção
- Por que resultados de Shapley eram tão convincentes?

# Escada de distâncias

## Luminosidade aparente vs absoluta



Fluxo vs Luminosidade

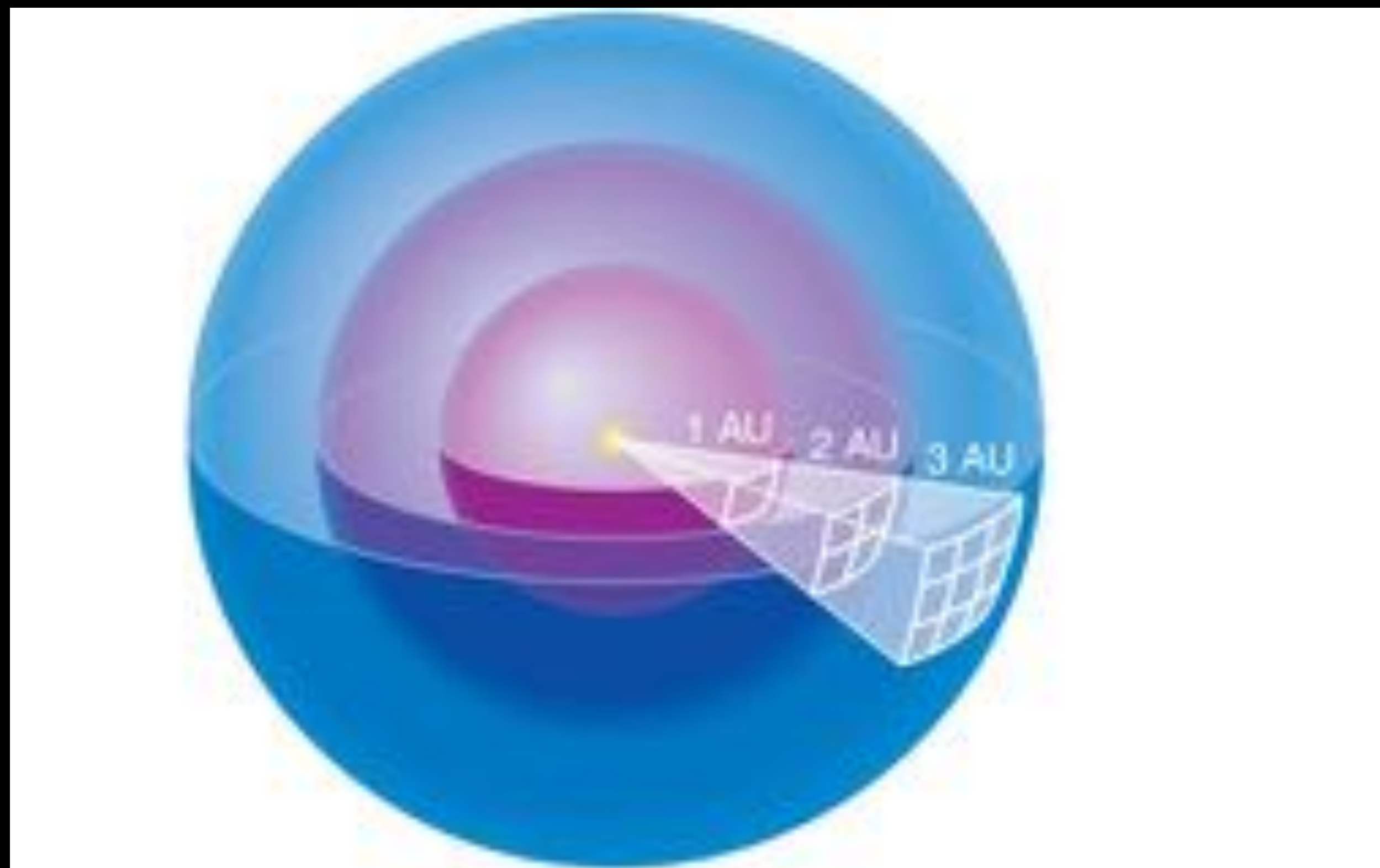


# Escada de distâncias

## Luminosidade aparente vs absoluta



Fluxo vs Luminosidade



$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

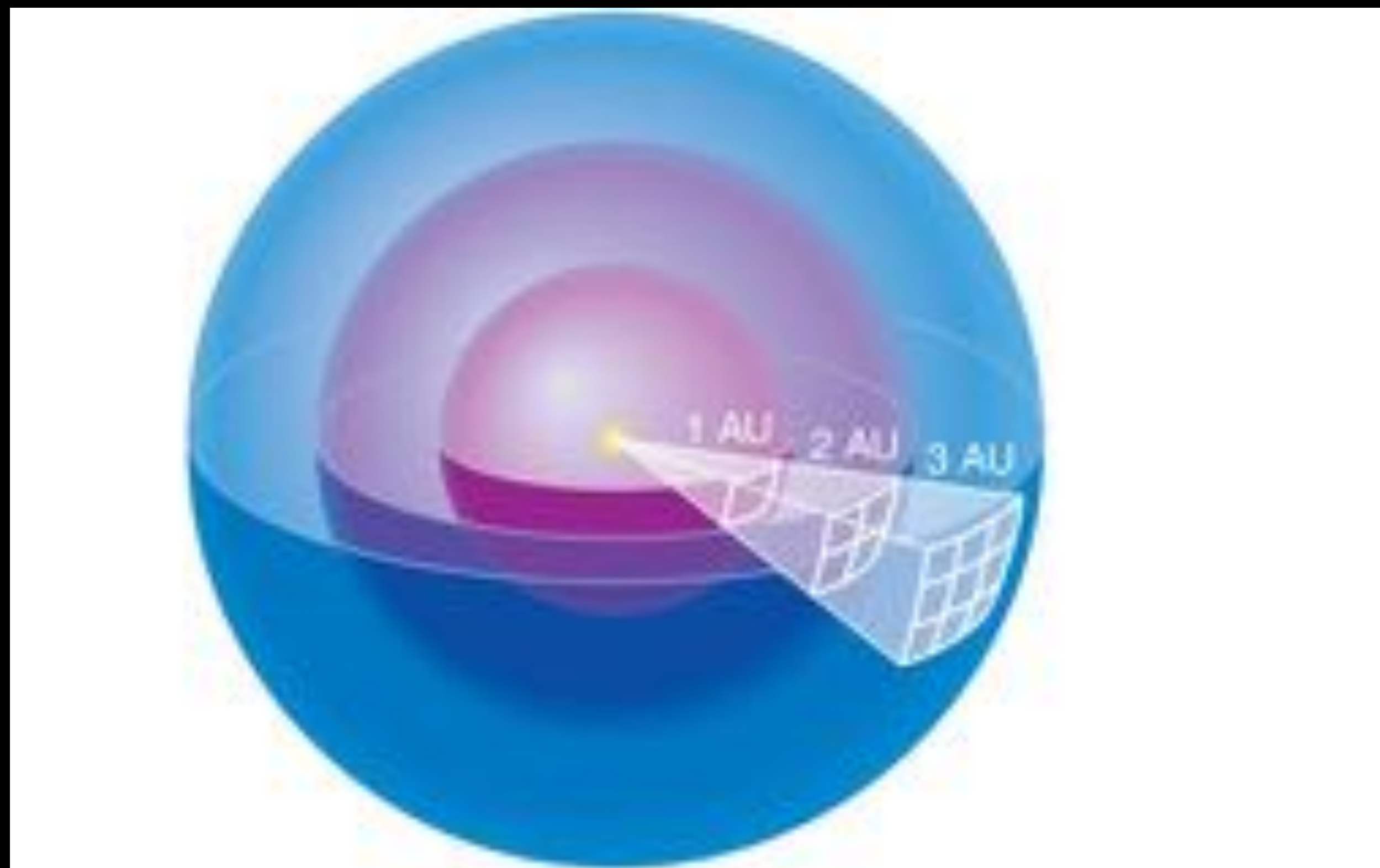


# Escada de distâncias

## Luminosidade aparente vs absoluta



Fluxo vs Luminosidade



$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Conhecendo  $L$  e medindo o fluxo, temos  $d$ !



# Escada de distâncias



# Escada de distâncias

- 1850: fotografia na astronomia

# Escada de distâncias

- 1850: fotografia na astronomia
- 1910: paralaxes de  $\sim 400$  estrelas

# Escada de distâncias

- 1850: fotografia na astronomia
- 1910: paralaxes de  $\sim 400$  estrelas
- E. Pickering e “computadoras” (Harvard)



# Escada de distâncias

- 1850: fotografia na astronomia
- 1910: paralaxes de  $\sim 400$  estrelas
- E. Pickering e “computadoras” (Harvard)





# Escada de distâncias

- 1850: fotografia na astronomia
- 1910: paralaxes de  $\sim 400$  estrelas
- E. Pickering e “computadoras” (Harvard)



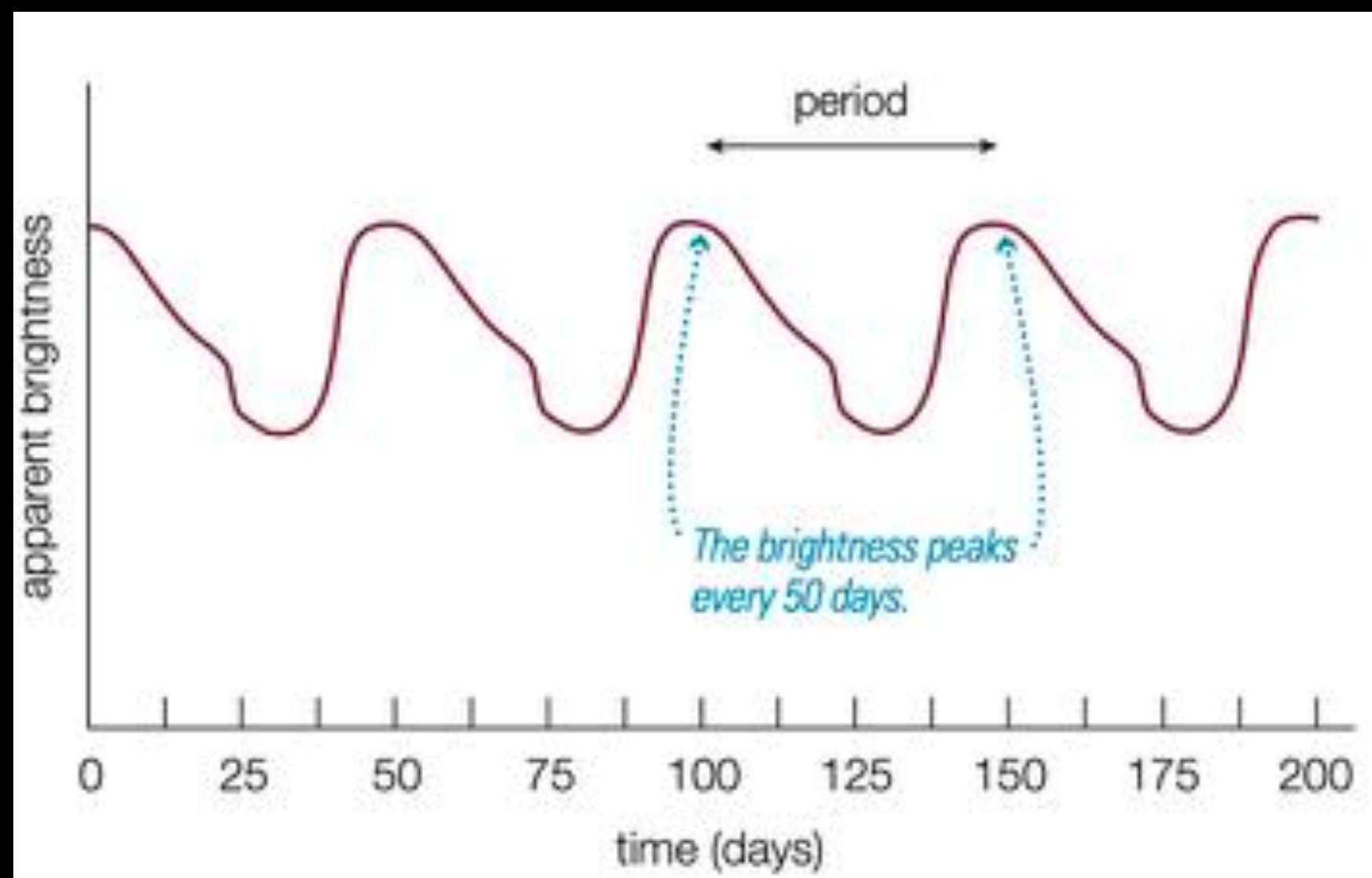
# Escada de distâncias

- 1850: fotografia na astronomia
- 1910: paralaxes de  $\sim 400$  estrelas
- E. Pickering e “computadoras” (Harvard)
- H. Leavitt: estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães

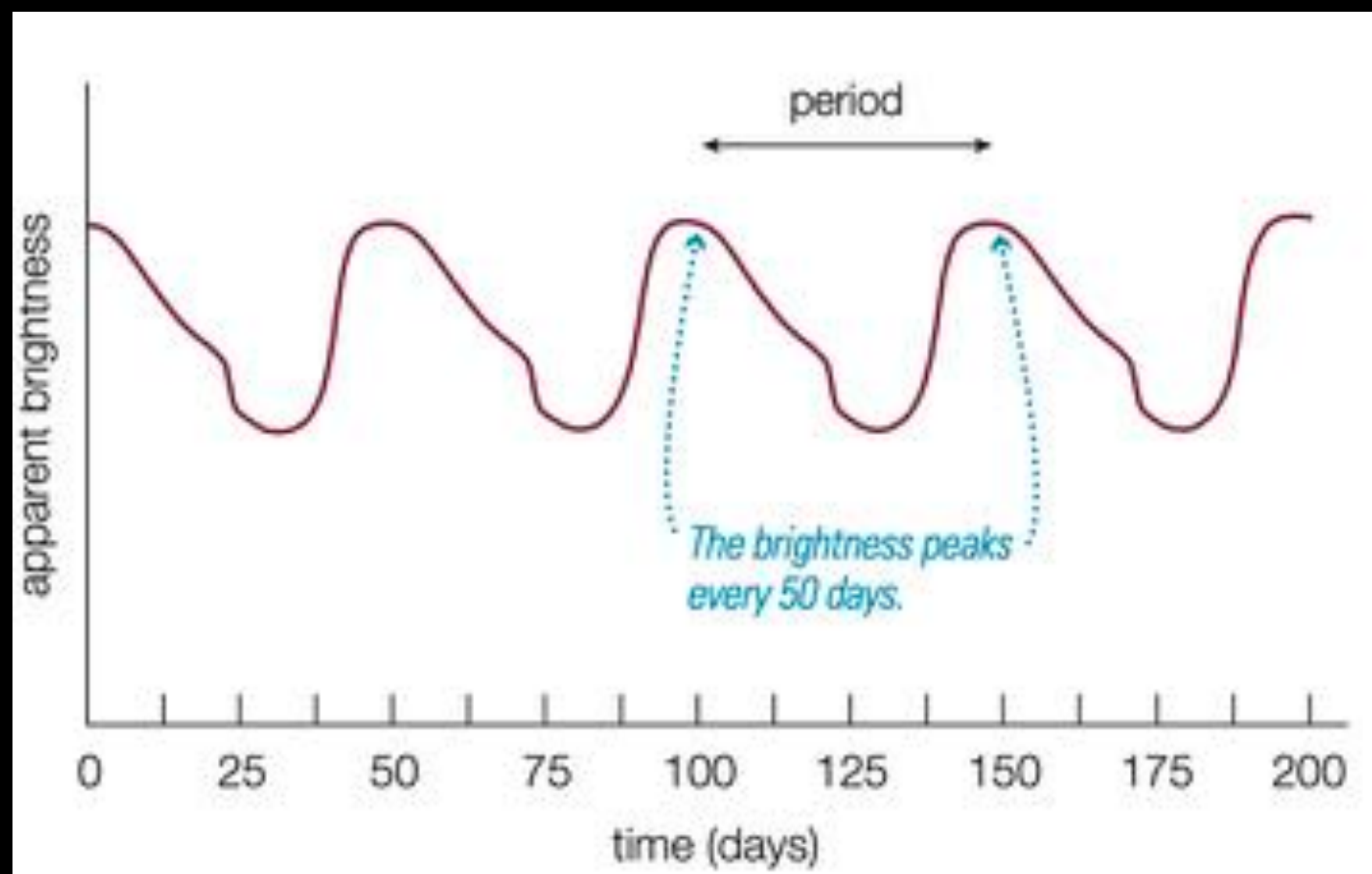


# Escada de distâncias

- 1850: fotografia na astronomia
- 1910: paralaxes de  $\sim 400$  estrelas
- E. Pickering e “computadoras” (Harvard)
- H. Leavitt: estrelas variáveis nas Nuvens de Magalhães



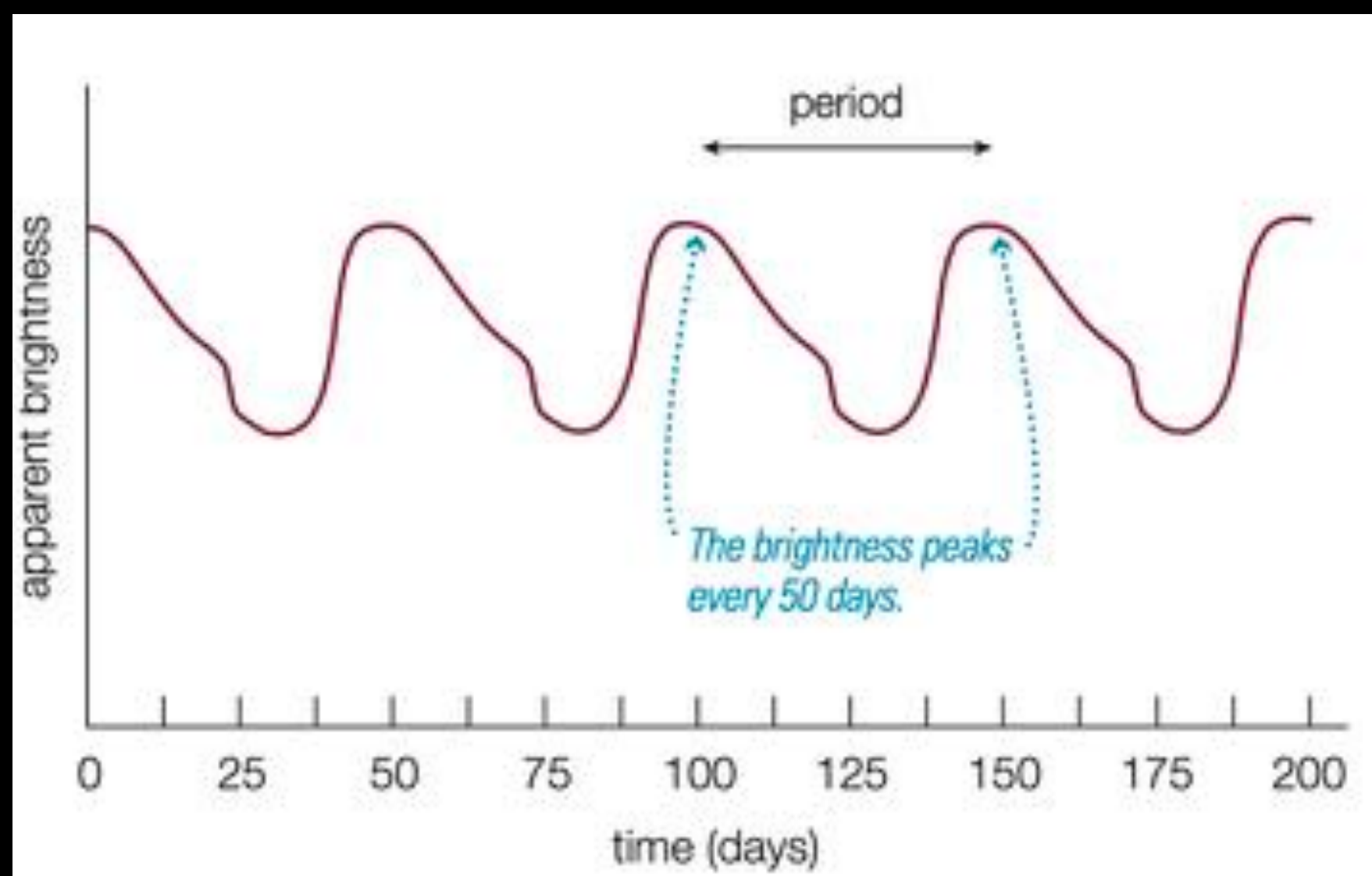
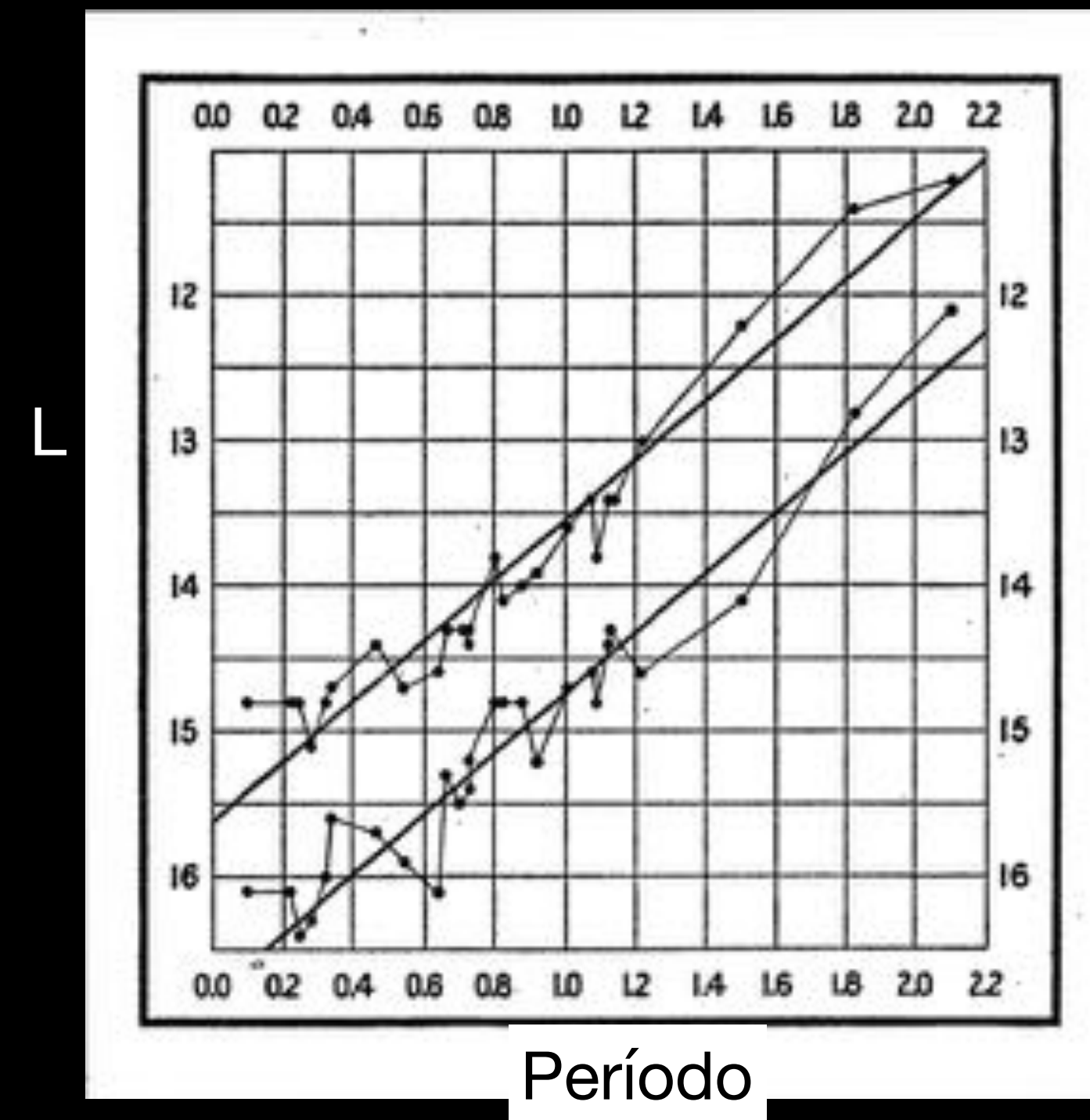
# Rel. período-luminosidade





# Rel. período-luminosidade

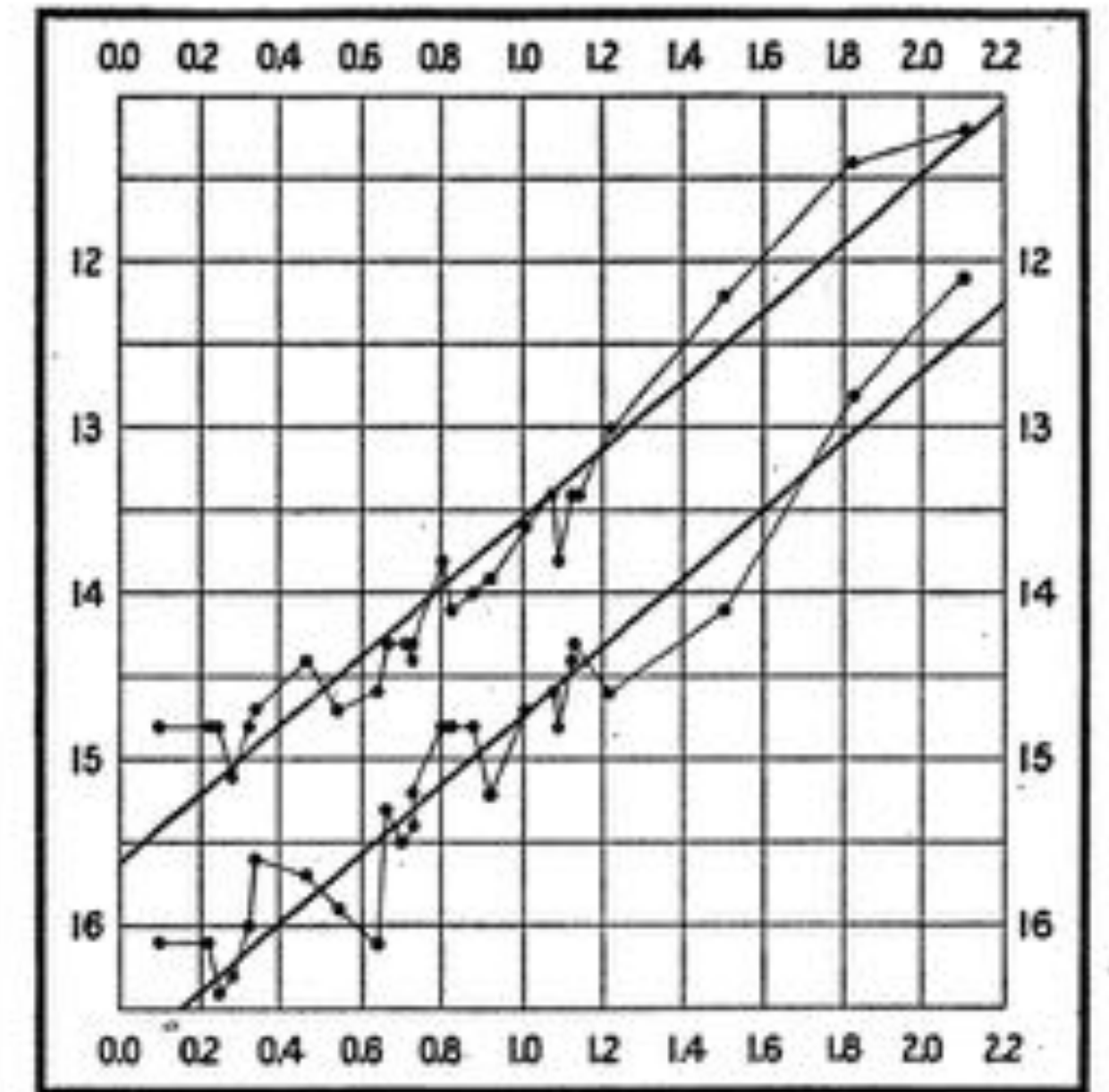
- Cefeidas: relação período-luminosidade



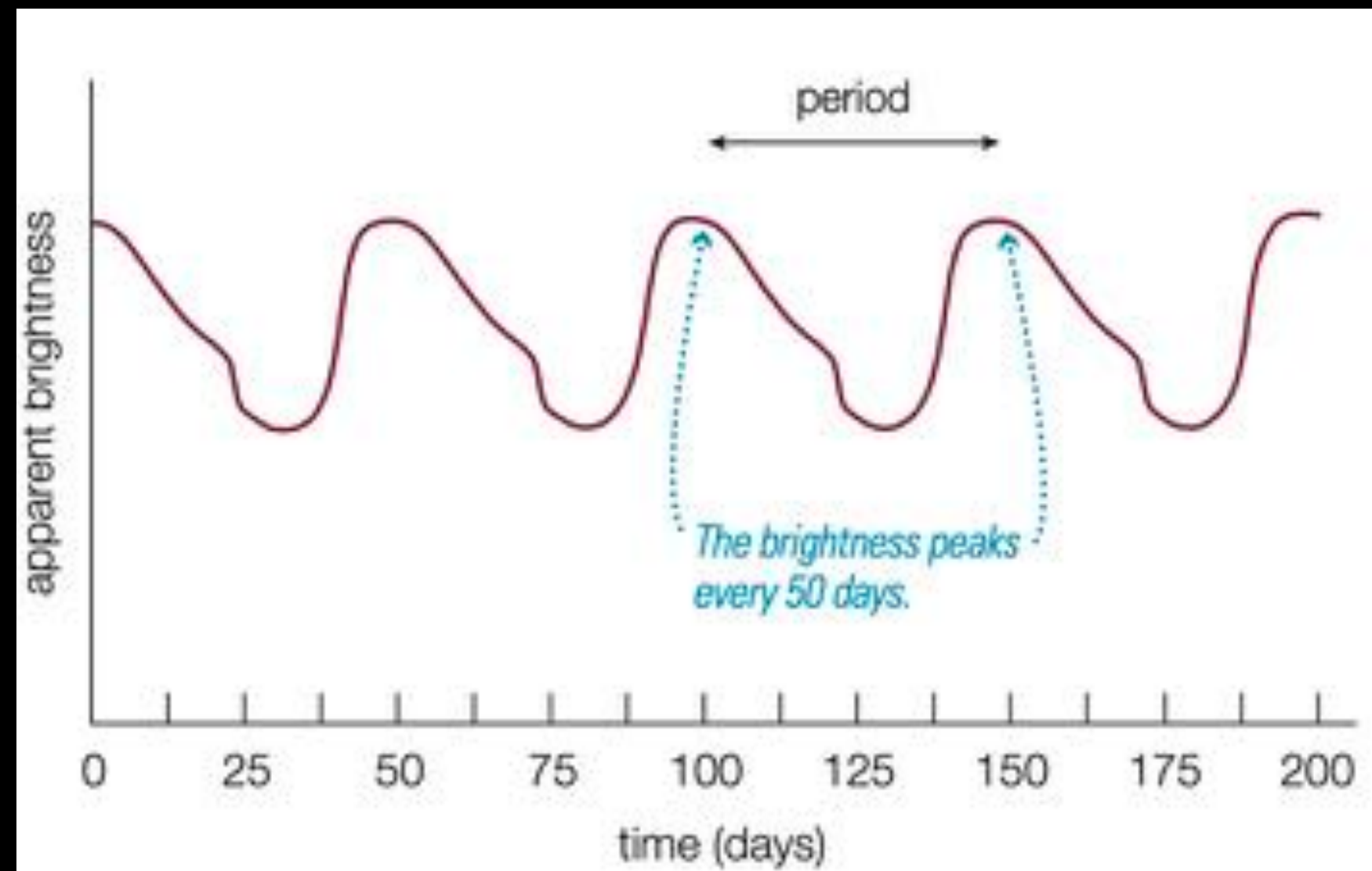
# Rel. período-luminosidade

- Cefeidas: relação período-luminosidade
- E. Hertzsprung (1913): paralaxe de Cefeidas

L



Período

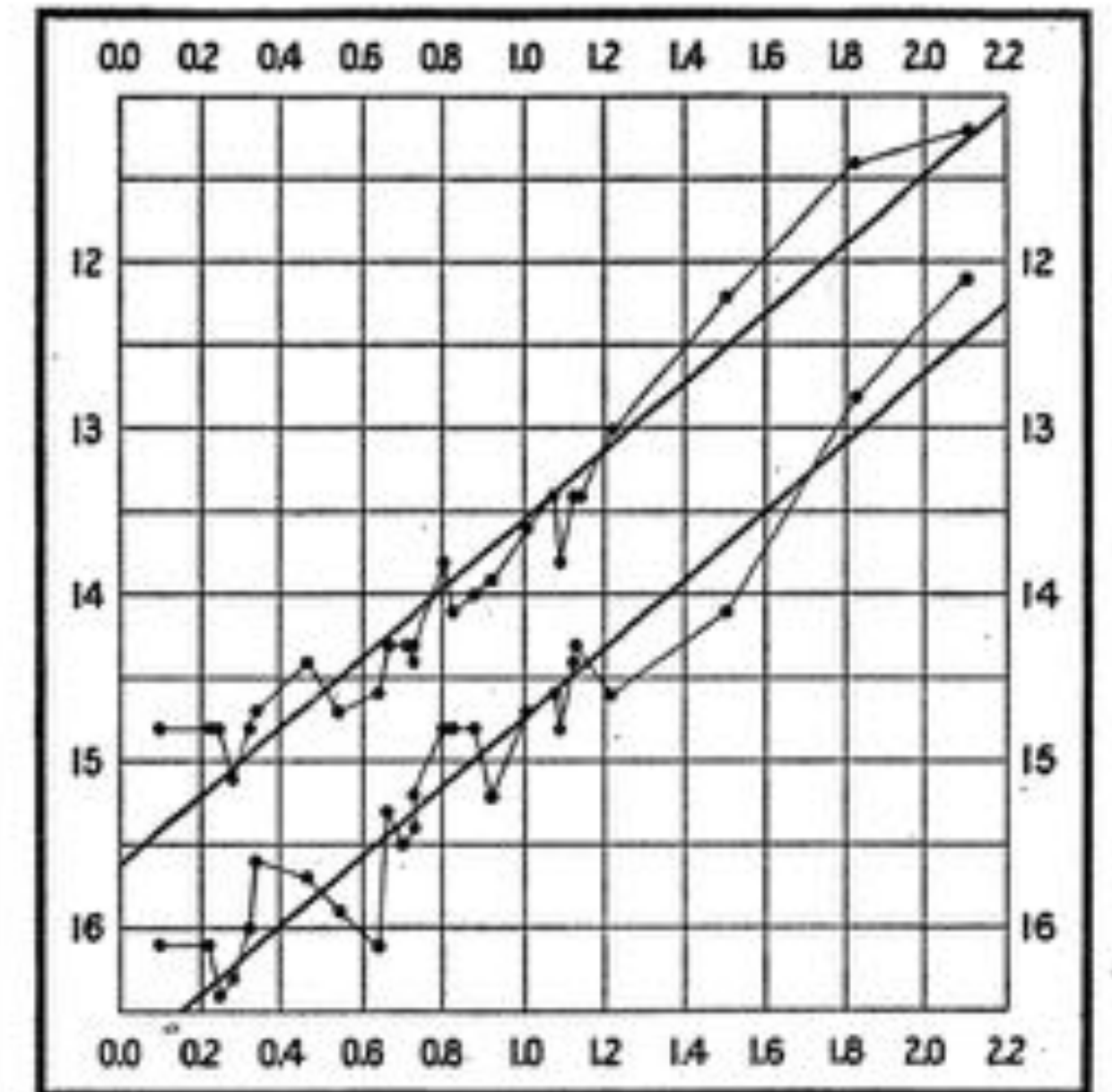




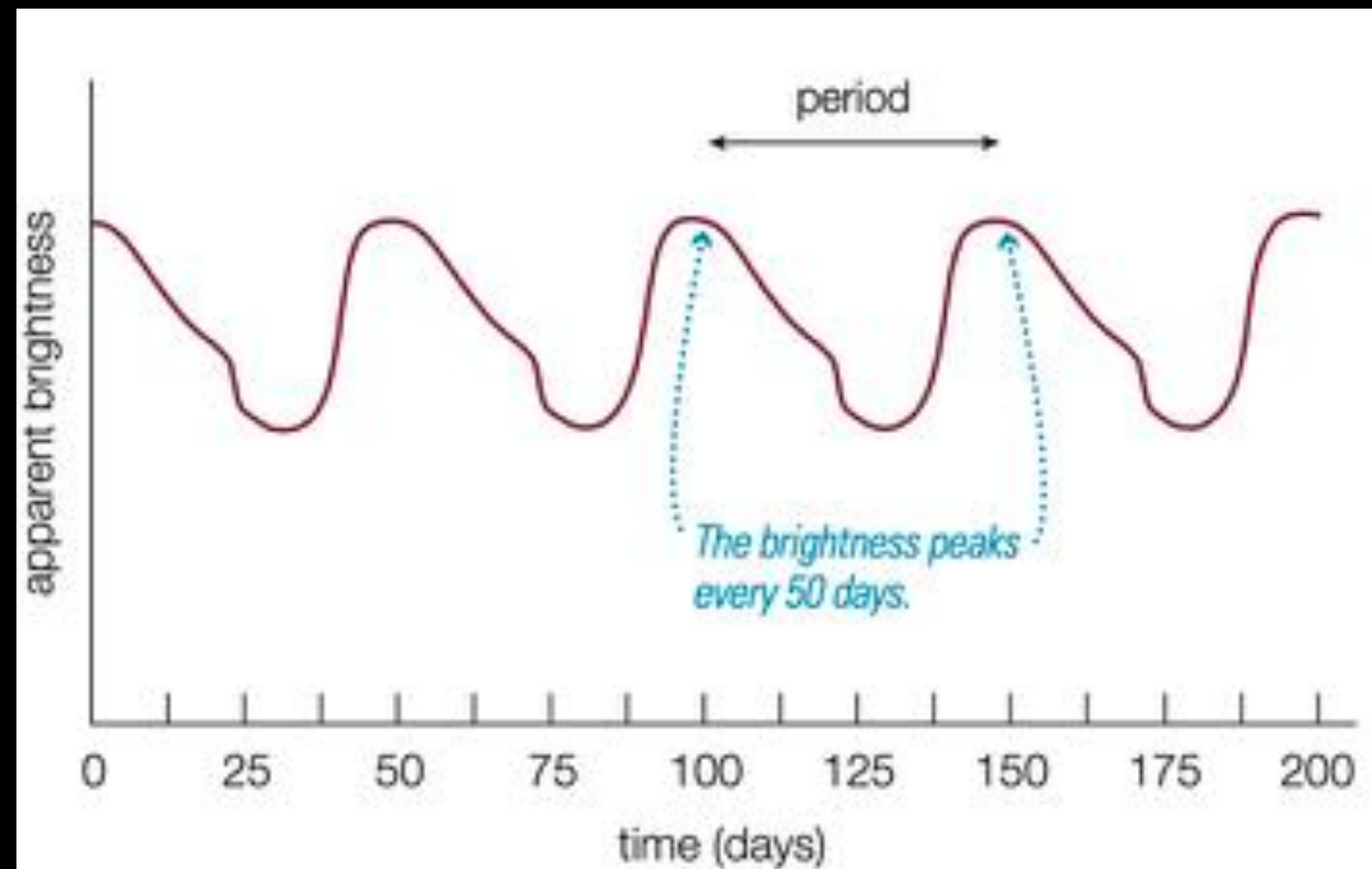
# Rel. período-luminosidade

- Cefeidas: relação período-luminosidade
- E. Hertzsprung (1913): paralaxe de Cefeidas
- Calibração absoluta

L

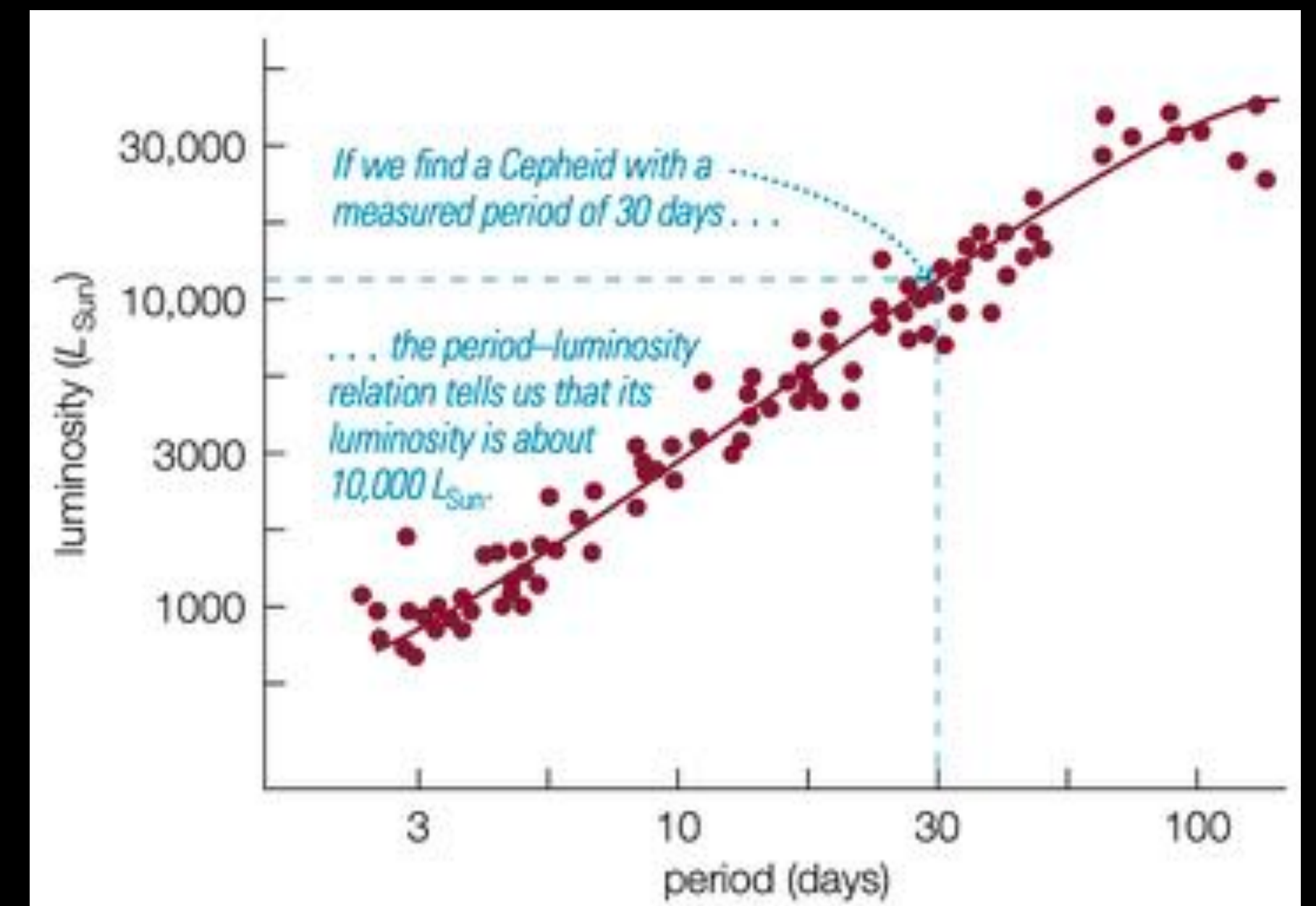


Período



# Rel. período-luminosidade

- Cefeidas: relação período-luminosidade
- E. Hertzsprung (1913): paralaxe de Cefeidas
- Calibração absoluta

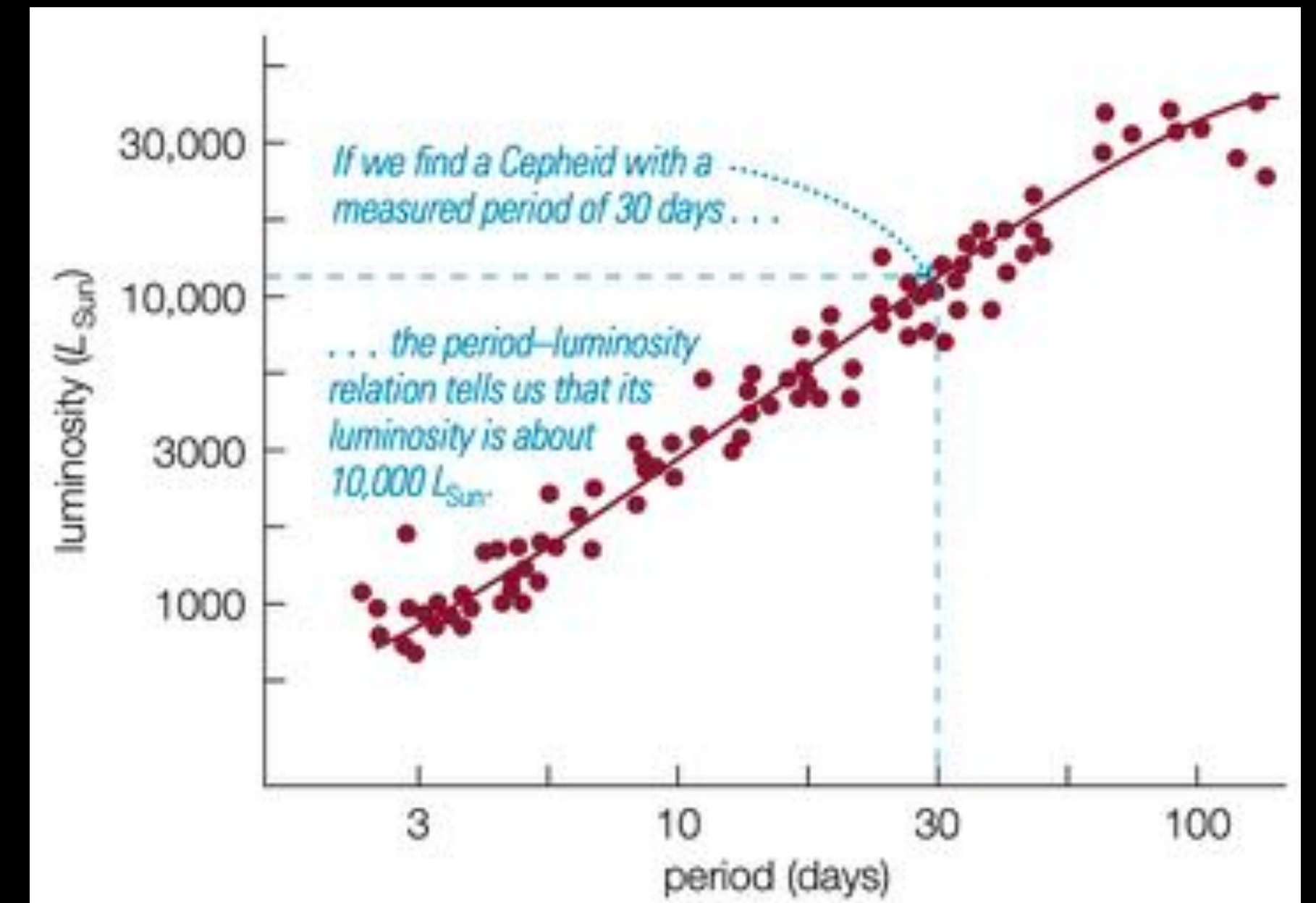




# Rel. período-luminosidade

- Cefeidas: relação período-luminosidade
- E. Hertzsprung (1913): paralaxe de Cefeidas
- Calibração absoluta

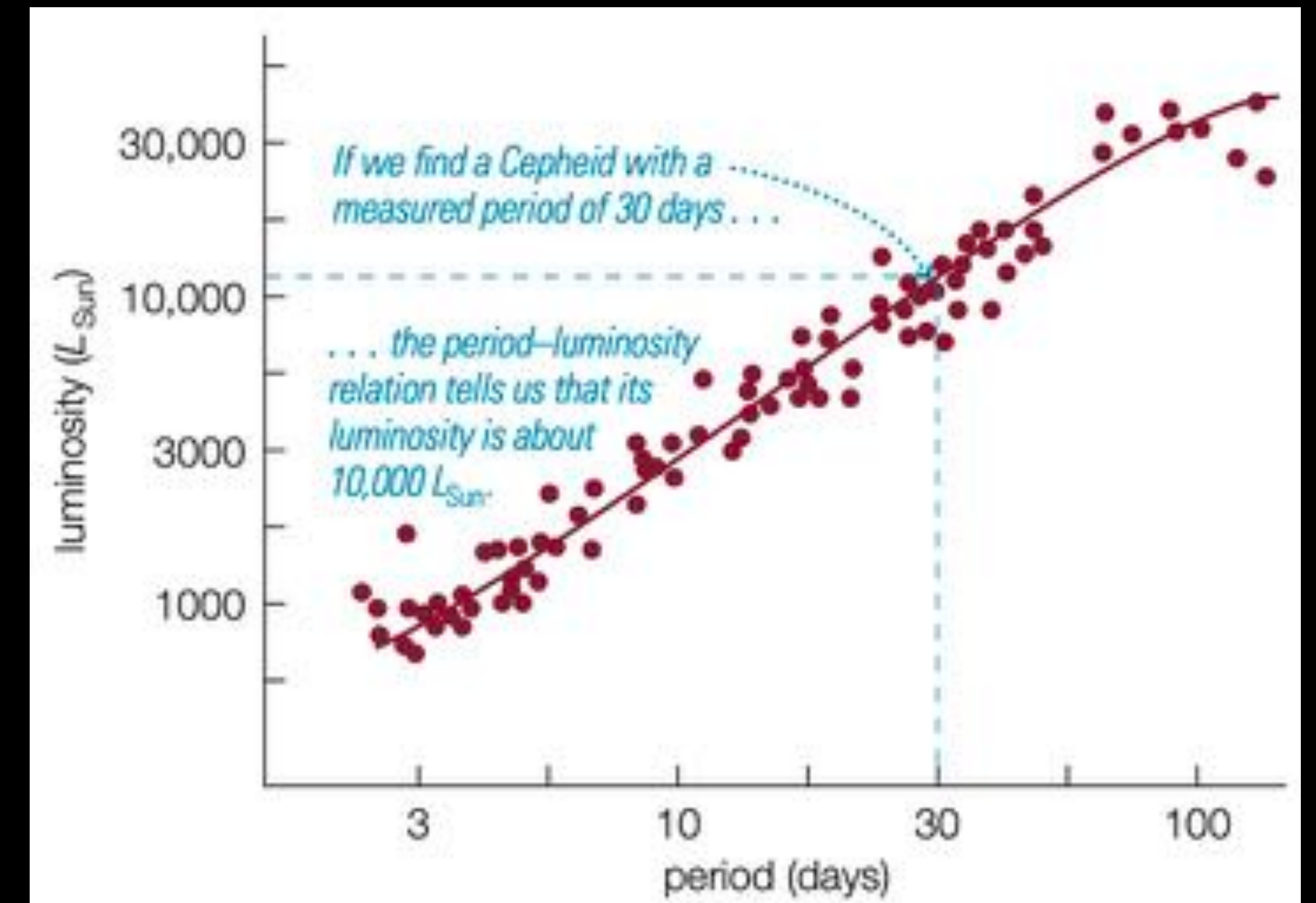
- $$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$



# Rel. período-luminosidade

- Cefeidas: relação período-luminosidade
- E. Hertzsprung (1913): paralaxe de Cefeidas
- Calibração absoluta

- $$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$





# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

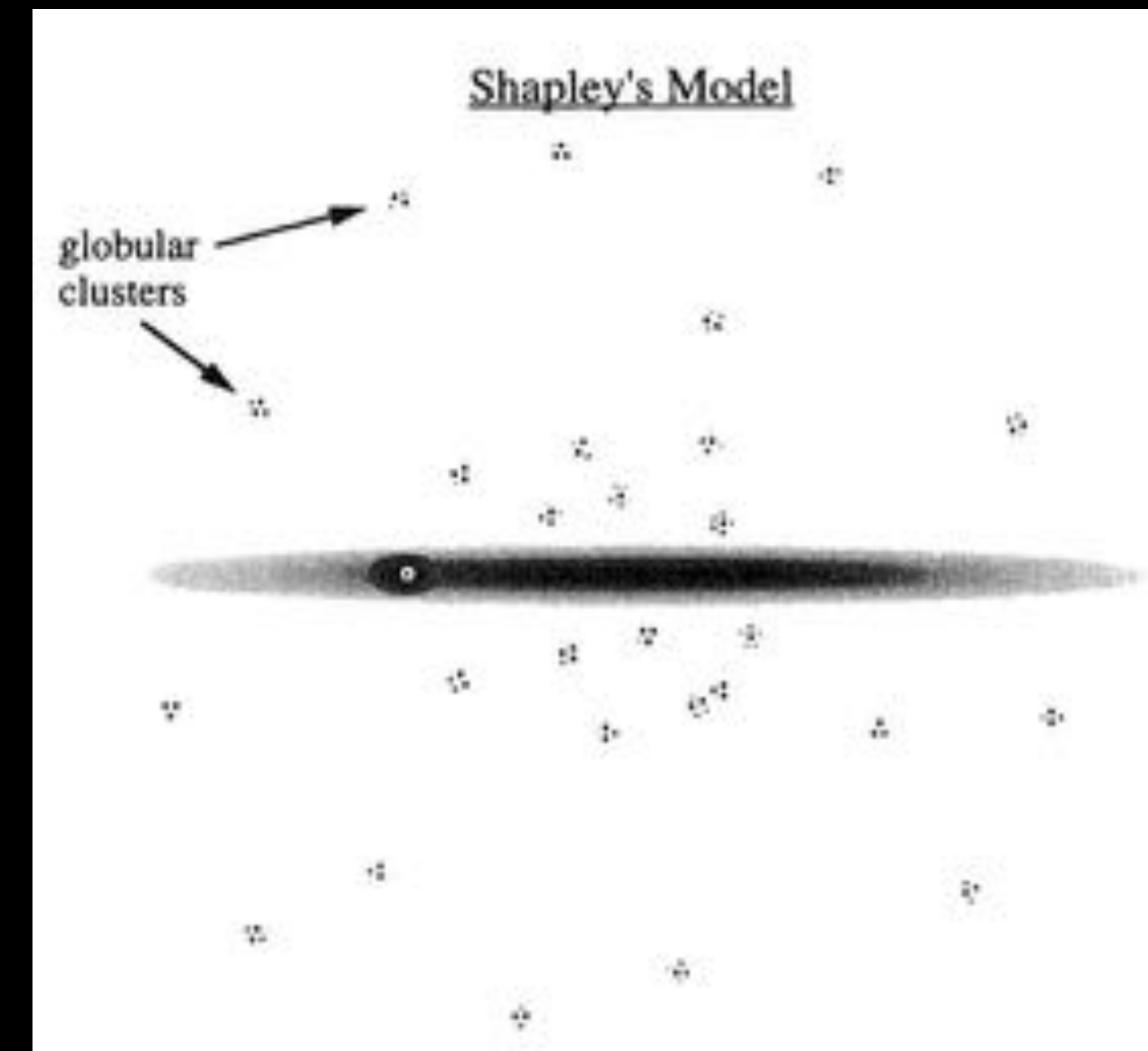
- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)



# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia



# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia
- 69 GCs - escada de distâncias:





# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia
- 69 GCs - escada de distâncias:
  - Cefeidas em 3 (rel. período-luminosidade)



# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia
- 69 GCs - escada de distâncias:
  - Cefeidas em 3 (rel. período-luminosidade)
  - RR Lyrae ->  $L$  nos 3 + 4 GCs



# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia
- 69 GCs - escada de distâncias:
  - Cefeidas em 3 (rel. período-luminosidade)
  - RR Lyrae ->  $L$  nos 3 + 4 GCs
  - Estrelas mais brilhantes de mesma  $L$  em cada GC





# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia
- 69 GCs - escada de distâncias:
  - Cefeidas em 3 (rel. período-luminosidade)
  - RR Lyrae ->  $L$  nos 3 + 4 GCs
  - Estrelas mais brilhantes de mesma  $L$  em cada GC
  - Comparando c/ fluxo  $F$  -> dist. p/ mais 21 GCs

# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia
- 69 GCs - escada de distâncias:
  - Cefeidas em 3 (rel. período-luminosidade)
  - RR Lyrae ->  $L$  nos 3 + 4 GCs
  - Estrelas mais brilhantes de mesma  $L$  em cada GC
  - Comparando c/ fluxo  $F$  -> dist. p/ mais 21 GCs
  - 28 GCs têm mesmo diâmetro absoluto

# Harlow Shapley

$$F = \frac{L}{4\pi d^2} \rightarrow d = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



- Ao invés de estrelas, aglomerados globulares (GC, de “globular cluster”)
- Distribuição de GCs ~ esférica em torno da galáxia
- 69 GCs - escada de distâncias:
  - Cefeidas em 3 (rel. período-luminosidade)
  - RR Lyrae ->  $L$  nos 3 + 4 GCs
  - Estrelas mais brilhantes de mesma  $L$  em cada GC
  - Comparando c/ fluxo  $F$  -> dist. p/ mais 21 GCs
  - 28 GCs têm mesmo diâmetro absoluto
    - comparando c/ diâmetro aparente -> dist. p/ mais 41 GCs



# Harlow Shapley

1918



# Harlow Shapley

1918

- Hipótese: sistema de GCs centrado no centro da Via Láctea



# Harlow Shapley

1918

- Hipótese: sistema de GCs centrado no centro da Via Láctea
- Raio da Via Láctea: 50 kpc





# Harlow Shapley

1918

- Hipótese: sistema de GCs centrado no centro da Via Láctea
- Raio da Via Láctea: 50 kpc
- Sol em 20 kpc



# Harlow Shapley

1918

- Hipótese: sistema de GCs centrado no centro da Via Láctea
- Raio da Via Láctea: 50 kpc
- Sol em 20 kpc
- Estimativas  $2,5 \times$  maiores que atuais (erro na base da escada)



# Harlow Shapley

1918

- Hipótese: sistema de GCs centrado no centro da Via Láctea
- Raio da Via Láctea: 50 kpc
- Sol em 20 kpc
- Estimativas  $2,5 \times$  maiores que atuais (erro na base da escada)
- Cenário mais apropriado que o de Kapteyn



# Harlow Shapley

1918

- Hipótese: sistema de GCs centrado no centro da Via Láctea
- Raio da Via Láctea: 50 kpc
- Sol em 20 kpc
- Estimativas  $2,5 \times$  maiores que atuais (erro na base da escada)
- Cenário mais apropriado que o de Kapteyn
- Discrepância: absorção por poeira no disco





# Kapteyn vs Shapley

## Galáxia pequena vs Galáxia grande



vs



# Kapteyn vs Shapley

## Galáxia pequena vs Galáxia grande



vs

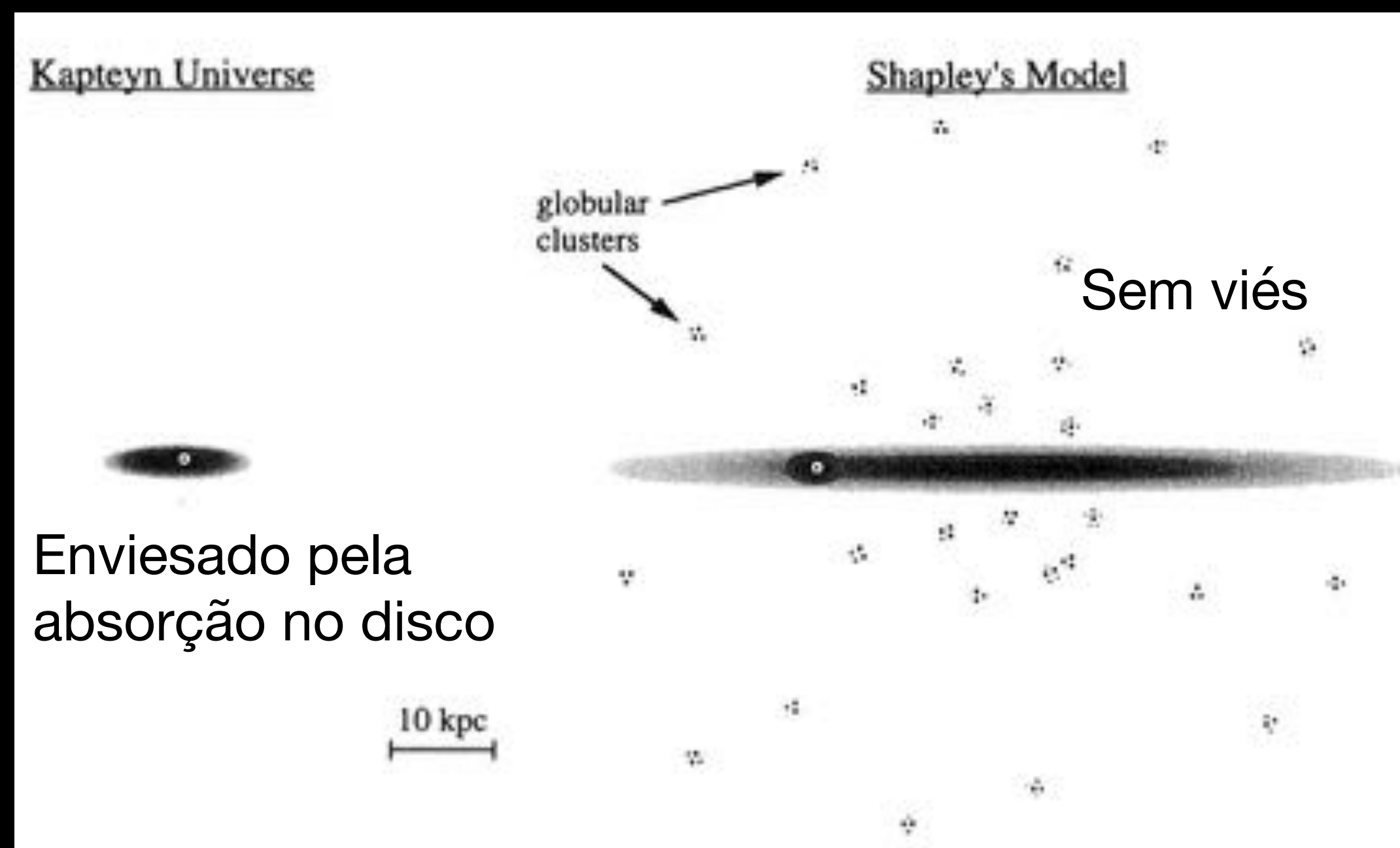


# Kapteyn vs Shapley

## Galáxia pequena vs Galáxia grande



vs





# O “Grande Debate”

Duas questões relacionadas



The “Great Spiral Nebula” in the constellation of Andromeda (1902)



# O “Grande Debate”

## Duas questões relacionadas

- Tamanho da Via Láctea



The “Great Spiral Nebula” in the constellation of Andromeda (1902)



# O “Grande Debate”

## Duas questões relacionadas

- Tamanho da Via Láctea
  - Absorção pelo meio interestelar



The “Great Spiral Nebula” in the constellation of Andromeda (1902)



# O “Grande Debate”

## Duas questões relacionadas

- Tamanho da Via Láctea
  - Absorção pelo meio interestelar
  - Posição relativa do Sol



The “Great Spiral Nebula” in the constellation of Andromeda (1902)



# O “Grande Debate”

## Duas questões relacionadas

- Tamanho da Via Láctea
  - Absorção pelo meio interestelar
  - Posição relativa do Sol
- Natureza das “nebulosas”



The “Great Spiral Nebula” in the constellation of Andromeda (1902)



# O “Grande Debate”

## Duas questões relacionadas

- Tamanho da Via Láctea
  - Absorção pelo meio interestelar
  - Posição relativa do Sol
- Natureza das “nebulosas”
  - Objetos pequenos e internos



The “Great Spiral Nebula” in the constellation of Andromeda (1902)



# O “Grande Debate”

## Duas questões relacionadas

- Tamanho da Via Láctea
  - Absorção pelo meio interestelar
  - Posição relativa do Sol
- Natureza das “nebulosas”
  - Objetos pequenos e internos
  - Objetos distantes e tão grandes quanto a Via Láctea



The “Great Spiral Nebula” in the constellation of Andromeda (1902)

# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”





# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

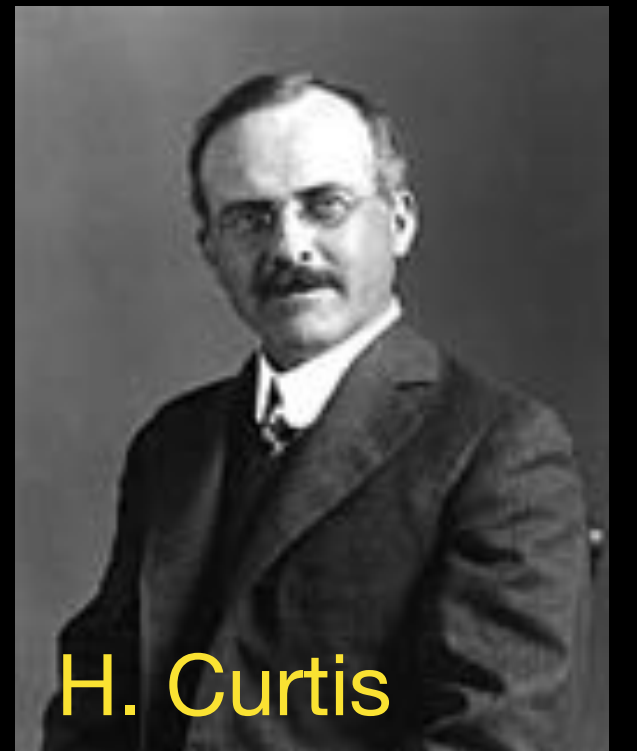
# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley



H. Curtis



# O “Grande Debate”

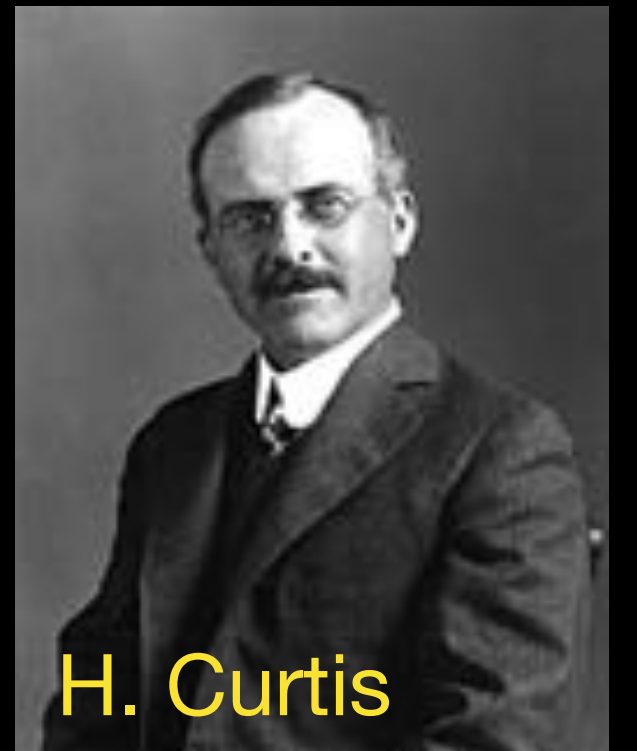
Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

Nebulosas são parte da MW:



H. Curtis



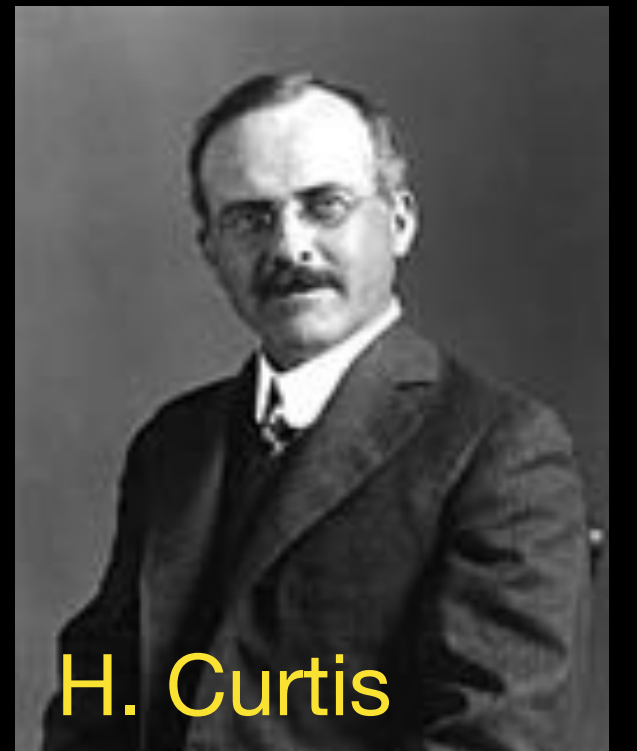
# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley



H. Curtis

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande



# O “Grande Debate”

Abril 1920

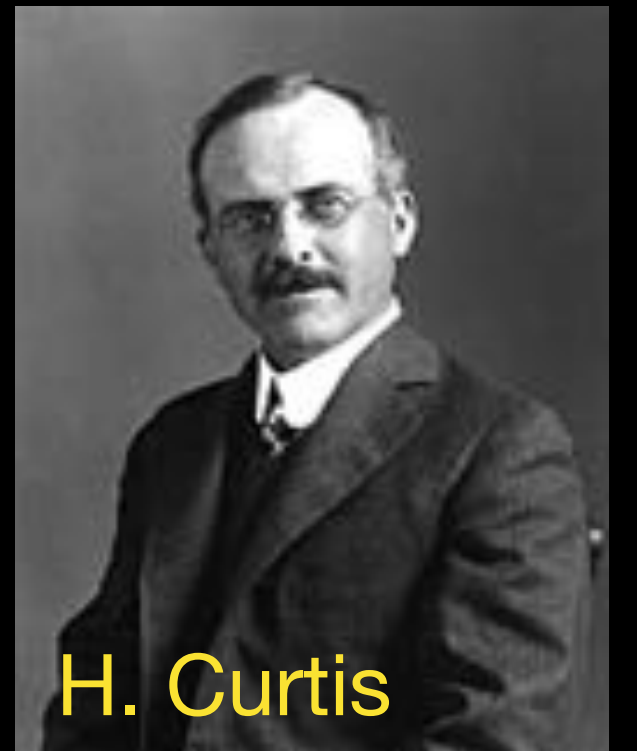
- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande
- Rotação de M101



H. Curtis



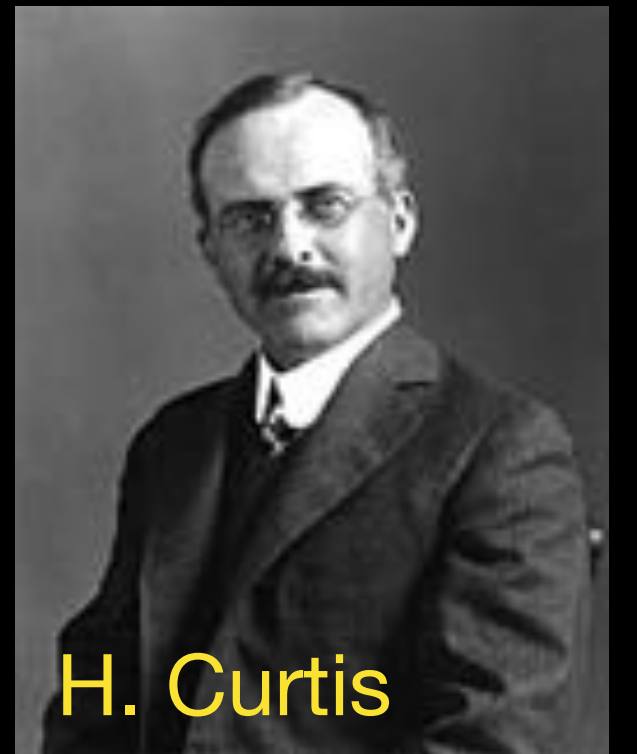
# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley



H. Curtis

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande
- Rotação de M101
- Novas mais brilhantes que toda a nebulosa



# O “Grande Debate”

Abril 1920

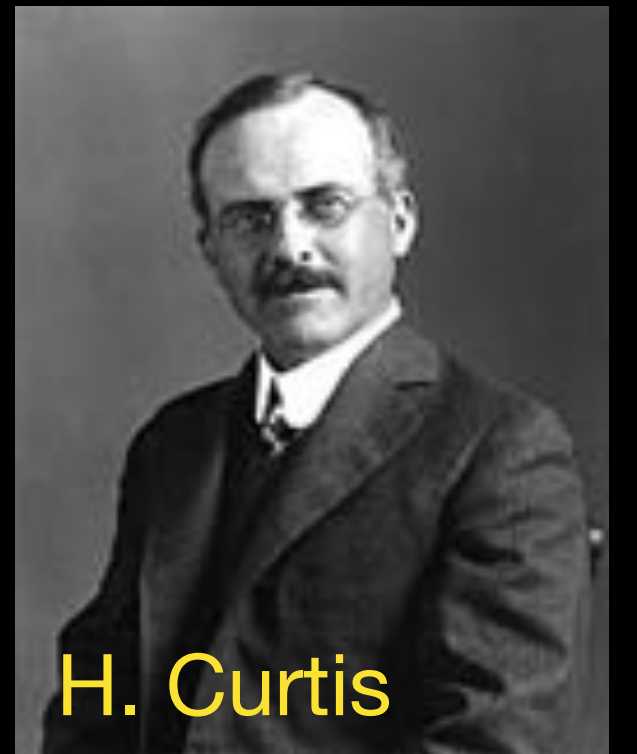
- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande
- Rotação de M101
- Novas mais brilhantes que toda a nebulosa



H. Curtis

Nebulosas são outras galáxias:

# O “Grande Debate”

Abril 1920

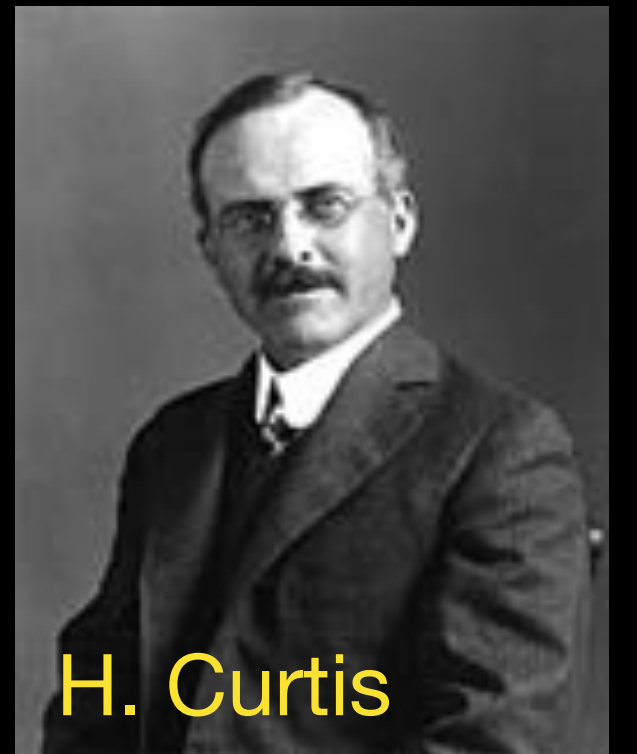
- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande
- Rotação de M101
- Novas mais brilhantes que toda a nebulosa



H. Curtis

Nebulosas são outras galáxias:

- Via Láctea pequena



# O “Grande Debate”

Abril 1920

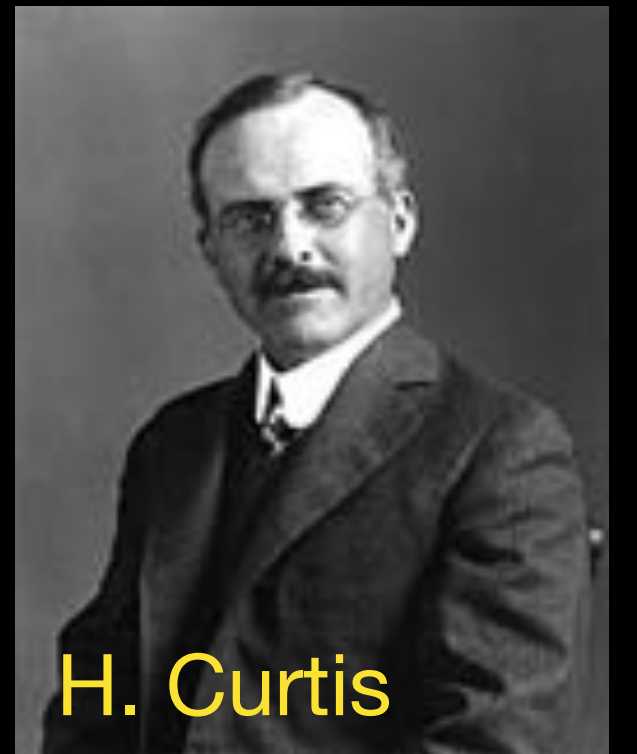
- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande
- Rotação de M101
- Novas mais brilhantes que toda a nebulosa



H. Curtis

Nebulosas são outras galáxias:

- Via Láctea pequena
- Mais novas em Andromeda



# O “Grande Debate”

Abril 1920

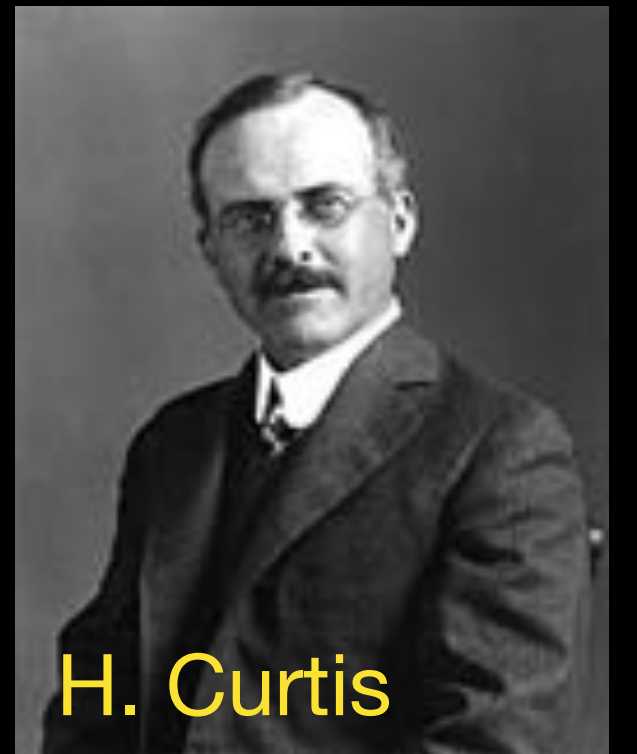
- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande
- Rotação de M101
- Novas mais brilhantes que toda a nebulosa



H. Curtis

Nebulosas são outras galáxias:

- Via Láctea pequena
- Mais novas em Andromeda
- Grande  $v_{los}$  (desligada)



# O “Grande Debate”

Abril 1920

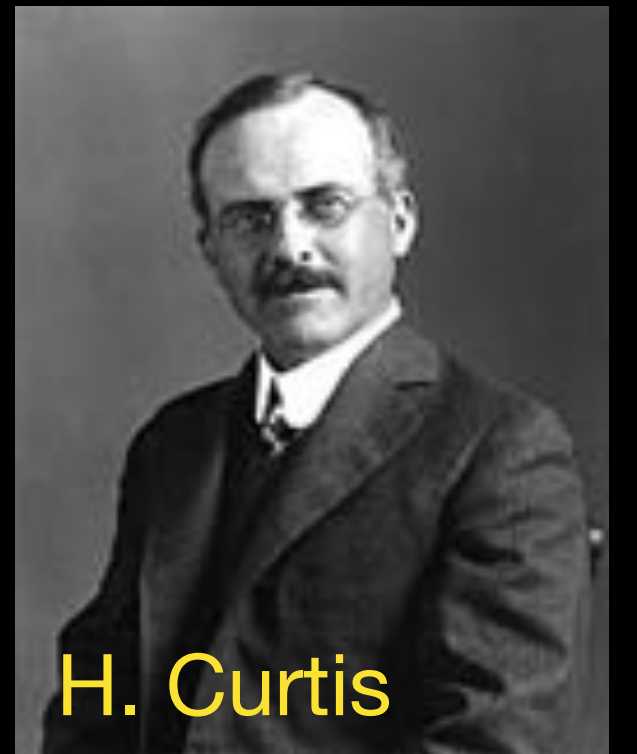
- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

Nebulosas são parte da MW:

- Via Láctea grande
- Rotação de M101
- Novas mais brilhantes que toda a nebulosa



H. Curtis

Nebulosas são outras galáxias:

- Via Láctea pequena
- Mais novas em Andromeda
- Grande  $v_{\text{los}}$  (desligada)
- Faixas escuras como na MW

# O “Grande Debate”

- Só seria resolvido determinando-se distância às “nebulosas”
- 1923: Hubble identifica Cefeidas em Andromeda
- $D \sim 780$  kpc (Hubble mediu 285 kpc, mas conclusão é a mesma)
- Nebulosas são outras galáxias como a Via Láctea



# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



“Shapley foi tão conservador (e errado) na 2<sup>a</sup> questão quanto foi radical (e correto) na 1<sup>a</sup>”

Mihalas & Binney

# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley

“Shapley foi tão conservador (e errado) na 2<sup>a</sup> questão quanto foi radical (e correto) na 1<sup>a</sup>”

Mihalas & Binney



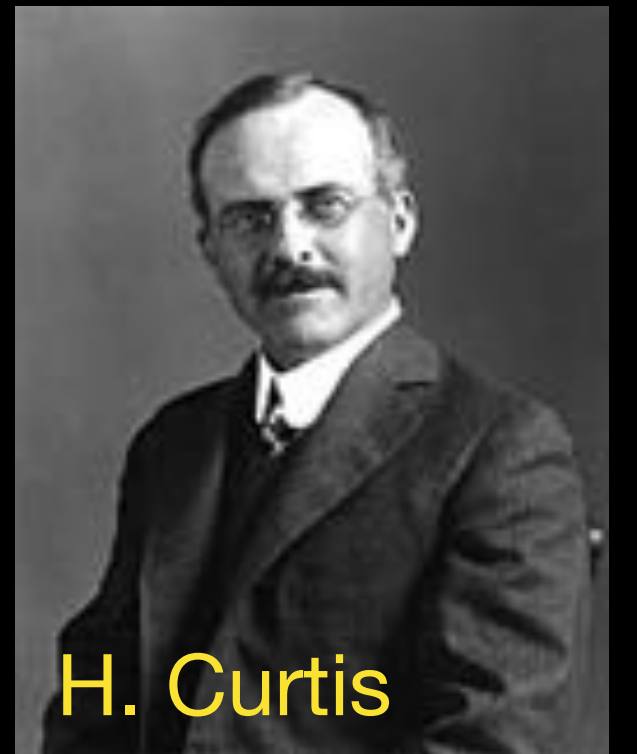
# O “Grande Debate”

Abril 1920

- Tamanho da Via Láctea
- Natureza das “nebulosas”



H. Shapley



H. Curtis

“Shapley foi tão conservador (e errado) na 2ª questão quanto foi radical (e correto) na 1ª”

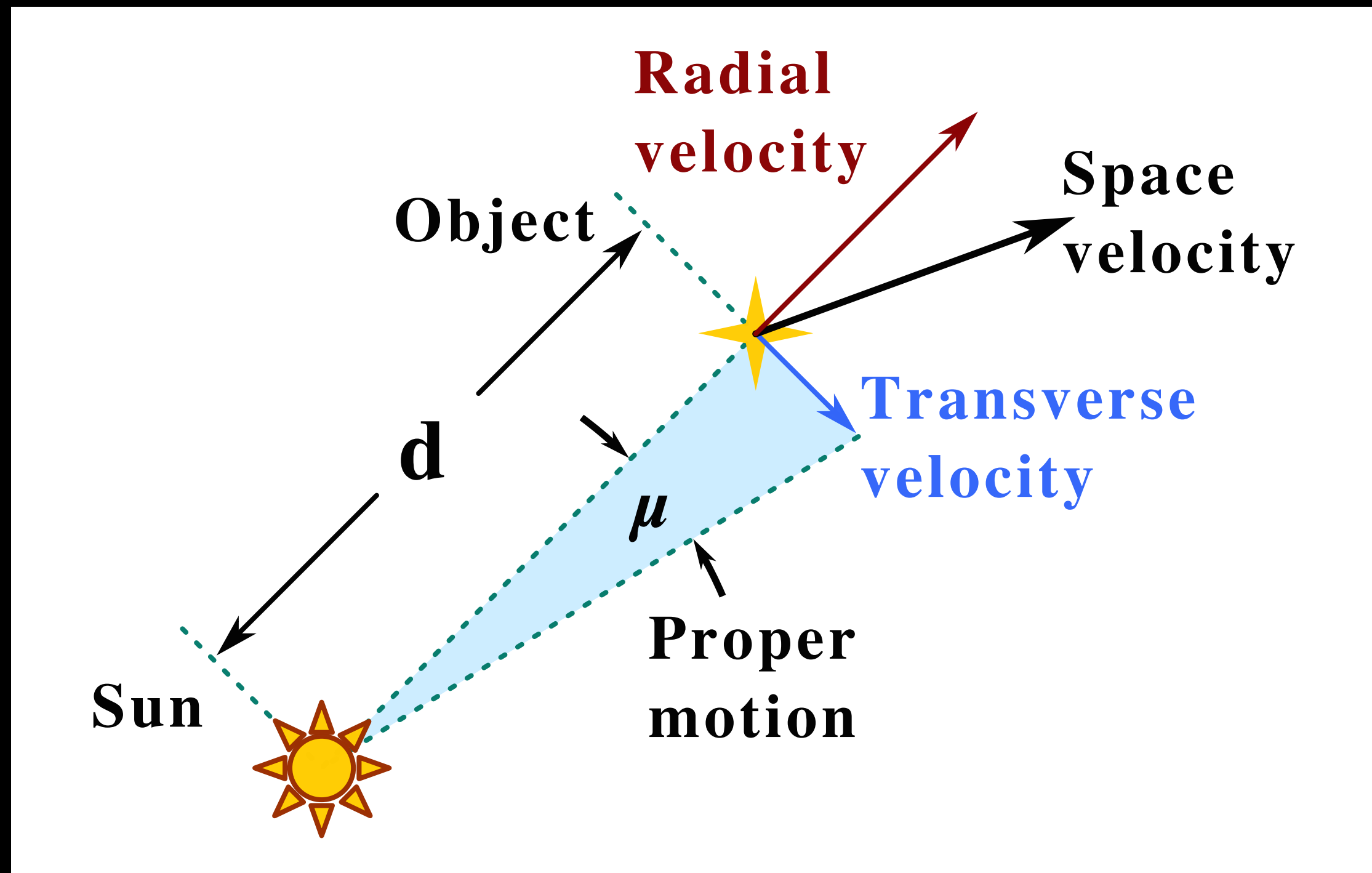
Mihalas & Binney



# A Via Láctea

## Cinemática

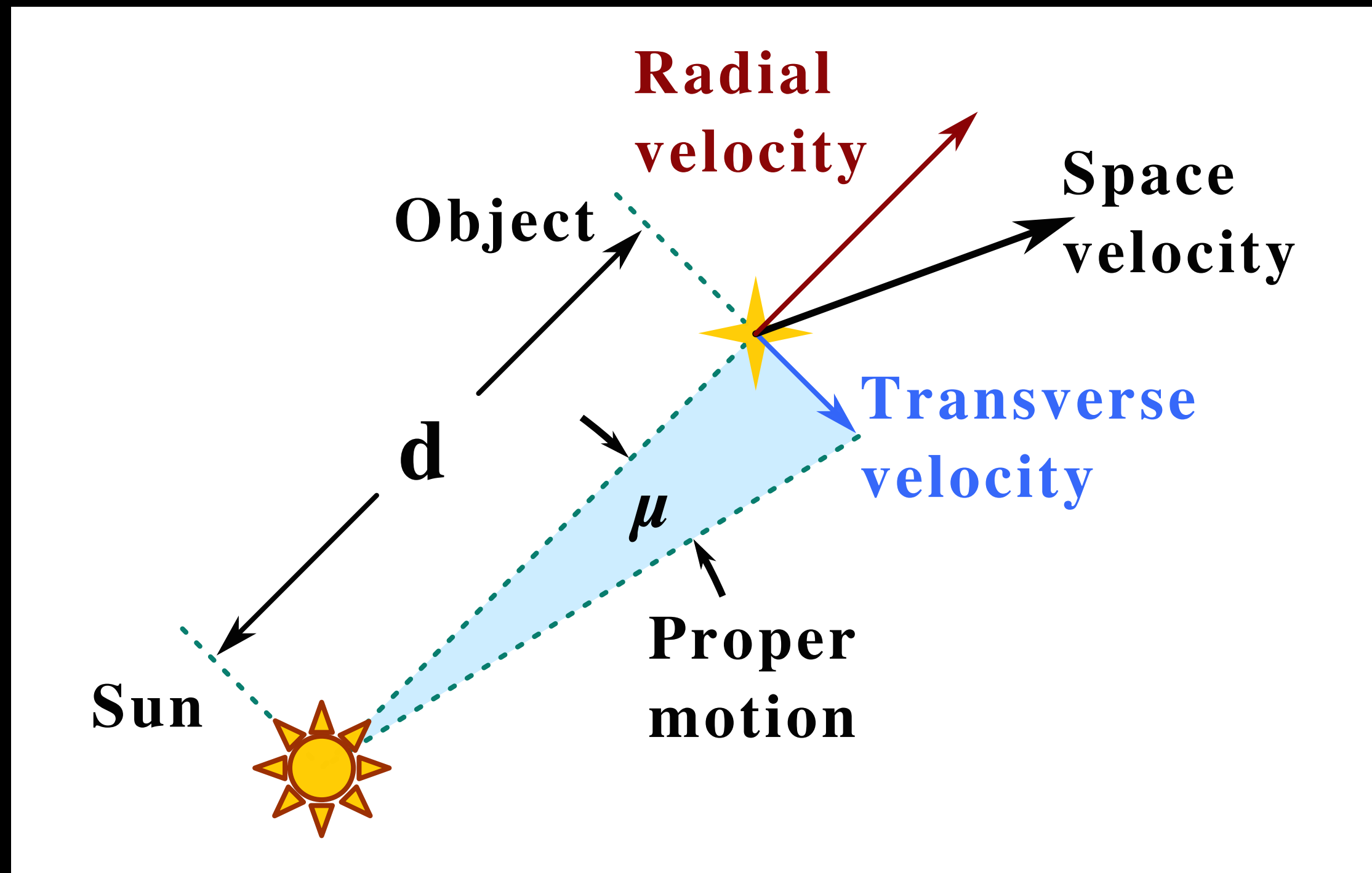
- Movimento próprio vs velocidade na linha-de-visada



# A Via Láctea

## Cinemática

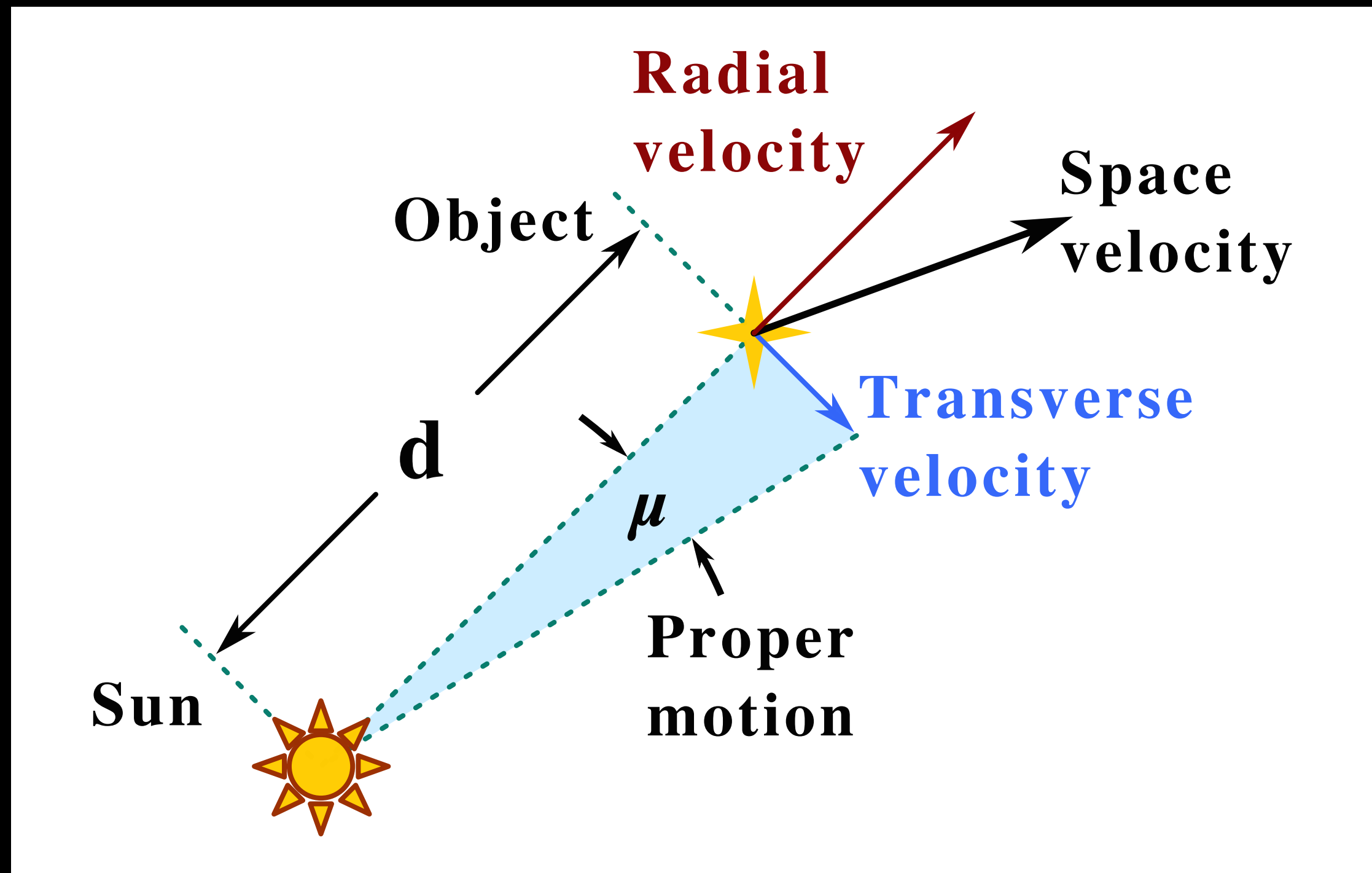
- Movimento próprio vs velocidade na linha-de-visada



# A Via Láctea

## Cinemática

- Movimento próprio vs velocidade na linha-de-visada



$$v^2 = v_{\text{los}}^2 + v_t^2$$





# Parênteses: Missão Gaia

Movimento previsto

<https://youtu.be/Ag0qsSFJBAk?list=TLGGNRCr-fy7Mn4xOTA3MjAyMw>

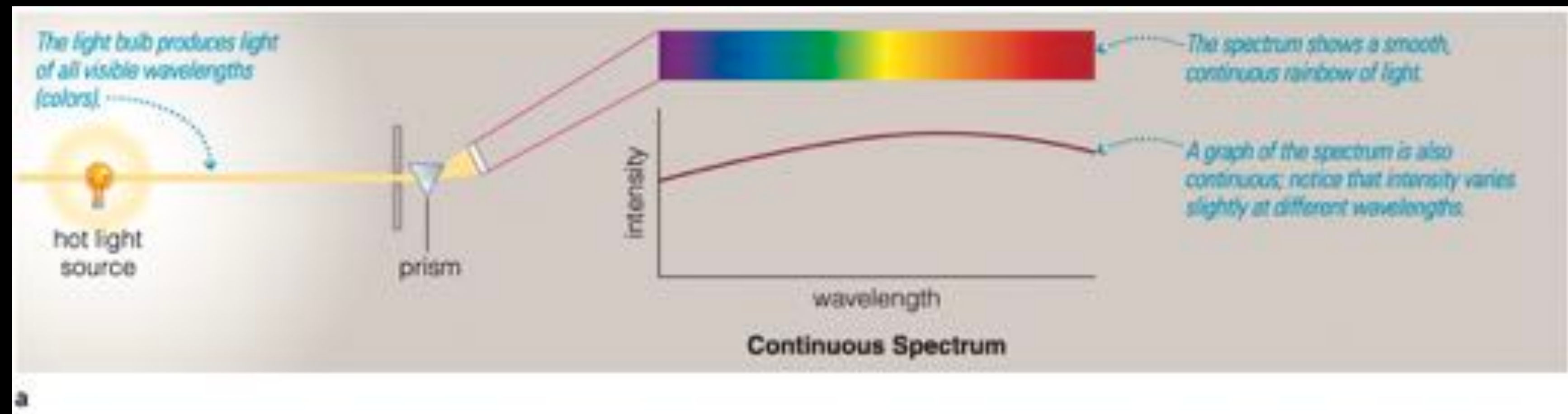


# Espectros



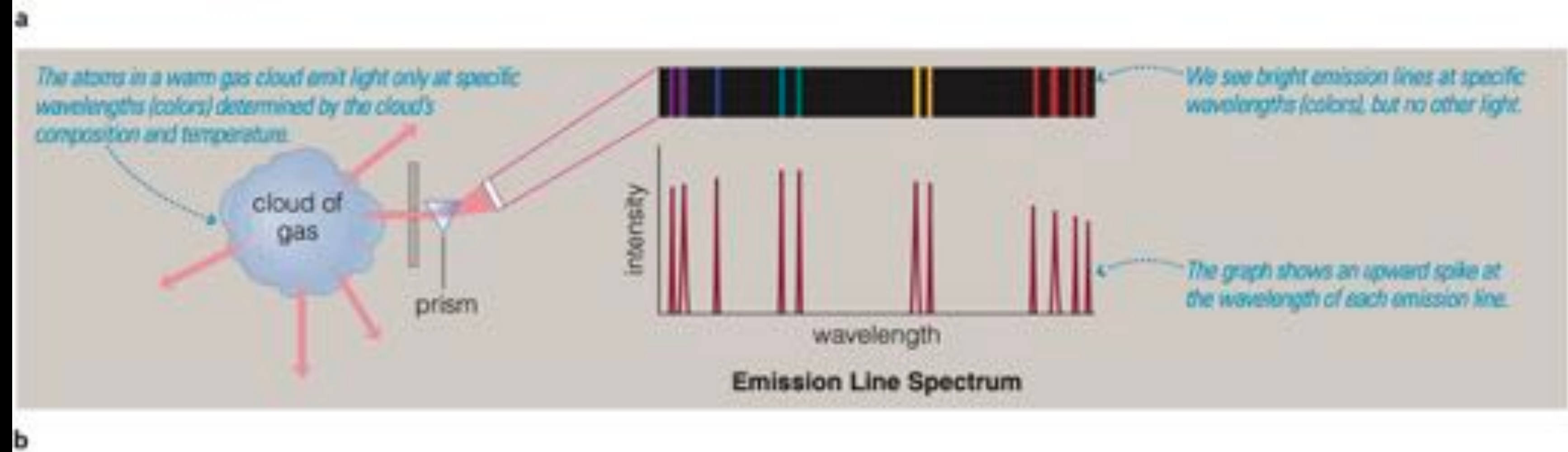
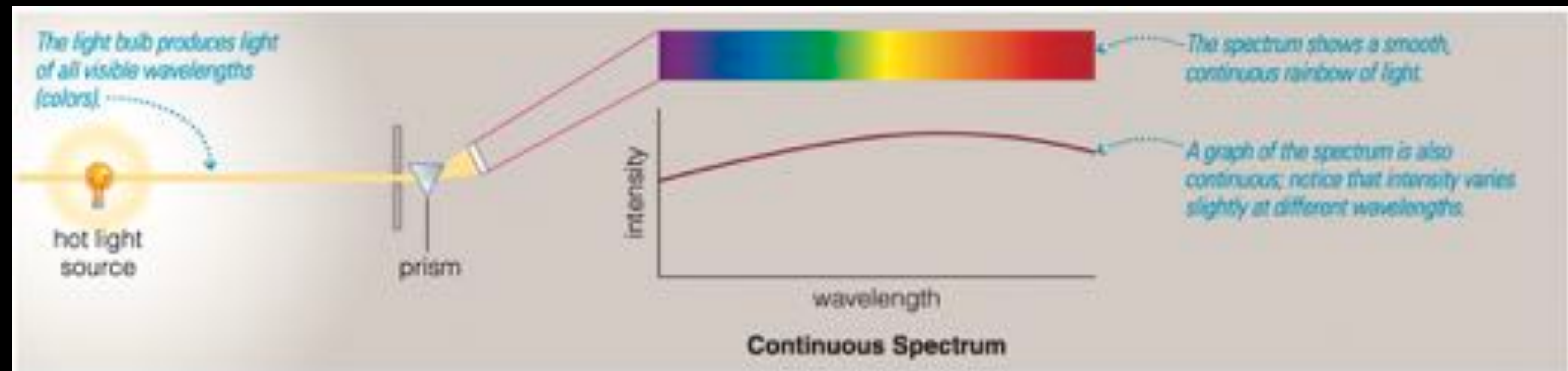


# Espectros



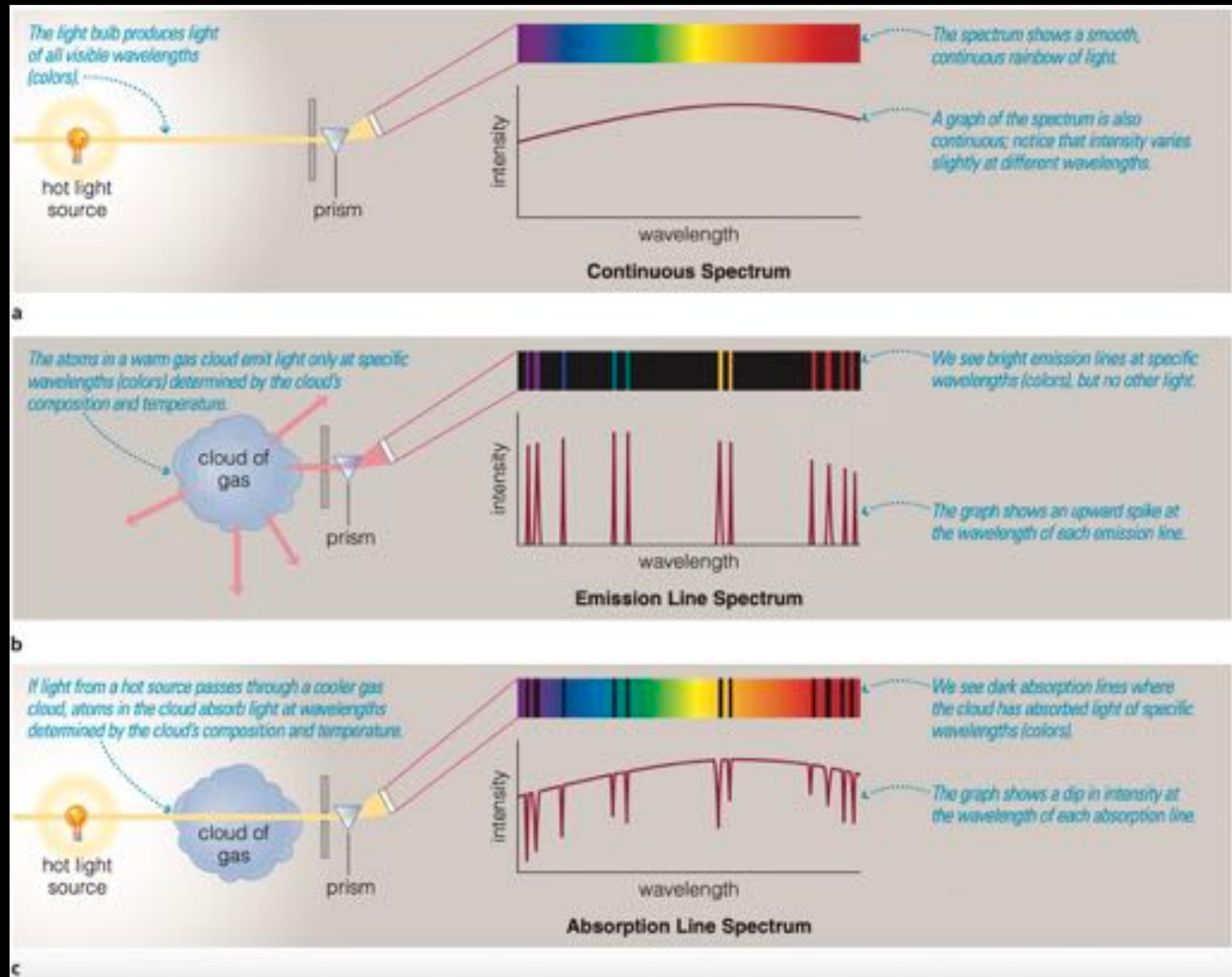


# Espectros

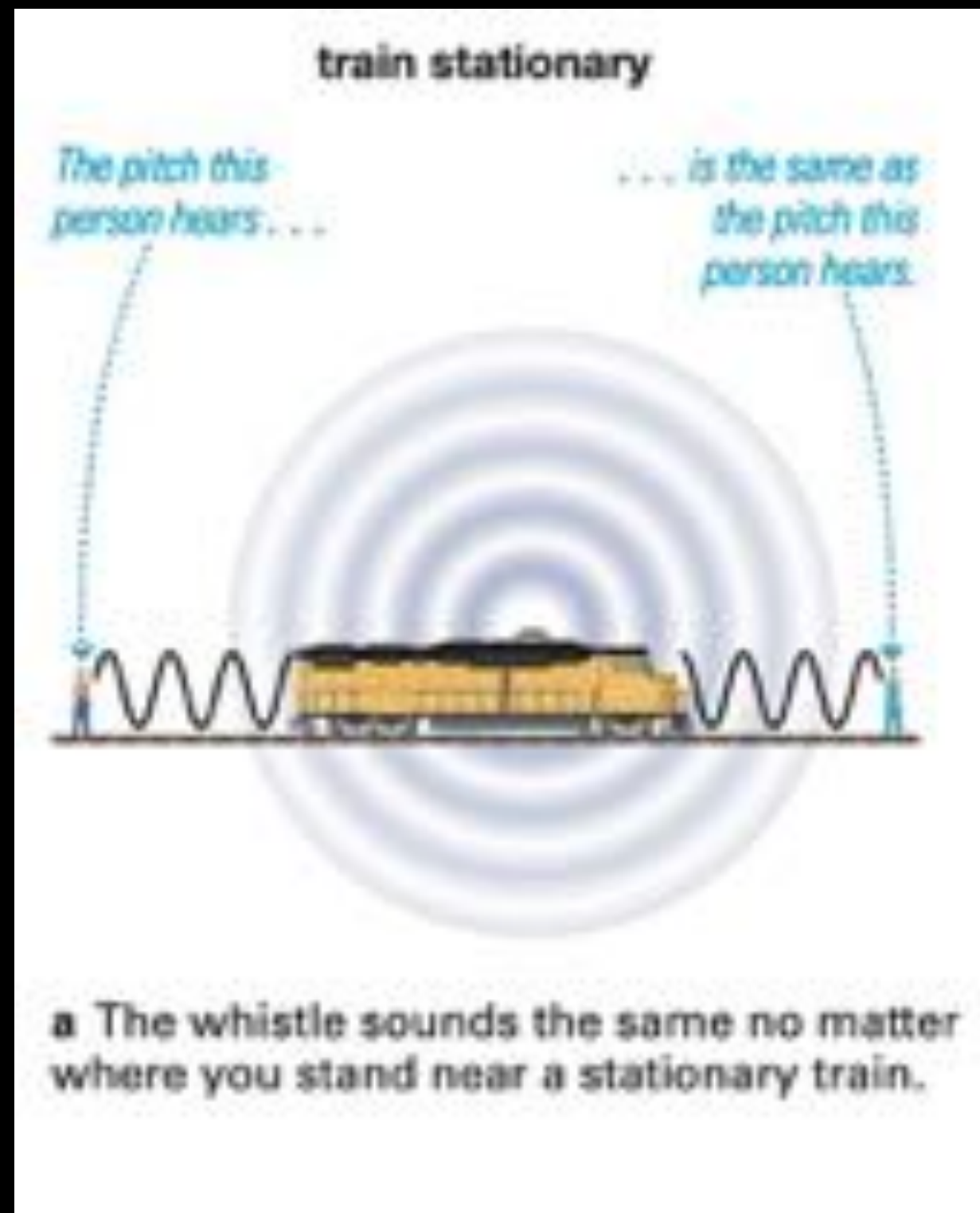




# Spectros

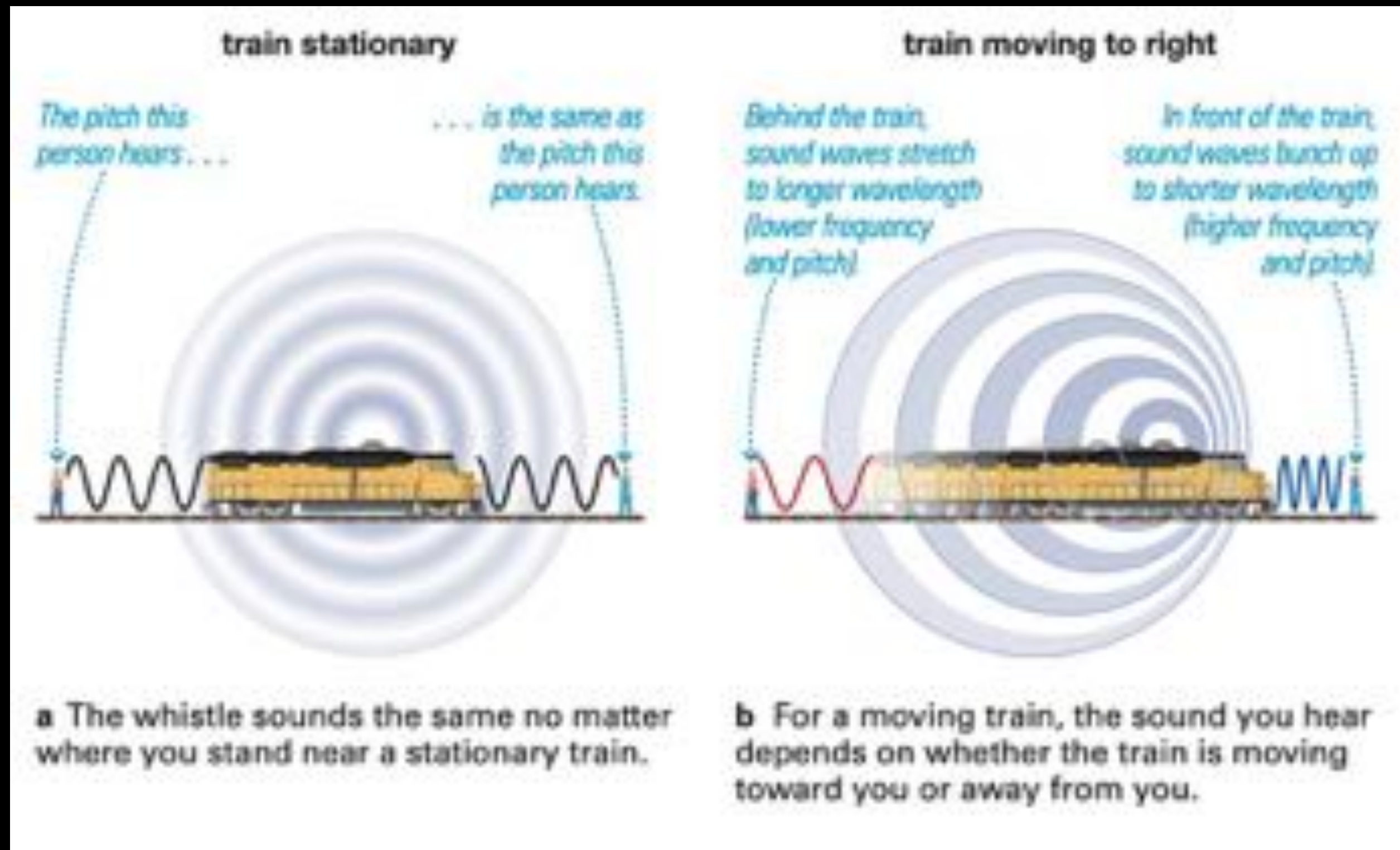


# Efeito Doppler

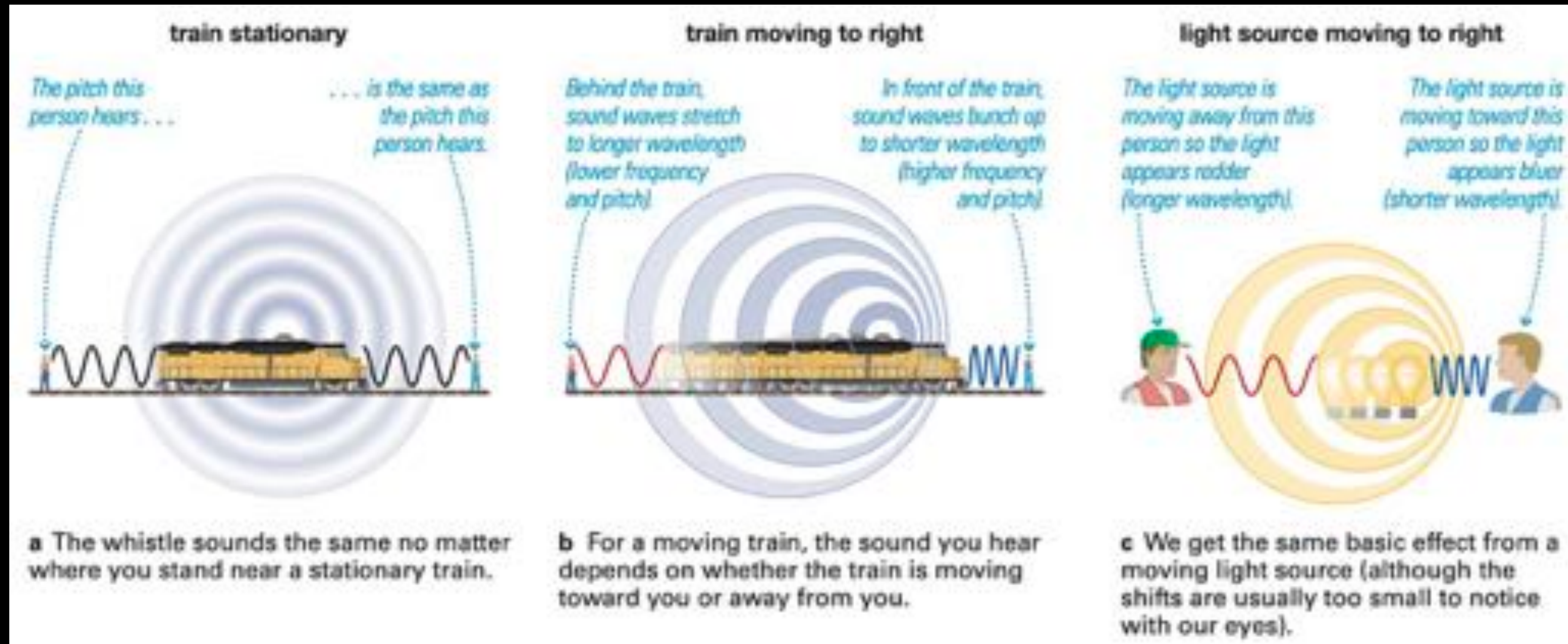




# Efeito Doppler

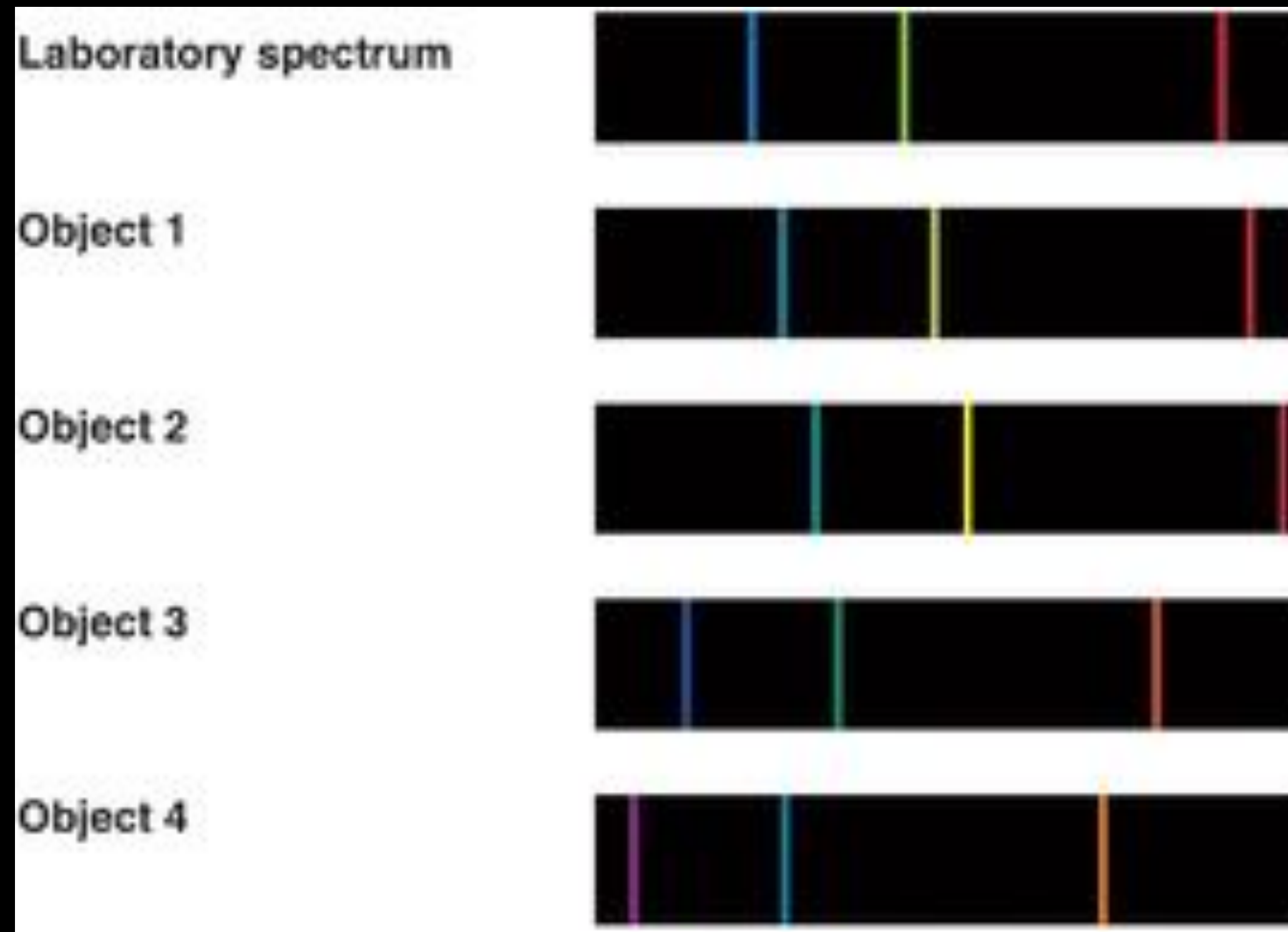


# Efeito Doppler





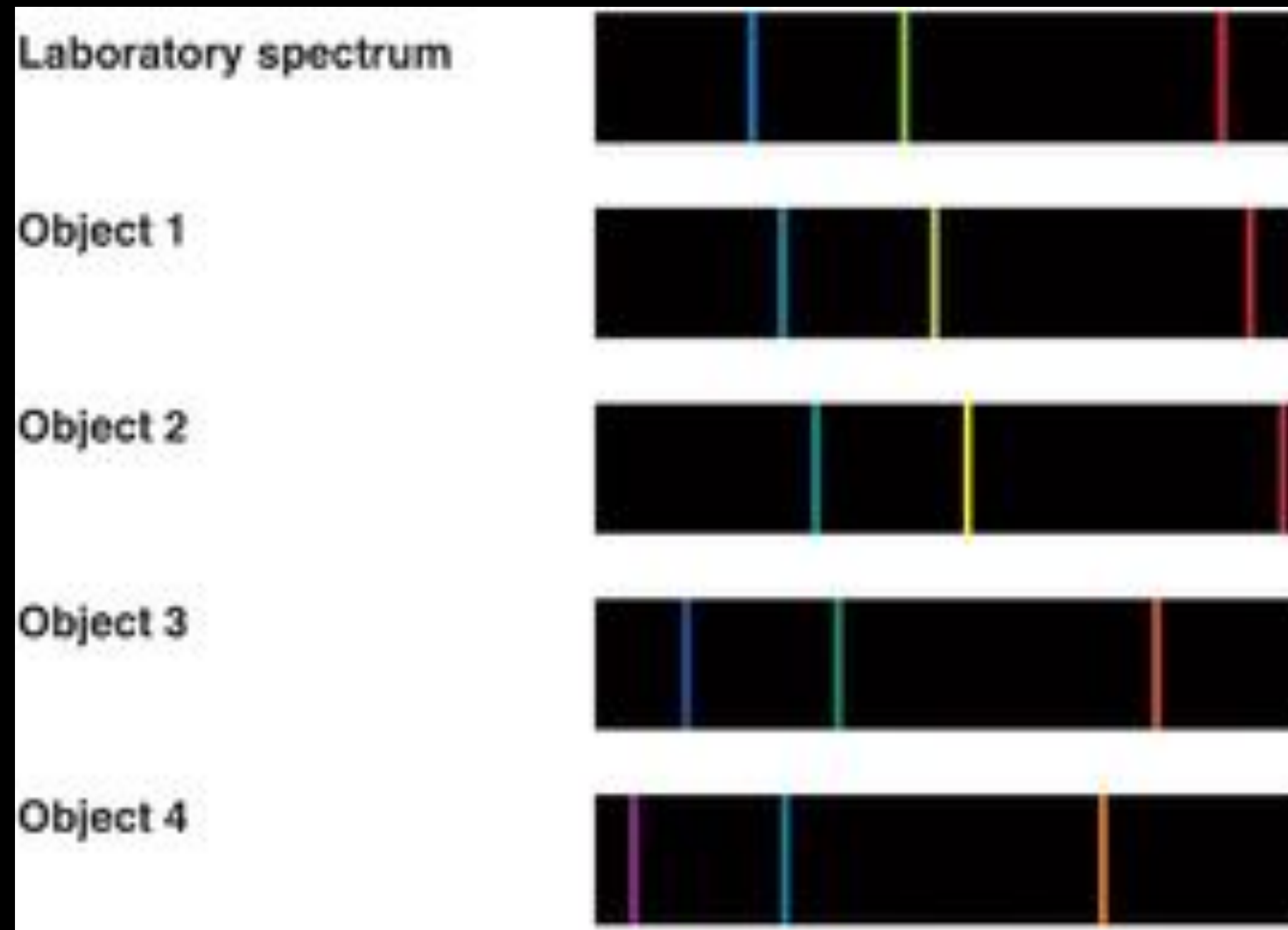
# Velocidade na linha de visada



Parado



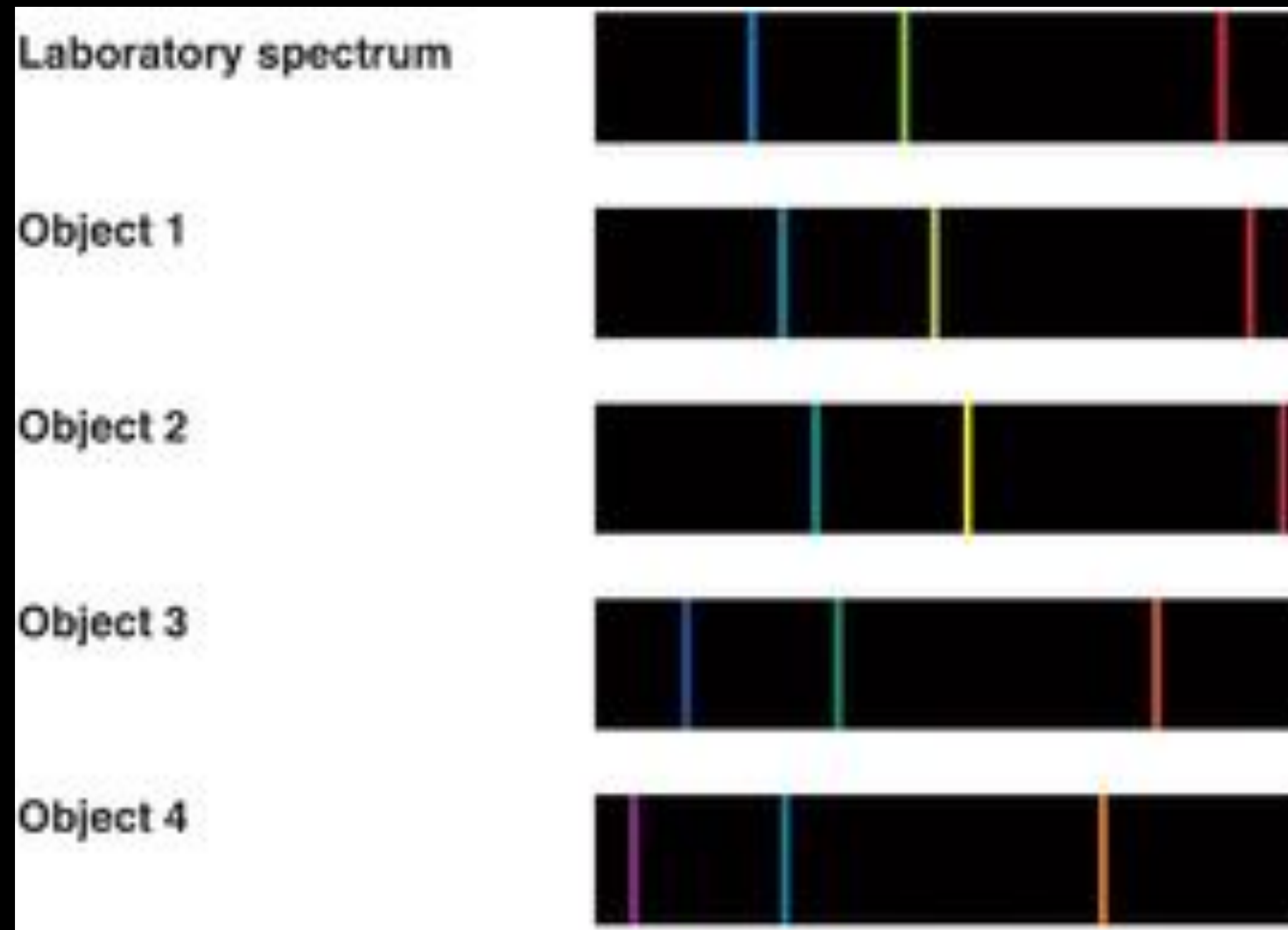
# Velocidade na linha de visada



Parado

Se afastando

# Velocidade na linha de visada

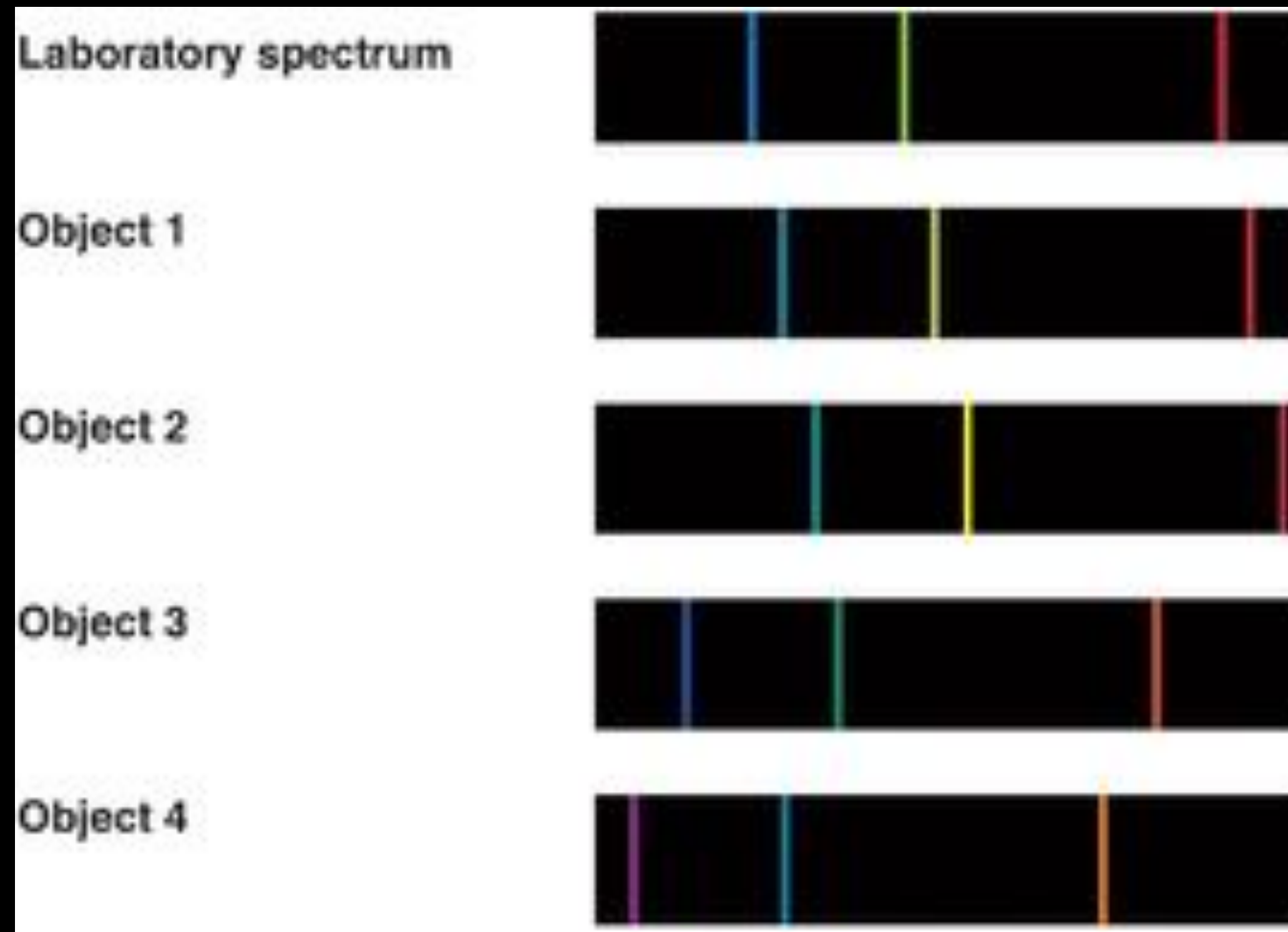


Parado

Se afastando

Se afastando mais rapidamente

# Velocidade na linha de visada



Parado

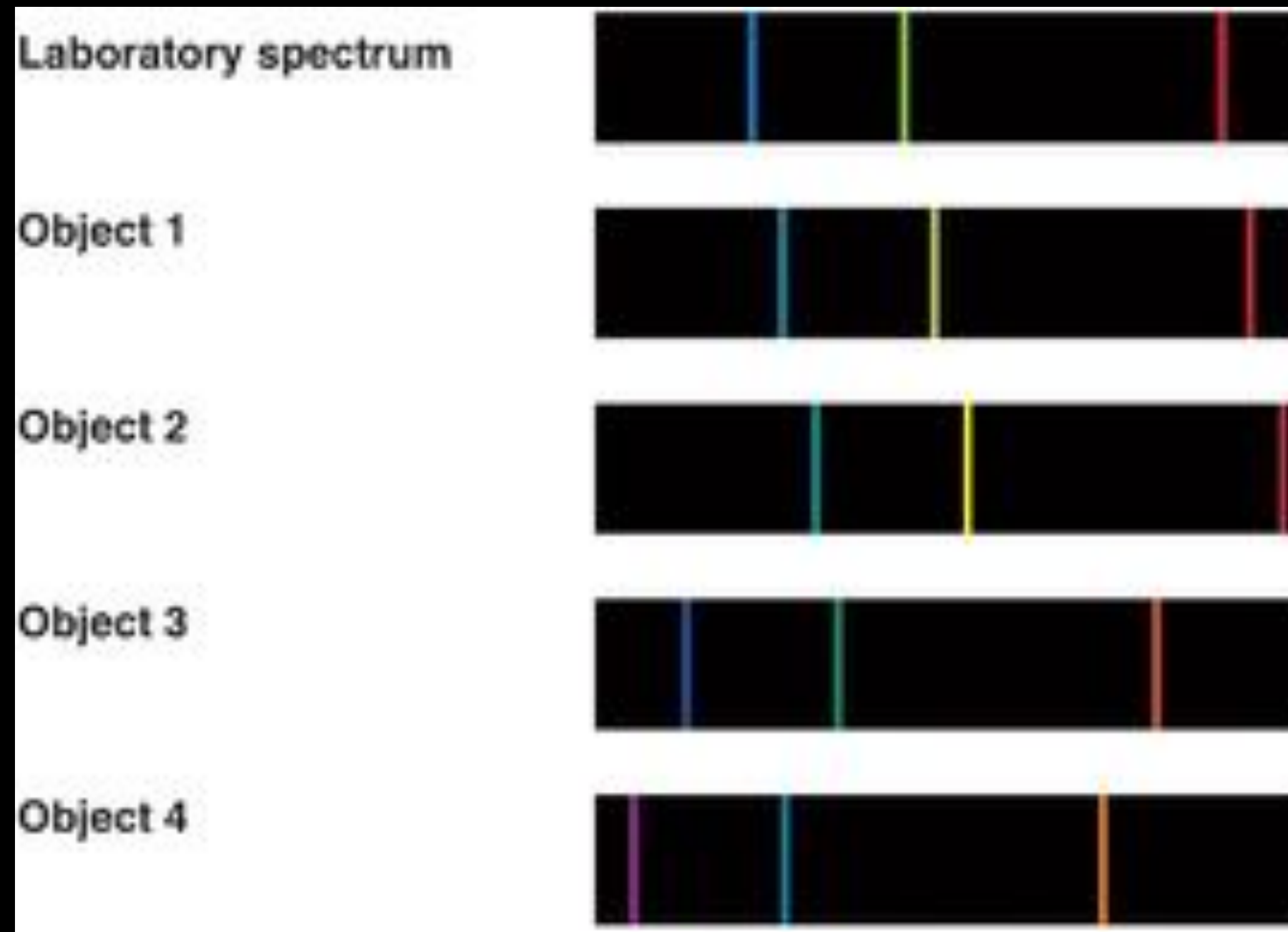
Se afastando

Se afastando mais rapidamente

Se aproximando



# Velocidade na linha de visada



Parado

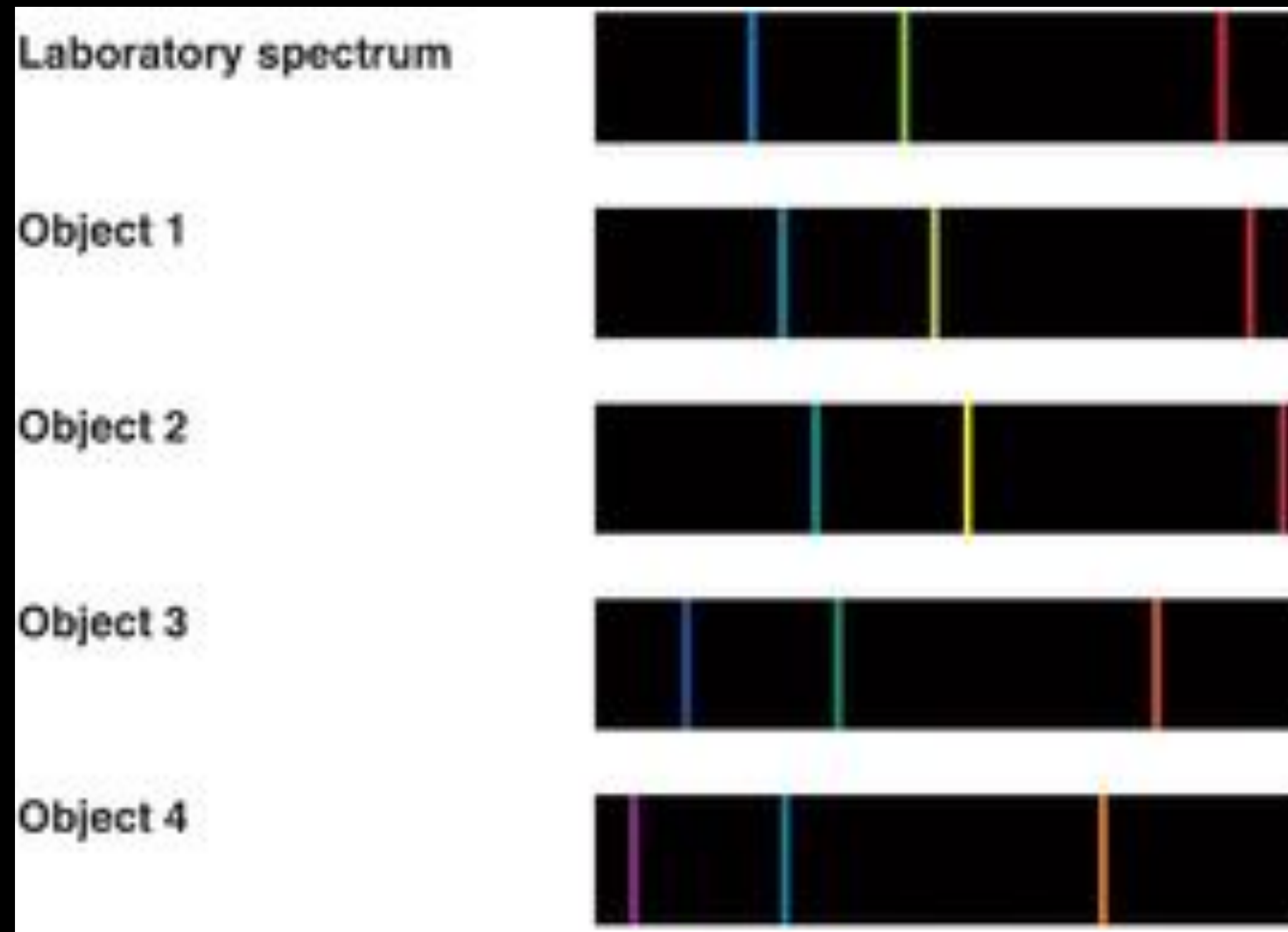
Se afastando

Se afastando mais rapidamente

Se aproximando

Se aproximando mais rapidamente

# Velocidade na linha de visada



Parado

Se afastando

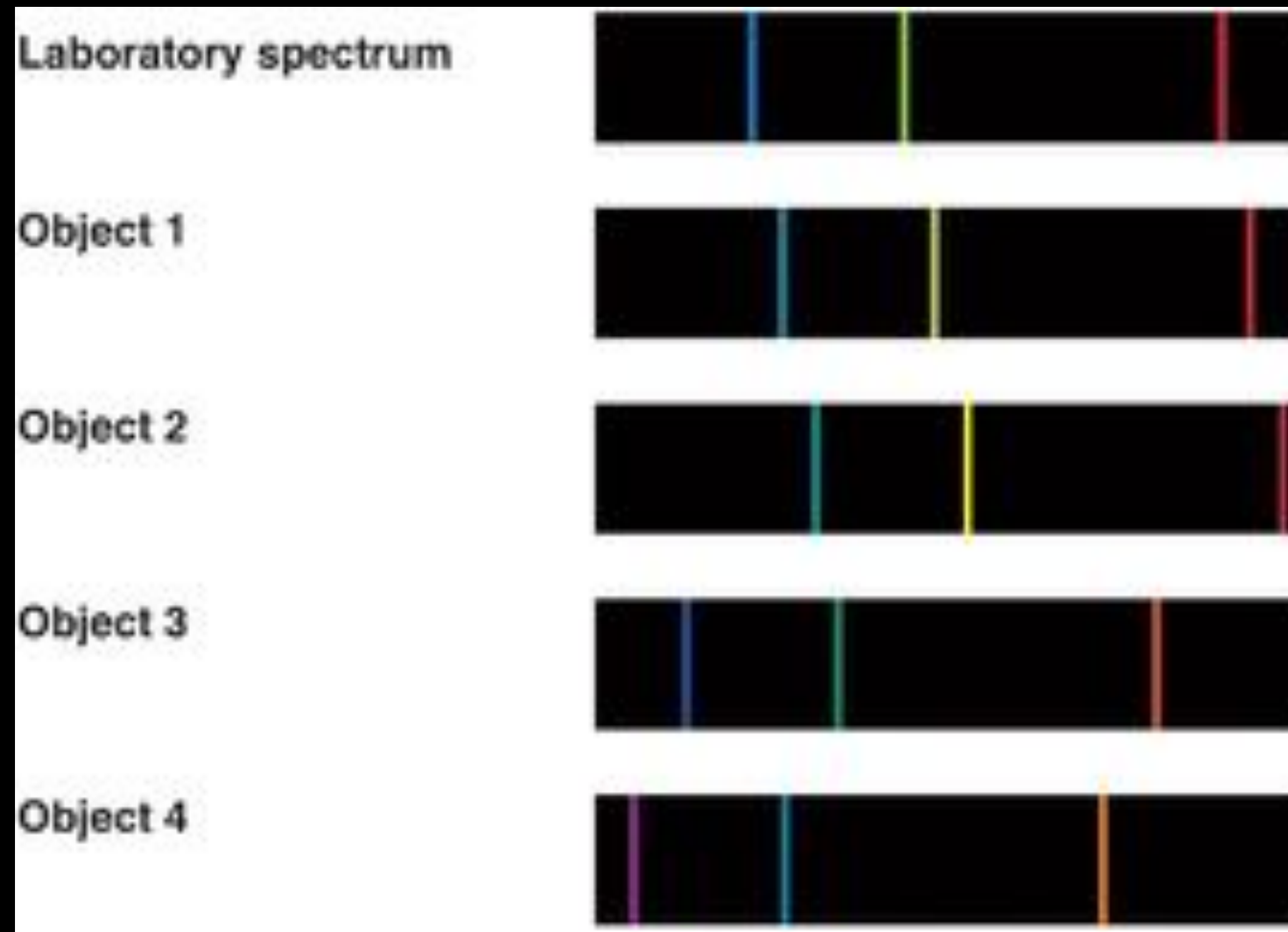
Se afastando mais rapidamente

Se aproximando

Se aproximando mais rapidamente

- Deslocamento Doppler: deslocamento do  $\lambda$  de linhas espectrais

# Velocidade na linha de visada



Parado

Se afastando

Se afastando mais rapidamente

Se aproximando

Se aproximando mais rapidamente

- Deslocamento Doppler: deslocamento do  $\lambda$  de linhas espectrais
- Deslocamento Doppler  $\rightarrow$  velocidade na linha de visada



# Espectros

# Espectros

- Primeiro espectro estelar (além do Sol): 1888

# Espectros

- Primeiro espectro estelar (além do Sol): 1888
- 1900 - 1930: muitos espectros: Campbell (California) & Wrigth (Chile)



# Espectros

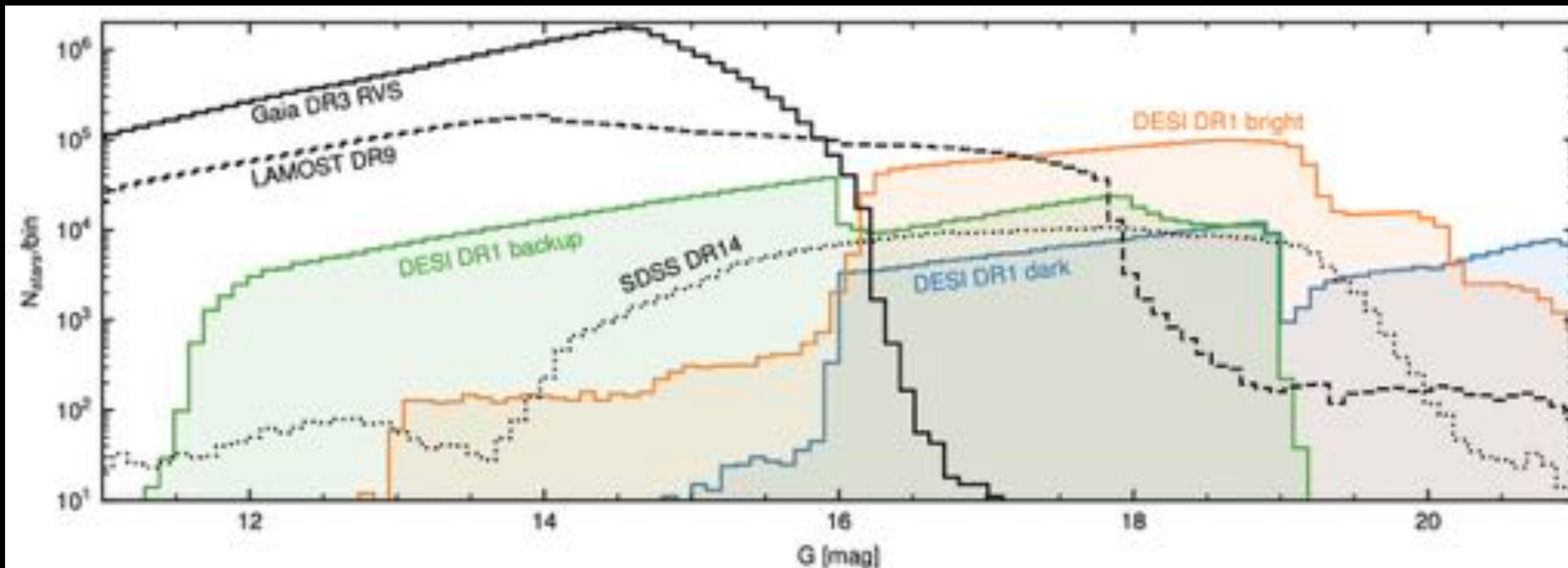
- Primeiro espectro estelar (além do Sol): 1888
- 1900 - 1930: muitos espectros: Campbell (California) & Wrigth (Chile)
- Atualmente, Gaia: 30 milhões de estrelas

# Espectros

- Primeiro espectro estelar (além do Sol): 1888
- 1900 - 1930: muitos espectros: Campbell (California) & Wrigth (Chile)
- Atualmente, Gaia: 30 milhões de estrelas
- Levantamentos espectroscópicos: APOGEE, LAMOST, DESI etc

# Espectros

- Primeiro espectro estelar (além do Sol): 1888
- 1900 - 1930: muitos espectros: Campbell (California) & Wrigth (Chile)
- Atualmente, Gaia: 30 milhões de estrelas
- Levantamentos espectroscópicos: APOGEE, LAMOST, DESI etc



Koposov et al. 2025



# A Via Láctea

## Cinemática

# A Via Láctea

## Cinemática

- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas

# A Via Láctea

## Cinemática

- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas
  - Dois sentidos de rotação?



# A Via Láctea

## Cinemática

- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas
  - Dois sentidos de rotação?
- Em 1918, Shapley: centro da Via Láctea

# A Via Láctea

## Cinemática

- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas
  - Dois sentidos de rotação?
  - Em 1918, Shapley: centro da Via Láctea
- Schwarzschild (1907-1908): (U, V, W), maior velocidade em U

# A Via Láctea

## Cinemática

- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas
  - Dois sentidos de rotação?
  - Em 1918, Shapley: centro da Via Láctea
- Schwarzschild (1907-1908): (U, V, W), maior velocidade em U
- Stromberg (1923): estrelas de altas velocidades,  $\gtrsim 75$  km/s



# A Via Láctea

## Cinemática

- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas
  - Dois sentidos de rotação?
  - Em 1918, Shapley: centro da Via Láctea
- Schwarzschild (1907-1908): (U, V, W), maior velocidade em U
- Stromberg (1923): estrelas de altas velocidades,  $\gtrsim 75$  km/s
  - Metade do céu: estrelas se afastando de nós

# A Via Láctea

## Cinemática

- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas
  - Dois sentidos de rotação?
  - Em 1918, Shapley: centro da Via Láctea
- Schwarzschild (1907-1908): (U, V, W), maior velocidade em U
- Stromberg (1923): estrelas de altas velocidades,  $\gtrsim 75$  km/s
  - Metade do céu: estrelas se afastando de nós
  - Na outra metade: estrelas se aproximando de nós

# A Via Láctea

## Cinemática

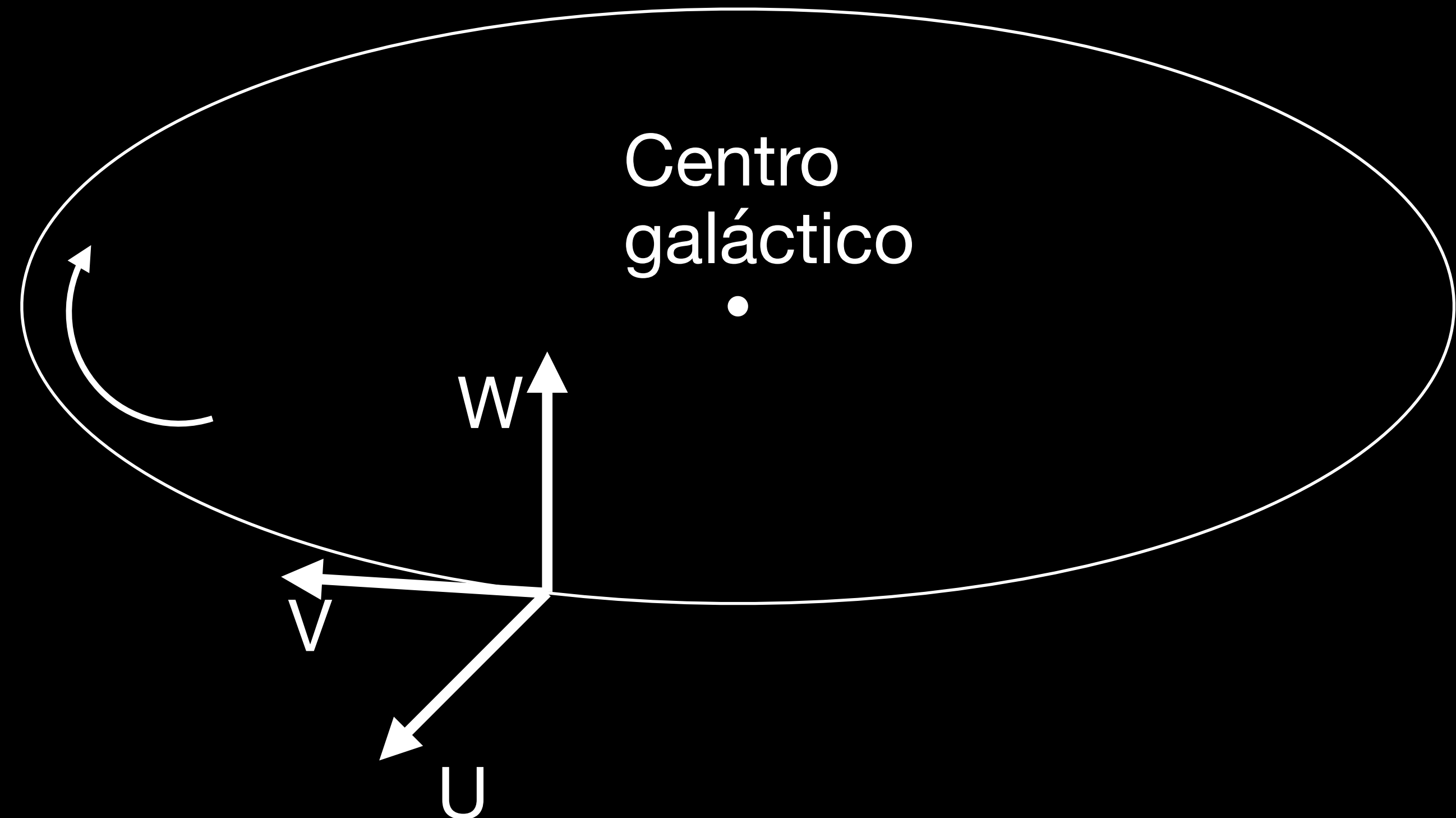
- Kapteyn (1904): dois grupos, se movendo em direções opostas
  - Dois sentidos de rotação?
  - Em 1918, Shapley: centro da Via Láctea
- Schwarzschild (1907-1908): (U, V, W), maior velocidade em U
- Stromberg (1923): estrelas de altas velocidades,  $\gtrsim 75$  km/s
  - Metade do céu: estrelas se afastando de nós
  - Na outra metade: estrelas se aproximando de nós
  - Para essas estrelas, maior velocidade em V



# Modelo de Stromberg (1923)

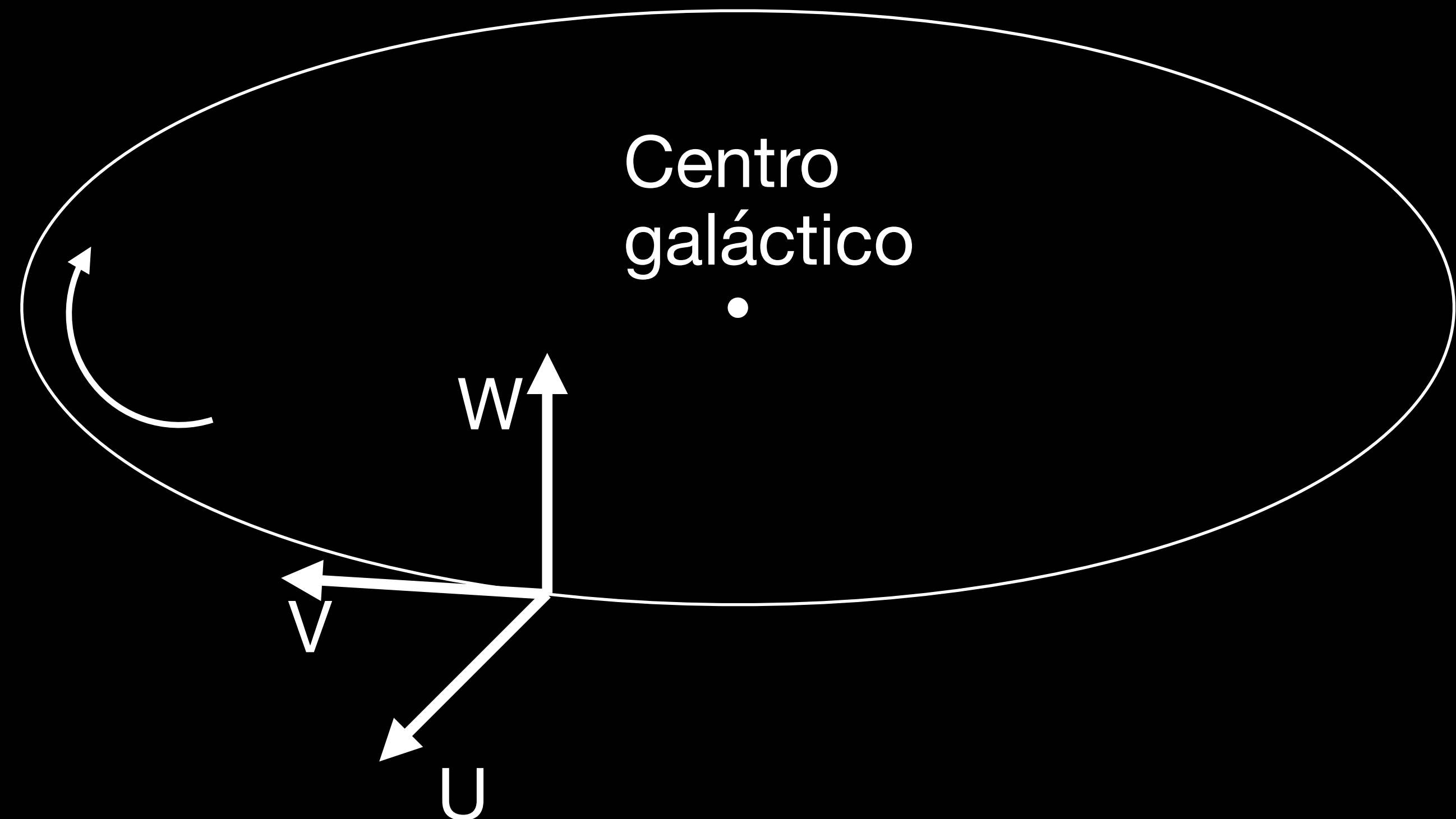
# Modelo de Stromberg (1923)

- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico



# Modelo de Stromberg (1923)

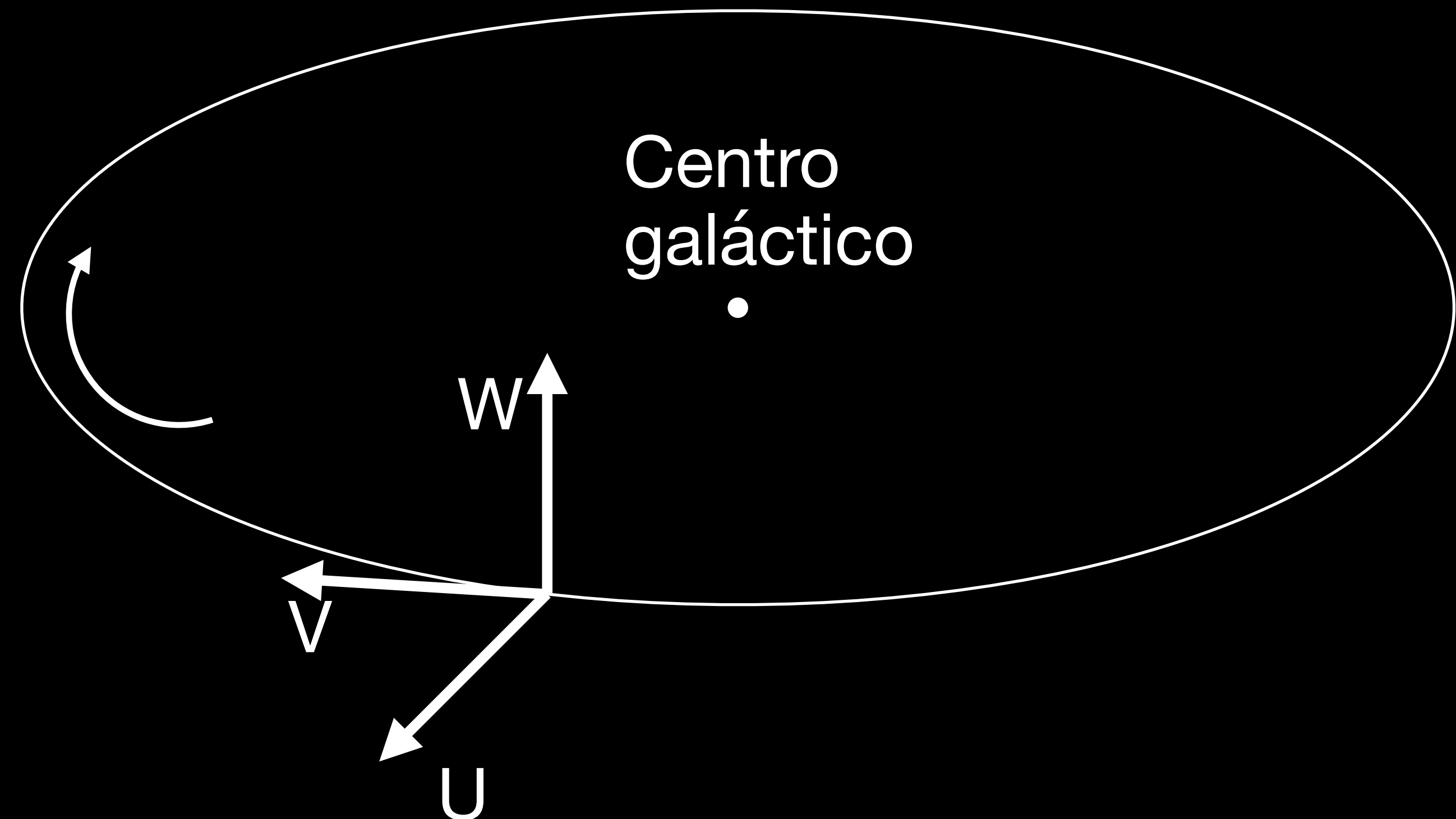
- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico
- O Sol, e a maioria das estrelas, gira na direção V (disco)





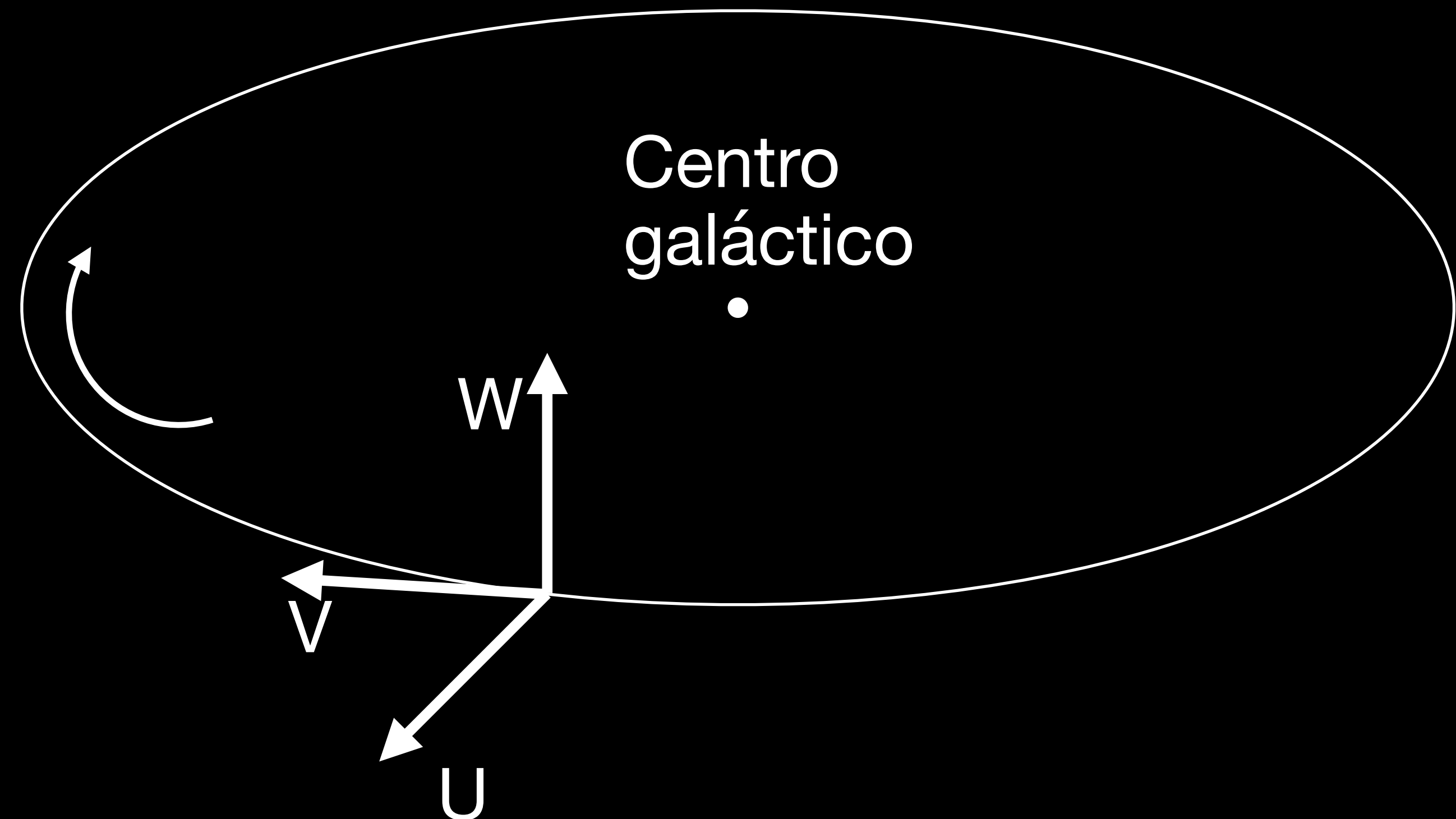
# Modelo de Stromberg (1923)

- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico
- O Sol, e a maioria das estrelas, gira na direção V (disco)
- As estrelas de alta velocidade:



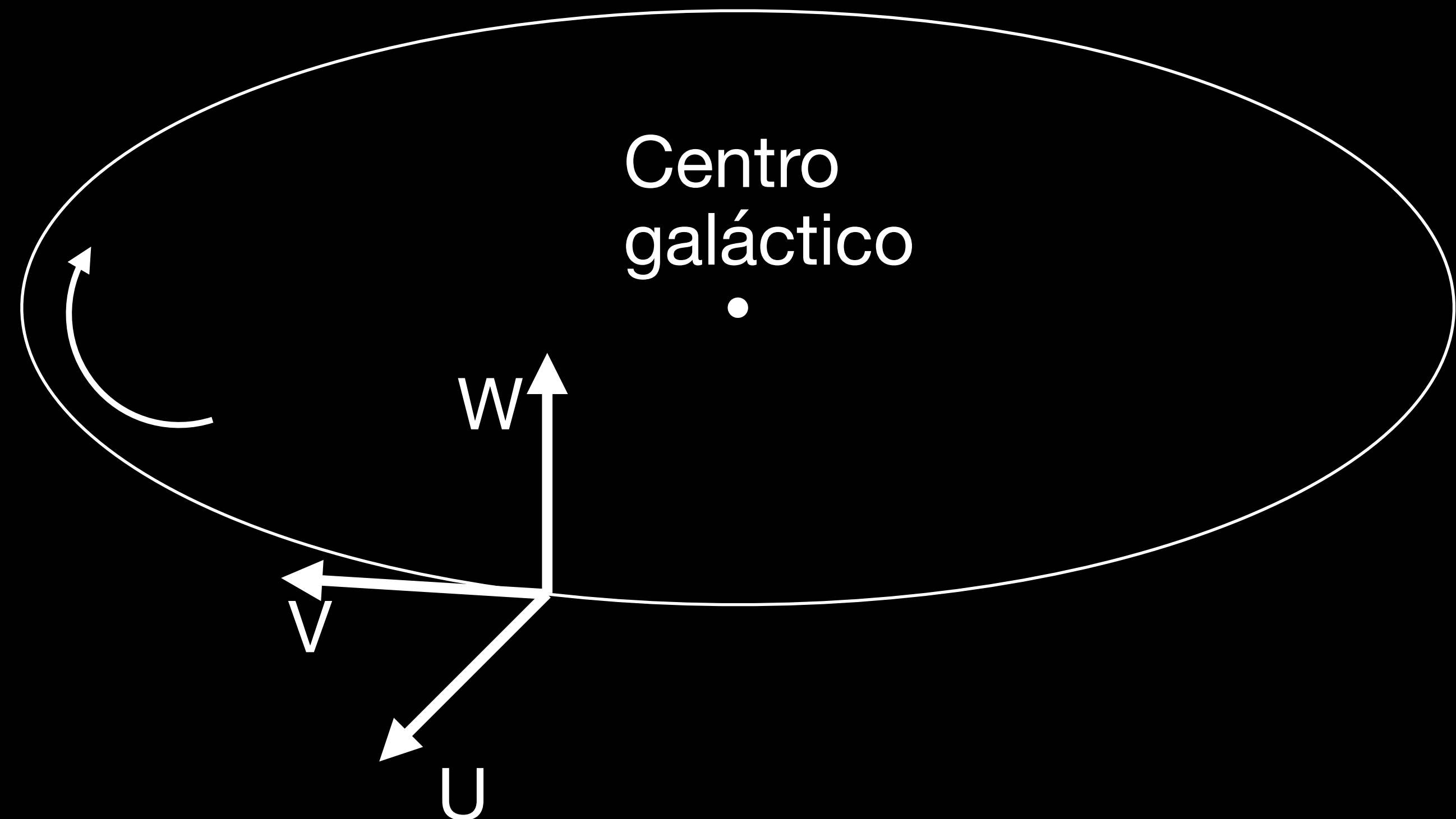
# Modelo de Stromberg (1923)

- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico
- O Sol, e a maioria das estrelas, gira na direção V (disco)
- As estrelas de alta velocidade:
  - Têm órbitas diferentes



# Modelo de Stromberg (1923)

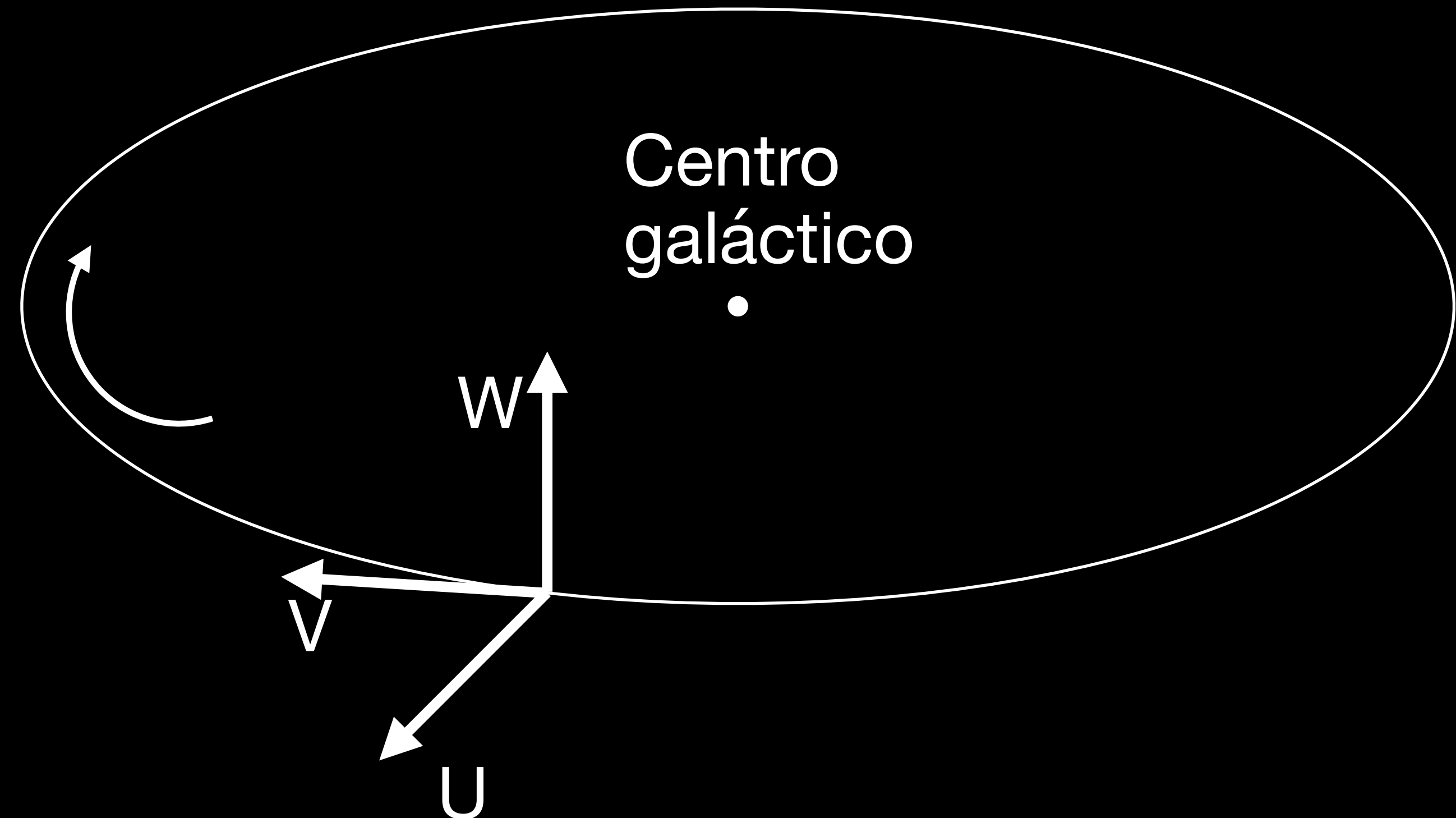
- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico
- O Sol, e a maioria das estrelas, gira na direção V (disco)
- As estrelas de alta velocidade:
  - Têm órbitas diferentes
  - Sem sentido definido de rotação





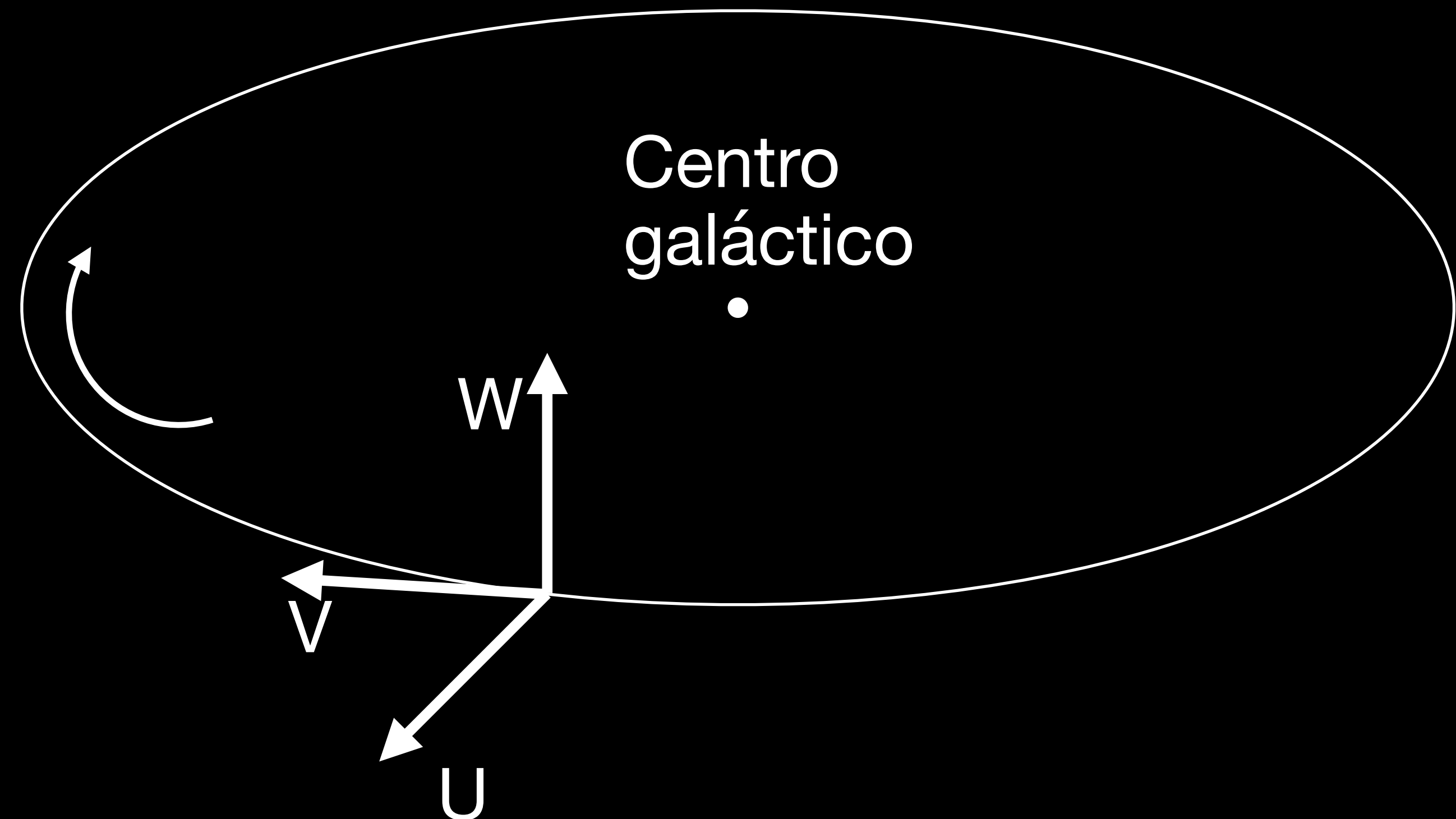
# Modelo de Stromberg (1923)

- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico
- O Sol, e a maioria das estrelas, gira na direção V (disco)
- As estrelas de alta velocidade:
  - Têm órbitas diferentes
  - Sem sentido definido de rotação
  - Altas vels. em V (em relação ao Sol)



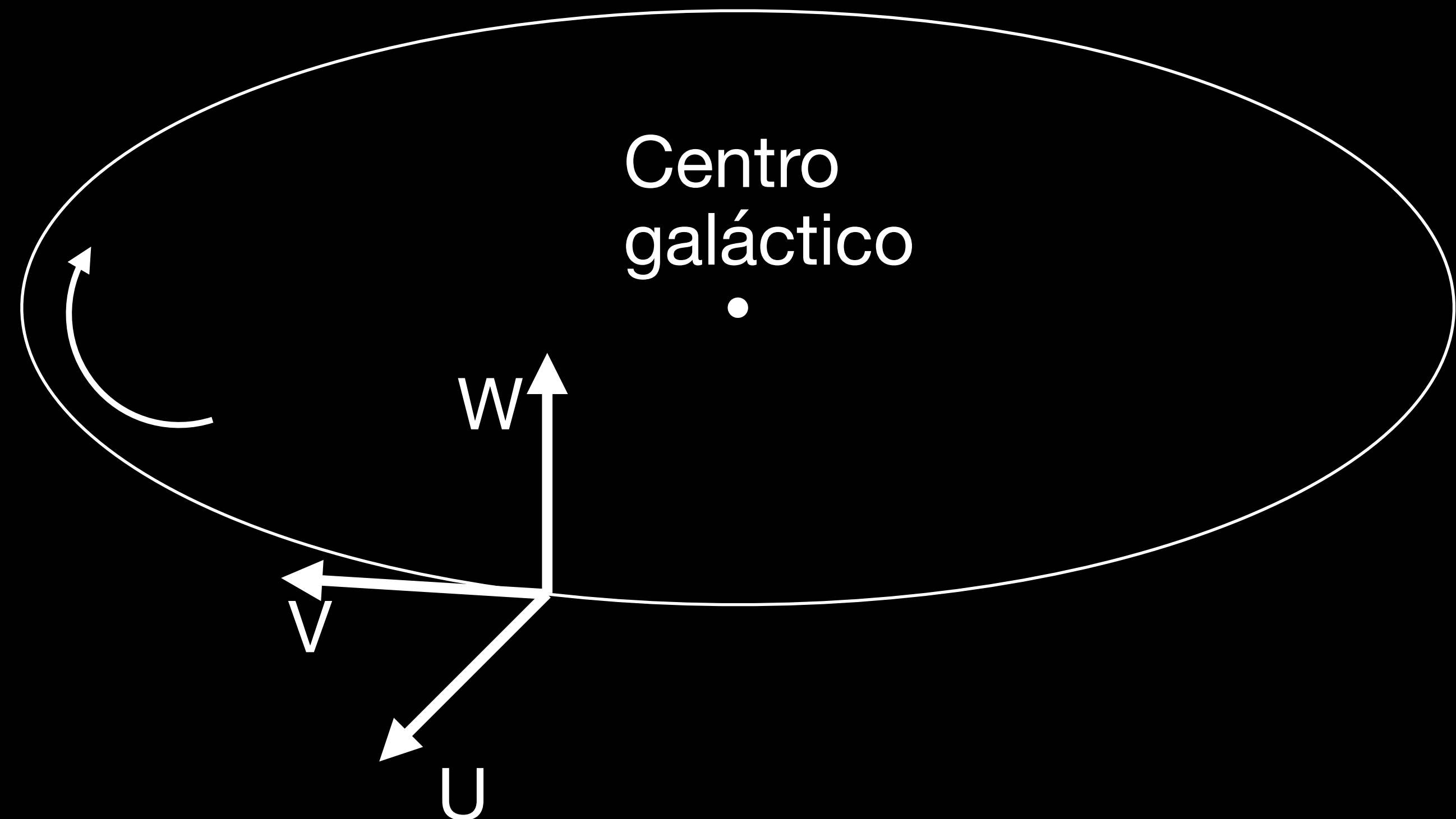
# Modelo de Stromberg (1923)

- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico
- O Sol, e a maioria das estrelas, gira na direção V (disco)
- As estrelas de alta velocidade:
  - Têm órbitas diferentes
  - Sem sentido definido de rotação
  - Altas vels. em V (em relação ao Sol)
  - Movimento do Sol cria assimetria



# Modelo de Stromberg (1923)

- A direção identificada por Kapteyn (U) é a direção do centro galáctico
- O Sol, e a maioria das estrelas, gira na direção V (disco)
- As estrelas de alta velocidade:
  - Têm órbitas diferentes
  - Sem sentido definido de rotação
  - Altas vels. em V (em relação ao Sol)
  - Movimento do Sol cria assimetria
  - Halo estelar





**Bertil Lindblad**

**1925-1927**

# Bertil Lindblad

1925-1927

- Estrelas do disco giram com vels. de centenas de km/s

# Bertil Lindblad

1925-1927

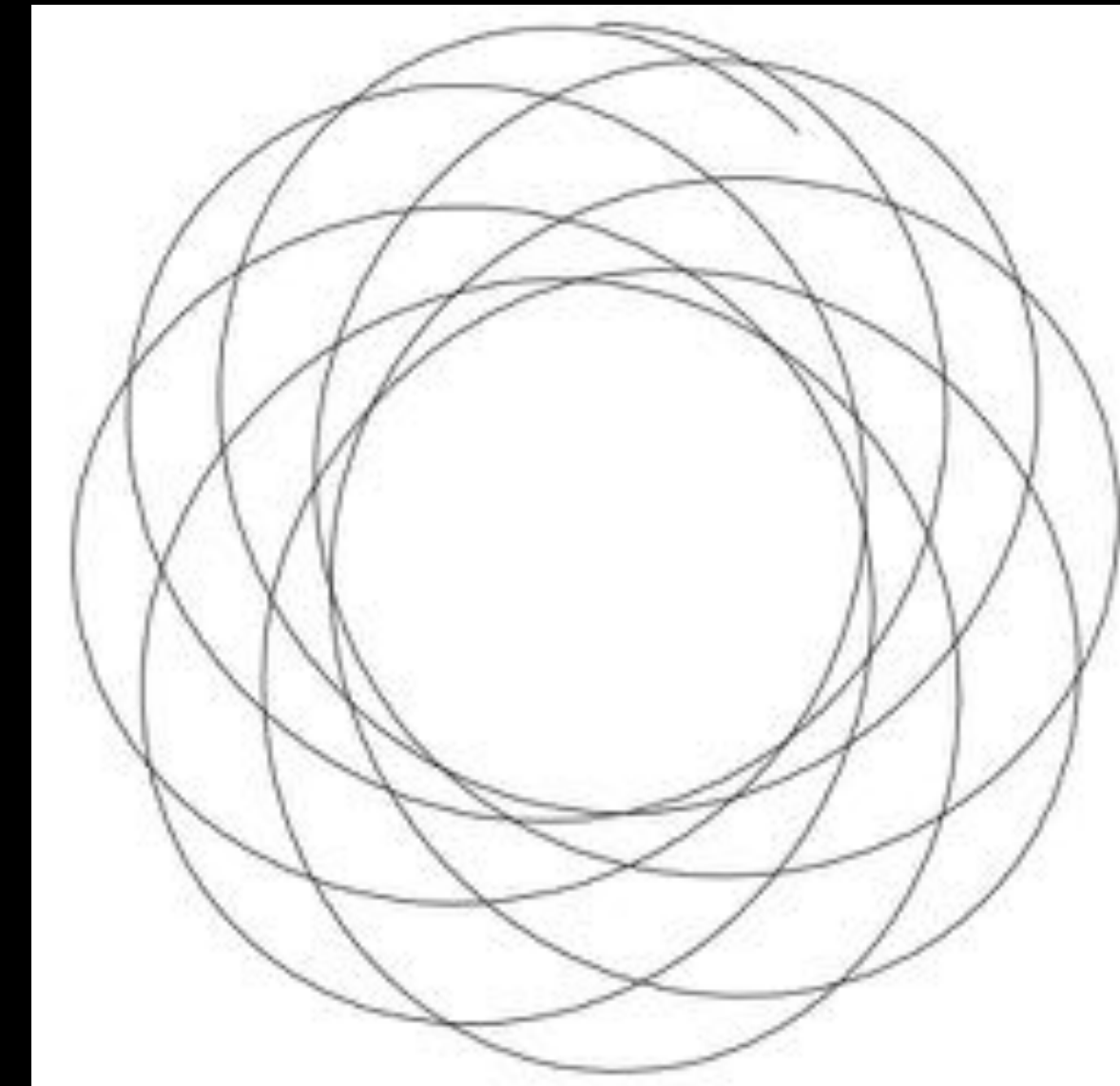
- Estrelas do disco giram com vels. de centenas de km/s
- Mas a maioria compartilha esse movimento com Sol (vels. relativas baixas)



# Bertil Lindblad

1925-1927

- Estrelas do disco giram com vels. de centenas de km/s
- Mas a maioria compartilha esse movimento com Sol (vels. relativas baixas)
- Órbitas ~ elípticas -> estrelas se afastam e se aproximam do centro

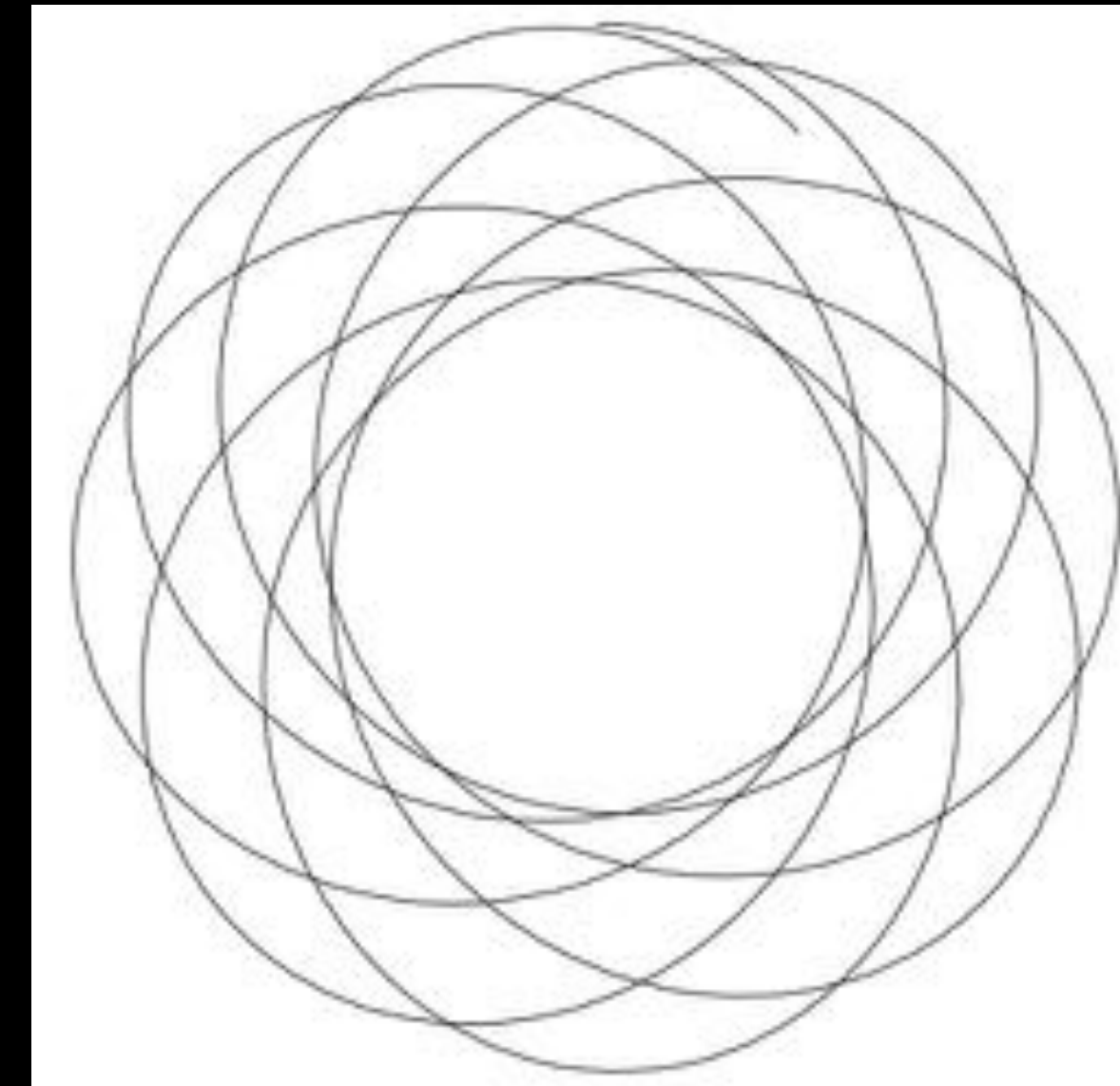


Órbita típica em potencial esférico

# Bertil Lindblad

1925-1927

- Estrelas do disco giram com vels. de centenas de km/s
- Mas a maioria compartilha esse movimento com Sol (vels. relativas baixas)
- Órbitas ~ elípticas -> estrelas se afastam e se aproximam do centro
- Isso gera vels. em U (não rotação, como Kapteyn achava)



Órbita típica em potencial esférico

**Jan Oort**

**1927**



# Jan Oort

1927

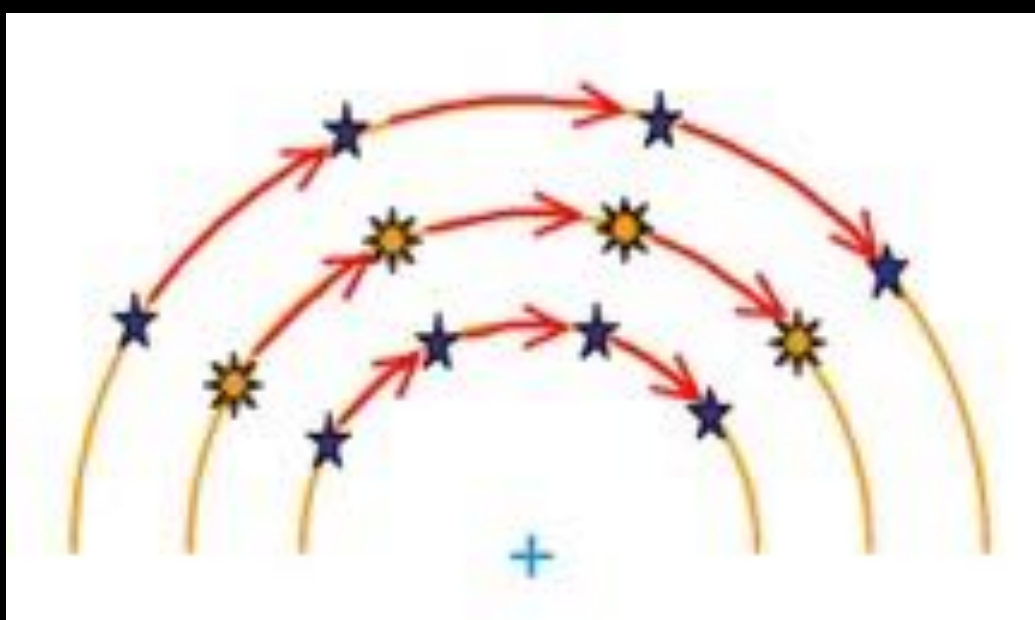
- Galáxia tem rotação diferencial

# Jan Oort

1927

- Galáxia tem rotação diferencial

disco rígido:

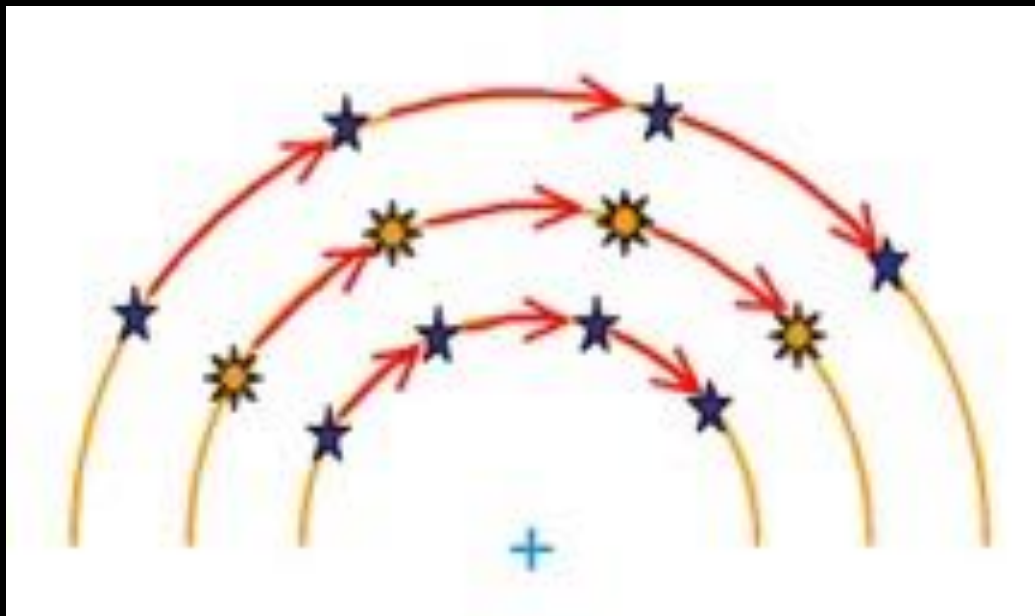


# Jan Oort

1927

- Galáxia tem rotação diferencial

disco rígido:



rotação diferencial:



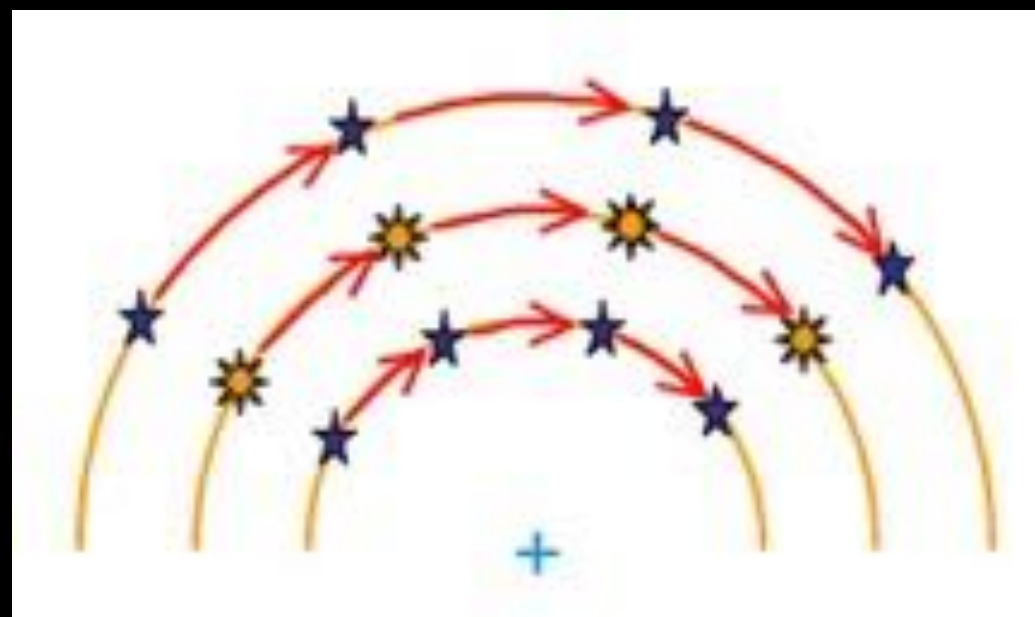


# Jan Oort

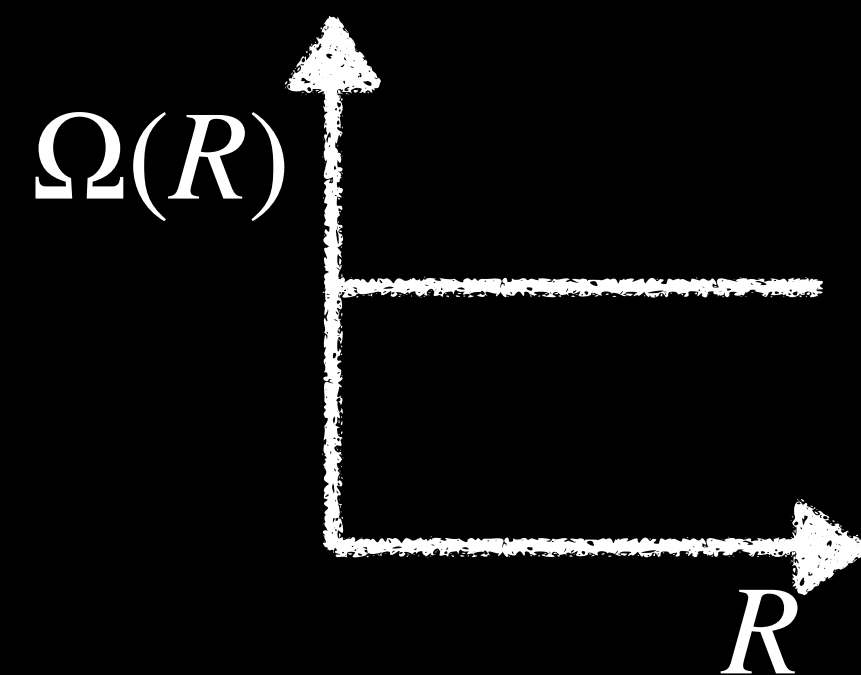
1927

- Galáxia tem rotação diferencial

disco rígido:



rotação diferencial:

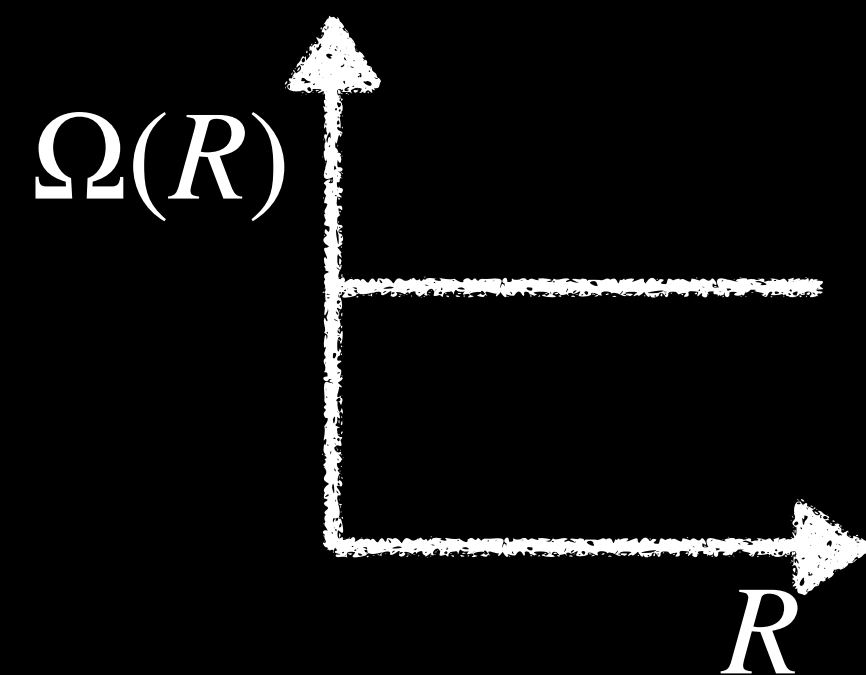
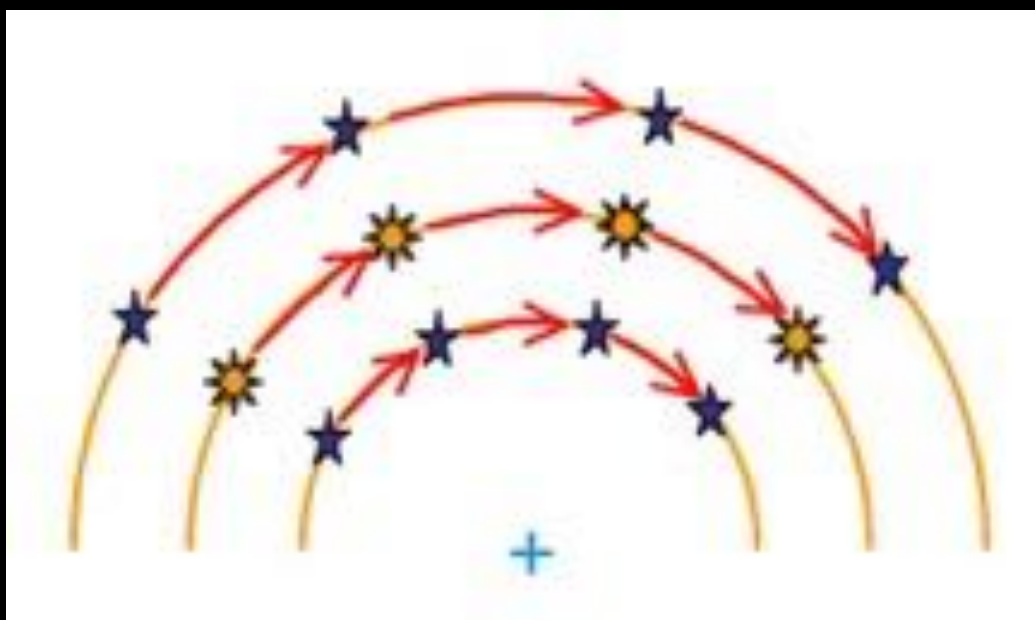


# Jan Oort

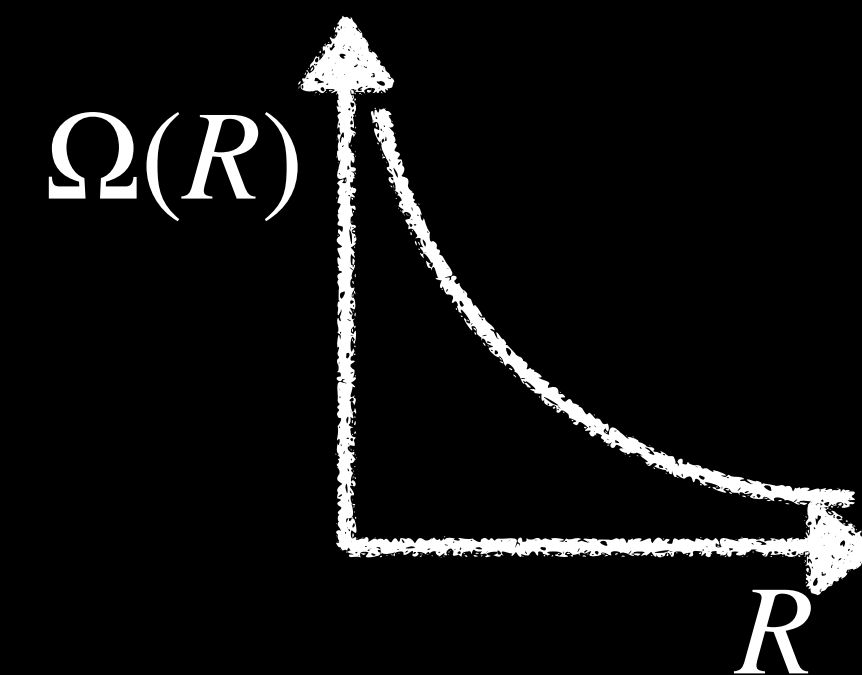
1927

- Galáxia tem rotação diferencial

disco rígido:



rotação diferencial:

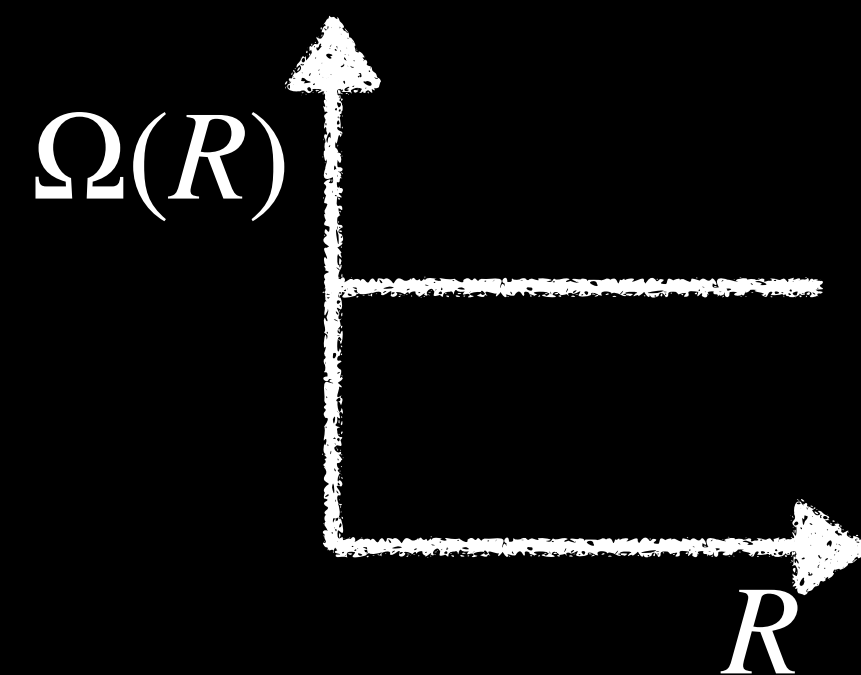
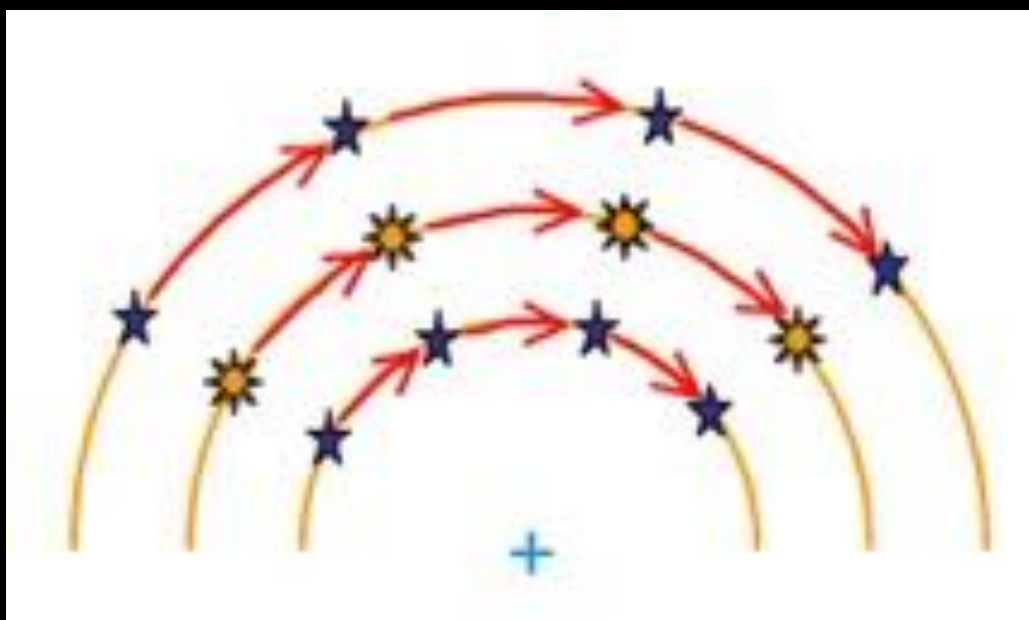


# Jan Oort

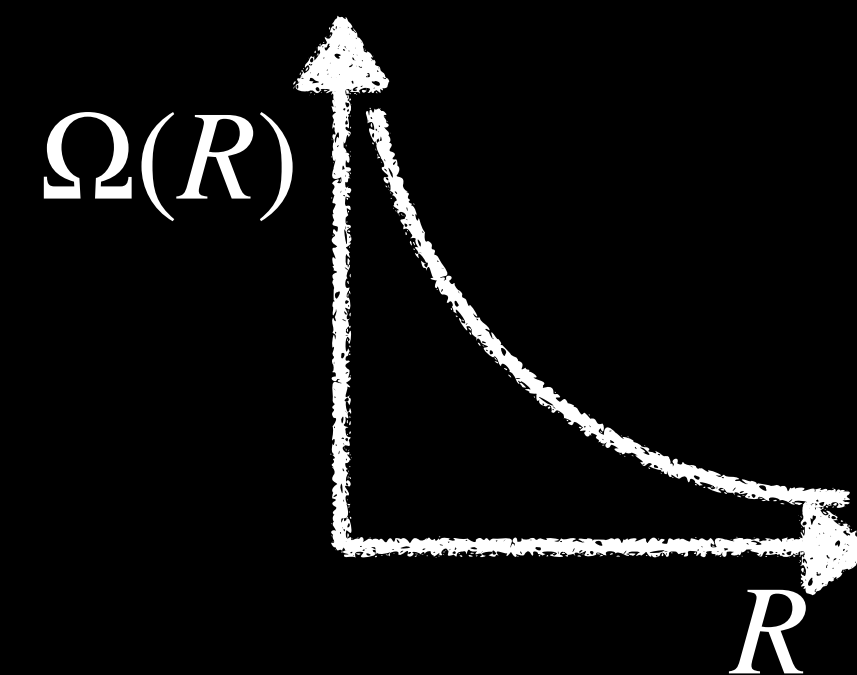
1927

- Galáxia tem rotação diferencial
- Método matemático para traduzir cinemática de estrelas em rotação da gal.

disco rígido:



rotação diferencial:



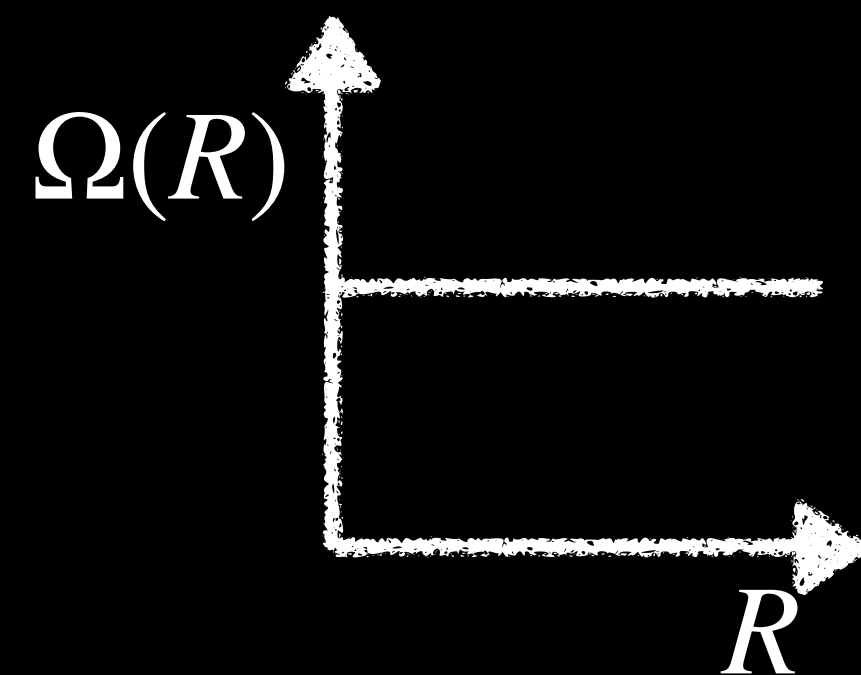
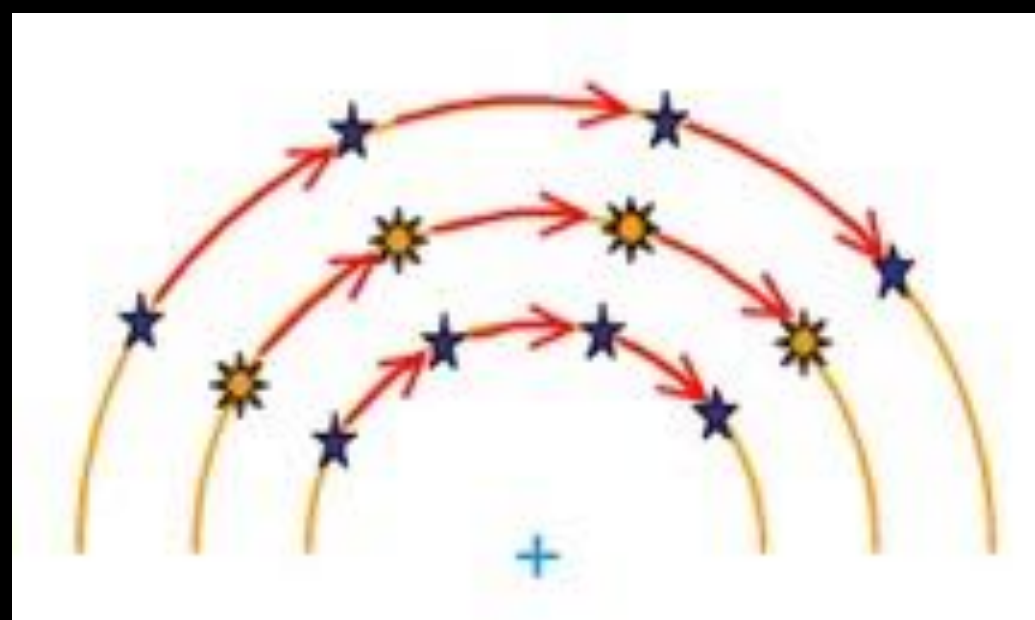


# Jan Oort

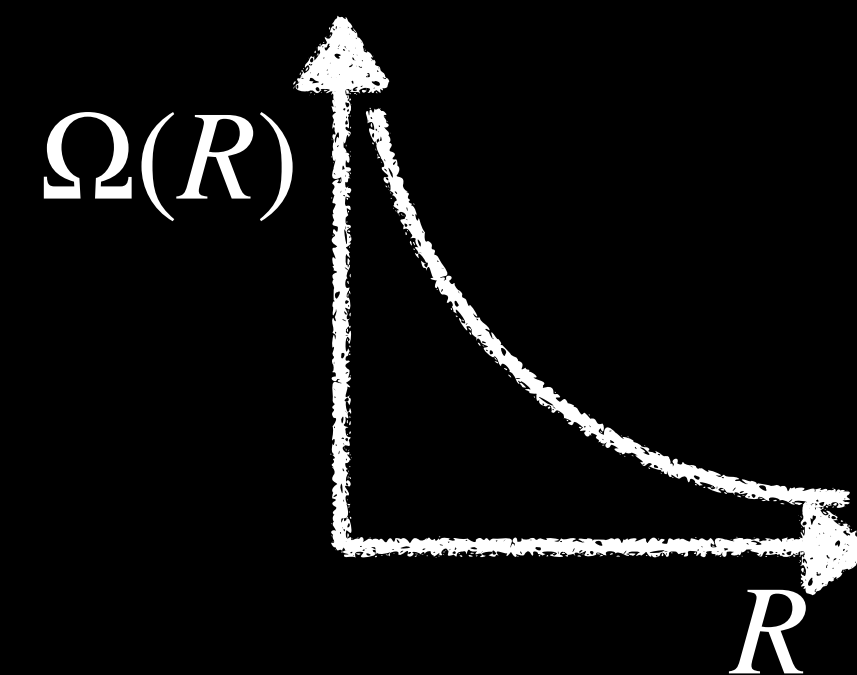
1927

- Galáxia tem rotação diferencial
- Método matemático para traduzir cinemática de estrelas em rotação da gal.
- Poeira no disco concilia modelos de Kapteyn e Shapley

disco rígido:



rotação diferencial:

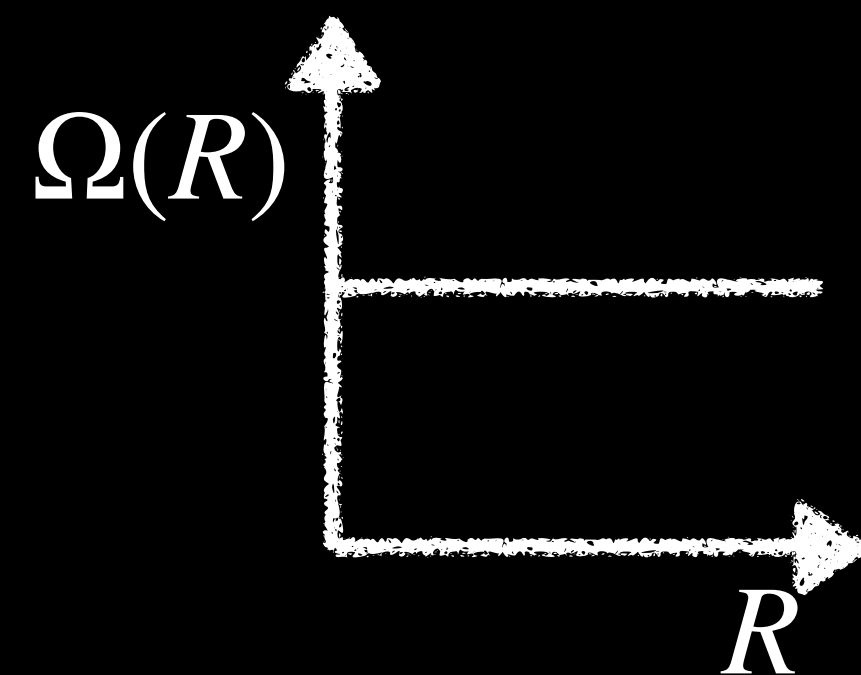
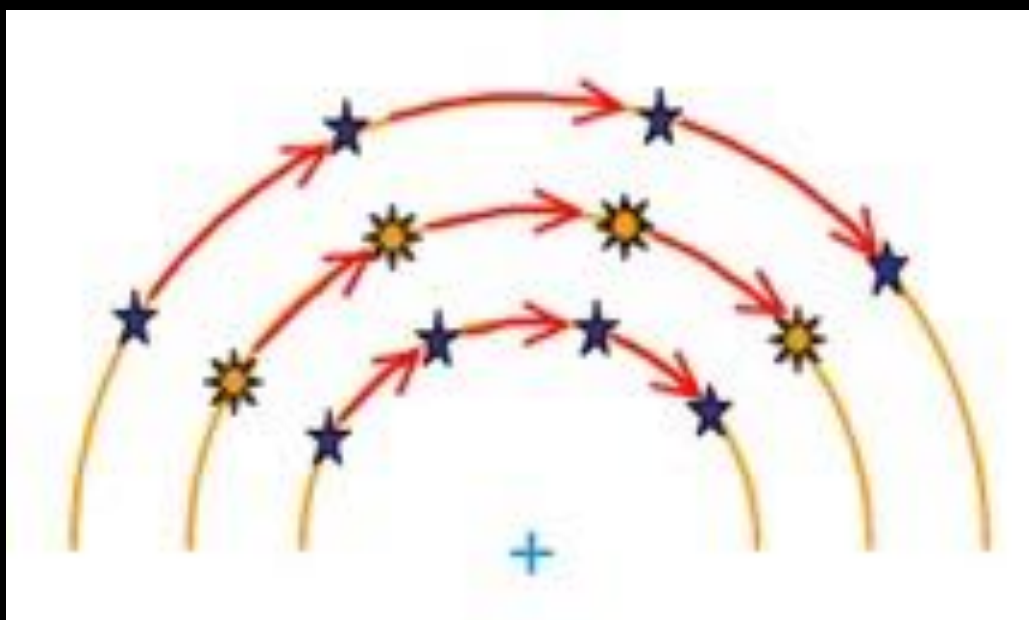


# Jan Oort

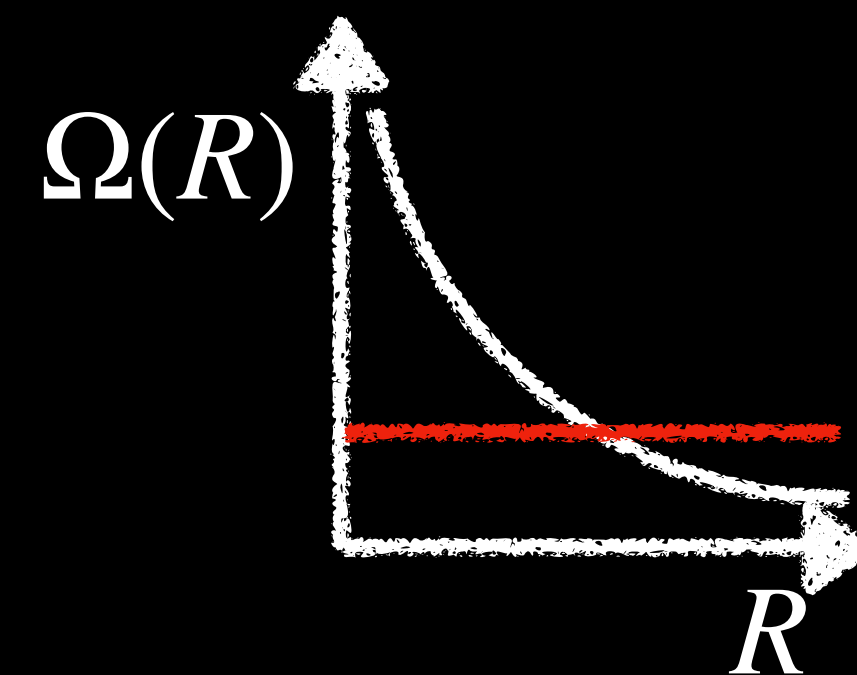
1927

- Galáxia tem rotação diferencial
- Método matemático para traduzir cinemática de estrelas em rotação da gal.
- Poeira no disco concilia modelos de Kapteyn e Shapley

disco rígido:



rotação diferencial:

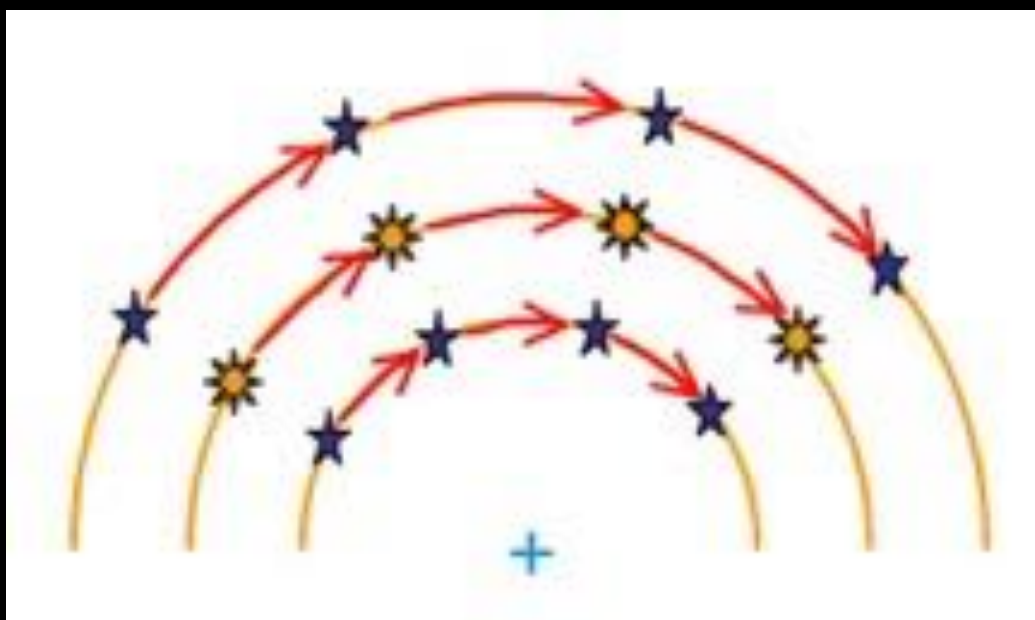


# Jan Oort

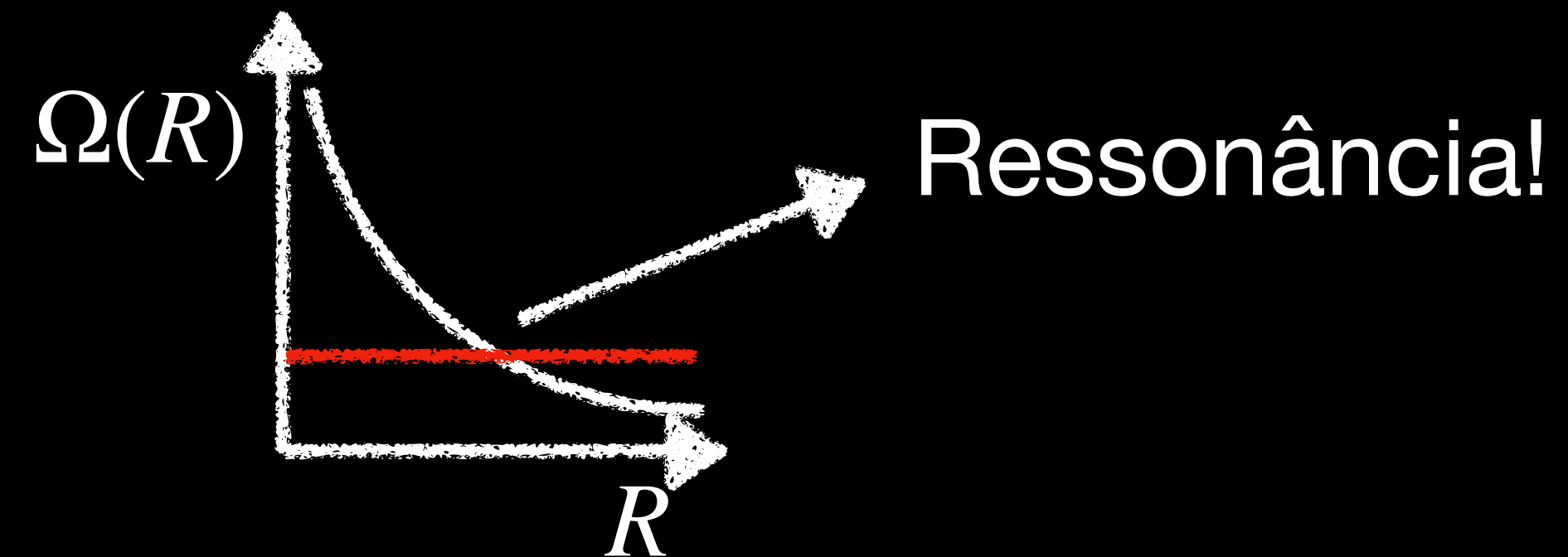
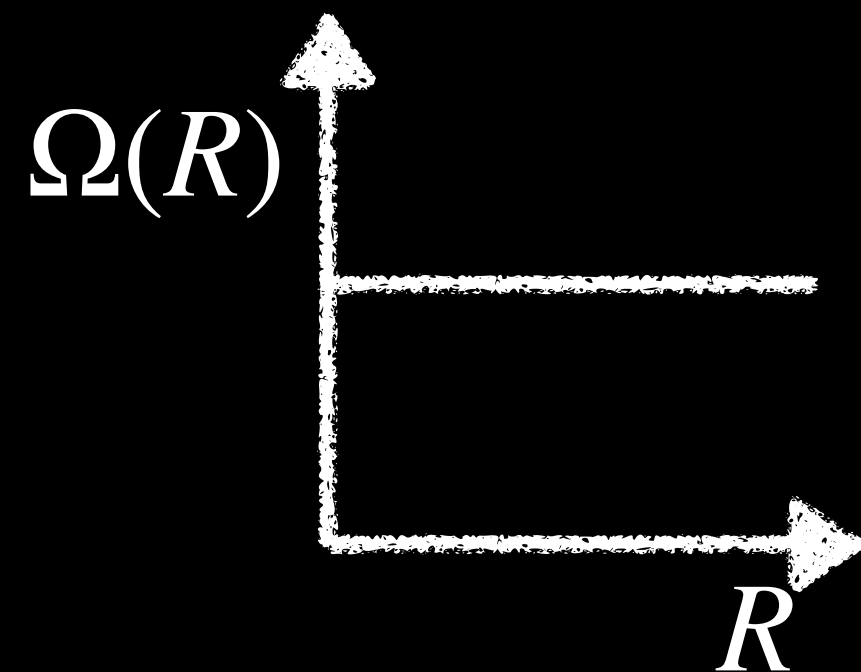
1927

- Galáxia tem rotação diferencial
- Método matemático para traduzir cinemática de estrelas em rotação da gal.
- Poeira no disco concilia modelos de Kapteyn e Shapley

disco rígido:



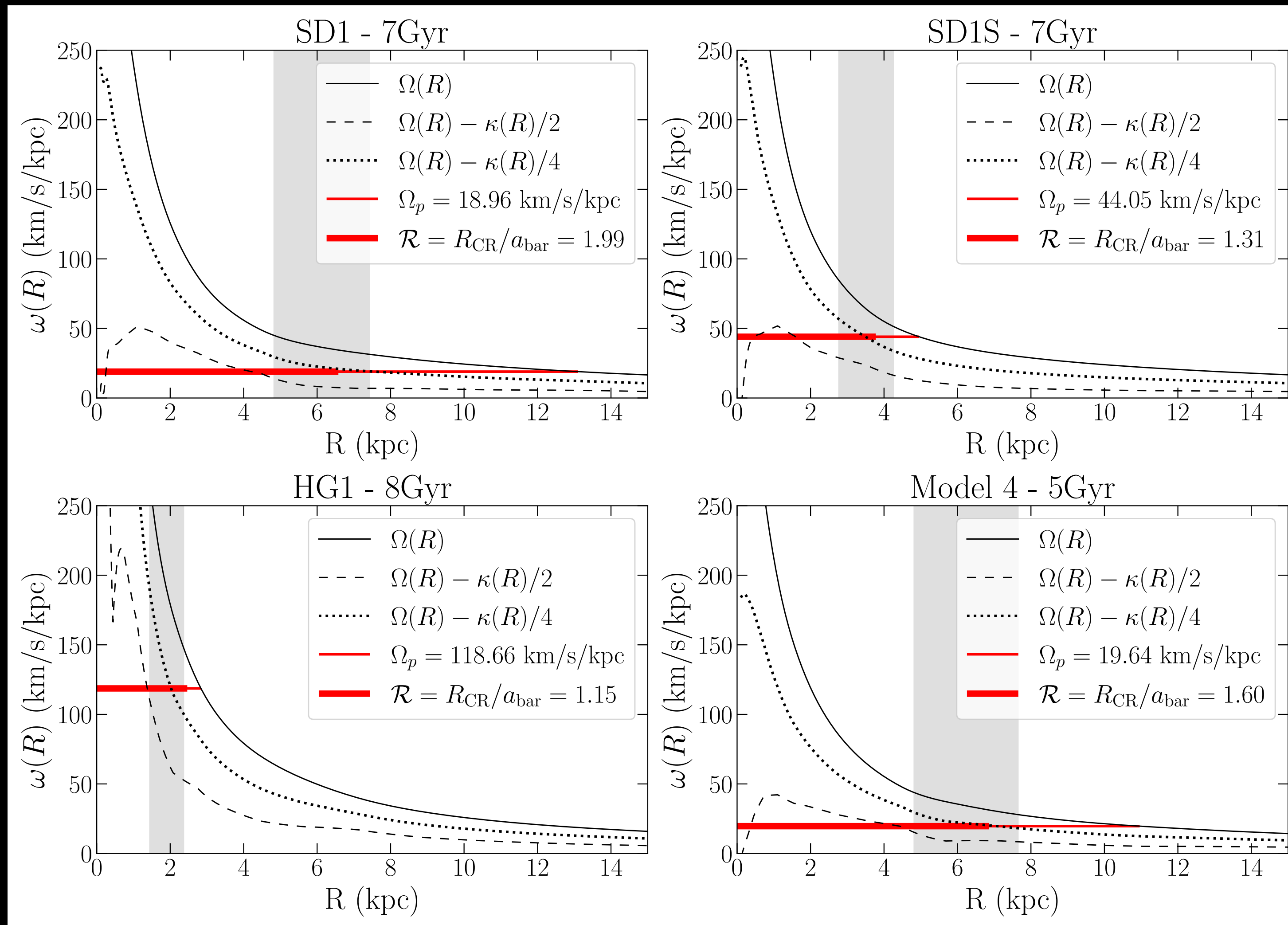
rotação diferencial:





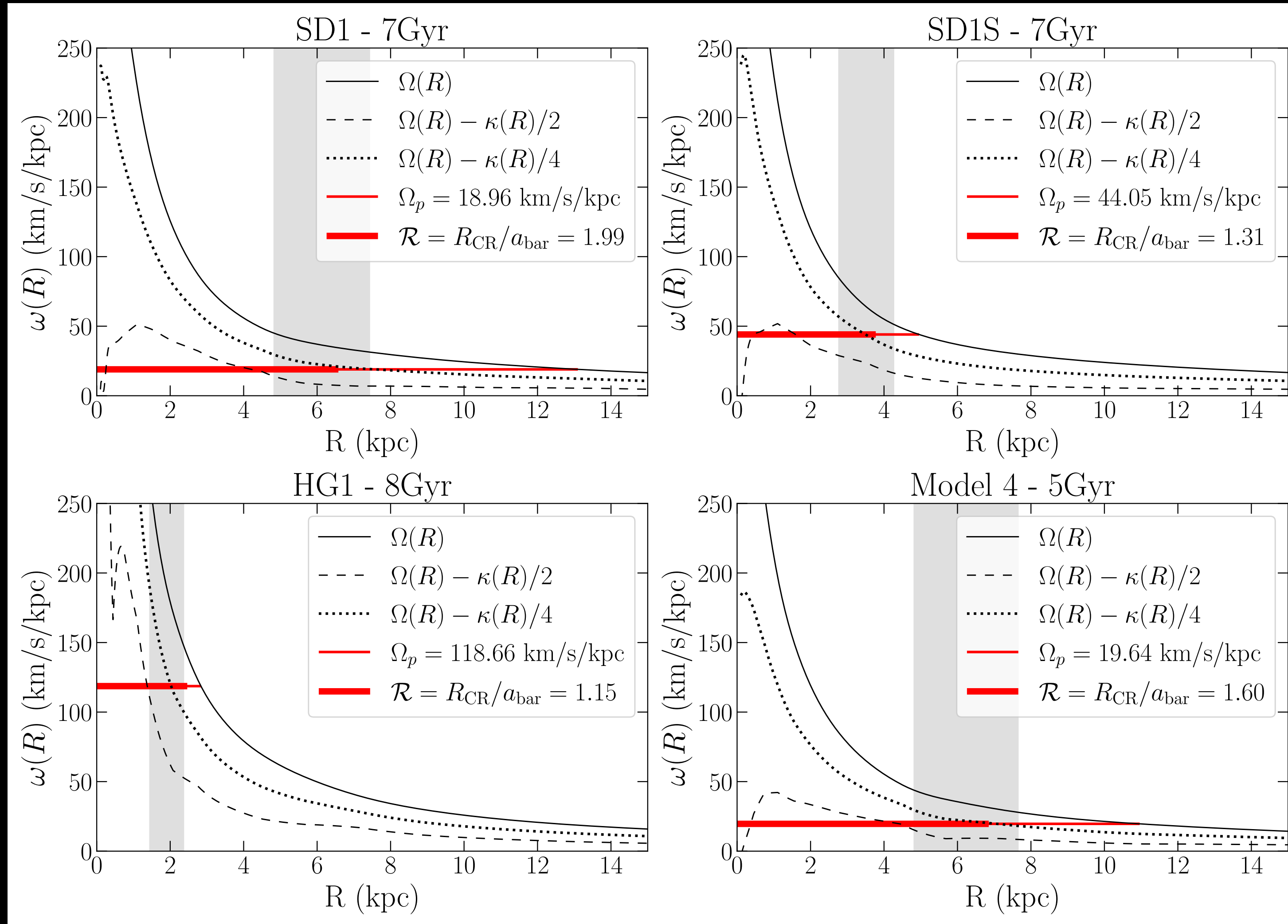
# Digressão: ressonâncias

## Simulações de galáxias com barras e/ou espirais



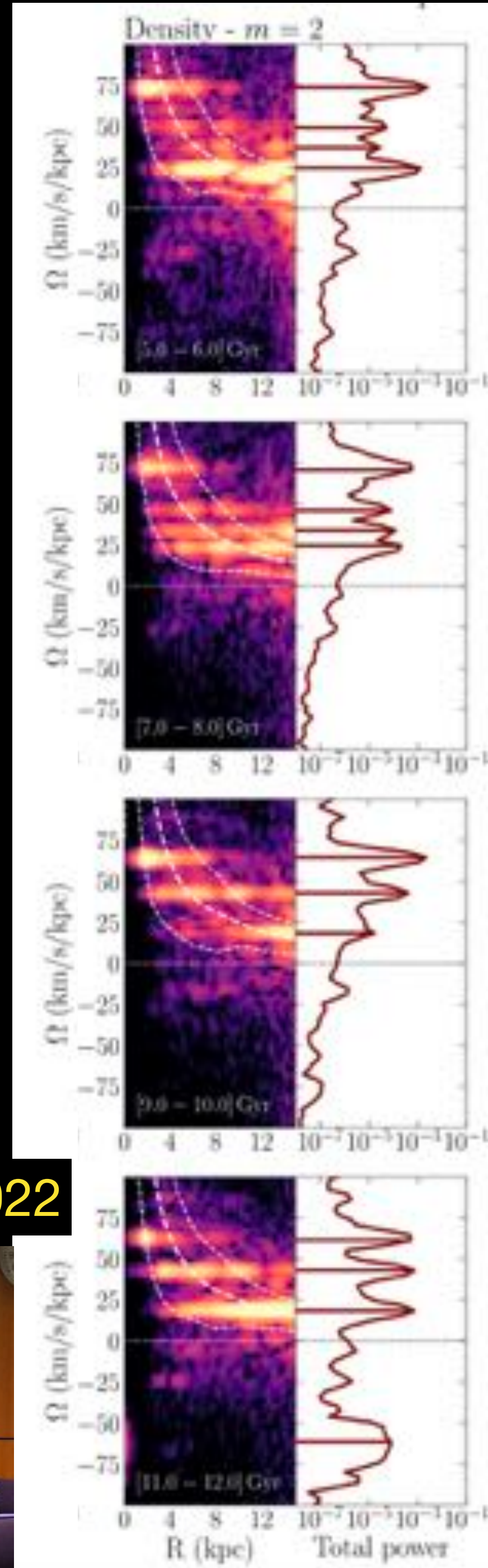
# Digressão: ressonâncias

## Simulações de galáxias com barras e/ou espirais



Beraldo e Silva+ 2023

Khachataryants, BeS+ 2022



# A Via Láctea como uma galáxia



# A Via Láctea como uma galáxia

- 1914: rotação da “nebulosa” do Sombreiro



# A Via Láctea como uma galáxia

- 1914: rotação da “nebulosa” do Sombreiro
- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m

# A Via Láctea como uma galáxia

- 1914: rotação da “nebulosa” do Sombreiro
- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m
- “Resolver” estrelas individuais em outras galáxias



# A Via Láctea como uma galáxia

- 1914: rotação da “nebulosa” do Sombreiro
- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m
- “Resolver” estrelas individuais em outras galáxias
- Resolução angular:  $\theta \approx \lambda/D$

# A Via Láctea como uma galáxia

- 1914: rotação da “nebulosa” do Sombreiro
- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m
- “Resolver” estrelas individuais em outras galáxias
- Resolução angular:  $\theta \approx \lambda/D$
- 1923: Hubble identifica Cefeidas em Andromeda



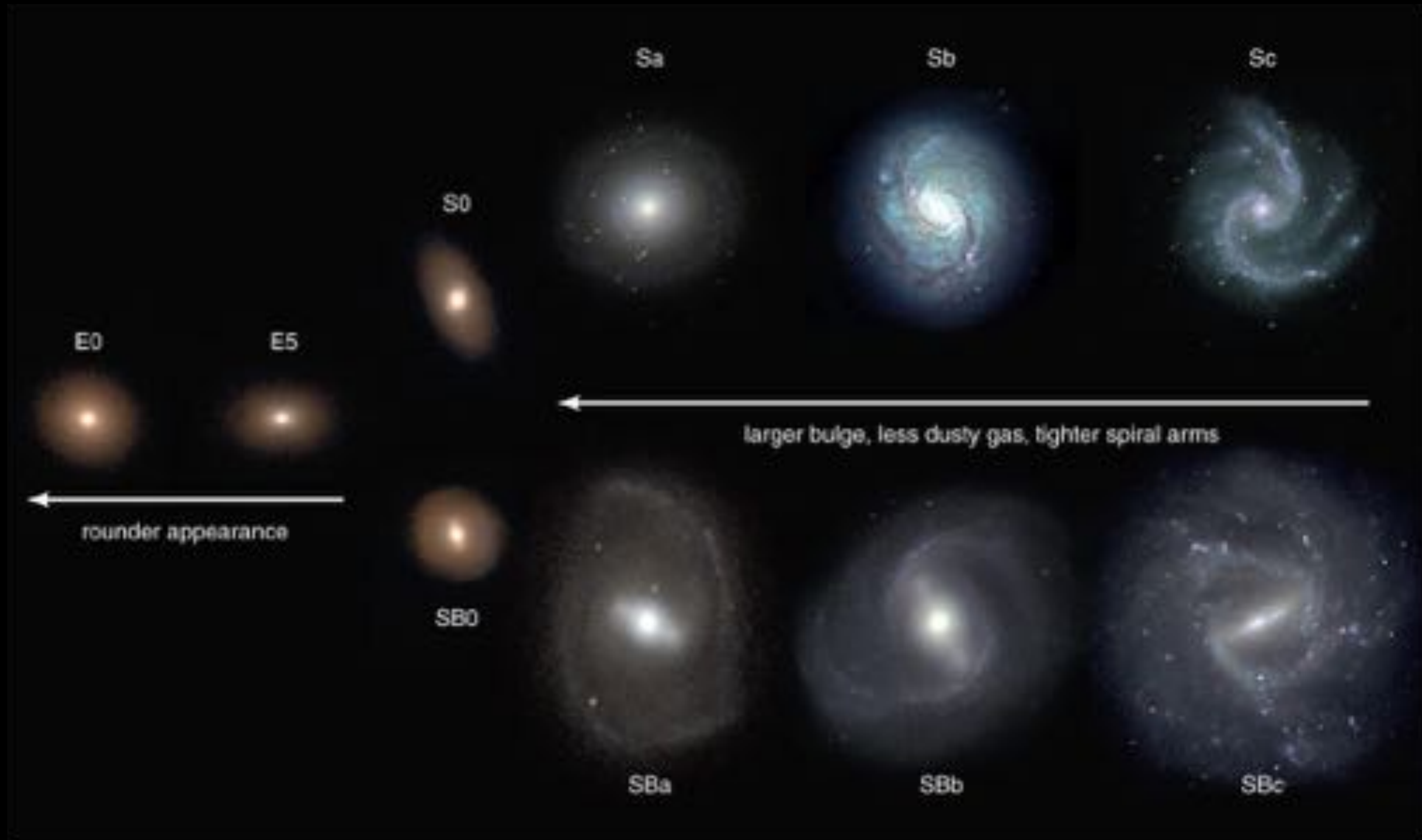
# A Via Láctea como uma galáxia

- 1914: rotação da “nebulosa” do Sombreiro
- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m
- “Resolver” estrelas individuais em outras galáxias
- Resolução angular:  $\theta \approx \lambda/D$
- 1923: Hubble identifica Cefeidas em Andromeda
- 1926: Diapasão de Hubble





# Diapasão de Hubble



# **A Via Láctea como uma galáxia**

**Baade: Populações I e II**

# **A Via Láctea como uma galáxia**

## **Baade: Populações I e II**

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas



# A Via Láctea como uma galáxia

## Baade: Populações I e II

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas
- Em discos, e braços espirais: estrelas mais brilhantes são azuis (pop. I)

# A Via Láctea como uma galáxia

## Baade: Populações I e II

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas
- Em discos, e braços espirais: estrelas mais brilhantes são azuis (pop. I)
- Galáxias elípticas e bojos de galáxias espirais: estrelas vermelhas (pop. II)

# A Via Láctea como uma galáxia

## Baade: Populações I e II

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas
- Em discos, e braços espirais: estrelas mais brilhantes são azuis (pop. I)
- Galáxias elípticas e bojos de galáxias espirais: estrelas vermelhas (pop. II)
- Na Via Láctea:

# A Via Láctea como uma galáxia

## Baade: Populações I e II

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas
- Em discos, e braços espirais: estrelas mais brilhantes são azuis (pop. I)
- Galáxias elípticas e bojos de galáxias espirais: estrelas vermelhas (pop. II)
- Na Via Láctea:
  - Disco/vizinhança solar: dominados por estrelas de pop. I



# A Via Láctea como uma galáxia

## Baade: Populações I e II

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas
- Em discos, e braços espirais: estrelas mais brilhantes são azuis (pop. I)
- Galáxias elípticas e bojos de galáxias espirais: estrelas vermelhas (pop. II)
- Na Via Láctea:
  - Disco/vizinhança solar: dominados por estrelas de pop. I
  - Halo estelar (estrelas de alta vel.): dominados por estrelas de pop. II

# A Via Láctea como uma galáxia

## Baade: Populações I e II

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas
- Em discos, e braços espirais: estrelas mais brilhantes são azuis (pop. I)
- Galáxias elípticas e bojos de galáxias espirais: estrelas vermelhas (pop. II)
- Na Via Láctea:
  - Disco/vizinhança solar: dominados por estrelas de pop. I
  - Halo estelar (estrelas de alta vel.): dominados por estrelas de pop. II
- ~1950: o que distingue pops. I e II é a idade

# A Via Láctea como uma galáxia

## Baade: Populações I e II

- Walter Baade (1944): resolveu estrelas no bojo de Andrômeda -> vermelhas
- Em discos, e braços espirais: estrelas mais brilhantes são azuis (pop. I)
- Galáxias elípticas e bojos de galáxias espirais: estrelas vermelhas (pop. II)
- Na Via Láctea:
  - Disco/vizinhança solar: dominados por estrelas de pop. I
  - Halo estelar (estrelas de alta vel.): dominados por estrelas de pop. II
- ~1950: o que distingue pops. I e II é a idade
- Reforça a idéia da Via Láctea como galáxia típica - braços espirais?

# Os braços espirais da Via Láctea



# Os braços espirais da Via Láctea

- Baade (~1945): estrelas OB traçam os braços espirais

# Os braços espirais da Via Láctea

- Baade (~1945): estrelas OB traçam os braços espirais
- William Morgan (Yerkes Observatory): mapear estrelas OB na Via Láctea
- 1950: resultados não-convincentes

# Os braços espirais da Via Láctea

- Baade (~1945): estrelas OB traçam os braços espirais
- William Morgan (Yerkes Observatory): mapear estrelas OB na Via Láctea
- 1950: resultados não-convincentes
- Na mesma conferência: Baade: regiões H II traçam os braços espirais de M31

# Os braços espirais da Via Láctea

- Baade (~1945): estrelas OB traçam os braços espirais
- William Morgan (Yerkes Observatory): mapear estrelas OB na Via Láctea
- 1950: resultados não-convincentes
- Na mesma conferência: Baade: regiões H II traçam os braços espirais de M31
- Morgan: identificou regiões H II na Via Láctea, revelando dois braços espirais



# Os braços espirais da Via Láctea

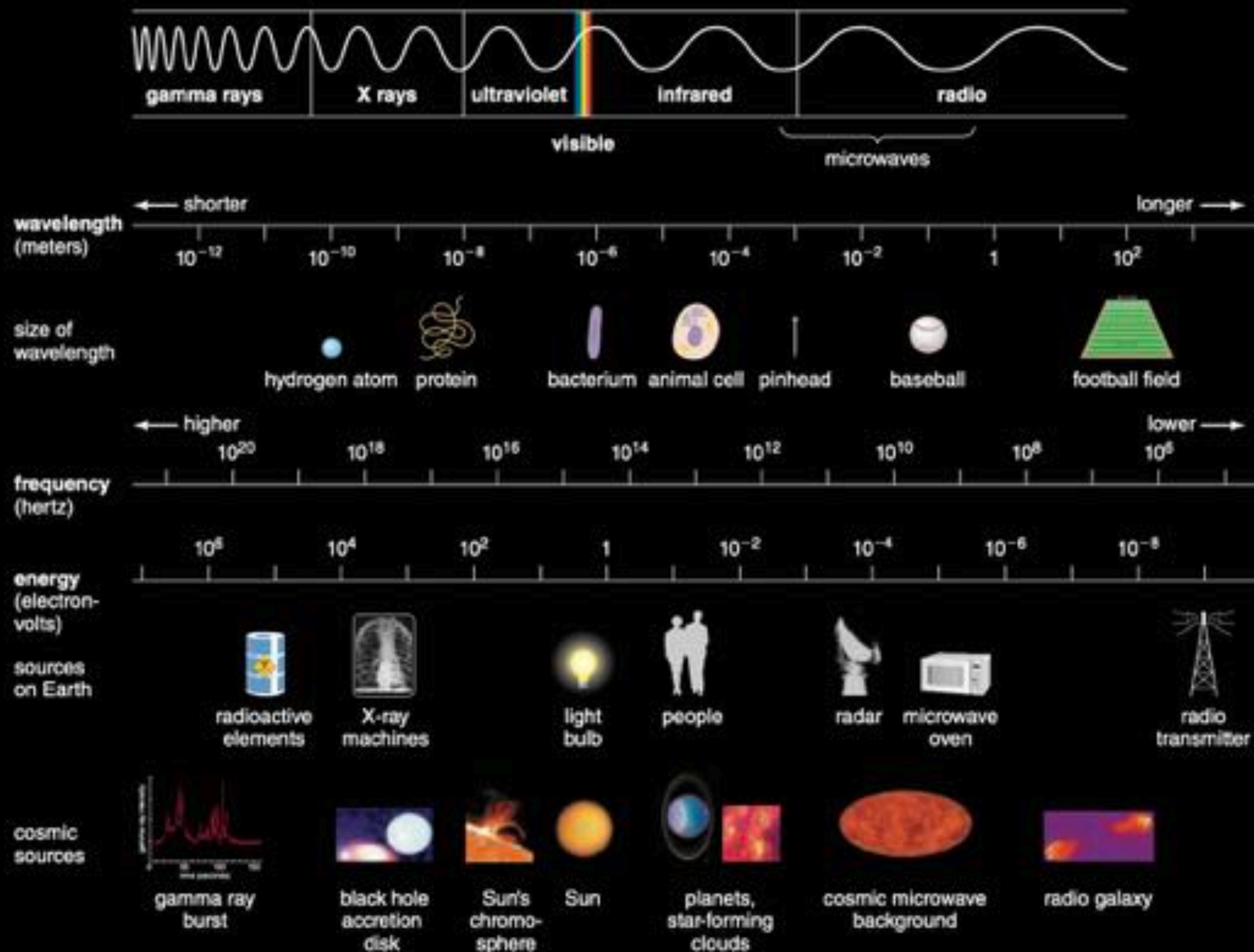
Ondas de rádio

# Os braços espirais da Via Láctea

## Ondas de radio

- Observações anteriores no ótico (filtros vermelhos)

# The Electromagnetic Spectrum



# Os braços espirais da Via Láctea

## Ondas de radio

- Observações anteriores no ótico (filtros vermelhos)
- 1944: Hendrick van de Hulst & Jan Oort: linha de 21 cm



# Os braços espirais da Via Láctea

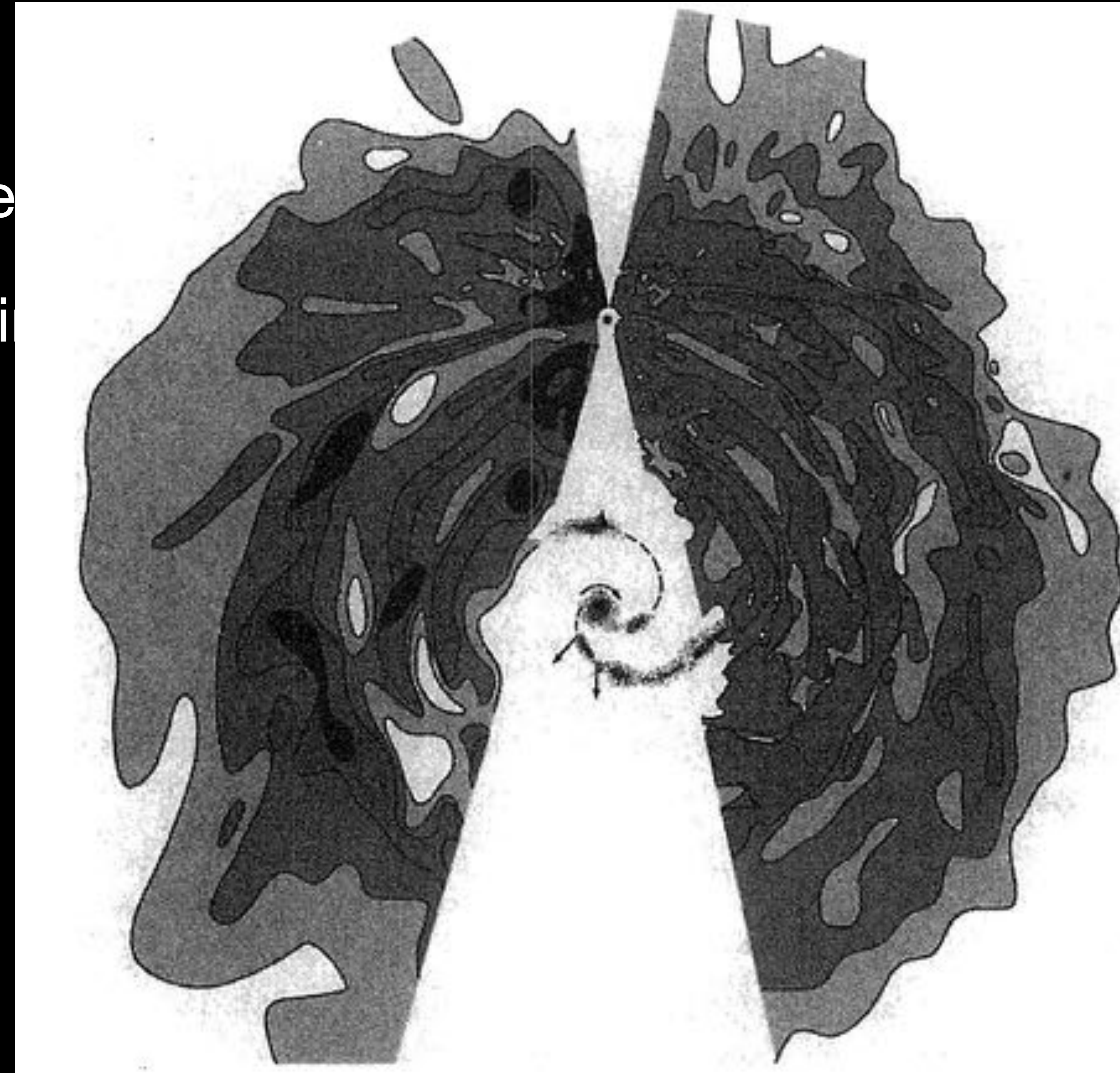
## Ondas de radio

- Observações anteriores no ótico (filtros vermelhos)
- 1944: Hendrick van de Hulst & Jan Oort: linha de 21 cm
- ~1951: braços espirais traçados em radio

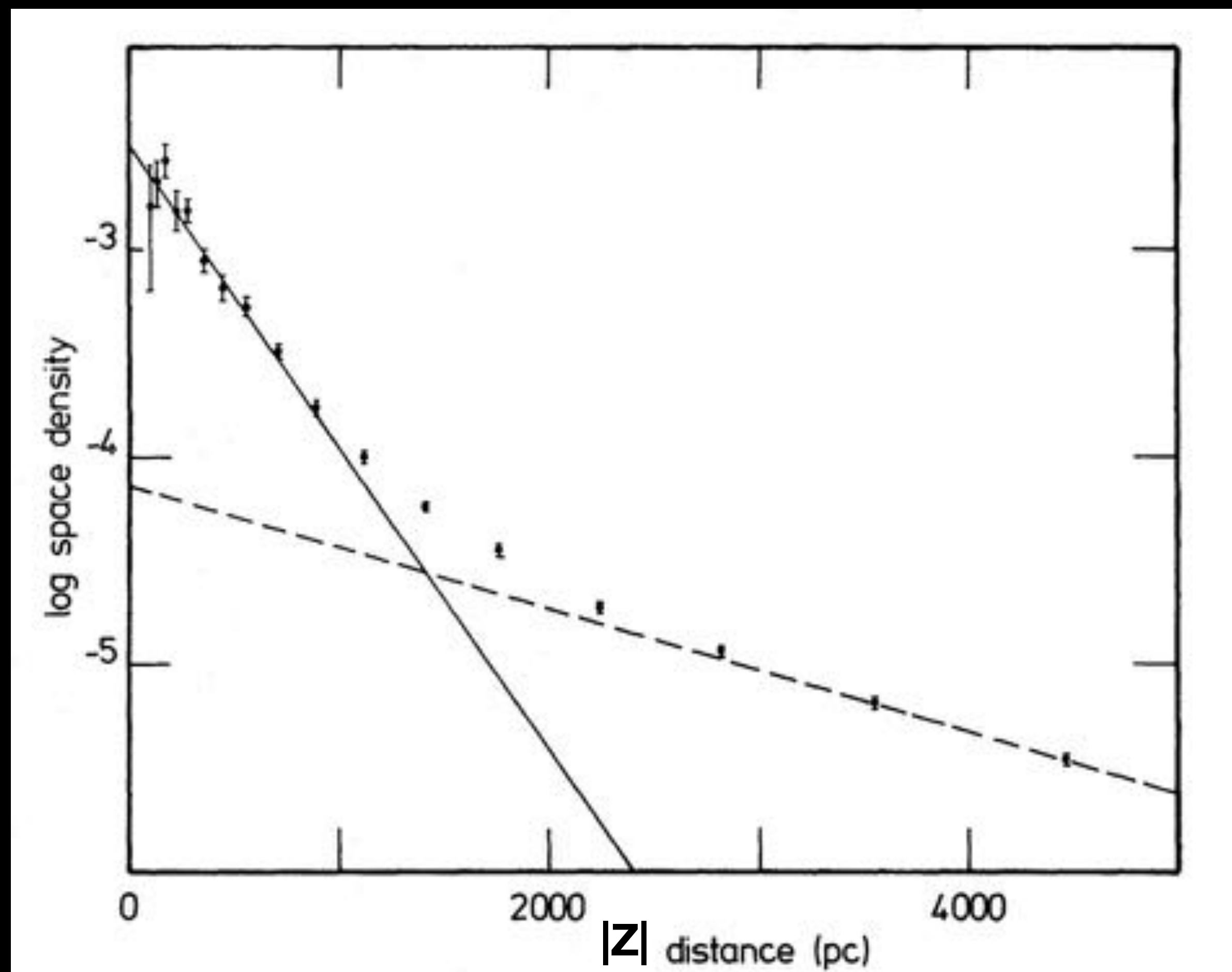
# Os braços espirais da Via Láctea

## Ondas de radio

- Observações anteriores no ótico (filtros ve
- 1944: Hendrick van de Hulst & Jan Oort: li
- ~1951: braços espirais traçados em radio

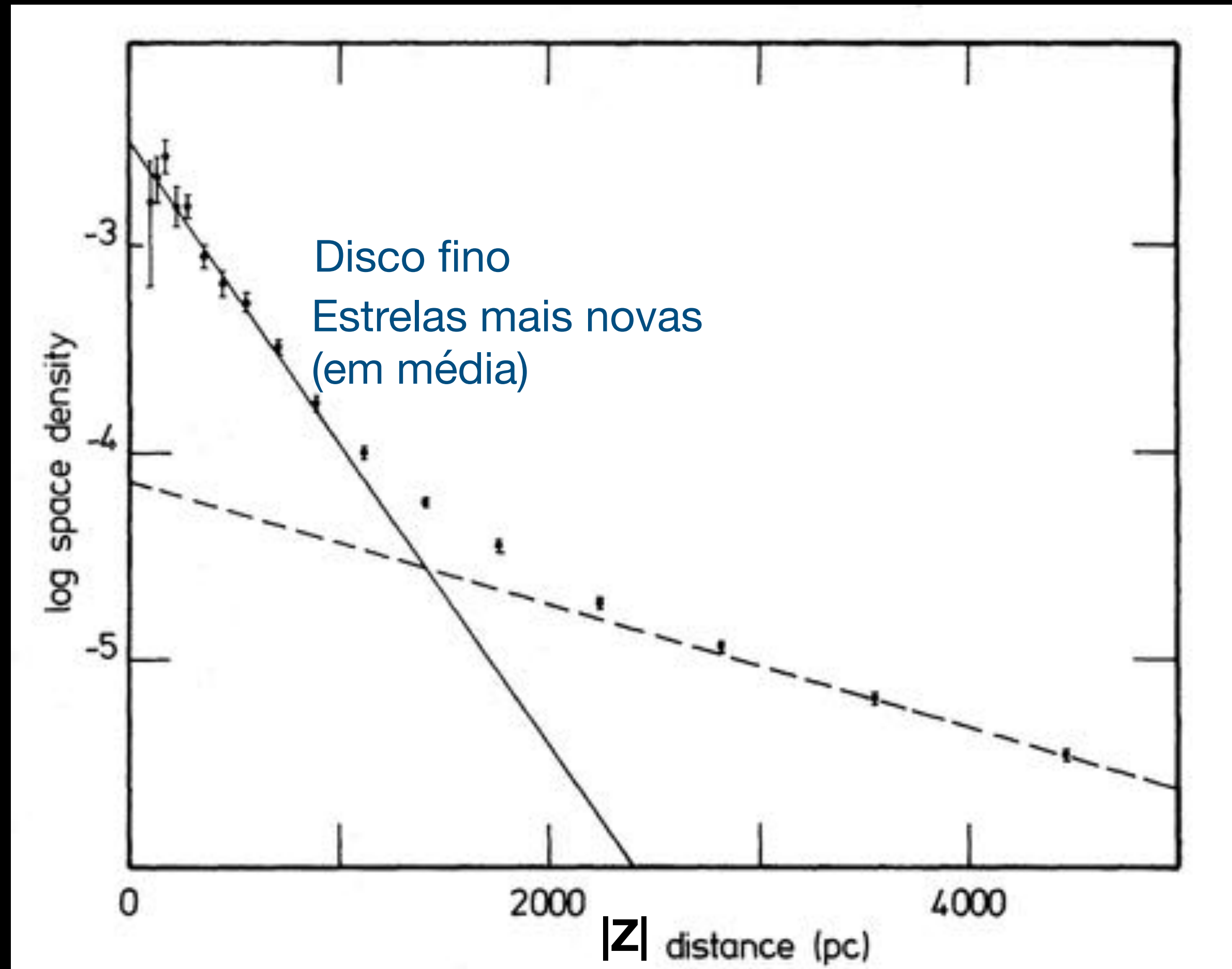


# Disco fino vs disco spesso



Yoshii 1982; Gilmore & Reid 1983

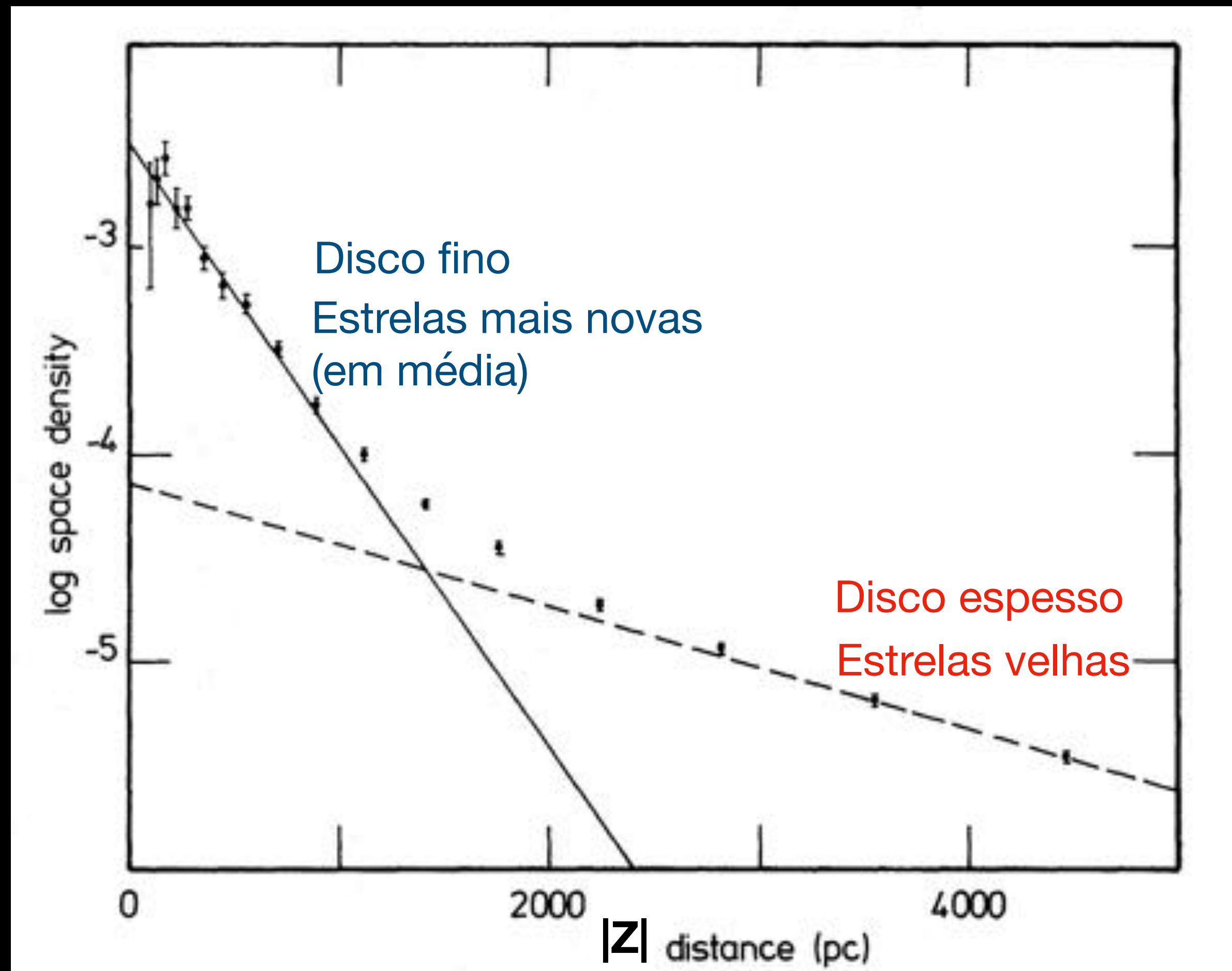
# Disco fino vs disco espesso



Yoshii 1982; Gilmore & Reid 1983



# Disco fino vs disco espesso

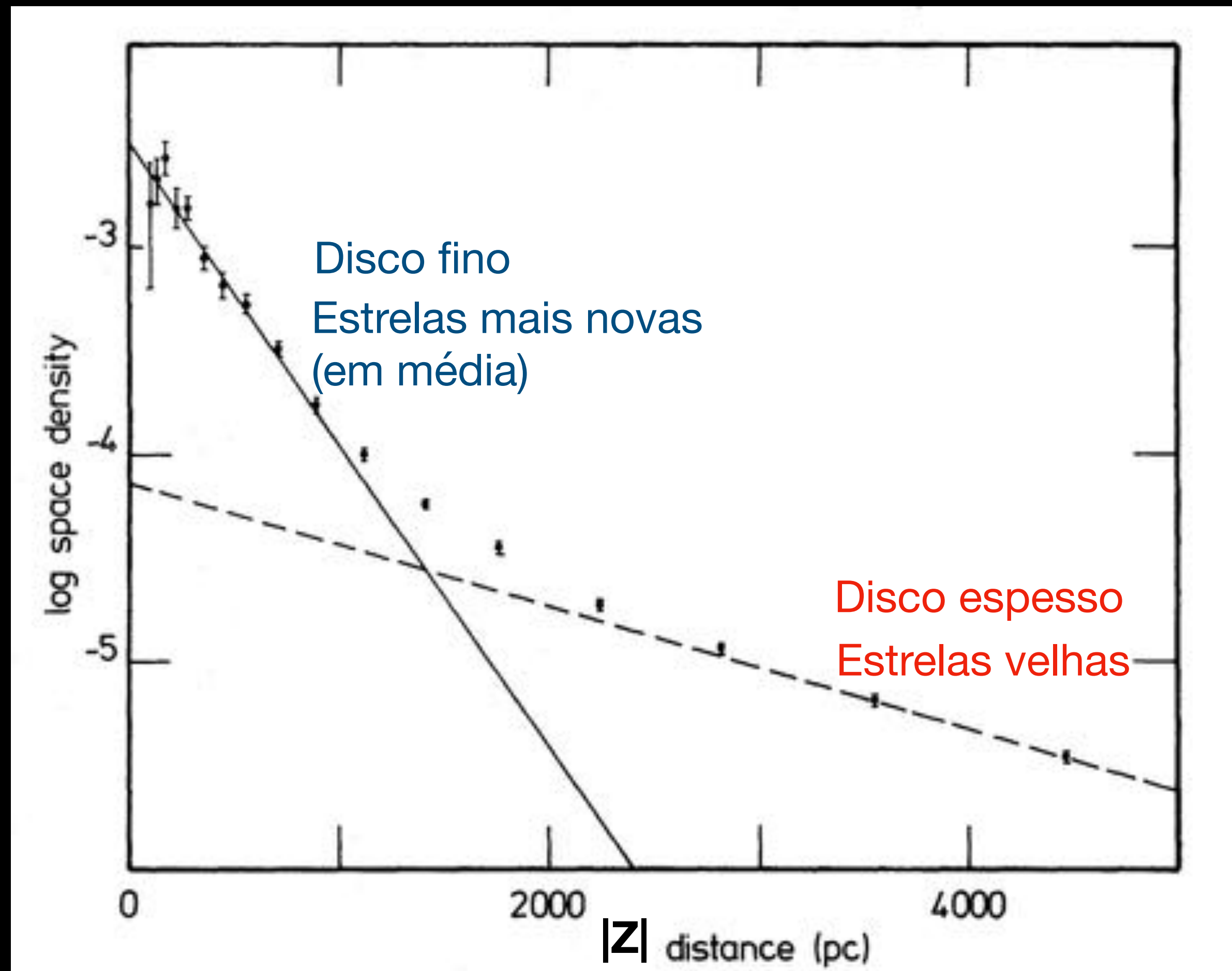


Yoshii 1982; Gilmore & Reid 1983

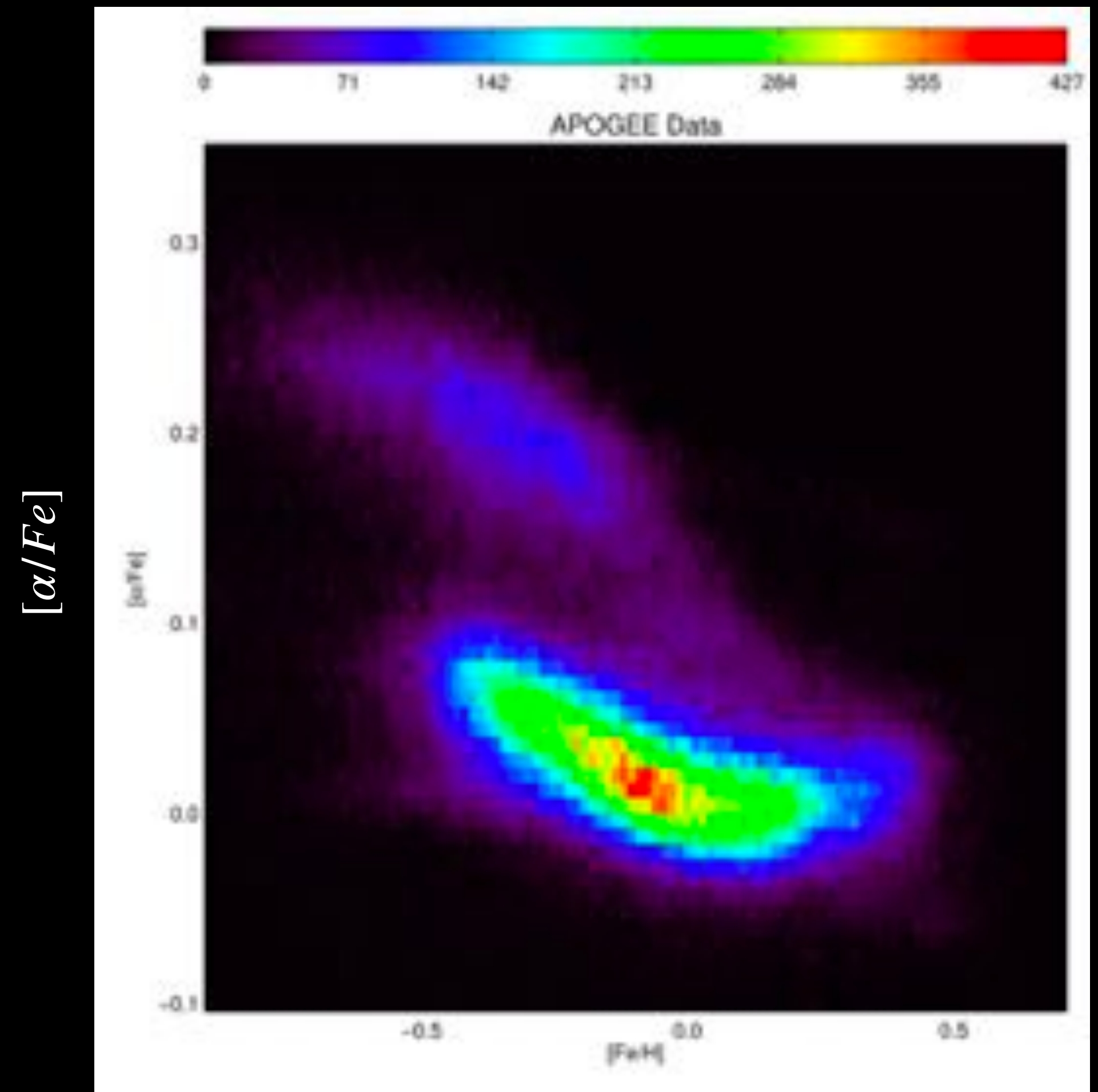
# Disco fino vs disco espesso

Nidever+ 2014

Hayden+ 2015



Yoshii 1982; Gilmore & Reid 1983

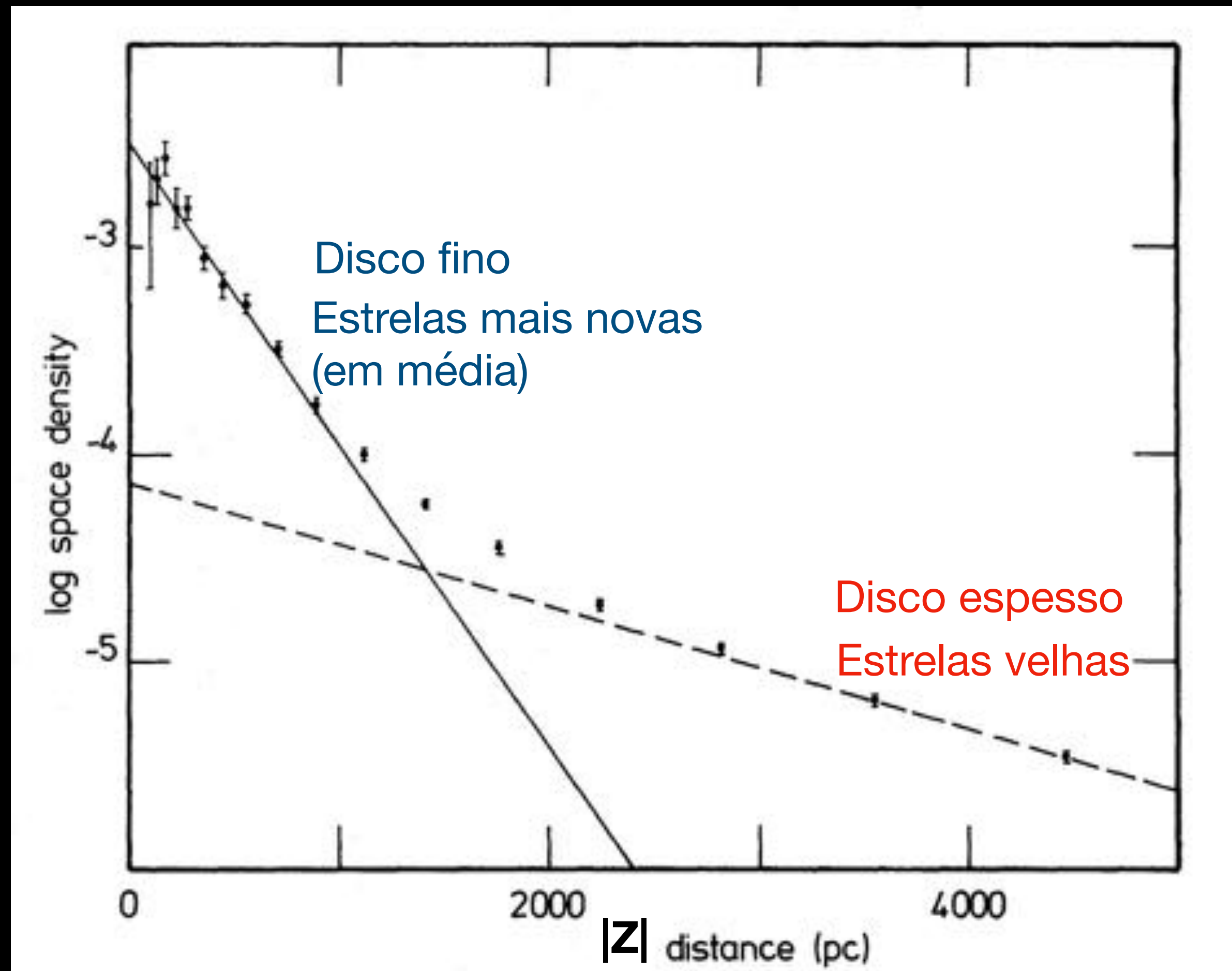


$[Fe/H]$

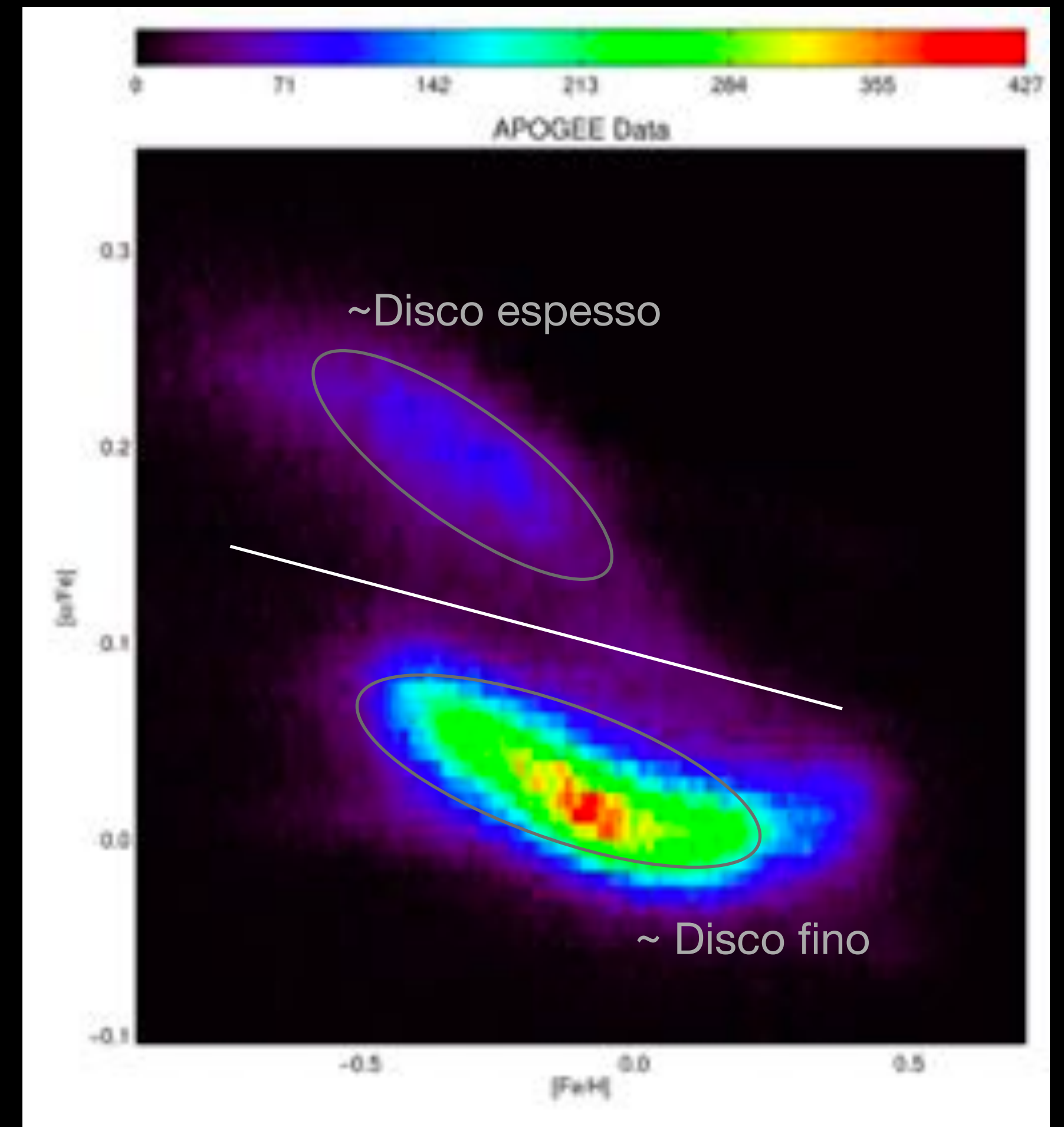
# Disco fino vs disco espesso

Nidever+ 2014

Hayden+ 2015



Yoshii 1982; Gilmore & Reid 1983



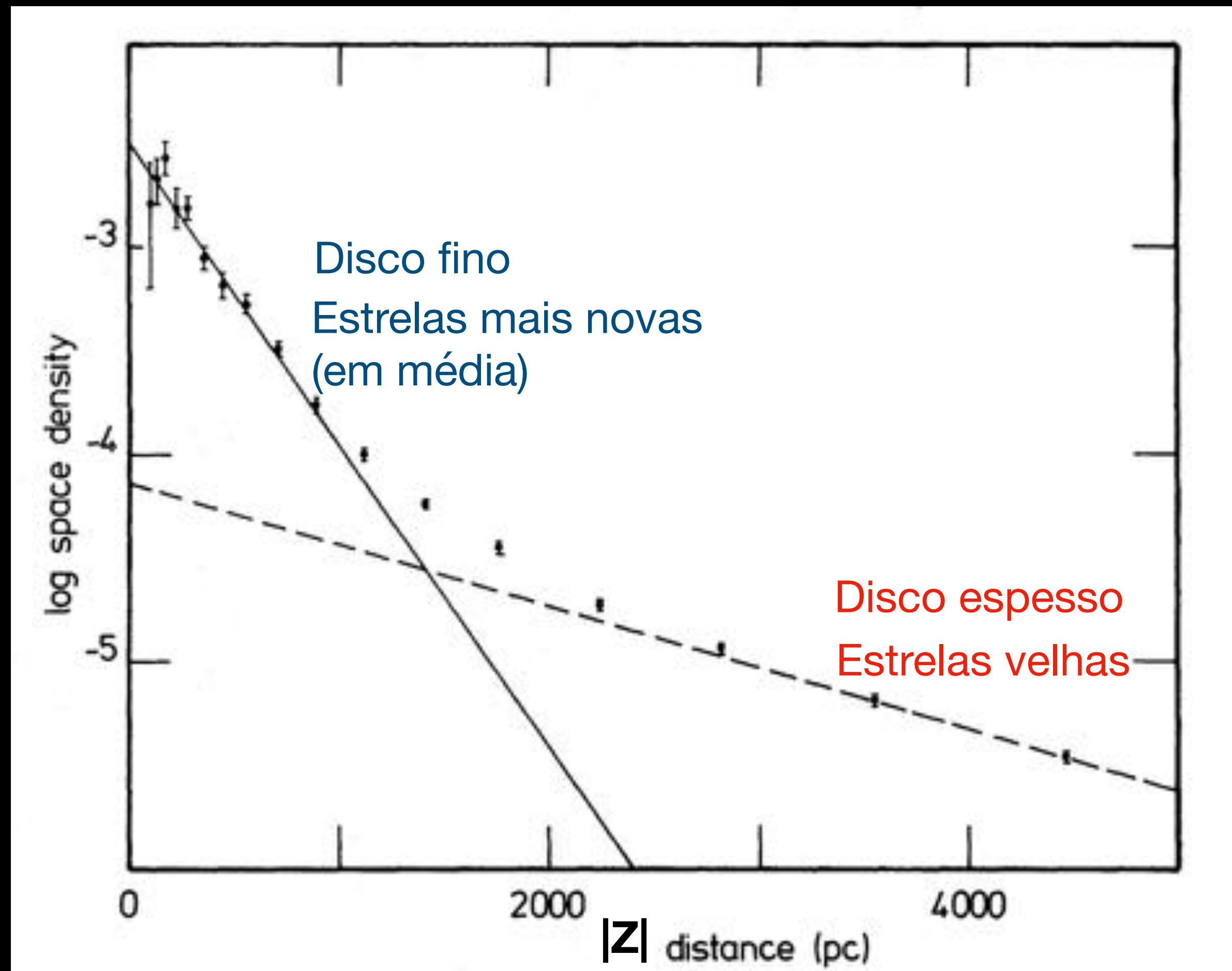
[Fe/H]



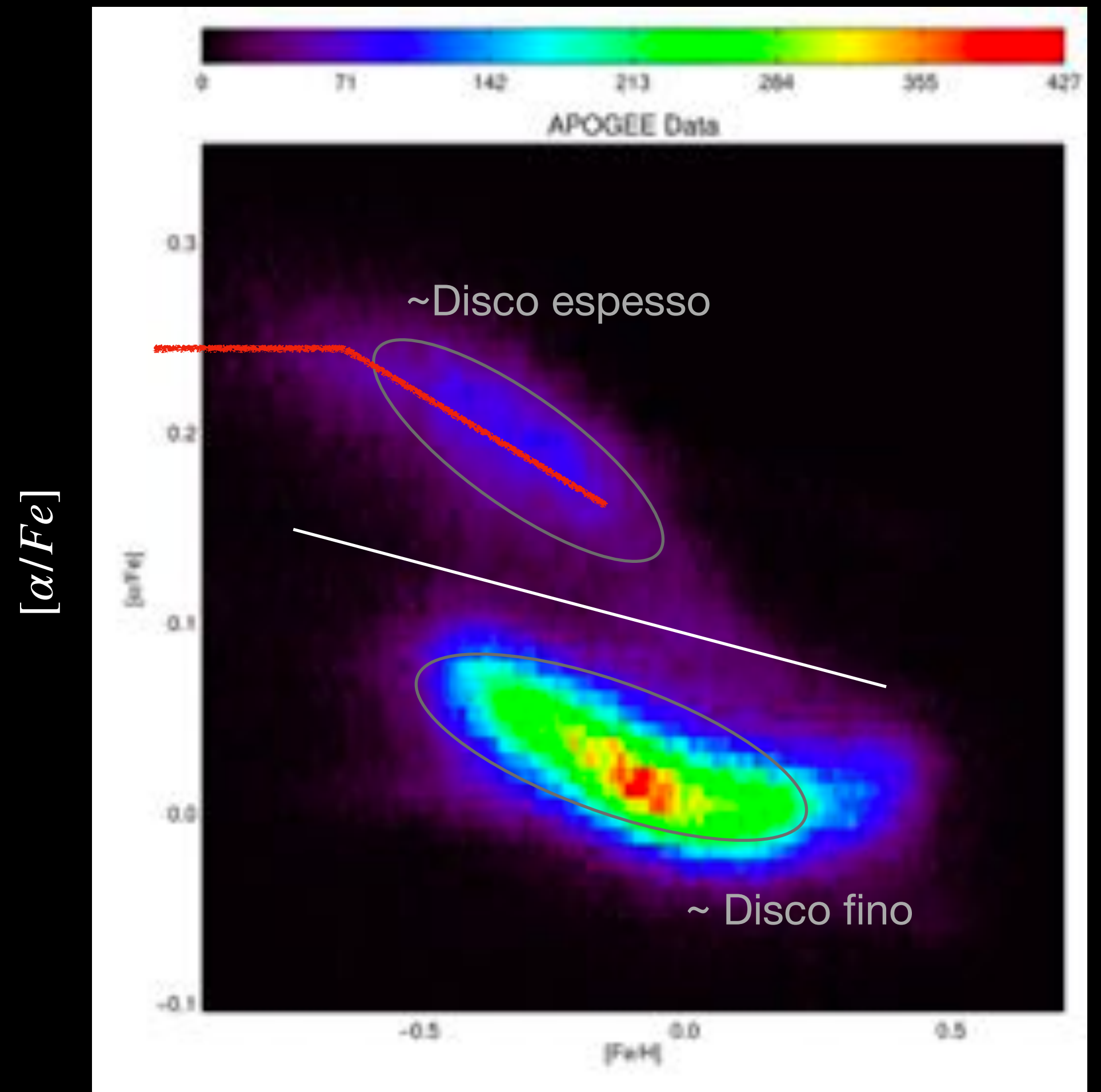
# Disco fino vs disco espesso

Nidever+ 2014

Hayden+ 2015



Yoshii 1982; Gilmore & Reid 1983

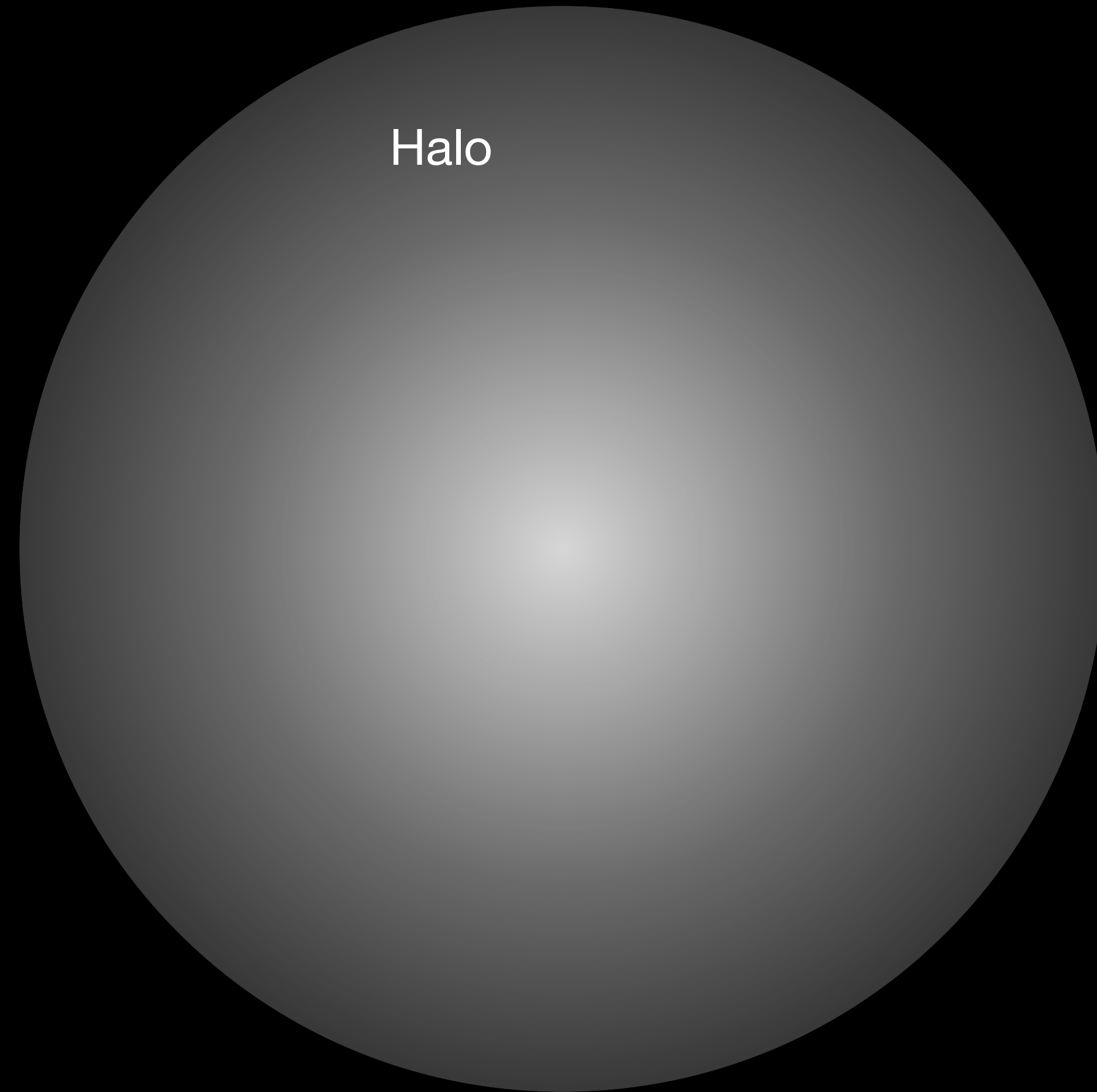


[Fe/H]

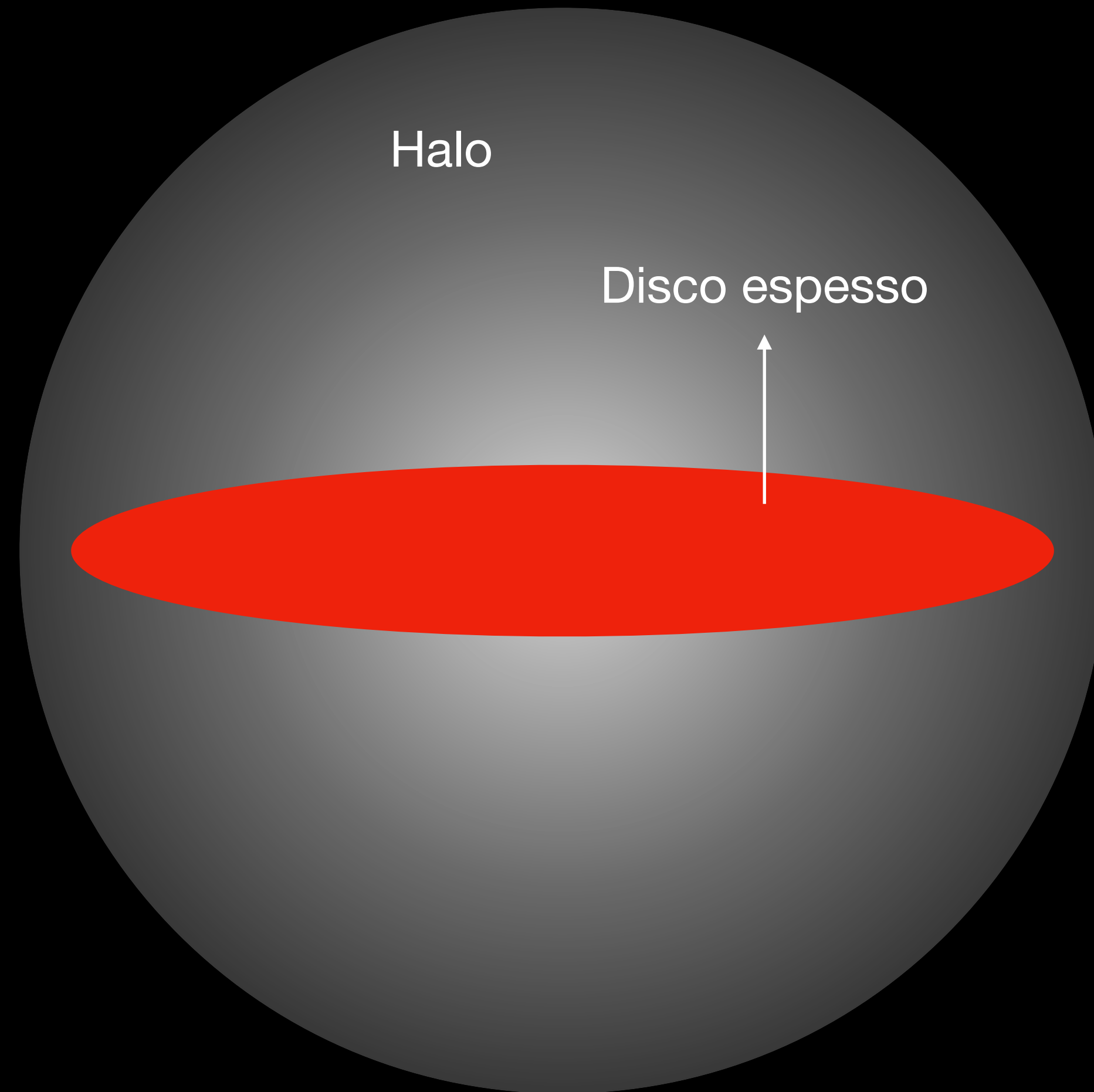


# A estrutura da Via Láctea

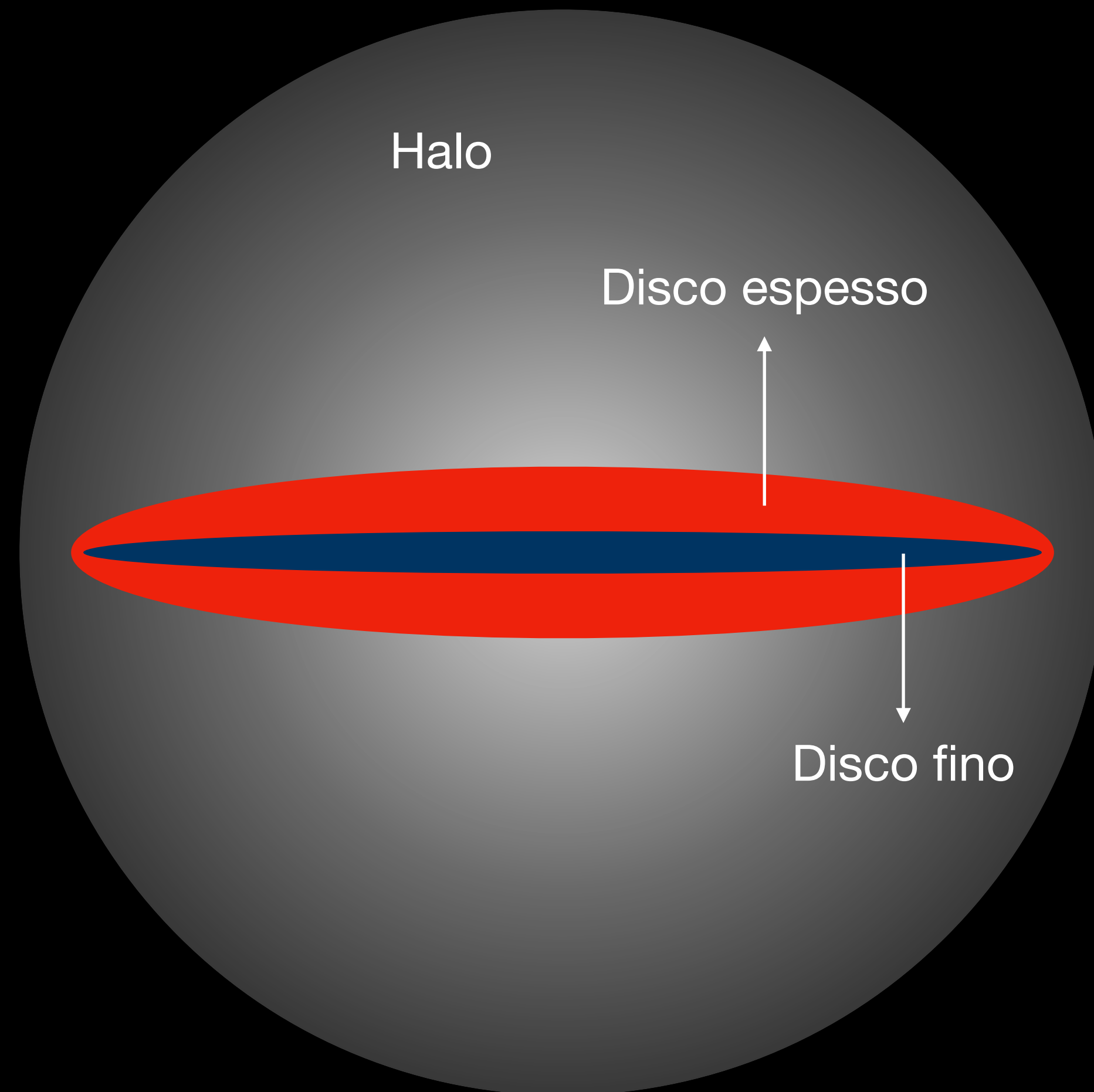
# A estrutura da Via Láctea



# A estrutura da Via Láctea

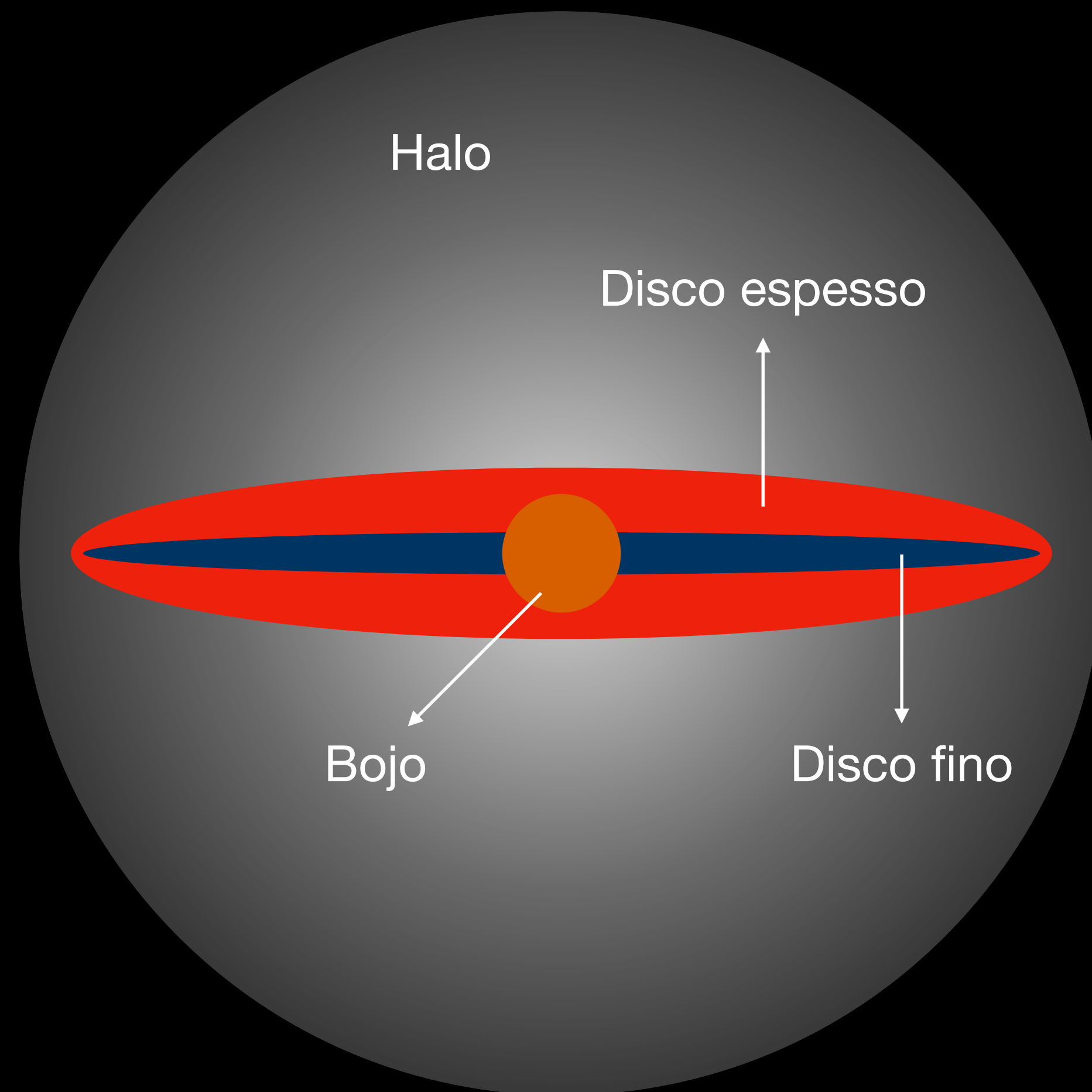


# A estrutura da Via Láctea

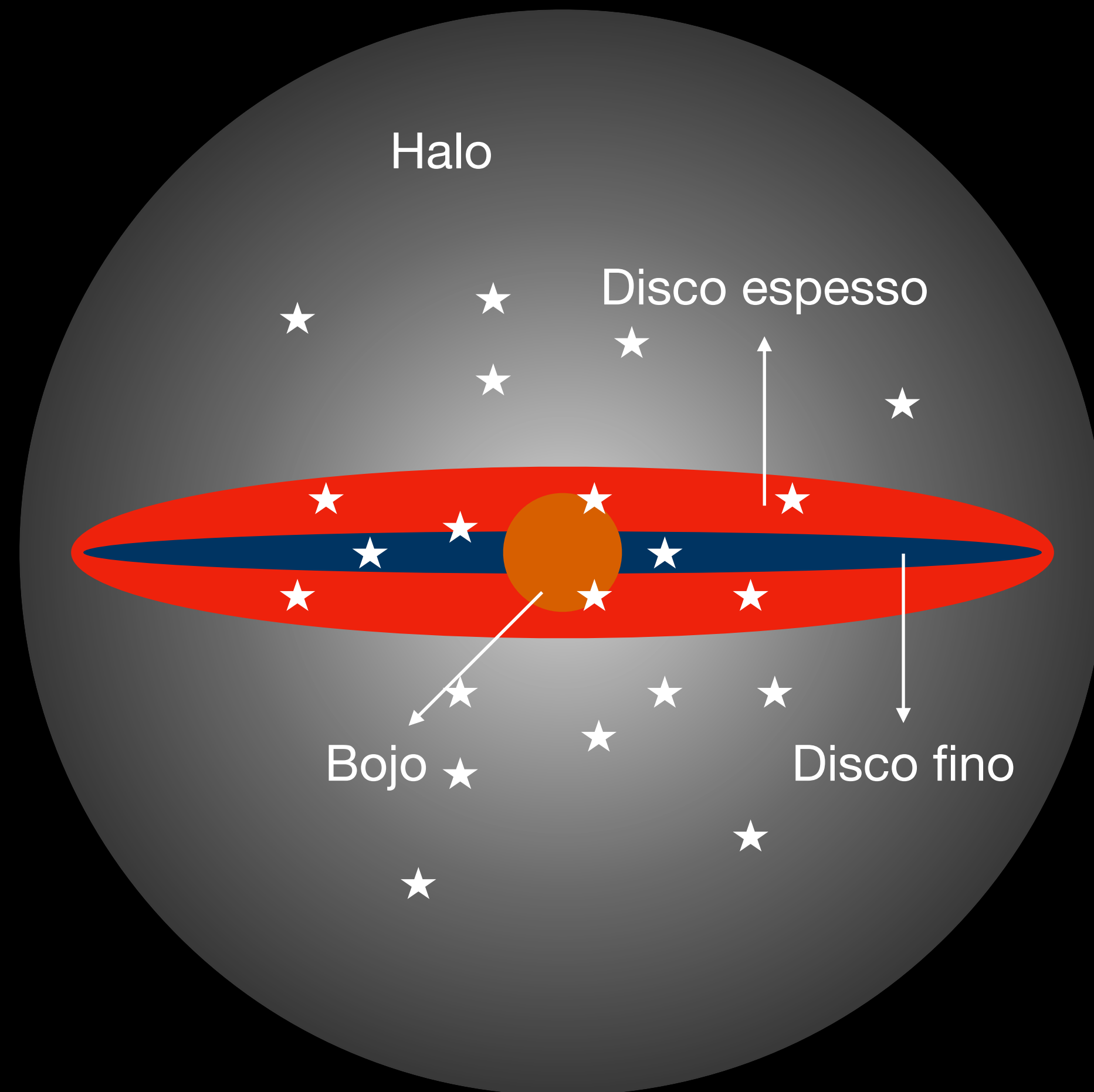




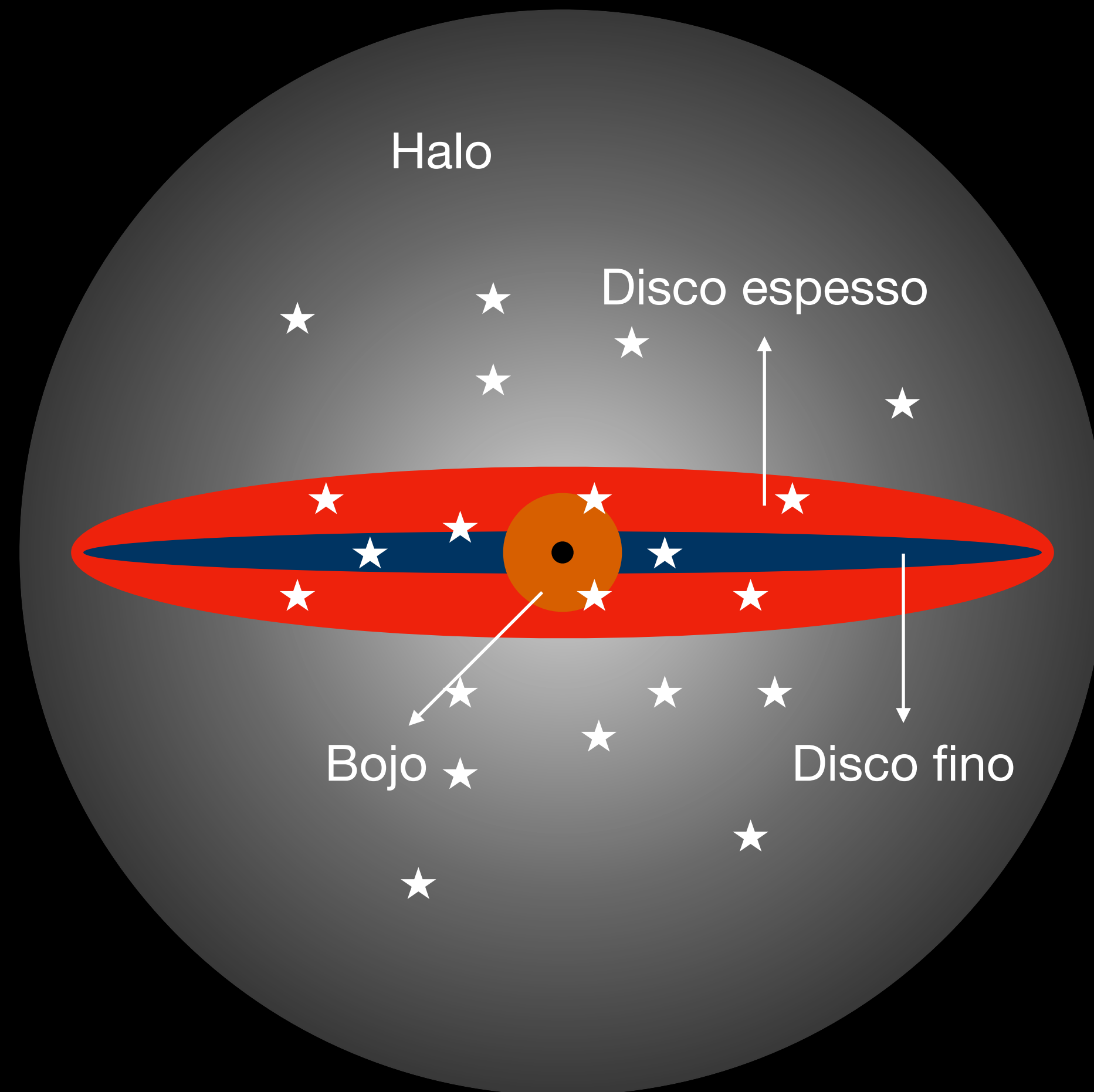
# A estrutura da Via Láctea



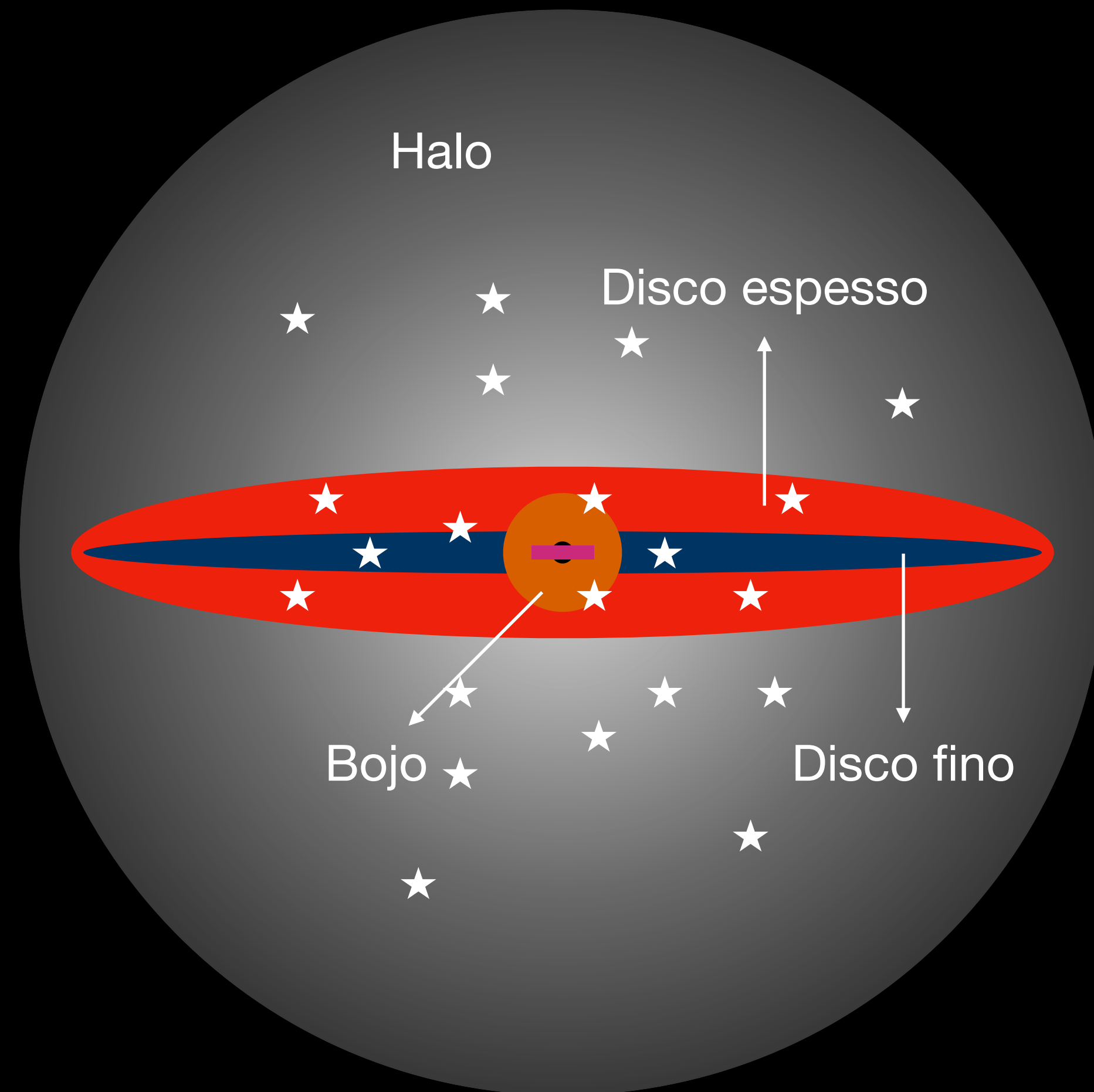
# A estrutura da Via Láctea



# A estrutura da Via Láctea



# A estrutura da Via Láctea







# Edwin Hubble

# Edwin Hubble

- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m

# Edwin Hubble

- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m
- 1923: Hubble identifica Cefeidas em Andromeda



# Edwin Hubble

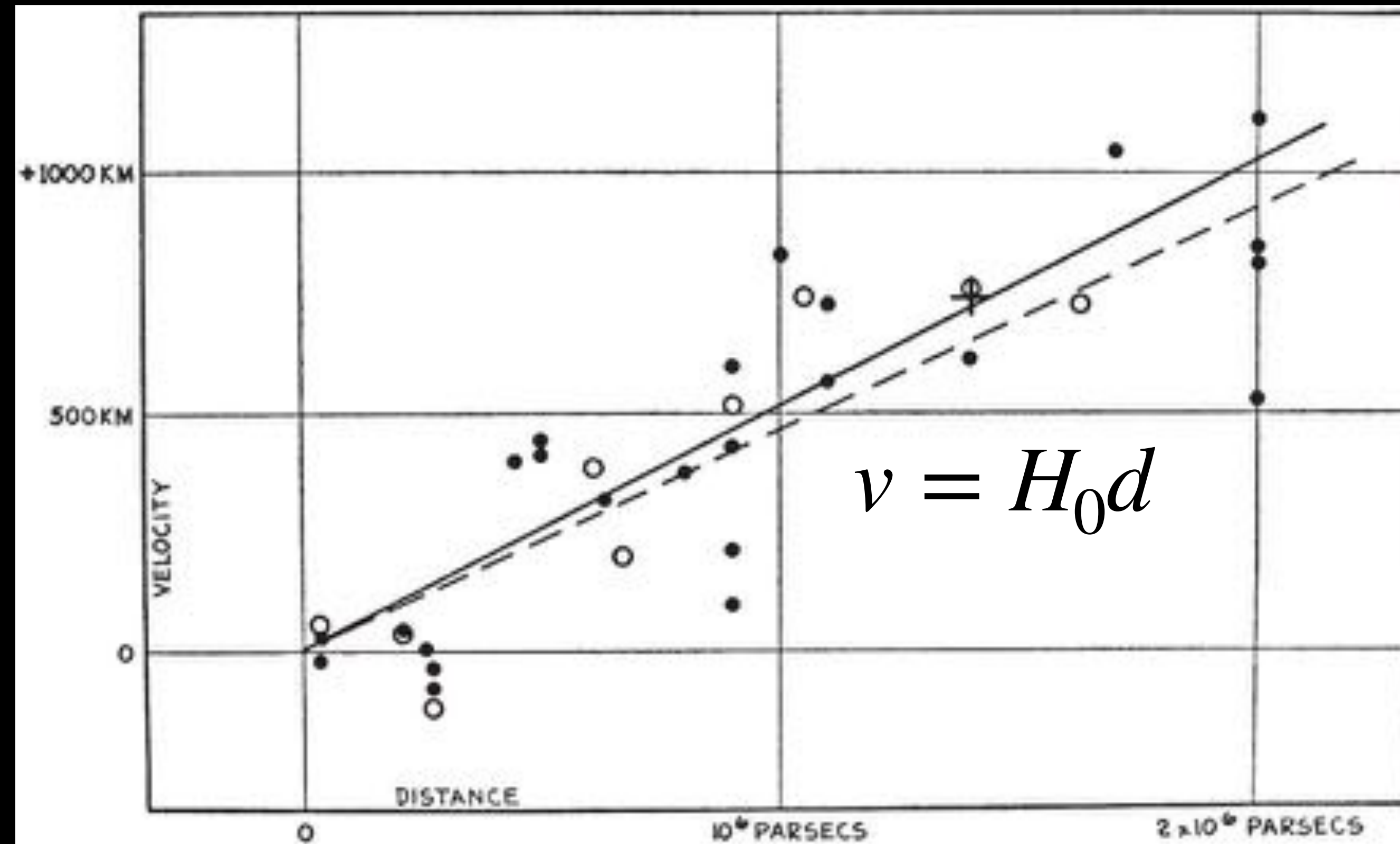
- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m
- 1923: Hubble identifica Cefeidas em Andromeda
- 1926: Diapasão de Hubble

# Edwin Hubble

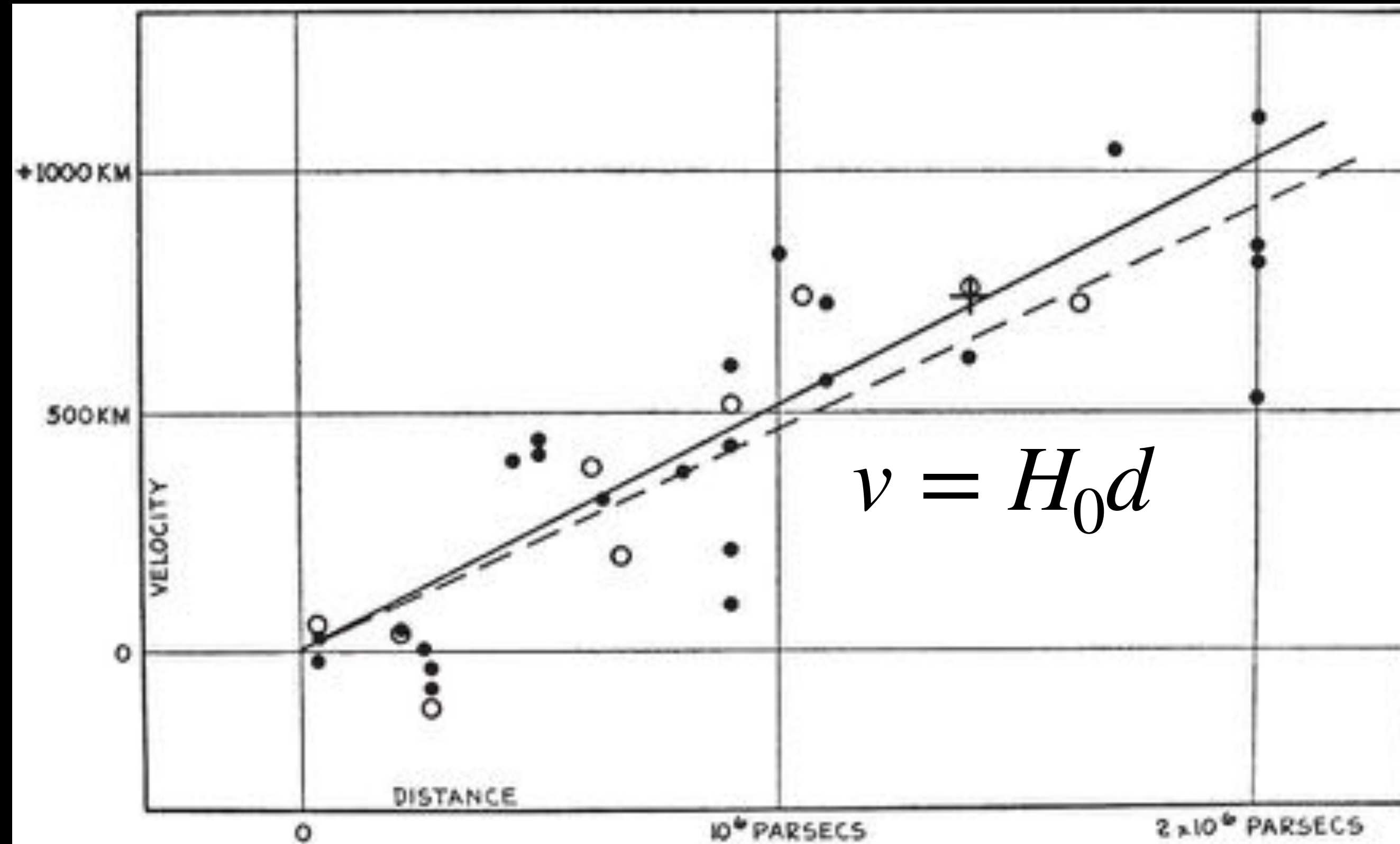
- 1917: telescópio Hooker (Califórnia), 2,5m
- 1923: Hubble identifica Cefeidas em Andromeda
- 1926: Diapasão de Hubble
- 1929: Lei de Hubble



# Lei de Hubble



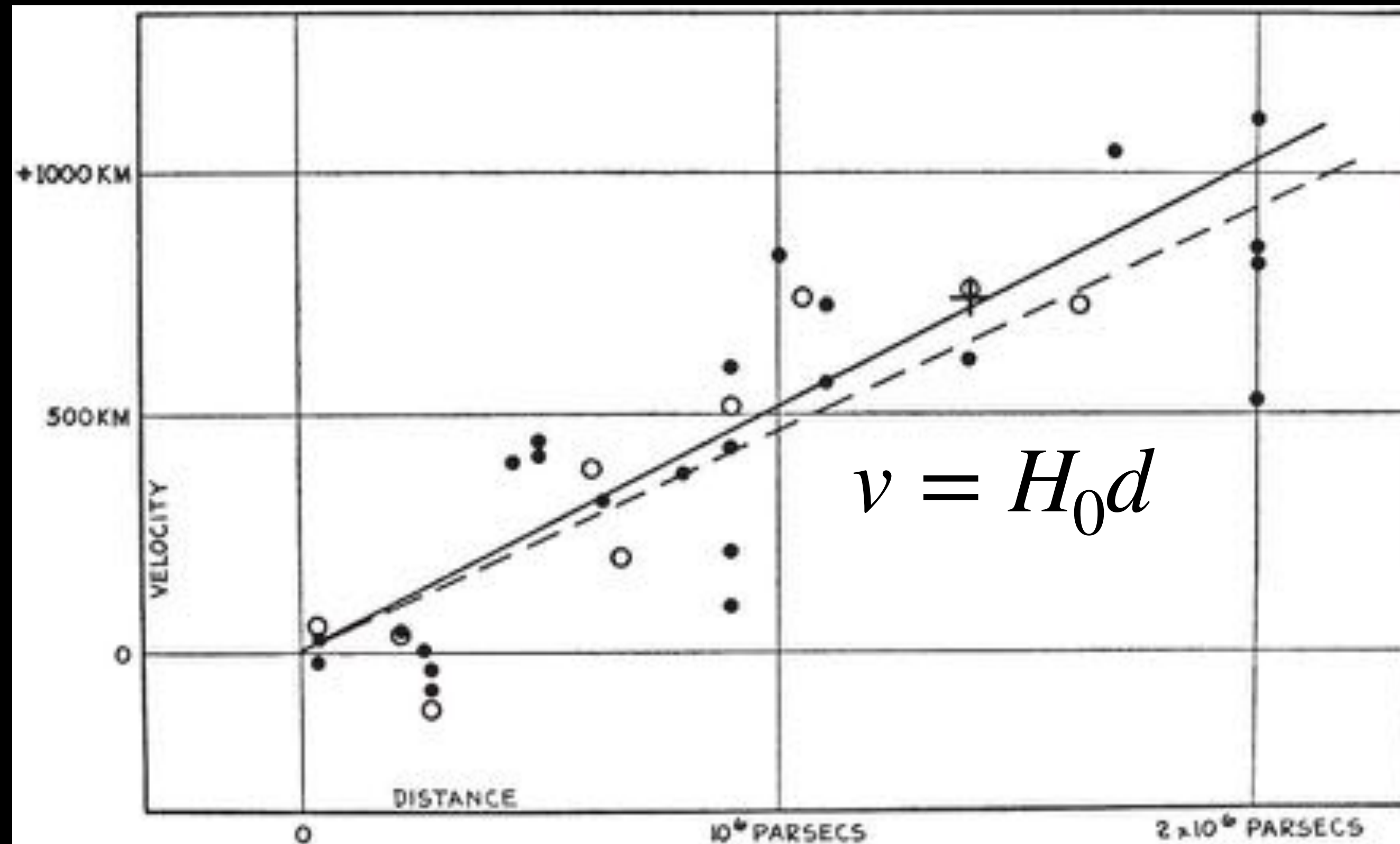
# Lei de Hubble



- Nossa posição é privilegiada (centro)?



# Lei de Hubble



- Nossa posição é privilegiada (centro)?
- Ou o universo está se expandindo!

# Evidências de matéria escura

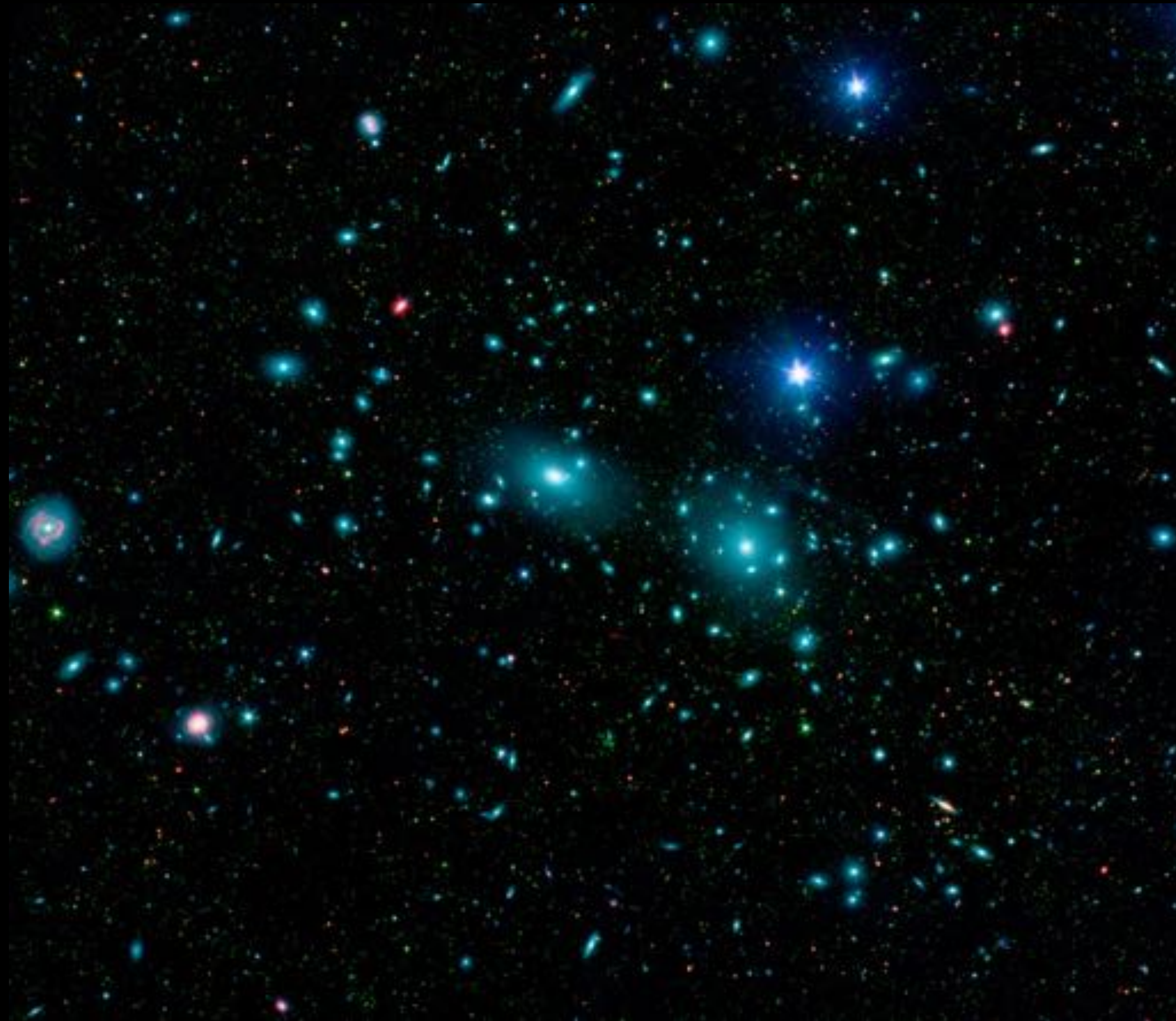
# Aglomerados de galáxias



Aglomerado de galáxias Virgo (Abell 1689)



# Aglomerados de galáxias



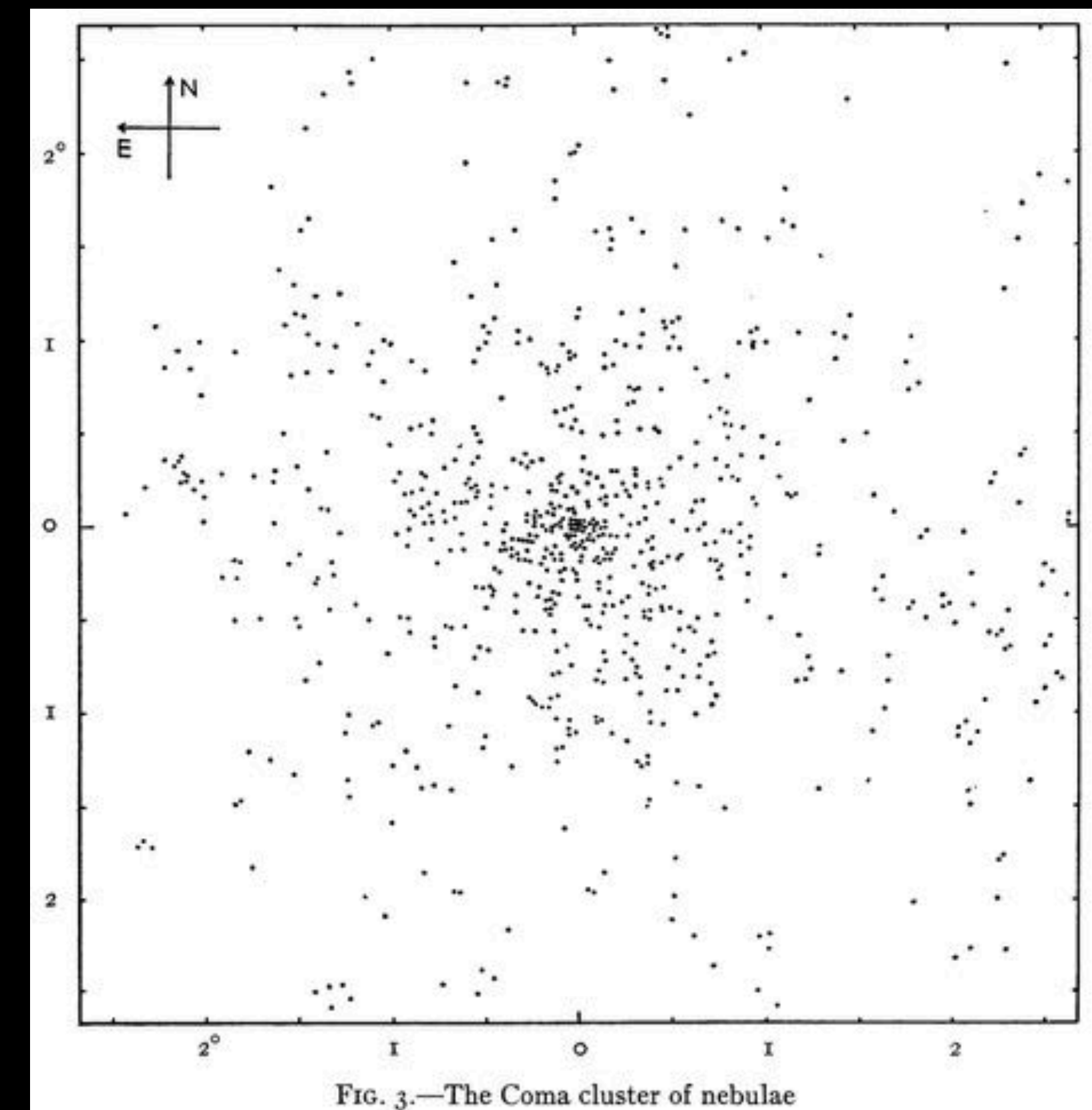
Aglomerado de galáxias Coma (Abell 1656)



# Fritz Zwicky

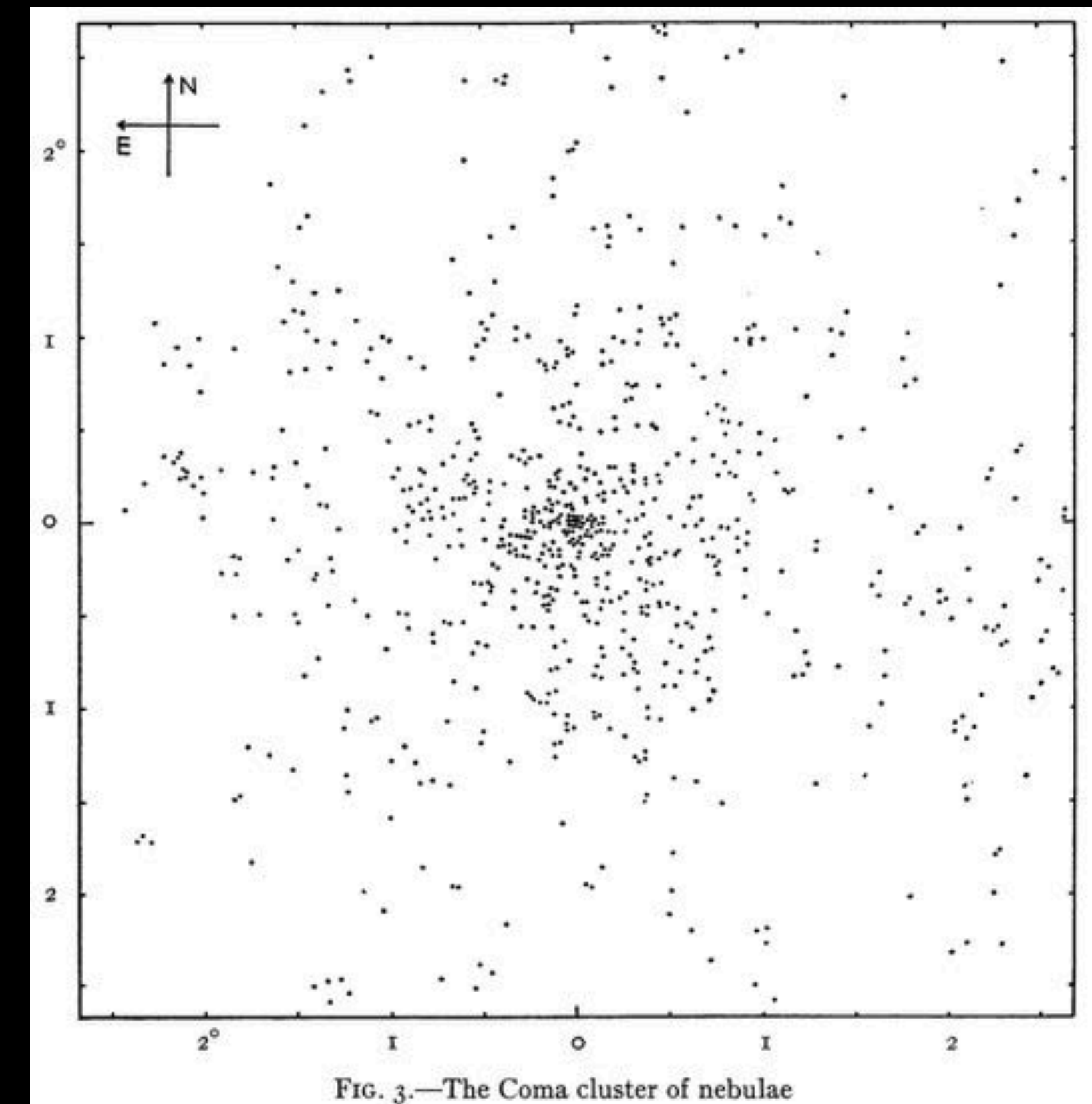


# Matéria escura no aglomerado de Coma



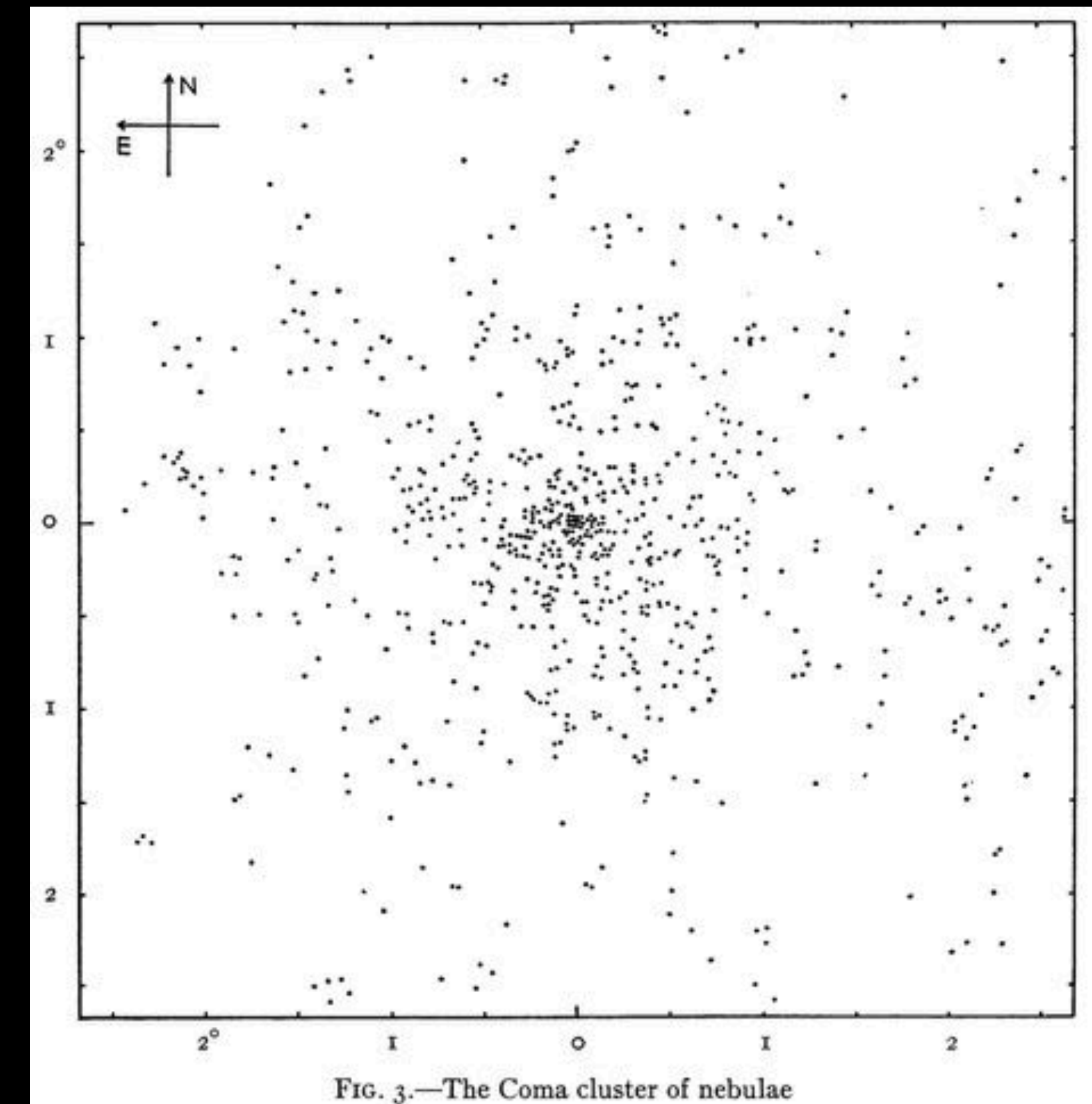
# Matéria escura no aglomerado de Coma

- Aglomerado: galáxias orbitando campo gravitacional comum



# Matéria escura no aglomerado de Coma

- Aglomerado: galáxias orbitando campo gravitacional comum
- Zwicky obteve redshift (vels.) de ~1000 galáxias

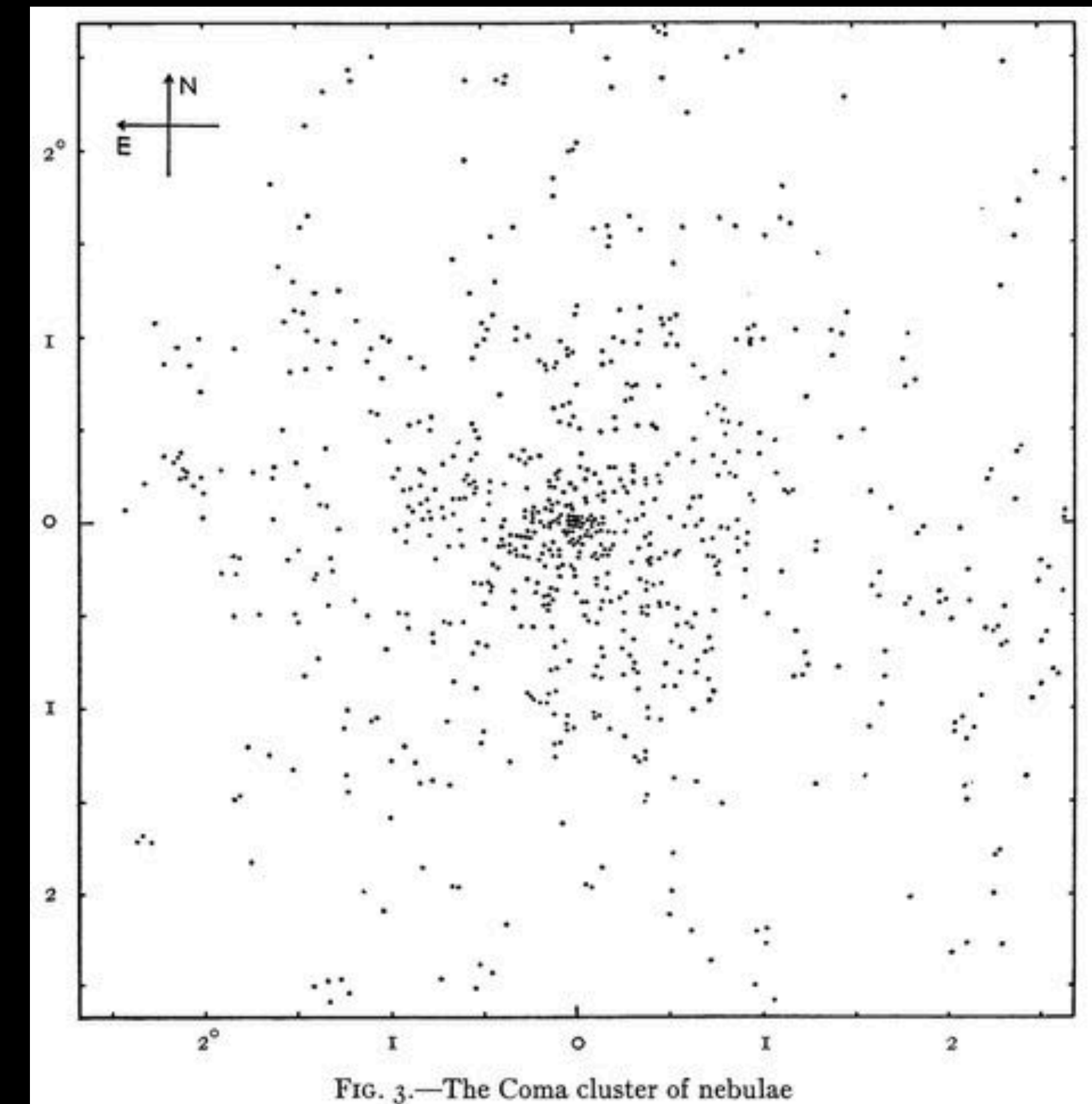




# Matéria escura no aglomerado de Coma

- Aglomerado: galáxias orbitando campo gravitacional comum
- Zwicky obteve redshift (vels.) de ~1000 galáxias

- Em equilíbrio:  $2K = -W \rightarrow 2\frac{1}{2}M\langle v^2 \rangle \approx \frac{GM^2}{R}$

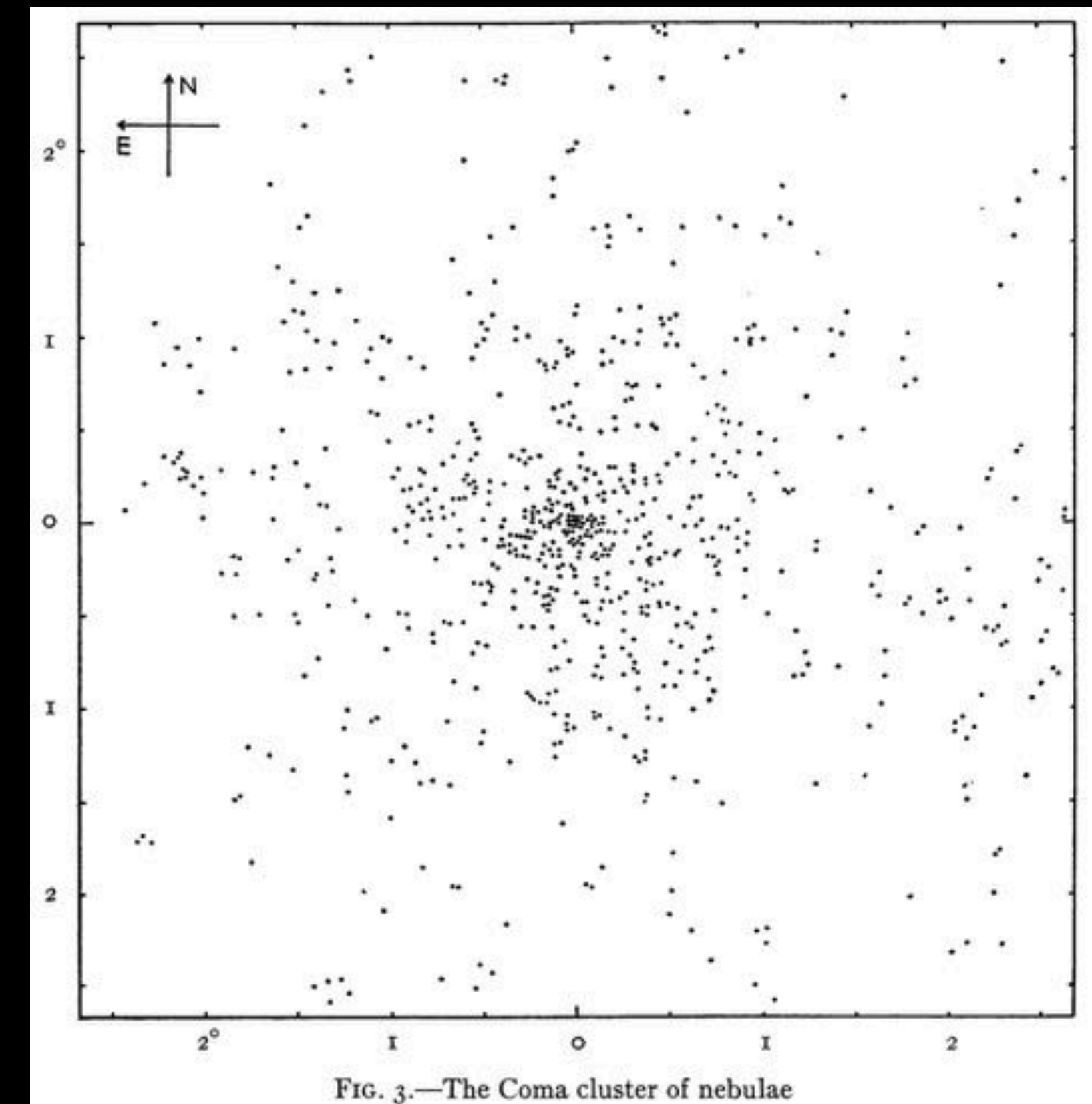


# Matéria escura no aglomerado de Coma

- Aglomerado: galáxias orbitando campo gravitacional comum
- Zwicky obteve redshift (vels.) de ~1000 galáxias

- Em equilíbrio:  $2K = -W \rightarrow 2\frac{1}{2}M\langle v^2 \rangle \approx \frac{GM^2}{R}$

- $\rightarrow M \approx \frac{R\langle v^2 \rangle}{G}$





# Matéria escura no aglomerado de Coma

Combining (33) and (34), we find

$$\mathcal{M} > 9 \times 10^{46} \text{gr} . \quad (35)$$

The Coma cluster contains about one thousand nebulae. The average mass of one of these nebulae is therefore

$$\overline{M} > 9 \times 10^{43} \text{gr} = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot} . \quad (36)$$

Inasmuch as we have introduced at every step of our argument inequalities which tend to depress the final value of the mass  $\mathcal{M}$ , the foregoing value (36) should be considered as the lowest estimate for the average mass of nebulae in the Coma cluster. This result is somewhat unexpected, in view of the fact that the luminosity of an average nebula is equal to that of about  $8.5 \times 10^7$  suns. According to (36), the conversion factor  $\gamma$  from luminosity to mass for nebulae in the Coma cluster would be of the order

$$\gamma = 500 , \quad (37)$$

as compared with about  $\gamma' = 3$  for the local Kapteyn stellar system. This discrepancy is so great that a further analysis of the problem is in order. Parts of the following discussion were published several years ago, when the conclusion expressed in (36) was reached for the first time.<sup>5</sup>

# Curvas de rotação



# Curvas de rotação

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Densidade constante:  $M(r) = \rho_0 4\pi r^3 / 3$

# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Densidade constante:  $M(r) = \rho_0 4\pi r^3 / 3 \rightarrow v_c(r) \propto r$

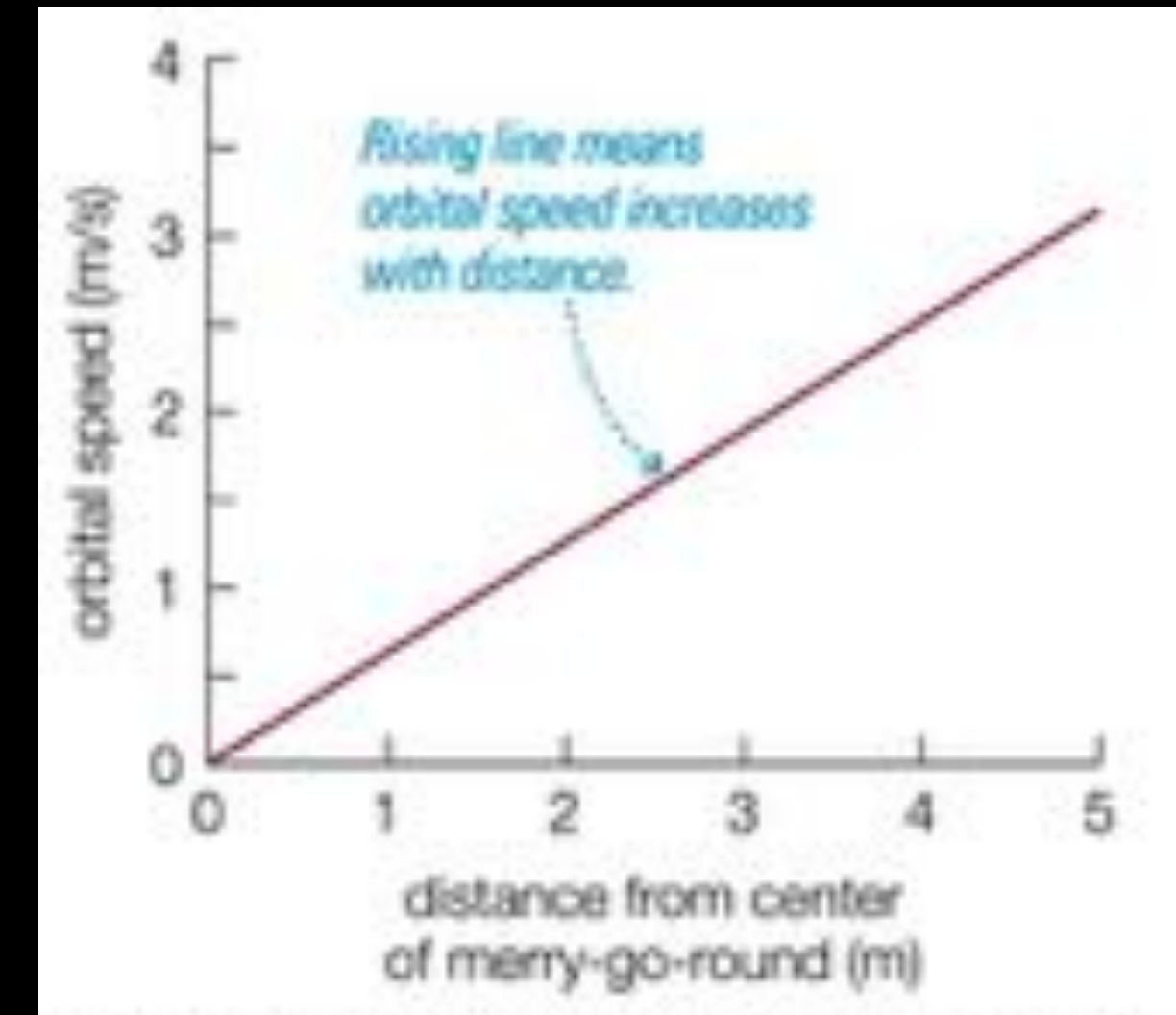


# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Densidade constante:  $M(r) = \rho_0 4\pi r^3 / 3 \rightarrow v_c(r) \propto r$

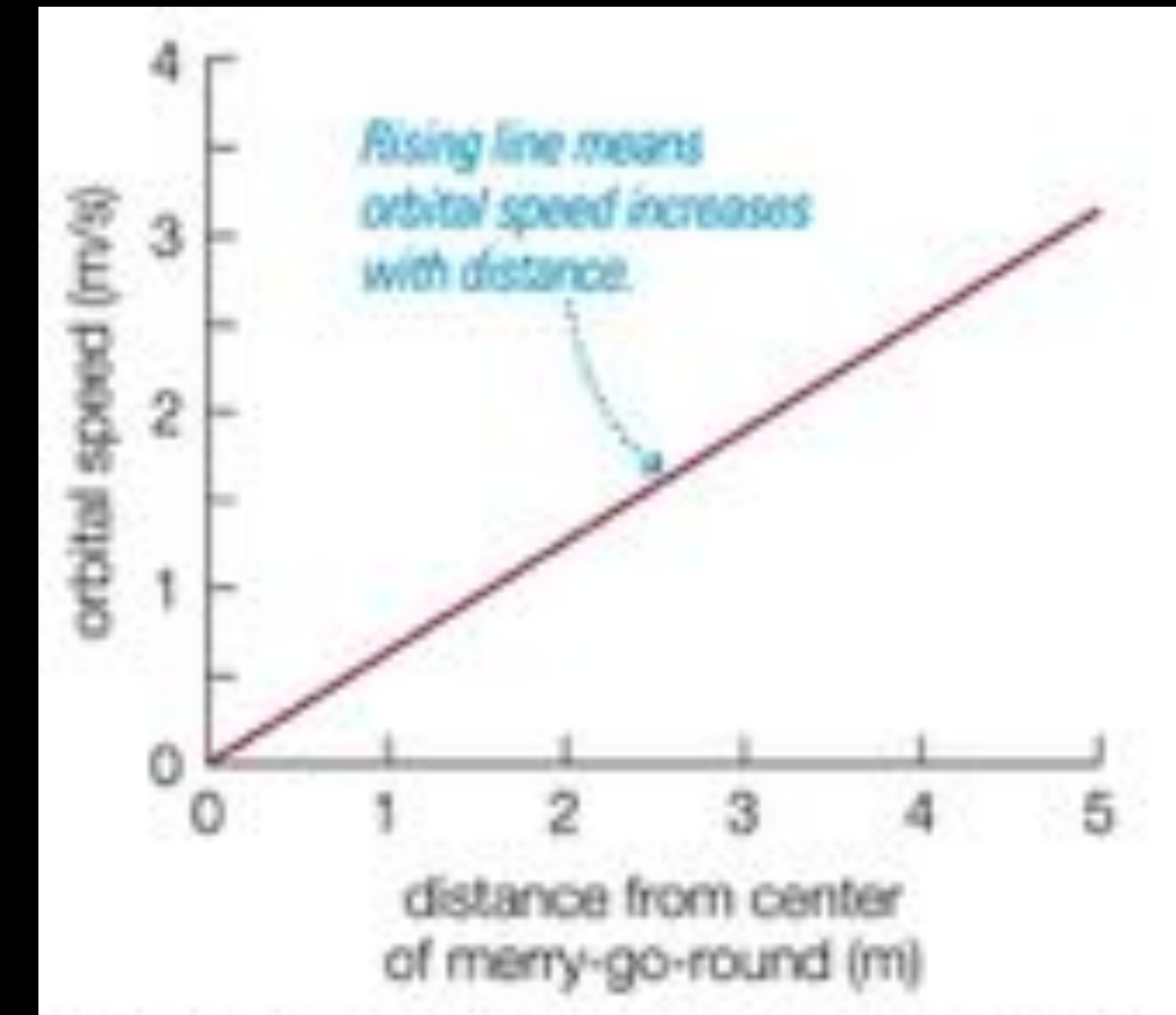


# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Densidade constante:  $M(r) = \rho_0 4\pi r^3 / 3 \rightarrow v_c(r) \propto r$



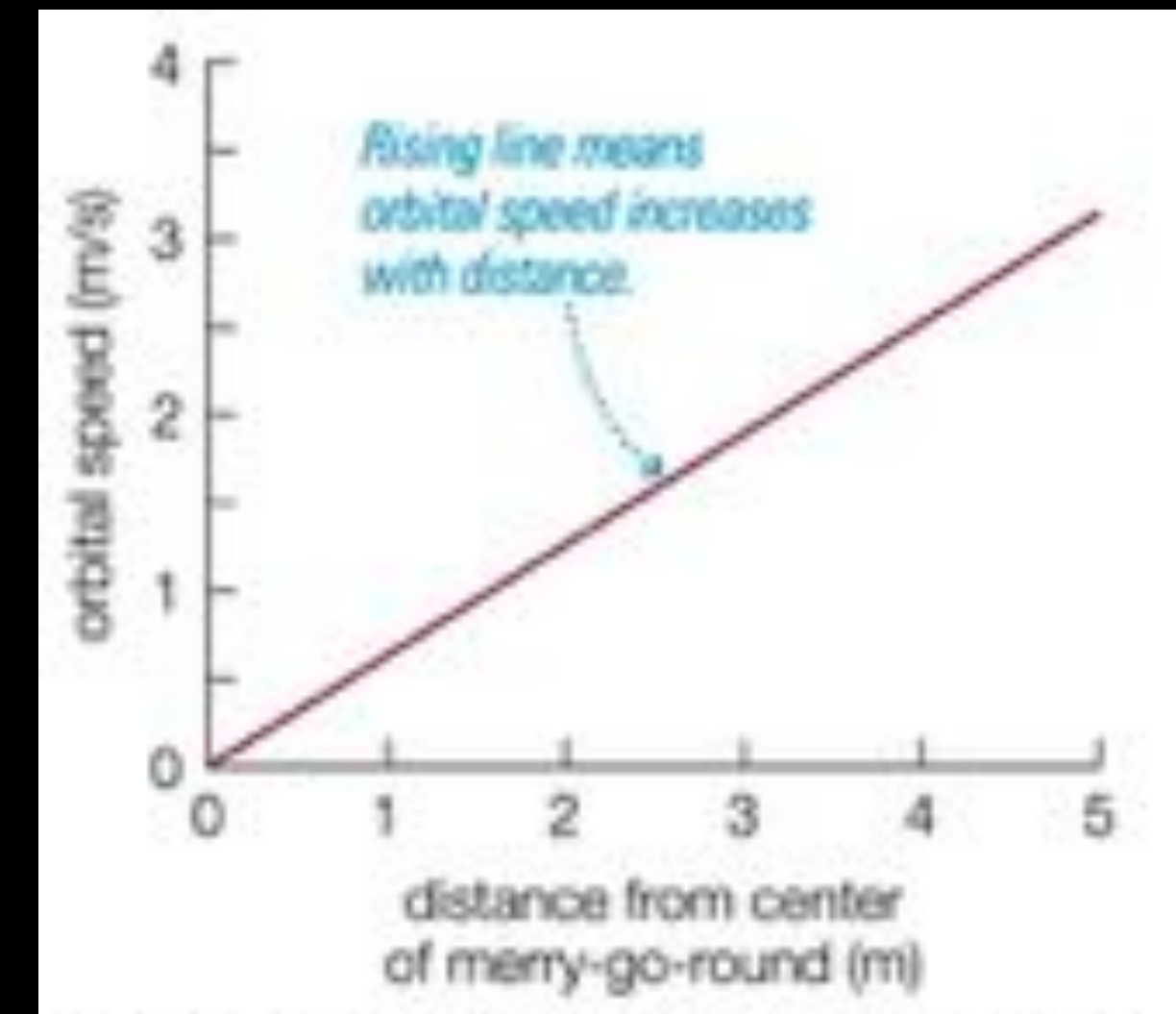
Massa central:  $M(r) = M_0$

# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Densidade constante:  $M(r) = \rho_0 4\pi r^3 / 3 \rightarrow v_c(r) \propto r$



Massa central:  $M(r) = M_0 \rightarrow v_c(r) \propto r^{-1/2}$

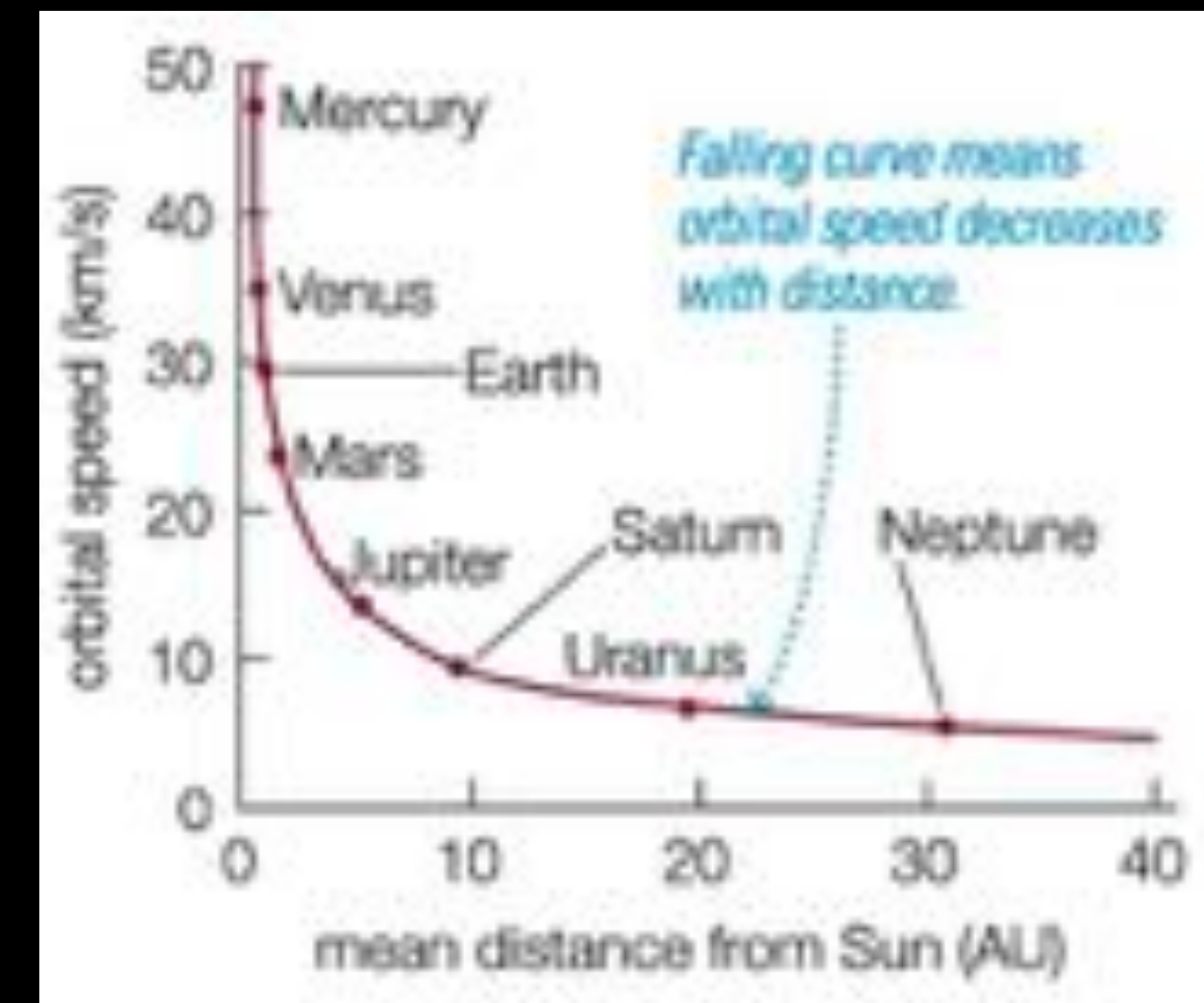
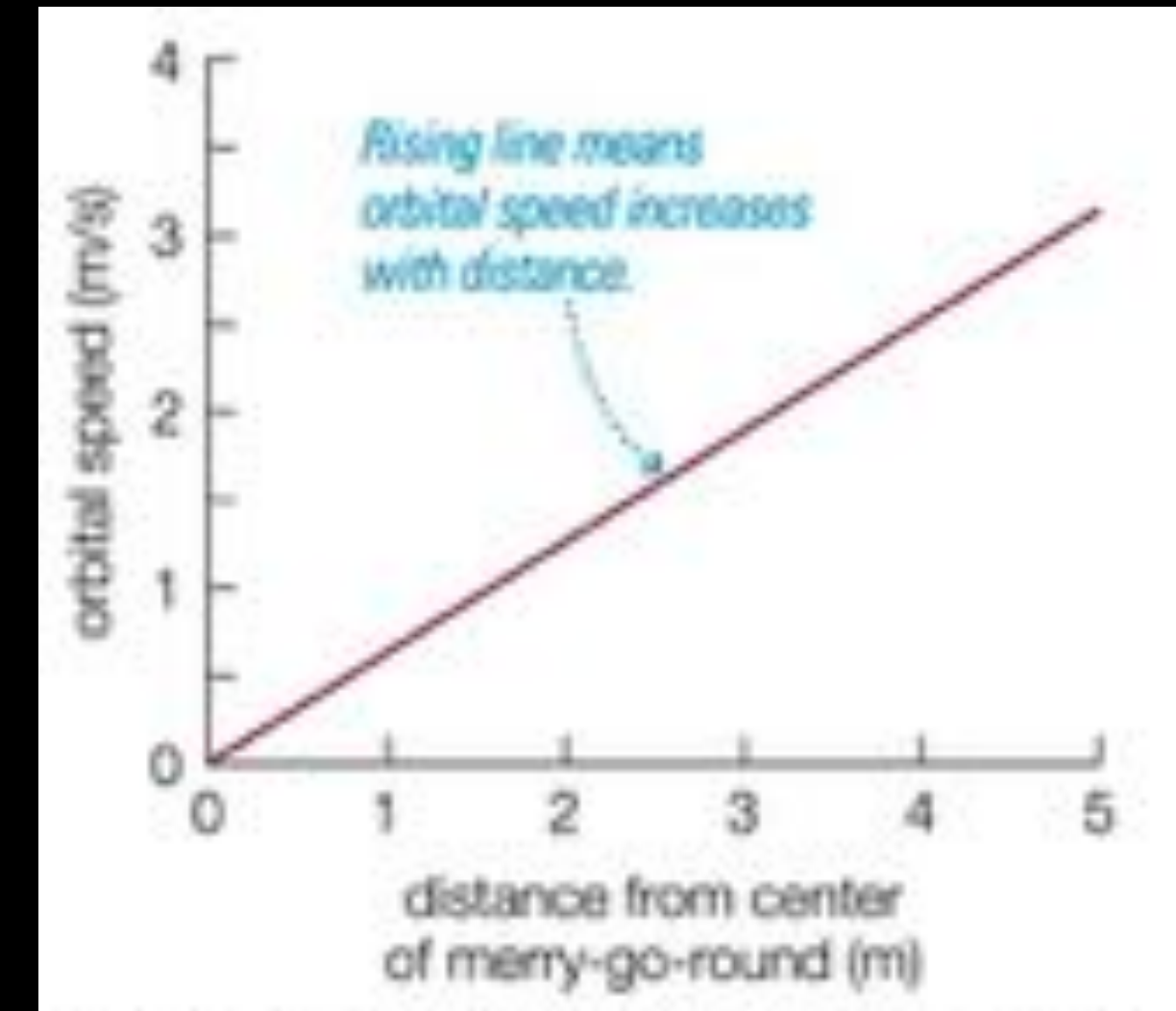
# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

Densidade constante:  $M(r) = \rho_0 4\pi r^3 / 3 \rightarrow v_c(r) \propto r$

Massa central:  $M(r) = M_0 \rightarrow v_c(r) \propto r^{-1/2}$





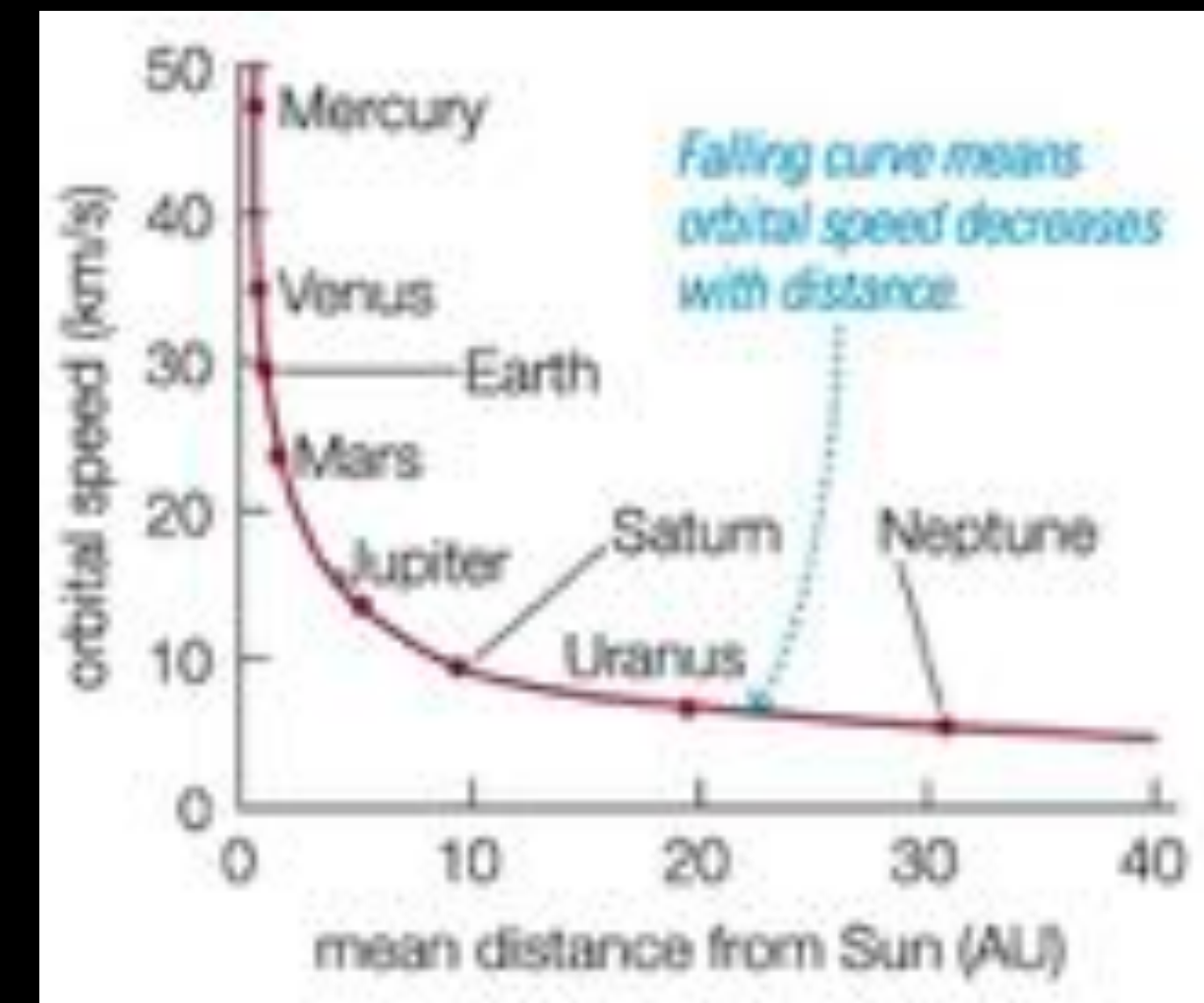
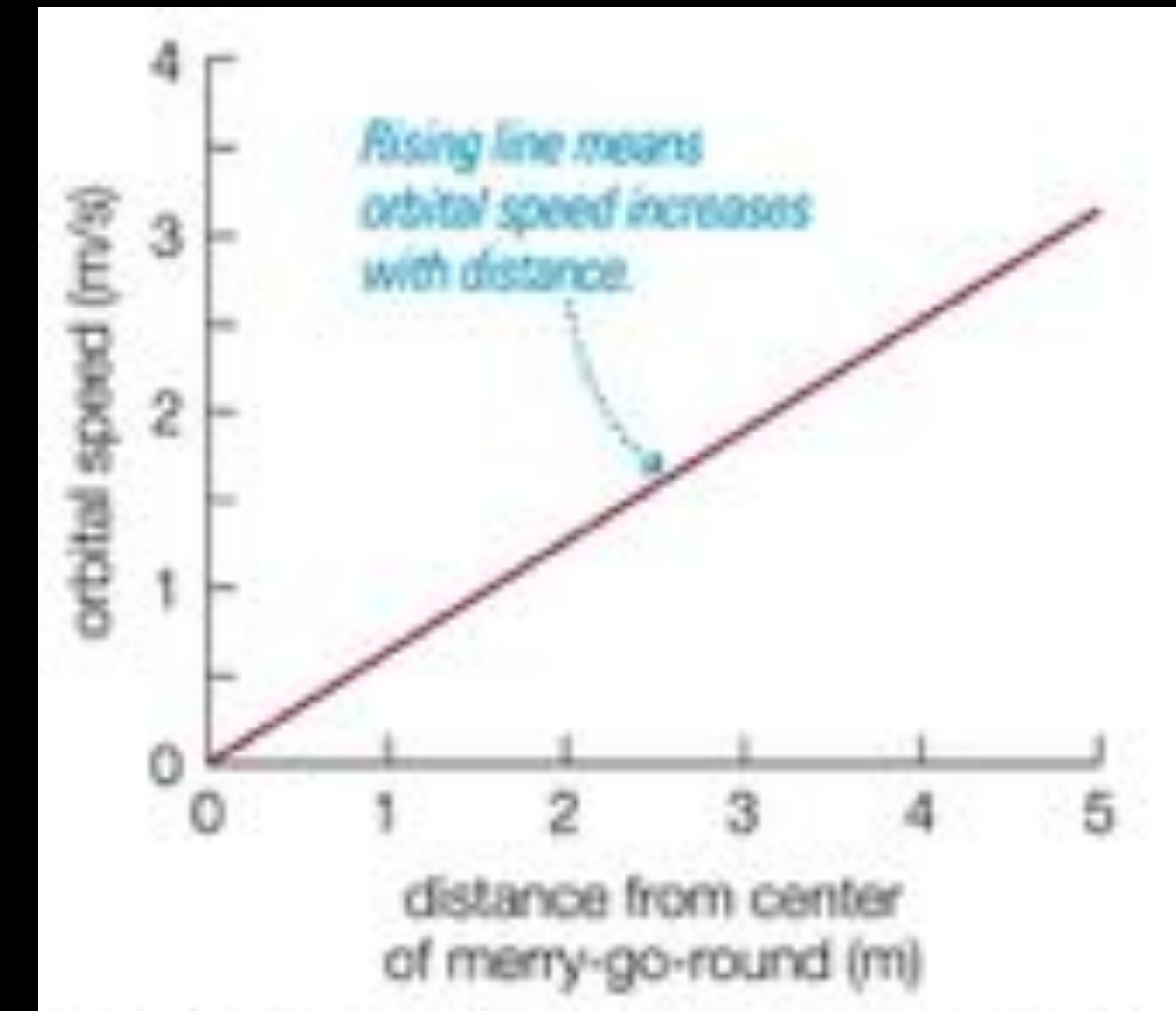
# Curvas de rotação

$$\Omega(r) = v_c(r)/r$$

$$m \frac{v_c^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2} \rightarrow v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

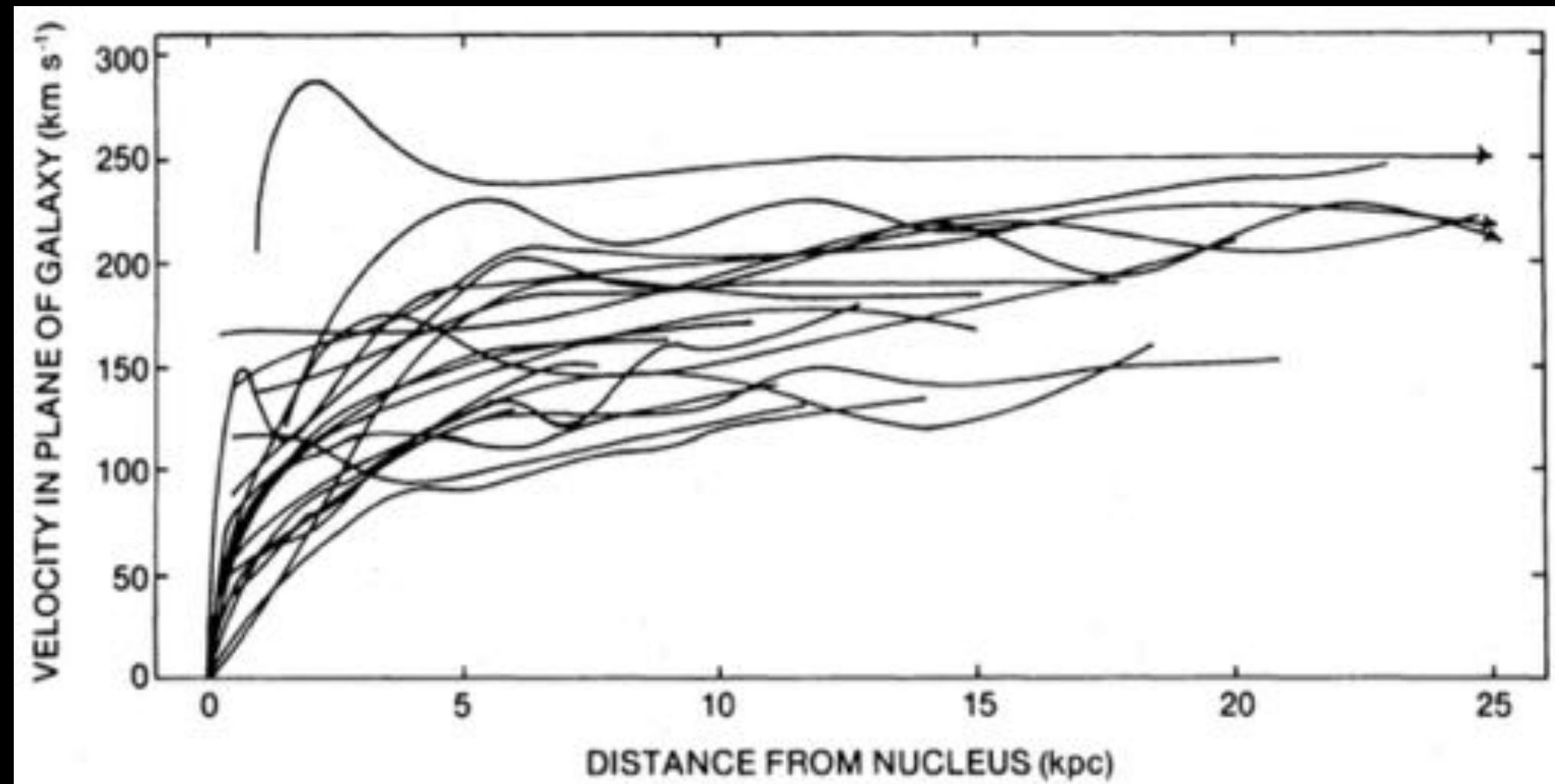
Densidade constante:  $M(r) = \rho_0 4\pi r^3 / 3 \rightarrow v_c(r) \propto r$

Massa central:  $M(r) = M_0 \rightarrow v_c(r) \propto r^{-1/2}$



Galáxias espirais?

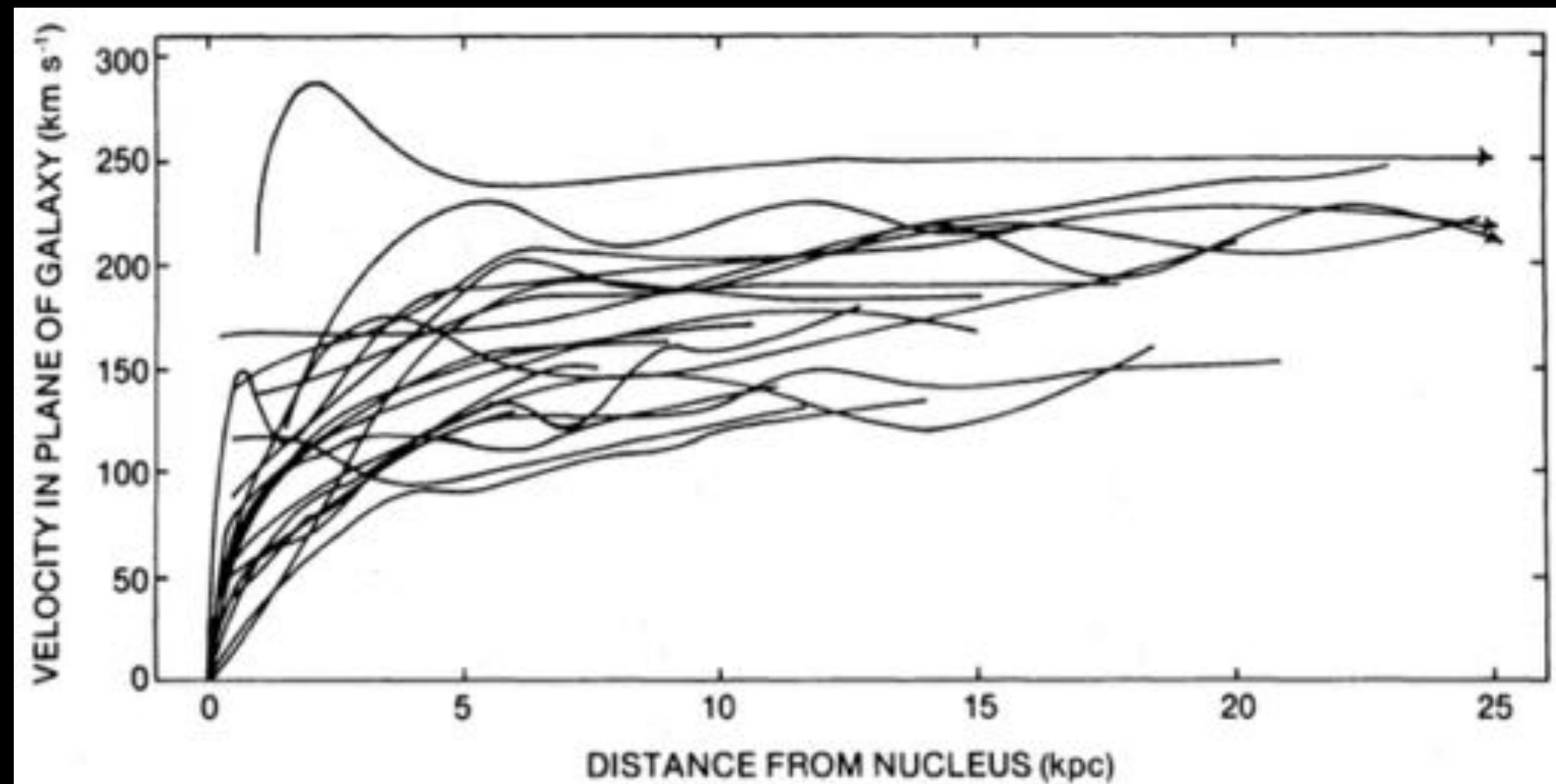
# Curvas de rotação



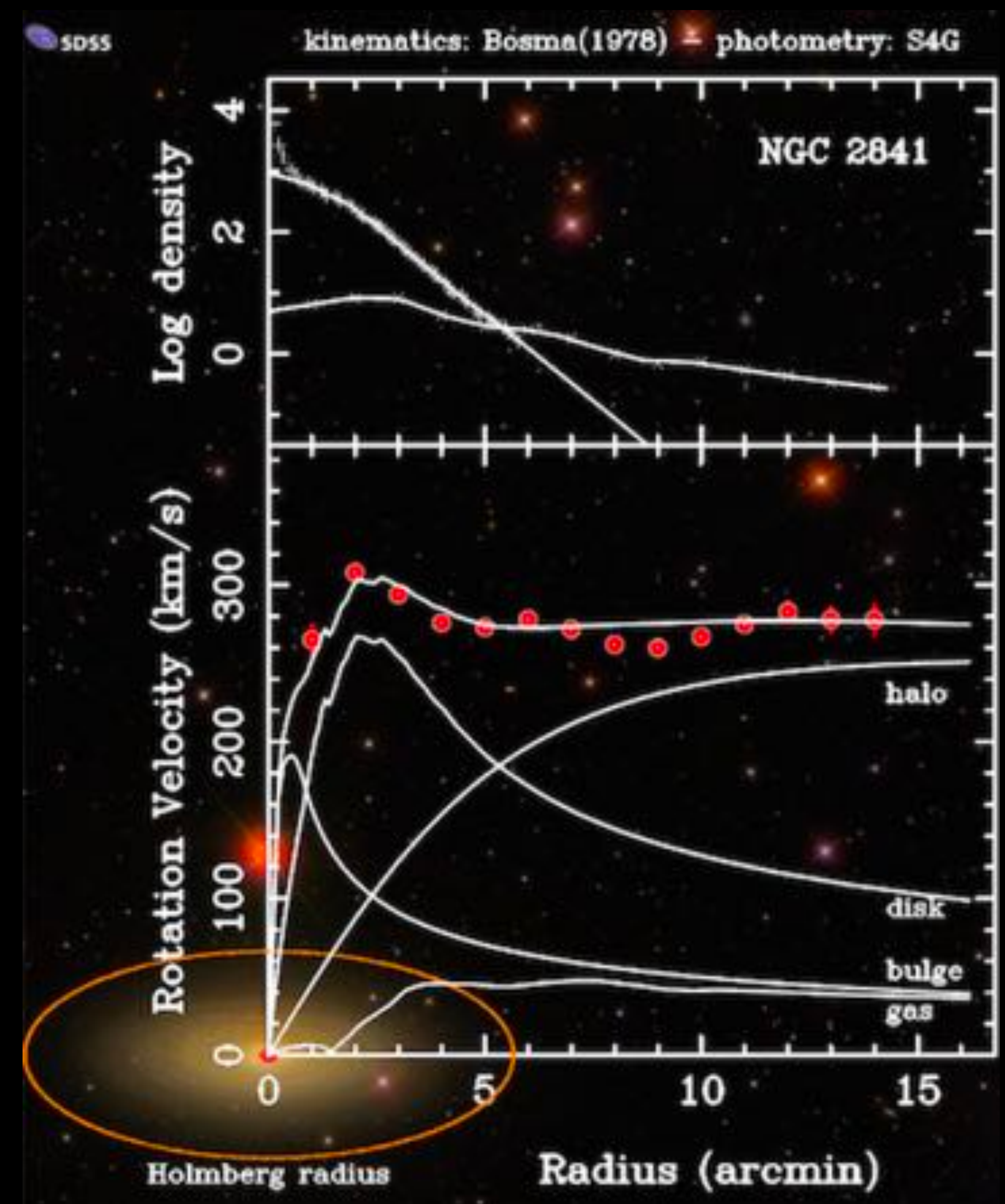
Rubin+ 1980



# Curvas de rotação



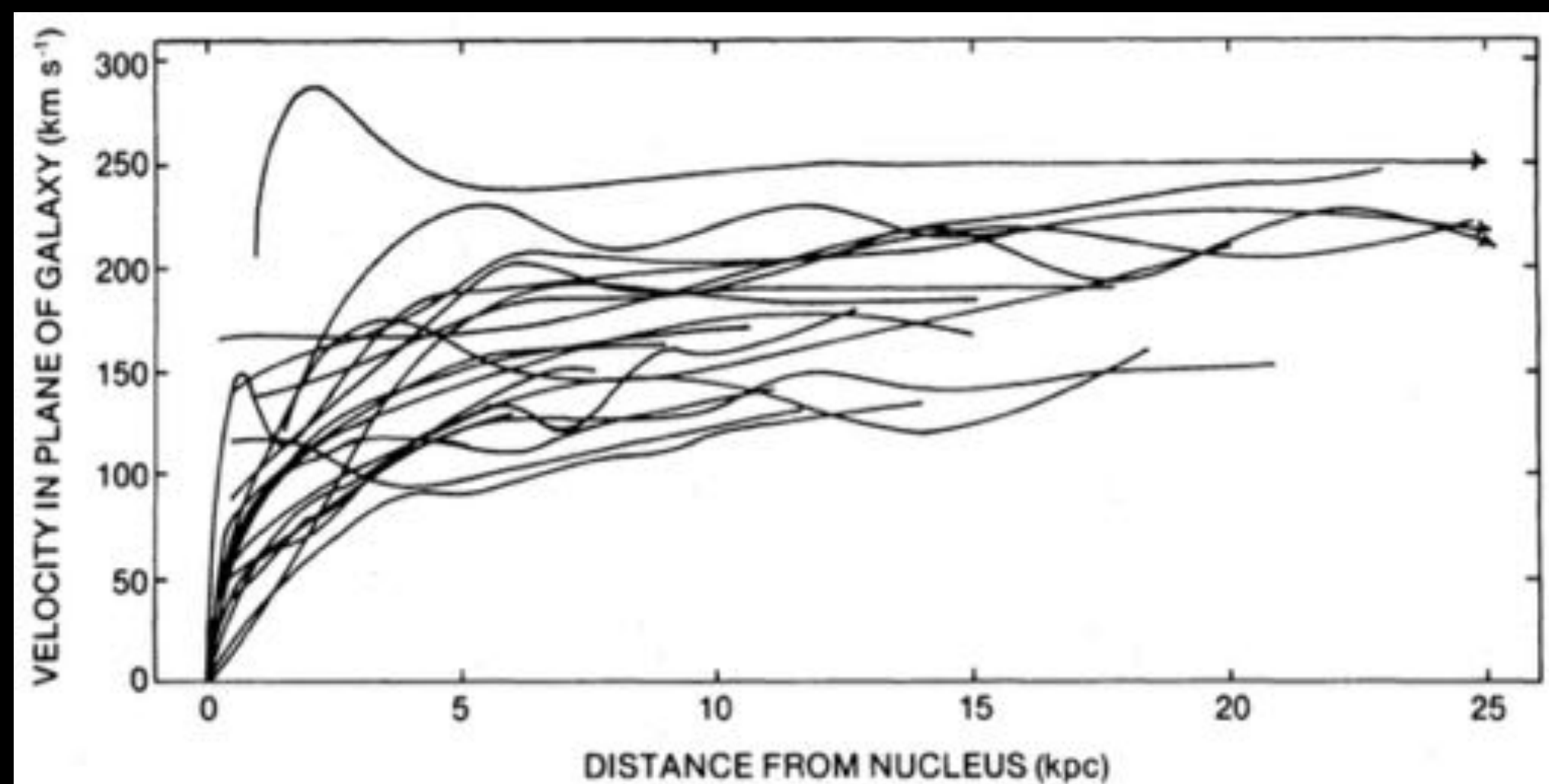
Rubin+ 1980



Bosma 2023

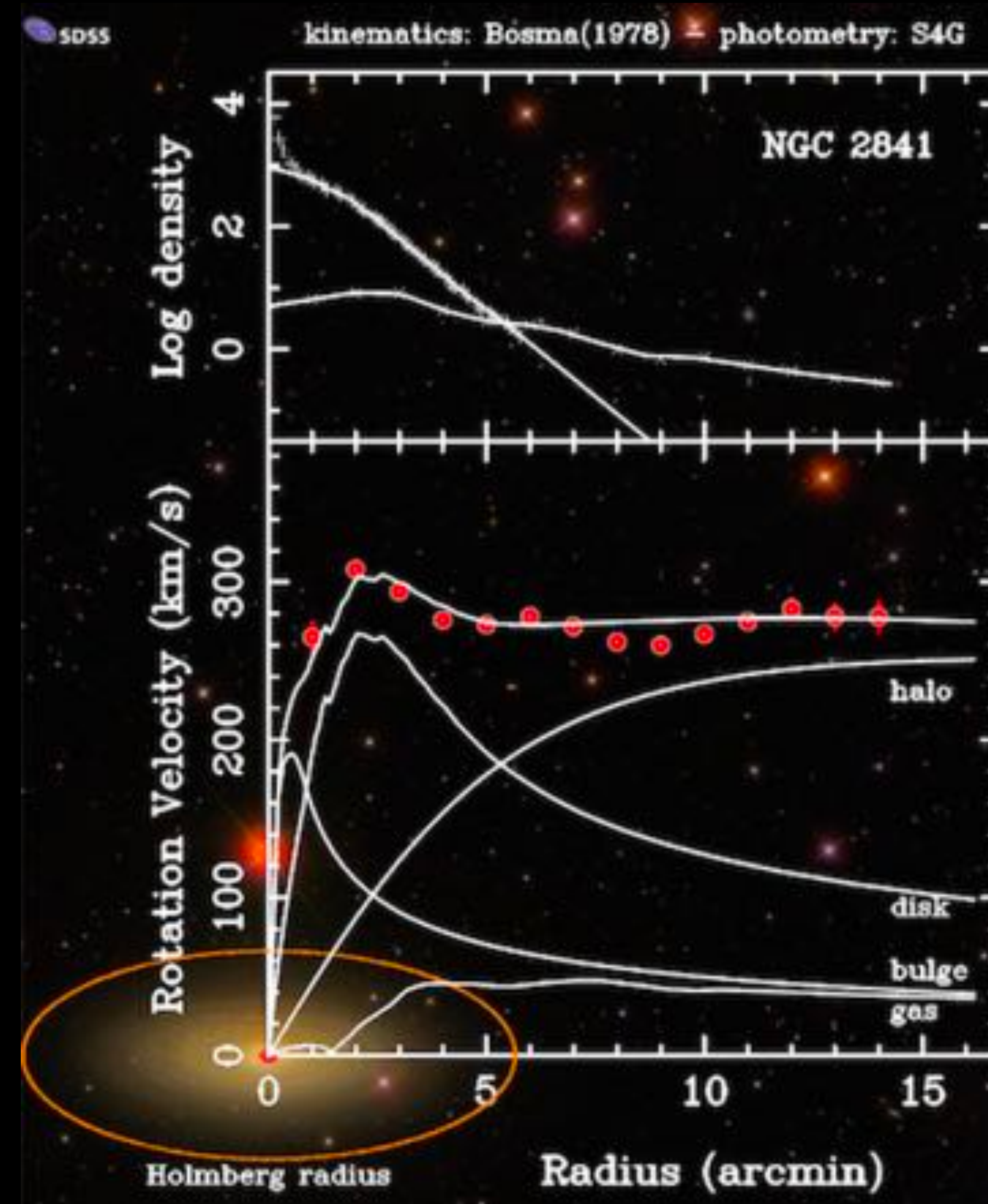


# Curvas de rotação



Rubin+ 1980

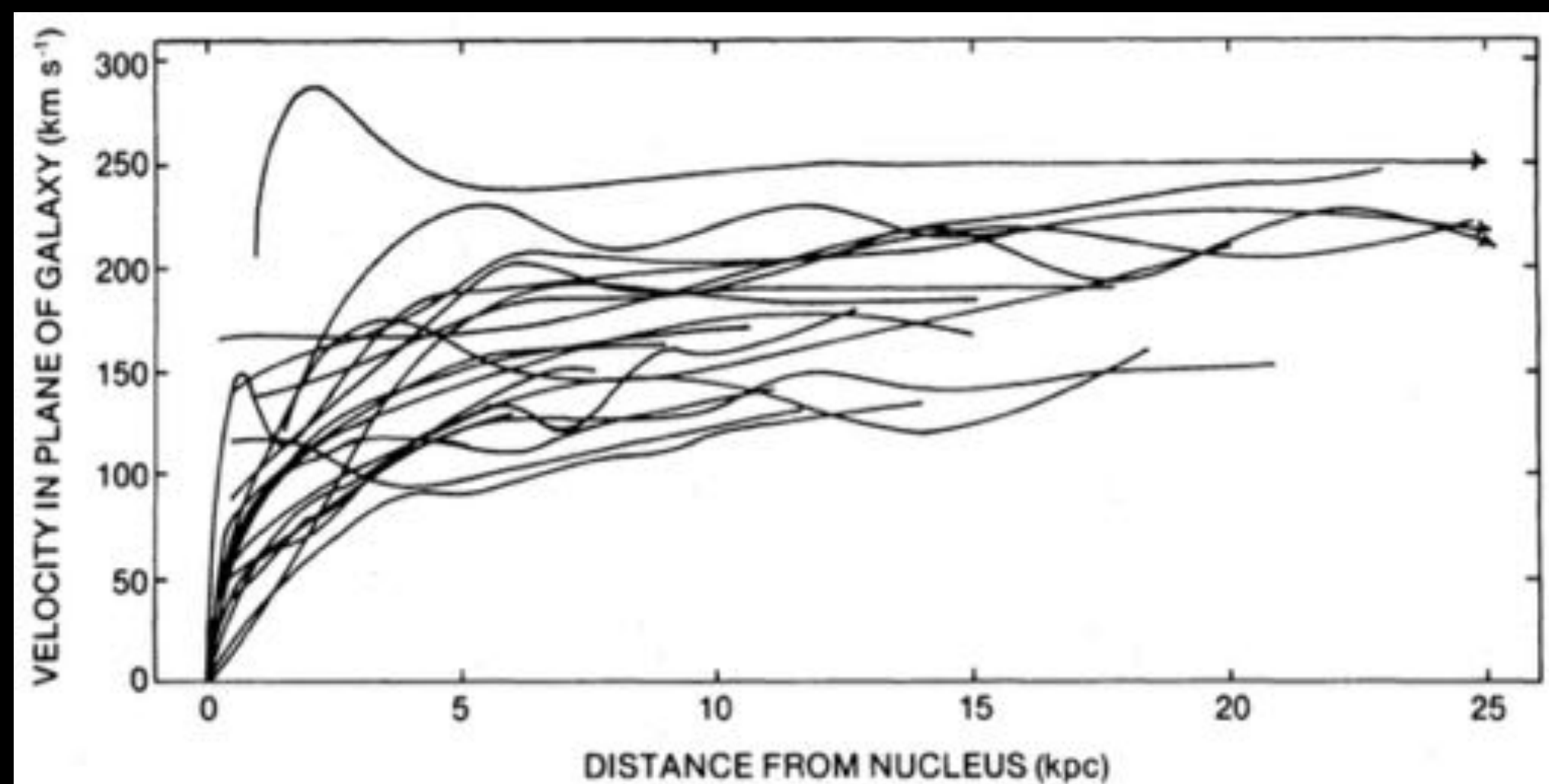
$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$



Bosma 2023



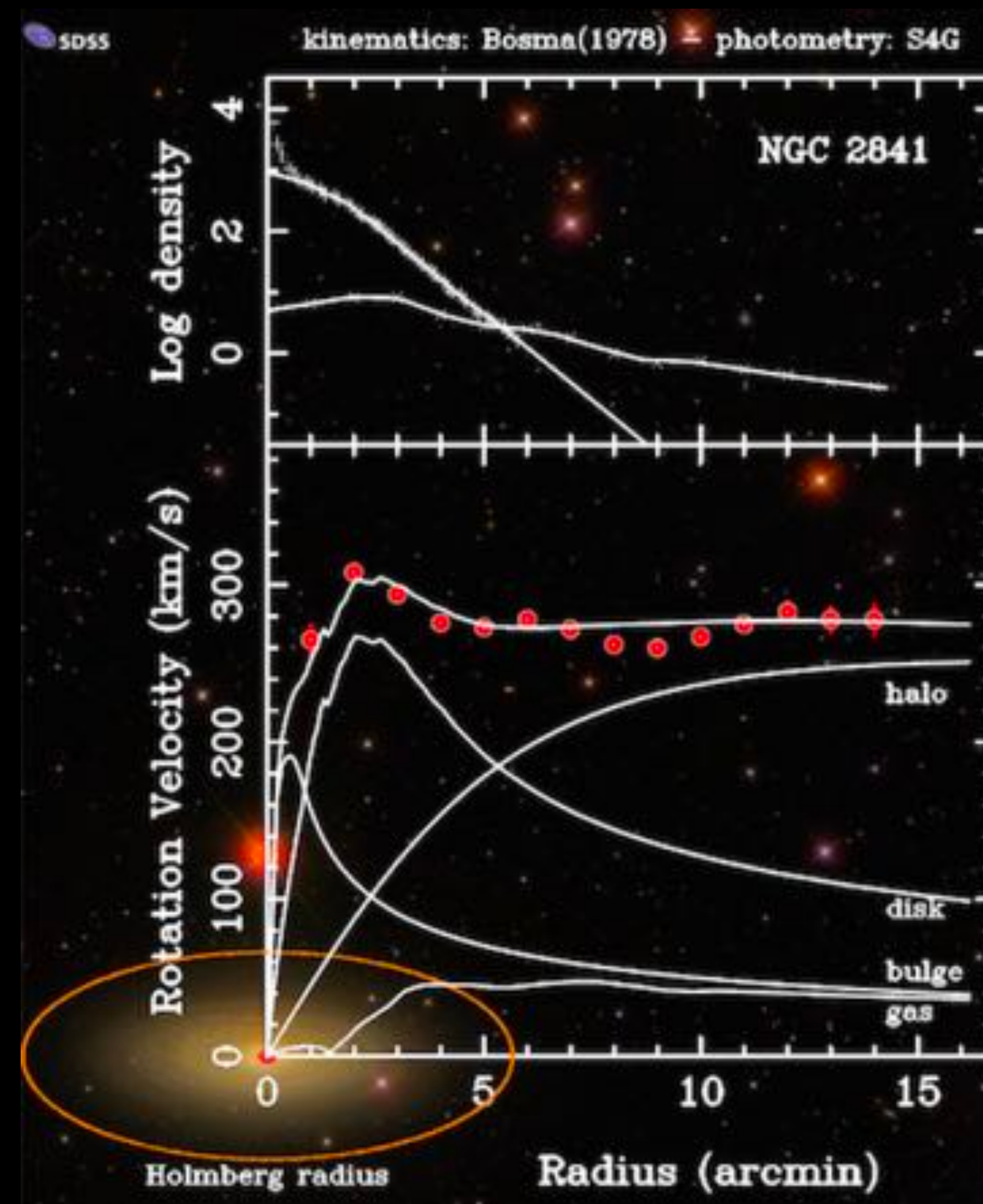
# Curvas de rotação



Rubin+ 1980

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

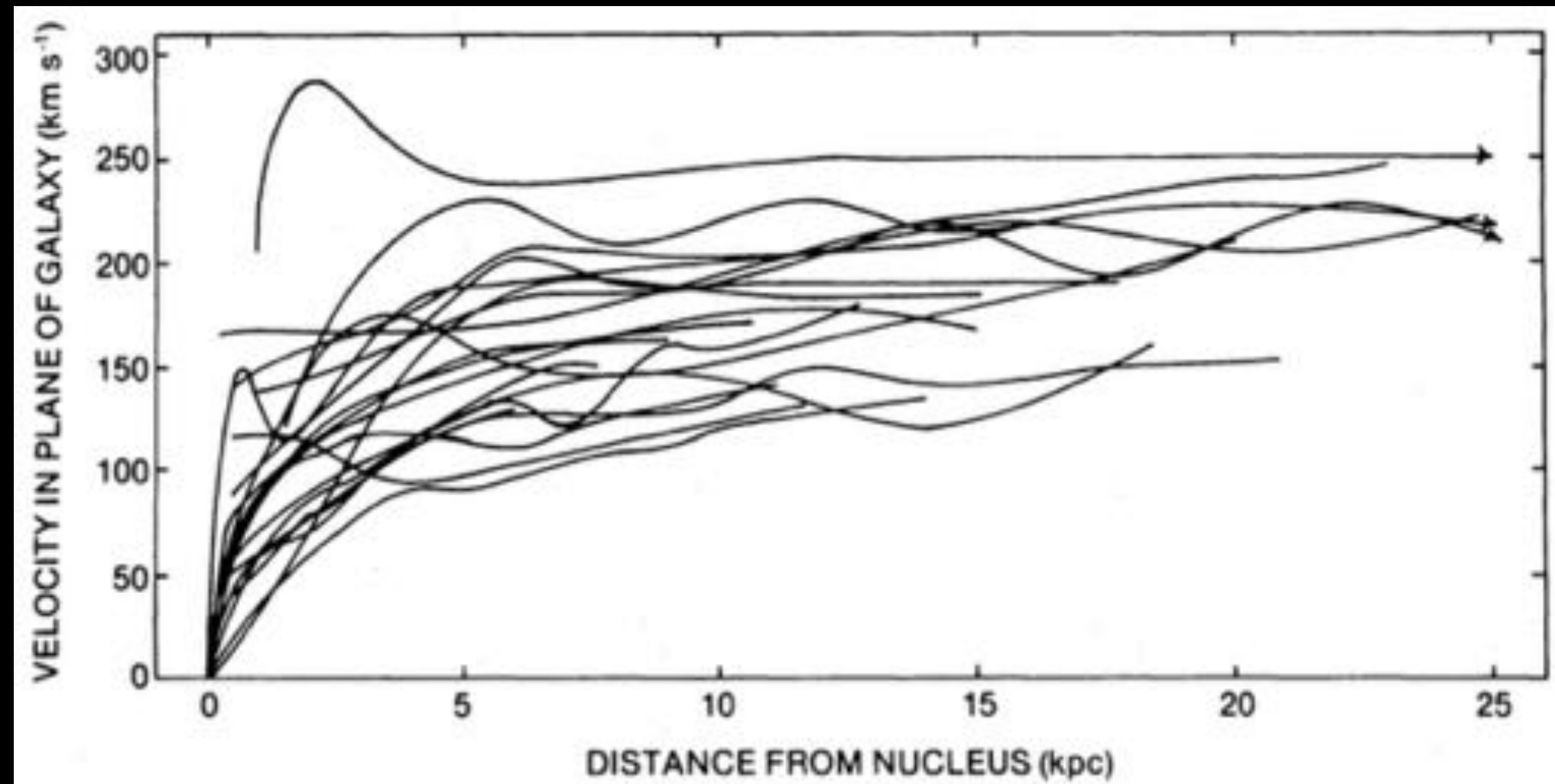
$$v_c = \text{cst} \rightarrow M(r) \propto r$$



Bosma 2023



# Curvas de rotação

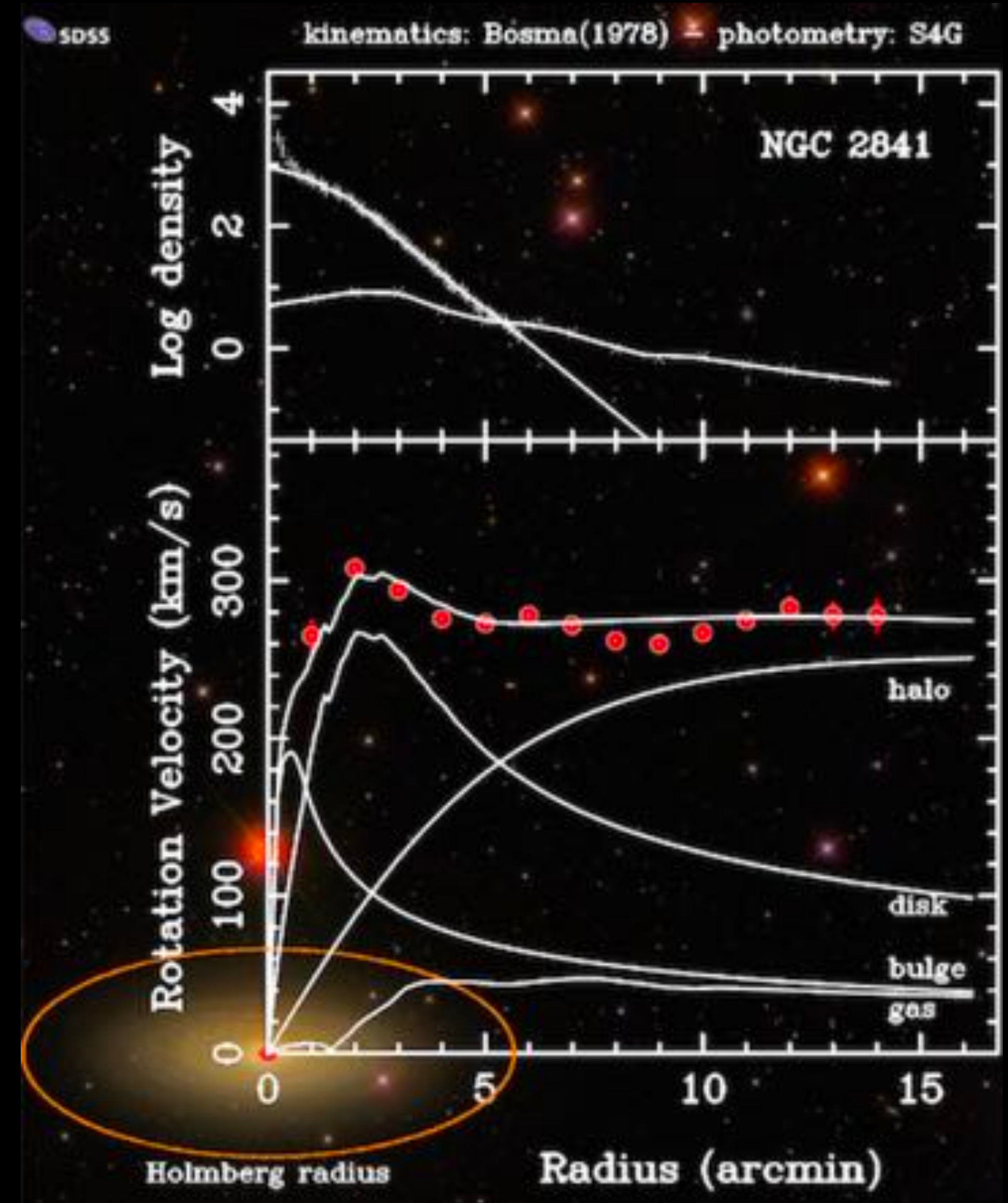


Rubin+ 1980

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$v_c = \text{cst} \rightarrow M(r) \propto r$$

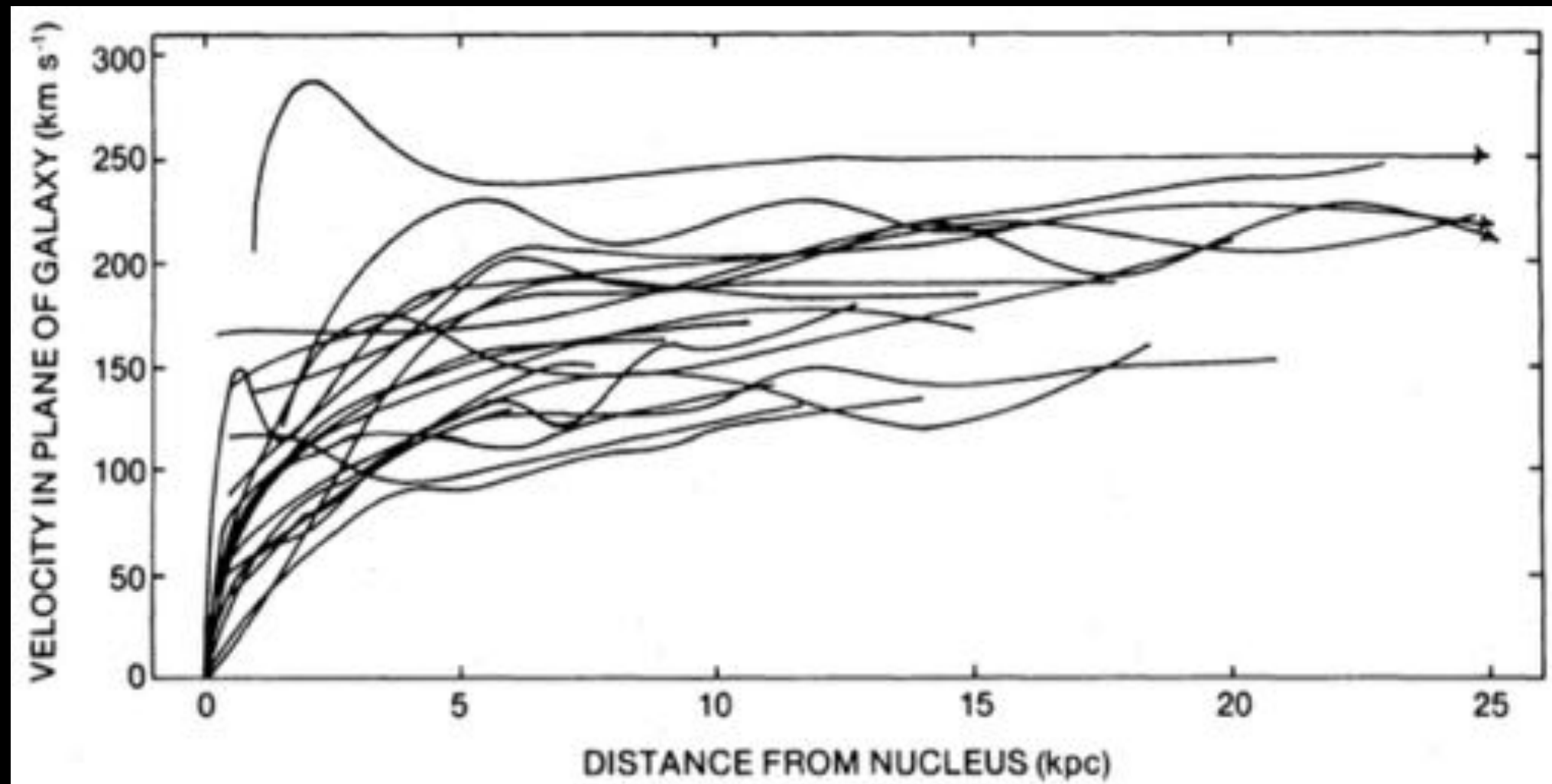
$$\rho(r) = M(r)/(4\pi r^3/3) \propto 1/r^2$$



Bosma 2023



# Curvas de rotação



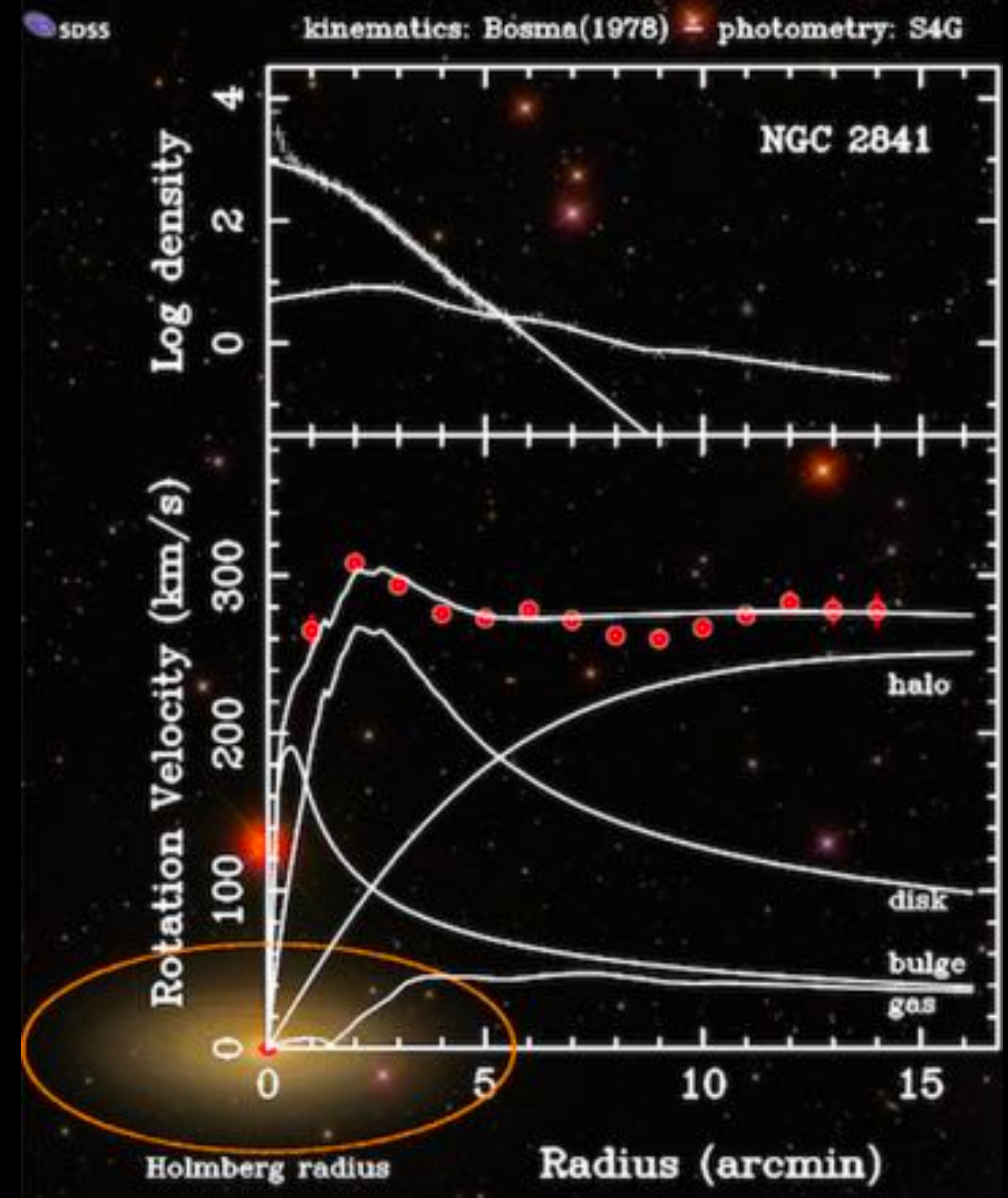
Rubin+ 1980

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

$$v_c = \text{cst} \rightarrow M(r) \propto r$$

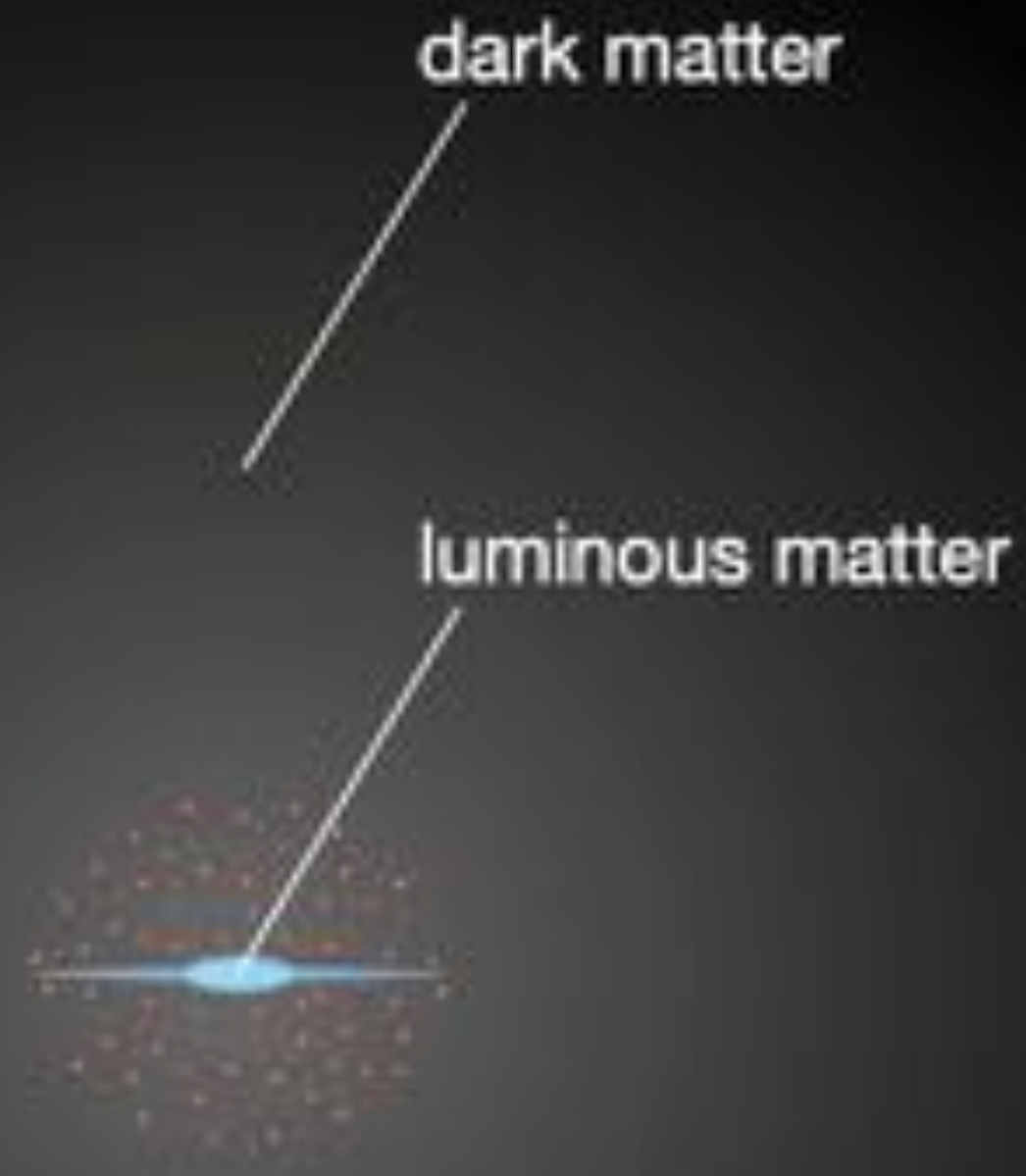
$$\rho(r) = M(r)/(4\pi r^3/3) \propto 1/r^2$$

matéria escura!



Bosma 2023

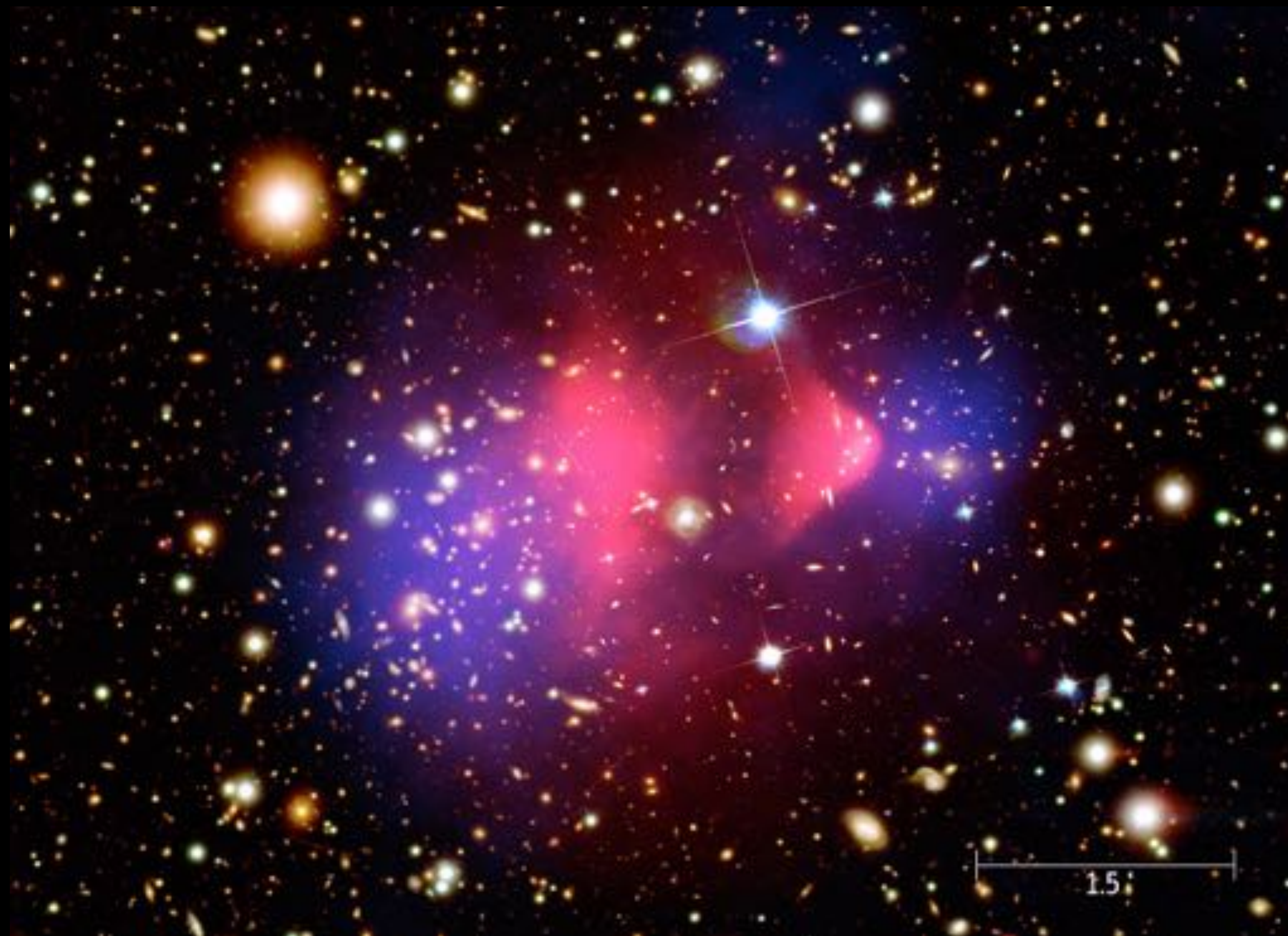
# Halo de matéria escura



$$\rho(r) \propto r^{-2}$$



# Bullet cluster



# Formação de galáxias

# Formação de galáxias

Universo primordial

# Formação de galáxias

## Universo primordial

- H, He e ME preenchem todo o espaço ~ uniformemente



# Formação de galáxias

## Universo primordial

- H, He e ME preenchem todo o espaço ~ uniformemente
- Pequenas perturbações da densidade: “sementes” de galáxias

# Formação de galáxias

## Universo primordial

- H, He e ME preenchem todo o espaço ~ uniformemente
- Pequenas perturbações da densidade: “sementes” de galáxias
- Quando atração gravitacional vence expansão -> colapso

# Formação de galáxias

## Universo primordial

- H, He e ME preenchem todo o espaço ~ uniformemente
- Pequenas perturbações da densidade: “sementes” de galáxias
- Quando atração gravitacional vence expansão -> colapso
- Interação EM da matéria bariônica retarda seu colapso

# Formação de galáxias

## Universo primordial

- H, He e ME preenchem todo o espaço ~ uniformemente
- Pequenas perturbações da densidade: “sementes” de galáxias
- Quando atração gravitacional vence expansão -> colapso
- Interação EM da matéria bariônica retarda seu colapso
- ME não tem interação EM e colapsa antes

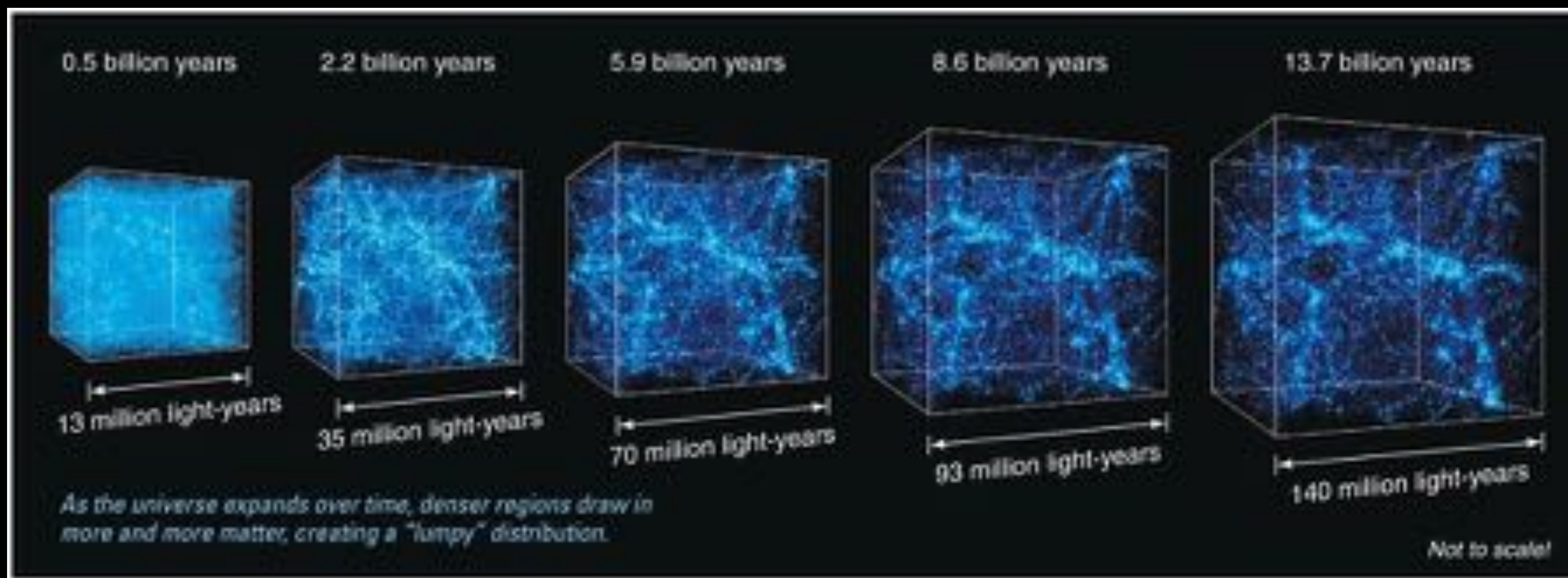


# Formação de galáxias

## Universo primordial

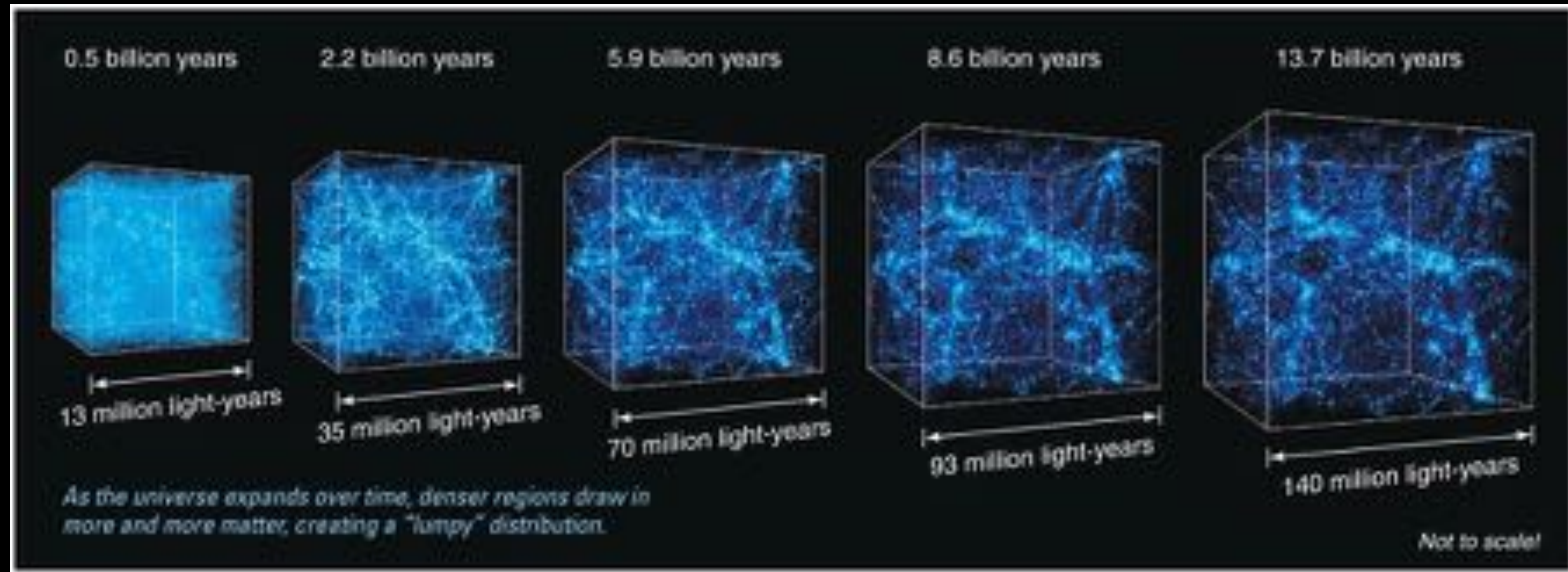
- H, He e ME preenchem todo o espaço ~ uniformemente
- Pequenas perturbações da densidade: “sementes” de galáxias
- Quando atração gravitacional vence expansão -> colapso
- Interação EM da matéria bariônica retarda seu colapso
- ME não tem interação EM e colapsa antes
- Matéria bariônica “cai” nesses poços de potencial, formando galáxias

# Formação de galáxias





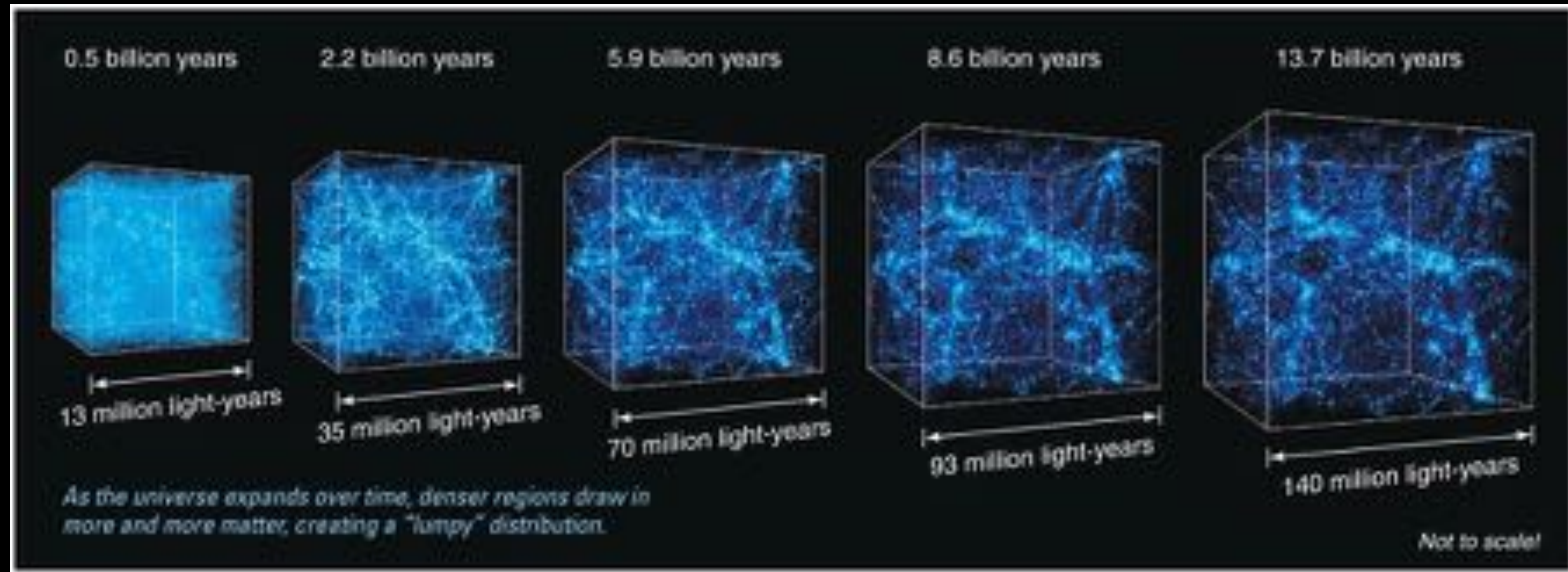
# Formação de galáxias



- Flutuações iniciais de densidade “vencem” expansão e crescem



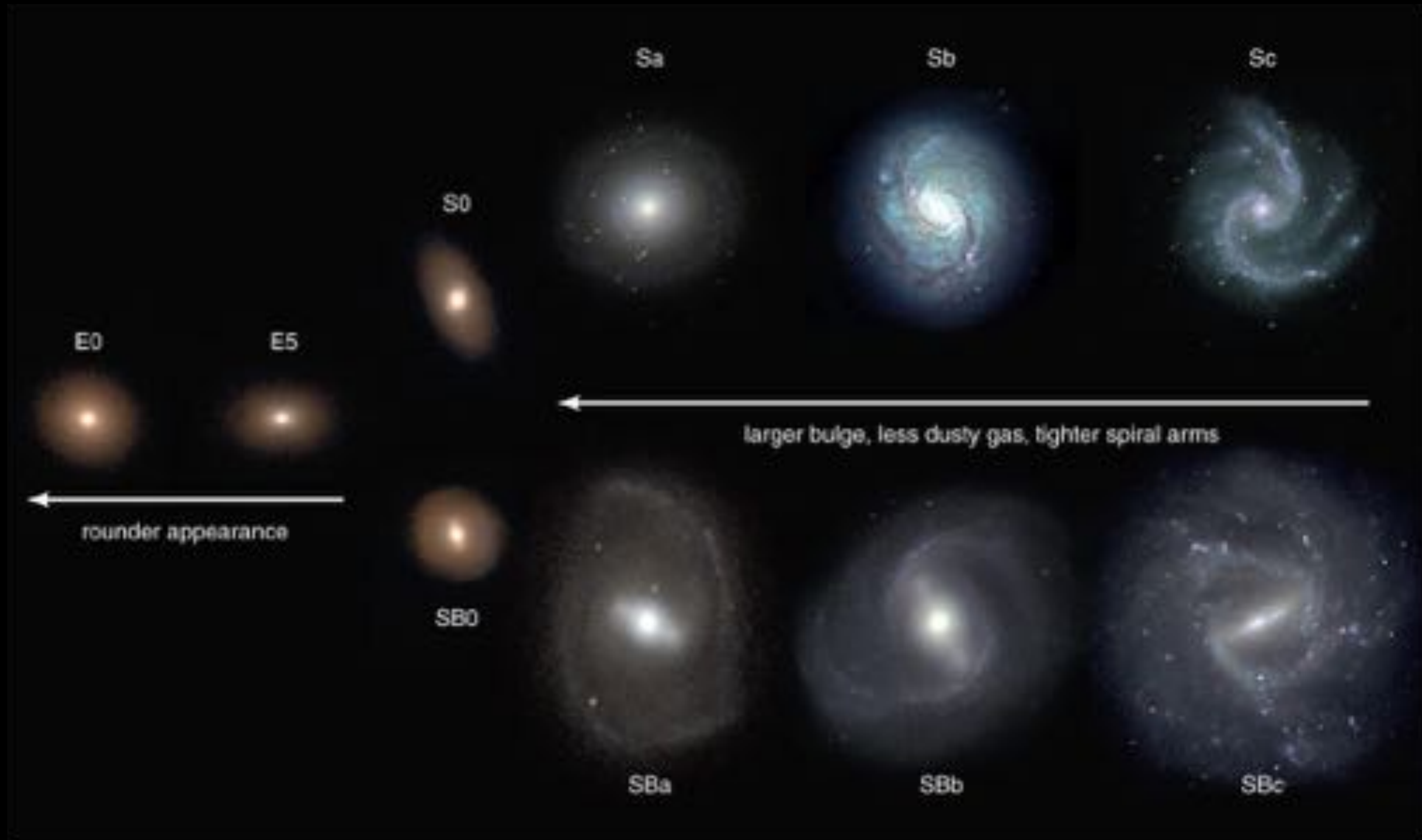
# Formação de galáxias



- Flutuações iniciais de densidade “vencem” expansão e crescem
- É onde se formarão as galáxias



# Diapasão de Hubble



# Elípticas vs espirais

# Elípticas vs espirais

- Matéria escura colapsa e forma halos

# Elípticas vs espirais

- Matéria escura colapsa e forma halos
- Gás ao redor desses halos pode ter rotação e está esfriando



# Elípticas vs espirais

- Matéria escura colapsa e forma halos
- Gás ao redor desses halos pode ter rotação e está esfriando
- Elíptica ou espiral depende de:

# Elípticas vs espirais

- Matéria escura colapsa e forma halos
- Gás ao redor desses halos pode ter rotação e está esfriando
- Elíptica ou espiral depende de:
  - Rotação da nuvem protogaláctica

# Elípticas vs espirais

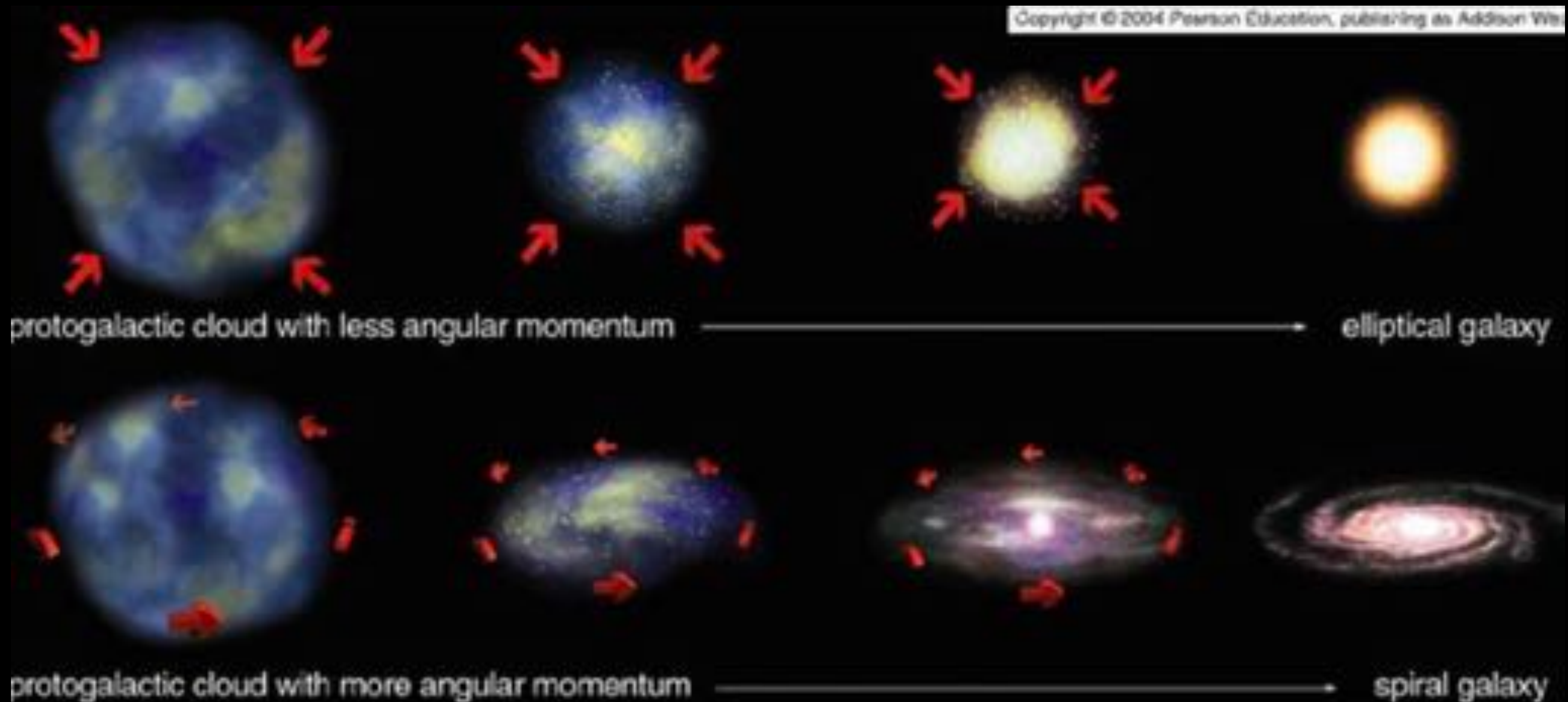
- Matéria escura colapsa e forma halos
- Gás ao redor desses halos pode ter rotação e está esfriando
- Elíptica ou espiral depende de:
  - Rotação da nuvem protogaláctica
  - Densidade da protogaláxia

# Elípticas vs espirais

- Matéria escura colapsa e forma halos
- Gás ao redor desses halos pode ter rotação e está esfriando
- Elíptica ou espiral depende de:
  - Rotação da nuvem protogaláctica
  - Densidade da protogaláxia
  - Eventos de fusão (mergers)

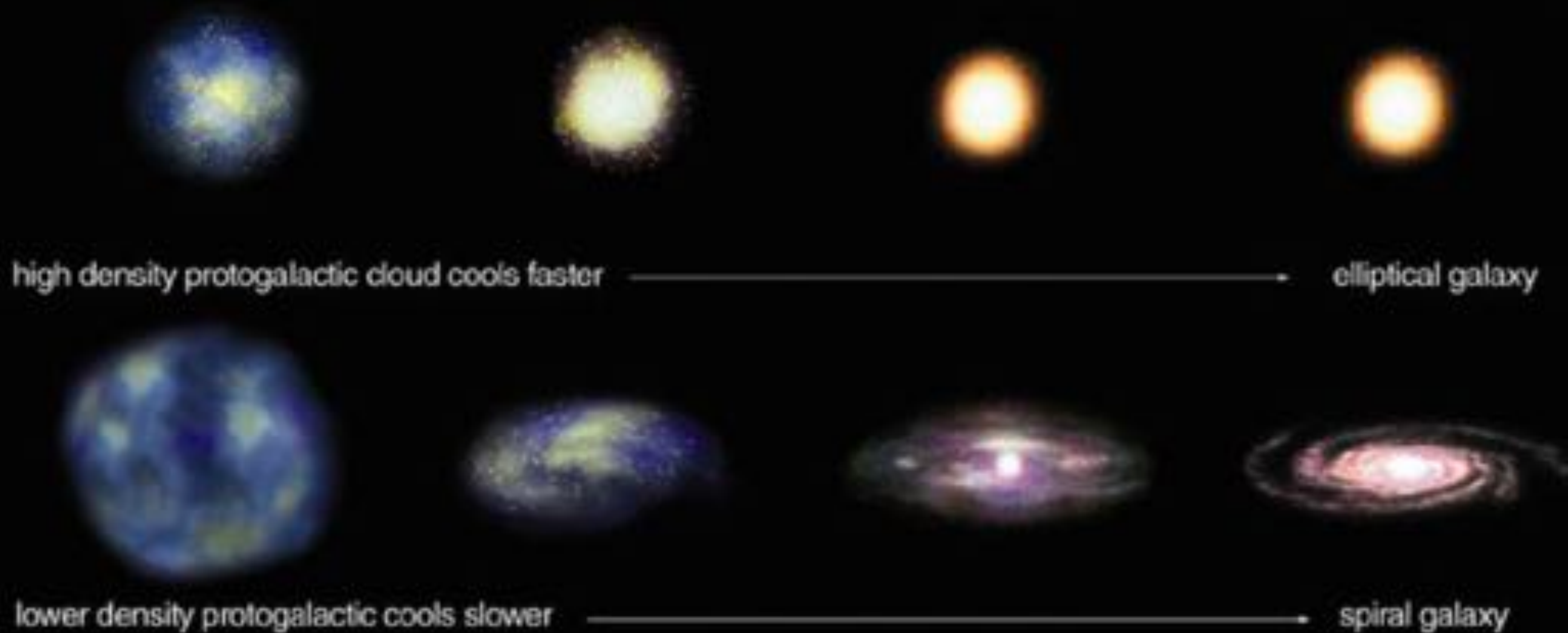


# Elípticas vs espirais (rotação)



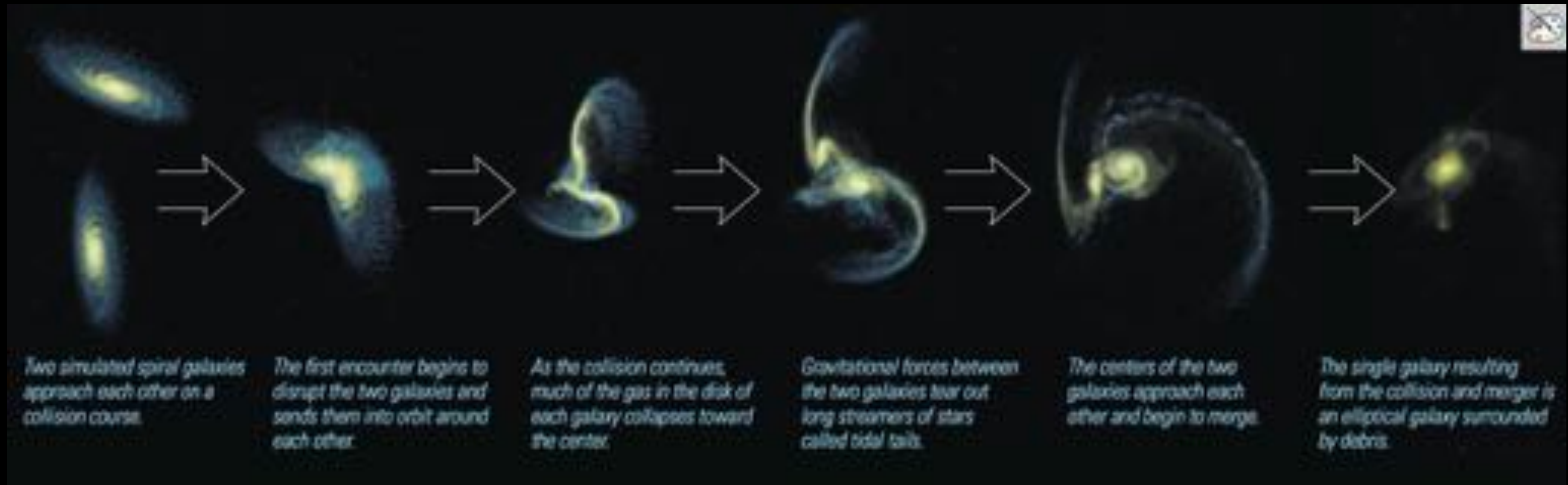
# Elípticas vs espirais (densidade)

Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley





# Galáxias elípticas via mergers



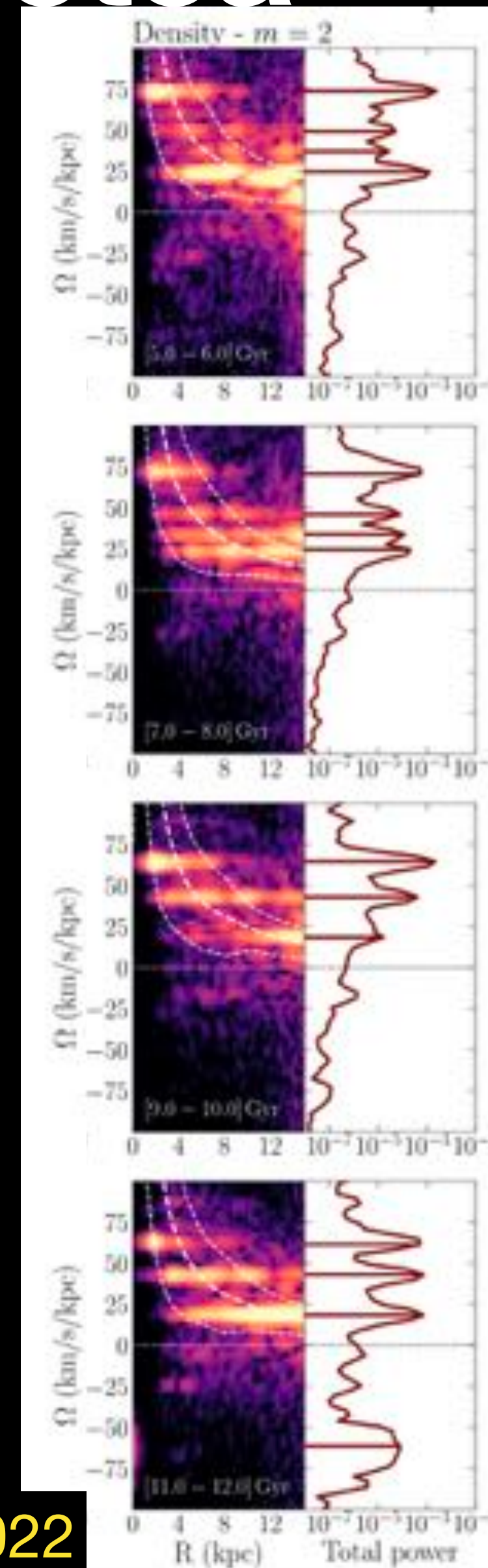
Fusões de galáxias menores tendem a formar elípticas

# Pesquisa



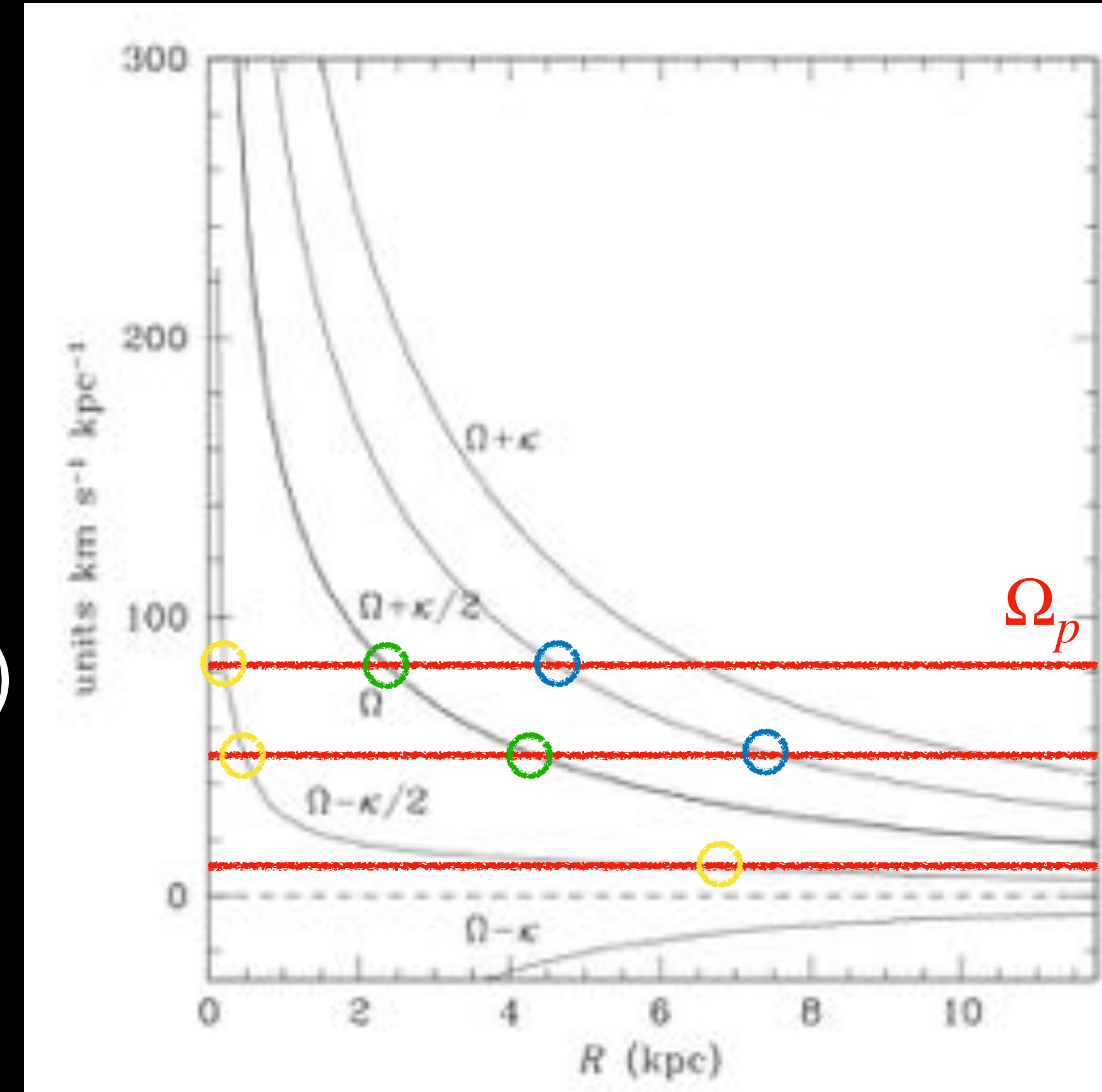
# Evolução dos braços espirais na Via Láctea

- Braços espirais são transientes
- Estrelas nascem nos braços espirais
- Qual a história de evolução dos braços espirais na Via Láctea?
- Correlação com regiões de formação estelar?



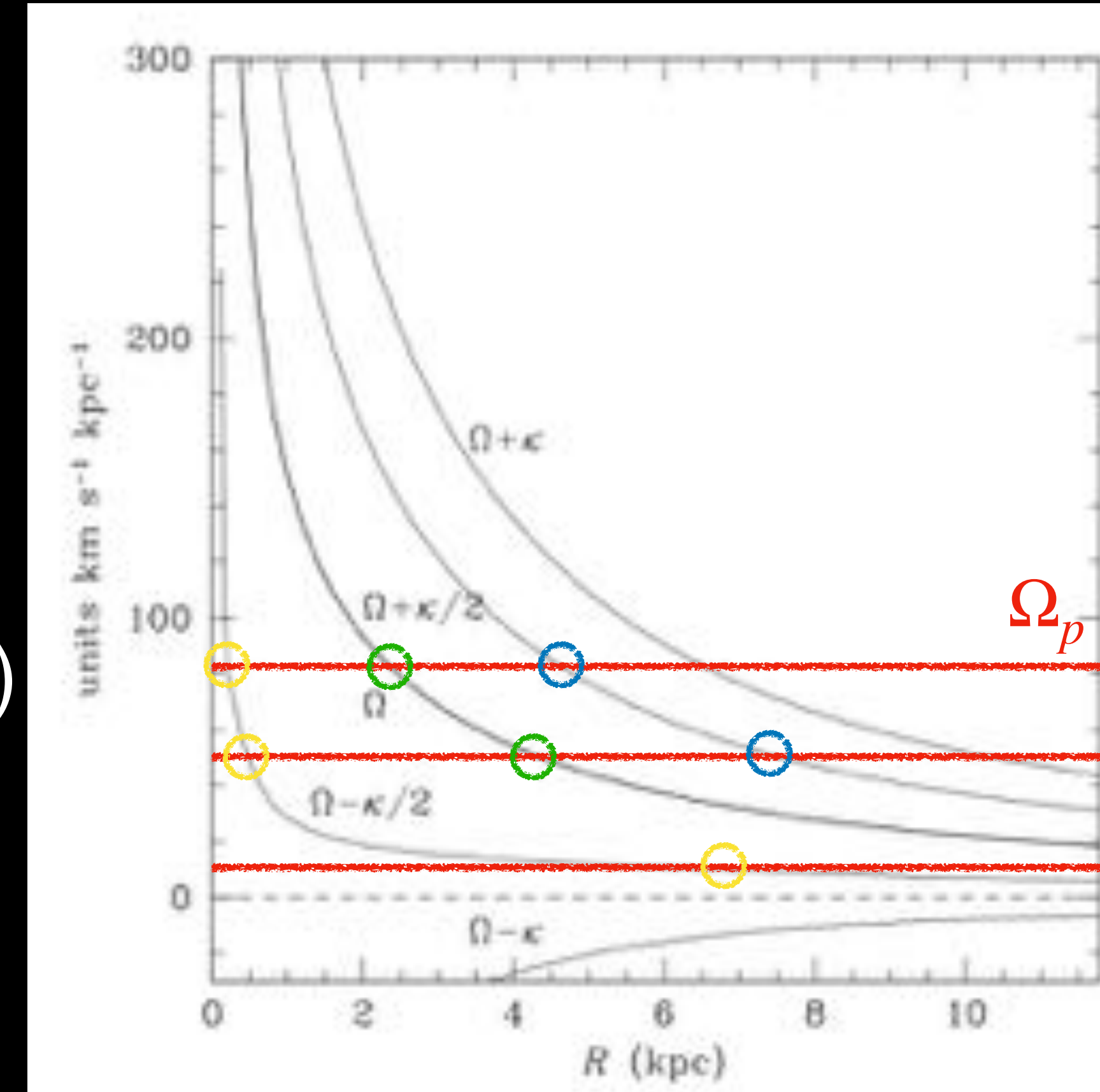
# Ressonâncias da barra na Via Láctea

- $\Omega_p = \Omega_\phi - \Omega_r/2 \rightarrow$  Inner Lindblad Resonance (ILR)
- $\Omega_p = \Omega_\phi \rightarrow$  Co-rotation Resonance
- $\Omega_p = \Omega_\phi + \Omega_r/2 \rightarrow$  Outer Lindblad Resonance (OLR)



# Ressonâncias da barra na Via Láctea

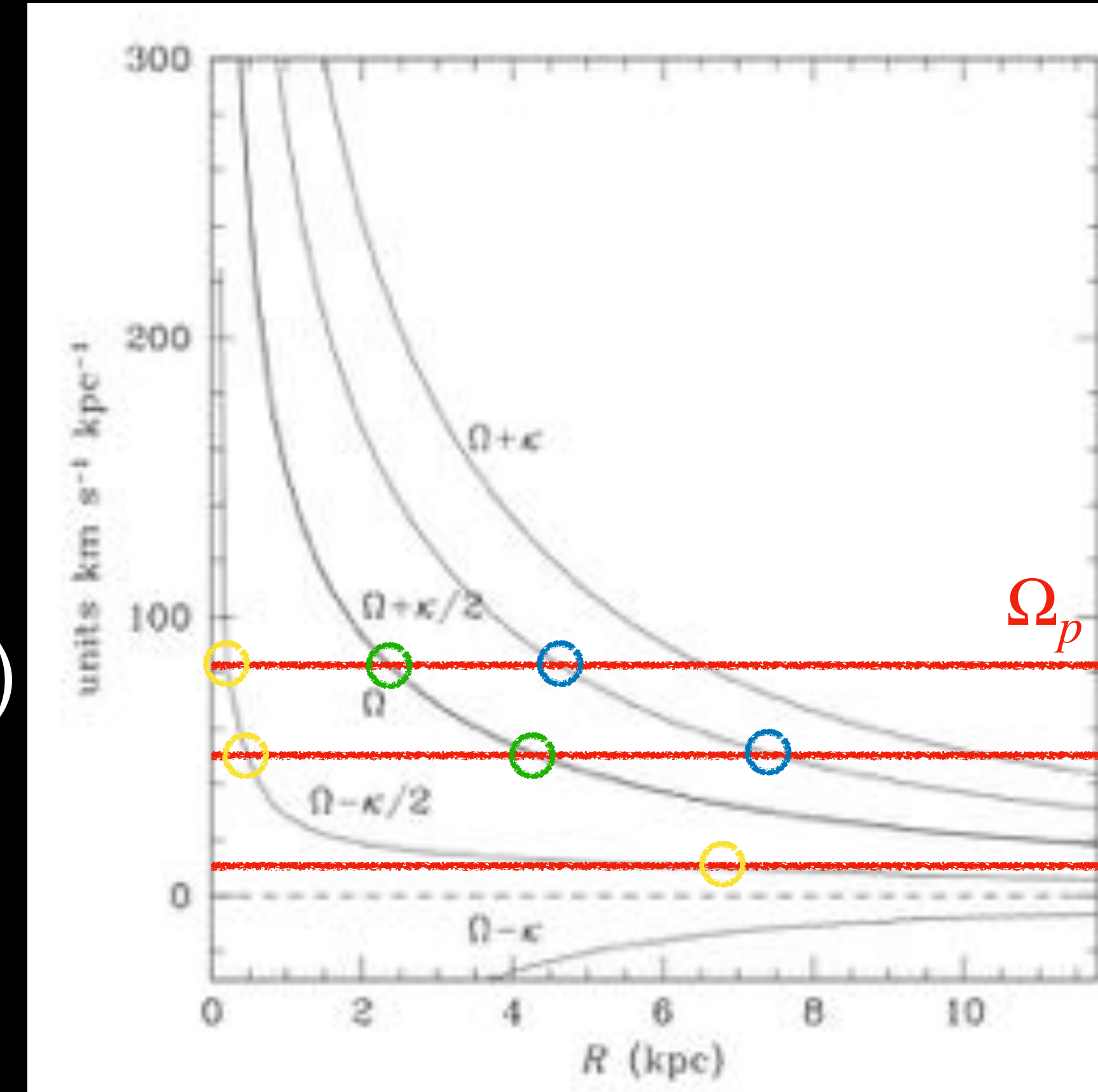
- $\Omega_p = \Omega_\phi - \Omega_r/2 \rightarrow$  Inner Lindblad Resonance (ILR)
- $\Omega_p = \Omega_\phi \rightarrow$  Co-rotation Resonance
- $\Omega_p = \Omega_\phi + \Omega_r/2 \rightarrow$  Outer Lindblad Resonance (OLR)
- Barras desaceleram  $\rightarrow$  ressonâncias “varrem” o disco





# Ressonâncias da barra na Via Láctea

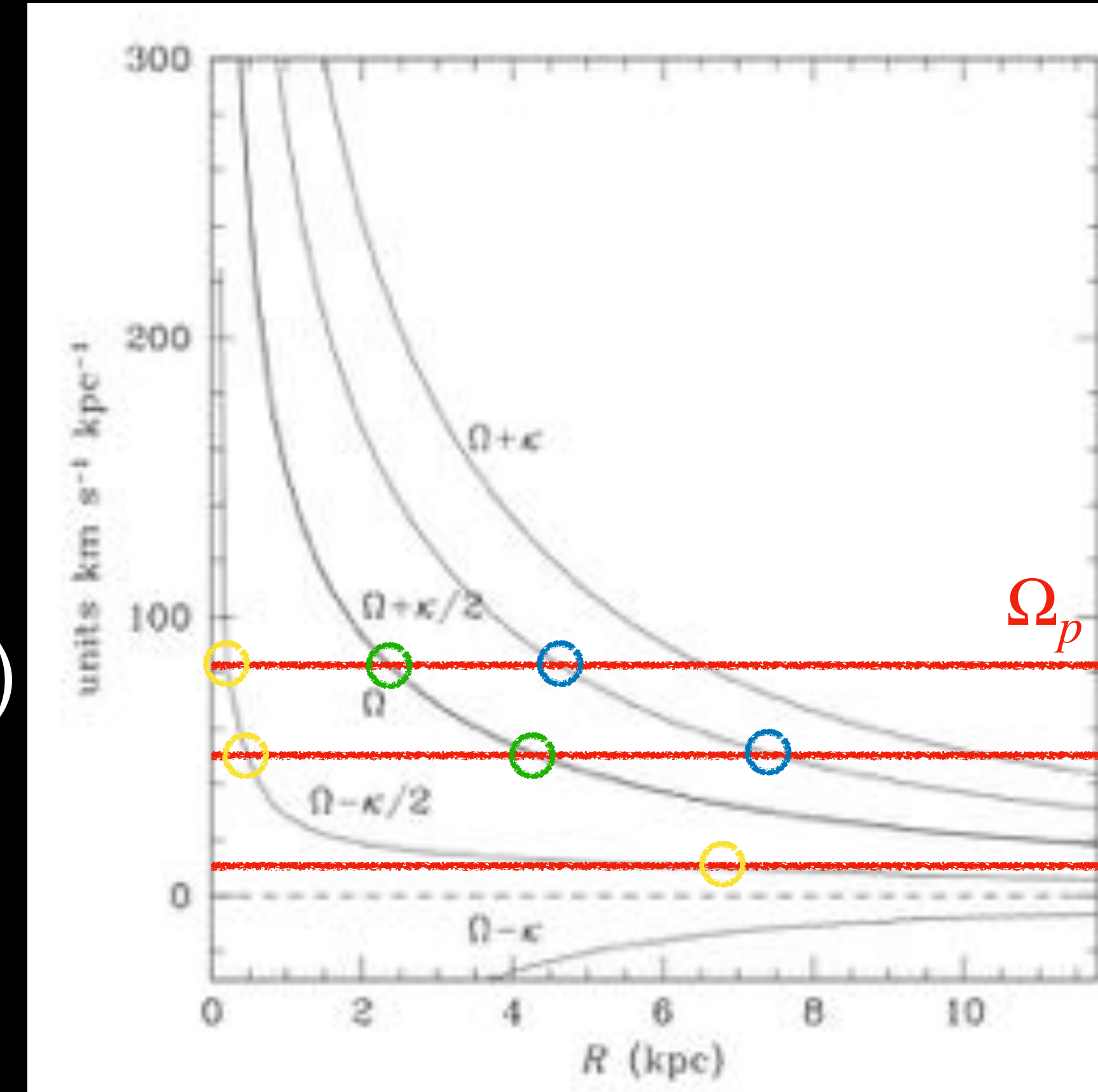
- $\Omega_p = \Omega_\phi - \Omega_r/2 \rightarrow$  Inner Lindblad Resonance (ILR)
- $\Omega_p = \Omega_\phi \rightarrow$  Co-rotation Resonance
- $\Omega_p = \Omega_\phi + \Omega_r/2 \rightarrow$  Outer Lindblad Resonance (OLR)
- Barras desaceleram  $\rightarrow$  ressonâncias “varrem” o disco
- Discos crescem “inside-out”





# Ressonâncias da barra na Via Láctea

- $\Omega_p = \Omega_\phi - \Omega_r/2 \rightarrow$  Inner Lindblad Resonance (ILR)
- $\Omega_p = \Omega_\phi \rightarrow$  Co-rotation Resonance
- $\Omega_p = \Omega_\phi + \Omega_r/2 \rightarrow$  Outer Lindblad Resonance (OLR)
- Barras desaceleram  $\rightarrow$  ressonâncias “varrem” o disco
- Discos crescem “inside-out”
- Barras trazem estrelas nascidas no centro da Galáxia (ricas em [Fe/H])?



# Ressonâncias da barra na Via Láctea

- $\Omega_p = \Omega_\phi - \Omega_r/2 \rightarrow$  Inner Lindblad Resonance (ILR)

- $\Omega_p = \Omega_\phi \rightarrow$  Co-rotation Resonance

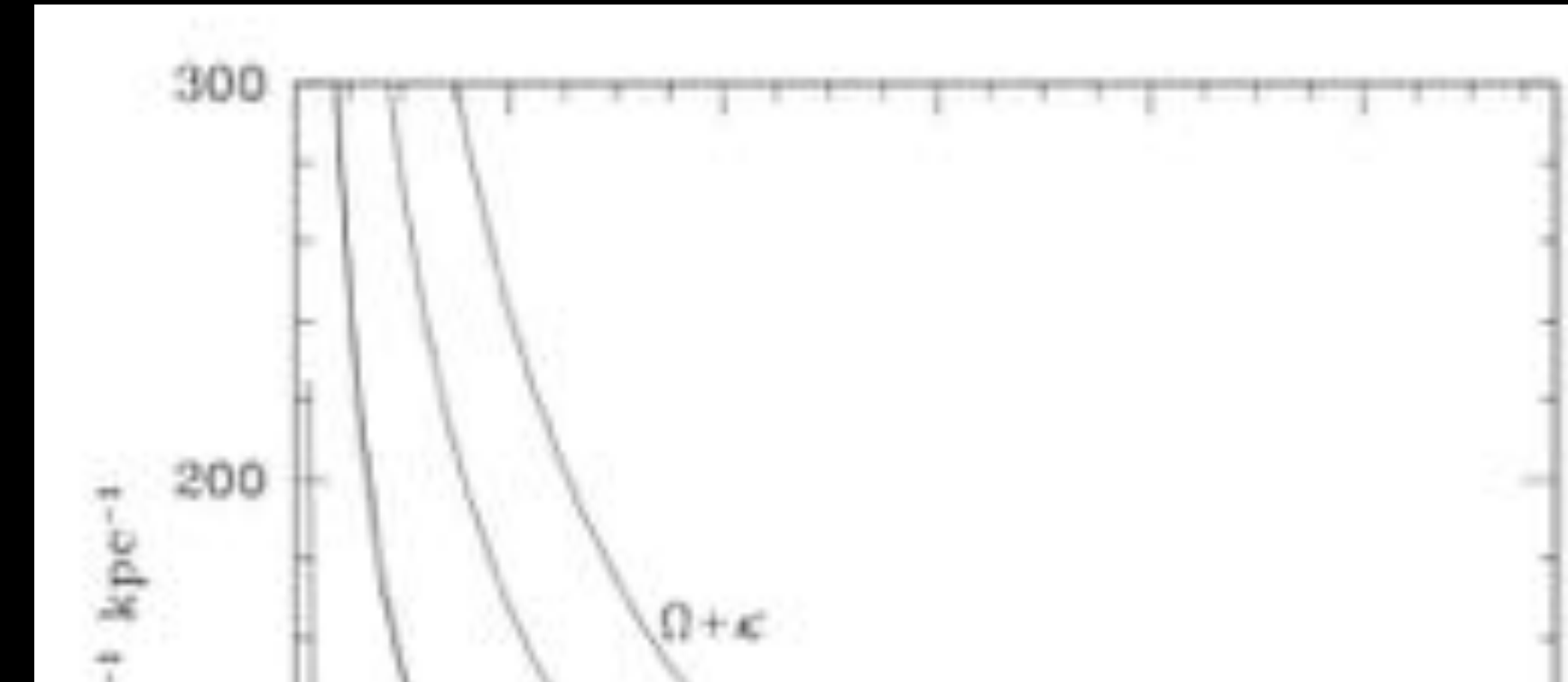
- $\Omega_p = \Omega_\phi + \Omega_r/2 \rightarrow$  Outer Lindblad Resonance

- Barras desaceleram  $\rightarrow$  ressonâncias “varredoras”

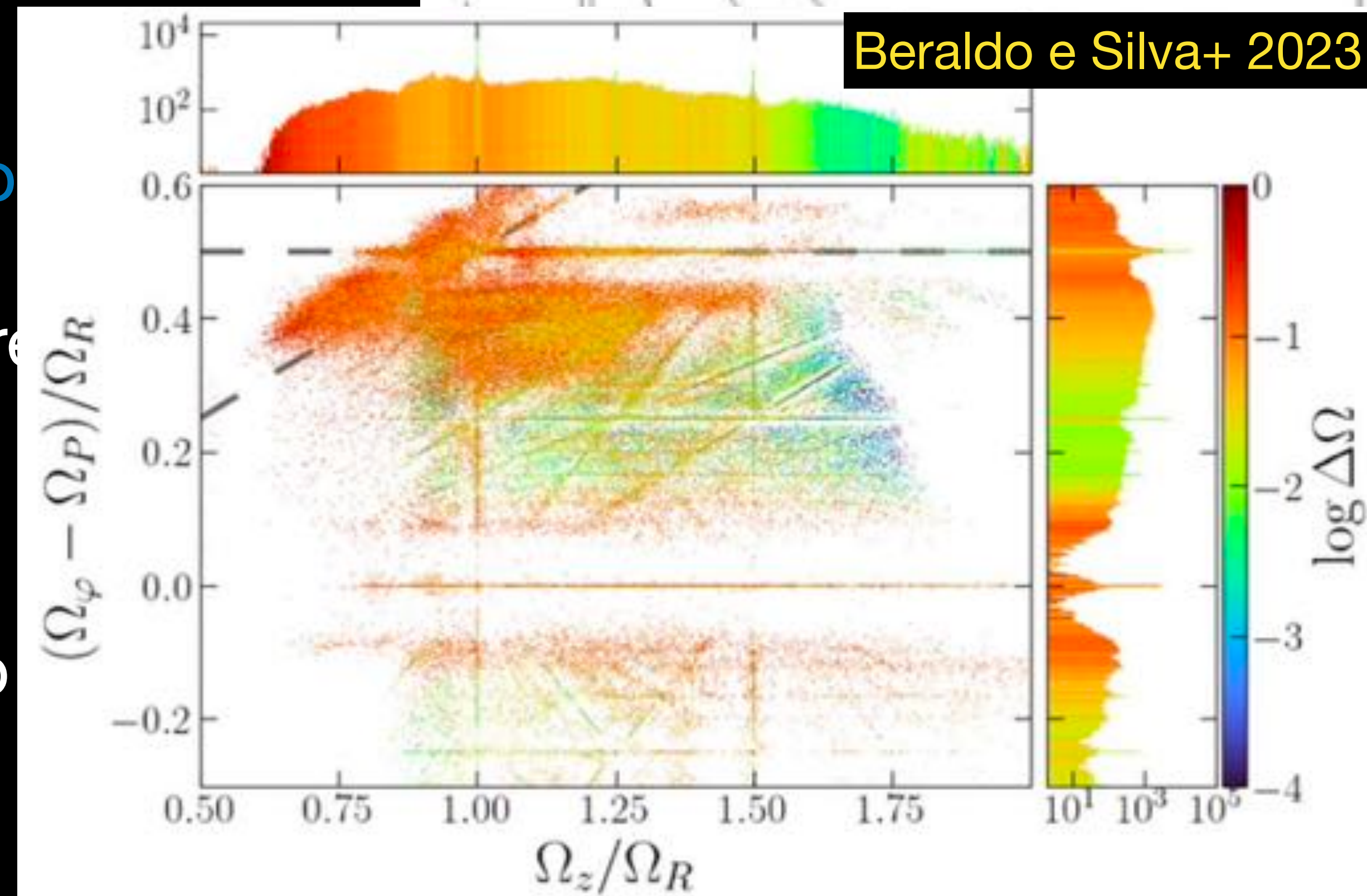
- Discos crescem “inside-out”

- Barras trazem estrelas nascidas no centro

- Barras podem alimentar buracos-negros?



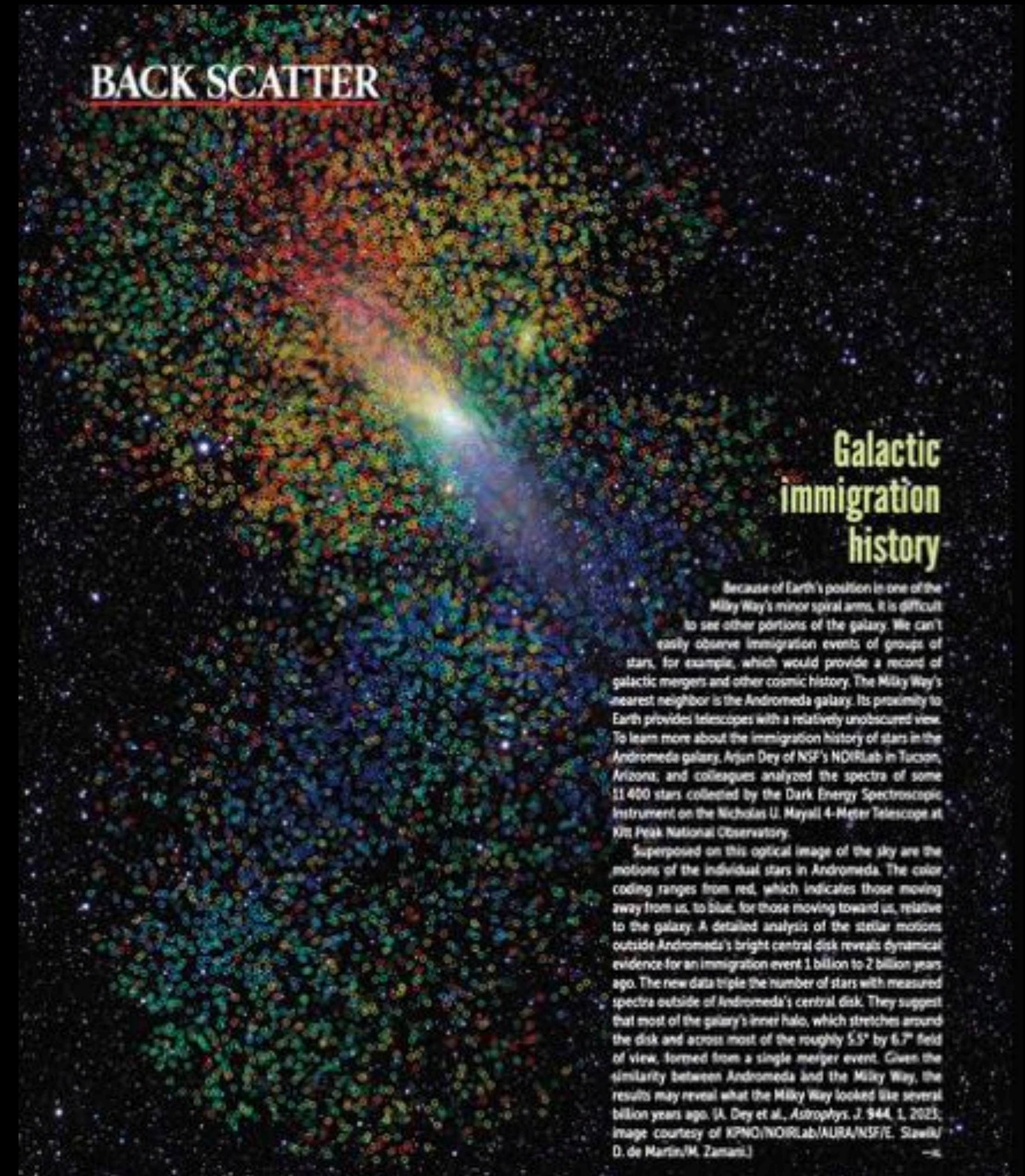
Beraldo e Silva+ 2023





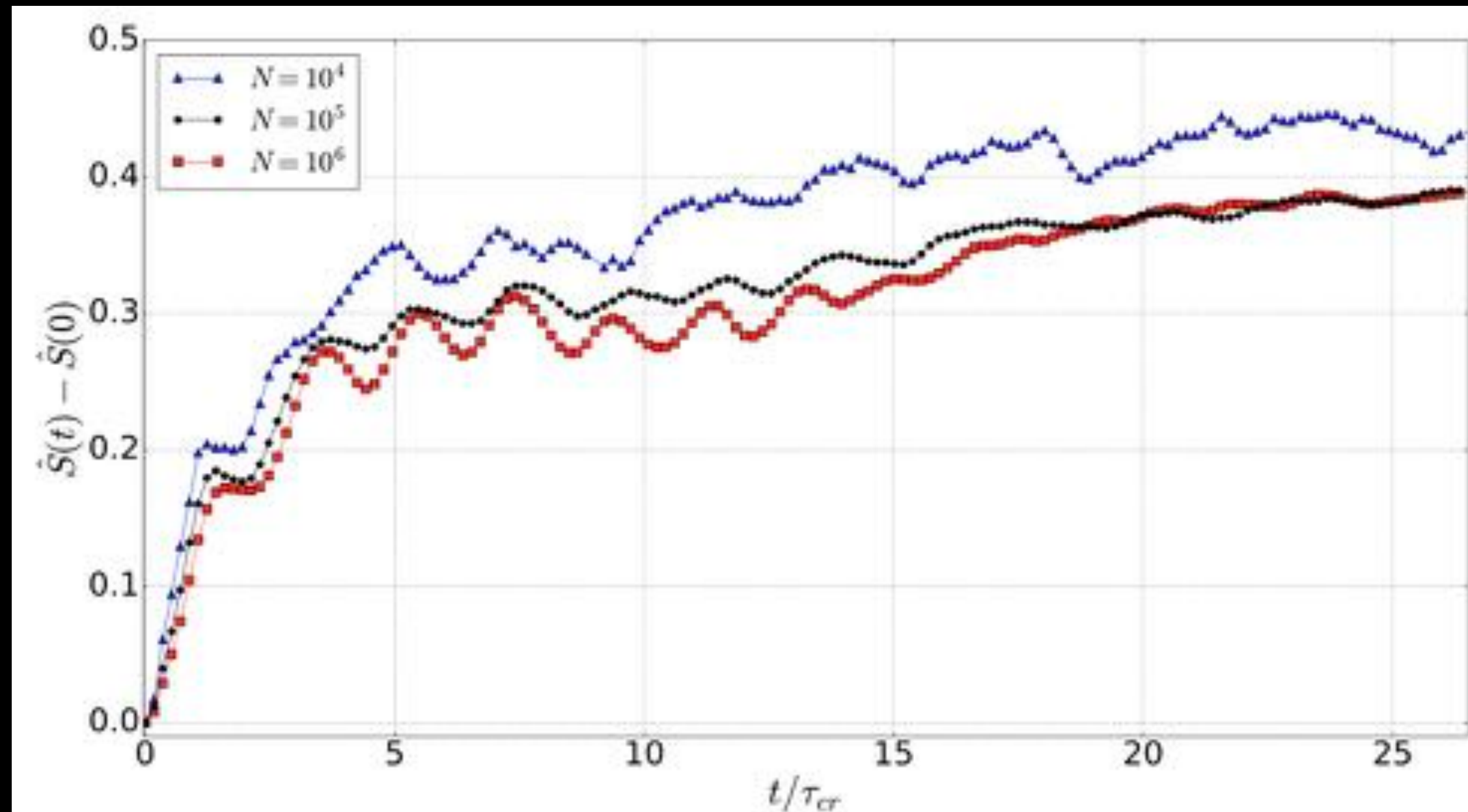
# A história da galáxia de Andrômeda

- A rotação de Andrômeda vista pelo DESI
- História de evolução c/ simulações





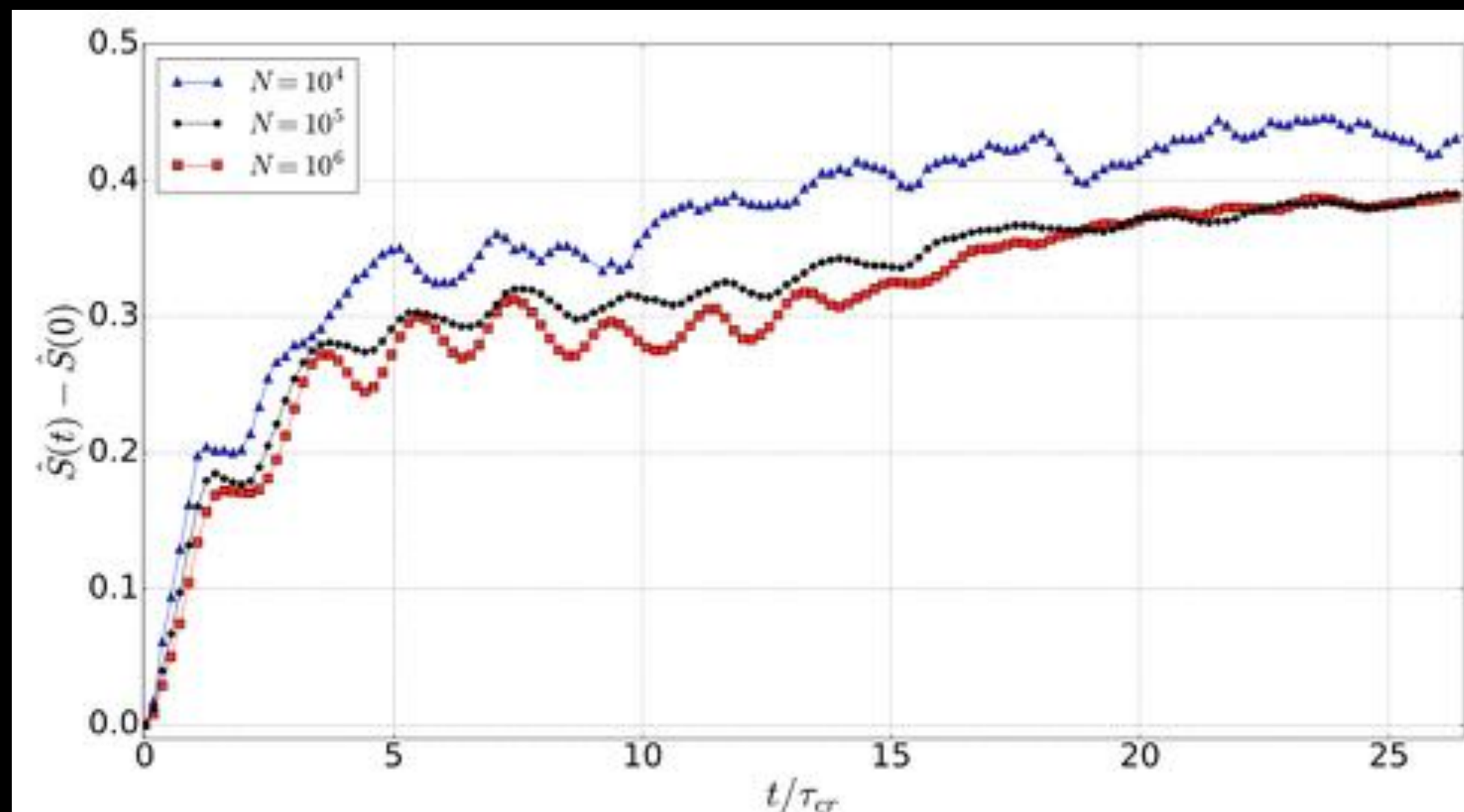
# Evolução cinética e estimadores de entropia



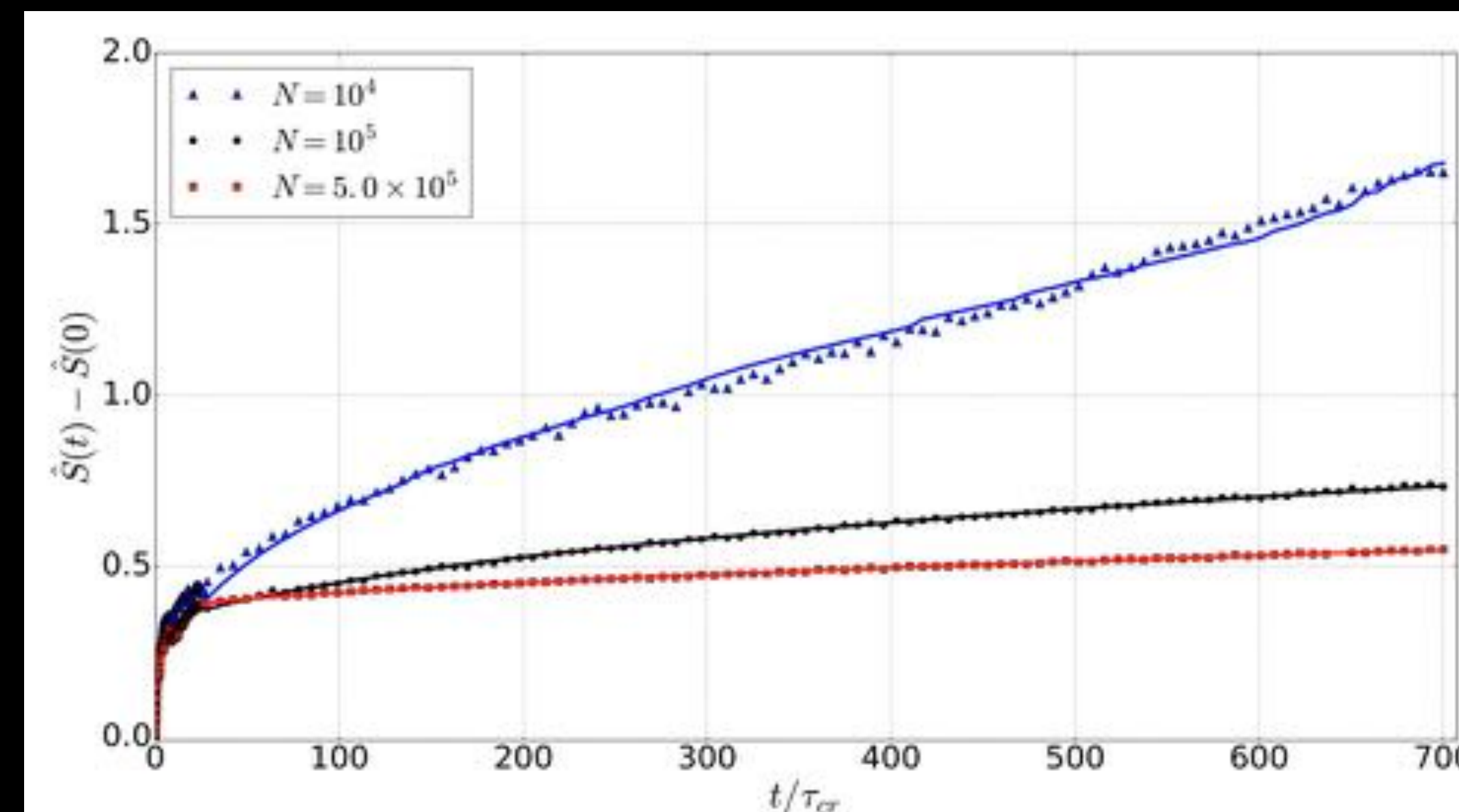
Beraldo e Silva+ 2017



# Evolução cinética e estimadores de entropia



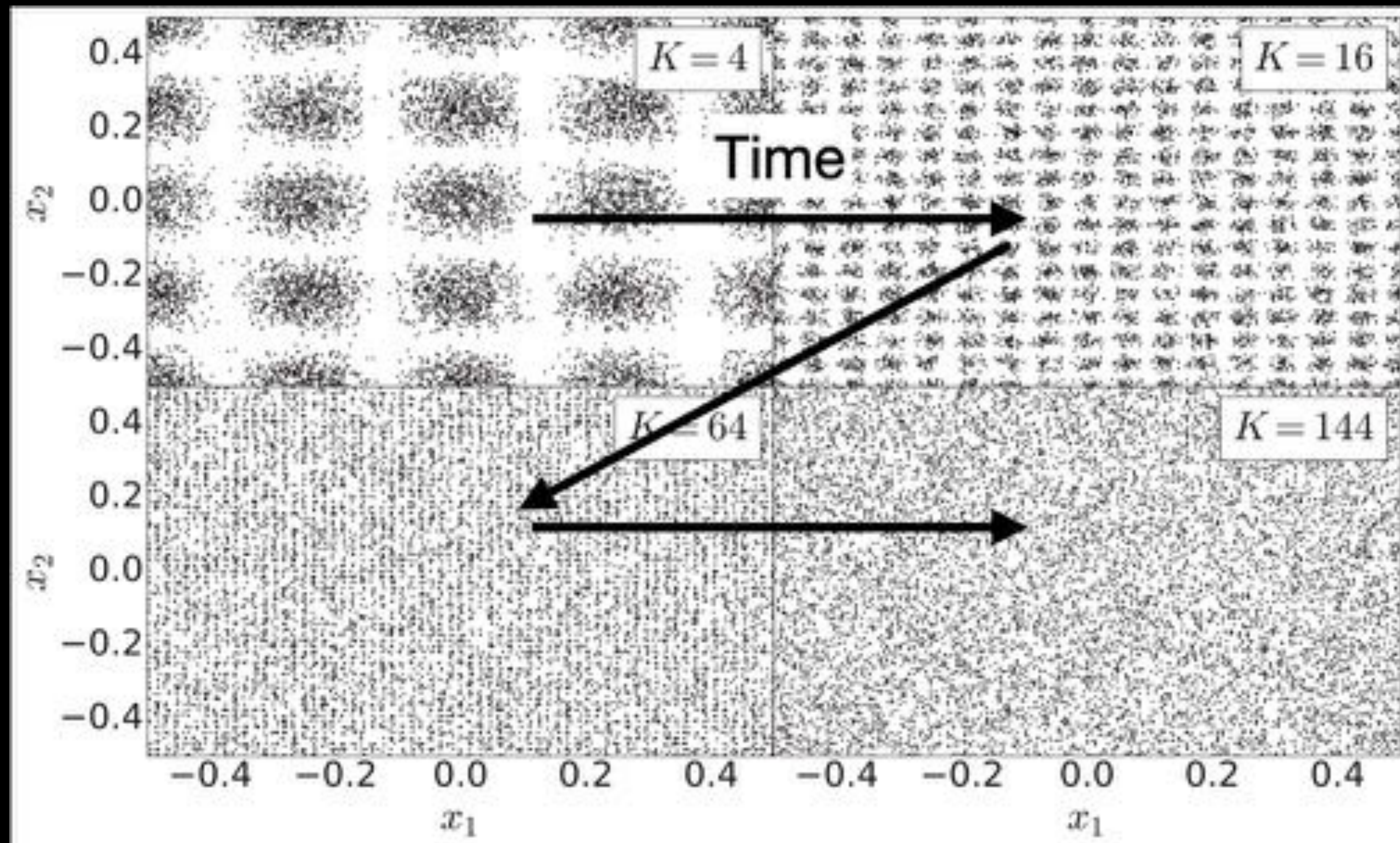
Beraldo e Silva+ 2017



Beraldo e Silva+ 2017



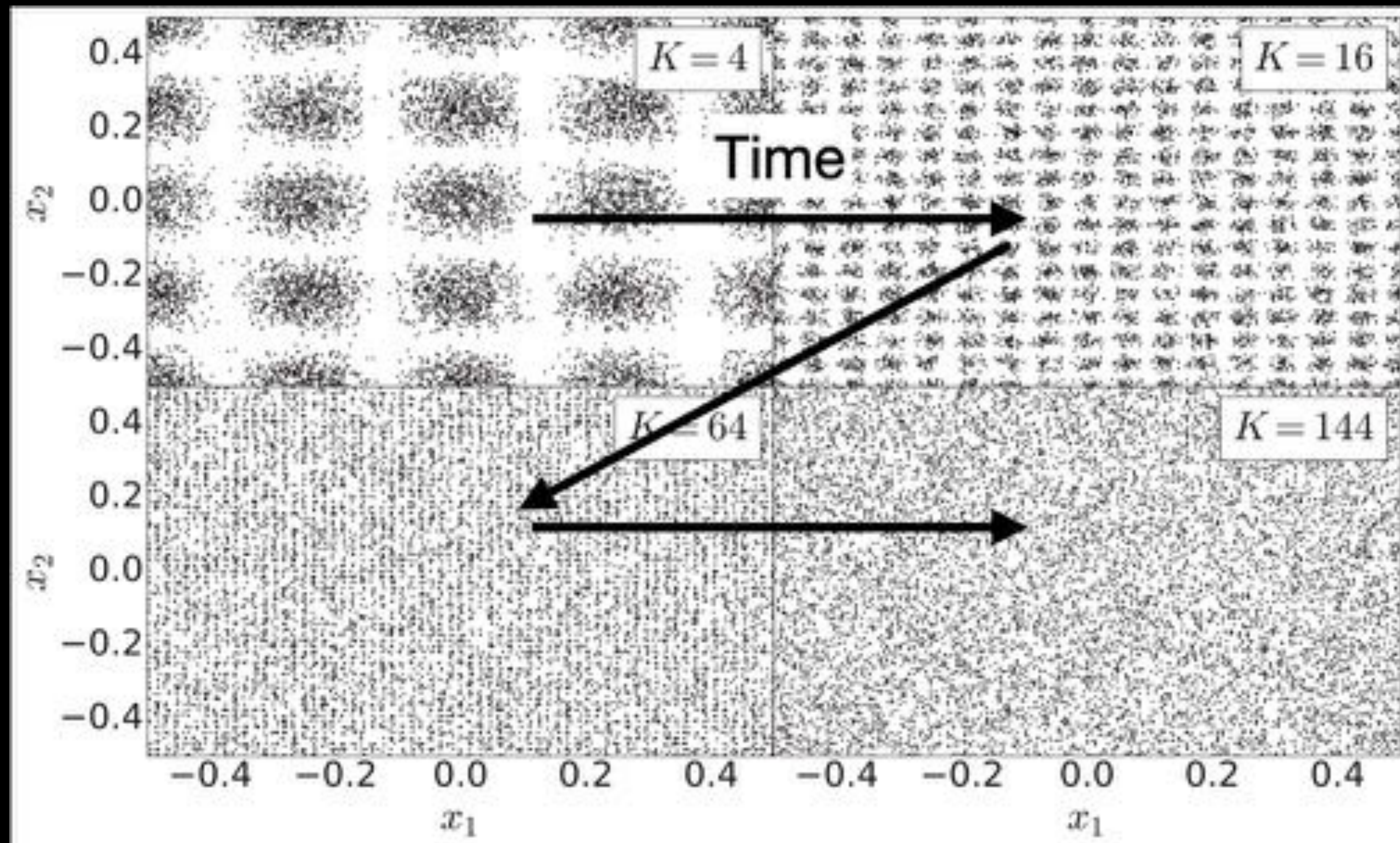
# Evolução cinética e estimadores de entropia



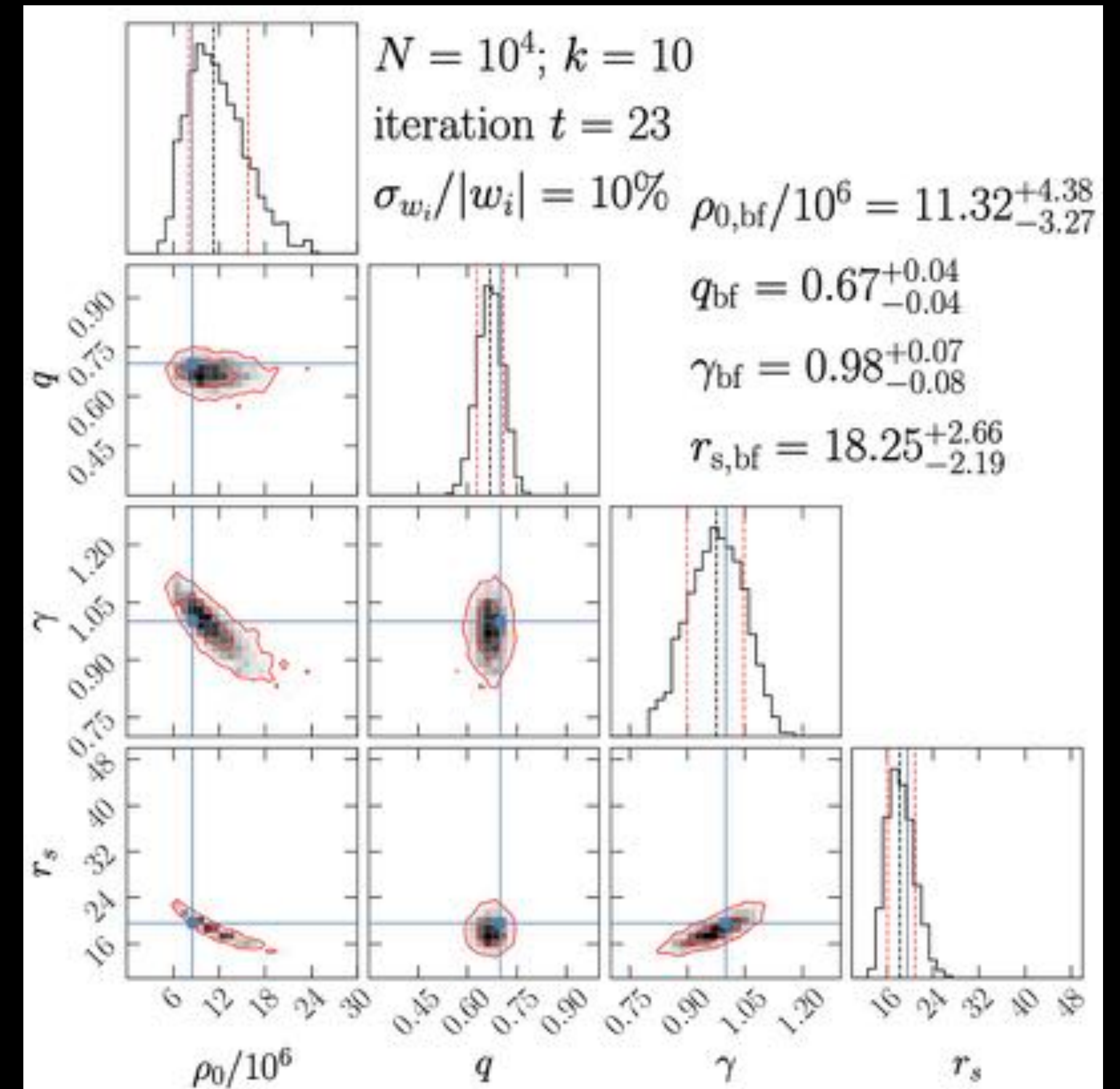
Beraldo e Silva+ 2019



# Evolução cinética e estimadores de entropia



Beraldo e Silva+ 2019



Beraldo e Silva+ 2025



# Galáxias: da Via Láctea ao tecido cósmico

Fim

Curso de Inverno 2025 - Observatório Nacional

Leandro Beraldo e Silva - lberaldoesilva@on.br

[lberaldoesilva.github.io](https://lberaldoesilva.github.io)