

Distâncias Astronômicas

A Importância da Informação da Distância

Escalas de Distâncias do Universo

Estimativas de Distância em Pequena Escala

Método da Paralaxe Trigonométrica

Método da Vela Padrão

Sandra dos Anjos

<http://astroweb.iag.usp.br/~aga210/>

Hierarquização das Estruturas do Universo

JOURNEY INTO THE UNIVERSE THROUGH TIME AND SPACE

"My suspicion is that the universe is not only queerer than we suppose, but queerer than we can suppose." — J.B.S. HALDANE

WHEN PRIMITIVE MAN gazed at the void of heaven, his eye discerned at most a few thousand stars—a serene and limited universe. But now, far beyond the range of feeble sight, out on the limitless curve of space and time, science has revealed a universe of unimaginable size and inconceivable violence. Billions upon billions of stars—like our sun—burn with the energy of a thermonuclear furnace. Many die in explosions that litter the reaches of space with gas and dust from which new stars and planets are born.

And from the vastness beyond the congregations of stars come the murmur, in microwaves, of the most cataclysmic event of all—the big bang of creation.

When time began—perhaps as long as twenty billion years ago—all mass and energy were compressed almost to infinite density and heated to trillions upon trillions of degrees. A cosmic explosion rent that featureless mass, creating a rapidly expanding fireball. It has been cooling and slowing ever since.

At first the universe was an impenetrable haze. During the first million years, temperatures dropped to 3000 kelvins (3000 degrees above absolute zero). Neutral captured electrons, producing atoms that formed an unsettled gas of hydrogen and some helium. The universe cleared and everywhere blazed with light. Denser regions of gas, pulled together by their own gravity, resulted into stars collected in aggregations called galaxies. Today's universe continues to expand. The early radiation, cooled by the expansion to 3K, can be detected in every direction by radio telescopes—the remnant echo of the big bang.

But what came before the big bang, and how will it all end? Billions of years hence, will gravity overcome the expansion and pull all matter back into its primordial state—in a big crunch? And if the universe is closed, might another big bang follow, with another expansion? Or, as many astronomers now believe, will an ever expanding, or open, universe end in a whimper, its galaxies scattered irrevocably, their star fires spent and cold? For now, the questions are the domain of the philosopher as well as the astronomer.

Produced by the Cartographic Division
National Geographic Society
SUBMIT IN GREEN INK, PRESENT

NATIONAL GEOGRAPHIC MAGAZINE

EDITOR: GUY T. CLARKE
DESK: GUY T. CLARKE, JIM SPURGEON
ART: JIM SPURGEON, JIM SPURGEON
DESIGN: JIM SPURGEON, JIM SPURGEON
PHOTOGRAPHERS: JIM SPURGEON, JIM SPURGEON
ILLUSTRATORS: JIM SPURGEON, JIM SPURGEON
COPYRIGHT: © 1984 NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY, WASHINGTON, D.C.

4. LOCAL GROUP

Beyond the Milky Way we have isolated galaxies in every direction. Our own is part of a loosely bound cluster of some 20 galaxies, called provisionally the Local Group. "Galaxies are to astronomers what atoms are to physicists," astronomer Allan Sandage has said, and this group illustrates the variations. The Milky Way, its sister Andromeda (M31), and the smaller M32 are fast-moving spirals. Hundreds of star clusters and dust clouds lie within the boundaries. The irregular galaxy NGC 205 is a companion galaxy, consisting mainly of old stars. The Large and Small Magellanic Clouds are irregular galaxies, described as haze in the middle sky by Magellan's crew in 1520. These member galaxies, all members in motion, may be held together by gravity, even as the universe expands.

6. KNOWN UNIVERSE

In whatever direction we look into deep space, we can detect clusters of galaxies and superclusters, all moving away from us. Toward the observable horizon, we see quasars—quasi-stellar objects—with the uniform glow of radiation from the big bang. There is no center, any observer anywhere would see this same effect. The universe is isotropic; that is, it looks the same in every direction.

Quasars, the most distant objects yet observed, are among the most curious and the most energetic. Each of the brightest quasars emits the energy of hundreds of galaxies from a volume far smaller than our Milky Way; each is probably the violent nucleus of a distant galaxy. The farthest quasars are racing away from us at more than 90 percent the speed of light. Their light traveled billions of years to reach us. During that time they evolved, and what they are like today we have no way of knowing. To look at such objects is to see the universe as it was billions of years ago.

- Superclusters
- Clusters of galaxies
- Quasars

Quasars (1 through 5), with grids measured in light-years, show morphology and distance. To each galaxy is indicated the relative position of stars within the galaxies. The lines connect a quasar to a galaxy with a radius of 20 billion light-years.

Letters and numbers refer to satellite galaxies, such as A 208 in the M51 family of rich clusters. M stands for Messier, and NGC for New General Catalogue.

5. LOCAL SUPERCLUSTER

Clusters of galaxies—the fleets of thousands in superclusters, the largest of celestial formations. Virgo, the closest rich cluster to our Local Group, is some 50 million light-years away, near the center of our local supercluster. It is considered rich because it has thousands of member galaxies.

Existing new observations of superclusters have shown tremendous volumes of relatively empty space, or voids, between superclusters. Some cosmologists speculate that the universe resembles a sponge in which the superclusters are interconnected, resembling thin filaments stretching between giant voids.

Astronomers calculate the masses of rich clusters as one way to estimate the density of matter in the universe. If that density is at or below a critical number, matter will fly apart forever in the expansion initiated by the big bang. If the density is greater, gravitational braking will slow the matter until the universe falls back together.

- Clusters of galaxies
- Single galaxies

3. MILKY WAY GALAXY

Our galaxy was thought to be the only one until discoveries in the 1920s showed it is only one of billions of others. It is a representative spiral galaxy with the light of billions of stars. The galaxy's oldest stars are 10 to 15 billion years old, and are concentrated in the spiral arms. Gas and dust are forming new stars. In one place, 200 million years, traveling at 100 miles per hour, are swept up and compressed by a large halo of interstellar and dark, unseen matter.

SUN AND NEAR PLANETS

A vast cloud of gas and dust collapses some 4.6 billion years ago. Compression spawns a star in the hot of the rotating disk-shaped mass, and our sun's thermonuclear furnace ignites. Various materials condense from the cooling disk, cooling, and condense to form the planets. The three terrestrial, or earthlike, planets shown here are solid spheres with metallic cores. Earth and Venus possess atmospheres, but only earth's sustains life. After our middle-aged sun exhausts its hydrogen fuel, it will expand, devouring Mercury and Venus and turning the earth into a steam-heated inferno.

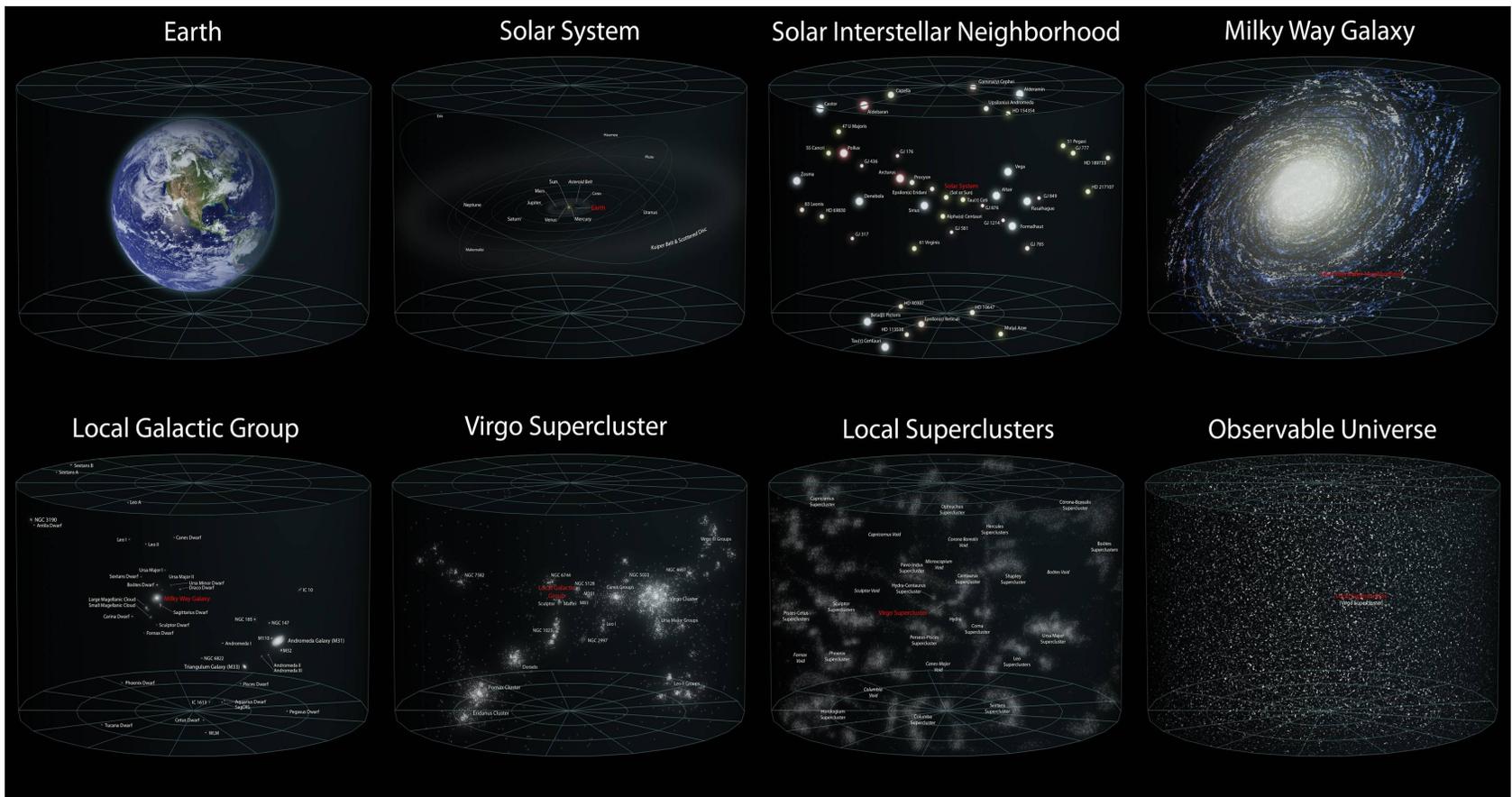
2. SUN'S NEIGHBORS

The sun is in universal terms an ordinary yellow star, shown here with 20 closest neighbors. Distances are given in light-years—how far light travels in one year at almost 300,000 kilometers (186,000 miles) a second. Sunlight, for instance, takes a full 8 minutes to cross the 150 million km to our windows. That same light travels 9 more hours before reaching the planet Pluto. After about 4 years 4 months it reaches Alpha Centauri, our nearest stellar neighbor, 4.3 light-years, or 40 trillion km away.

Alpha Centauri is actually a multiple system with three stars locked by gravity in orbit around each other. Indeed many stars are binary or multiple stars. Though some are more likely to have planetary systems than our own. The Solar System to be orbited soon would create just Jupiter-size planet associated with Bernard's star, almost 6 light-years away.

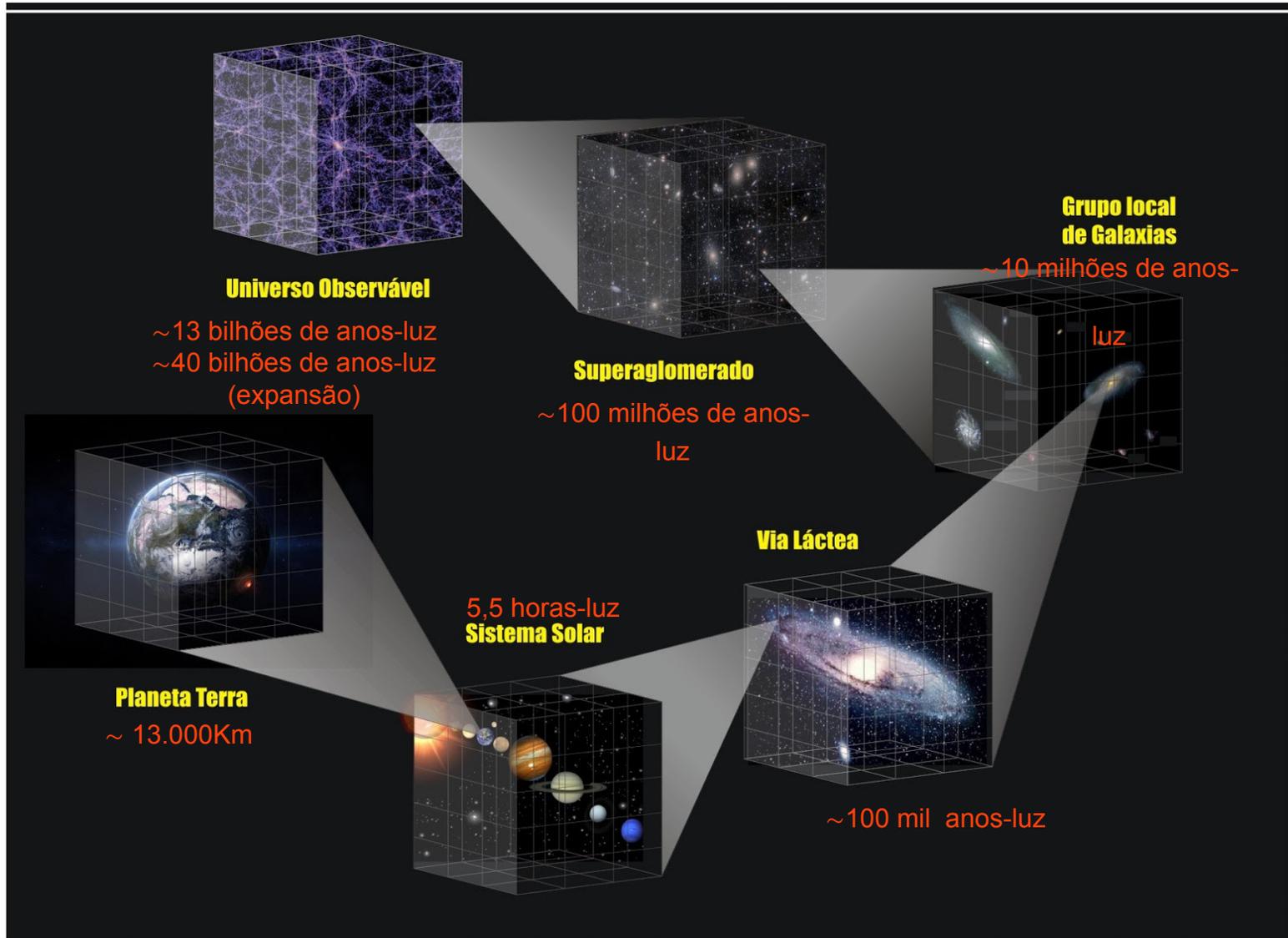
APPARENT MAGNITUDE

- 0-1.5: Very bright stars
- +1.5 to +2.0: Visible with binoculars in a small telescope
- +2.0 to +3.0: Visible with a small telescope
- +3.0 to +4.0: Visible with a medium telescope
- +4.0 to +5.0: Visible with a large telescope
- +5.0 to +6.0: Visible with a very large telescope
- +6.0 to +7.0: Visible with a very large telescope
- +7.0 to +8.0: Visible with a very large telescope
- +8.0 to +9.0: Visible with a very large telescope
- +9.0 to +10.0: Visible with a very large telescope
- +10.0 to +11.0: Visible with a very large telescope
- +11.0 to +12.0: Visible with a very large telescope
- +12.0 to +13.0: Visible with a very large telescope
- +13.0 to +14.0: Visible with a very large telescope
- +14.0 to +15.0: Visible with a very large telescope
- +15.0 to +16.0: Visible with a very large telescope
- +16.0 to +17.0: Visible with a very large telescope
- +17.0 to +18.0: Visible with a very large telescope
- +18.0 to +19.0: Visible with a very large telescope
- +19.0 to +20.0: Visible with a very large telescope



Mas...,surpreendentemente, em escalas maiores do que da ordem de bilhões de anos-luz (“grande escala”) → Universo é HOMOGÊNIO...!

Escalas de Dimensões no Universo → “anos-luz”



Vamos ver então como é definido “ano-luz” seus múltiplos e submúltiplos...e outras unidades utilizadas na Astronomia e Astrofísica

Escalas de Dimensões e Distâncias no Universo

O sistema de unidades oficial utilizado por Físicos e Astrônomo é o “Sistema Internacional – SI”

- Distâncias (**D**) são expressas em metros (**m**)
- Massas (**M**) em kilograma (**kg**)
- Tempo (**T**) em segundos (**s**)

Para lidar com a amplitude de valores utilizados em astronomia e astrofísica, utiliza-se notação científica, nos quais os números são expressos em **potências de 10**. Abaixo, damos alguns exemplos aproximados para entender a necessidade deste tipo de notação.

--> **Dimensões atômicas típicas = 0,0000000001 m = 10^{-10} a 10^{-9} m**

--> **Dimensões Planetas = 1.000.000 = 10^6 a 10^7 m**

--> **Distância Terra-Sol = 150.000.000 km = 1.5×10^8 km = 1 UA**

--> **Dimensão do Sistema Solar = 10.000.000.000 km = 1×10^{10} km**

--> **Dimensão da Via Láctea = 120.000.000.000.000.000 km = 1.2×10^{17} km**

--> **Dimensão de SuperAglom. = 1.000.000.000.000.000.000.000 km = 1×10^{21} km**

Definição de algumas Unidades Especiais Convenientes na Astronomia

Algumas unidades especiais são utilizadas por astrônomos para facilitar a compreensão, manipulação e comparação de medidas, são elas:

- **Unidade Astronômica (U.A)** = Definida como sendo a distância média entre Terra-Sol

$$1 \text{ UA} = \mathbf{150.000.000 \text{ km}} = 1,5 \times 10^{11} \text{ m} \text{ ou } 1,5 \times 10^8 \text{ km}$$

- **Ano-luz (A.L)** = Distância que a luz percorre em 1 ano, **no vácuo**, com velocidade da luz (c). É, portanto, uma síntese, uma medida de distância em 4 dimensões (pois leva em conta 3 dimensões espaciais e uma de tempo – ver aula 6; relatividade).

$$1 \text{ AL} = 9,5 \times 10^{15} \text{ m} \text{ ou } 9,5 \times 10^{12} \text{ km}$$

- **Parsec (pc)** = Distância na qual um astro teria com uma “paralaxe” de 1 segundo de arco

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ A.L}$$

* Paralaxe é diferença na posição aparente de um objeto visto por observadores em locais distintos. A medida da paralaxe é feita a partir de medidas de triangulação para obtenção de um ângulo....

Vamos entender melhor a seguir, os submúltiplos de Ano-Luz (AL) e a definição de Parsec (pc)

Ano-Luz e Sub-Multiplos

É comum e útil utilizarmos também as sub-unidades do ano-luz tais como a hora-luz, o minuto-luz e o segundo-luz

Uma **hora-luz** é a distância percorrida pela luz em uma hora. Ela corresponde a **1 079 252 820 km**

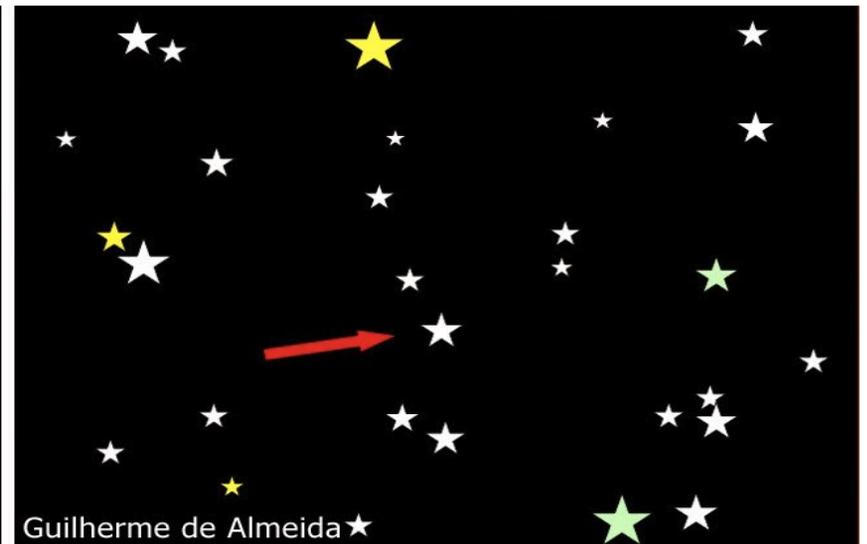
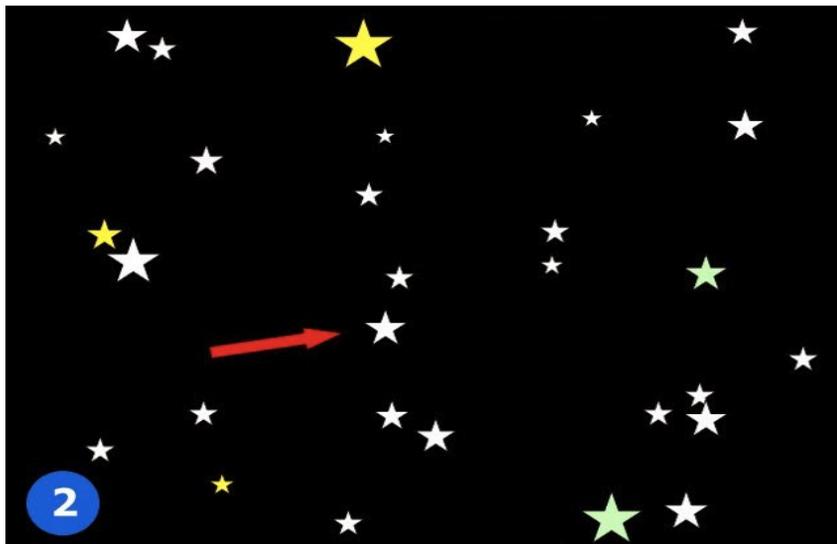
Um **minuto-luz** é a distância percorrida pela luz em um minuto. Ele corresponde a **17 987 547 km.**

Um **segundo-luz** é a distância percorrida pela luz em um segundo. Ele corresponde a **299 792 km.**

Importante: o ano-luz e seus submúltiplos, hora-luz, minuto-luz e segundo-luz, **são unidades de medida de distância e não de tempo.**

Estimativa de distância via método de paralaxe

O que é paralaxe?



Definição de Paralaxe e do Parsec...



Definição de Paralaxe

Alteração aparente de um objeto contra um fundo de estrelas devido ao movimento do observador (Fig.1)

É o ângulo (p) formado pelas semiretas que partem do centro de um astro e vão ter, uma ao centro da Terra, outra ao ponto onde se acha o observador.

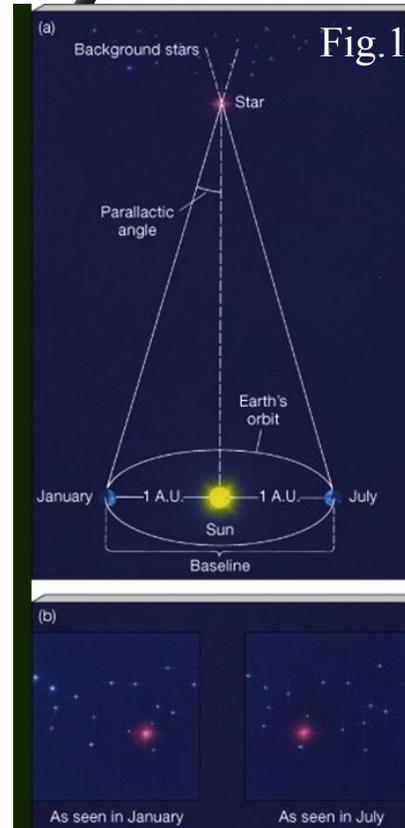


Fig.1

II. Paralaxe estelar

- Estende-se a linha de base para o diâmetro da órbita da terra
- **definição:** 1pc = distância sol-estrela se a paralaxe medida for de 1''

$$D(\text{pc}) = \frac{1}{\text{paralaxe}('')}$$

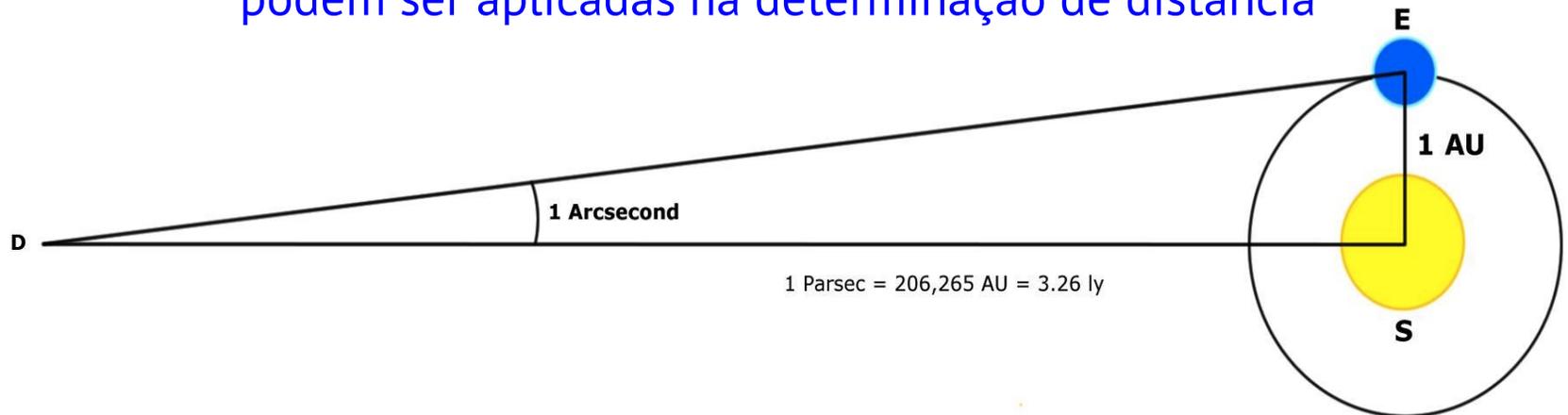
aplicável as estrelas mais próximas (até ~ 30 pc)

alguns milhares de estrelas

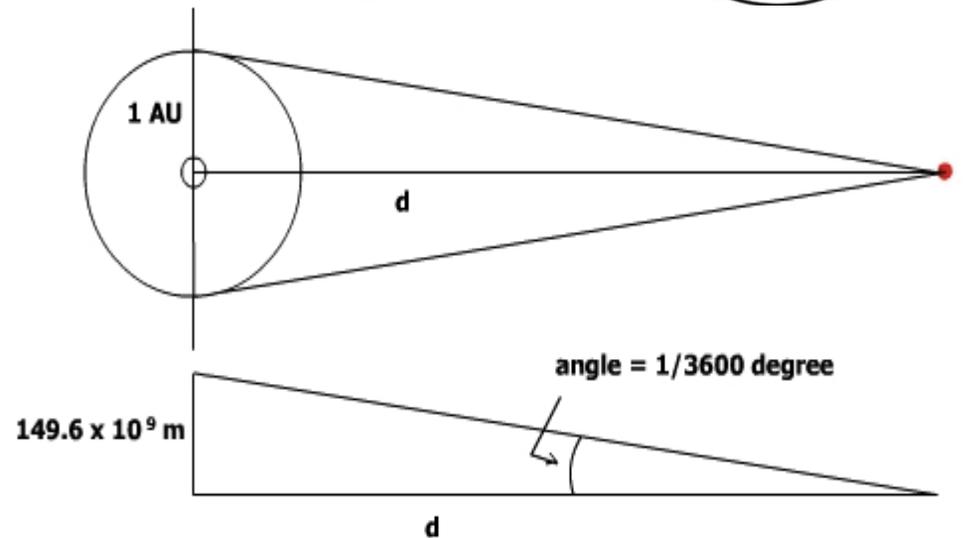
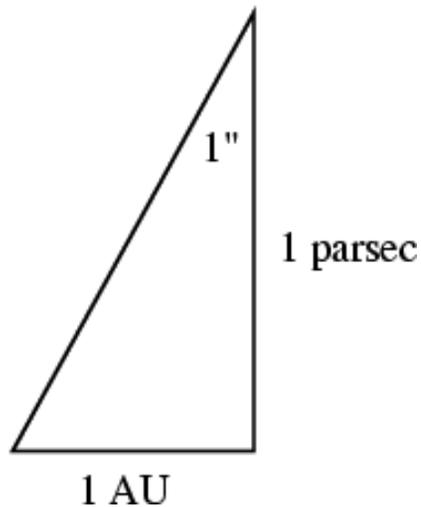
método dependente do *seeing*

Parsec: unidade de distancia definida a partir do raio de órbita da Terra quando é visto sob um ângulo de $1'' \rightarrow 1 \text{ pc} = 3,26 \text{ A.L}$

Visualizando as relações trigonométricas que definem o parsec e que podem ser aplicadas na determinação de distância



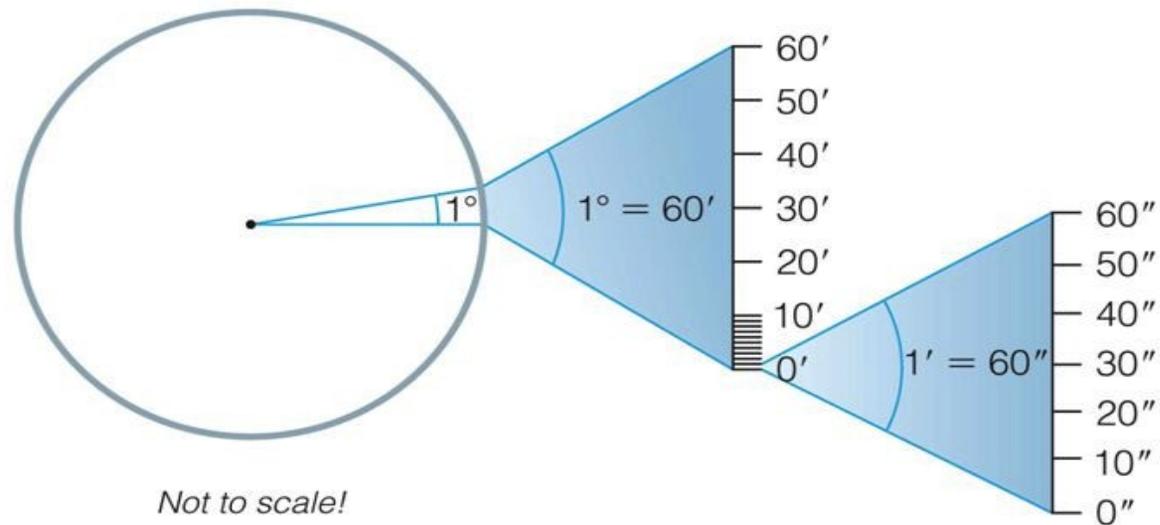
$$\tan(1'') = \frac{1 \text{ AU}}{1 \text{ pc}}$$



$$\tan(1/3600) = \frac{149.6 \times 10^9 \text{ m}}{d} \quad \text{so } d = \frac{149.6 \times 10^9 \text{ m}}{\tan(1/3600)} = 3.08 \times 10^{16} \text{ m}$$

lembrando de algumas definições de medidas angulares

- Full circle = 360°
- $1^\circ = 60'$ (arcminutes)
- $1' = 60''$ (arcseconds)



Not to scale!

More Precisely... *Astronomical Measurement*

Astronomers use many different kinds of units in their work, simply because no single system of units will do. Rather than the *Système Internationale* (SI), or meter-kilogram-second (MKS), metric system used in most high school and college science classes, many professional astronomers still prefer the older centimeter-gram-second (CGS) system. However, astronomers also commonly introduce new units when convenient. For example, when discussing stars, the mass and radius of the Sun are often used as reference points. The solar mass, written as M_{\odot} , is equal to 2.0×10^{33} g, or 2.0×10^{30} kg (since $1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$). The solar radius, R_{\odot} , is equal to 700,000 km, or 7.0×10^8 m ($1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$). The subscript \odot always stands for Sun. Similarly, the subscript \oplus always stands for Earth. In this book, we will use the units that astronomers commonly use in any given context, but we will also give the “standard” SI equivalents where appropriate.

Of particular importance are the units of length astronomers use. On small scales, the *angstrom* ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$), the *nanometer* ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm}$), and the *micron* ($1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 10^{-4} \text{ cm}$) are used. Distances within the solar system are usually expressed in terms of the *astro-*

nomical unit (A.U.), the mean distance between Earth and the Sun. One A.U. is approximately equal to 150,000,000 km, or $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$. On larger scales, the *light year* ($1 \text{ ly} = 9.5 \times 10^{15} \text{ m} = 9.5 \times 10^{12} \text{ km}$) and the *parsec* ($1 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{16} \text{ m} = 3.1 \times 10^{13} \text{ km} = 3.3 \text{ ly}$) are commonly used. Still larger distances use the regular prefixes of the metric system: *kilo* for one thousand and *mega* for one million. Thus, 1 *kiloparsec* (kpc) = $10^3 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{19} \text{ m}$, 10 *megaparsecs* (Mpc) = $10^7 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{23} \text{ m}$, and so on.

Astronomers use units that make sense within a context, and as contexts change, so do the units. For example, we might measure densities in grams per cubic centimeter (g/cm^3), in atoms per cubic meter (atoms/m^3), or even in solar masses per cubic megaparsec (M_{\odot}/Mpc^3), depending on the circumstances. The important thing to know is that once you understand the units, you can convert freely from one set to another. For example, the radius of the Sun could equally well be written as $R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$, or $6.96 \times 10^{10} \text{ cm}$, or $109 R_{\oplus}$, or $4.65 \times 10^{-3} \text{ A.U.}$, or even $7.36 \times 10^{-8} \text{ ly}$ —whichever happens to be most useful. Some of the more common units used in astronomy, and the contexts in which they are most likely to be encountered, follow.

Tabela 1 – Unidades e Medidas Astronômicas

Length:

1 angstrom (Å)	= 10^{-10} m	atomic physics, spectroscopy
1 nanometer (nm)	= 10^{-9} m	
1 micron (μm)	= 10^{-6} m	interstellar dust and gas
1 centimeter (cm)	= 0.01 m	in widespread use
1 meter (m)	= 100 cm	throughout all
1 kilometer (km)	= 1000 m = 10^5 cm	astronomy
Earth radius (R_{\oplus})	= 6378 km	planetary astronomy
Solar radius (R_{\odot})	= 6.96×10^8 m	solar system, stellar evolution
1 astronomical unit (A.U.)	= 1.496×10^{11} m	
1 light year (ly)	= 9.46×10^{15} m = 63,200 A.U.	galactic astronomy, stars and star clusters
1 parsec (pc)	= 3.09×10^{16} m = 3.26 ly	
1 kiloparsec (kpc)	= 1000 pc	galaxies, galaxy clusters,
1 megaparsec (Mpc)	= 1000 kpc	cosmology

Mass:

1 gram (g)		in widespread use in many different areas
1 kilogram (kg)	= 1000 g	
Earth mass (M_{\oplus})	= 5.98×10^{24} kg	planetary astronomy
Solar mass (M_{\odot})	= 1.99×10^{30} kg	“standard” unit for all mass scales larger than Earth

Time:

1 second (s)		in widespread use throughout astronomy
1 hour (h)	= 3600 s	planetary and stellar scales
1 day (d)	= 86400 s	
1 year (yr)	= 3.16×10^7 s	virtually all processes occurring on scales larger than a star

Tabela 2 – Constantes Úteis e Medidas Físicas

Some Useful Constants and Physical Measurements*

astronomical unit	1 A.U. = 1.496×10^8 km (1.5×10^8 km)
light year	1 ly = 9.46×10^{12} km (10^{13} km; 6 trillion miles)
parsec	1 pc = 3.09×10^{13} km = 3.3 ly
speed of light	$c = 299,792.458$ km/s (3×10^5 km/s)
Stefan-Boltzmann constant	σ [Greek sigma] = 5.67×10^{-8} W/m ² · K ⁴
Planck's constant	$h = 6.63 \times 10^{-34}$ Js
gravitational constant	$G = 6.67 \times 10^{-11}$ Nm ² /kg ²
mass of the Earth	$M_{\oplus} = 5.97 \times 10^{24}$ kg (6×10^{24} kg; about 6000 billion billion tons)
radius of the Earth	$R_{\oplus} = 6378$ km (6500 km)
mass of the Sun	$M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30}$ kg (2×10^{30} kg)
radius of the Sun	$R_{\odot} = 6.96 \times 10^5$ km (7×10^5 km)
luminosity of the Sun	$L_{\odot} = 3.90 \times 10^{26}$ W
effective temperature of the Sun	$T_{\odot} = 5778$ K (5800 K)
Hubble constant	$H_0 \approx 75$ km/s/Mpc
mass of the electron	$m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg
mass of the proton	$m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg

*The rounded-off values used in the text are shown in parentheses.

Conversions between English and Metric Units

1 inch	=	2.54 centimeters (cm)	1 mile	=	1.609 kilometers (km)
1 foot (ft)	=	0.3048 meters (m)	1 pound (lb)	=	453.6 grams (g) or .4536 kilograms (kg) (on Earth)

Outras Escalas e Medidas Úteis

- Distancias: U.A, a.l, pc, Kpc (10^3), M (10^6)pc
- Unidades de tempo: Mega-ano = My (10^6), Giga-ano = Gy (10^9)
- Unidades de Energia e seus Múltiplos:

Eletron-volt (eV) - é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \ 177 \ 33 \ (49) \times 10^{-19} \text{ joules.}$$

$$1 \text{ keV (quilo eV): mil elétrons-volt} = 10^3 \text{ elétrons-volt (eV)}$$

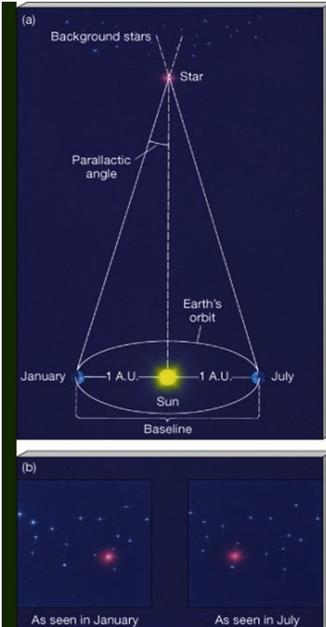
$$1 \text{ MeV (mega eV): 1 milhão de elétrons-volt} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV (giga eV): 1 bilhão (mil milhões) de elétrons-volt} = 10^9 \text{ (eV)}$$

$$1 \text{ TeV (tera eV): 1 trilhão (mil bilhões) de elétrons-volt} = 10^{12} \text{ (eV)}$$

Distâncias

Vimos que no Sistema Solar é comum utilizar unidades de distância tais como Unidade Astronomica e Parsec.



II. Paralaxe estelar

- Estende-se a linha de base para o diâmetro da órbita da terra
- definição: 1pc = distância sol-estrela se a paralaxe medida for de 1''

$$D(\text{pc}) = \frac{1}{\text{paralaxe}(\text{''})}$$

aplicável as estrelas mais próximas (até ~ 30 pc) ↷

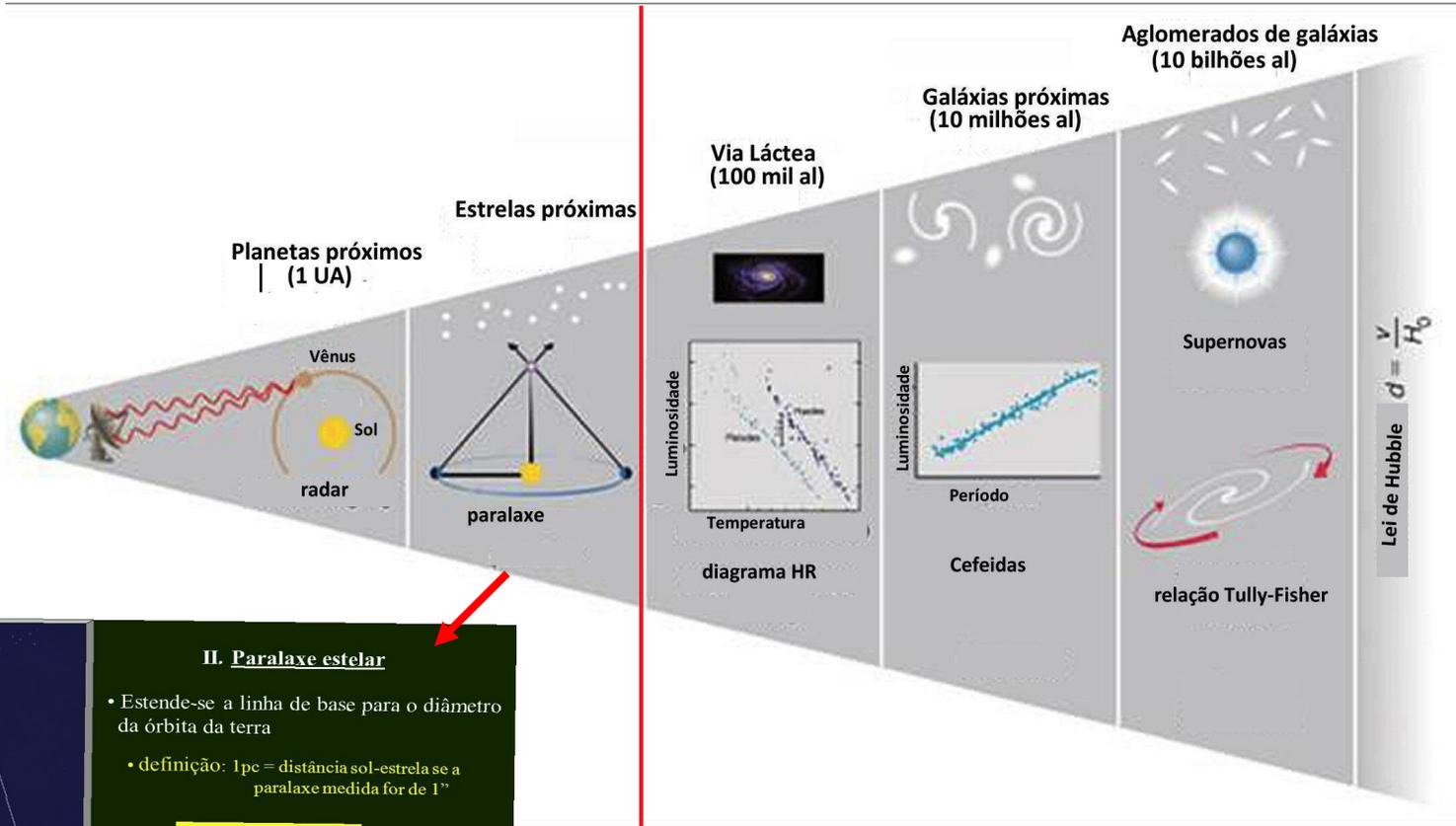
alguns milhares de estrelas

método dependente do *seeing*

Veremos outros métodos que permitem obter distância de objetos mais longínquos, já que este método é limitado

Métodos Indiretos que usam luminosidade = "Vela Padrão" (L) via Módulo de Distância

Métodos Diretos: geométricos
ou cinemáticos



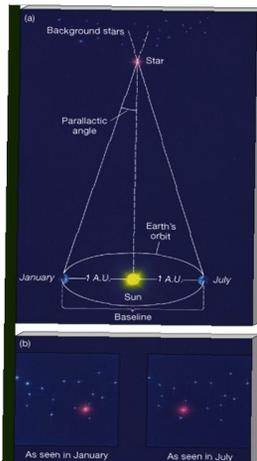
II. Paralaxe estelar

- Estende-se a linha de base para o diâmetro da órbita da terra
- definição: 1pc = distância sol-estrela se a paralaxe medida for de 1"

$$D(\text{pc}) = \frac{1}{\text{paralaxe}(\text{''})}$$

Aplicável as estrelas mais próximas, até (20 Kpc) alguns milhares de estrelas

método dependente do seeing



Obs: Telescópio Espacial Gaia tem medido distâncias da ordem de até 20Kpc (1 pc = 3,26 a.l)

Por que é fundamental estimar a distância de objetos astronômicos?

Não podemos medir diretamente a distância de um astro....

A **distância** é uma informação fundamental, apesar de **não** ser considerada uma **grandeza física fundamental**. Entretanto, esta informação nos permite obter algumas grandezas físicas fundamentais, como por exemplo, a **luminosidade, temperatura, dimensão, índice de cor, massa e composição química**. No caso de estrelas, pode estruturar e consolidar o estudo da Formação e Evolução Estelar.

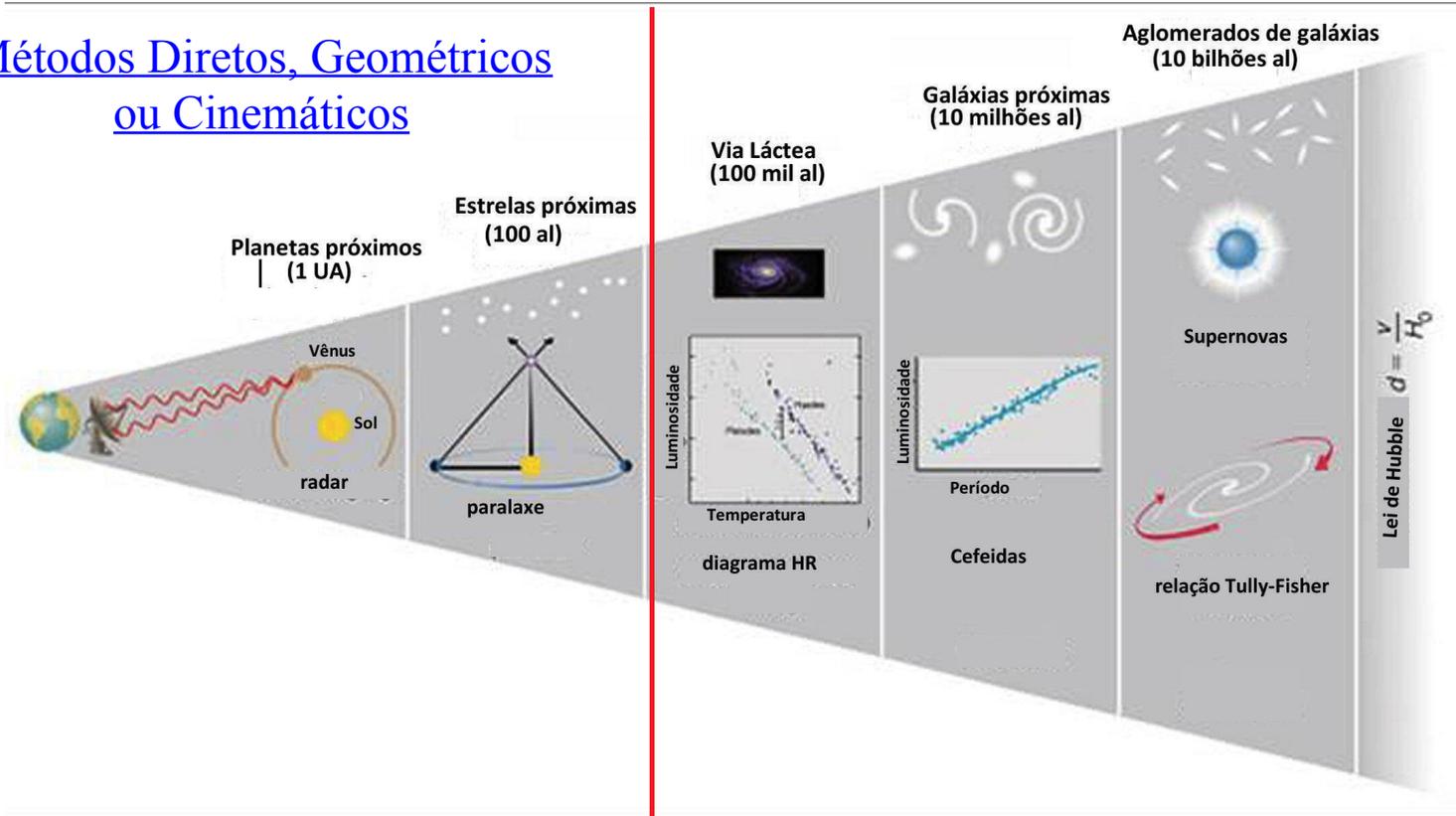
Existem da ordem de dezenas de métodos para se determinar a distância de estrelas, que agrupados poderiam ser representados por 2 categorias: **diretos ou cinemáticos, e os indiretos obtidos via luminosidade**.

Acabamos de ver que no Sistema Solar é possível aplicar métodos trigonométricos e cinemáticos até um **limite de distância de 100 a.l.**

Agora vamos ver outros métodos que permitem obter distâncias acima deste valor...

Métodos Indiretos que usam luminosidade = “Vela Padrão” (L)

Métodos Diretos, Geométricos ou Cinemáticos



Como estrelas tem movimento real, **métodos cinemáticos** são aplicados para se obter distâncias utilizando técnicas de **astrometria** - que permite medir a **posição das estrelas e a distância** e que podem medir a componente transversal do movimento através do chamado **“movimento próprio”**, como veremos a seguir.

Astrometria

medidas de posição e distância...

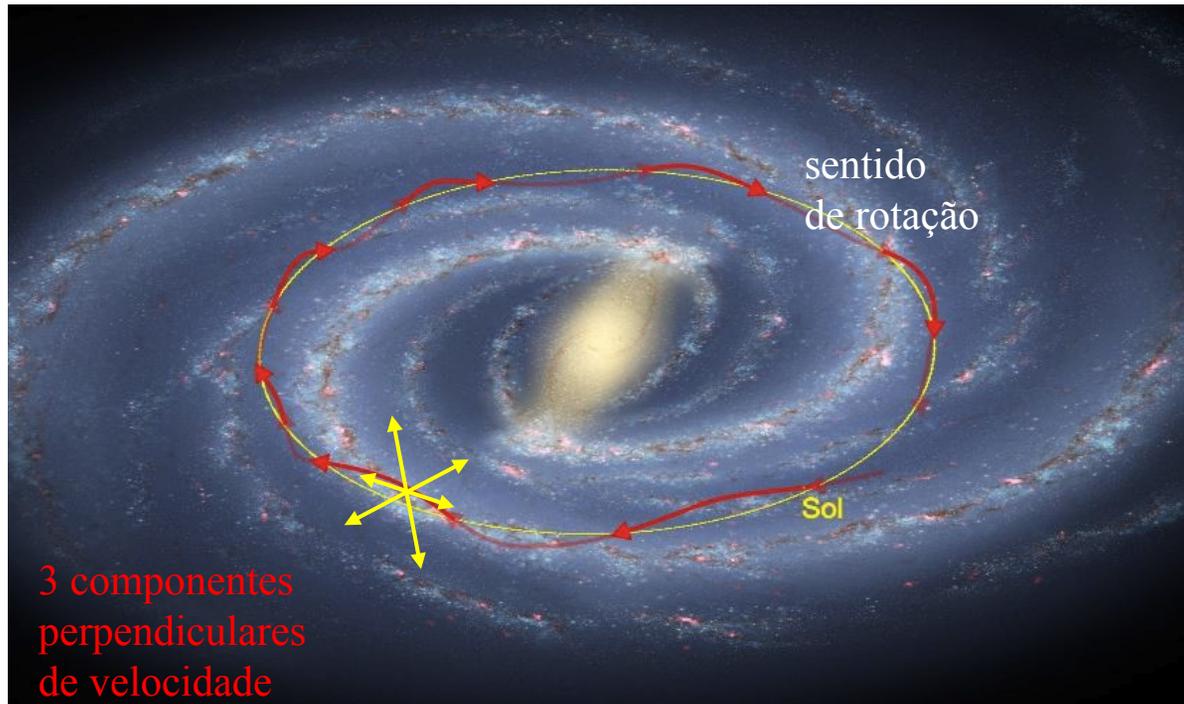
Medidas de posições de estrelas são importantes por vários motivos:

- 1- Repetidas medidas de posição podem revelar **movimentos de estrelas**.
- 2- Os **movimentos** permitem obter as distâncias das estrelas, já que o ângulo formado nestes movimentos pode ser medido. As distâncias estimadas fornecem a distribuição das estrelas, e conseqüentemente, a **estrutura da Galáxia**. Veremos a seguir....
- 3- Determinação da distância **de aglomerados de estrelas, onde o conjunto de estrelas** nasceu junto, permite estabelecer que a diversidade observada nas propriedades encontradas pode ser atribuídas a evolução.

Vimos anteriormente que distâncias de **estrelas próximas, até centenas de parsec**, podem ser obtidas através de **técnicas de trigonometria**, ou seja, através de **paralaxe estelar**. **A paralaxe estelar pode ser medida através do movimento da Terra em torno do Sol**, e mede o movimento aparente causado pela **paralaxe**. (ver próximo slide →)

Movimentos das Estrelas

...velocidade espacial das estrelas....



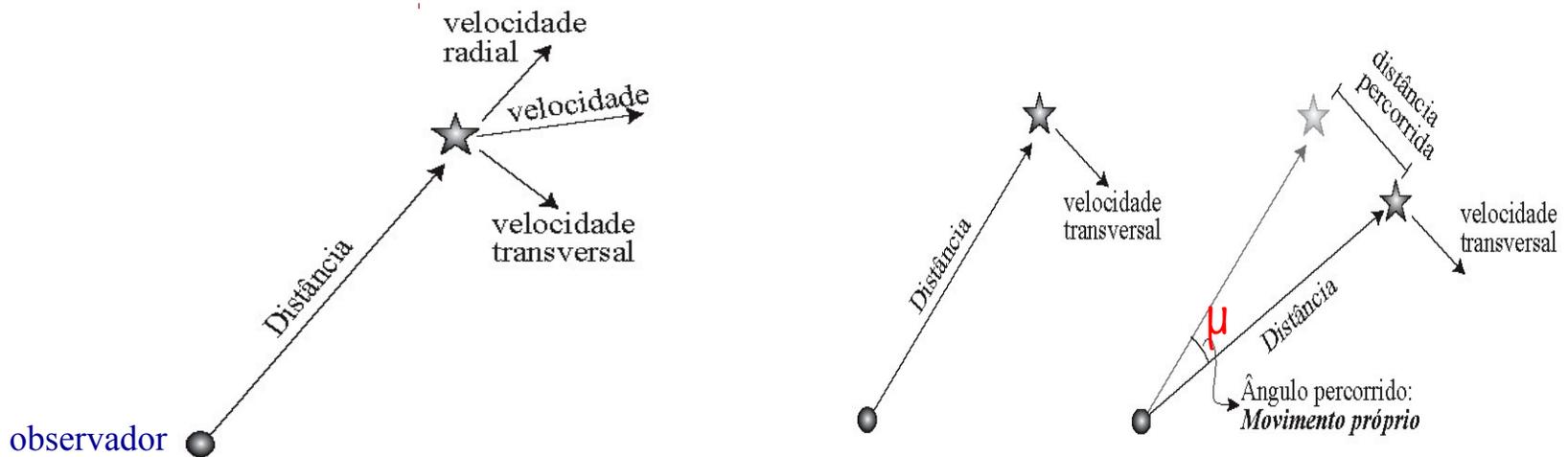
As estrelas giram em torno do centro Galáctico em um movimento organizado conhecido como **rotação diferencial**.

- Na posição do Sol a velocidade de rotação (v_r) é de ~ 220 km/s.
- As estrelas **também têm** uma velocidade aleatória ou dispersão de velocidade superposta, adicional, à rotação.
- Para estrelas próximas do Sol esta velocidade $V \sim 10 - 40$ km/s.

Movimento das Estrelas

...velocidade espacial pode ser decomposta em velocidade radial + velocidade tangencial

A componente radial, na linha de visada é **medida via Efeito Doppler**



A velocidade total, que resulta do movimento espacial, se decompõe em 2 componentes **mensuráveis**:

- (1) **velocidade tangencial ou transversal (V_t)** medida pelo movimento em relação às estrelas distantes (movimento próprio) + (2) **velocidade radial (v_r)** medida via ef. Doppler

$$V^2_{\text{total}} = V_t^2 + V_r^2$$

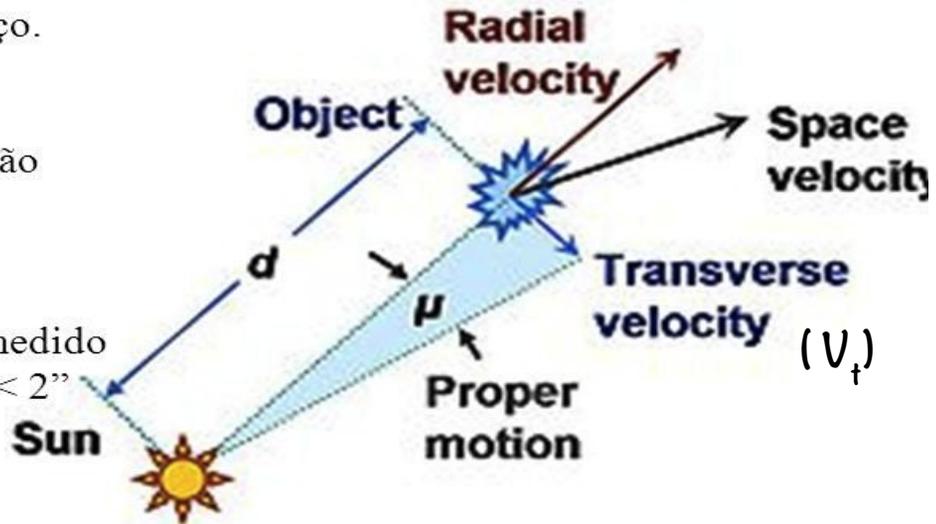
Movimento próprio das estrelas

Movimento espacial das estrelas causado pelo movimento do Sol no espaço.

- V_r , velocidade radial
componente de V , na direção Sol-Objeto

- V_t , Velocidade tangencial
- μ , deslocamento angular medido em segundos de arco / ano $< 2''$

$$\sim \mu = V_t/d \quad d = V_t/\mu$$

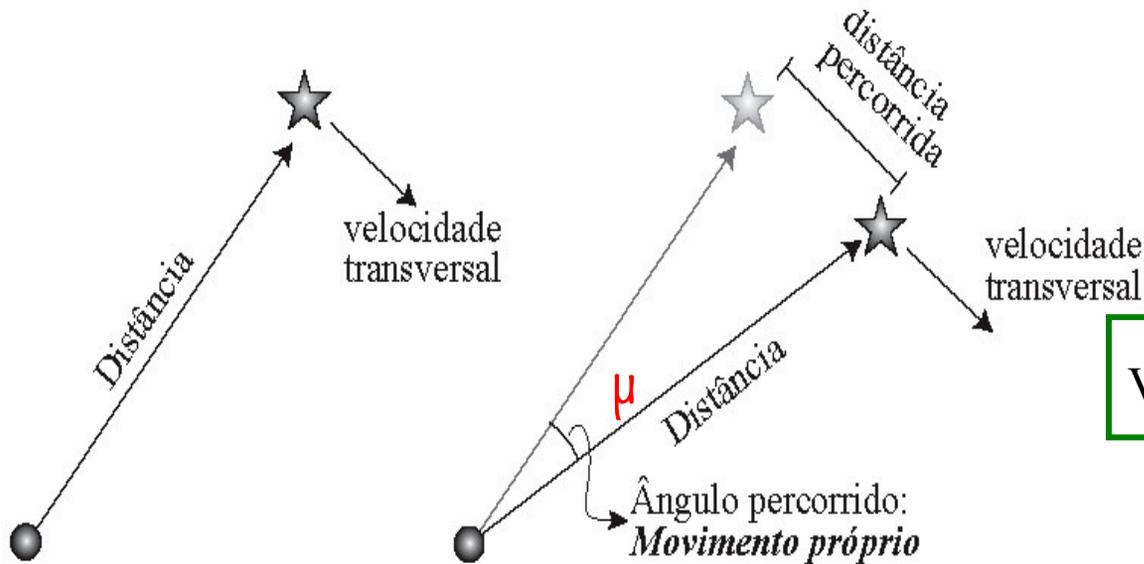


Miriani Pastoriza

Então, para se obter a **velocidade tangencial** de uma estrela, a distancia d e μ devem ser observáveis conhecidos.

Astrometria – Medidas de Movimento Próprio

...mede a componente transversal (V_t) do movimento espacial



$$V^2_{\text{total}} = V_t^2 (\text{km/s}) + V_r^2 (\text{km/s})$$

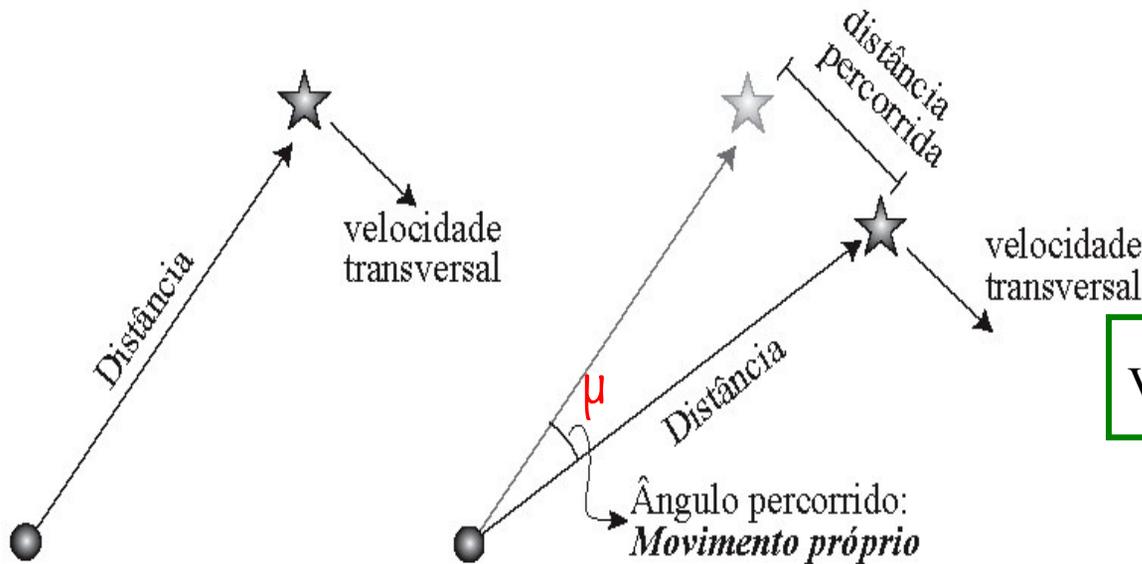
Lembrem-se que $d (\text{pc}) = 1/p''$; $1 \text{ pc} = 206265 \text{ UA}$; $1 \text{ UA/ano} = 4,74$

E que $\sin \mu = \mu = \frac{V_t}{d (\text{pc})}$, mas $V_t = \frac{\mu (\text{rad/ano}) (\text{pc/ano})}{p''} = \frac{\mu (''/\text{ano}) (\text{pc/ano})}{206265 p''}$

$$V_t = \frac{4,74 \mu (''/\text{ano}) \text{ Km/s}}{p('')}$$

Astrometria – Medidas de Movimento Próprio

...mede a componente transversal (V_t) do movimento espacial



$$V^2_{\text{total}} = V_t^2 (\text{km/s}) + V_r^2 (\text{km/s})$$

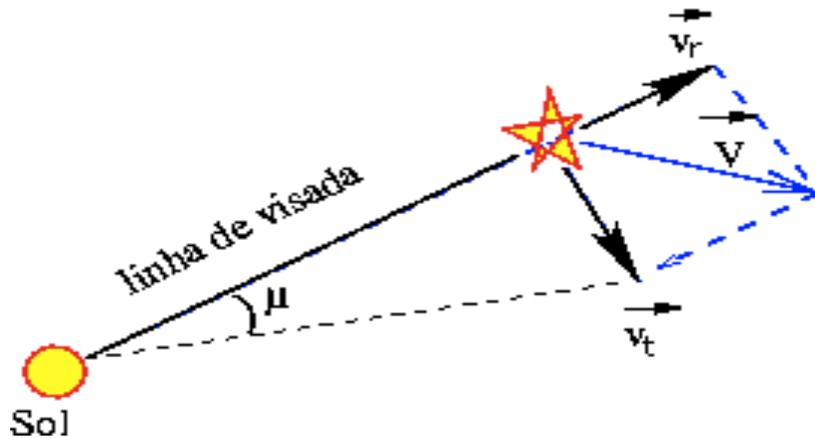
Lembrem-se que $d (\text{pc}) = 1/p''$; $1 \text{ pc} = 206265 \text{ UA}$; $1 \text{ UA/ano} = 4,74$

$$\text{Sen } \mu = \mu = \frac{V_t}{D (\text{pc})} \text{ mas } V_t = \frac{\mu (\text{rad/ano}) (\text{pc/ano})}{p''} = \frac{\mu ('' / \text{ano}) (\text{pc/ano})}{206265 p''}$$

$$V_t = 4,74 \frac{\mu ('' / \text{ano}) \text{ Km/s}}{p ('')}$$

Astrometria – Medidas de Movimento Próprio

...mede a componente transversal (V_t) do movimento espacial



$$V_t = 4,74 \frac{\mu \text{ (\"/ano)}}{p \text{ (\")}} \text{ Km/s}$$

$$V^2_{\text{total}} = V_t^2 + V_r^2$$

?

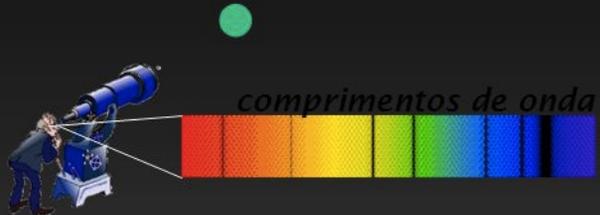
- Quanto maior a velocidade transversal, maior o movimento próprio.
- Mas quanto maior a distância, menor o movimento próprio.

...mas ainda precisamos da Velocidade Radial....

Lembrando que a V_{rad} pode ser obtida via Efeito Doppler

Efeito que acontece com a radiação

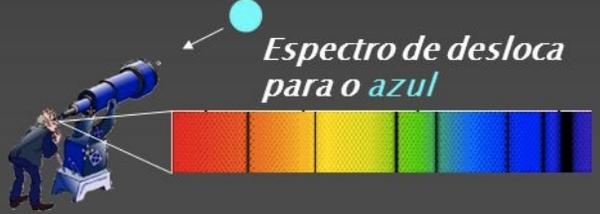
Espectro de uma fonte de luz estacionária que emite e absorve radiação numa variedade de comprimentos de onda (ex. um estrela)



A mesma fonte de luz se afastando



A mesma fonte de luz se aproximando



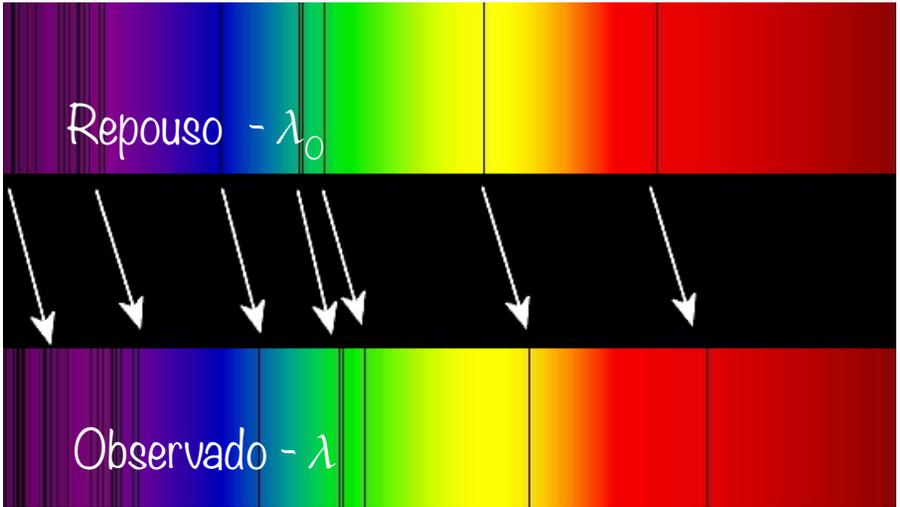
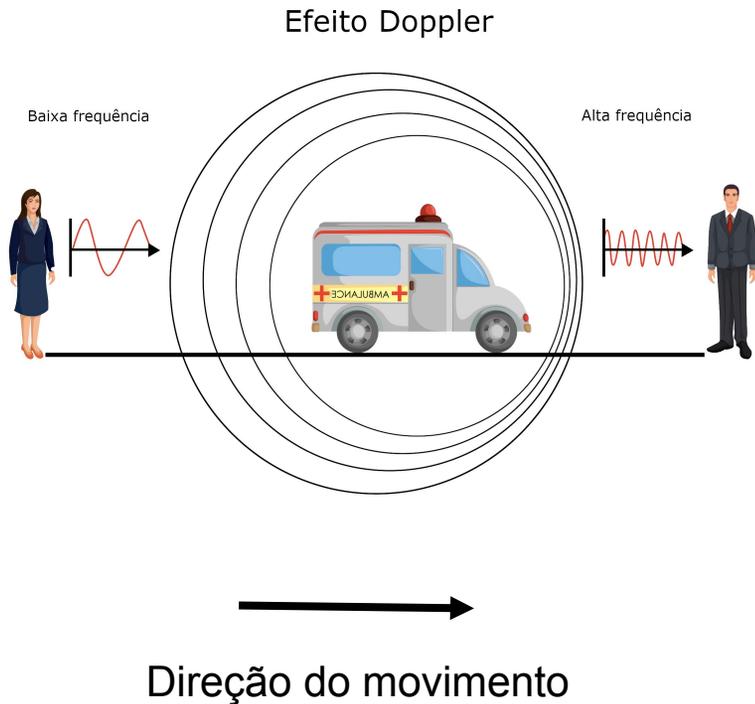
Se o movimento for de afastamento, a **frequência diminui** e dizemos que ocorreu um "desvio para o vermelho" (redshift).

Se o movimento for de aproximação, a **frequência aumenta** e dizemos que ocorreu um "desvio para o azul" (blueshift).

...e fazendo analogia do efeito Doppler sonoro com o Doppler da luz

Sirene de um carro de polícia altera o som quando passa por observador

Fonte em movimento altera a Frequência e o Comprimento de Onda em relação ao obs.



A comparação das linhas em repouso e observada mostram deslocamento ($\Delta\lambda$), dado por

→ $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

A velocidade V_{rad} da fonte pode ser obtida por:

← $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_{rad}}{c}$

← redshift

Temos, portanto, condições de calcular a velocidade espacial dada por:

$$V^2_{\text{total}} = V_t^2 + V_r^2, \text{ onde:}$$


$$V_t = 4,74 \mu \left(\frac{''}{\text{ano}} \right) \frac{\text{Km/s}}{p('')} \quad \text{e} \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{V_{\text{rad}}}{c} \longrightarrow V_{\text{rad}} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \times c$$

Com avanços tecnológicos como os lançamentos de satélites Hipparcos, Hubble e o Gaia, foi possível aumentar a precisão de medidas de paralaxe, o que permitiu pesquisar distâncias que anteriormente eram da ordem de 100 pc e passaram então a atingir 20 Kpc.

Vamos ver o caso do Telescópio Espacial GAIA:

Tecnologia de altíssima geração para determinação de distâncias, entre outros..., exoplanetas, estrelas marrons, teste para Relatividade , etc...

O MAPA DA VIA LÁCTEA

Satélite europeu Gaia fará um censo de 1 bilhão de estrelas da nossa galáxia

INSTRUMENTOS

- > Dois telescópios idênticos com câmeras de alta resolução
- > Fotômetros azuis e vermelhos
- > Espectrômetro de velocidade radial

A MISSÃO

- > Mapear a Via Láctea durante **5 ANOS**, a fim de determinar sua organização
- > Adicionalmente, o satélite descobrirá entre **10 MIL E 50 MIL** planetas fora do Sistema Solar
- > **1 EM CADA 200 ESTRELAS** da galáxia serão estudadas, com medição precisa de sua órbita e velocidade



Este satélite vai recolher uma grande variedade de dados sobre nossa galáxia e além, além de poder provar a teoria da relatividade de Einstein

01011
10111
00101

1.000.000.000.000.000

O satélite transmitirá um petaocteto de dados (equivalente a 250.000 DVD)



1.000.000.000

estrelas serão pesquisadas



1.000.000.000

de pixels de sensibilidade da câmera de Gaia



500.000

quasares para estudar

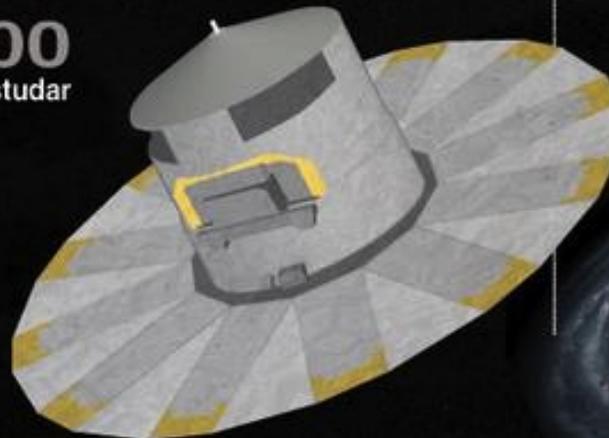


15.000

exoplanetas a descobrir



Lançamento
19 de dezembro
Kourou, Guiana Francesa



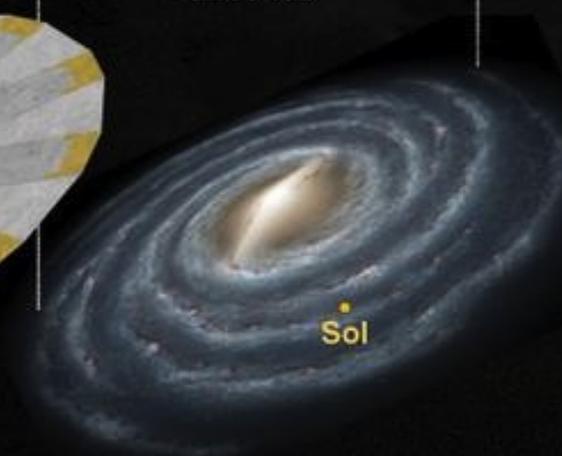
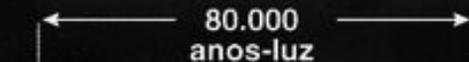
A Via Láctea

100 bilhões de estrelas

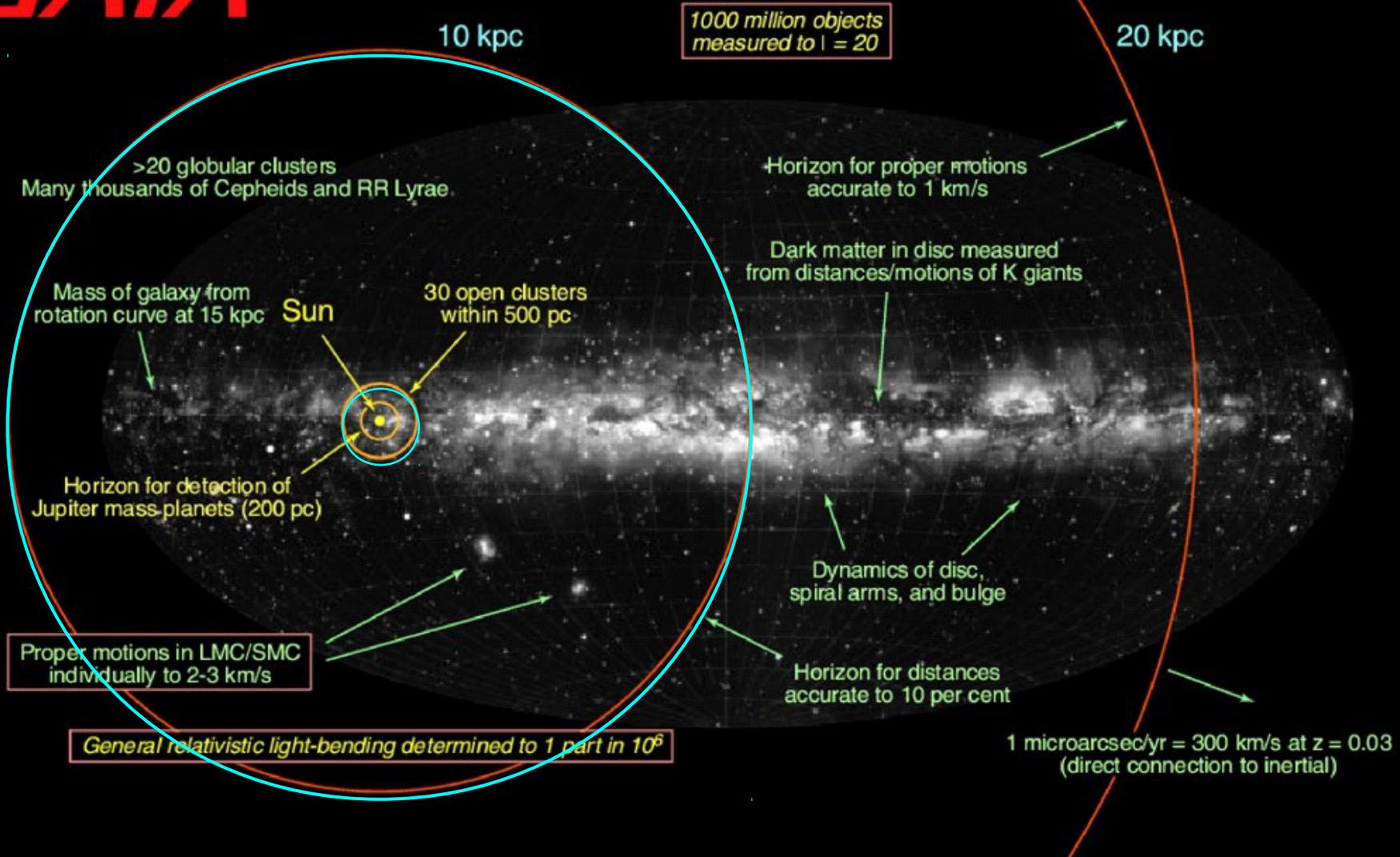
Formação:

13,2 bilhões de anos

80.000
anos-luz



GAIA



Medida de paralaxe até $d = 20 \text{ kpc}$ (20.000 pc) $\rightarrow p'' 0,00005$ / (Proxima-centauri $p = 0,768''$)
Até pouco tempo os telescópios disponíveis na Terra $\rightarrow d < 20 \text{ pc} \rightarrow p'' = 0,05$

<http://www1.folha.uol.com.br/ciencia/2013/12/1387845-satelite-europeu-gaia-e-lancado-com-sucesso.shtml>

Indicadores de Distância Indiretos, que usam Luminosidade

Um método comum que se utiliza para obter distâncias onde não se pode mais utilizar métodos como paralaxe trigonométrica é o “**Módulo de Distância**”.

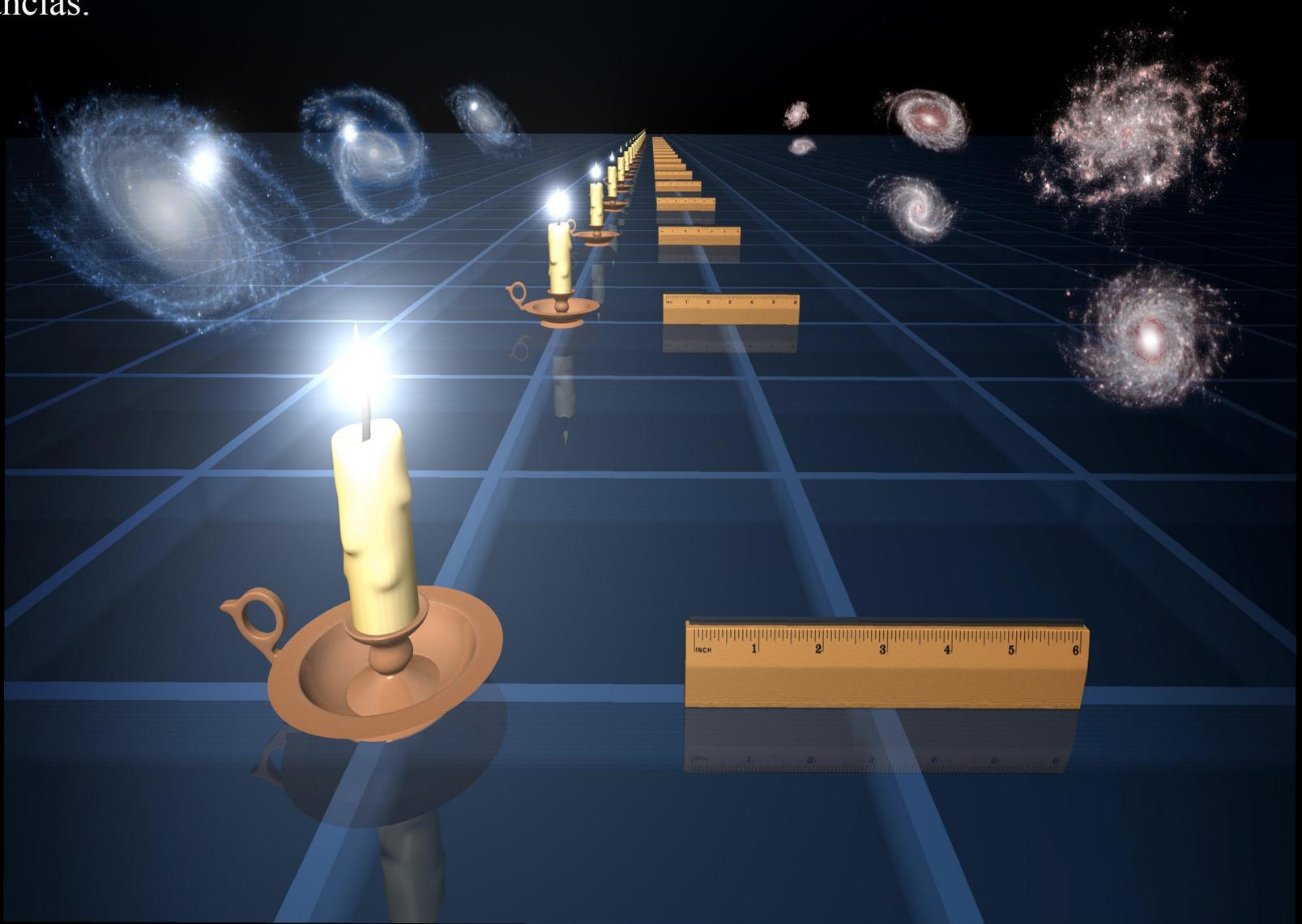
É um método indireto, baseado no conceito de **luminosidade**, cujo conceito básico considera que a **diferença entre a magnitude aparente (m) e a magnitude absoluta (M), permite obter a distância de uma estrela**. Para tanto, define-se a **magnitude absoluta (M)**, como sendo a magnitude aparente que uma estrela teria a uma distância de 10 pc.

Vamos lembrar que a **luminosidade** de uma estrela é a **energia total** que ela emite por segundo. Para se obter a luminosidade de uma estrela é preciso realizar **observações no intervalo completo de energia ou frequências que a estrela emite, desde as ondas em rádio até as em gama (...ultra-violeta, infravermelho, etc...)**.

Vimos também em aulas anteriores que o brilho (ou fluxo) é expresso em termos de sistemas de magnitude, ou seja, que $m = -2,5 \log F(\lambda) + C$ e que $F(\lambda) = L/4\pi d^2$ conhecida como Lei do Inverso do Quadrado da Distância (LIQD).

Reparem que LIQD relaciona propriedades intrínsecas da estrela, como **L e M** a quantidades medidas como o **F e m**.

Estrelas que estão a distâncias maiores que **várias centenas de parsecs** utiliza-se métodos que se baseiam na luminosidade, ou “**Princípio da Vela Padrão**”, onde a diferença de brilho aparente de **objetos de mesma natureza** é atribuída a diferentes distâncias.



O Princípio da Vela Padrão



Standard Candles In Astronomy

Kerrin, Makayla, Lindsey, Bailey, & Ryan

Most
Common
Types

Supernovae

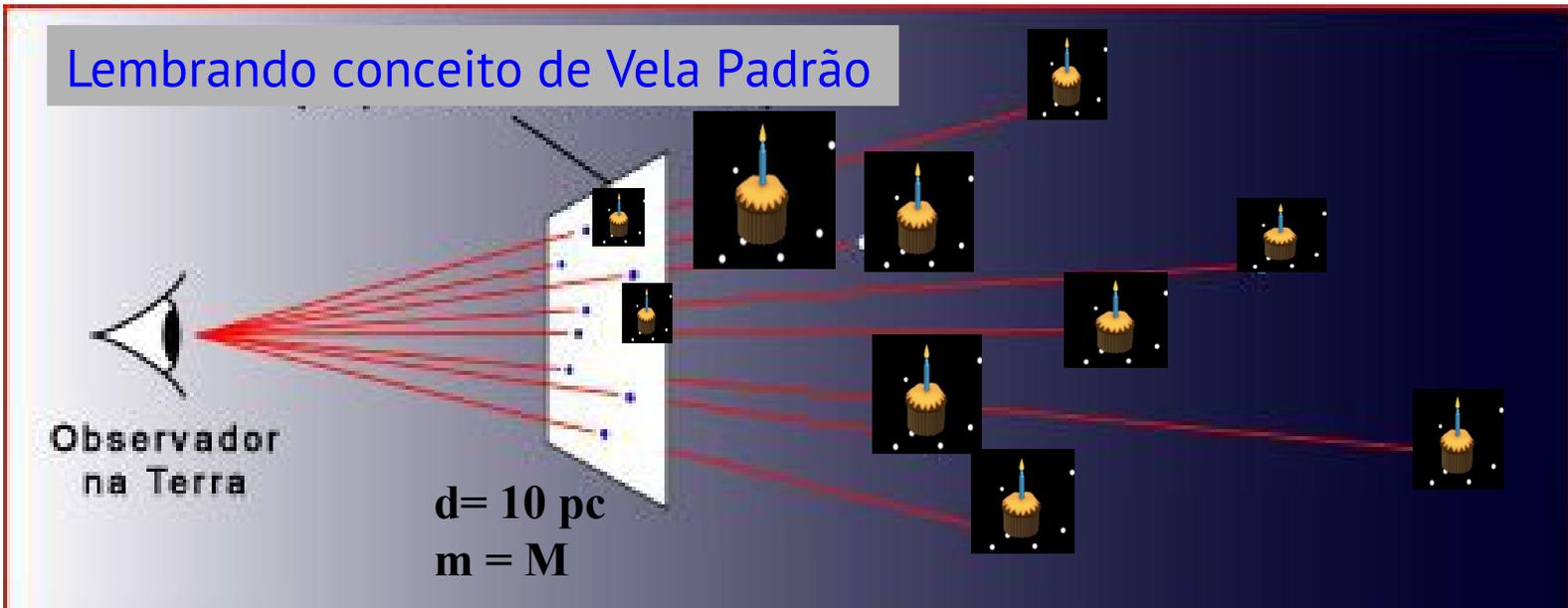
Variable
Stars

Why are
Standard
Candles
Useful

What are
Standard
Candles

Work
Class

Lembrando conceito de Vela Padrão



Magnitude aparente (m):
(depende da distância)



$$m = -2,5 \log F + C$$

medido

medido

Mas o fluxo é dado por $F = \frac{L}{4\pi d^2}$

Portanto, $m = -2,5 \log L + 2,5 \log 4\pi + 5 \log d + C$

$d = 10 \text{ pc}$
 $m = M$

$m - M = +2,75 + 5 \log 10 + C \rightarrow C = -7,75.$

Modulo de Distância (m-M): $m - M = 5 \log d (\text{pc}) - 5$ ou $m - M = 5 \log d/10$

O **Módulo de Distância** ($m-M= 5\log d(\text{pc}) - 5$) nos informa quantas vezes a luminosidade aparente é menor que a “luminosidade aparente que o objeto teria se estivesse a uma distância de 10pc (def. de módulo de distância)”

Alguns exemplos:

1- Sol

$$\text{--> } m = -26.81$$

$$\text{--> } d = 1 \text{ UA} = 1.484 \times 10^{-6}$$

Aplicando então a fórmula do Módulo de Distância acima, teremos:

$$\mathbf{Msol = msol - 5\log (d) + 5 \text{ --> Msol = 4.76}}$$

O **Módulo de Distância** será então, $\mathbf{msol-Msol = -31.57}$

2- Sírius

$$\rightarrow m = -1.44$$

→ Medidas do Hipparcos lhe conferem uma distância de $d=2.6371$ pc.

$$\begin{aligned}\rightarrow \text{Magnitude absoluta é } M &= -1.44 - 5 \times \log(2.6371) + 5 = \\ &= -1.44 - (5 \times 0.421127) + 5 \rightarrow \mathbf{M = 1.45.}\end{aligned}$$

Invertendo a situação....,

Se conhecemos a magnitude absoluta (M) de uma estrela e medirmos sua magnitude aparente (m) determinamos sua distância d, como

$$d(\text{pc}) = 10^{(m - M + 5)/5}$$

3- Spica

$$\rightarrow m = 0.98$$

Estrelas deste tipo têm magnitudes absolutas $M = -3.55$, então, podemos usar o Conceito de Vela Padrão...

$$\begin{aligned}\text{Portanto, a distância que nos separa de Spica é } d &= 10^{[0.98 - (-3.55) + 5]/5} = \\ &= 101.906 \Rightarrow \mathbf{d = 80.54 \text{ pc.}}\end{aligned}$$

Reparem que conhecendo-se as magnitudes absolutas (M) de **duas** estrelas, pode-se comparar suas luminosidades, já que a magnitude absoluta é proporcional ao logaritmo da luminosidade: $M_1 - M_2 = -2.5 \log(L_1/L_2)$.

$$\text{Logo, } L_1/L_2 = 10^{-0.4(M_1 - M_2)} \text{ ou } L_1/L_2 = 2.512^{(M_2 - M_1)}.$$

Lembrem-se que a estrela de maior luminosidade tem uma magnitude absoluta menor do que a de menor luminosidade, ou seja, se $L_1 > L_2$, $M_1 < M_2$.

O Módulo de Distância nos informa quantas vezes a luminosidade aparente é menor que a luminosidade aparente que o objeto teria se estivesse a uma distância de 10pc.

Ver no site da disciplina exercícios adicionais sobre o conceito de
Módulo de Distância

Lembrem-se que...

Luminosidade ou Potência ($W = \text{ergs} \times \text{s}^{-1}$)

- Grandeza intrínseca da fonte, e fornece a energia emitida em todas as direções por unidade de tempo = **potência emitida em unidades de Watts.**

É uma grandeza que não depende da distância

Brilho ou Fluxo – ($W / \text{cm}^2 = \text{ergs} \times \text{s}^{-1} \times \text{cm}^{-2}$)

Grandeza observada e medida nos detetores de telescópios. Fornece a energia por unidade de tempo e por unidade de superfície.

É uma grandeza que depende da distância.

É expresso por um número denominado **magnitude aparente**, que por definição é uma quantidade que serve para caracterizar o brilho aparente de um astro.

Cuidado: Este número diminui a medida que o brilho aumenta....!