

Astrofísica Moderna

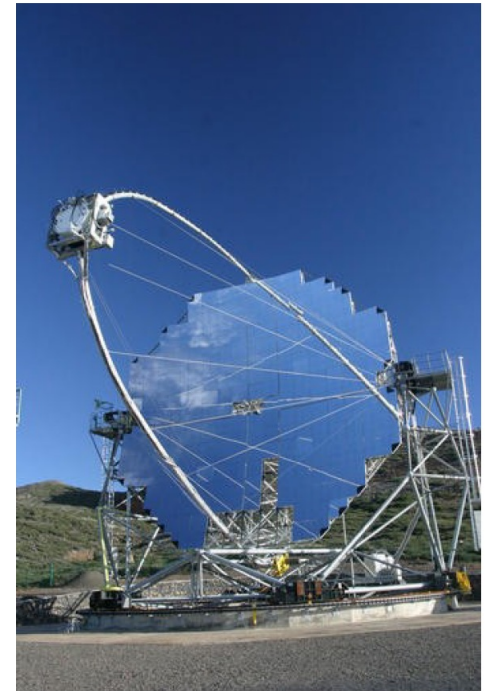
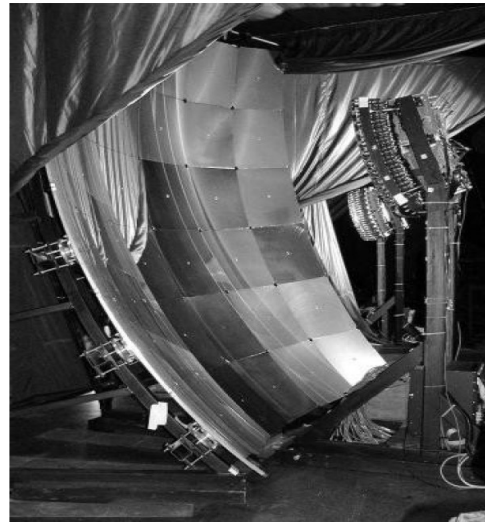
Aula 5: Telescópios

Prof. Aion Viana

Referencias principais da aula:

“Astronomia e astrofísica”, K. de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva
“Fundamentos de Astronomia”, notas de aula da Prof. Elisabete Gouveia dal Pino IAG/USP

Telescópios e instrumentos



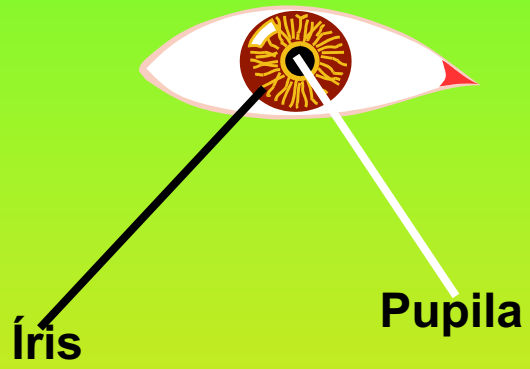
Telescópios e instrumentos

➤ Telescópios Ópticos

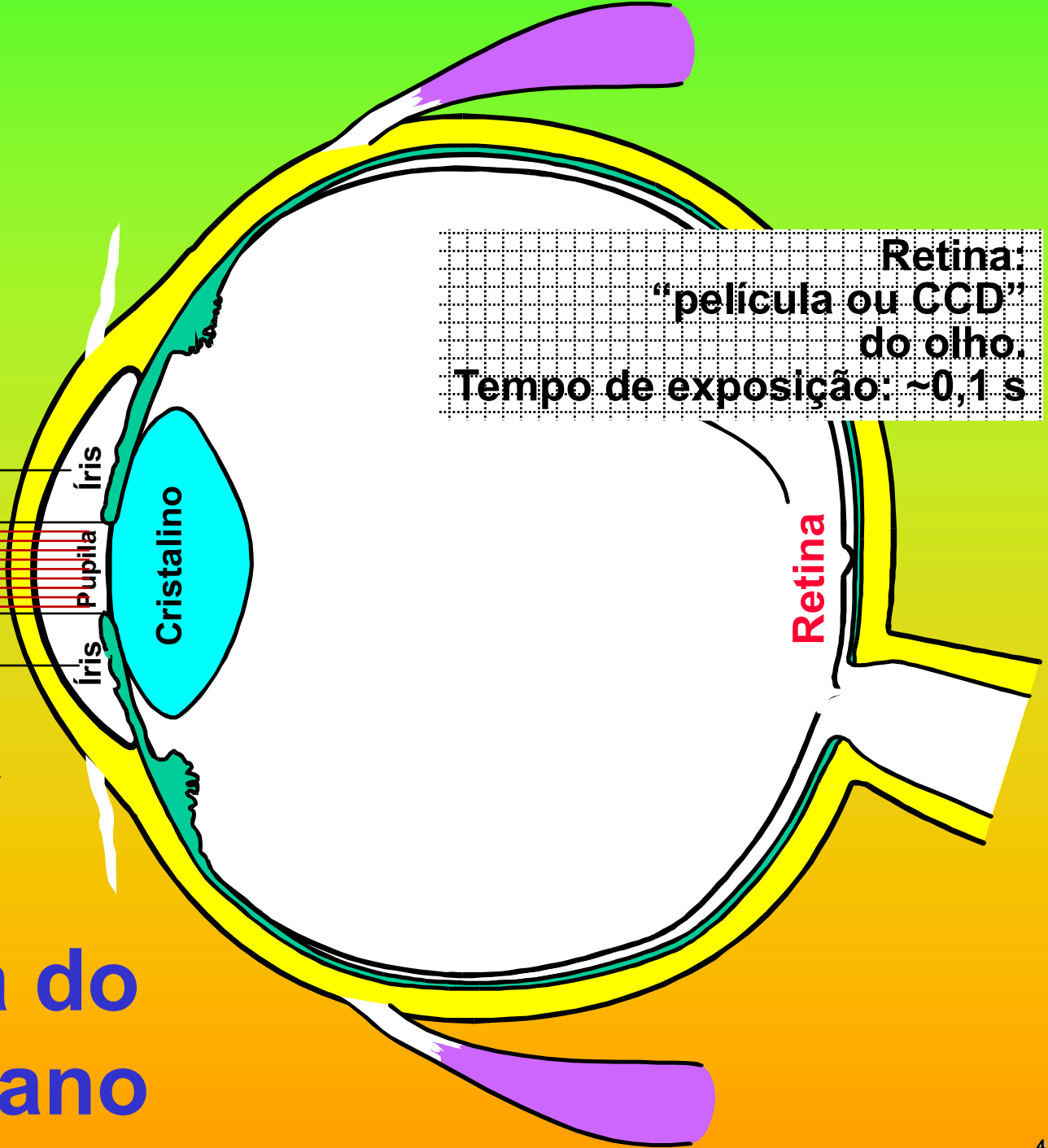
- Conceitos Básicos
- Refratores e Refletores
- Novas Gerações
- Detetores

➤ Rádio-telescópios

➤ Astronomia Espacial



Anatomia do olho humano



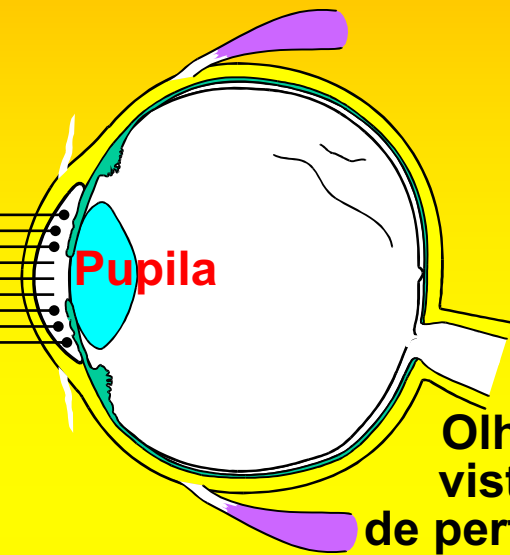
Retina:
"película ou CCD"
do olho.
Tempo de exposição: ~0,1 s

Por que usar um telescópio?



Íris

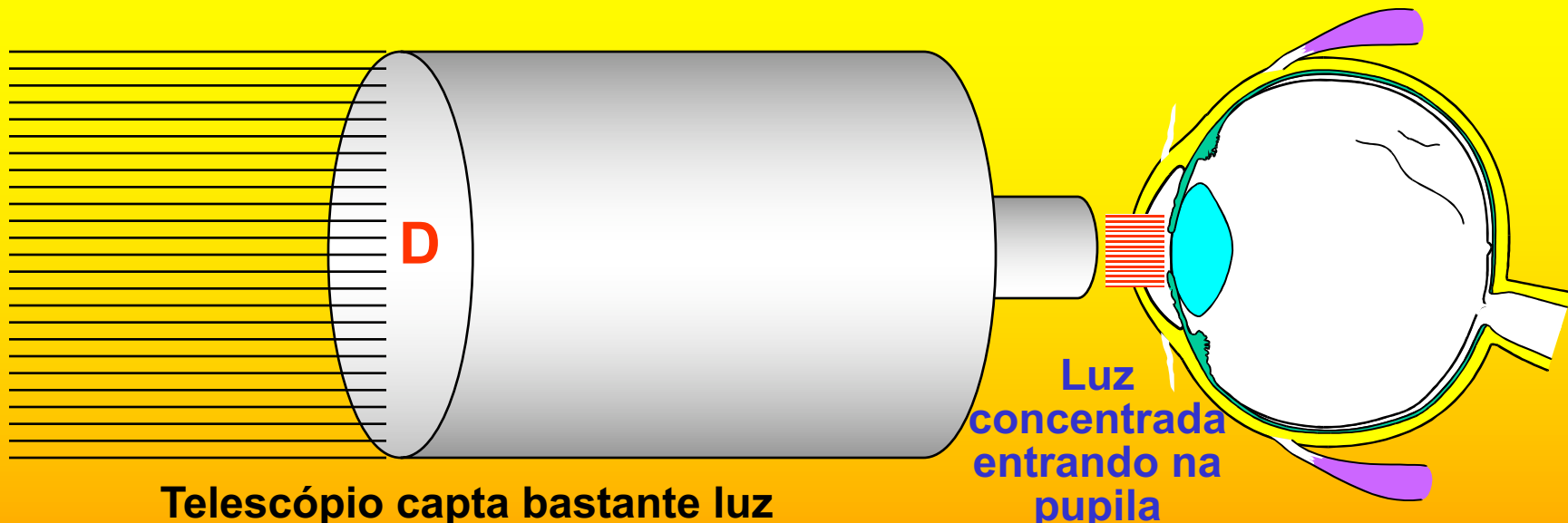
Pupila



Olho visto de perfil

Pouca luz da estrela entra no olho

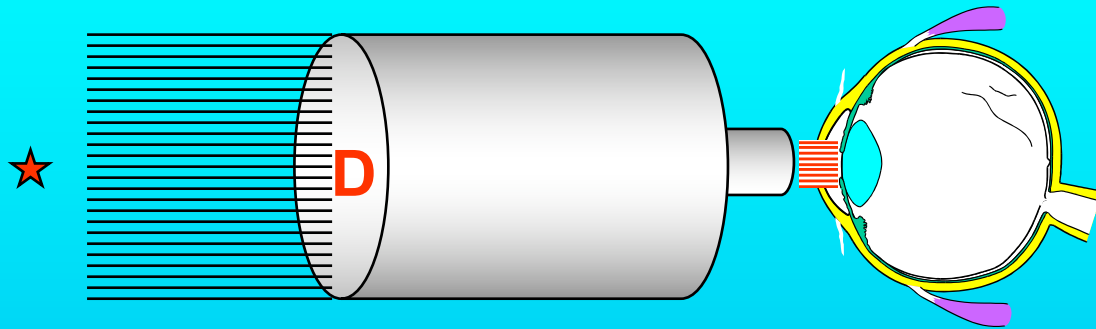
★
M
e
s
m
a
e
s
t
r
e
l
a
★



Telescópio capta bastante luz

Luz concentrada entrando na pupila

Poder coletor



Poder coletor

$$\propto D^2$$

Instrumento

**Abertura
D**

Poder coletor

Olho humano

0,5 cm

1 (padrão)

Luneta Galileu

10 cm

400

HST (Hubble)

2,5 m

250.000

Telescópio Keck

10 m

4.000.000

Telescópio ELT

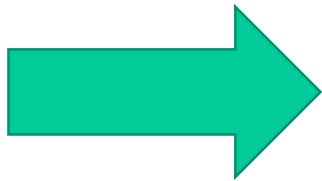
100 m

400.000.000

O que se deseja de um telescópio?

Objetos distantes e pouco luminosos requerem:

- poder de resolução (melhor nível de detalhamento)
- sensibilidade (maior quantidade de radiação coletada num menor tempo de exposição)

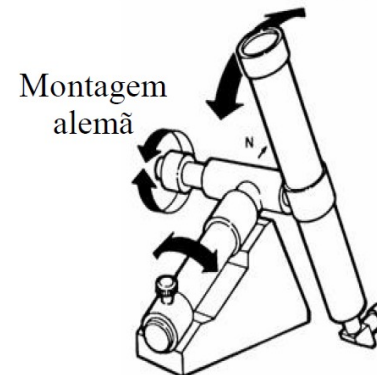


Telescópios:
grandes áreas coletoras

Telescópios ópticos

- Função: coletar e concentrar a radiação proveniente de um astro \Rightarrow feixe localizado.
- **Telescópios ópticos:** desenhados para coletar luz visível

Montagem equatorial



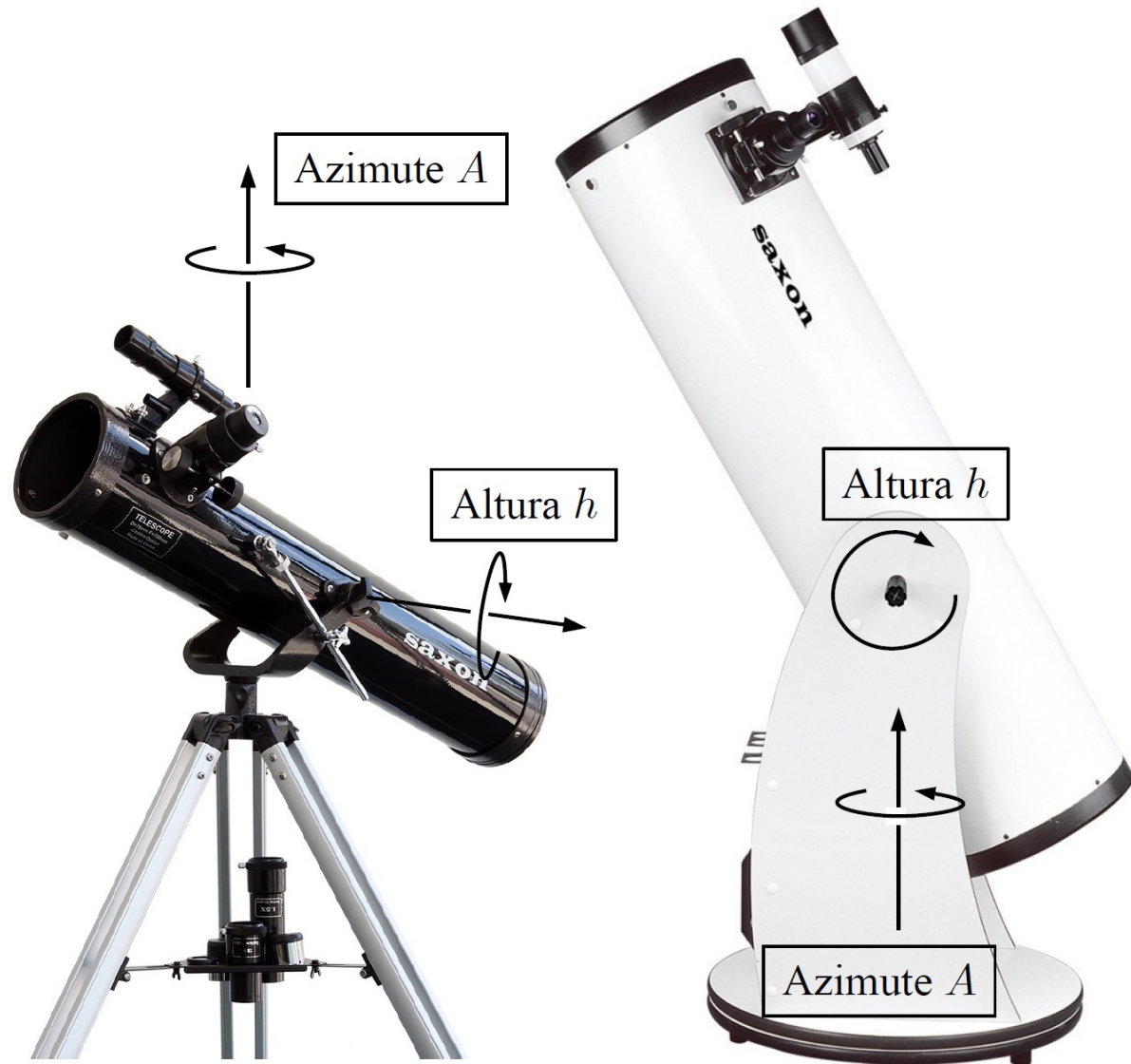
Compatível com os sistemas de coordenadas equatorial celeste e horário

Conveniente para astrofotografia

Montagem azimutal

Compatível com o sistema de coordenadas horizontal

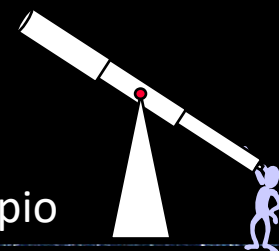
Simple, portátil e barata



Orion a olho nu e com telescópio óptico



A olho nu



Com telescópio

É assim que eu vejo
a galáxia de
Andrômeda
a olho nu?



Não!

Fotografando com diferentes tempos de exposição

1 minuto

3 minutos

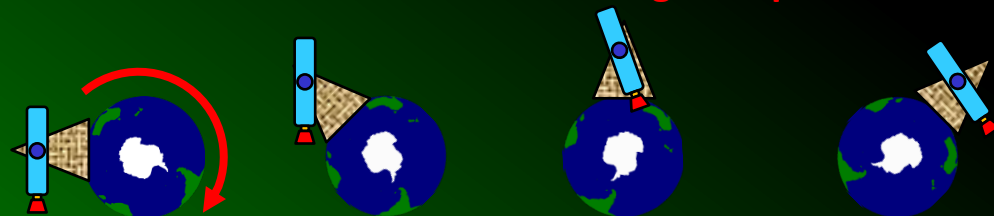
30 minutos



45 minutos



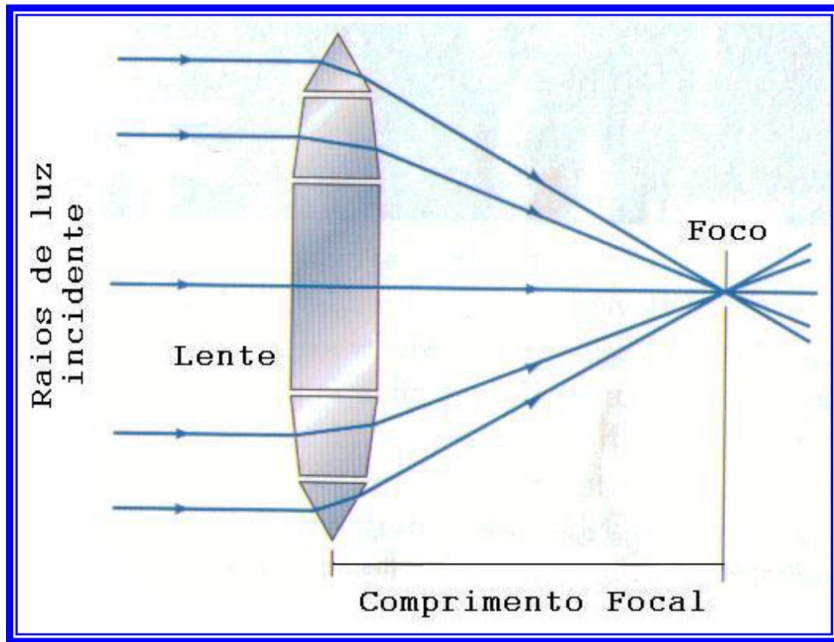
★ ★ ★ ★
Conveniência de um telescópio com sistema de acompanhamento para compensar movimento diurno aparente do astro causado pela rotação da Terra em torno de seu eixo -> **montagem equatorial**



Telescópios ópticos

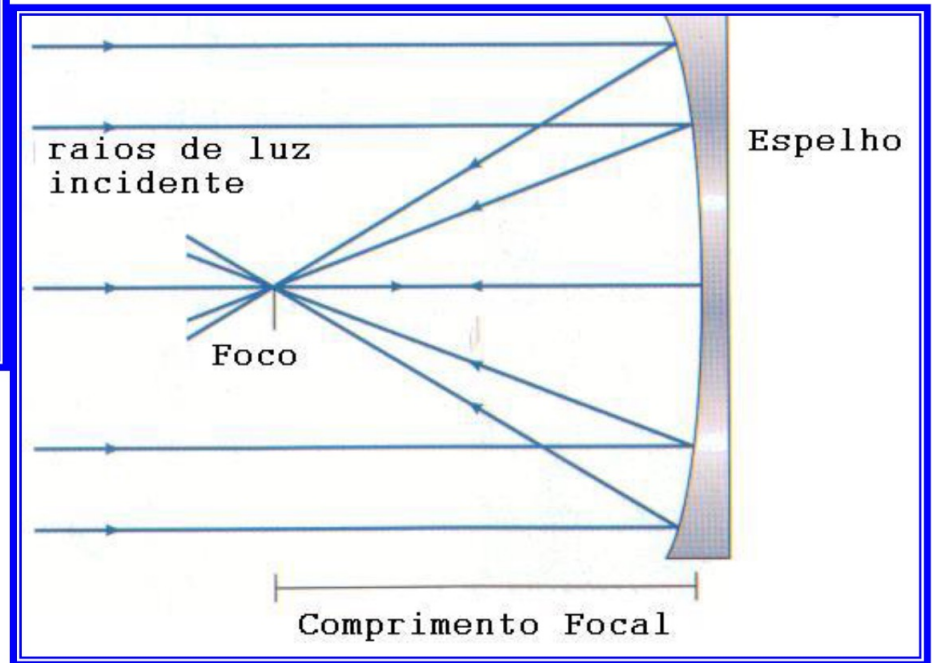
- Função: coletar e concentrar a radiação proveniente de um astro \Rightarrow feixe localizado.
- **Telescópios ópticos**: desenhados para coletar luz visível
- A concentração de luz em um **foco** pode ser obtida por um:
 - **espelho** = telescópio refletor
 - ou por uma **lente** = telescópio refrator

Refrator ou refletor



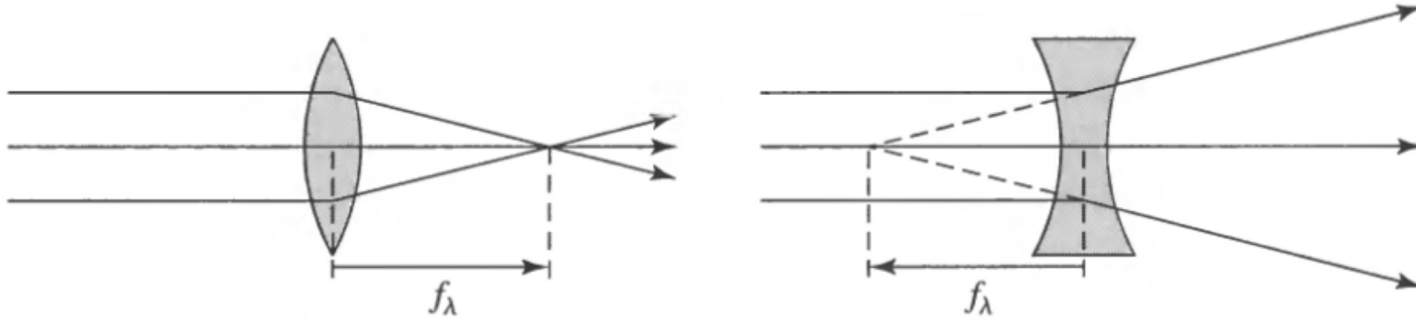
Telescópio refrator:
usa lente para
focalizar imagem
do feixe

Telescópio refletor:
usa um espelho
curvo para
concentrar o feixe
de luz no foco



Fórmula dos Fabricantes de Lentes

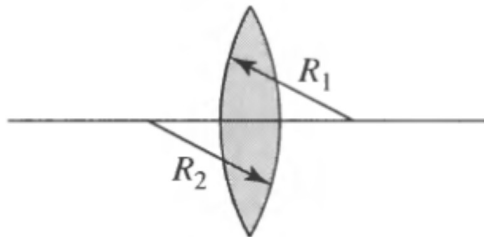
Lentes convergentes e divergentes:



$$\frac{1}{f_\lambda} = (n_\lambda - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

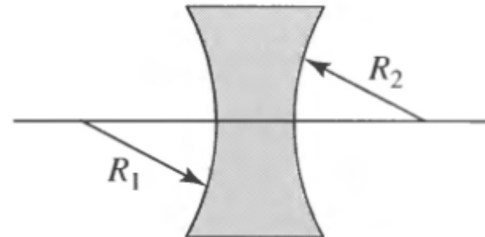
n_λ -> índice de refração da lente
 R_1, R_2 -> raios de curvatura

Raios de curvatura:



(a)

$$R_1 > 0, R_2 > 0$$



(b)

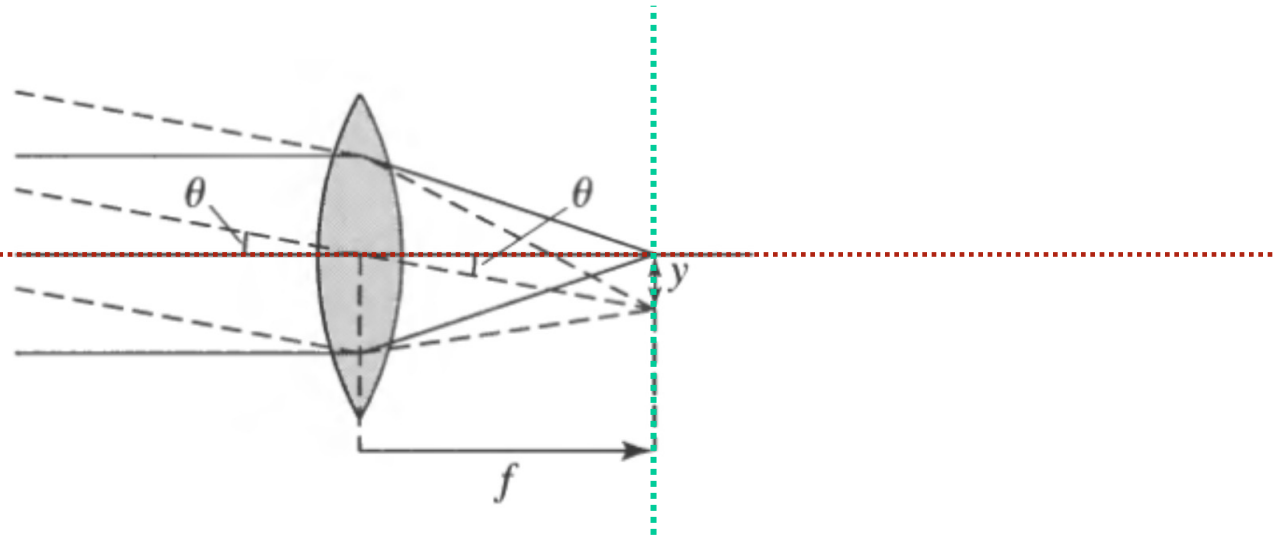
$$R_1 < 0, R_2 < 0$$

Plano focal

O **plano focal** é o plano que cruza o foco da lente e é perpendicular ao eixo óptico do sistema.

Plano focal

Eixo óptico



$$y = f \tan \theta$$

pequenos ângulos $\tan \theta \approx \theta$

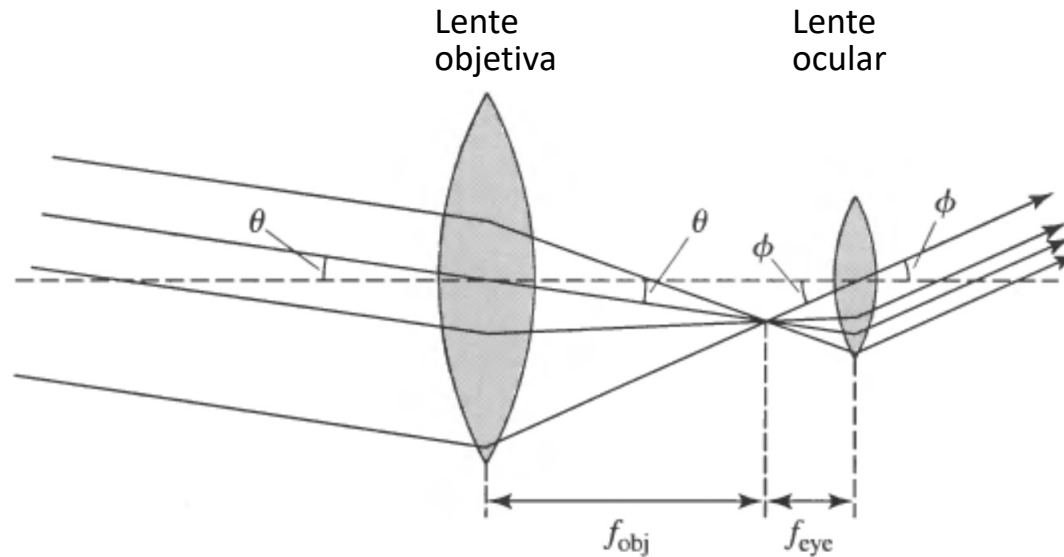
$$y = f \theta$$

(θ em rad)

$$\frac{d\theta}{dy} = \frac{1}{f}$$

Para objetos separados por uma distância angular ($d\theta$) fixa, quanto maior a distância focal, maior a distância linear observada no plano focal.

Magnificação de telescópio refrator



Seguindo a relação vista no slide anterior:

$$\frac{d\theta}{dy} = \frac{1}{f_{obj}}$$

$$\frac{d\phi}{dy} = \frac{1}{f_{eye}}$$

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \frac{f_{obj}}{f_{eye}} = m$$

Magnificação angular

Luminosidade de um telescópio

Brilho ou luminosidade de uma imagem = quantidade de energia por segundo por unidade de área da imagem resolvida

O **brilho** observado: diretamente proporcional à **área da superfície coletora** $\Rightarrow D^2$ (diâmetro do espelho do telescópio)

• \uparrow Diâmetro \uparrow Ganho \Rightarrow $\frac{B_A}{B_B} = \left(\frac{D_A}{D_B} \right)^2 = G$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ganho de um} \\ \text{telescópio A} \\ \text{em relação à B} \end{array} \right.$

Como a área de uma imagem é **proporcional ao quadrado do foco**, a **luminosidade é proporcional ao inverso do quadrado do foco**

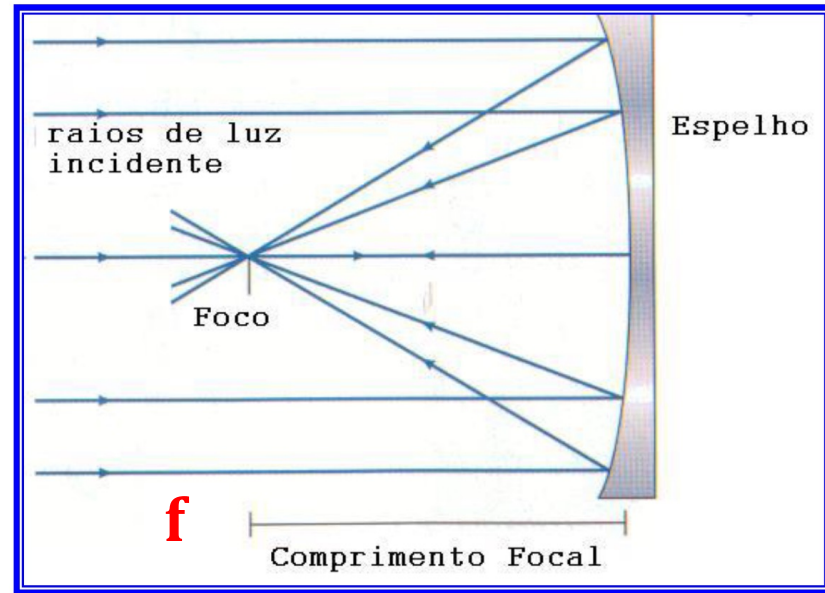
\Rightarrow $B \propto \frac{1}{f^2}$

Razão focal

- Razão Focal:

$$F = f/D$$

→ comprimento focal / diâmetro do espelho

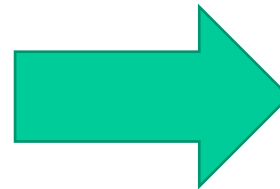


Ex. 1:

$$f=1\text{m}; D=20\text{cm} \left\{ \frac{f}{D} = \frac{1}{0,2} = 5 \right.$$

Notação $R_f = \text{“}f/5\text{”}$

Luminosidade de um telescópio
proporcional ao inverso do
quadrado da razão focal



$$B \propto \frac{1}{F^2}$$

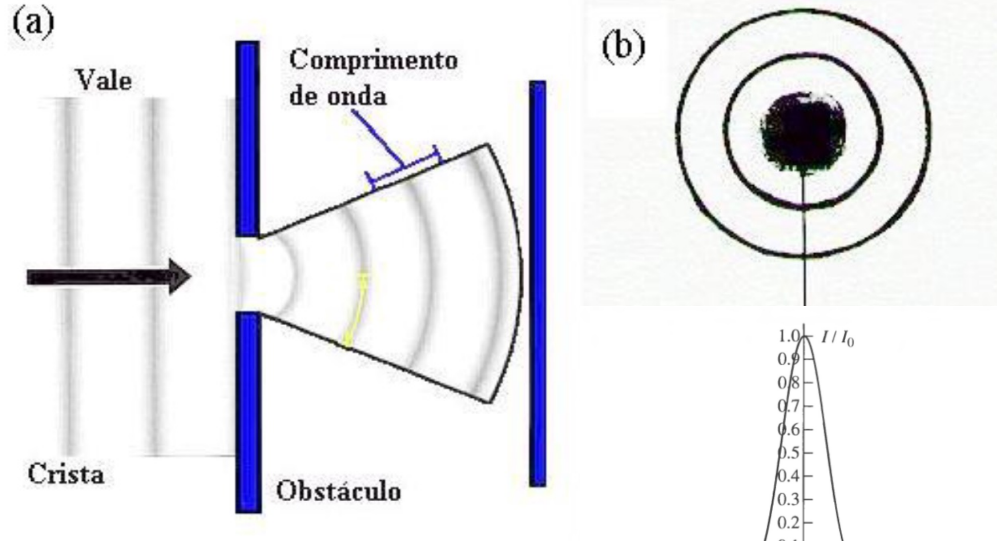
Questão

Q1: Qual o tamanho da imagem da Lua no plano focal de um telescópio f/11 com diâmetro 36 cm? (dado: diâmetro angular da Lua = 0.5°)

Fatores limitantes da qualidade das observações

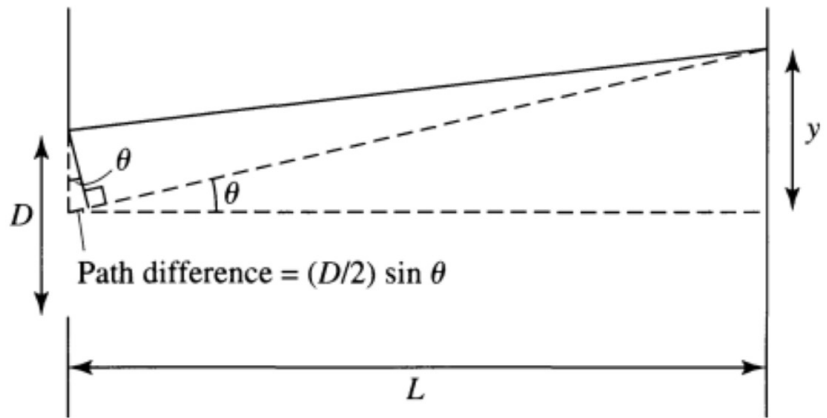
- Difração
- Seeing
- Absorção (Janelas atmosféricas)

Difração e resolução de um telescópio



Abertura linear:

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{D},$$



Quando feixe incide no D coletor do telescópio: **luz é dispersa** diminuindo concentração do feixe → **perda de resolução** da imagem

Para uma abertura linear, largura do primeiro máximo $\theta = \lambda/D$

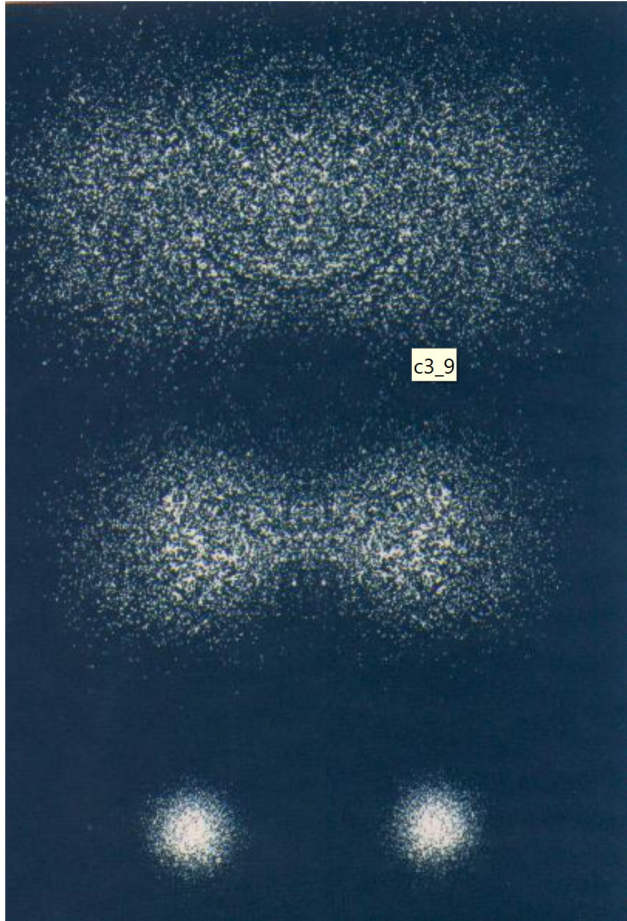
Para uma abertura circular (telescópio):

$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

θ em rad

Resolução angular do telescópio ou Critério de Rayleigh

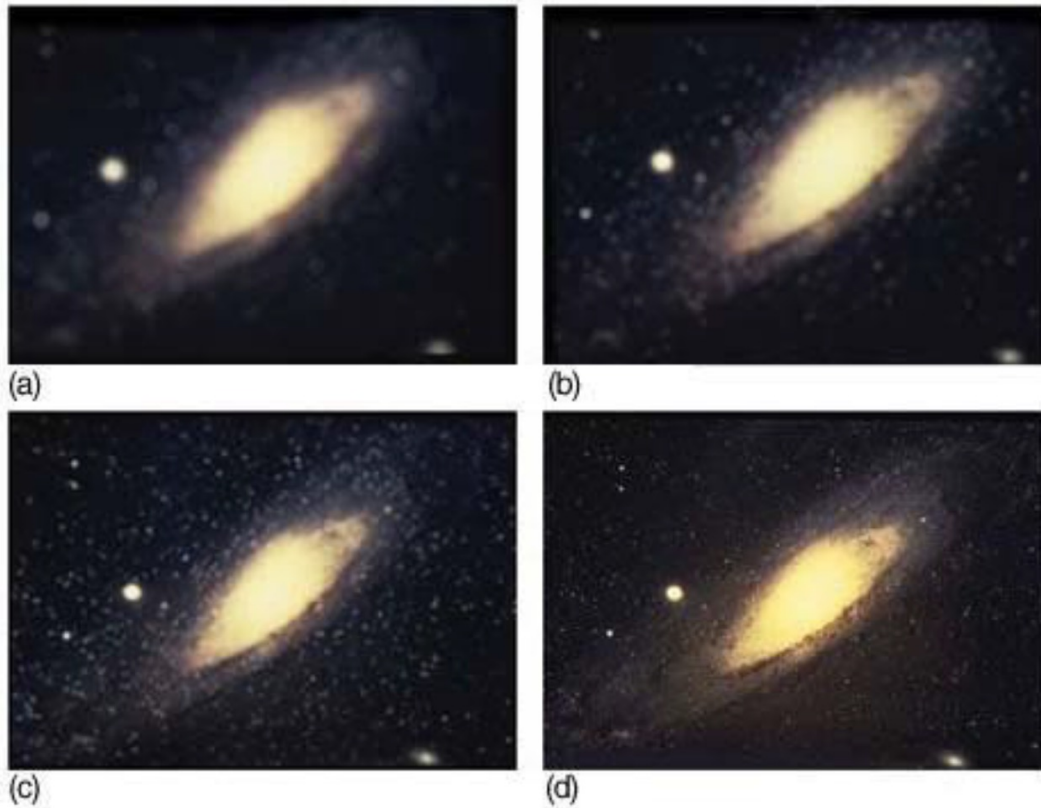
Difração e resolução de um telescópio



Duas fontes de brilho comparável são observadas com mais clareza à medida que a resolução angular melhora.

As fontes podem ser discernidas somente com um **telescópio de poder de resolução adequado.**

Difração e resolução de um telescópio



- Galaxia de Andromeda obs. com diferentes resoluções angulares: (a) 10', (b) 1', (c) 5" e (d) 12"

Exemplos e questões

Luz visível = $0.5 \mu\text{m}$

Olho humano = $0.5 \text{ cm} \Rightarrow 120''$ (real)

Luneta Galileu = $10 \text{ cm} \Rightarrow \sim 1''$

HST (Hubble) = $2.5\text{m} \Rightarrow 0''.05$

Q2: qual o poder de resolução necessário para distinguir um homem na Lua? (dados: comprimento de um homem = $1,70 \text{ m}$; distância Terra-Lua = $384,400 \text{ km}$)

Q3: Comparar o poder de resolução do Keck ($D=10\text{m}$), operando na faixa óptica, como o Arecibo ($D=300\text{m}$), operando na faixa métrica (rádio)

*A resolução a partir do solo é limitada pela atmosfera celeste.
Ela também pode ser limitada pela escala de pixel do detector.*

Seeing

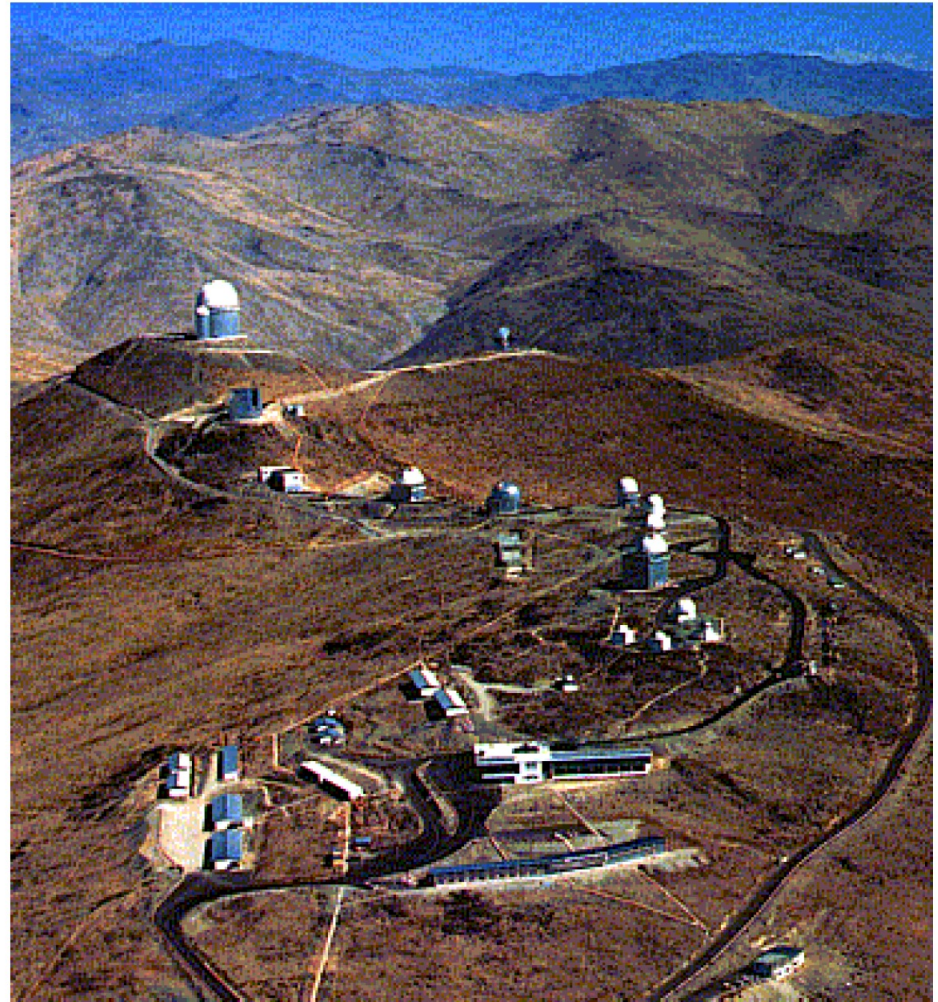
Resolução angular é **diminuída** ainda + por **turbulência atmosférica** → luz sofre **refração** na atmosfera: que altera **direção** do feixe

Seeing (medida da **turbulência atmosférica**): é o termo que se usa para expressar o efeito da atmosfera na desfocalização de imagens.

Para melhorar o seeing:

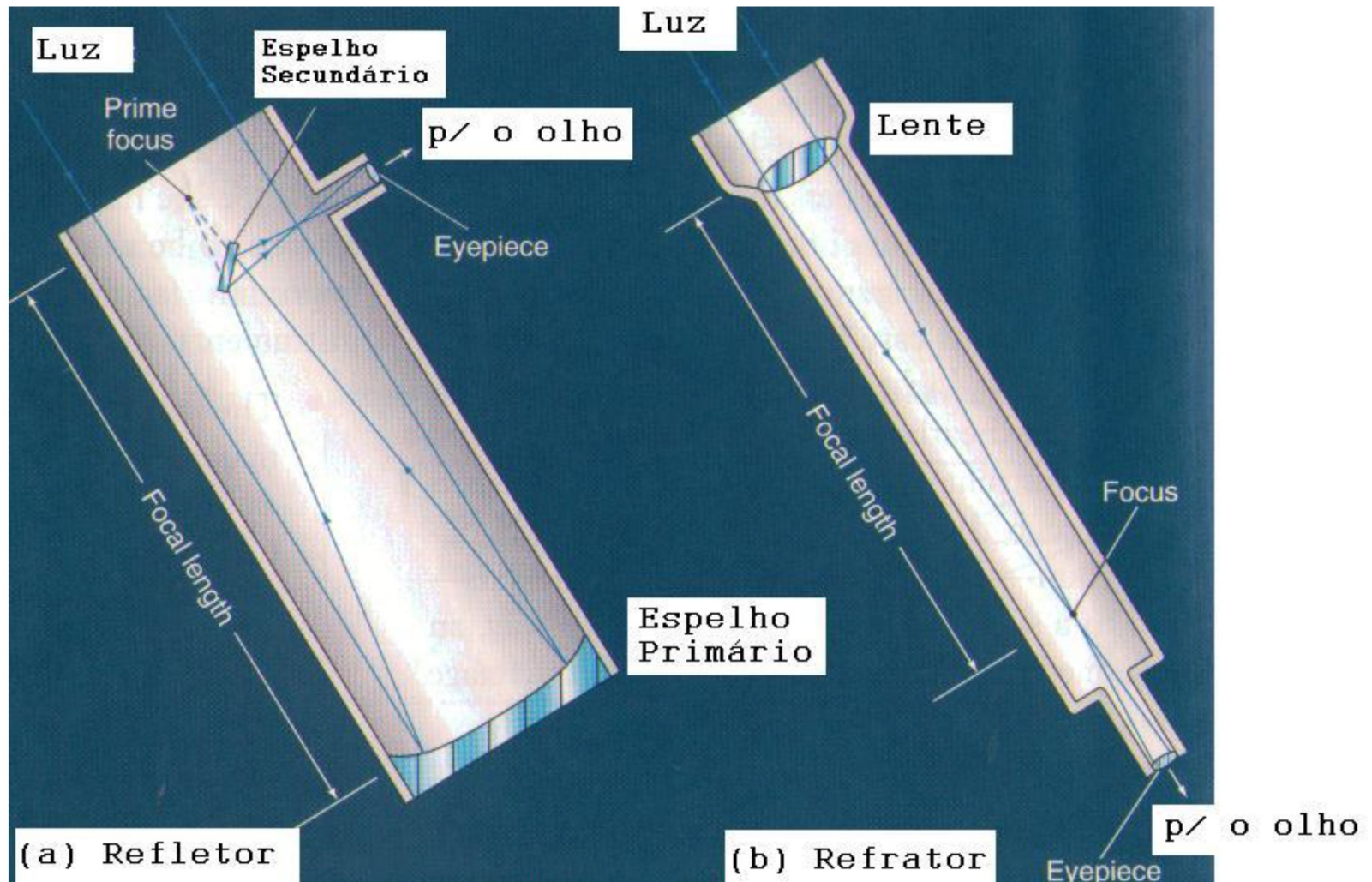
- > Altitude
- Clima seco
- Afastado de cidades (< poluição e < luz)

→ **Seeing** muito bom ($\theta \sim 1''$)



ESO - La Silla (Andes Chilenos)

Tipos de telescópios óticos



Os de maiores espelhos têm diâmetros da ordem de 10 metros.
Os de maiores lentes têm 1 metro de diâmetro.

Refletores vs Refratores

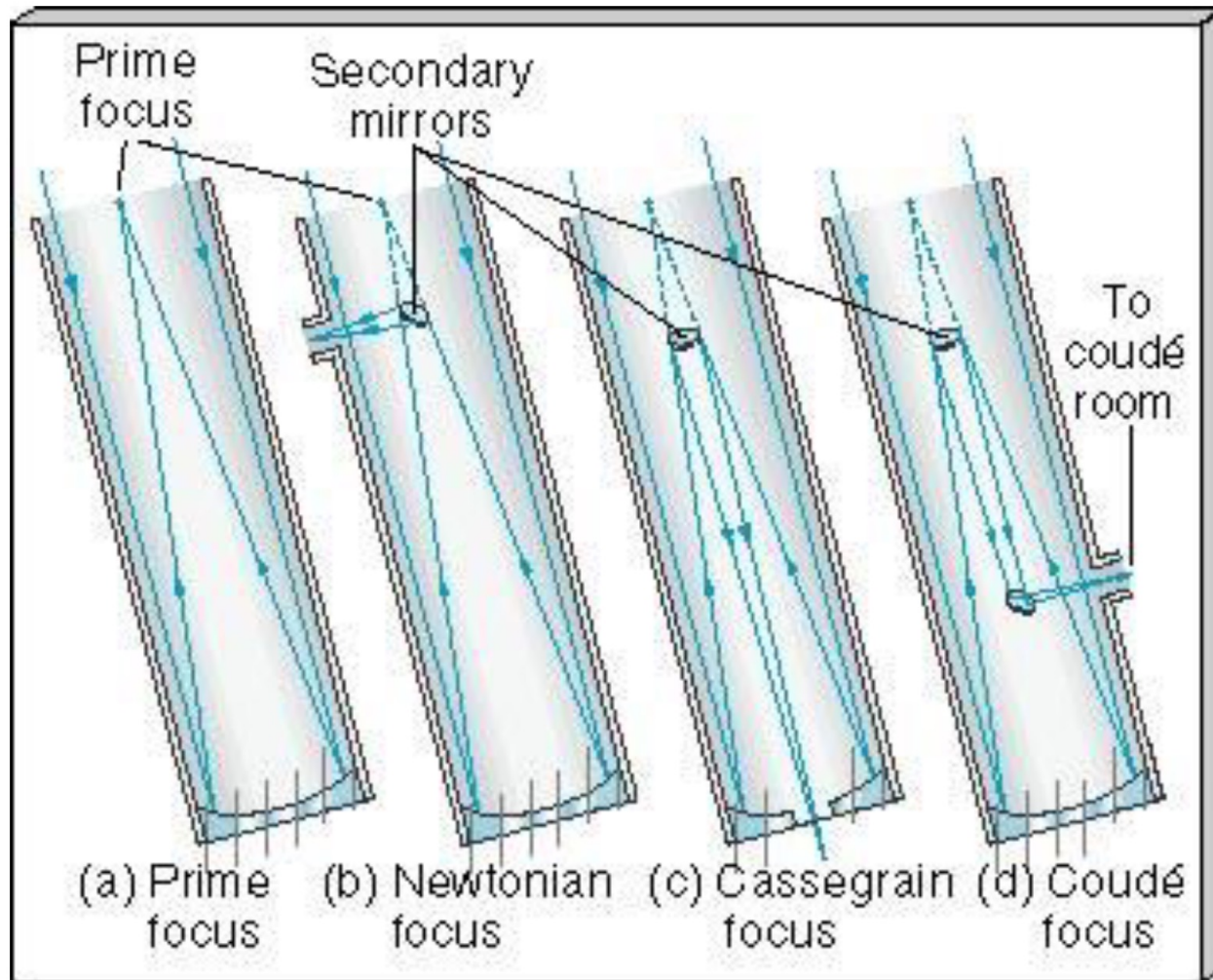
- **Os refletores são os mais usados:** mais praticos e economicos pois + facil produzir e lidar com espelhos grandes que lentes grandes
 - **Desvantagens das lentes:**
 - **peso**
 - **aberração cromática:** lente decompoe a luz como num prisma e focaliza diferentes λ s em pontos diferentes – causando defeito na imagem
 - **Polimento:** duas faces, enquanto espelho somente em uma face
- Maior telescopio **refrator** (**$D \sim 1\text{m}$**) \Rightarrow Obs. Yerkes (desde 1897), enquanto que maior telescopio **refletor**: **$D = 10\text{ m}$**

Refletores vs Refratores



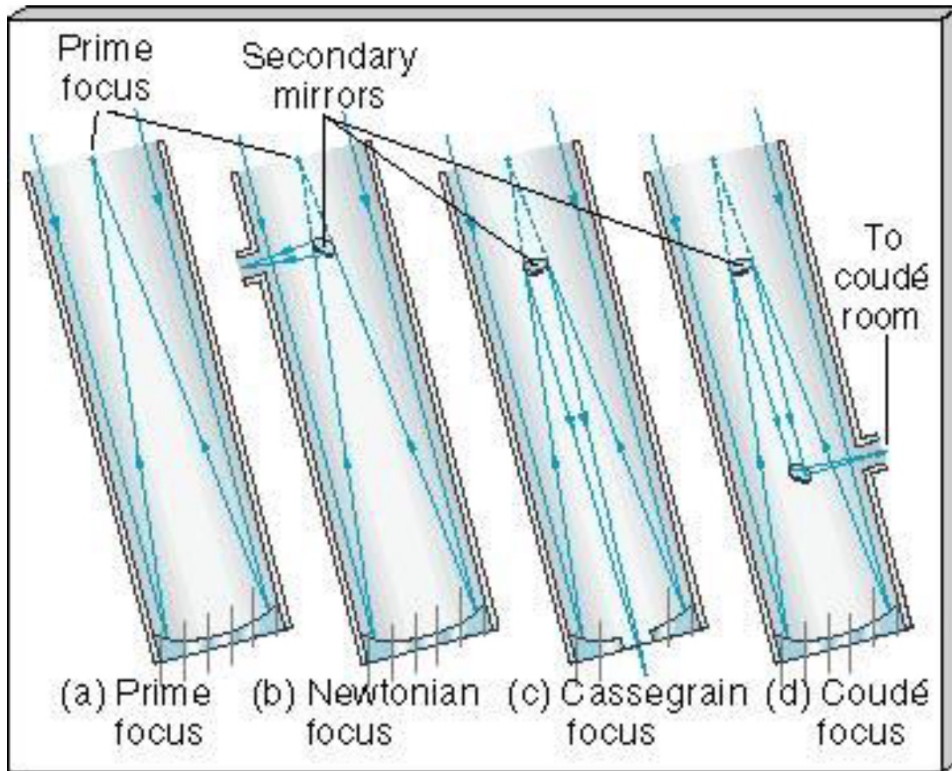
Observatório de Yerkes: maior telescópio refrator

Telescópios refletores



Principais tipos de focos utilizados na construção de telescópios refletores.

Telescópios refletores

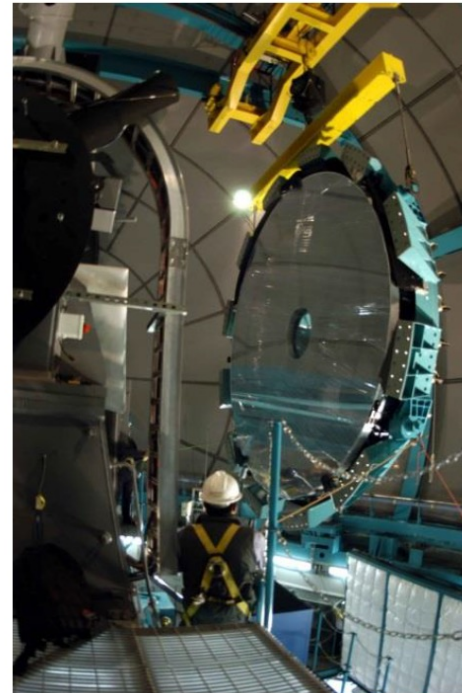
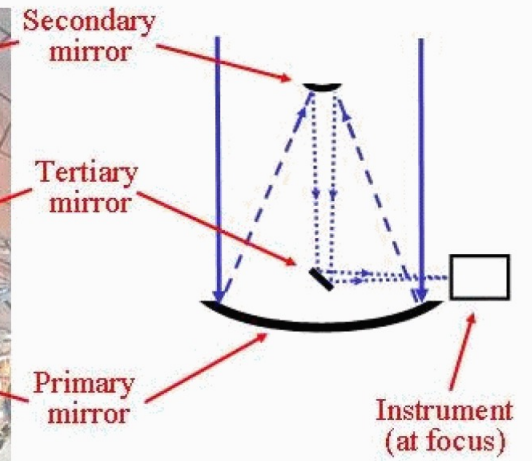
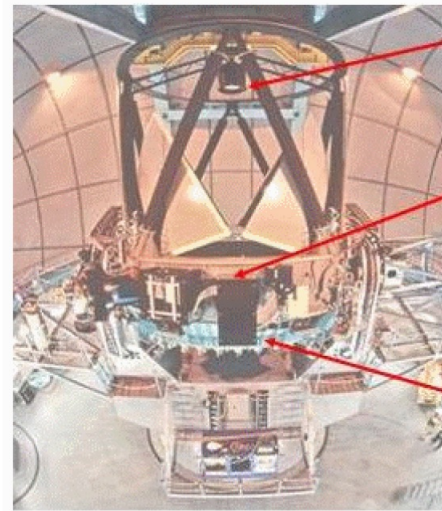


(b) **Newtoniano**: luz interceptada por **espelho secundário** antes de atingir **foco primário** – defletida de 90° para **ocular** na lateral (comum em **telescópios pequenos**)

(c) **Cassegrain**: quando se faz necessário acoplar **outros instrumentos** ao telescópio (detetores de grande porte) : montagem no **foco Cassegrain** – espelho **secundário reflete a luz para tubo abaixo** através de pequeno **buraco na lente primária**

(d) **Coudé** (cotovelo em francês): luz refletida pelo espelho secundário é interceptada por **3º espelho** que a **desvia para uma sala** com vários equipamentos + pesados (que não poderiam ser colocados num foco Cassegrain)

Telescópio SOAR: coudé



Nova geração de telescópios

- **Grandes espelhos monolíticos:** estrutura muito fina: em colméia
 - Múltiplos pontos monitorados para manter a forma do espelho: óptica ativa

Ex. Telescópio **Gemini**

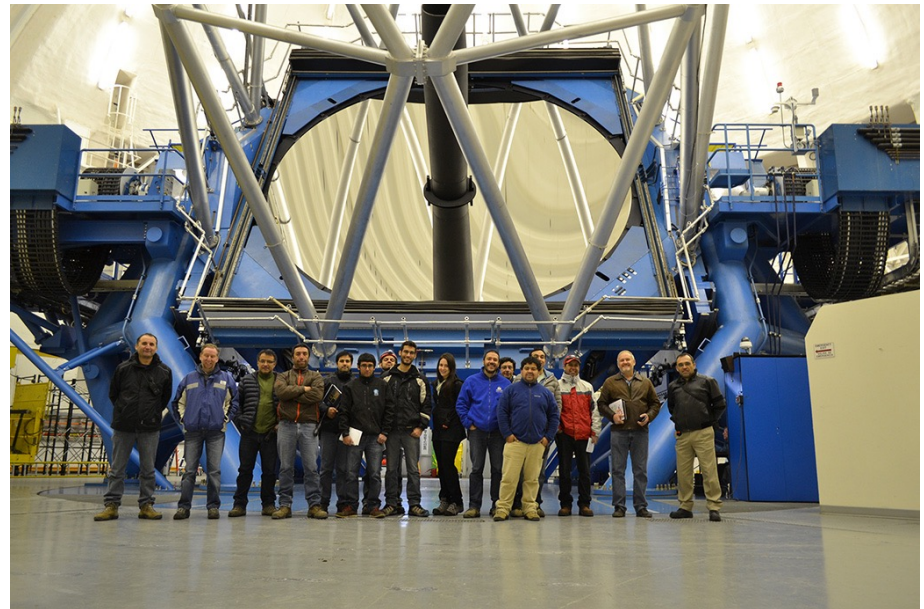
Telescópio Gemini



Gemini Sul – Cerro
Pachon (Chile)



$D = 8\text{m}$, espessura = 20 cm

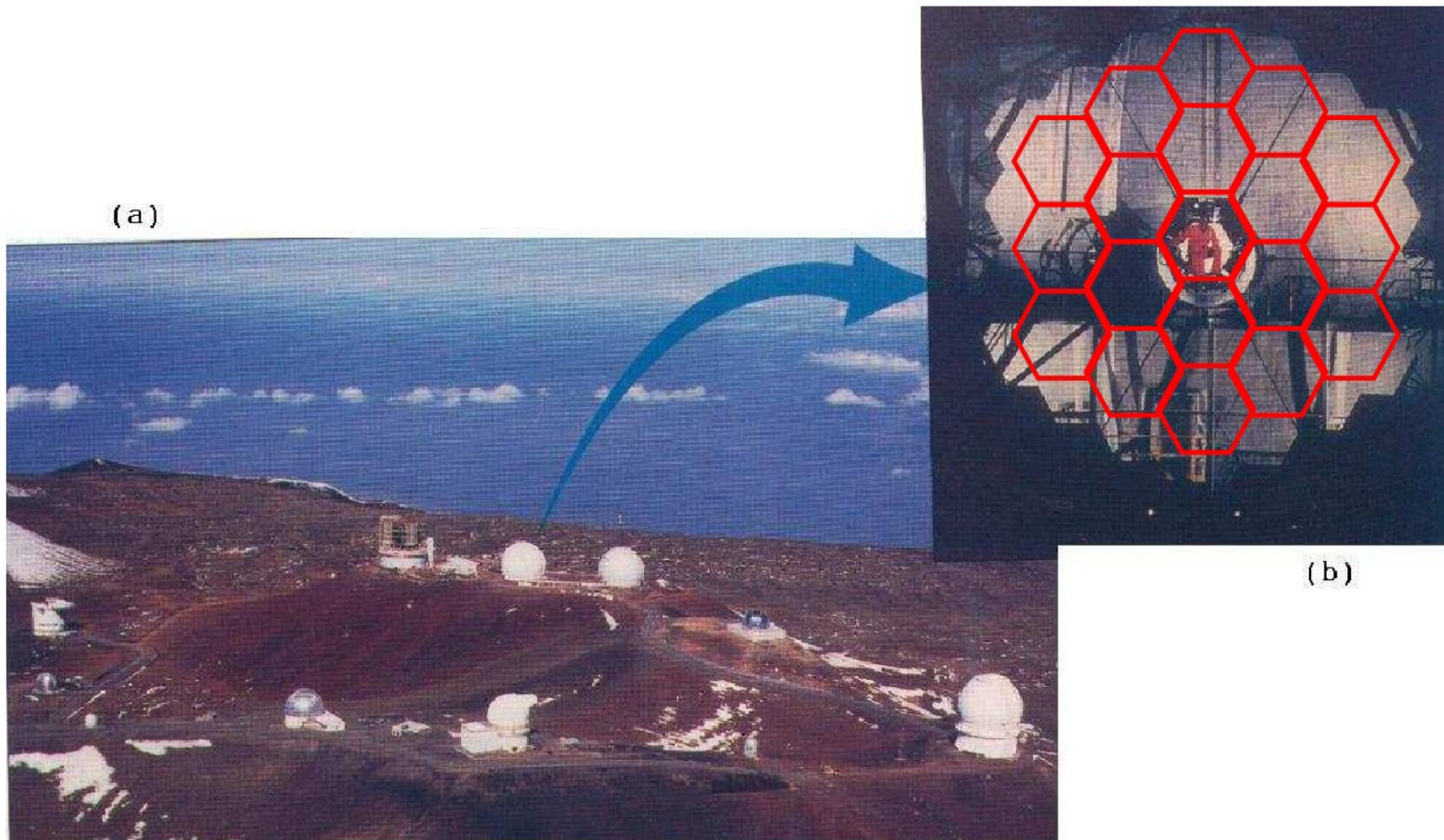


Nova geração de telescópios

Espelho em mosaico: segmentado

Ex: Keck de 10 m de diâmetro \Rightarrow mosaico
formado por 36 telescópios de 1,8m de diâmetro
cada (hexagonais)

Observatório Mauna Kea



(a) Observatório localizado no Havaí (4 km altitude). Os domos abrigam telescópios diferentes.

(b) Destaque para o **telescópio Keck de 10 m de diâmetro**: composto de um **mosaico de espelhos hexagonais** (Note o técnico no centro)

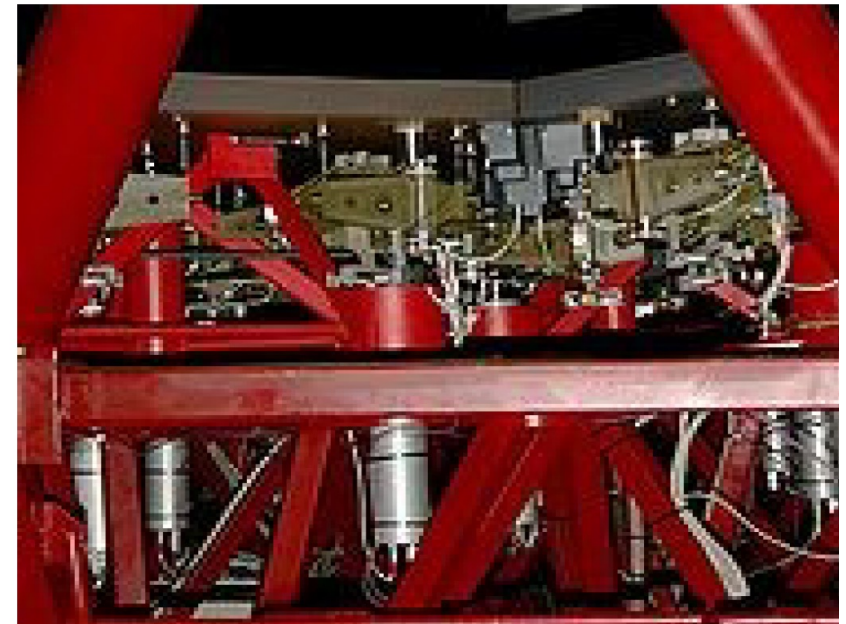
Novas técnicas

- **óptica ativa:** são efetuados contínuos ajustes para ajustes para evitar deformidades no espelho

Com **optica ativa:** **Keck -> $\theta = 0,25''$**

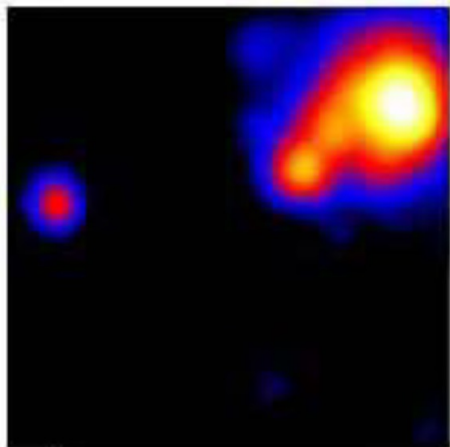
- **óptica adaptativa:** deforma a forma da superfície do espelho (por computador) para anular os efeitos da turbulencia atmosferica => melhora no seeing ($\ll 1''$)

Óptica ativa

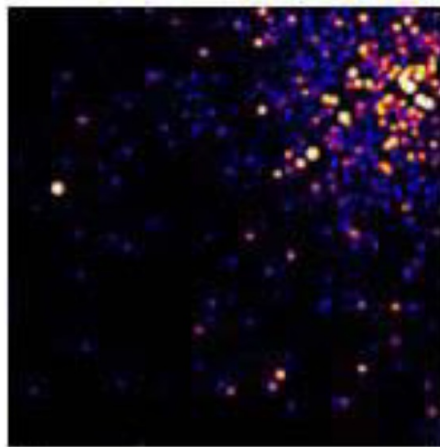


Atua sobre o espelho primário e corrige deformações a cada segundo.

Óptica ativa



(a)



(b)

Imagem de 1
aglomerado de
estrelas:

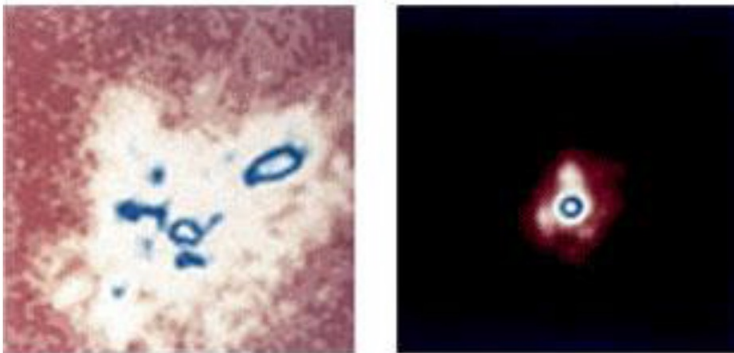
(a) **sem**

(b) **com optica ativa**

Óptica adaptativa



(a)



(b)

(a) **lasers checam a atmosfera** acima do tel. e retornam informacao ao computador que modifica o espelho **milhares de vezes/segundo** para compensar pelo *seeing* pobre (projeto star wars)

(b) **Estrela Procyon:**
sem (imagem borrada de varios “ de arco)
com optica adaptativa ($\theta = 0,2''$!)

Hubble Space Telescope (HST)

$D = 2,4\text{m}$

Colocado em
órbita em 1990:

$\theta_{\min} = 0.05''$ (no
óptico)

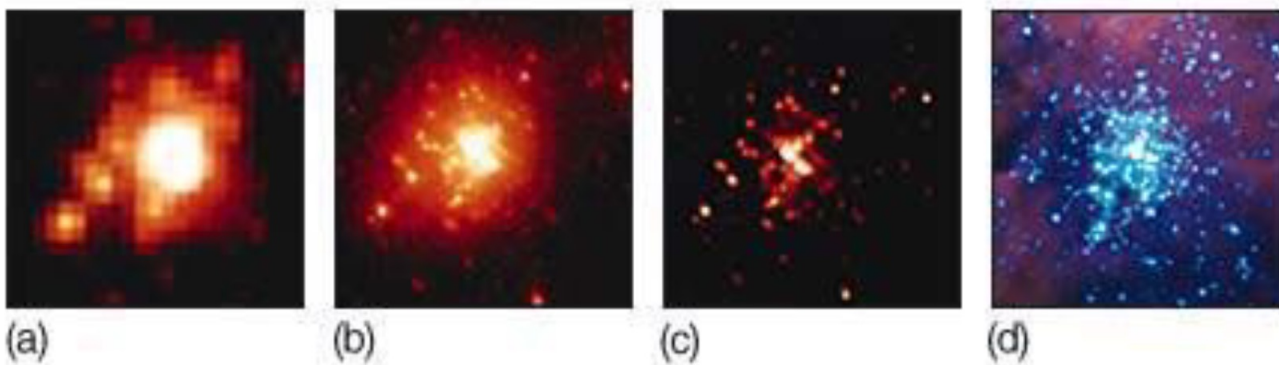
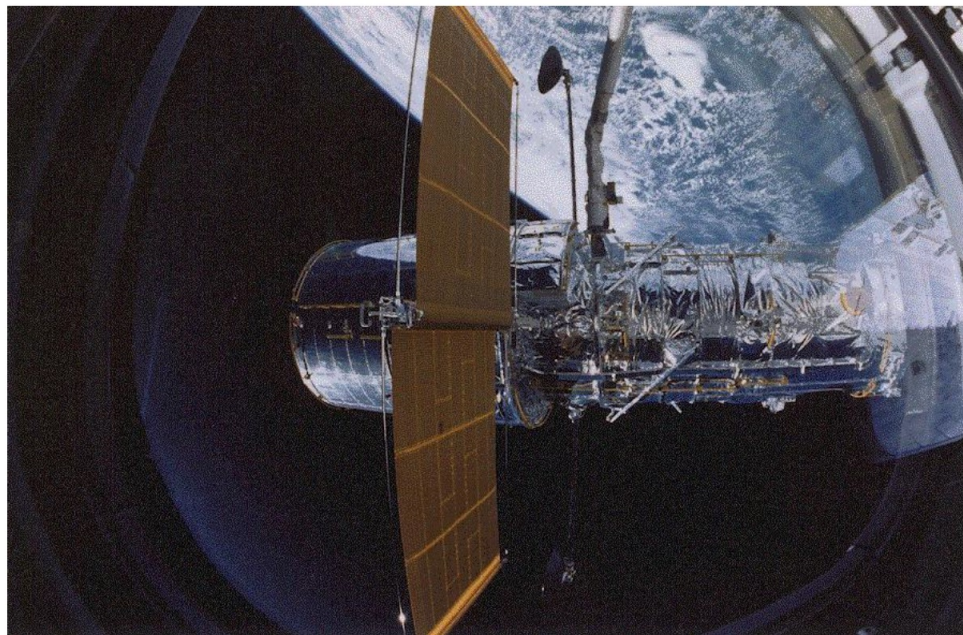


→ Visão do Universo: $20 \times >$ que qualquer telescópio grande no solo!

Hubble Space Telescope (HST)

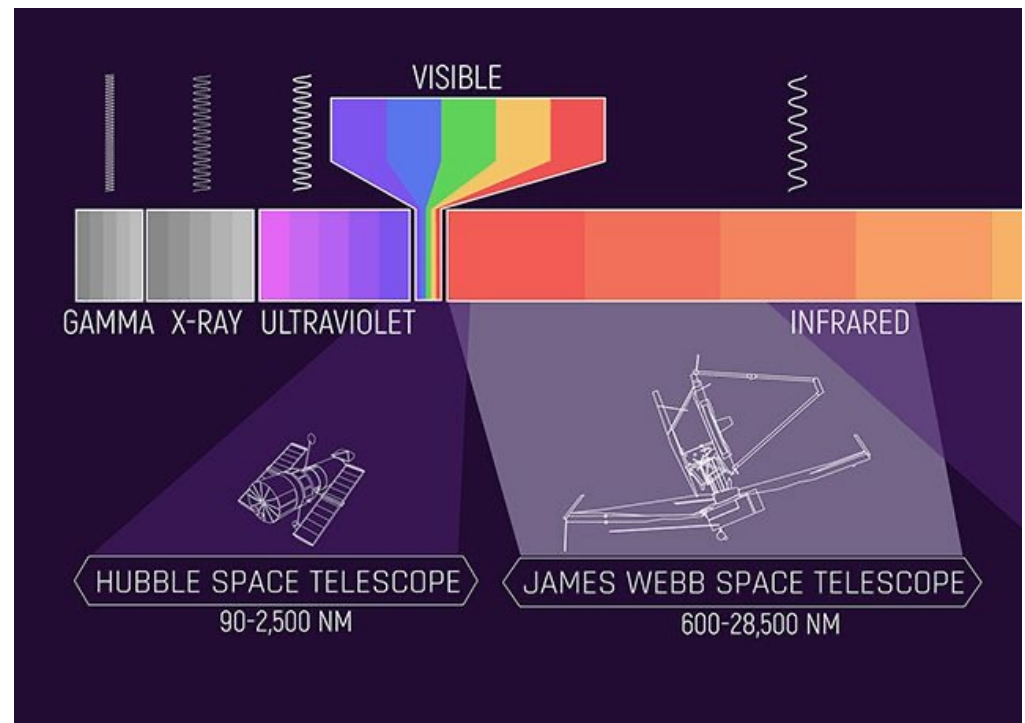
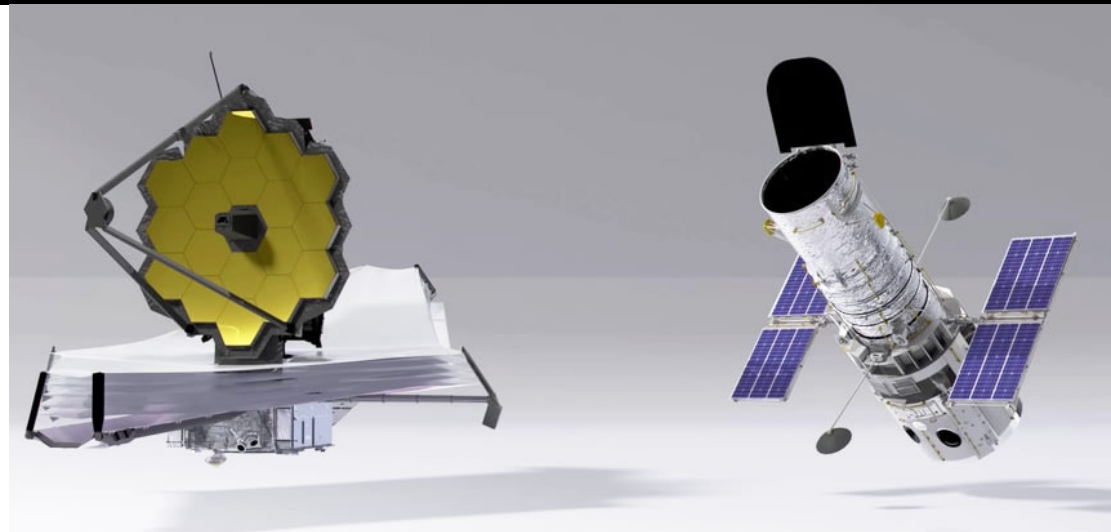
Imagem de um aglomerado de estrelas na NM:

(a) com 1 telescópio na superfície; (b) com HST antes do reparo; (c) com processamento de computador; (d) após reparo de defeito no espelho em 1994.



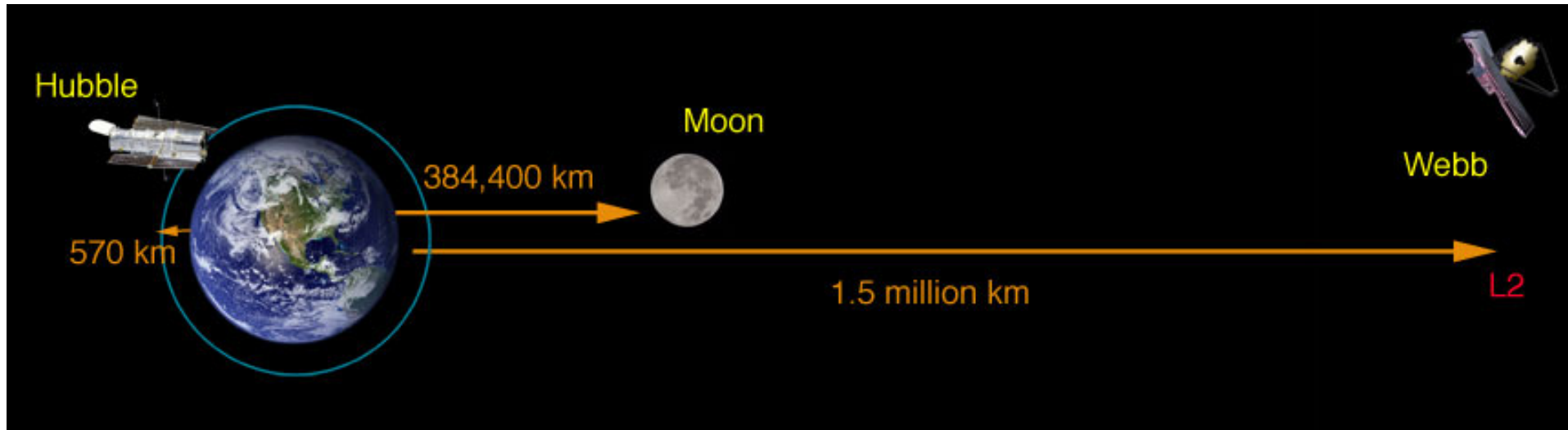
James Webb Space Telescope (JWSP)

- $D = 6.5 \text{ m}$
- Comprimento de onda: $0.6\text{--}28.3 \mu\text{m}$ (óptico (laranja) a infravermelho médio)
- $\theta_{\min} = 0.03''$ no optico



James Webb Space Telescope (JWSP)

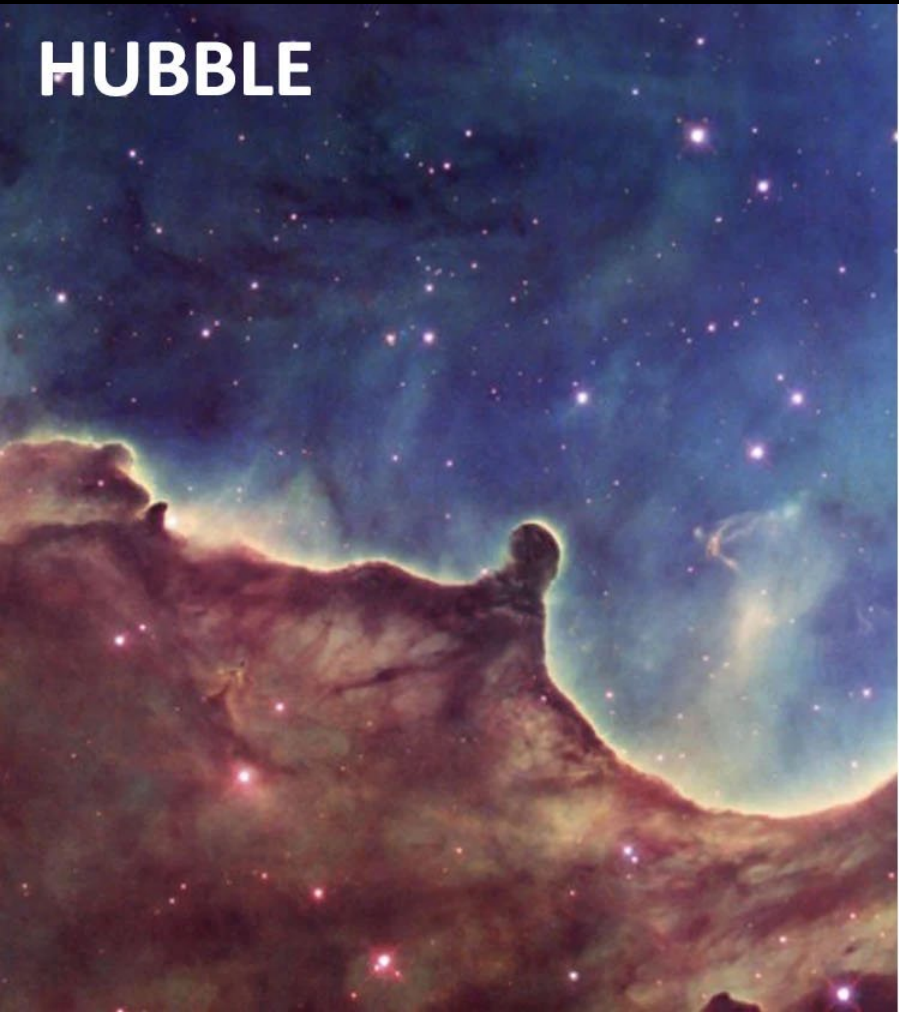
- Órbita no ponto de Lagrange L2



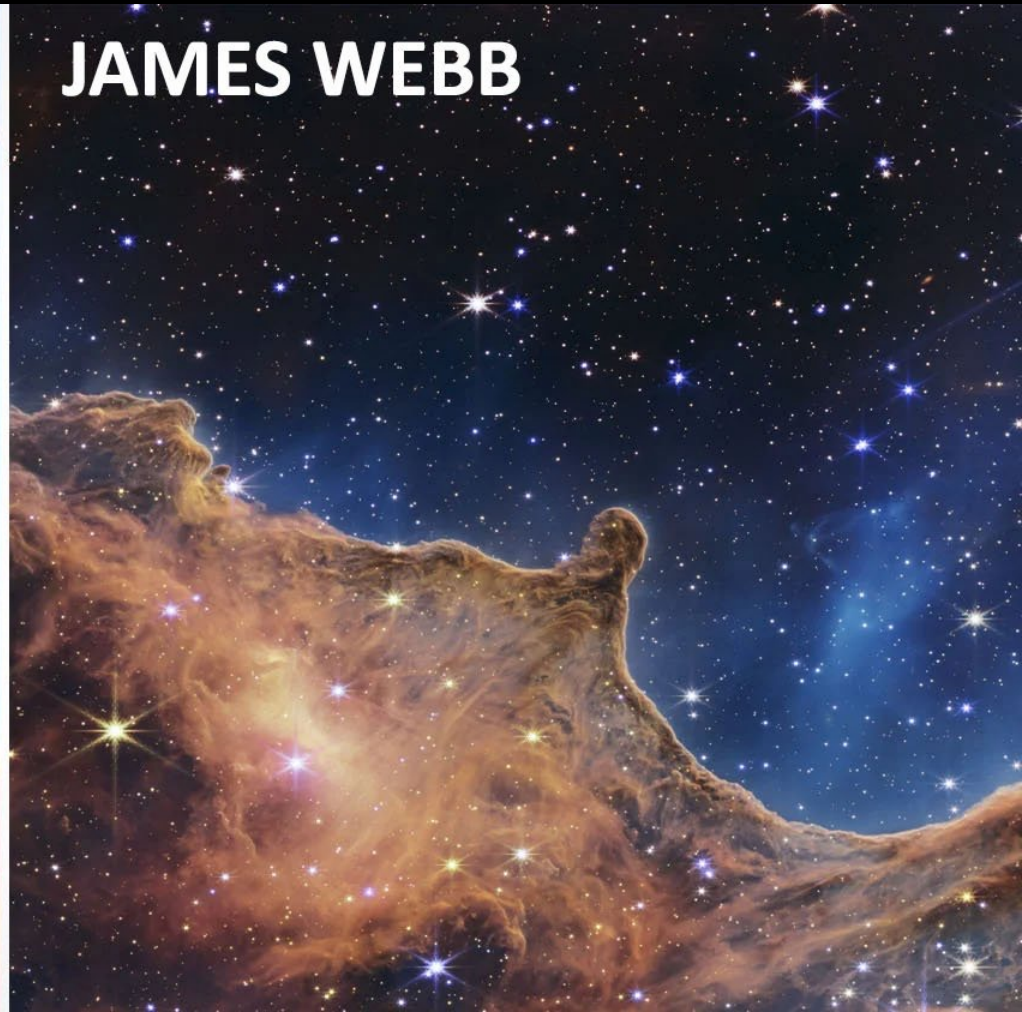
- Lançado em 25/12/2021
- Chegou no destino (L2) em Janeiro de 2022
- Primeira imagem em 11 de Julho de 2022

James Webb Space Telescope (JWSP)

HUBBLE



JAMES WEBB



Cosmic Cliffs of Carina Nebula (NGC 3324)

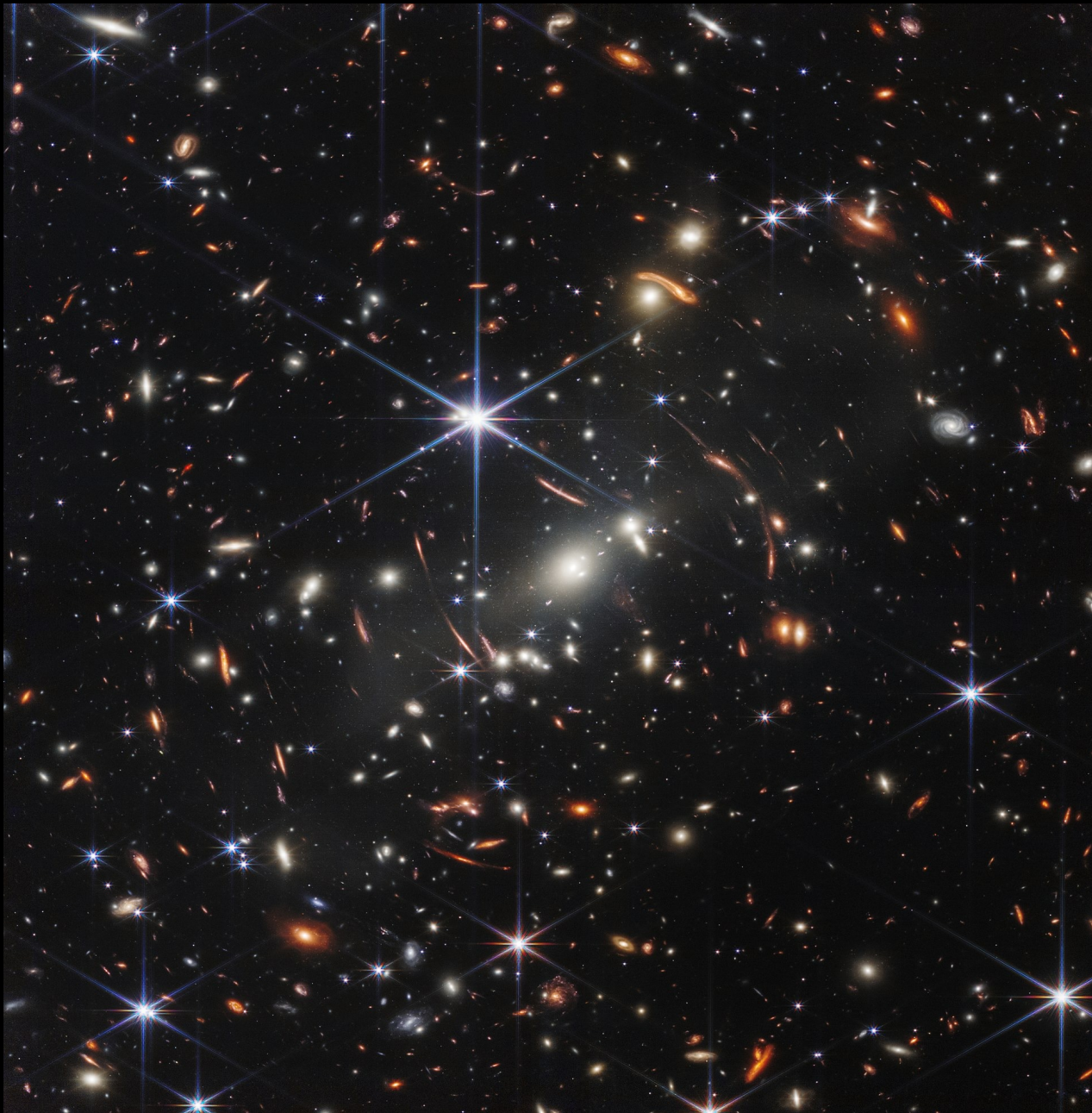
James Webb Space Telescope (JWST)



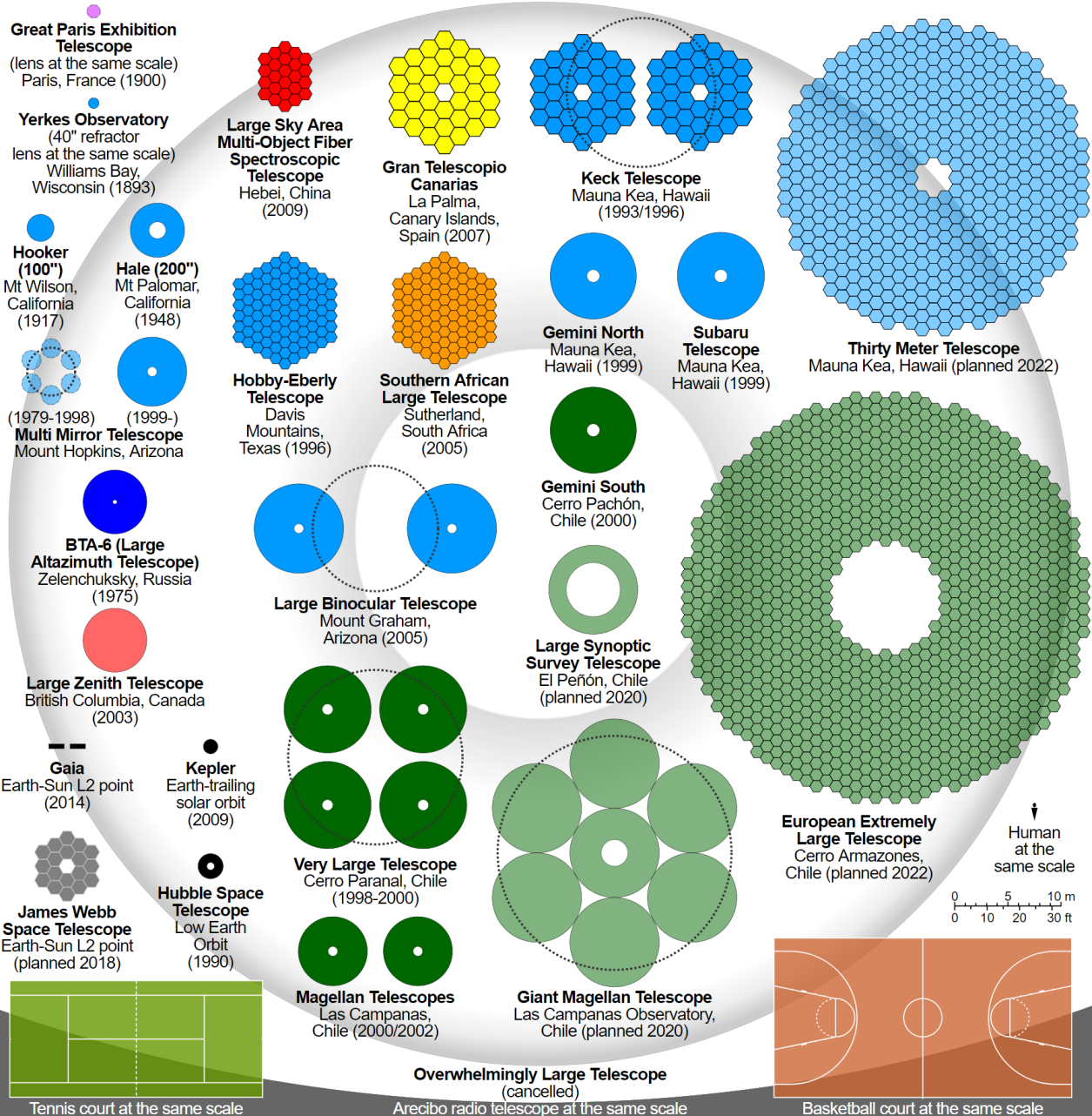
Pilares da criação na nebulosa da Águia

James Webb Space Telescope (JWST)

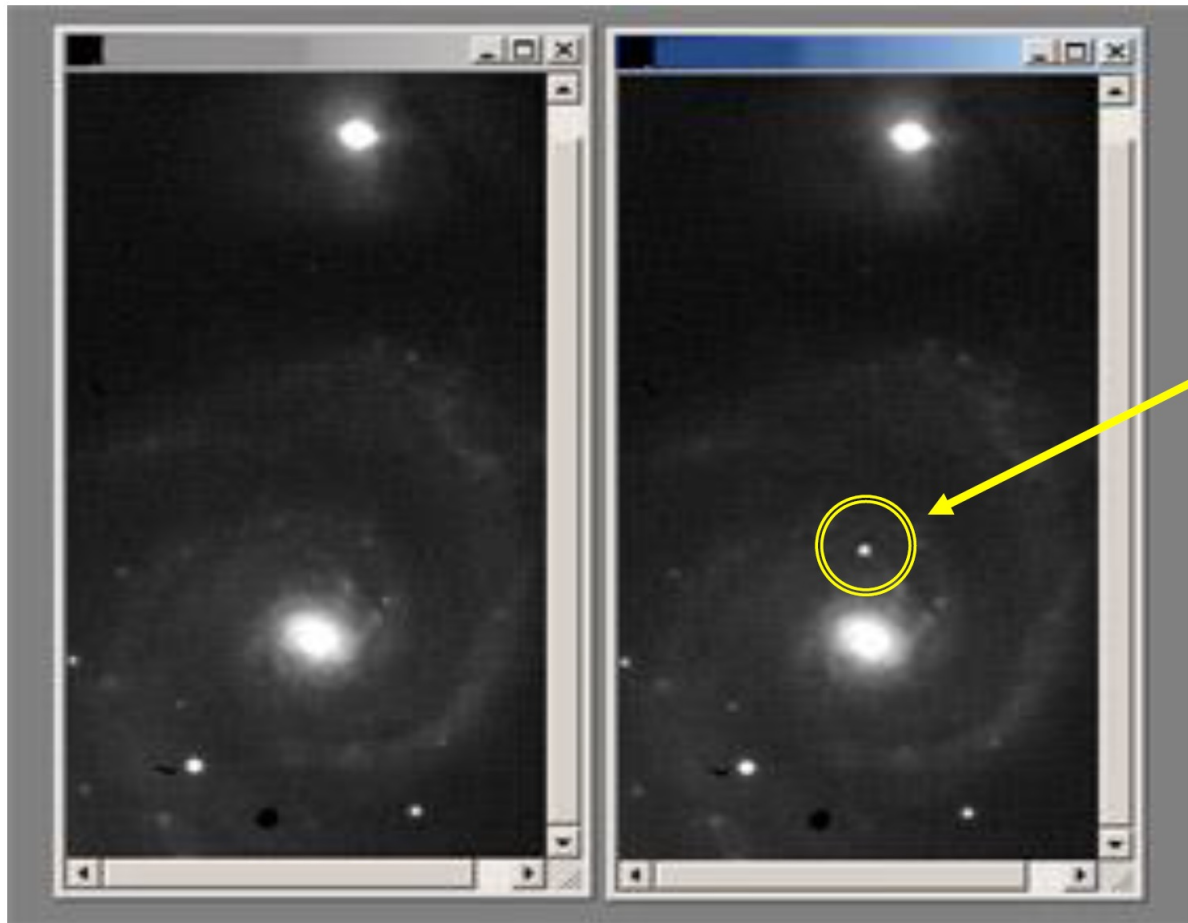
Webbs First
Deep Field –
Galaxy cluster
SMACS
J0723.3-7327



Telescópios atuais e futuros



Processamento de imagens



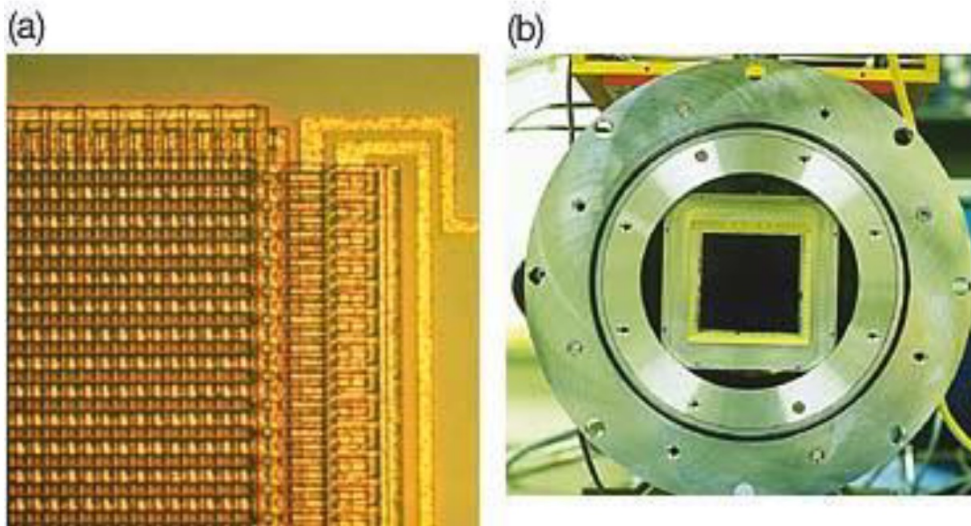
Imagens de uma galáxia obtidas em épocas diferentes. Uma supernova destaca-se na segunda imagem.

Como se faz o estudo e a comparação de diferentes imagens astronômicas?

Processamento de imagens

Computadores: controlam telescópios hoje, imagens e dados são lidos e manipulados por programas de computador

Fotografias: bem pouco usadas hoje como detectores no telescópio



(a) CCD; (b) CCD montado no foco de 1 telescópio

Detetores eletrônicos CCD

(charged coupled devices):
pastilha de silício com várias células sensíveis à luz =
pixels num arranjo
bidimensional

Luz atinge pixel: 1 carga elétrica é liberada

leitura eletrônica da carga em cada pixel: computador reconstrói imagem

quantidade de carga :
proporcional ao n. de fótons incidentes em cada pixel

Processamento de imagens

CCD: um arquivo de dados é representado por uma matriz de números:

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	80	90	75	0	0	0
0	0	50	108	132	100	66	0	0
0	64	112	109	130	166	120	50	0
0	0	106	113	52	112	116	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

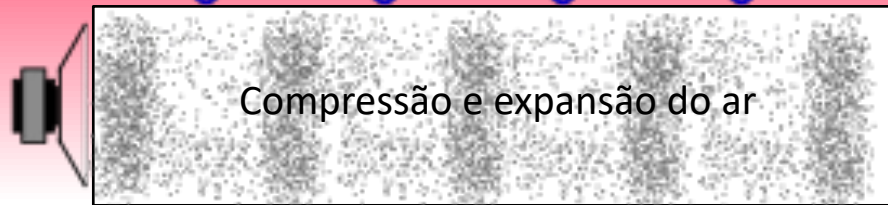
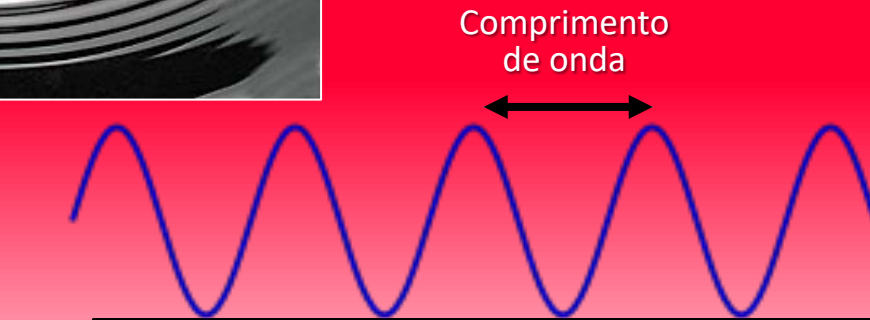
Cada número corresponde ao brilho de uma parte do céu na imagem.

Ondas Eletromagnéticas

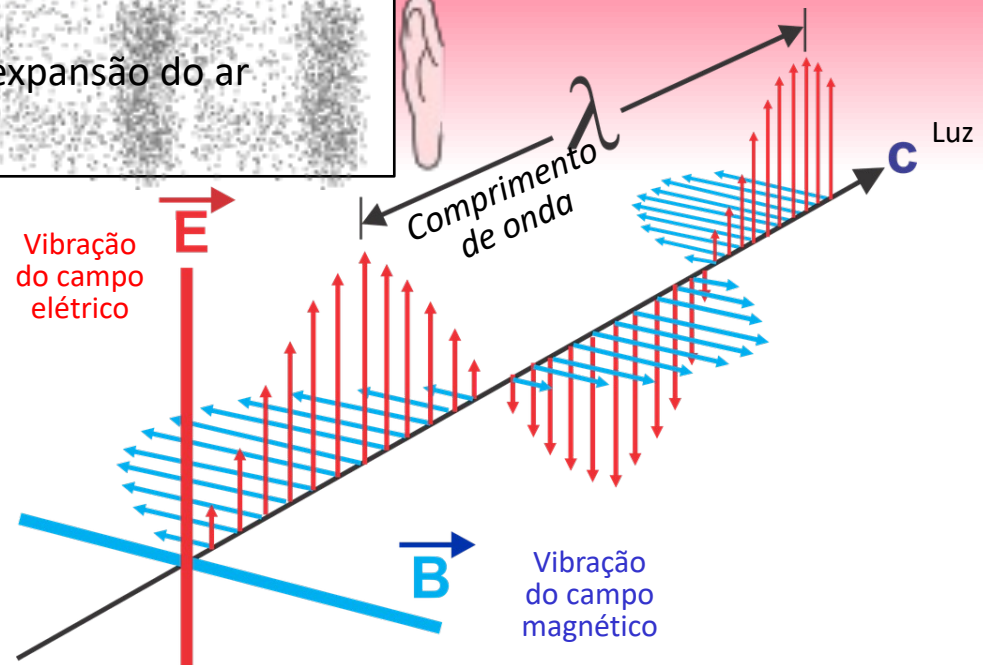
Ondas mecânicas e eletromagnéticas



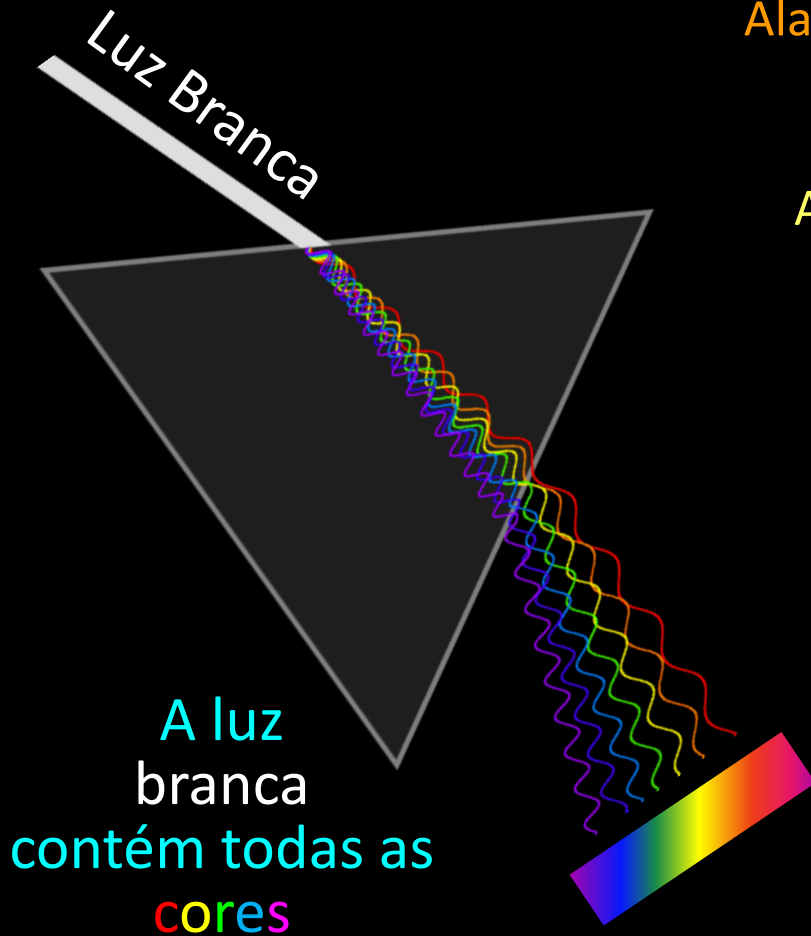
Ondas mecânicas:
Precisam de meio material para sua propagação



Ondas eletromagnéticas:
Não precisam de meio material para sua propagação



Espectro visível



Ondas eletromagnéticas

Vermelho

Alaranjado

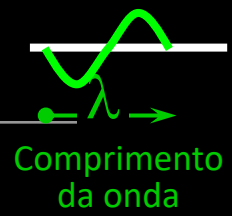
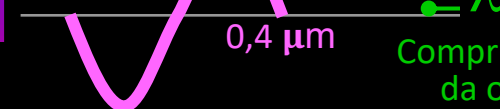
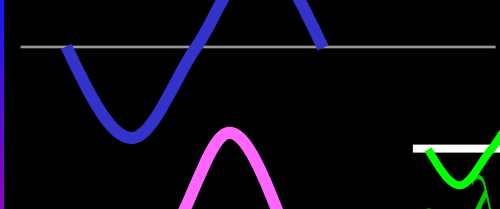
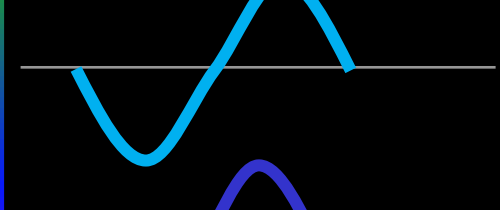
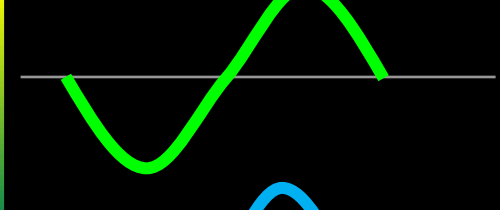
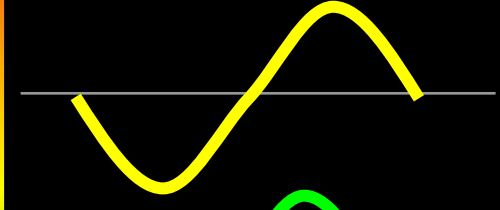
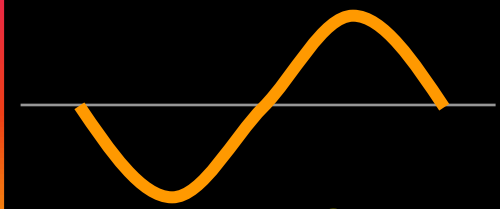
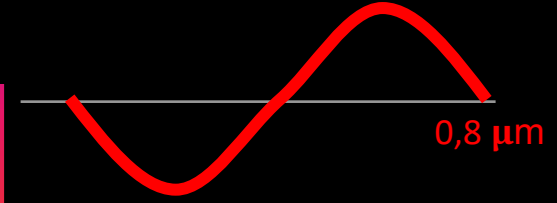
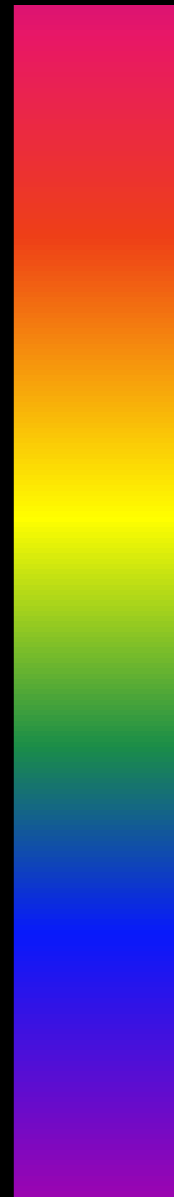
Amarelo

Verde

Azul

Anil

Violeta



Espectro eletromagnético



Hertz
1885

Ondas de rádio

Infravermelho
(calor)

Visível

Vermelho
Laranja
Amarelo
Verde
Azul
Anil
Violeta

Newton
1666

Ultravioleta

Roentgen
1895

Raios X

Raios Gama



Comprimento de onda



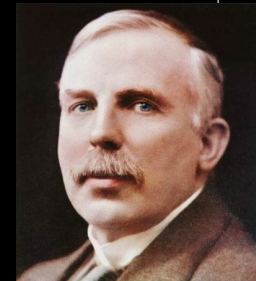
Herschel
1800



Ritter
1801



Rutherford
1914



Olhando o céu em ondas de rádio



Ondas de rádio

Infravermelho

Visível

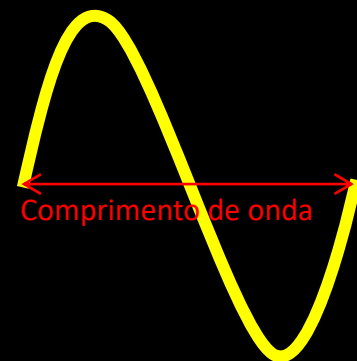
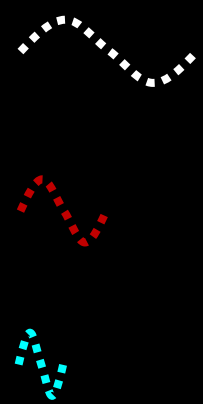
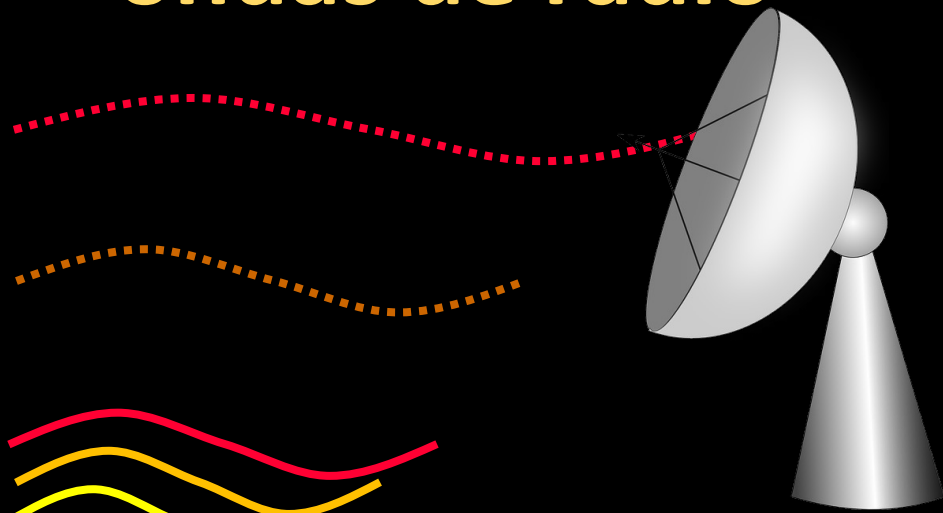
Vermelho

Violeta

Ultravioleta

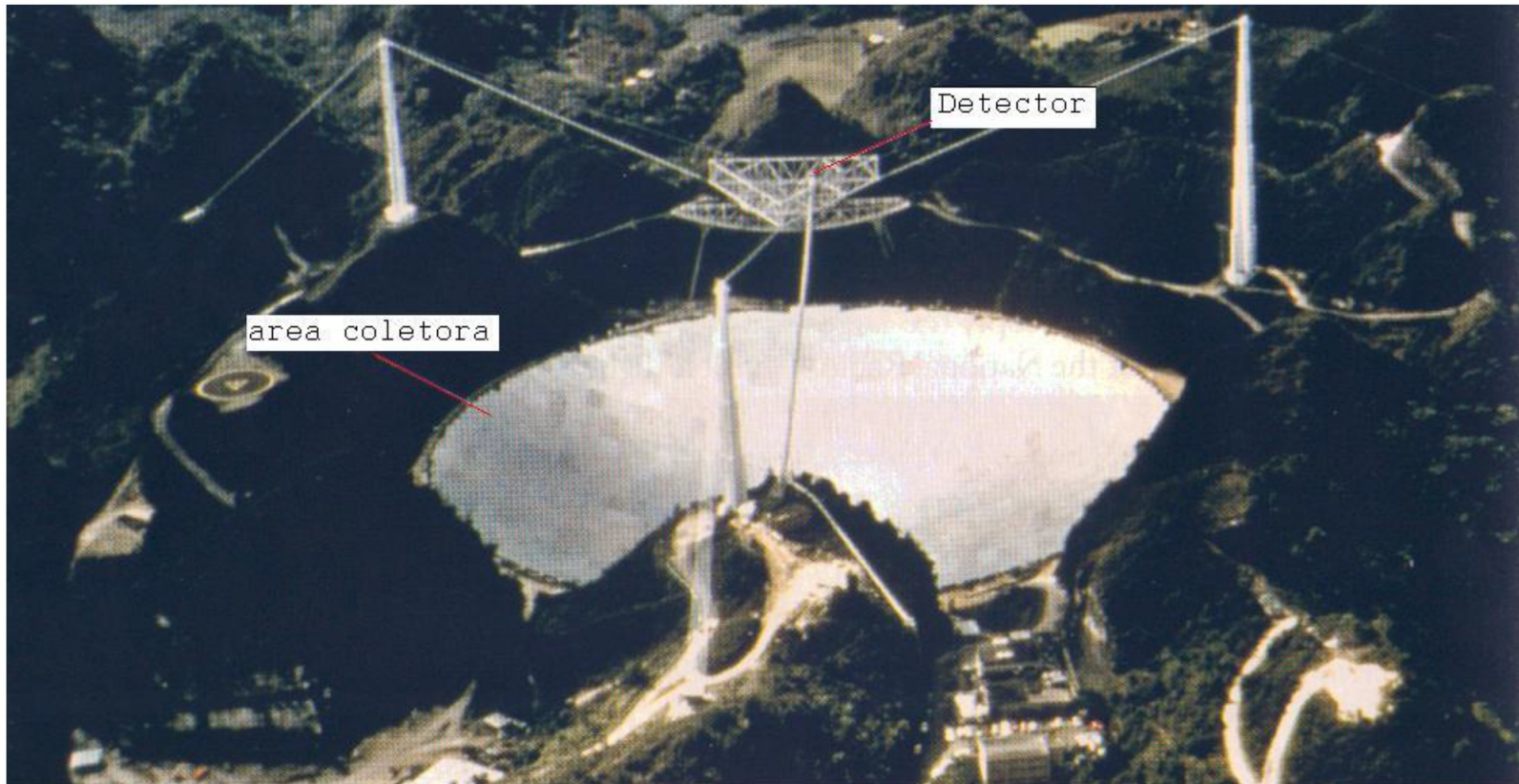
Raios X

Raios Gama



Radiotelescópios

A emissão de ondas rádio ($\lambda \sim 10^{-3}$ a 10^3 m) pode ser coletada por antenas parabólicas e levadas a um receptor.



Arecibo (antena com **300 m de diâmetro**)

Radiotelescópios

- Coletor de ondas rádio
- Tipo mais comum: refletor parabólico ondas de radio levadas ao foco onde se localiza antena: coleta energia e alimenta o receptor
- Contrariamente a telescópios ópticos que podem coletar todos os λ s visíveis: cada radiotelescópio só banda estreita (só 1 canal de frequências)

Radiotelescópios

- Resolução angular pobre:

$$\theta = \lambda/D$$

$$\lambda_{\text{radio}} = 10^6 \lambda_{\text{optico}}$$

→ θ grande

Melhor resolução que se consegue com RT:

$\theta_{\text{min}} = 10''$ (>10x pior que tels. ópticos)

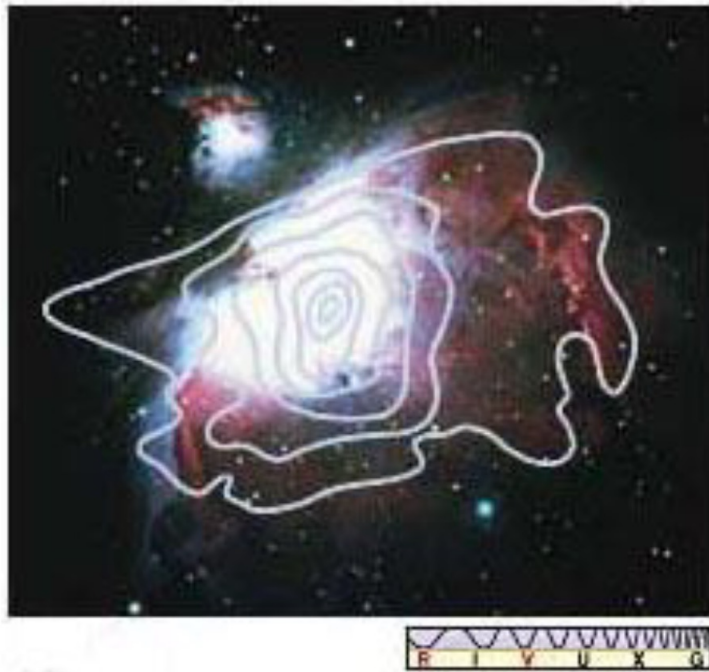
Ex.: RT de Green Bank possui **D= 43 m**

Para **$\lambda= 1 \text{ cm}$**

$$\rightarrow \theta_{\text{min}} = 1' !$$

Dai a necessidade de os pratos coletores: D bem grande (Arecibo: D=300 m)

Radiotelescópios

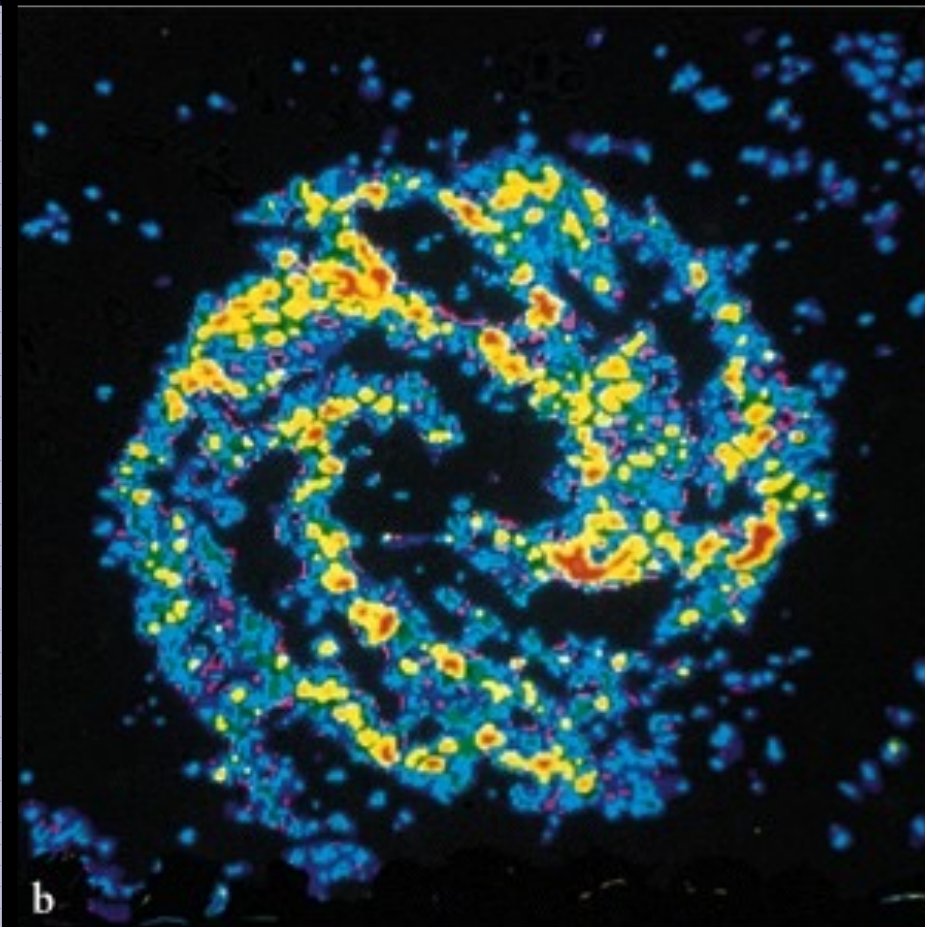
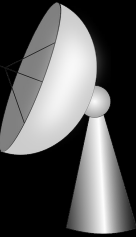


- Imagem da nebulosa de Orion no optico superposta por mapa em radio (linhas):

Resolucao no optico: 1''

Resolucao em radio: 1'

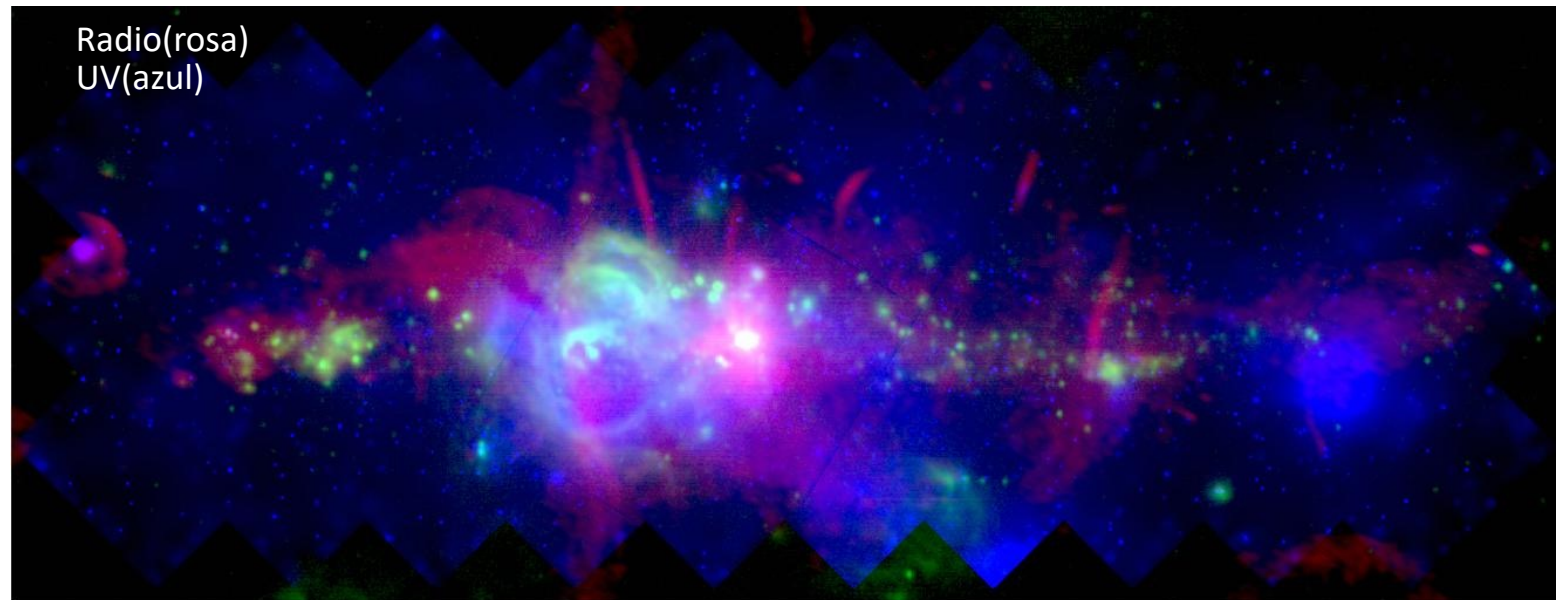
M 83 observada no visível e em ondas rádio



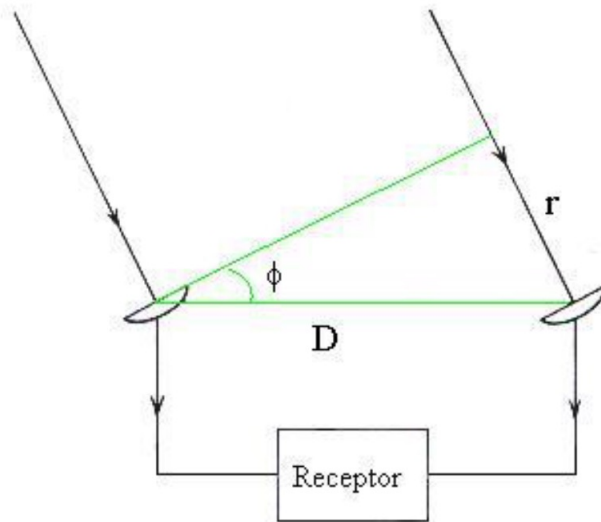
Vantagens dos RTs

- **Muitas fontes emitem fracamente no visível e fortemente em rádio e os RTs as tornam observáveis**
- **Muitas fontes inobserváveis porque luz visível é fortemente absorvida por poeira interestelar – são observáveis em rádio: ex. centro de nossa galáxia**
- **RTs são bem sensíveis – detectar rádio fontes bem fracas e distantes com tempos de observação curtos se os pratos coletores tiverem D s grandes**

Centro Galáctico



Radio-interferômetros



Esquema de um interferômetro de duas antenas

Diametro efetivo do interferômetro (D) = distância entre os pratos mais distantes do arranjo

Quanto maior D (linha de base): melhor o poder de resolução

Very Large Array (VLA)

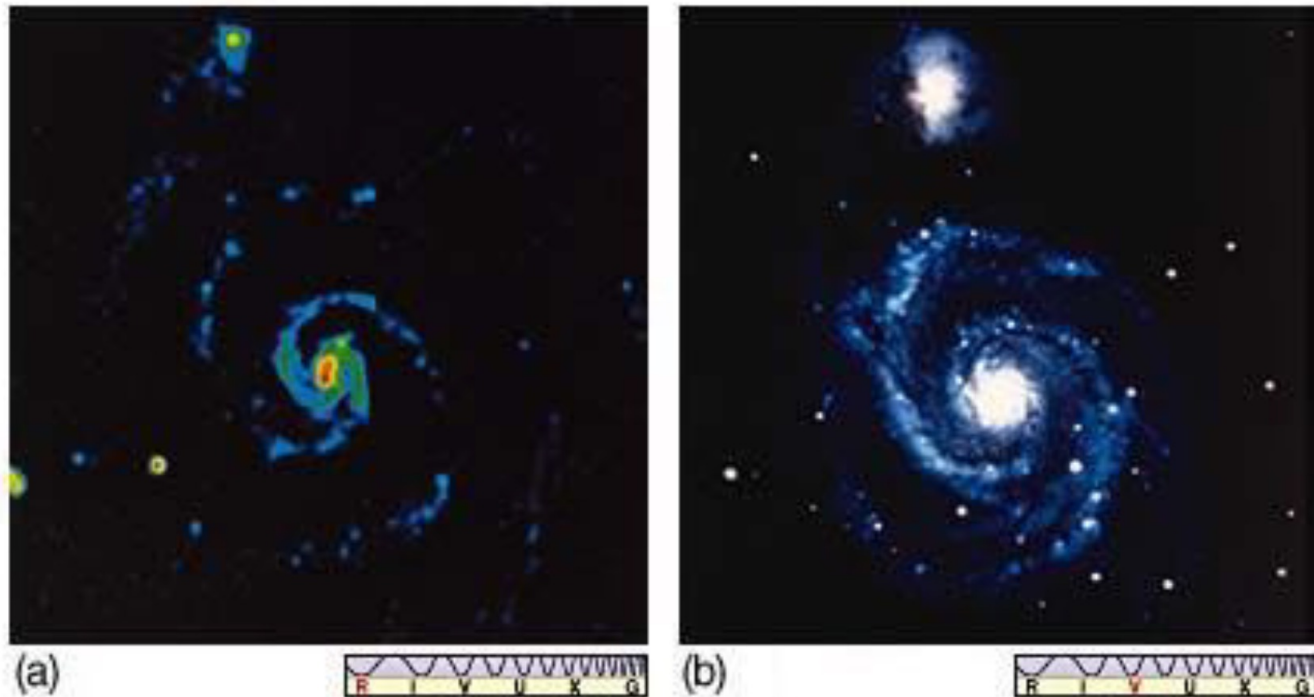


VLA (Very Large Array): o arranjo das 27 antenas (com 25m de diâmetro cada) dispostas sobre trilhos em forma "Y" formando o VLA.

Very Large Array (VLA)

- 3 fileiras formando um “Y”, com 27 antenas (com $d = 25$ m cada).
- **Arranjos de 1 a 35 km, $p/\lambda = 1,3$ a 21cm**
- Resolução angular: $\theta = \text{alguns}^\circ$ (comparavel a de imagens óticas)
- Bom para **mapear galaxias distantes** que são radiofontes intensas

Very Large Array (VLA)



- (a) Imagem VLA da galaxia M51 ($\theta =$ alguns “)
- (b) Imagem ótica com telescópio de $D=4$ m

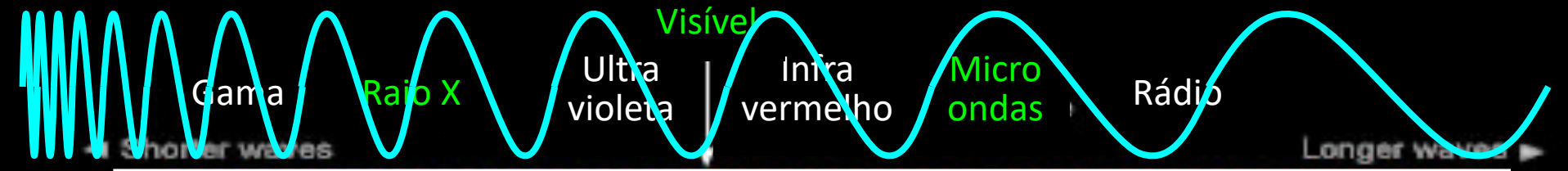
VLBI (Very Long Baseline Interferometry)



Interferometria utilizando dados de RTs colocados em vários pontos da superfície da Terra:

D = distancias intercontinentais com grande precisão no tempo de observação:

$$\theta = 0,001 \text{ " !}$$



Nível superior da atmosfera



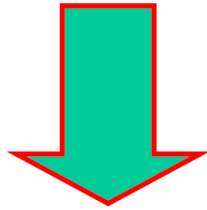
Transparência da atmosfera

UV + Visível + IV

Rádio

Astronomia Espacial

Os comprimentos de onda correspondentes ao **IV** e às altas energias (**raios γ** , **raios X**, **ultravioleta**), são absorvidos na ionosfera, a uma altitude de 100 km



detectados em equipamentos a bordo de balões, aviões e satélites

Satelites usados no Infravermelho e Microondas

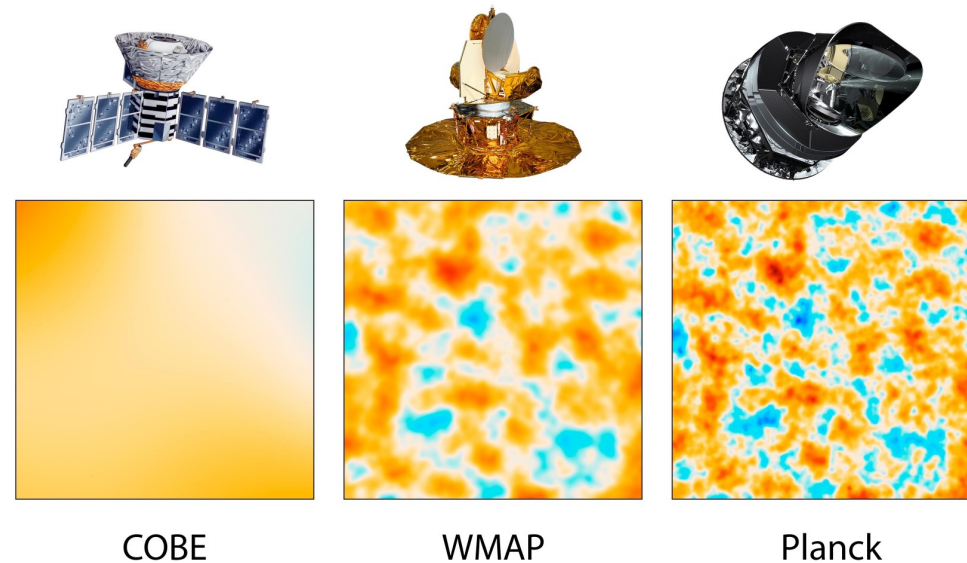
Infravermelho:

- IRAS (InfraRed Astronomy Satellite) cobertura do ceu completo
- Herschel: maior telescópio infravermelho já lançado



Microondas:

- COBE (Cosmic Background Experiment) mapeamento da radiação de fundo
- WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)
- Planck: imagem mais detalhada do fundo microondas cosmológico



Satélites utilizados nas altas energias

Raios ultravioleta:

- IUE (International Ultraviolet Explorer) lançado em 1987
- HST: embora optico, tambem captura radiacao UV (1990)
- GALEX

Raios-X:

- satélites pioneiros Einstein (início dos anos 80) e ROSAT (início dos anos 90)
- Swift
- Atuais: XMM, Chandra, NuSTAR

Raios gama:

- GRO (Gamma Ray Observatory) lançado em 1991
- EGRET
- Atualmente novo: FERMI/NASA

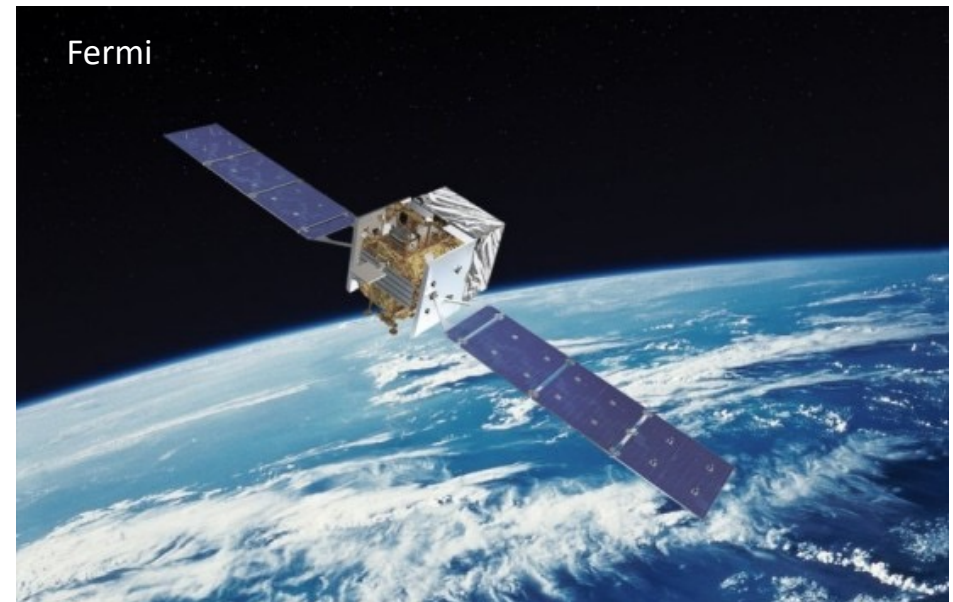
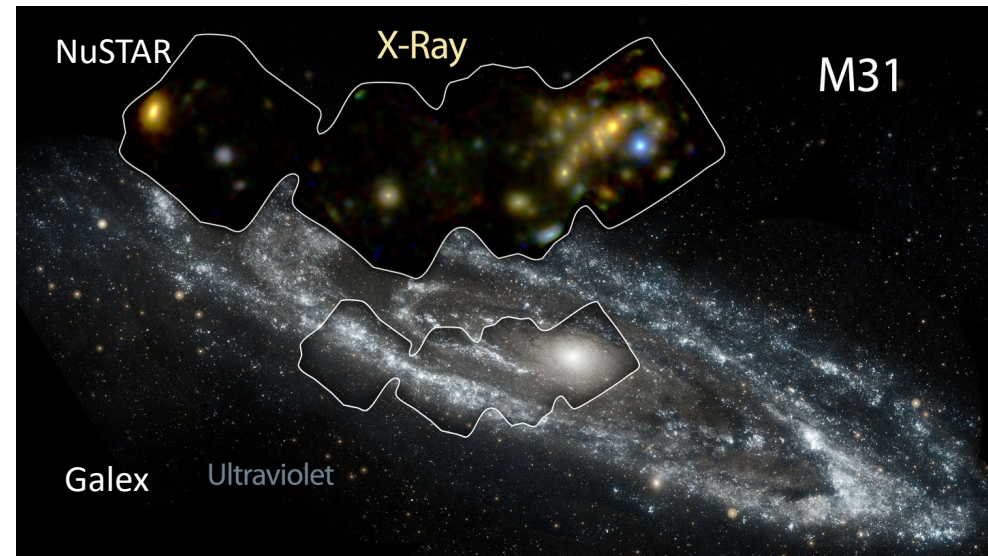
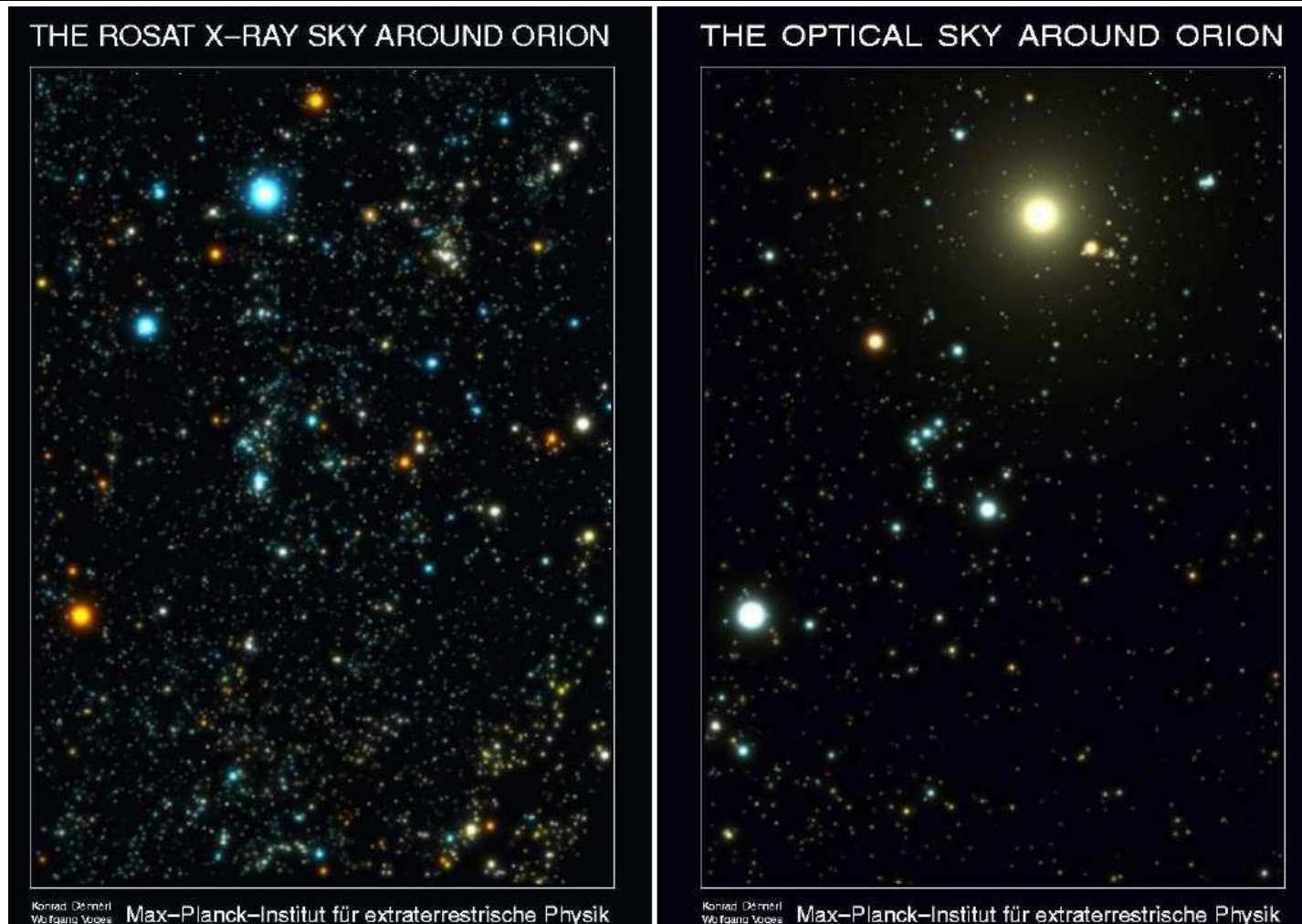


Imagem raio-X de Orion

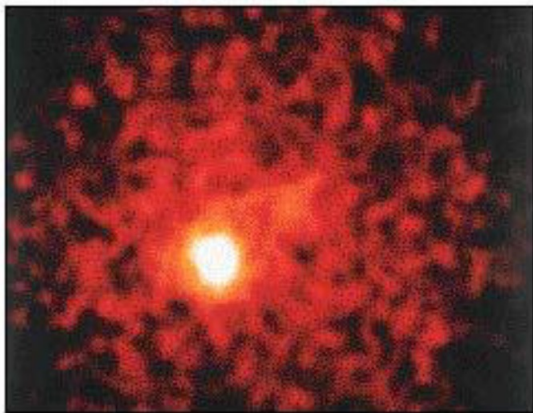


Obtida com ROSAT: satellite lançado em 1991 (operou 2 anos):
+ sensível que o Einstein
– sensível que o atual CHANDRA

Raios gama



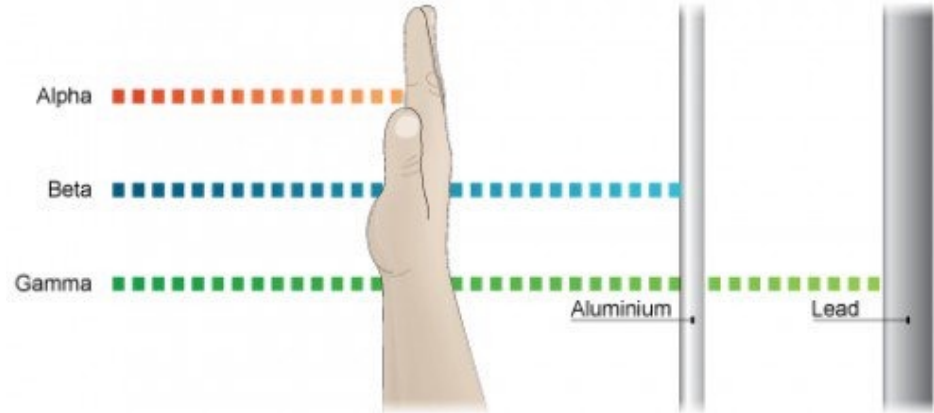
(a)



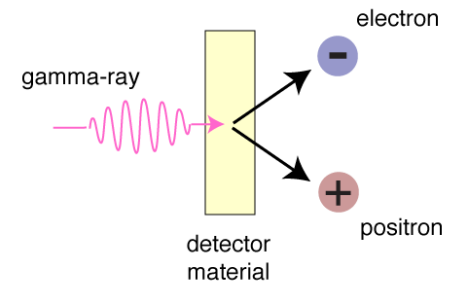
(b)



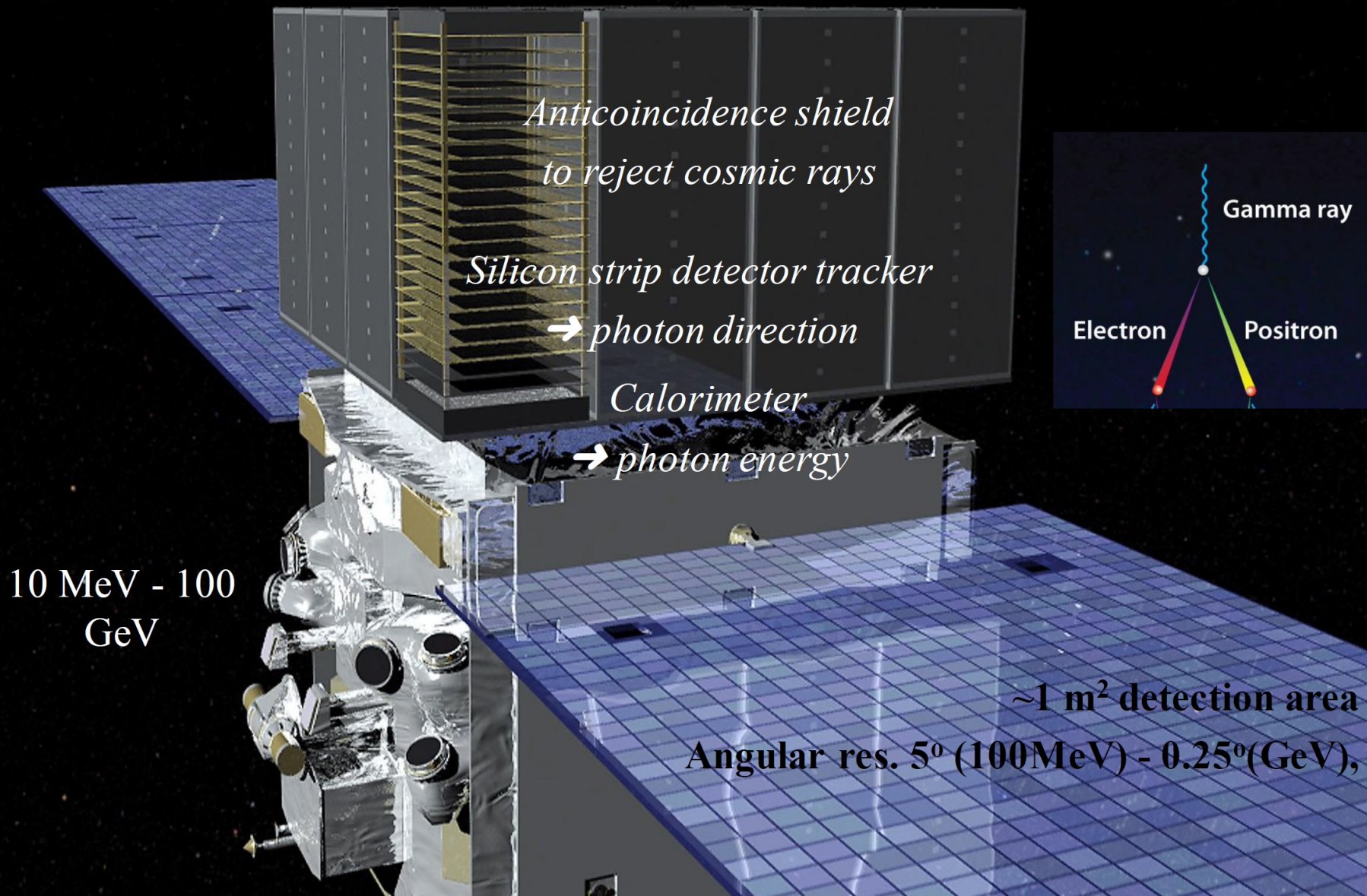
“Imagem” gama obtida com o GRO (lançado em 1991) (cor falsa): de 1 burst gama ocorrido no núcleo de galáxia distante



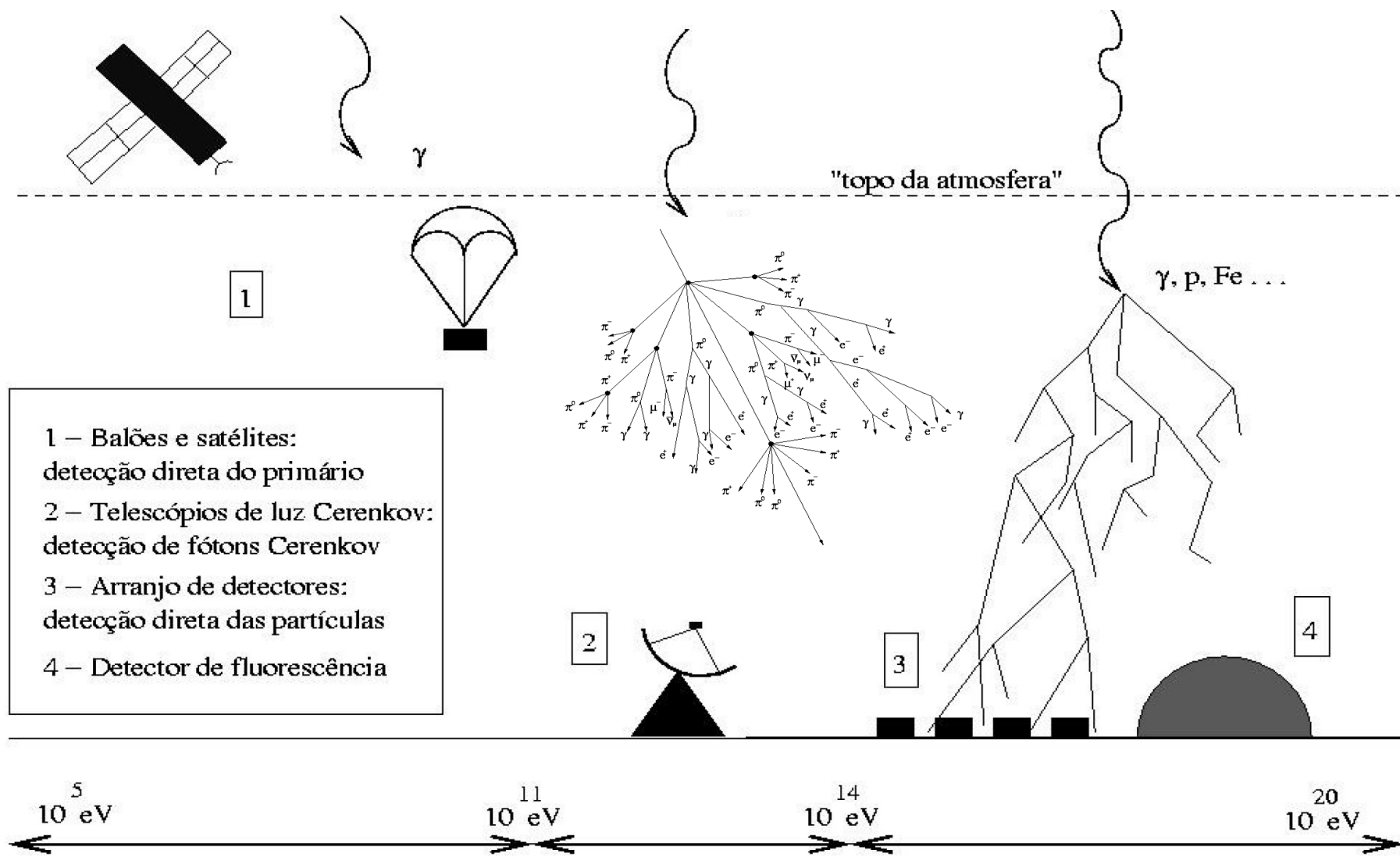
- Não podem ser refletidos ou absorvidos: pois atravessam materiais
- Telescópios gama atuais: apontam em uma direção e CONTAM os fótons recebidos após interação com algum alvo e conversão em partículas detectáveis



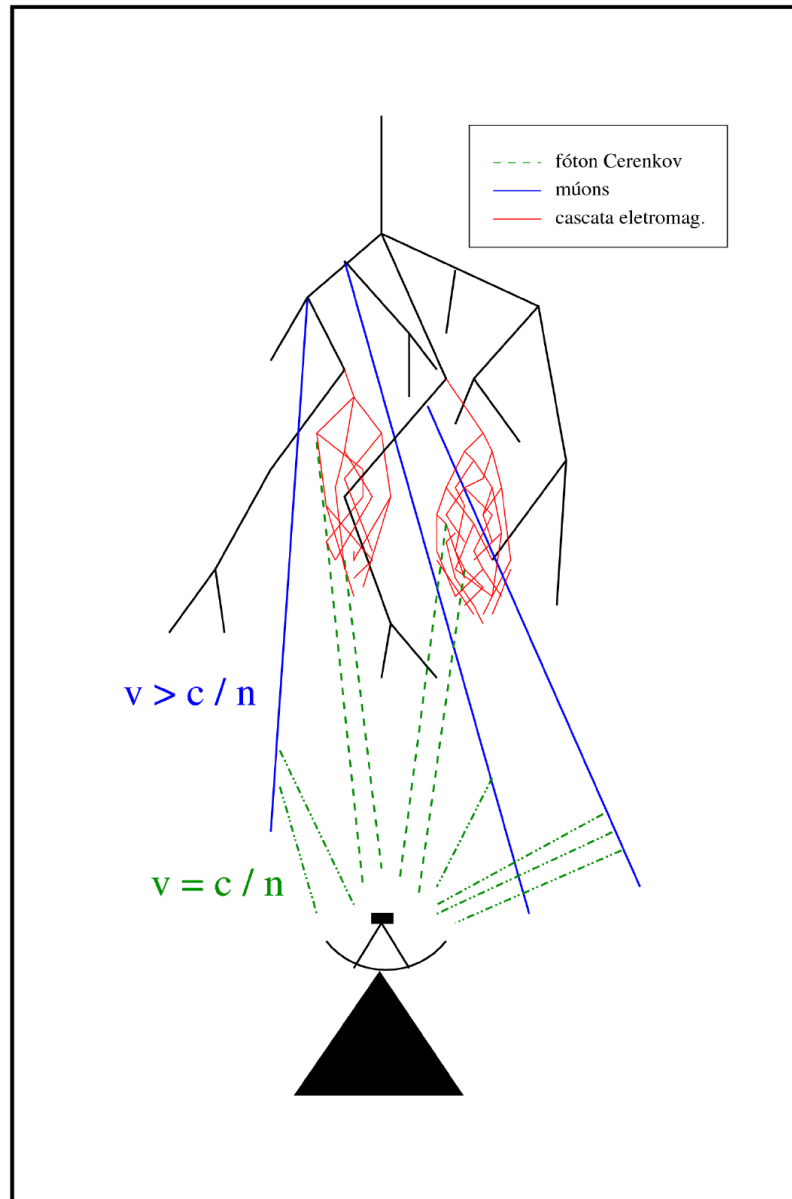
Telescópio Espacial Fermi



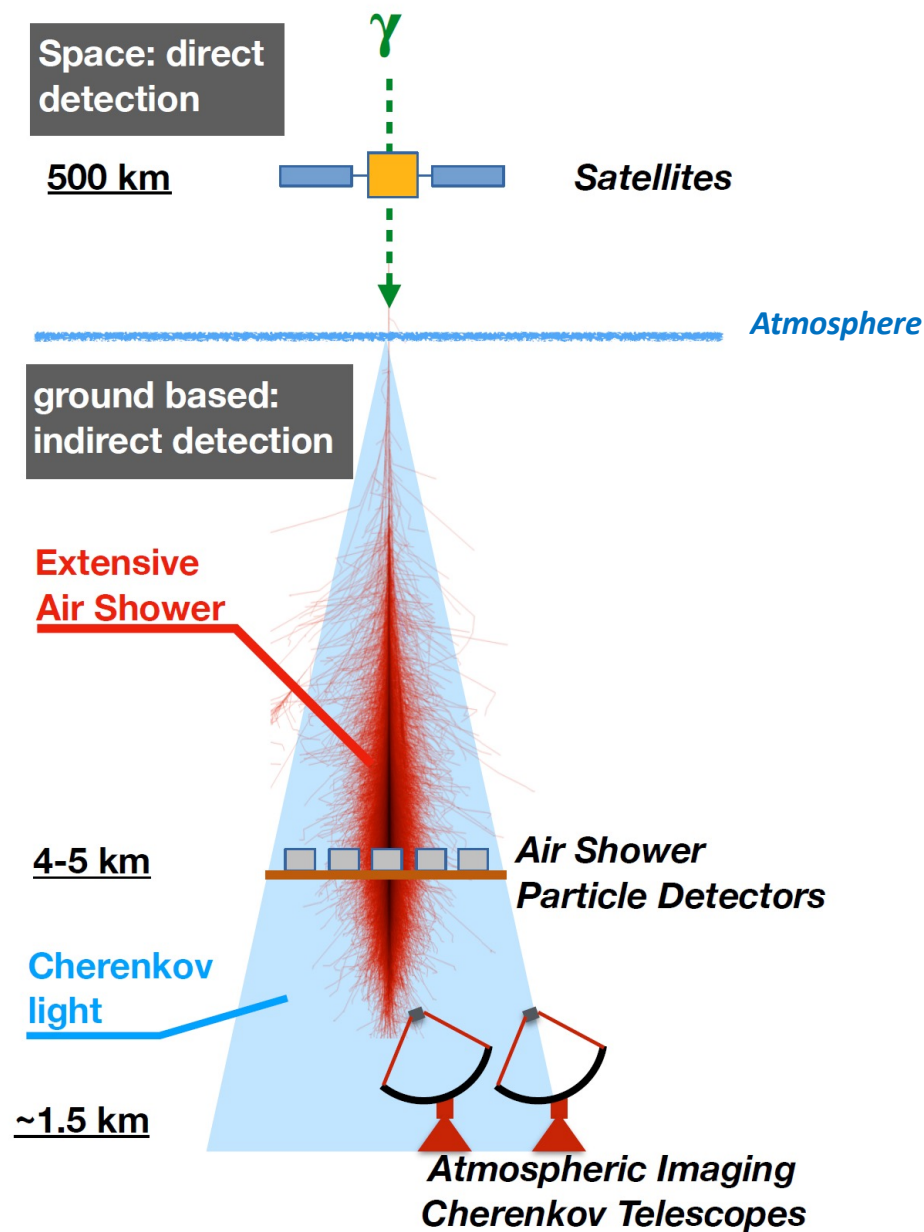
Raios gama na atmosfera



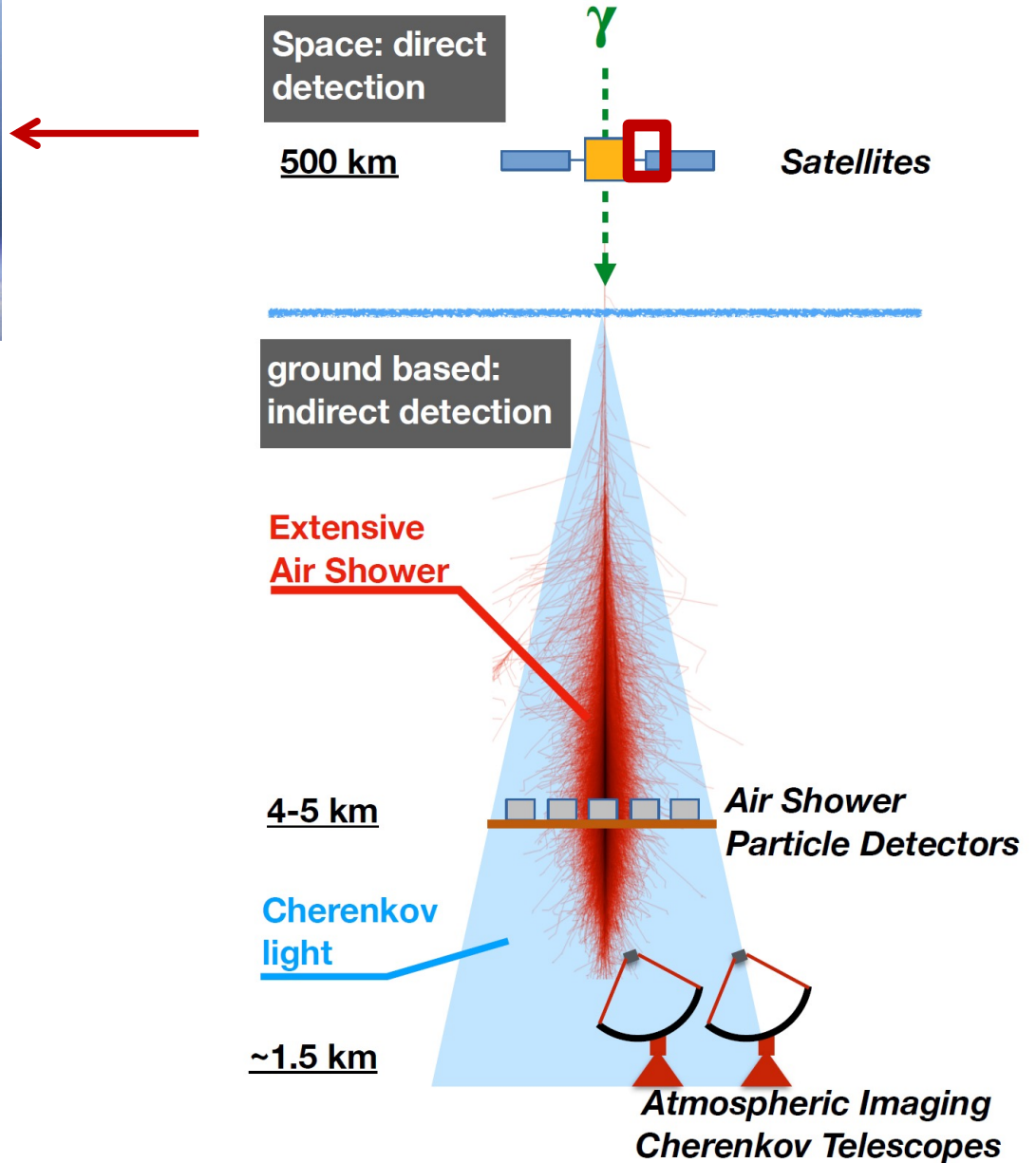
Raios gama na atmosfera



Técnicas de detecção em astronomia gama



Técnicas de detecção em astronomia gama

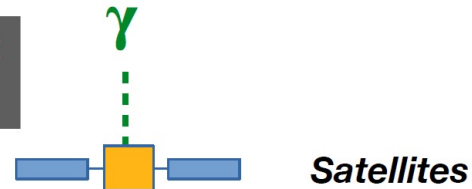


Técnicas de detecção em astronomia gama



Space: direct detection

500 km



HAWC



ground based:
indirect detection

Extensive
Air Shower

4-5 km

Air Shower
Particle Detectors

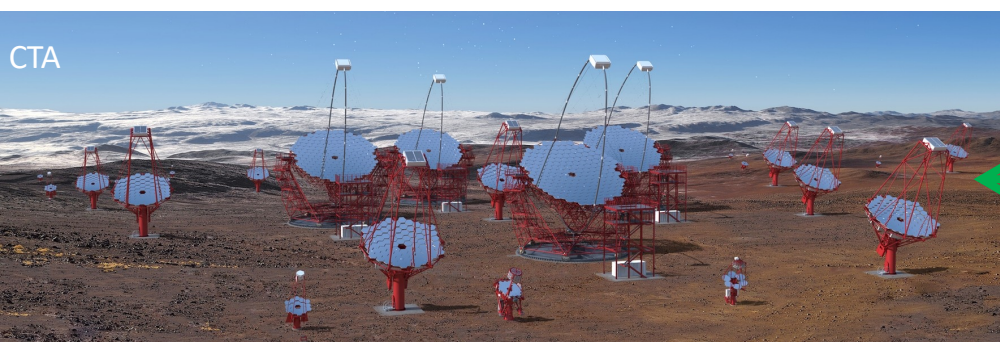
Cherenkov
light

~1.5 km

Atmospheric Imaging
Cherenkov Telescopes

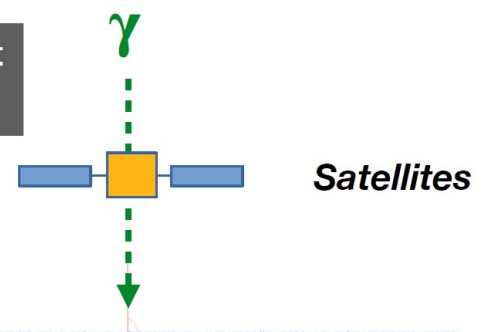


Técnicas de detecção em astronomia gama



Space: direct detection

500 km

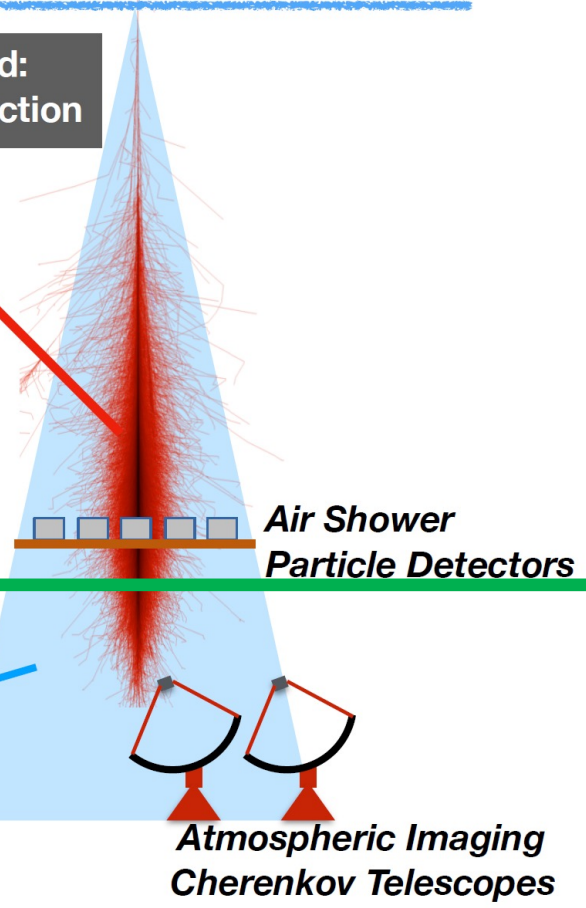


Satellites

ground based: indirect detection

Extensive Air Shower

4-5 km



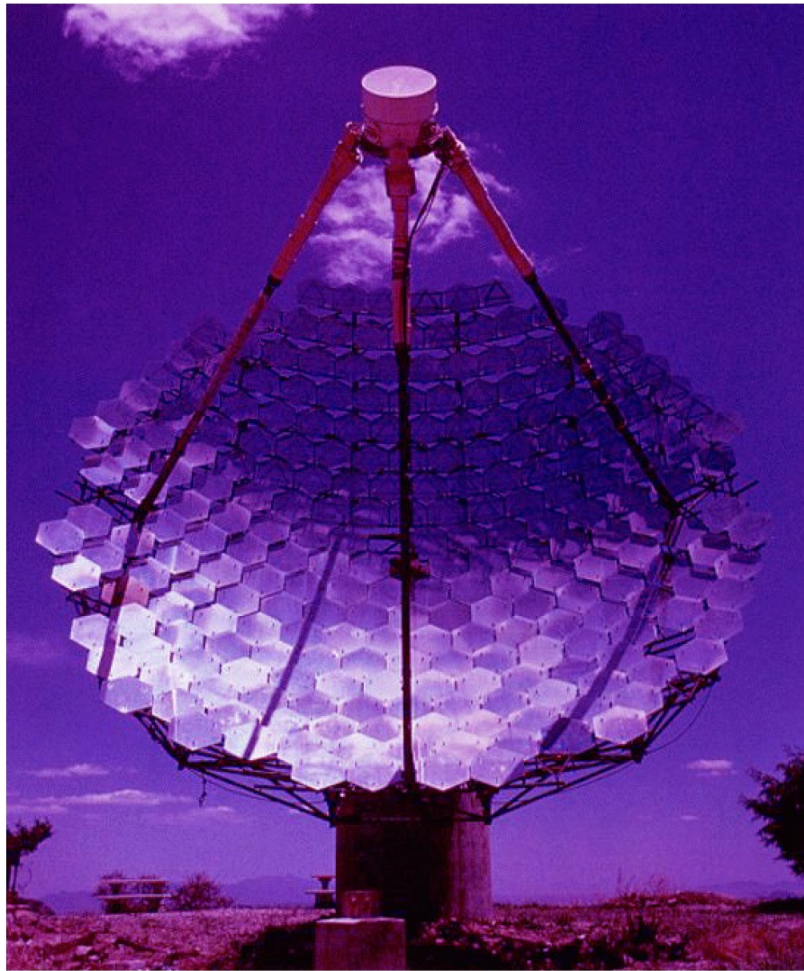
Air Shower Particle Detectors

Cherenkov light

~1.5 km

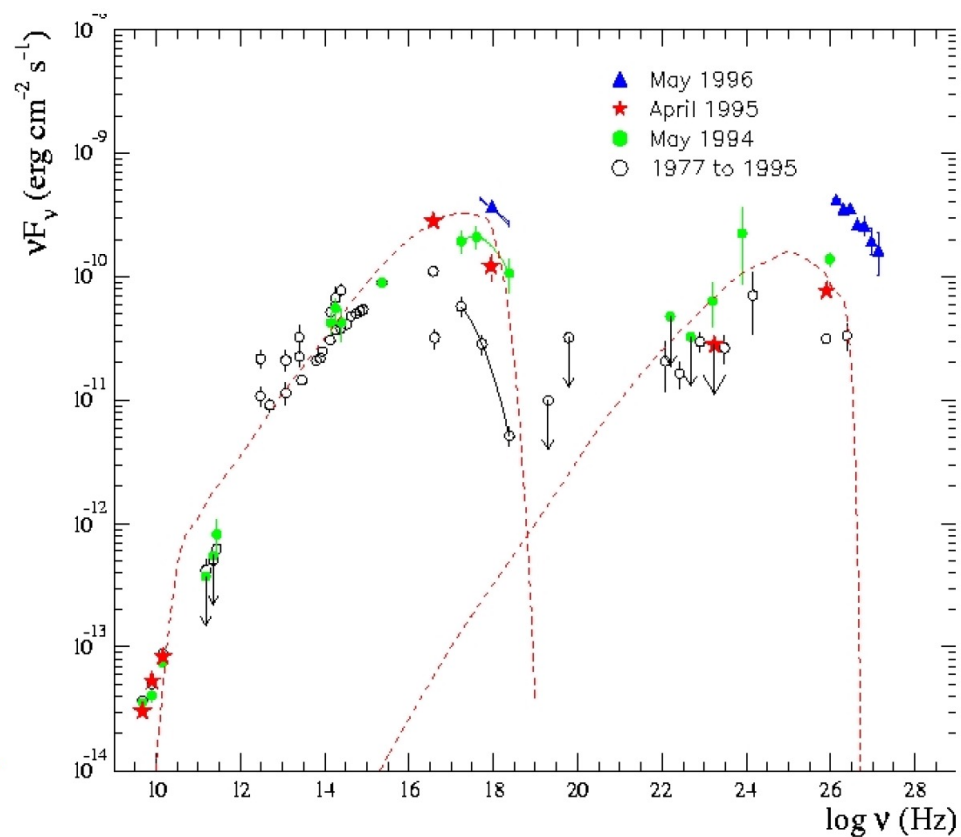
Atmospheric Imaging Cherenkov Telescopes

Astronomia Gama Terrestre



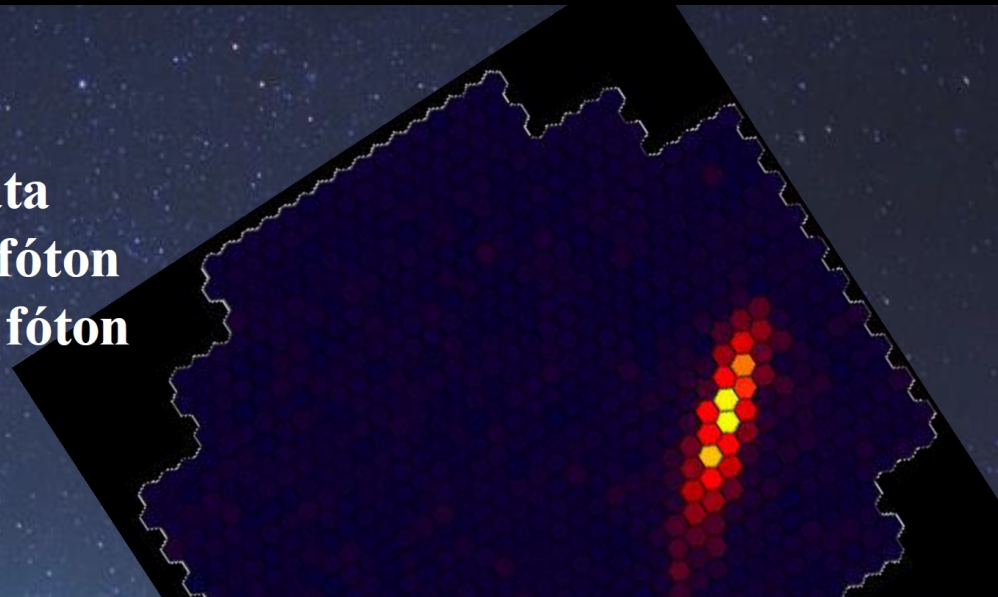
Telescópio Whipple - Arizona (EL)

Detector de raios gama com energia entre 10^9 e 10^{12} eV



Astronomia Gama Terrestre

imagiamento da cascata
geometria → direção do fóton
intensidade → energia do fóton



Observatórios atuais de raios gama no solo



VERITAS Arizona, USA
1275m a.s.l.
4 telescopes, \varnothing 12m
Stereoscopy
>2007



MAGIC Canary Island, Spain
La Palma, 2225m a.s.l.
2 telescopes, \varnothing 17m
>2009



H.E.S.S. Namibia
1800m a.s.l.
4 telescopes, \varnothing 12m
stereoscopy
>2003
HESS 2 : 4+ 1 (\varnothing 28m) telescopes, 2012

Futuro: Cherenkov Telescope Array (CTA)



- Duas redes de telescópios: Norte em La Palma (Espanha), Sul em Paranal (Chile)
- 10 vezes mais telescópios e sensibilidades
- Dobrar a resolução angular e resolução em energia

