

PYTHON FOR ASTRONOMERS

+IGALDE



Fernando Buitrago

fbuitrago.astro@gmail.com

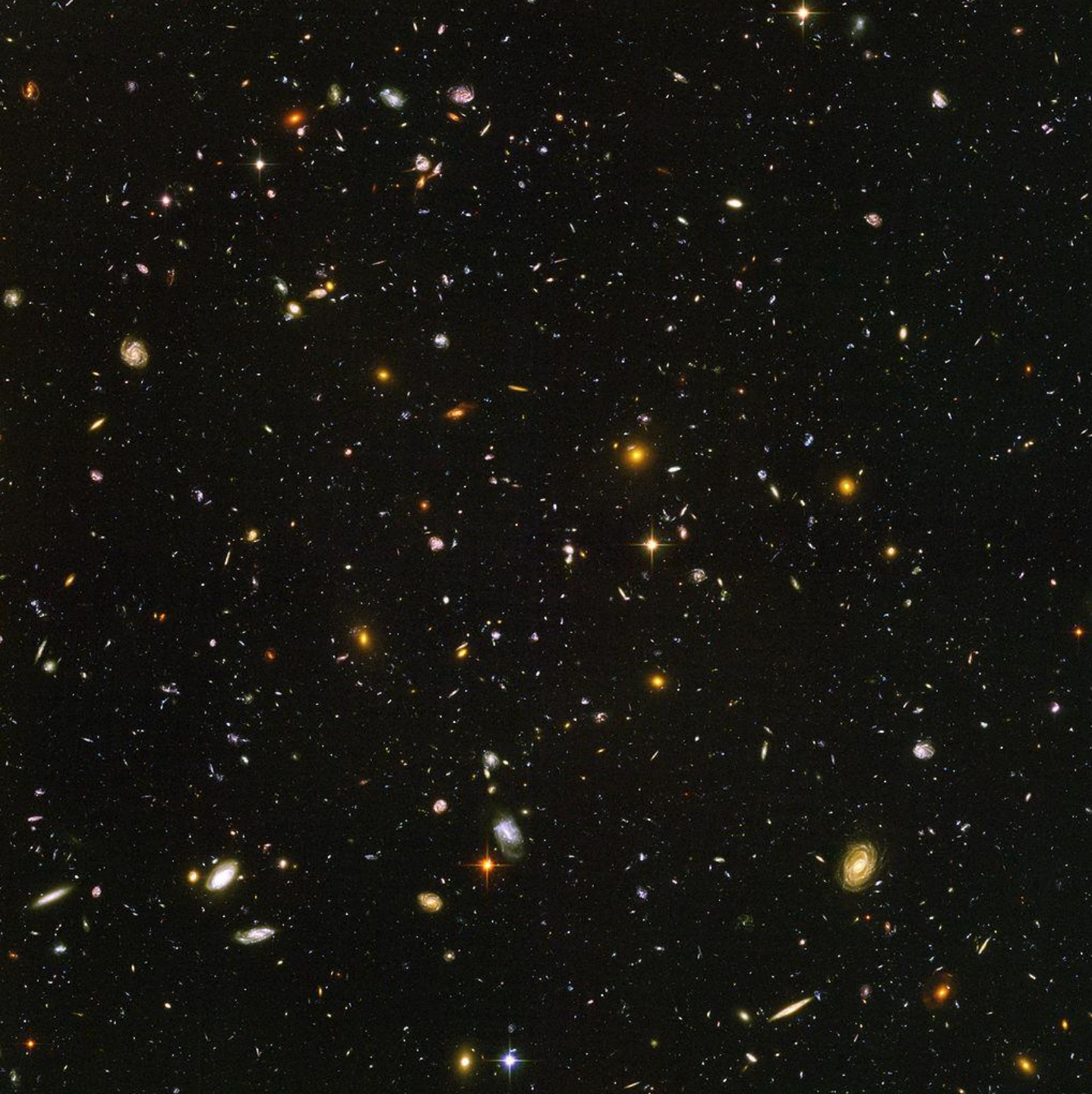




“Yet it is possible that some bodies, of a nature altogether new, and whose discovery may tend in future to disclose the most important secrets in the system of the universe, may be concealed under the appearance of very minute single stars no way distinguishable from others of a less interesting character, but by the test of careful and often repeated observations.”

“Es posible, que algunos cuerpos de naturaleza novedosas, y cuyo descubrimiento podría revelar en el futuro los secretos más importantes del universo, se ocultan bajo el aspecto de estrellas diminutas que no podemos distinguir de otras menos revelantes sino a través de observaciones precisas y repetidas”

John Herschel (1820)



Paco Menéndez, uno de los programadores más destacados de nuestro país, cuya retirada del mundillo del software de entretenimiento os anunciamos en el número anterior, ha sido el primero en recibir un premio nuevo creado por Microhobby: El Programador del Año.

Aprovechando el acto de entrega de premios a los Mejores Programas del 88, hemos considerado oportuno crear un nuevo trofeo que sirva para reconocer el trabajo de aquellas personas que son las principales responsables de que pasemos horas y horas pegados a nuestros ordenadores: los programadores.

Este premio difiere bastante del resto de los que otorgamos, ya que no se realiza mediante la votación de nuestros lectores, sino que es elegido entre los propios miembros de la redacción. De cualquier forma, parece que hemos coincidido bastante con los gustos de los usuarios, ya que el ganador, Francisco Menéndez, es el autor de uno de los títulos que más premios ha recibido en la última edición de Los Mejores Programas del Año: La Abadía del Crimen.

Sin embargo, parece que ni este reconocimiento va a evitar que unos de los mejores programadores del país abandone definitivamente la creación de software de entretenimiento.

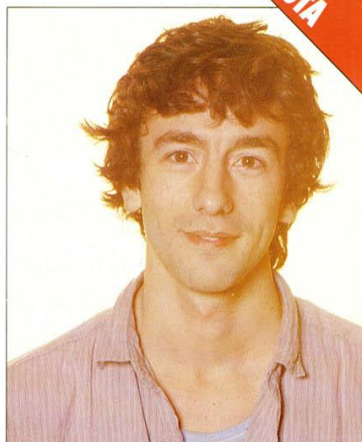
«Esto ya no es lo que era. Ahora es todo marketing», nos ha confesado Paco. «De todas formas, nunca había pensado dedicarme a esto para siempre, sino que me lo planteé como un hobby, y creo que ha llegado el momento de dejarlo».

Y ¿qué es lo que piensas hacer ahora? «Seguir con mi carrera, telecomunicaciones, y dedicarme a la investigación. Estoy trabajando sobre un ordenador con una arquitectura totalmente nueva y también estoy

"ANTES PROGRAMAR ERA UN ARTE, AHORA ES TODO MARKETING"



Parece que Fray Paco Menéndez va a colgar definitivamente los hábitos.



desarrollando un nuevo lenguaje para él». (¡Vaya con el chico!).

De todas formas, entre sus palabras se deja entrever algo de desilusión. «No es que me arrepienta de lo que he hecho, pero la verdad es que es una trabaja en el que se invierte mucho tiempo y luego no lo ves suficientemente recompensado. Además, hace unos años todo era diferente: cada juego iba mejorando en calidad y se hacían con más ilusión, ahora casi se ha llegado a un tope y los programas van decayendo. Antes era todo un arte, ahora todo es dinero».

Ni la consecución de los premios al Mejor Programador de 88, ni los de mejores gráficos y mejor argumento por su programa «La Abadía del Crimen» le han hecho cambiar de opinión, casi se ha producido un efecto contrario. «Si me decidiera por hacer algo nuevo tendría que ser mejor que la Abadía, y el esfuerzo que ello me supondría estoy seguro de que no se vería recompensado. Así pues, prefiero dejarlo».

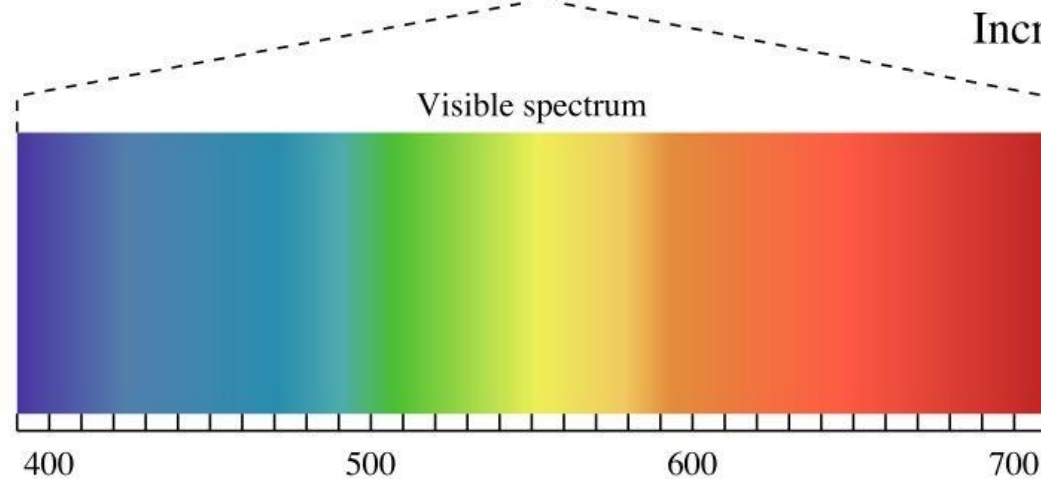
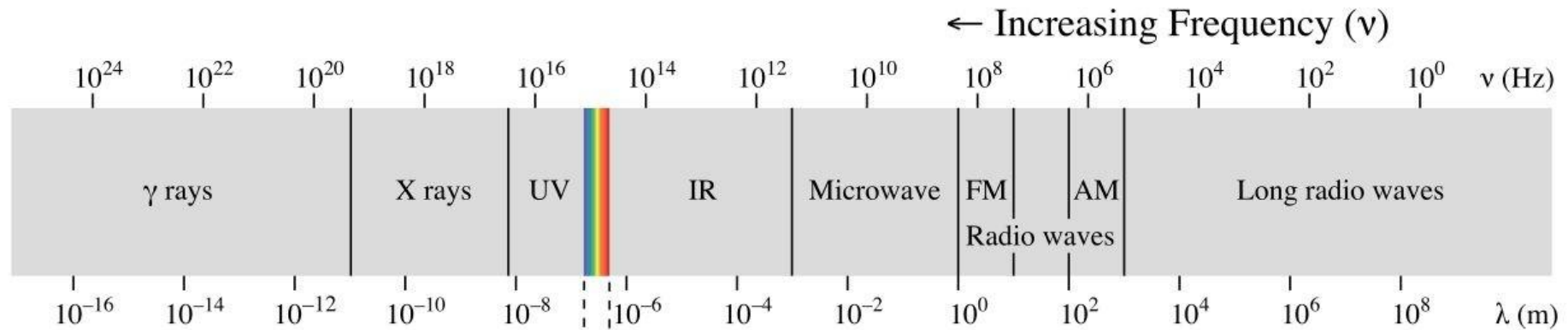
Como veis, sus palabras no son precisamente un compendio de optimismo, pero no os dejéis engañar por las apariencias. Aunque parezca que está desilusionado con el tema, sus ojos le delatan. No cabe duda que está orgulloso de su trabajo y los abrazos y las felicitaciones de sus compañeros provocan en él una emoción que difícilmente puede disimular.



WHY SO MUCH IMPORTANCE TO COMPUTING?

- Astronomers invest a huge amount of time creating **software**, and many little attention is drawn in how to optimize our tools
- **Unix-like systems** (i.e. Linux and MacOS): everything is text! Quicker and more portable
- **Python**: vectorial computing + huge quantity of libraries and resources + it's free!!

ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Increasing Wavelength (λ) in nm →

Frecuencia



$$\nu = c/\lambda$$

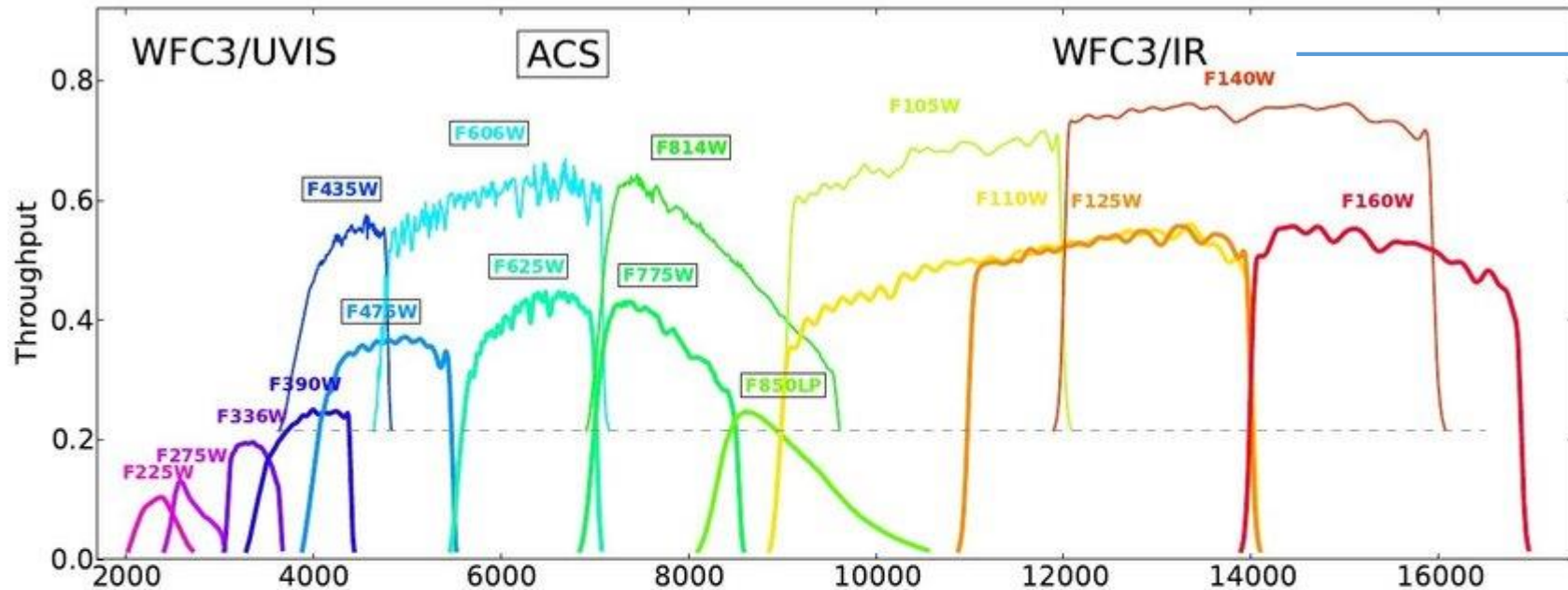
Energía



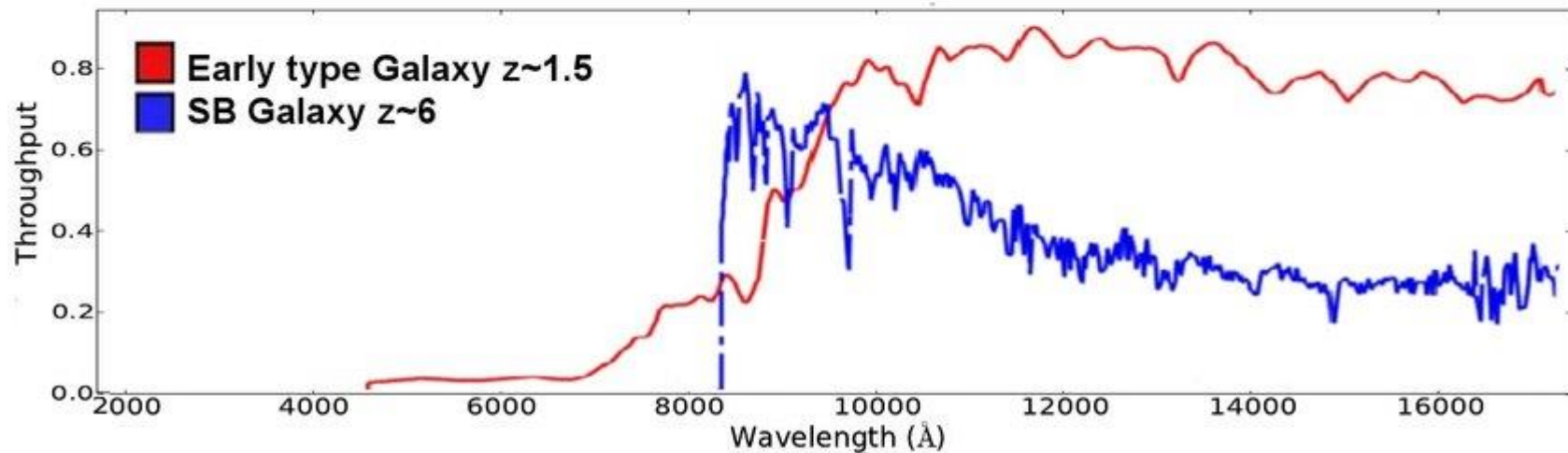
$$E = h\nu$$

ASTRONOMICAL FILTERS

HST =
Hubble
Space
Telescope



Here we
have the
name of
the
different
cameras



Más información:
<https://svo2.cab.inta-csic.es/svo/theory/fps3/index.php>

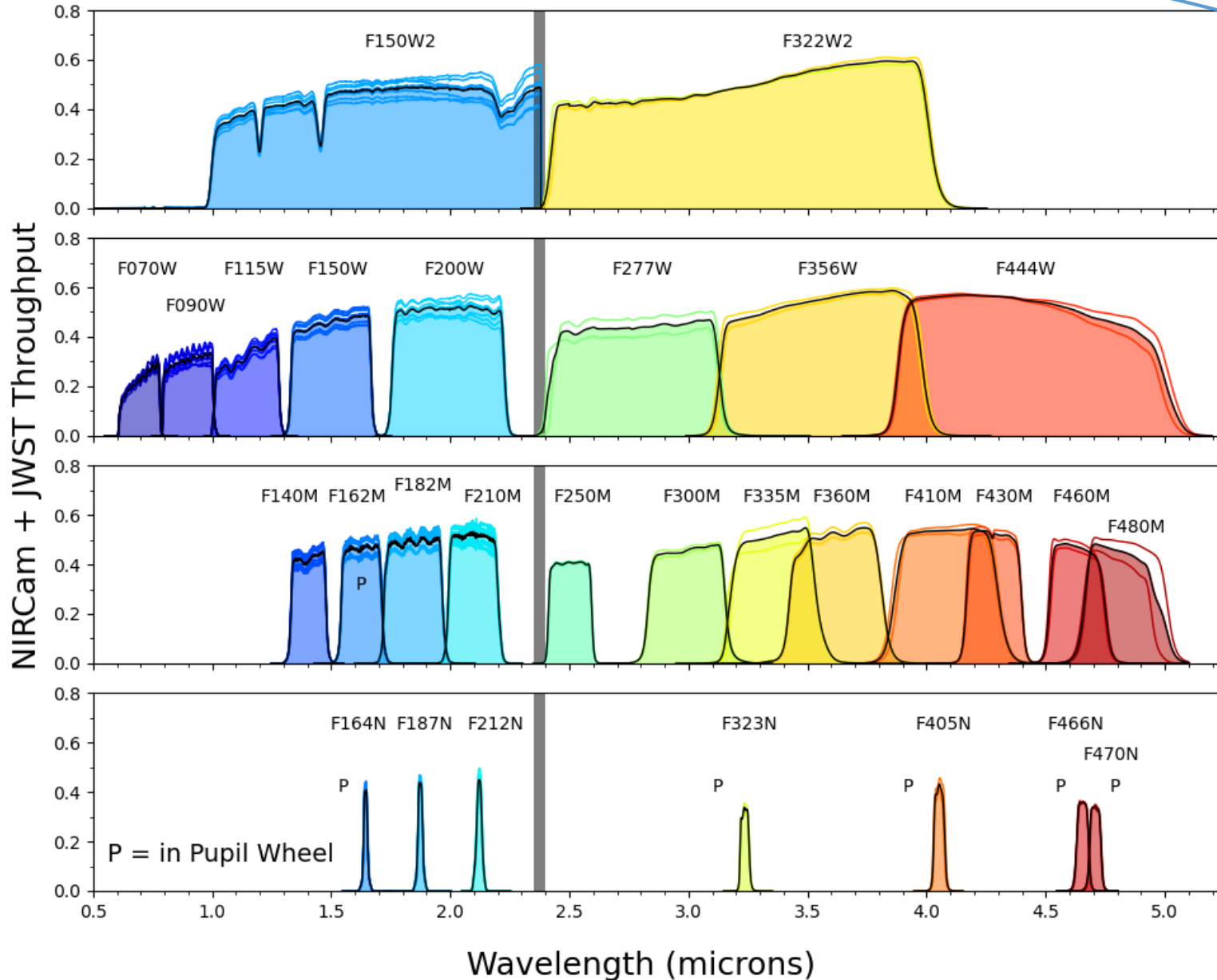
NIRCam Filters

JWST = James Webb
Space Telescope

Short Wavelength Channel

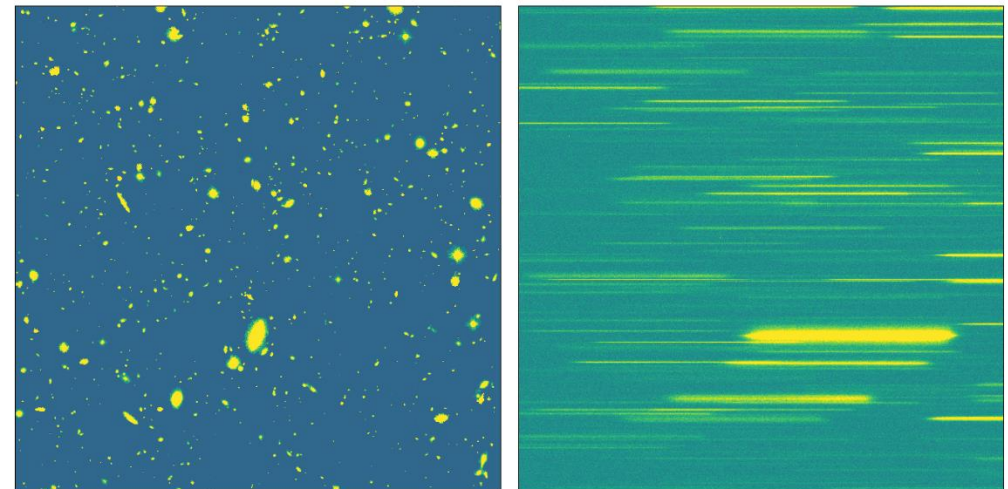
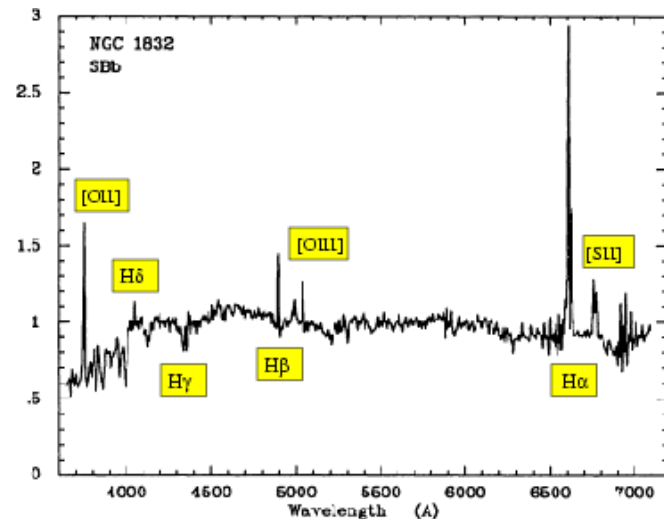
Long Wavelength Channel

This is the name of the camera



ASTROPHYSICAL TECHNIQUES

- Photometry (= images) $R = 1.22 * (\lambda/D)$
- Spectroscopy (= spectra) $R = \lambda/\Delta\lambda$
- Many in the middle: 3D spectroscopy, slitless spectroscopy, polarimetry...



ASTRONOMICAL IMAGES

- .fits extensión
- Header (metadata) +
Data (each pixel with a value)
- Because of its format,
it could also store spectra and tabulated files

```
17058_goodss_1_hudf.fits
File Edit Font
SIMPLE = T / Fits standard
BITPIX = -32 / Bits per pixel
NAXIS = 2 / Number of axes
NAXIS1 = 737 / Axis length
NAXIS2 = 737 / Axis length
EXTEND = F / File may contain extensions
IRAF-TLM= '16:44:56 (05/03/2004)' /
ORIGIN = 'KEPO-IRAF' /
DATE = '2004-03-03T05:25:11' /
IRAF-MAX= 0.000000E0 / DATA MAX
IRAF-MIN= 0.000000E0 / DATA MIN
FILETYPE= 'SCI' / type of data found in data file

TELESCOP= 'HST' / telescope used to acquire data
INSTRUME= 'ACS' / identifier for instrument used to acquire data
EQUINOX = 2000.0 / equinox of celestial coord. system

/ DATA DESCRIPTION KEYWORDS

IMAGETYP= 'EXT' / type of exposure identifier
PRIME1 = 'ACS' / instrument designated as prime

/ TARGET INFORMATION

TARGNAME= 'CDF-SOUTH-UDF' / proposer's target name

/ PROPOSAL INFORMATION

PROPOSID= 9978 / FEP proposal identifier
PR_INV_L= 'Beckwith' / last name of principal investigator
PR_INV_F= 'Steven' / first name of principal investigator
PR_INV_M= ' ' / middle name / initial of principal investigator

/ EXPOSURE INFORMATION

EXPTIME = 1.0 / exposure duration (seconds)--calculated

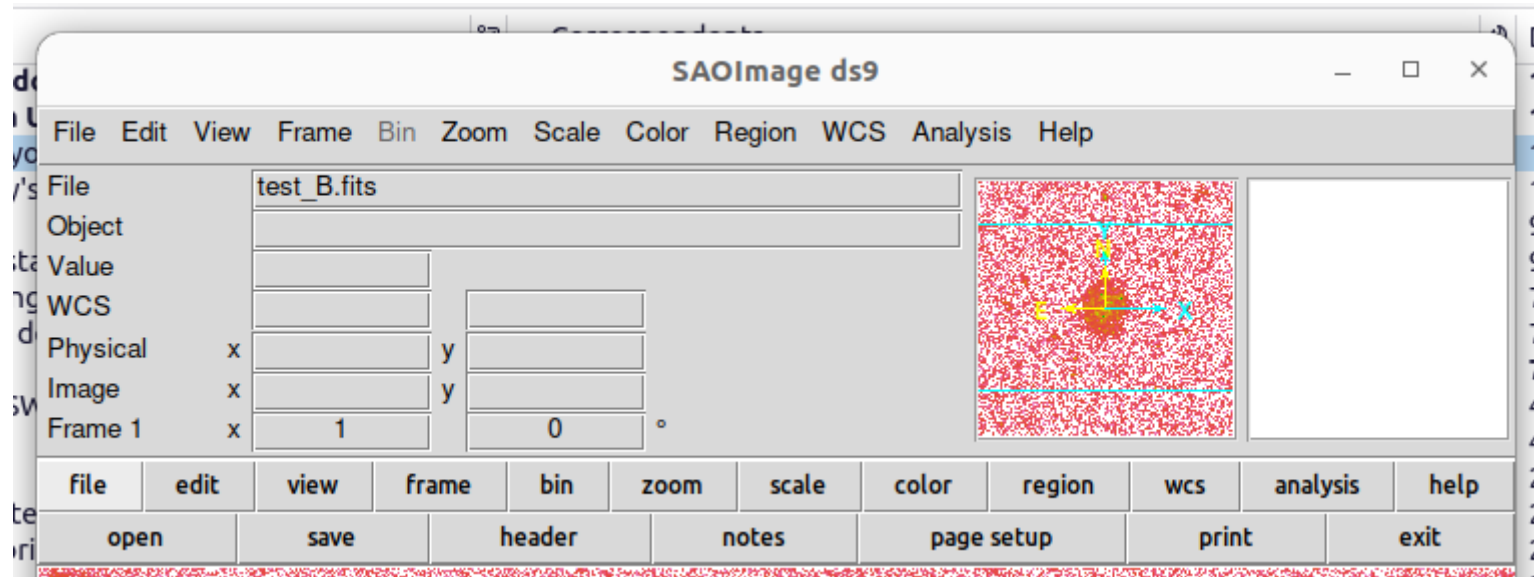
/ POINTING INFORMATION
```



IMAGE VISUALIZATION

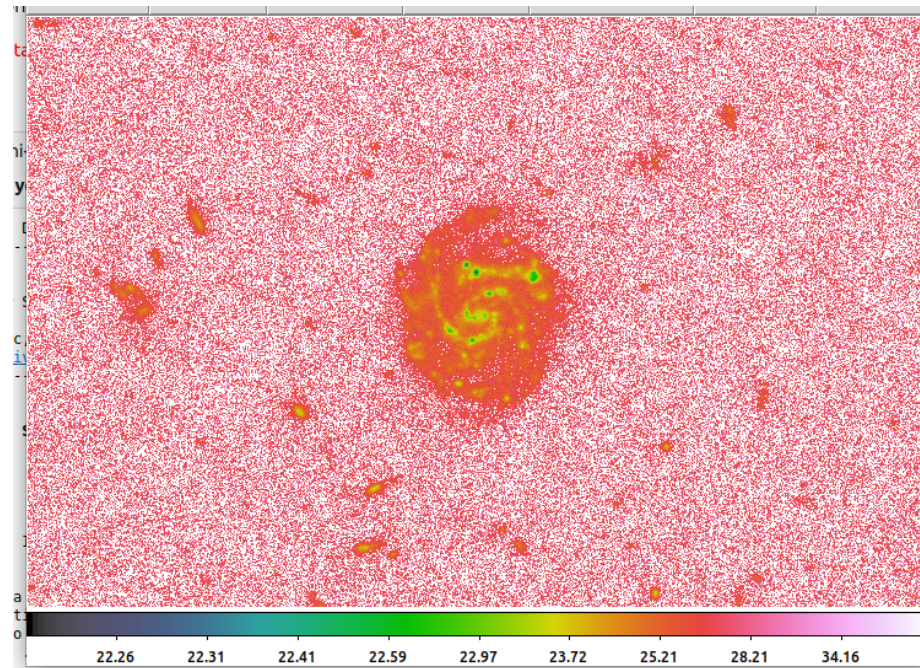


- SAO ds9
- <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>
- There are many other options: Aladin, QFitsView, etc.



THE IMAGES THEMSELVES

- Each pixel contains a certain flux in units of counts
- $\text{mag} = -2.5 \cdot \log_{10}(\text{flux}) + \text{zeropoint}$ [for integrated flux]
surface brightness = $-2.5 \cdot \log_{10}(\text{flux}) + \text{zeropoint} + (5 \cdot \log_{10}(\text{pixel scale}))$
- Using AB magnitudes you can translate directly into energy:
 $\text{mag}_{\text{AB}} = -2.5 \cdot \log_{10}(\text{flux}) + 8.9$ being the flux in Jy ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W Hz}^{-1} \text{ m}^{-2}$)



HOW TO DEAL WITH A SINGLE IMAGE

- Let's go to Jupyter Notebook `playing_with_cutouts.ipynb`

HOW TO DEAL WITH MANY FILTERS

- Let's go to Jupyter Notebook `analyse_many_galaxies.ipynb`

HOW TO CREATE COLOR IMAGES

- Let's go to Jupyter Notebook coloring_images_with_python.ipynb
- Usually we use an asinh transformation
 - Lupton:
<https://docs.astropy.org/en/latest/visualization/rgb.html>
 - Gnuastro:
https://www.gnu.org/software/gnuastro/manual/html_node/Color-images-with-full-dynamic-range.html

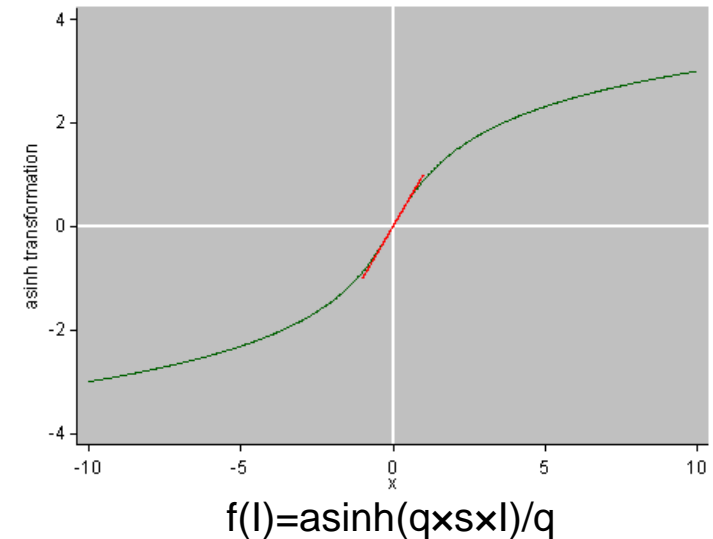


IMAGE REPOSITORIES

- Most used repositories

esa sky: <https://sky.esa.int/>

HST: <https://hla.stsci.edu/>

JWST: <https://dawn-cph.github.io/dja/>

ESO: <http://archive.eso.org/cms.html>

- Using mosaics:

ABYSS: <http://research.iac.es/proyecto/abyss/>

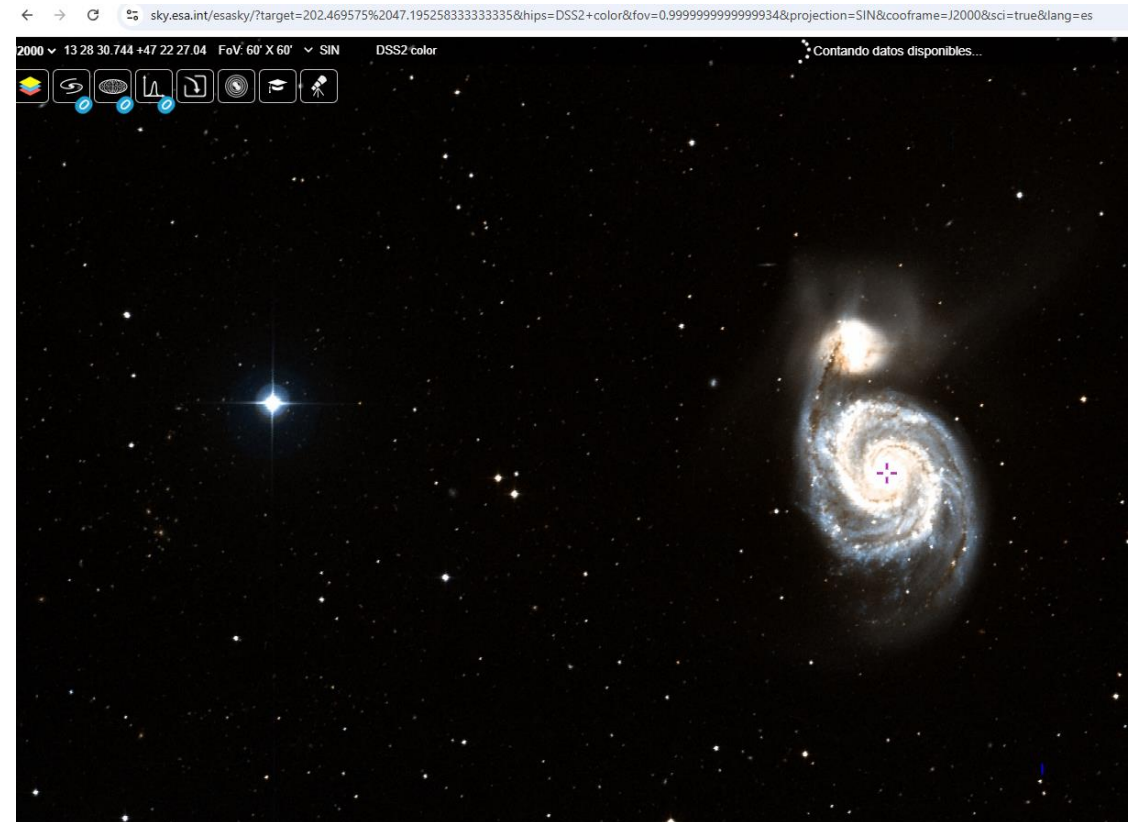
Hubble Legacy Fields: <https://archive.stsci.edu/prepds/hlf/>

JWST: <https://dawn-cph.github.io/dja/general/mapview/>

- Cutout service:

SDSS: <https://skyserver.sdss.org/dr18/>

GAMA: <https://www.gama-survey.org/dr4/tools/sov.php>



CREATING CUTOUTS

Montage wrapper (Python library)

```
montage.mSubimage_pix(image_filename, new_image_filename, x0, y0, side_pix, hdu=extension_no)
```

or

Gnuastro (Linux console)

```
astcrop image_filename --center=ra,dec --  
width=width_in_pix --mode=img -o new_image_filename
```

GNUASTRO

- Linux library for astronomical applications managing fits files
- <https://www.gnu.org/savannah-checkouts/gnu/gnuastro/gnuastro.html>
- It is excellently well documented, it is completely traceable and super compatible

TOPCAT

- Program for visualizing and merging tabulated data (a.k.a. catalogues)
- “Quick & dirty” plots (many different plots)
- Many other astronomical possibilities (such as connecting catalogues and images)

MATPLOTLIB

- Check Matplotlib gallery:
<https://matplotlib.org/stable/gallery/index.html>
- Use Matplotlib cheatsheets:
<https://matplotlib.org/cheatsheets/>
- There are a series of other customizations of Matplotlib, many times with added features → What does it make a beautiful plot?

CHATGPT, YES OR NO?

- These AI algorithms are called **foundational models**
- Did you **check the Python documentation** (for the different parameters but also for examples) or pages like Stack Overflow? Always remember that browsing internet and training AI demands huge amounts of energy
- Our difference with the AI is that we **human beings can filter the information to realize what is relevant**

CREATING IMAGE MASK

Source-Extractor: <https://www.astromatic.net/software/sextractor/>
(but also check SourceXtractor++ and Segment in gnuastro)

Documentation:

- User's manual in the webpage
- Source Extractor for Dummies: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0512139>

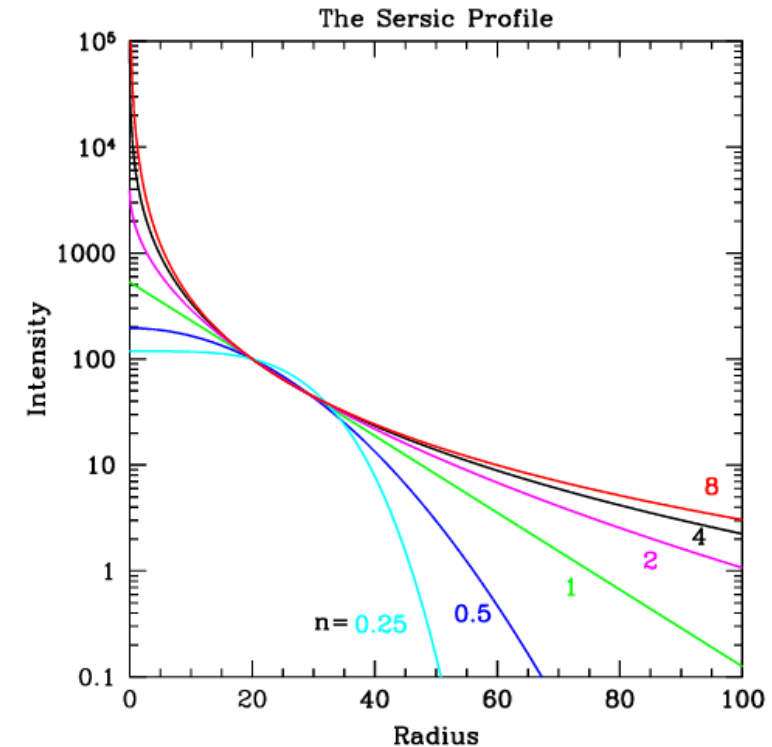
How to use it?

```
source-extractor image_filename.fits -c config_file
```

GALAXY STRUCTURAL PARAMETERS

- Galaxies could be fitted using **Sérsic functions** (or combinations), that are a generalization (Sérsic 1968) of De Vaucouleurs profiles –valid for spheroidal galaxies– and Freeman profiles –valid for disk-like galaxies–

$$I(R) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}$$



- Therefore, there are **five free parameters in a single 2D Sérsic function**: total magnitude, effective radius, Sérsic index, axis ratio and position angle

RUNNING GALFIT

- Software to fit parametric functions to astronomical images using a χ^2 algorithm

$$\chi_v^2 = \frac{1}{N_{\text{dof}}} \sum_{x=1}^{nx} \sum_{y=1}^{ny} \frac{(f_{\text{data}}(x, y) - f_{\text{model}}(x, y))^2}{\sigma(x, y)^2} \text{ being } f_{\text{model}} = \text{param_funct} \otimes \text{PSF}$$

- <https://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/galfit/galfit.html>
- Publications:
 - Peng et al. 2010:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2010AJ....139.2097P/abstract>

CREATING ELLIPSE PROFILES

```
profile1_filename="profile_"$band"_flux.fits"
astscript-radial-profile $masked_image -h1 \
    --mode=img --center=$x_cen,$y_cen \
    --rmax=$max_radius \
    -p $pa -Q $ar \
    --undersample=$pix_per_aperture \
    --measure=sigclip-mean,sigclip-std,sigclip-number \
    --sigmaclip=5,0.1 \
    --output=$profile1_filename
#--inststd=$sky_std \
```

CREATING ELLIPSE PROFILES (2)

```
#I convert from a flux table to a surface brightness table
profile2_filename="profile_"$band".fits"
asttable $profile1_filename -c1 -c'arith $1 '$pix_scale' x' \
    -c'arith $1 '$pix_scale' x '$phys_scale' x' \
    -c'arith $2' \
    -c'arith $2 log10 -2.5 x '$zp' + '$pix_scale' log10 5 x +' \
    -c'arith $4 sqrt set-den $3 den /' \
    -c'arith $4 sqrt set-den '$sky_std' den /' \
    -c'arith $4 sqrt set-den $3 den / set-sig source bin '$sky_std' den / set-sig_sky_bin sig_source_bin sig_source_bin x set-ssou2
sig_sky_bin sig_sky_bin x set-ssky2 ssou2 ssky2 + sqrt' \
    -c'arith $4 sqrt set-den $3 den / set-sig source bin '$sky_std' den / set-sig_sky_bin sig_source_bin sig_source_bin x set-ssou2
sig_sky_bin sig_sky_bin x set-ssky2 ssou2 ssky2 + sqrt $2 + $2 / log10 -2.5 x abs' \
    --colmetadata=1,distance_pix,pix,"radius in pix" \
    --colmetadata=2,distance_arcsec,arcsec,"radius in arcsec" \
    --colmetadata=3,distance_kpc,kpc,"radius in kpc" \
    --colmetadata=4,flux,count,"flux in counts" \
    --colmetadata=5,sb,mag/arcsec2,"surface brightness" \
    --colmetadata=6,sigma_source_bin,count,"sigma_source_bin" \
    --colmetadata=7,sigma_sky_bin,count,"sigma_sky_bin" \
    --colmetadata=8,delta_flux,count,"delta_flux_all_errors" \
    --colmetadata=9,sb_err,mag/arcsec2,"error in surface brightness" \
    --output=$profile2_filename
```

OTHER CORRECTIONS TO A GIVEN SURFACE BRIGHTNESS PROFILE

- Galactic extinction correction. To do this, we used the values provided by the NASA NED Extinction Calculator⁶:

$$\mu_{\text{corr},1} = \mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{extinction}} \quad (1)$$

with $\mu_{\text{corr},1}$ and μ_{obs} being the corrected and observed surface brightness profiles, respectively.

- Cosmological surface brightness dimming correction. We use $(1+z)^3$ as we are working with flux densities as explained before:

$$\mu_{\text{corr},2} = \mu_{\text{corr},1} - 7.5 \times \log_{10}(1+z) \quad (2)$$

- Disc inclination correction. For this last step, we used the expression

$$\mu_{\text{corr},3} = \mu_{\text{corr},2} + \sum_{j=0}^4 \alpha_j (b/a)^j \quad (3)$$

assuming $z_0/h = 0.12$ (for the determination of the α_j coefficients see Sect. 5.2 in [Trujillo et al. 2020](#)), where z_0 indicates the disc's model scale height and h its scale length.

AYUDA PARA NUESTRO PROYECTO SOBRE ECLIPSES