



UNIVERSITAT DE
BARCELONA



Institut de Ciències del Cosmos



EXCELENCIA
MARÍA
DE MAEZTU

Prada

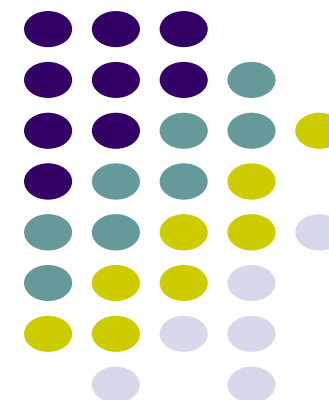
*18 d'agost
2022*

Astrofísica d'altas energies

Josep Maria Paredes Poy

jmparedes@ub.edu

54a Universitat Catalana d'Estiu



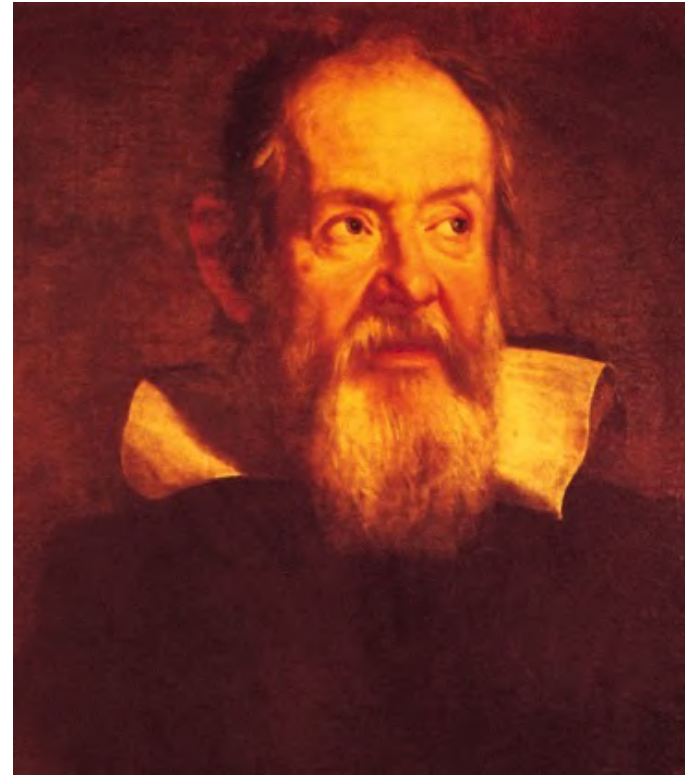
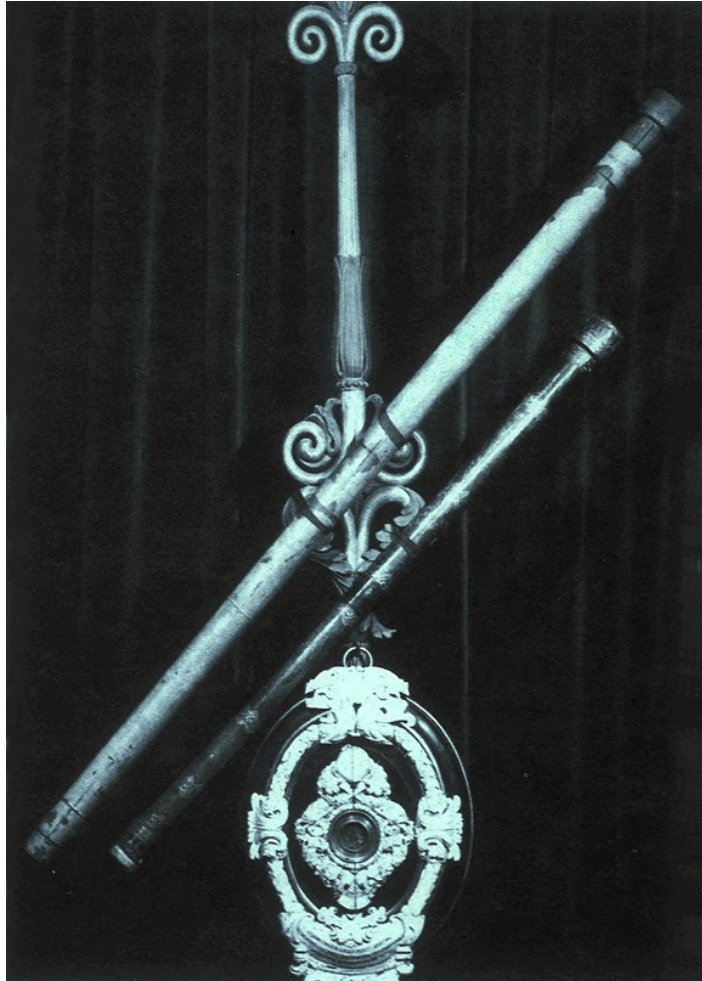
Crédit: Druckmuller (Brno University of Technology)



28/01/2007

Patagonia

Cometa McNaught

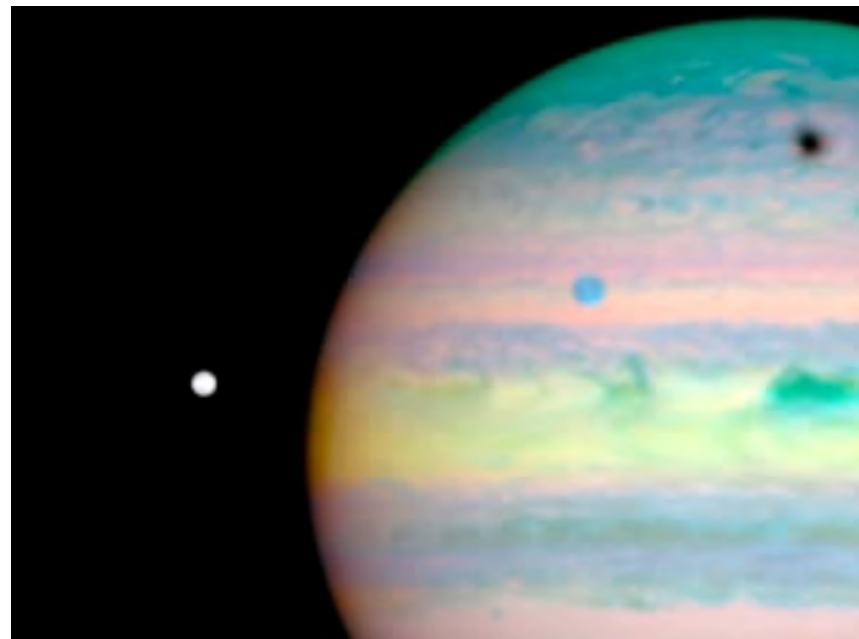


Galileo Galilei (1564-1642)

7 gener 1610: primera observació de Júpiter

El descobriment de les llunes de Júpiter va tenir un gran impacte cosmològic

Calisto: ombra vora dreta; Ganímedes: blau; Io: blanc



Hubble Space Telescope

Adi 7. d. Gennaio 1610 Giove si vedeva in l'oraone in
3. stelle affe. così * * * delle quali reb il unno
minor si vedeva. on: * a d. d. appariva così * * * era dug
diretto et no retrogrado come sogno i calculatori.
Adi 9. fu meglio. a d. d. si vedeva così * * * is e d.
giato in più occidentale si che la scultura figurato si può vedere.
Adi 11. era in questa guisa * * * et la stella più vicina
a Giove era la metà minore dell'altra, et vicinissima all'altra
come che le altre pare erano le dette stelle apparse tutte tre
di equal grandezza et tra di loro equo lontane; dal che
appare intorno a Giove esser 3. altre stelle errati invisibili ad
ogni uno s'io a questo tempo.
Adi 11. si vedde in tale costituzione * * * era la stella
occidentale poco minor dello orientale, et giove era in mezzo lontano
da l'una et dall'altra quanto il suo diametro è circa: et forse era
una terza fra l'una et l'altra a 1/2 verso oriente; anzi pur vi era
un comp. havendo io si più diligenza osservato, se ussido più imbrunita la
notte.
Adi 13. havendo forse formato lo horum. si veddono viciniss. a Giove
4. stelle in questa costituzione * * * o meglio così * * *
e tutte apparivano della med. grandezza, lo spazio delle 7. occidentali
ad era maggiore del diametro di 7. et erano fra di loro notabilmente
più vicine che le altre sore; ne erano in linea retta equidistanti come
si può in la media delle 3. occidentali era a poco elevata, ovvero la
più occidentale alquanto depressa; sono queste stelle tutte molto lucide et
purchiss. et altre due et apparivano della med. grande et si sono
con splendore.
Adi 14. fu meglio. Adi 15. era così * * * in pross. a
7. era la minore et le altre, di meno o meno maggiori: gli intersticij
tra 4. et la 3. sequet erano, quanto il diametro di 7. ma la * * * era di:
quanto della 7. il doppio circa: ad fine
7. erano iterum linea retta, ma come mostra
l'esempio, erano al polo lucidiss. et de più
7. et niente scintillavano come au gli altri

Sidereus Nuncius (Venecia, març 1610)

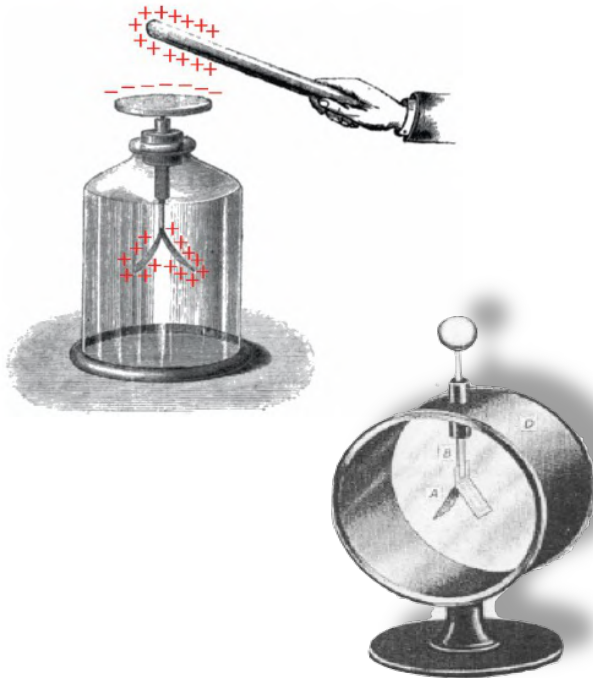
Pilars de la Creació
Nebulosa d'Aquila (M16) HST,
1995



Raigs Còsmics

Principis del segle XX:

Es detecta un ambient carregat elèctricament i es pensa que la radioactivitat n'és la causant.



- El físic austríac Victor F. Hess realitzà mesures de nivells de radiació a diferents alçades amb electroscopis embarcats en globus



Hess on gondola in 1912 probably in test flight. The date and place is not clear at present.

Tabelle der Mittelwerte.

Mittlere Höhe über dem Erdboden m	Beobachtete Strahlung in Ionen pro ccm und sec.			
	Apparat 1	Apparat 2	Apparat 3	
	Q_1	Q_2	Q_3 (reduziert)	Q_3 (nicht reduziert)
0	16,3 (18)	11,8 (20)	19,6 (9)	19,7 (9)
bis 200	15,4 (13)	11,1 (12)	19,1 (8)	18,5 (8)
200—500	15,5 (6)	10,4 (6)	18,8 (5)	17,7 (5)
500—1000	15,6 (3)	10,3 (4)	20,8 (2)	18,5 (2)
1000—2000	15,9 (7)	12,1 (8)	22,2 (4)	18,7 (4)
2000—3000	17,3 (1)	13,3 (1)	31,2 (1)	22,5 (1)
3000—4000	19,8 (1)	16,5 (1)	35,2 (1)	21,8 (1)
4000—5200	34,4 (2)	27,2 (2)	—	—

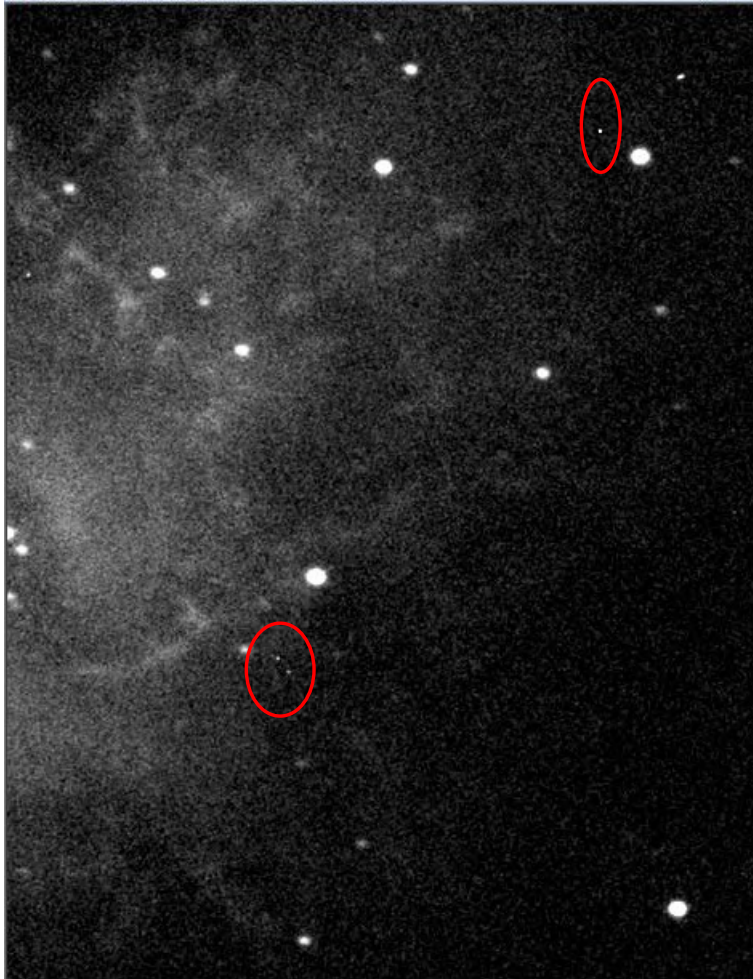
- Observa que la ionització dels àtoms de l'atmosfera augmenta amb l'alçada
- El 1912, després de 9 ascensions en globus per estudiar nivells d'ionització, Victor Hess va concloure que:

**Una radiació amb un altíssim poder de penetració
entra a la nostra atmosfera des de l'espai**

El 1936, Victor Hess va rebre el Premi Nobel de Física per aquest descobriment

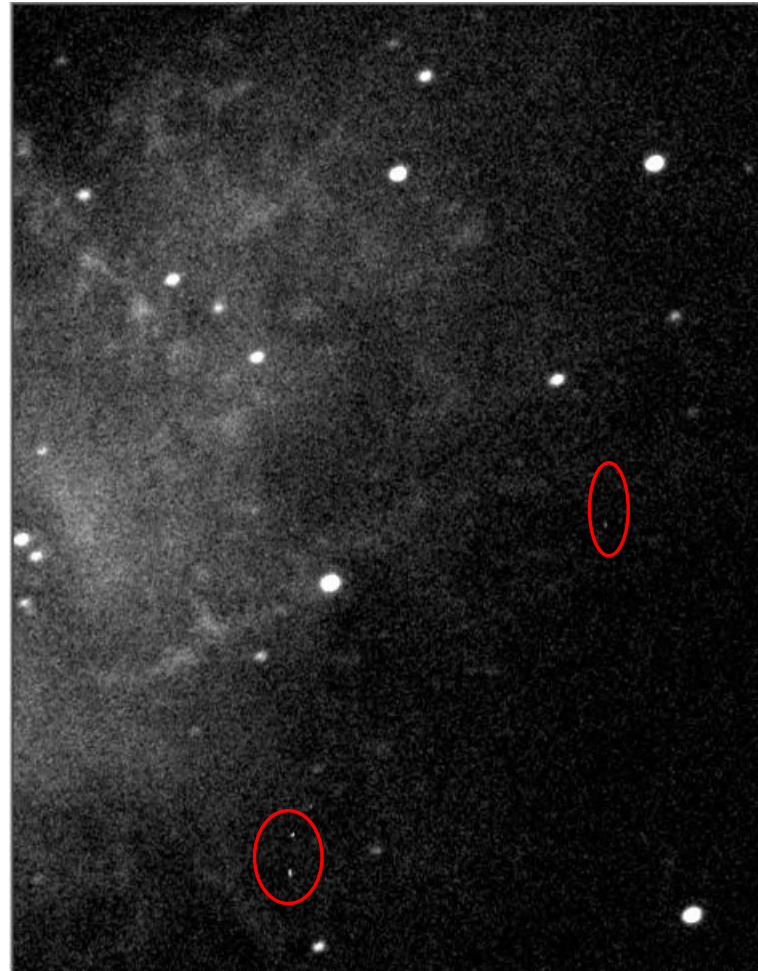
M1 (Crab Nebula)

R, 60s



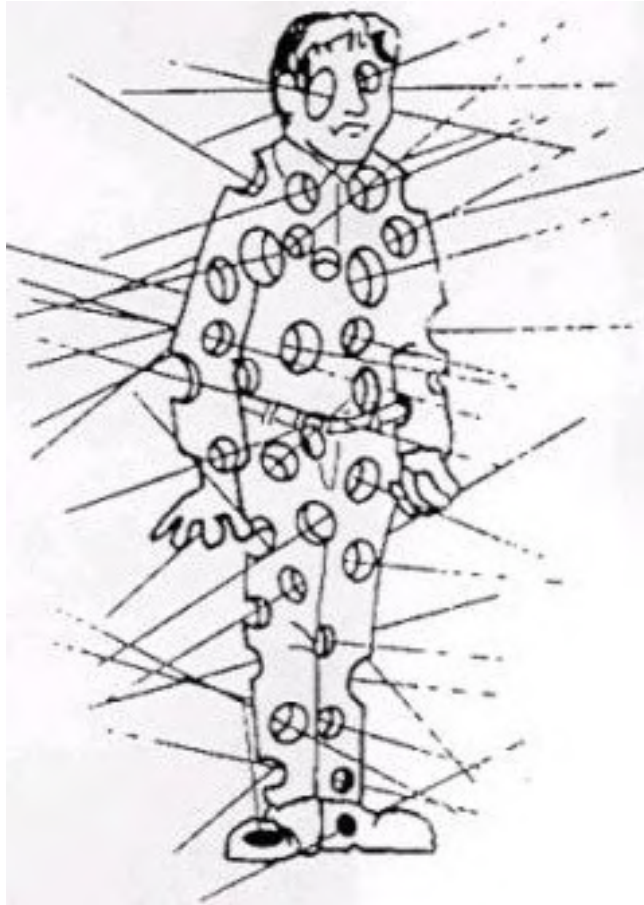
Raigs Còsmics

R, 60s





Estem immersos en un ambient ple de radiació i de partícules que no veiem.



Desenes de milers raigs còsmics us travessaran durant aquesta xerrada

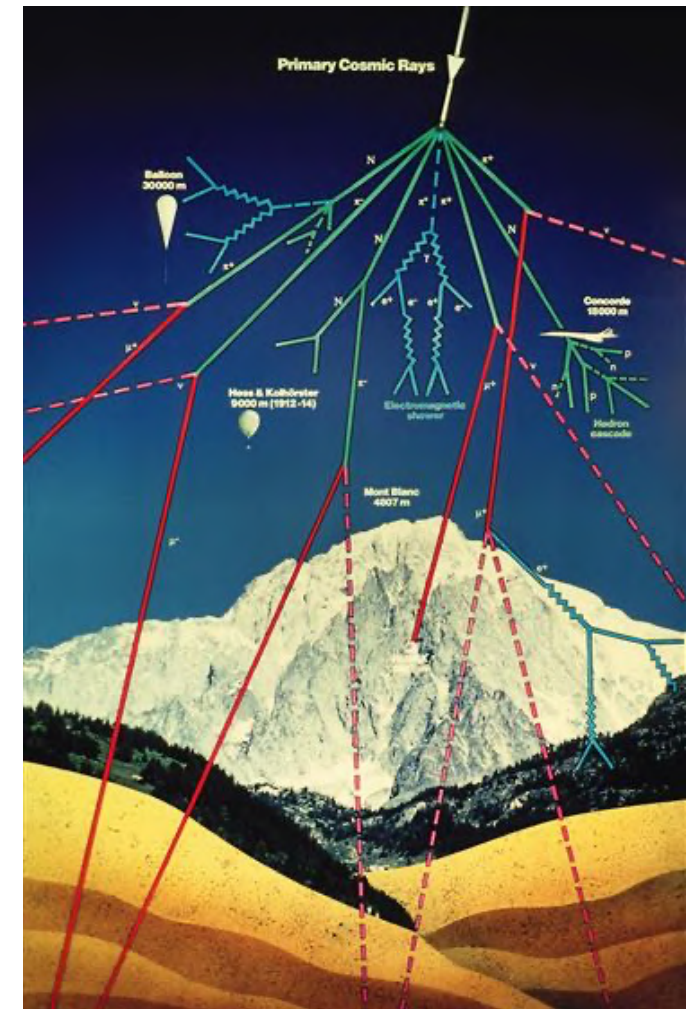
Què són els raigs còsmics?

Els Raigs Còsmics (CRs) són partícules carregades que arriben a l'atmosfera terrestre procedents de l'espai exterior amb energies relativistes.

86% de protons,
11% partícules alfa (nuclis d'heli)
1% nuclis més pesats
2% electrons

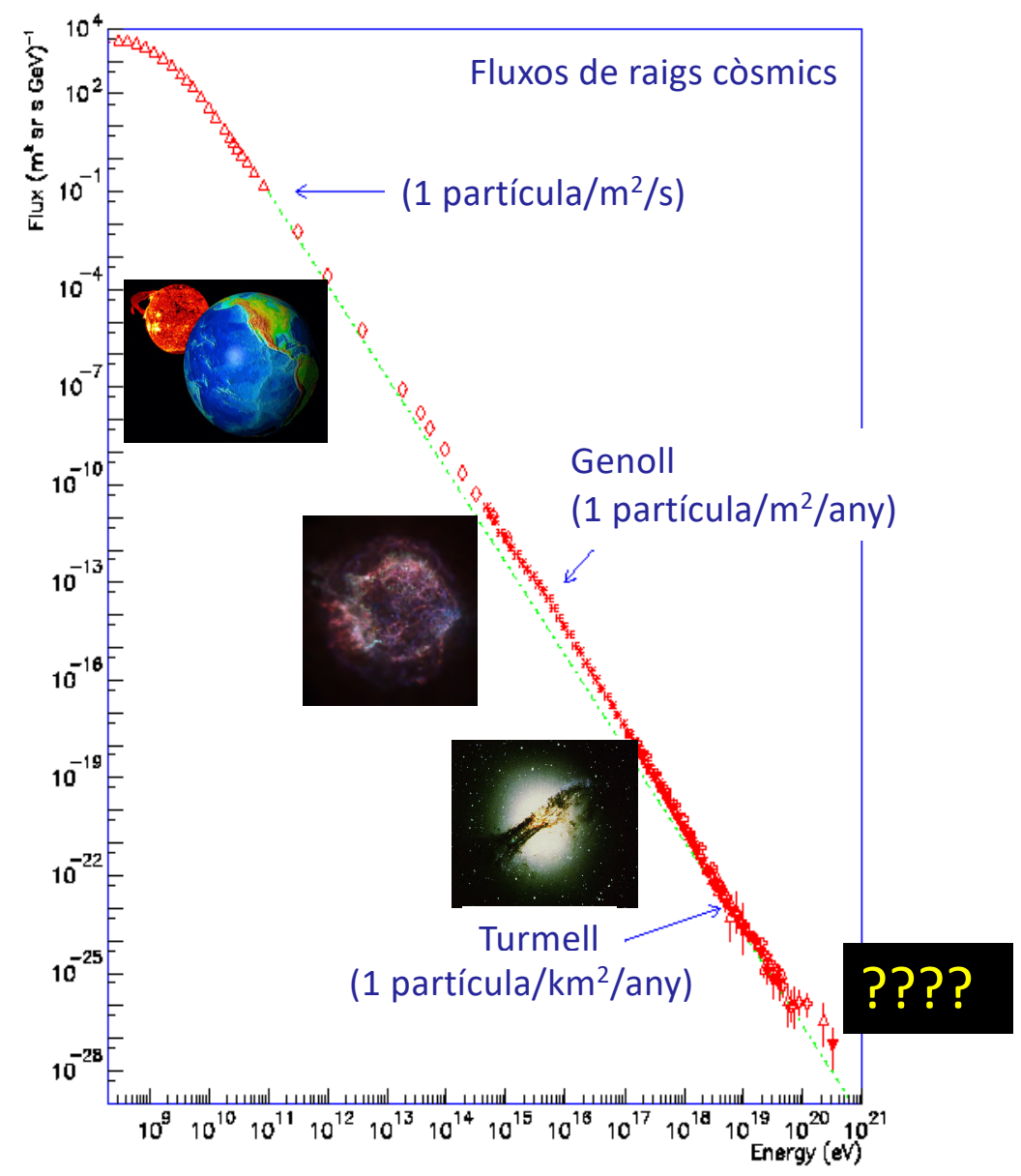
A més,

Petites proporcions de positrons i antiprotons d'origen secundari (interacció de CR primaris amb el IM).

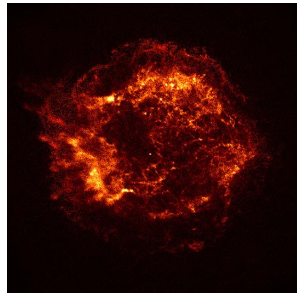


Fluxos en funció de l'energia

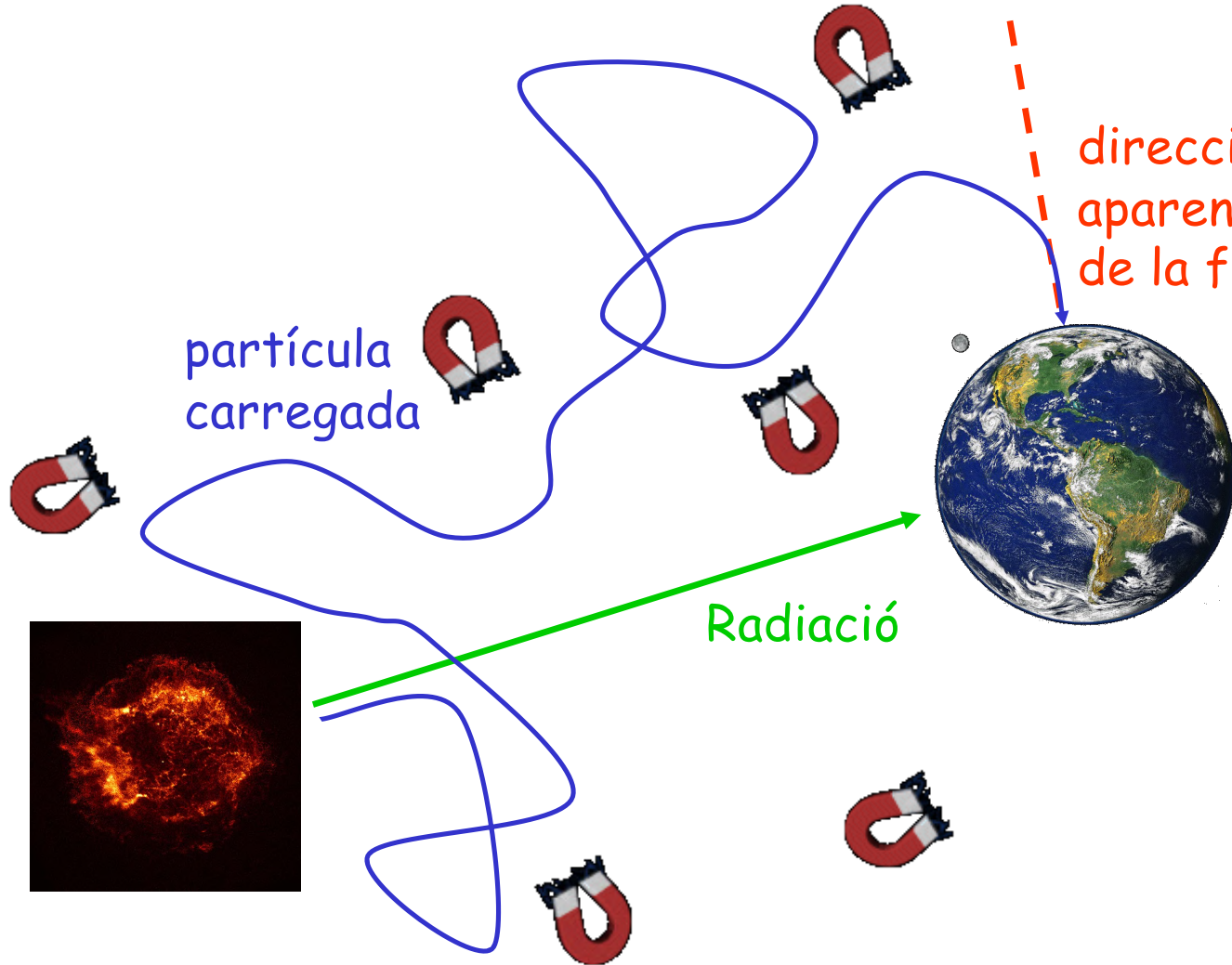
On s'originen ?



Font de raigs còsmics



partícula carregada



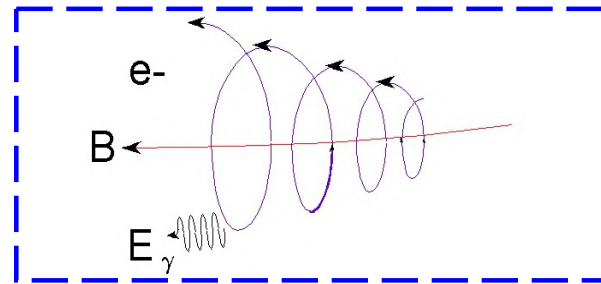
Radiació

direcció aparent de la font

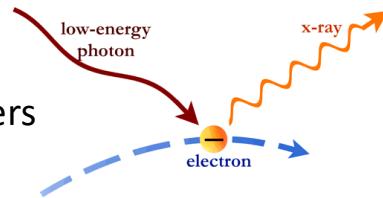


Un cop accelerades, les partícules poden produir llum (radiació) de diferents maneres

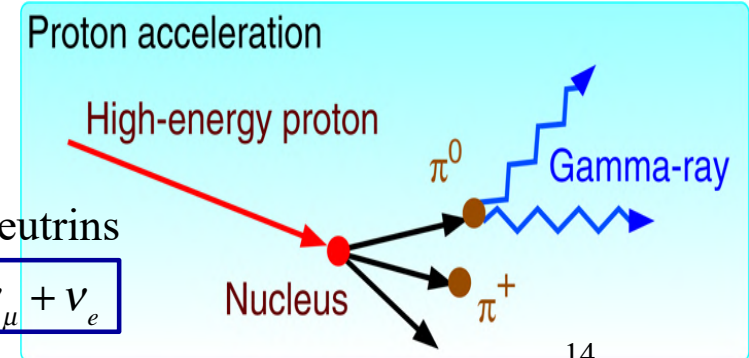
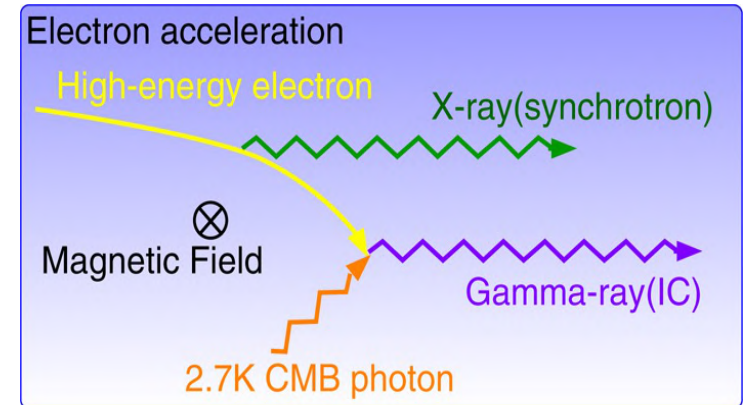
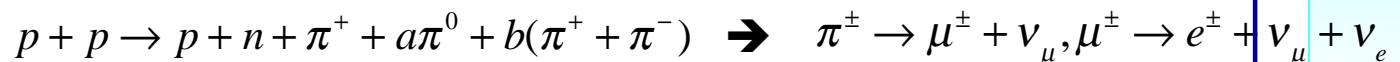
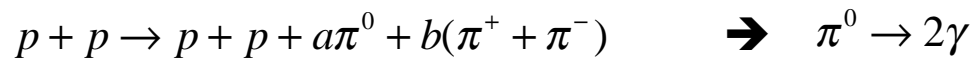
➤ Radiació sincrotró



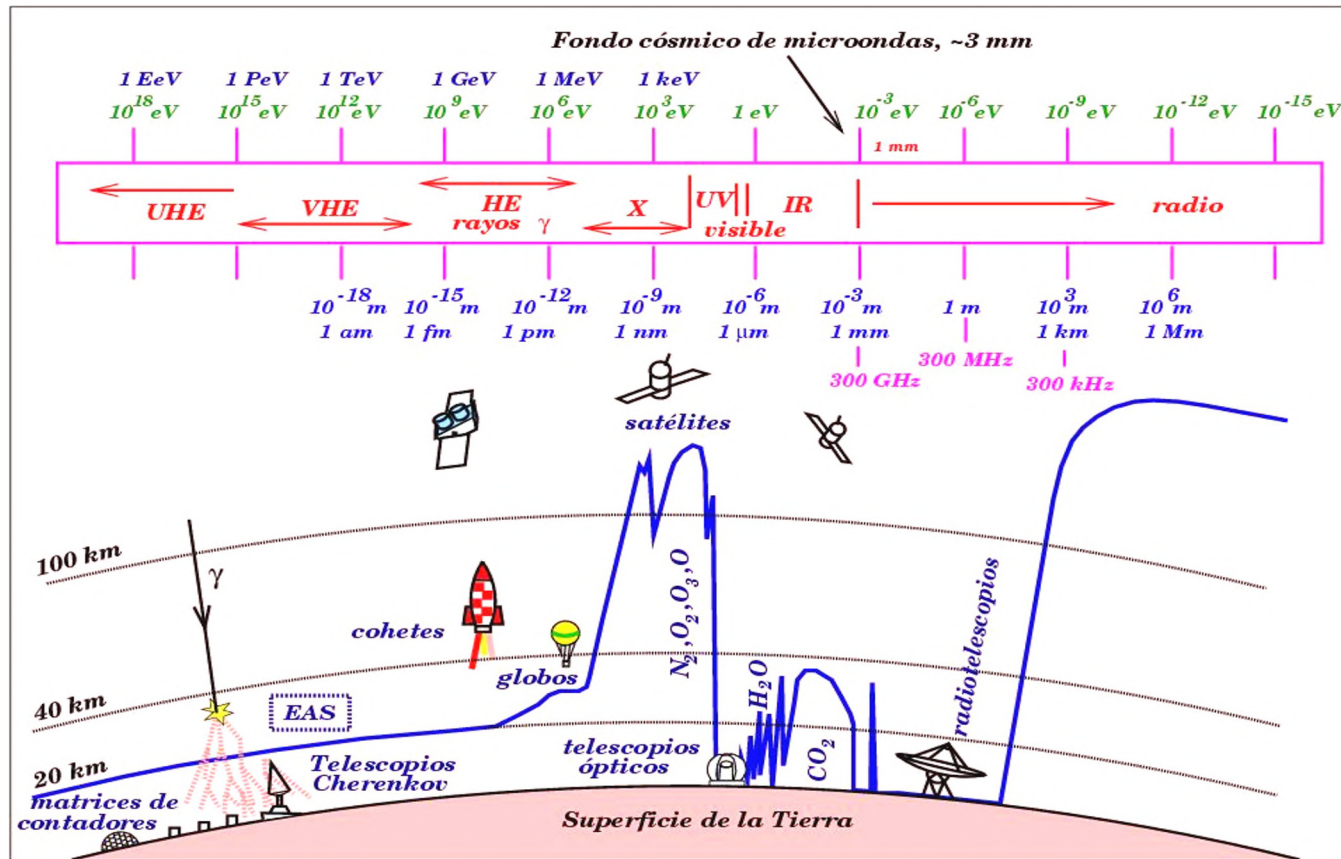
➤ Efecte Compton invers



➤ Processos hadrònics (xocs entre protons)



Absorció atmosfèrica



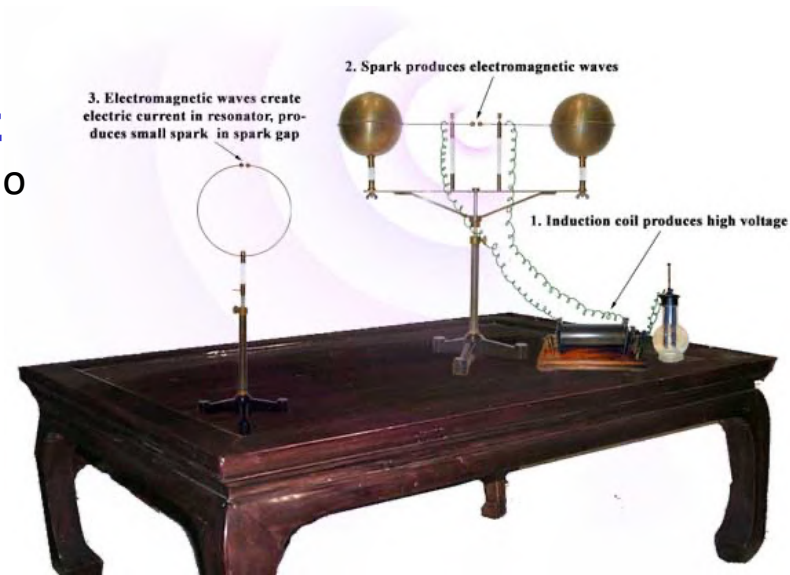
Gairebé no hi ha atenuació en la banda visible ni en la de ràdio, així com en determinades bandes de l'infraroig



HEINRICH RUDOLF HERTZ
1847 - 1894

Heinrich Hertz

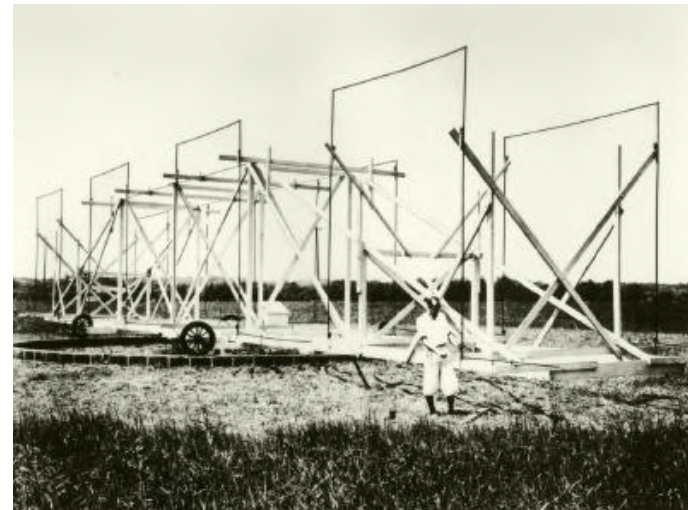
Emet i rep ones ràdio
(1885 -1889)



Astronomia ràdio

Una nova finestra d'exploració

Karl Jansky. Primera detecció en ràdio del centre de la Vía Làctia en els Lab. Bell (1931)



Els avenços tecnològics que aportà la Segona Guerra Mundial van donar l'impuls definitiu per a la radioastronomia.

L'any 1980 entra en funcionament el VLA

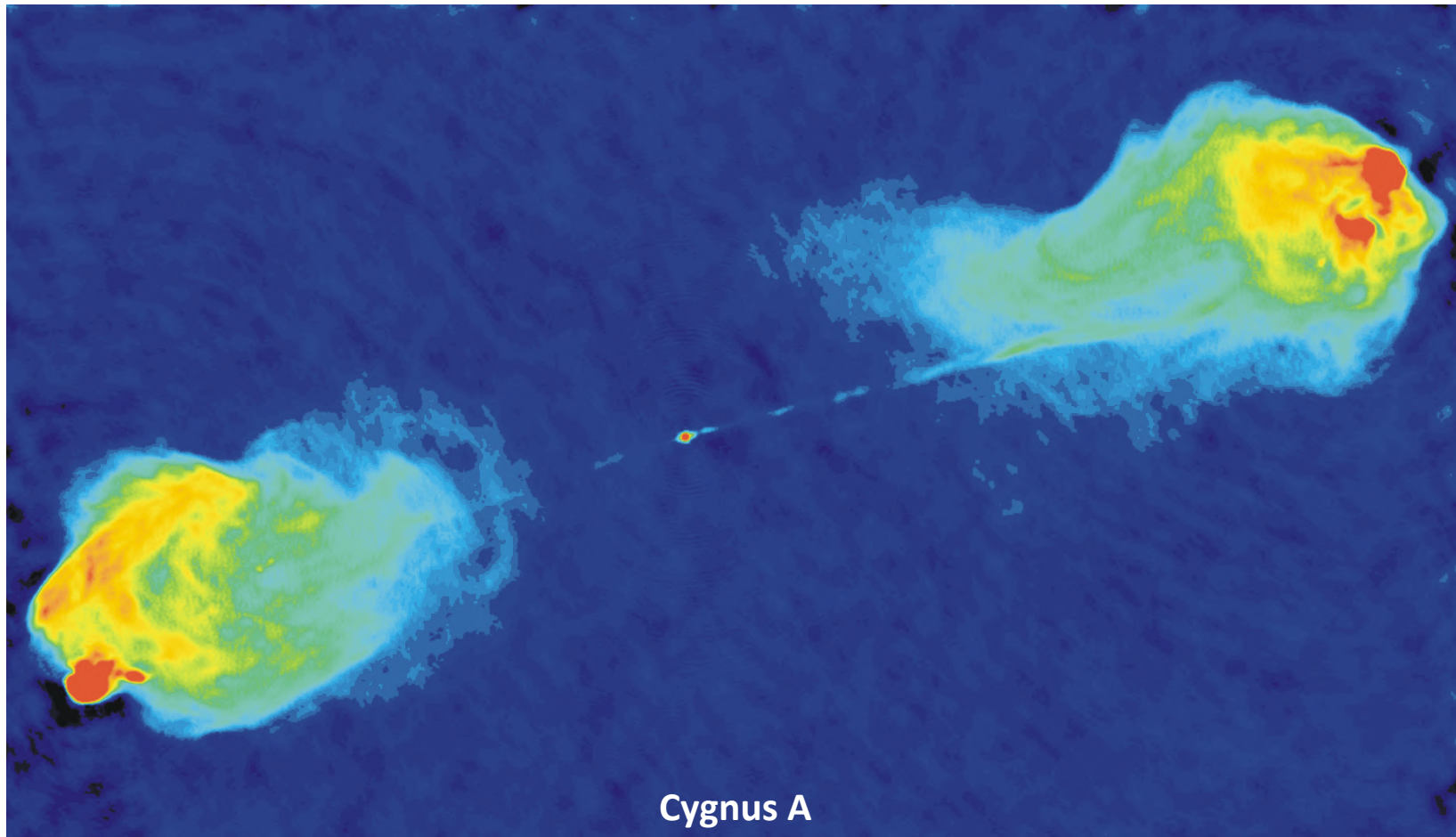


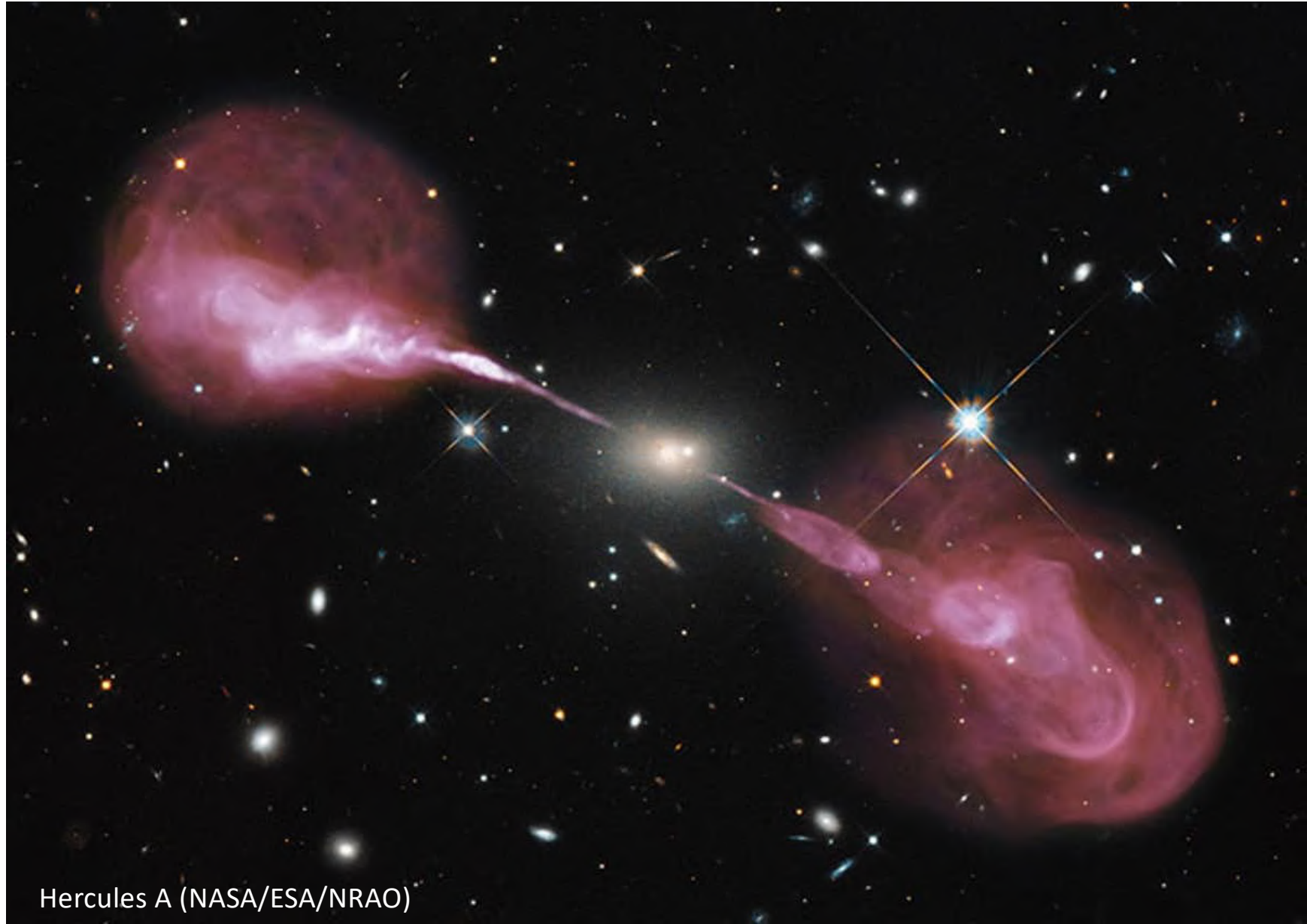
VLA (Very Large Array, USA)

Image courtesy of NRAO/AUI and Photographer-Kelly Gatlin; Digital composite-Patricia Smiley

Radiogalàxies

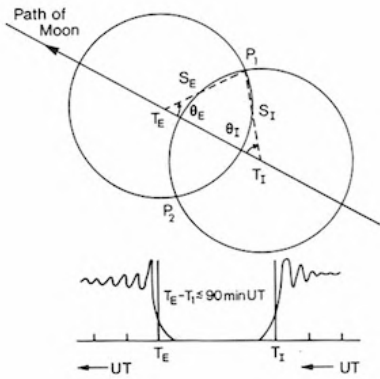
Descobertes per **Jennison** i **Das Gupta**, el 1953





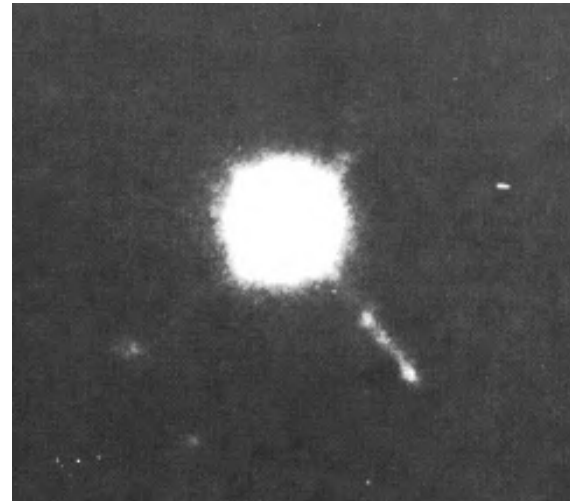
Hercules A (NASA/ESA/NRAO)

Quasi Stellar Radio Sources (Quasars)



3C 273

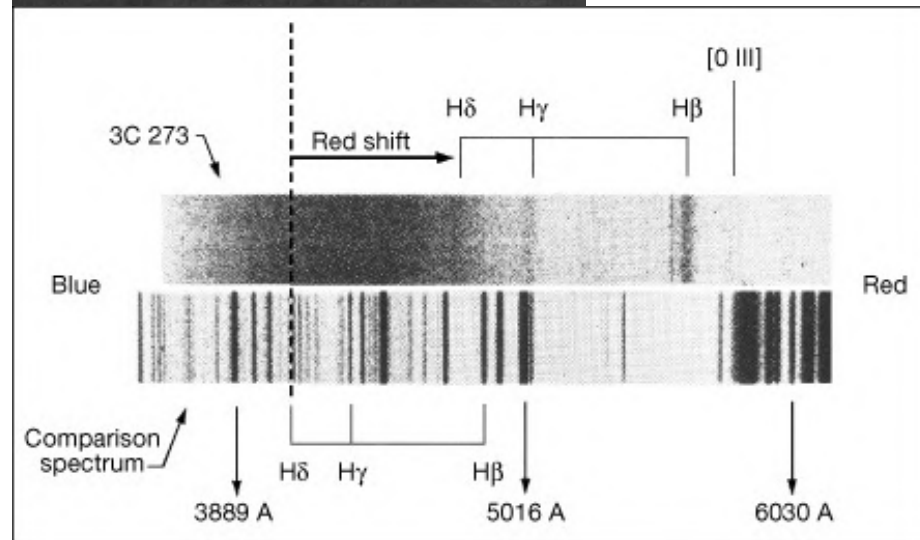
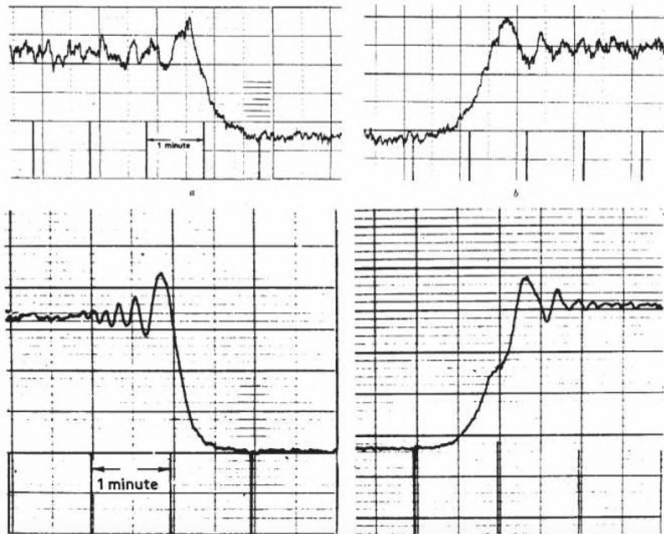
Mitjançant ocultacions lunars es va obtenir una posició precisa en ràdio que va permetre la seva identificació òptica



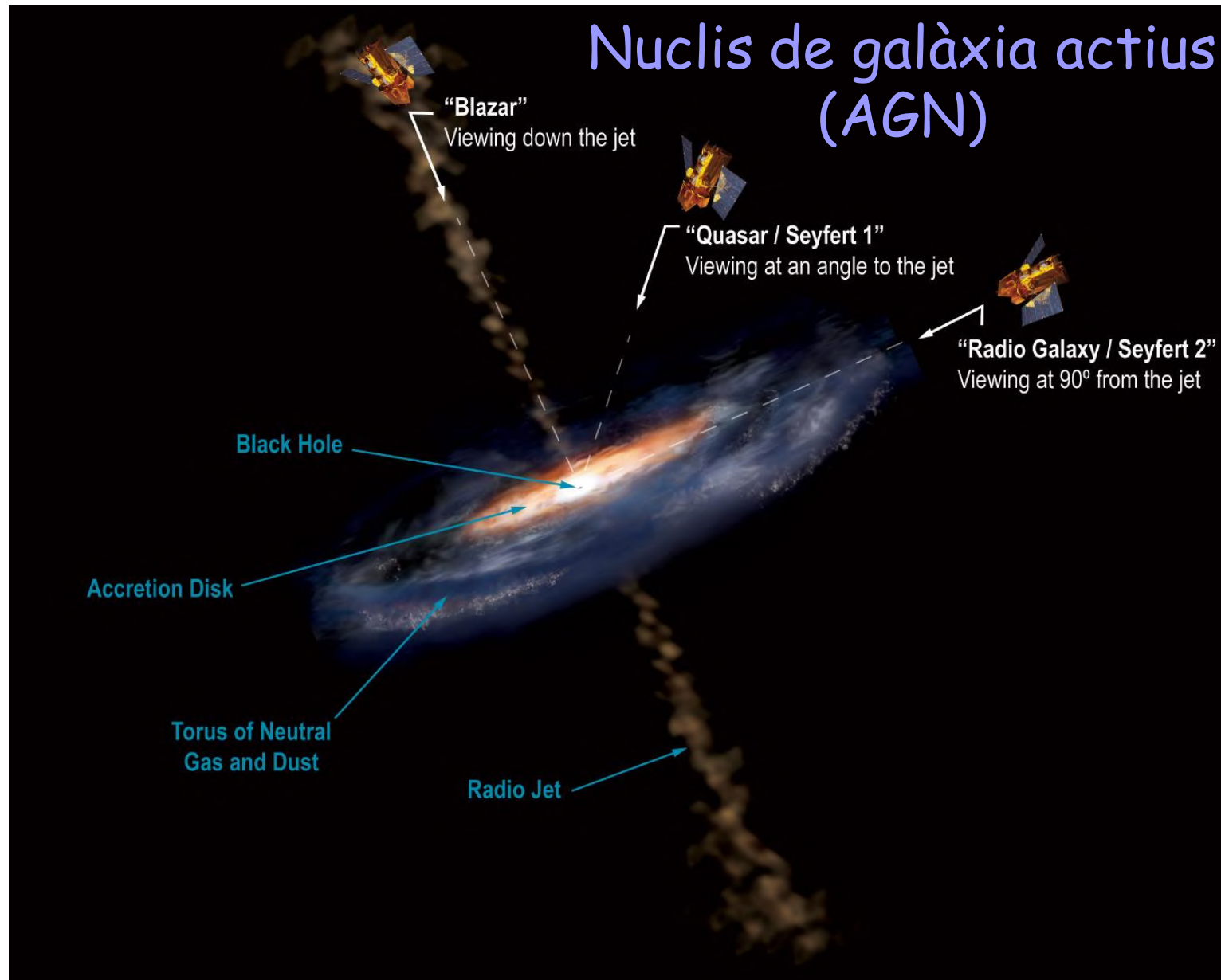
Descoberts per **Maarten Schmidt**, el 1963.

Identifica les línies de Balmer amb un desplaçament al vermell (redshift) de 0,16

1038 NATURE March 16, 1963 Vol. 197

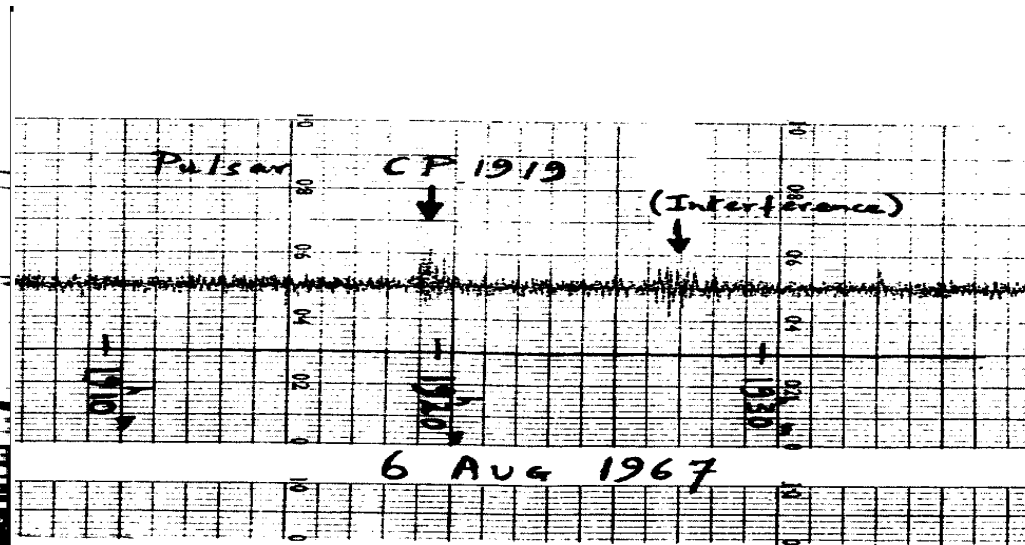


Nuclis de galàxia actius (AGN)

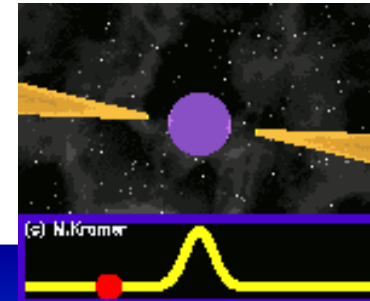


Pulsating Radio Sources (Pulsars)

Descoberts en 1968 per Jocelyn Bell i Antony Hewish (Premi Nobel de Física 1974)



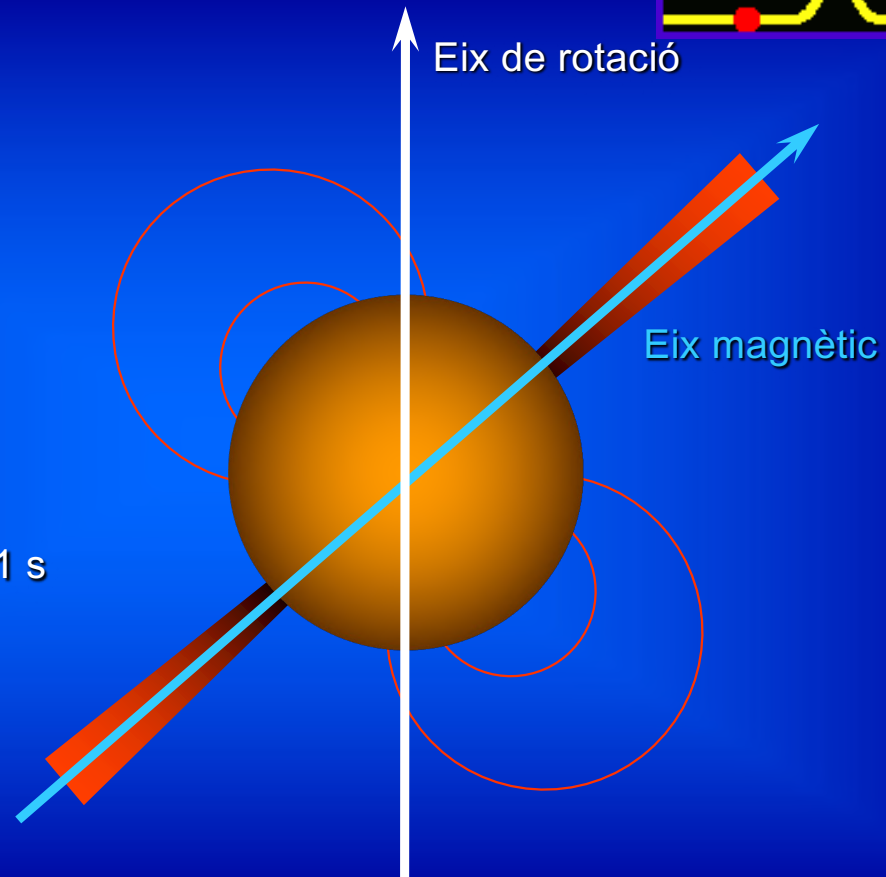
¿Qué són els púlsars?



Estrella de neutrons

Massa = $1.4 M_{\odot}$
Radi = 10 km
Període de rotació = 1 s

Feix d'emissió ràdio
al llarg de l'eix magnètic

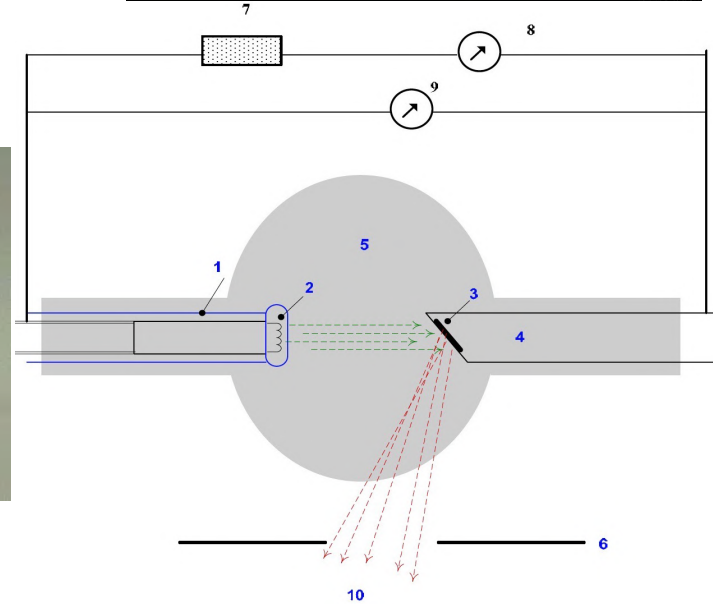
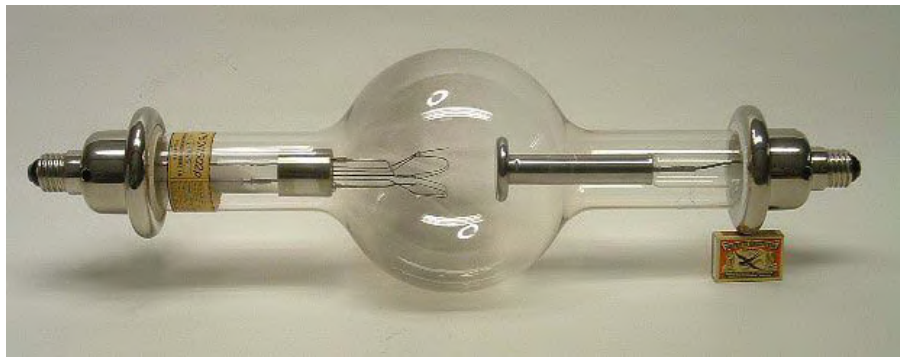
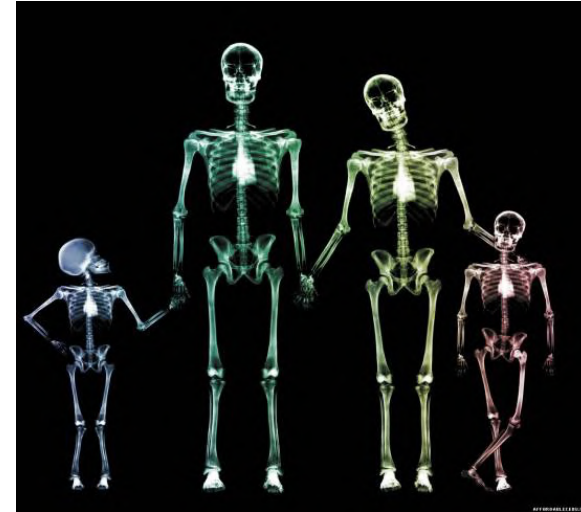




Wilhelm Roentgen

Descobreix els raigs-X (1895)

Primer PN de Física (1901)



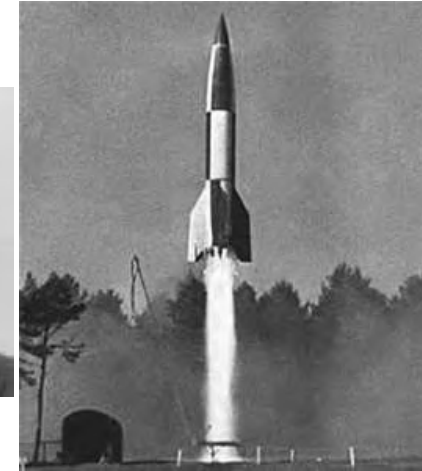
Astronomia de raigs X

Riccardo Giacconi

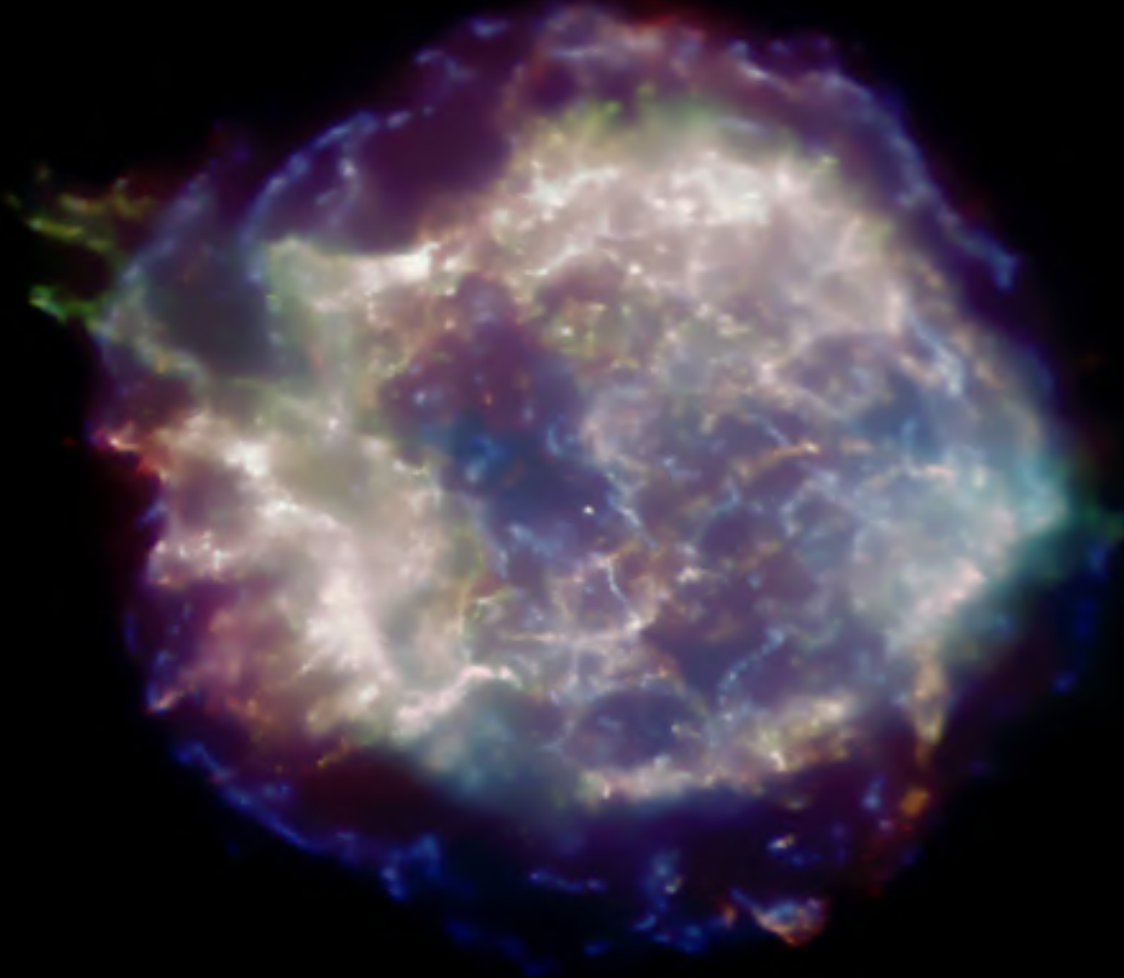
Pioner de l'astronomia X (PN de Física 2002)

1962: Es detecta la primera font de raigs X fora del Sistema Solar, Scorpius X-1, amb un detector a bord d'un coet V2

- Forats negres supermassius
- Púlsars de raigs X
- Romanents de Supernova
- Binàries de raigs X (i BHs estel·lars)
- Descobriments de plasmes amb $T \sim 10^6$ K



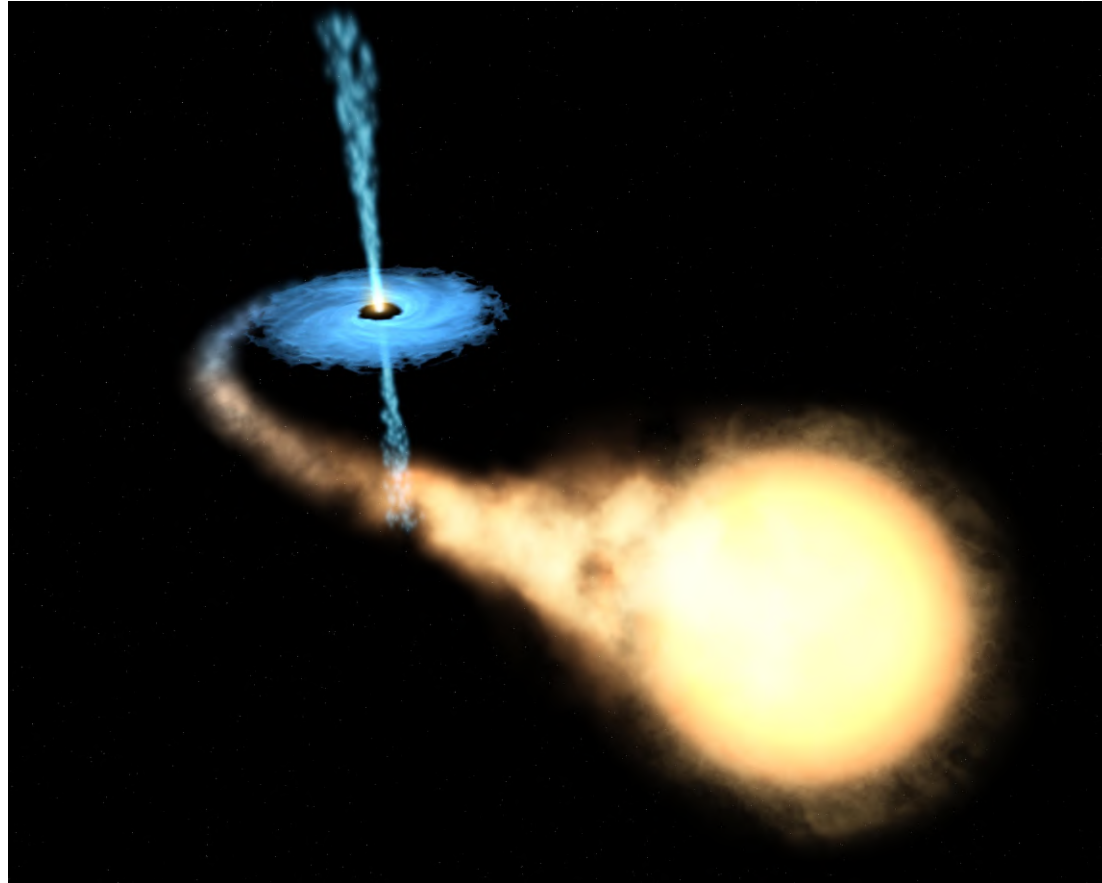
Romanents de Supernova



Chandra X-ray Observatory

Cassiopeia A

Binàries de raigs X



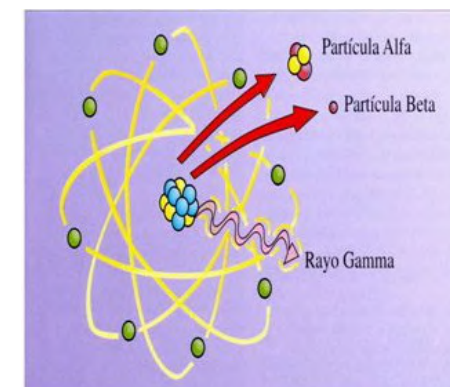


Raigs gamma

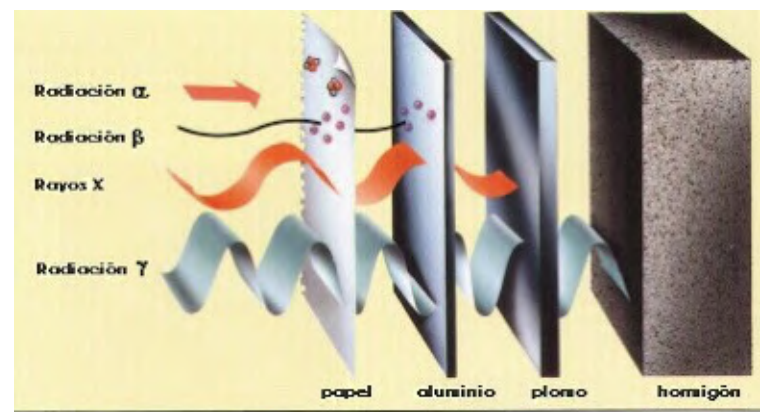
Paul Villard

1900: Descobreix els raigs-gamma

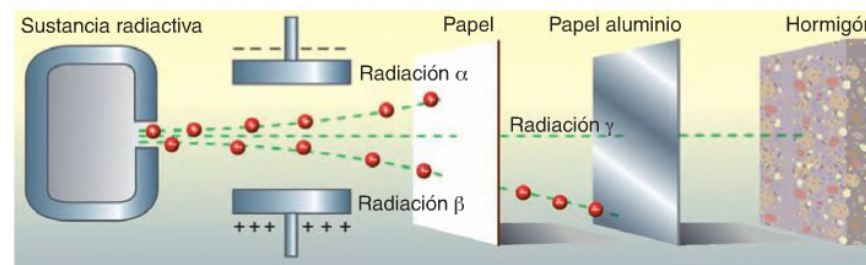
Radiació emesa per substàncies radioactives



- Eren diferents dels raigs X ja que tenien més poder de penetració



- El 1914, Rutherford va demostrar que eren **una forma de llum** amb una longitud d'ona més curta que els raigs X



Medicina



EsSalud
HOSPITAL NACIONAL EDUARDO REBAGLIATI

• La medicina nuclear documenta imágenes de la función y estructura de los órganos.

• Los radiofármacos más usados en medicina nuclear pueden ser detectados externamente por tipos especiales de cámaras gamma planar o SPECT, y PET.

Lic. Alexander Cárdenas Solano
Físico Médico en Medicina Nuclear

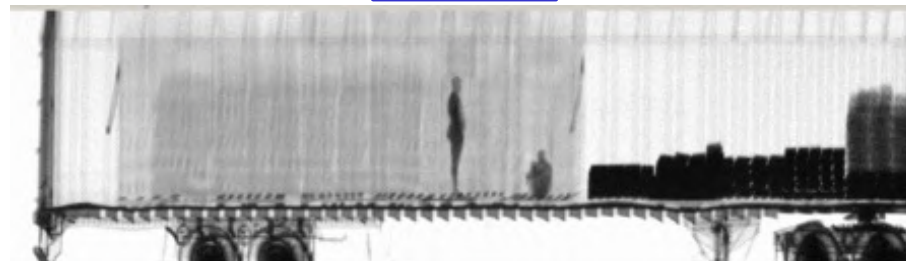
Radiografía industrial



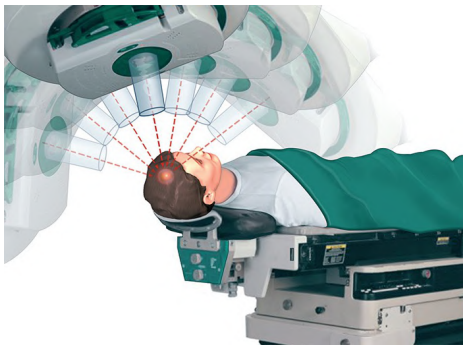
Aniquilar microorganismes de diferents productes



Scanners



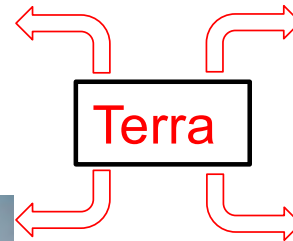
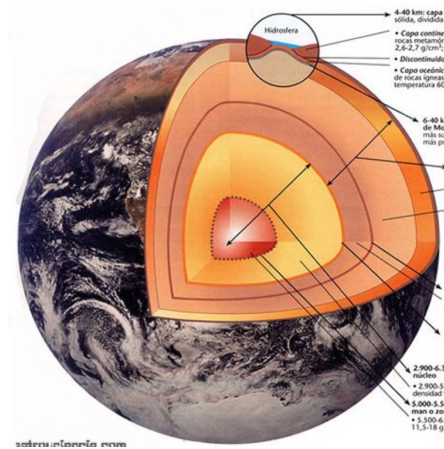
Radioteràpia



Seguretat alimentaria



Raig gamma On s'originen a la Terra?



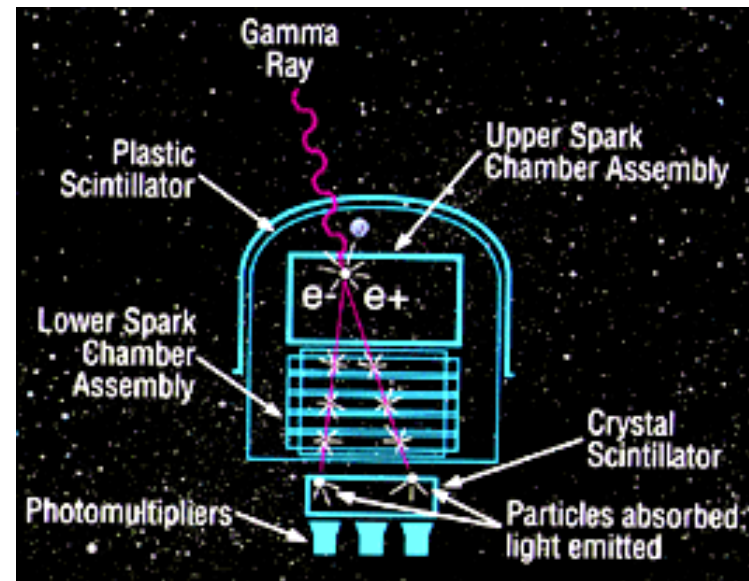
i també a l'espai.....

Astronomia Gamma

Raig gamma procedents de l'espai



1961: Explorer XI, primer satèl·lit de raigs gamma



Un descobriment impactant

Tot comença amb la bomba atòmica i els raigs gamma

Construcció: 1940-1950 (Los Álamos)

Probes: desert d'Arizona, illa de Bikini, etc.)

Finals 1950: Es coneixen els perills de la radioactivitat per la **salut**

1963: Tractat de **prohibició** de probes atòmiques en la atmosfera, sota aigua i a l'espai

Octubre 1963: s'inicia el programa **VELA** (velar, vigilar) per **verificar** que la URSS complia el tractat



La Bomba del Tsar va ser una bomba de fusió d'hidrogen de 50 Megatones, amb una potència 3.800 vegades més gran que la llançada a Hiroshima

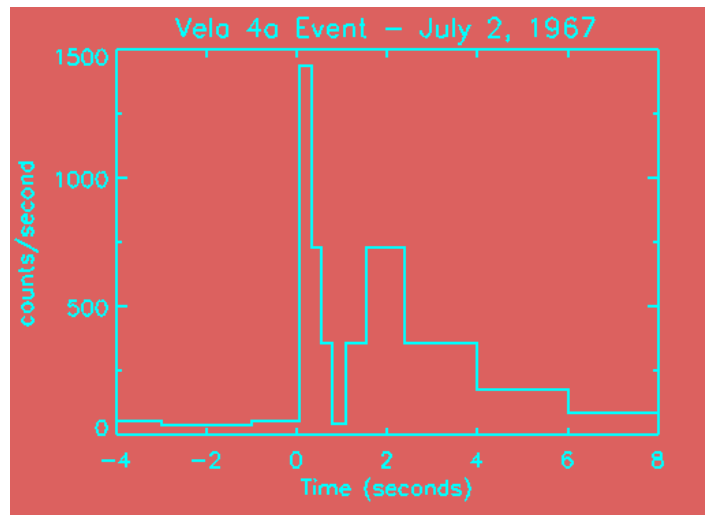
Vela Program (1963-1979)



Satèl·lits amb detectors de raigs X, gamma i neutrons

Gamma-ray Bursts (GRB)

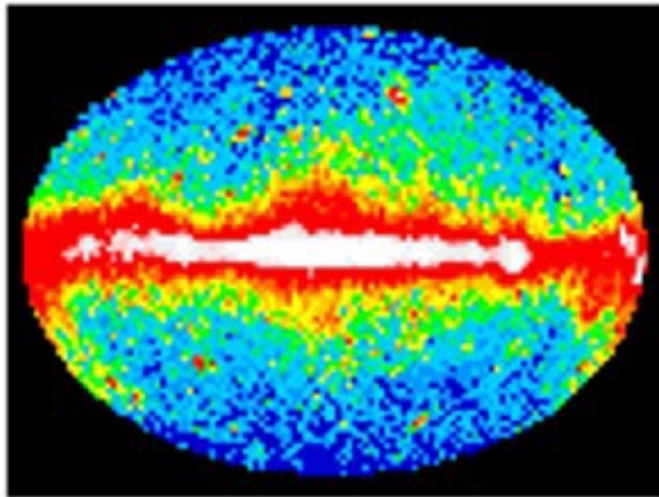
Descoberts el 1967 durant controls de proves d'explosions nuclears



Els satèl·lits VELA van detectar 16 esclats en 5 anys

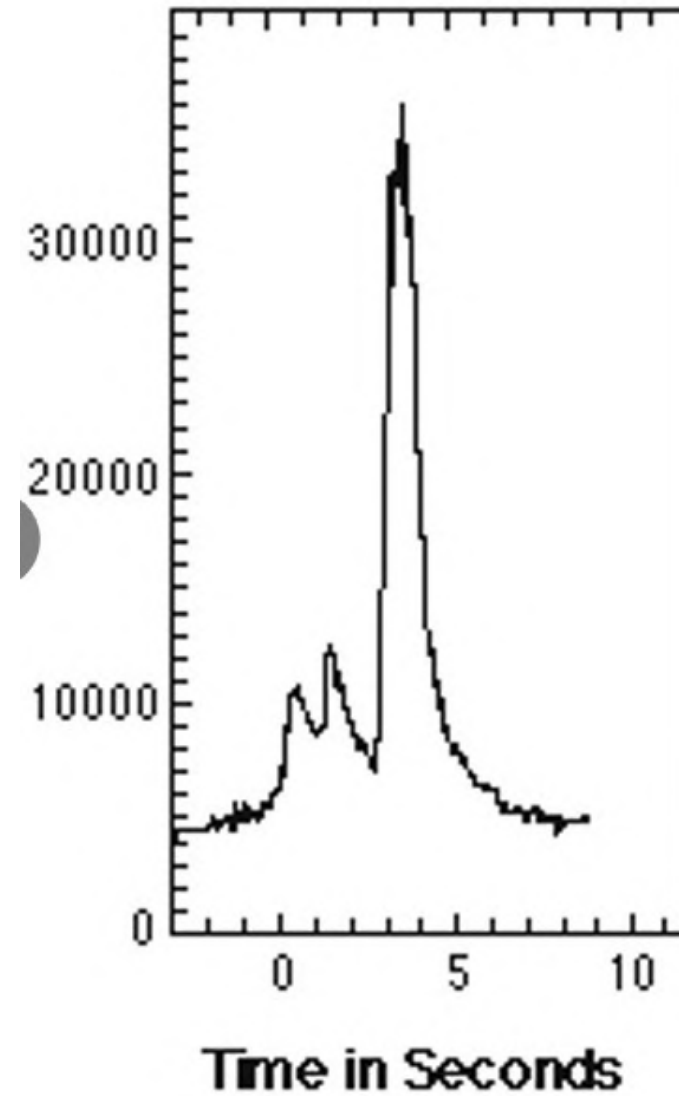
→ aquests esclats havien de ser molt freqüents

Un GRB cada dia, en alguna part de l'Univers

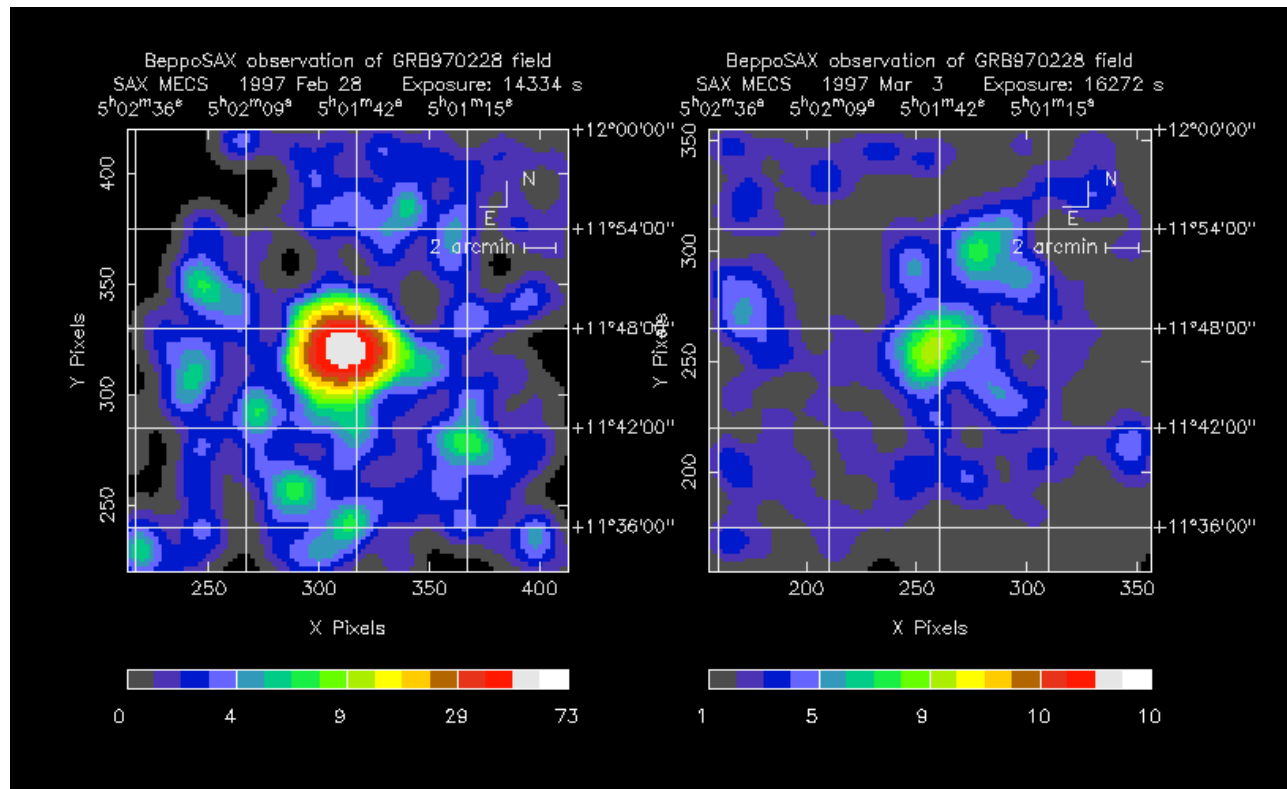


Counts per Second

Més de 30 anys de misteri !!

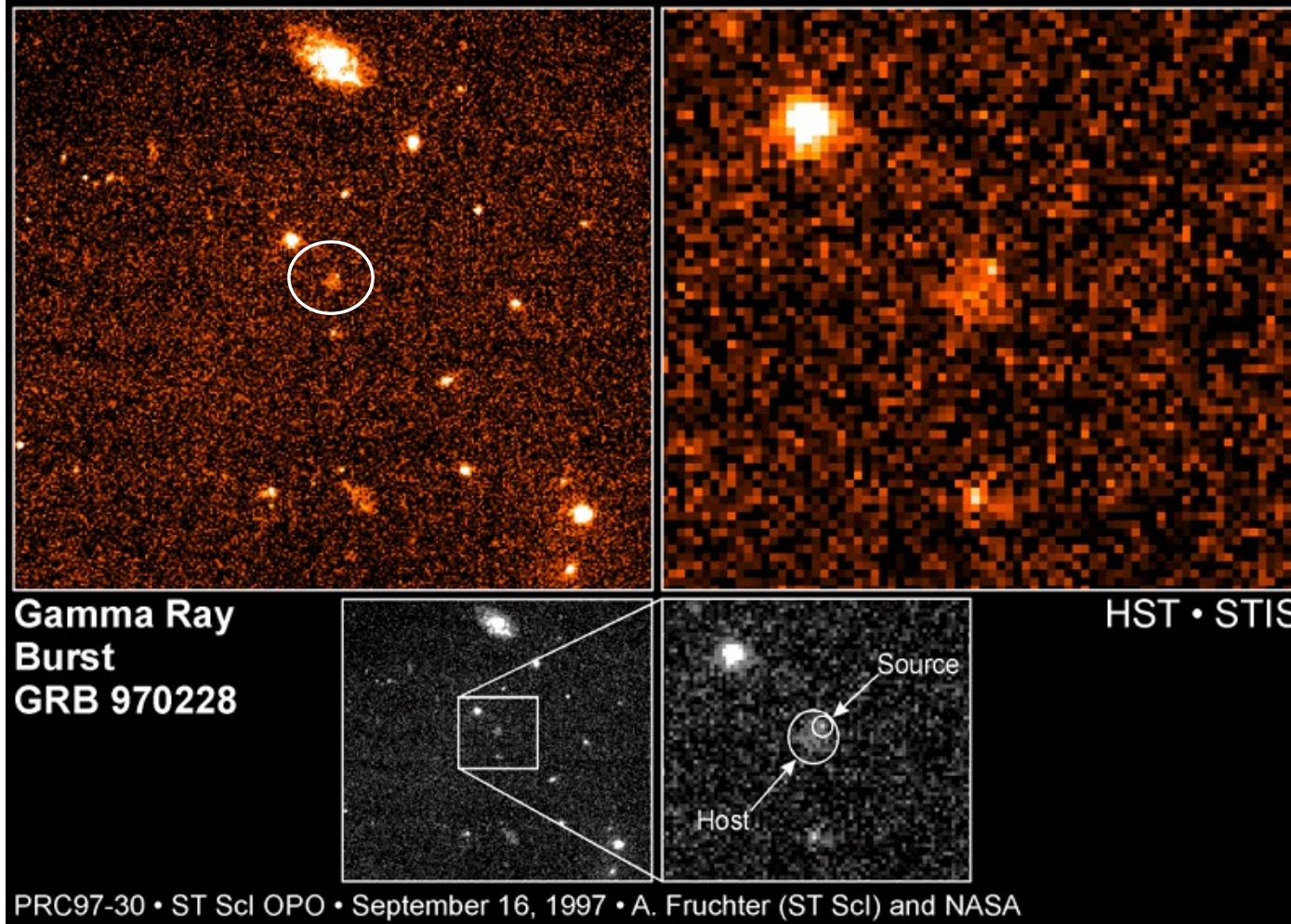


D'on venen aquests esclats?



En 1997, BeppoSAX va detectar per primer cop raigs X d'un GRB 8 hores després de l'explosió

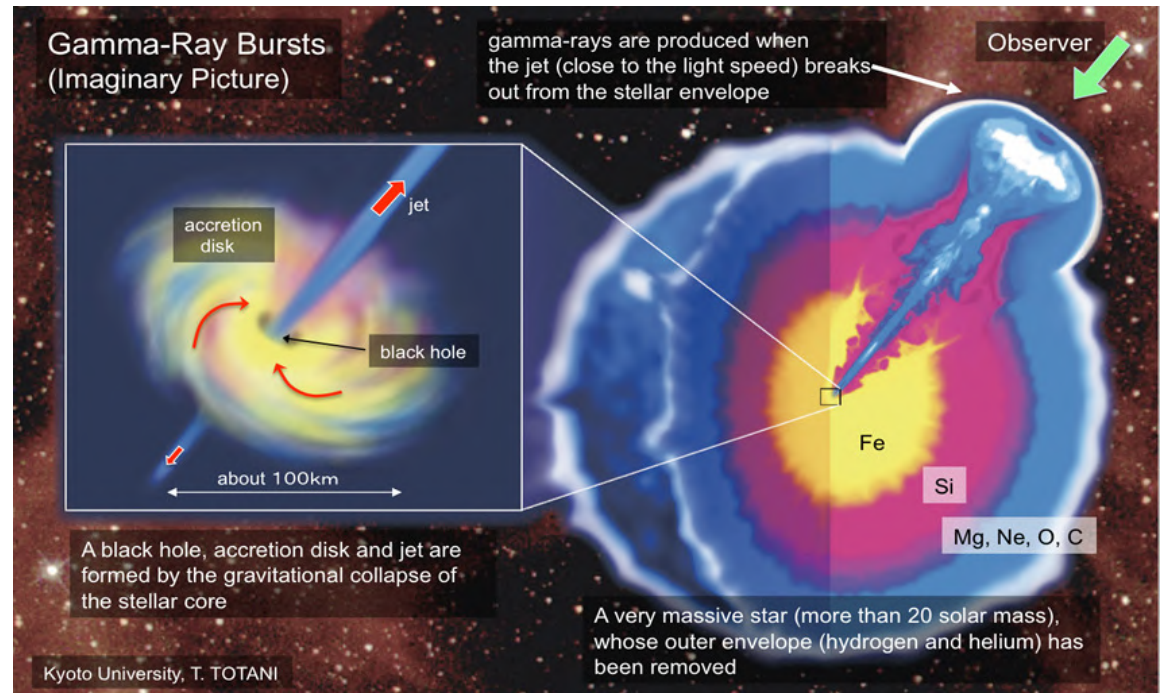
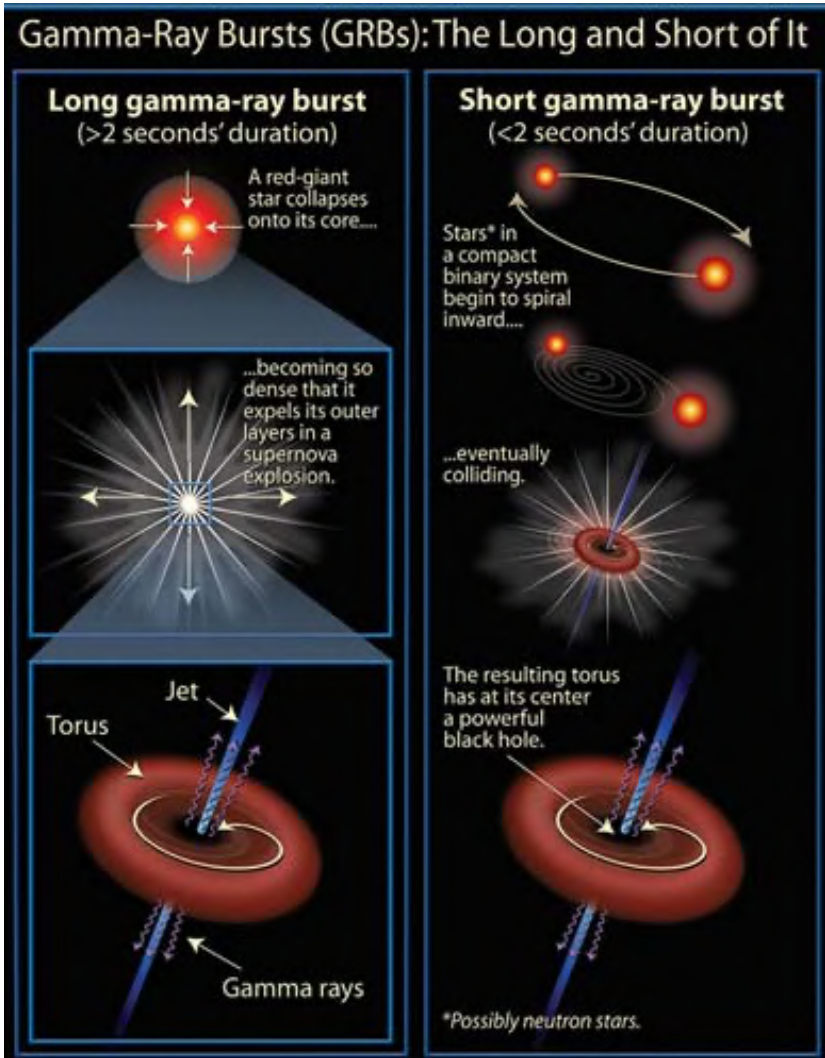
Què va veure HST? (7 mesos més tard)



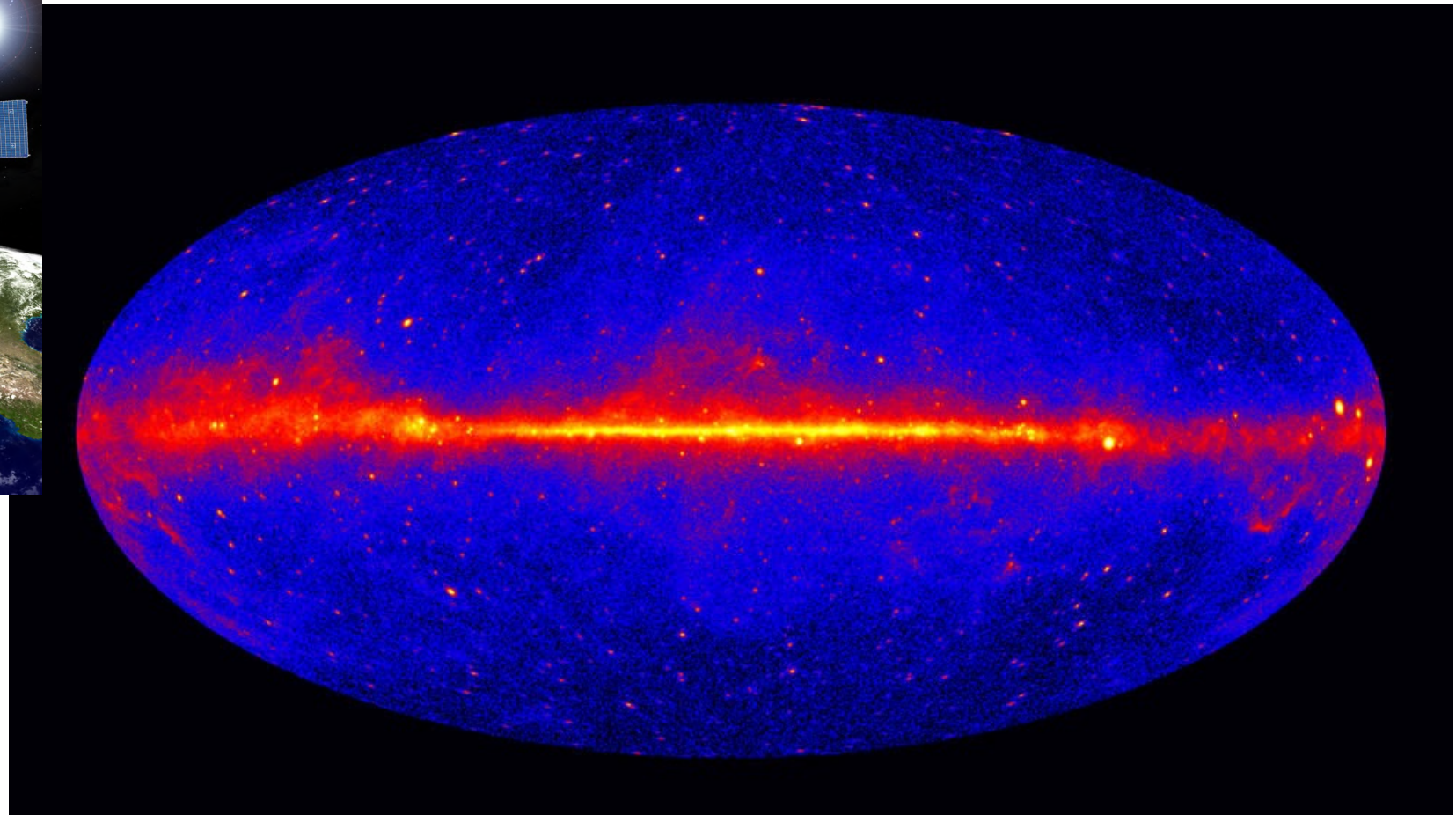
**Els GRBs
són extragalàctics !!!**

- Són les explosions més potents de l'Univers
- En menys de 10 s emeten més energia que el Sol al llarg dels 5×10^9 anys de vida

Models de GRBs

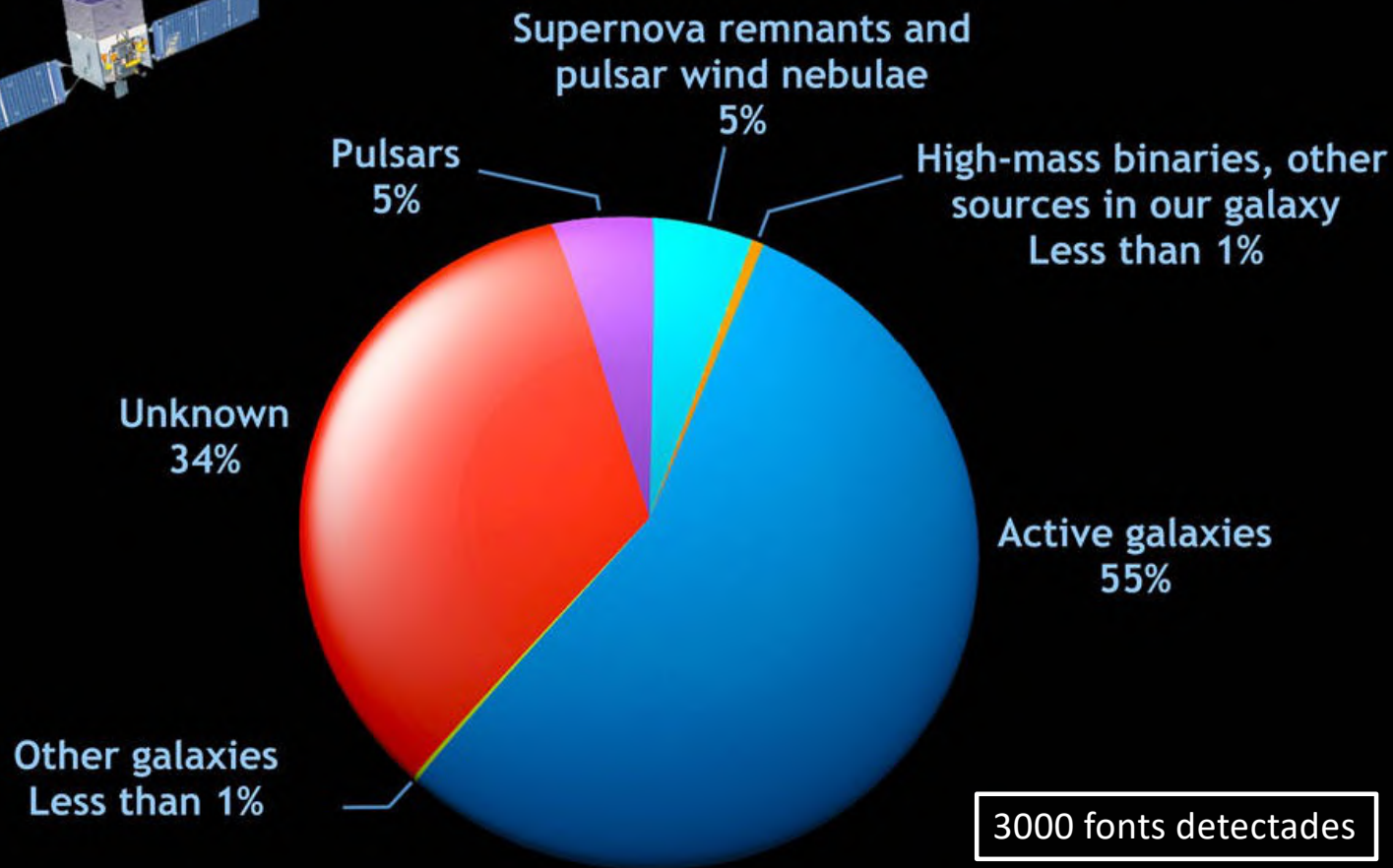


El cel en raigs gamma



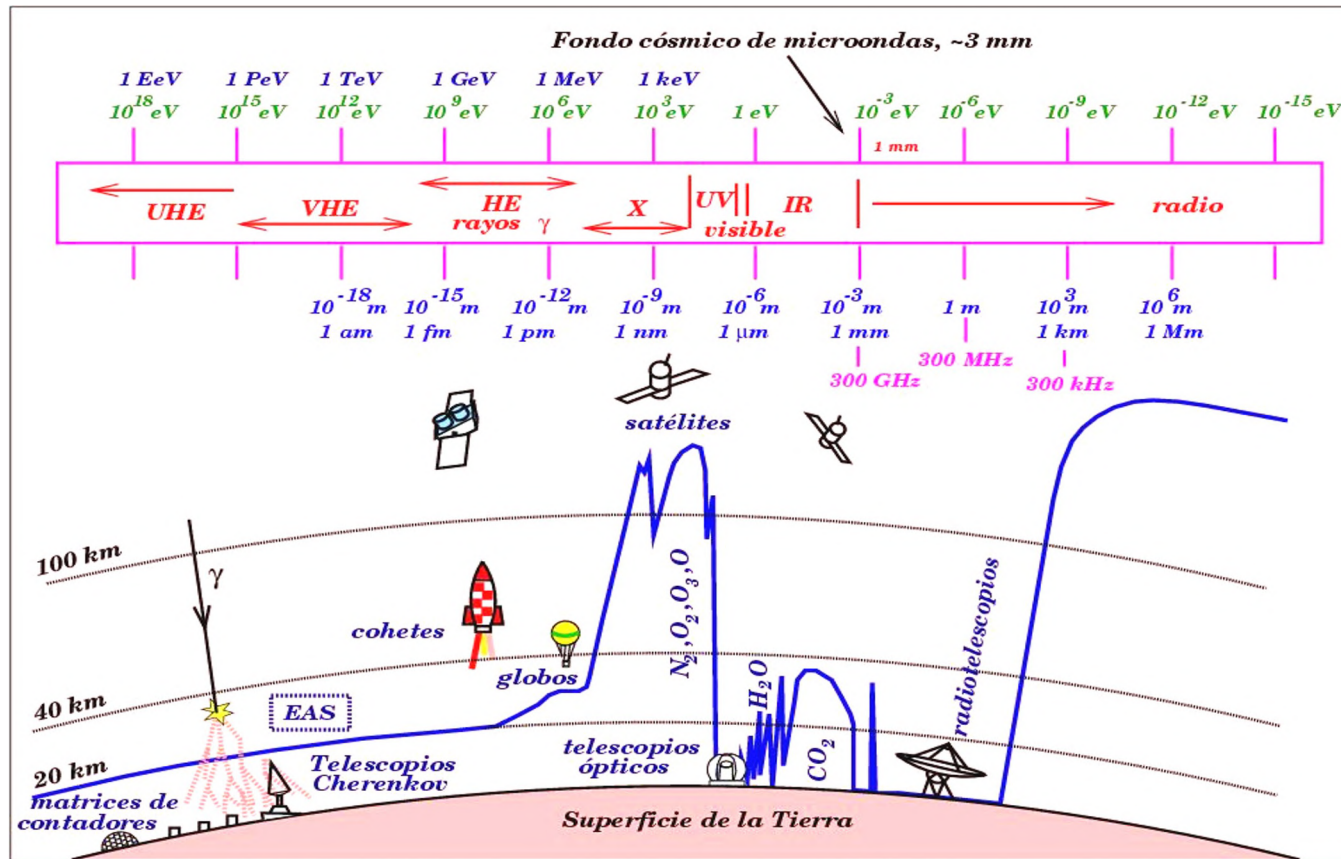
0.1 - 50 GeV High Energy gamma rays (HE)

Fermi reveals the universe above 10 GeV



Credit: NASA/Goddard Space Flight Center

Absorció atmosfèrica



Gairebé no hi ha atenuació en la banda visible ni en la de ràdio, així com en determinades bandes de l'infraroig

Raigs gamma de molt alta energia, VHE ($E_\gamma > 100 \text{ GeV}$)



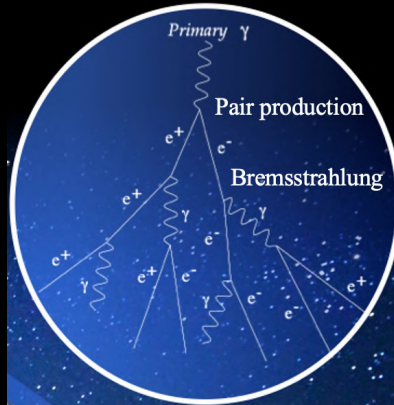
Astronomia gamma a energies $> 100 \text{ GeV}$

Tenen tanta energia que en entrar a l'atmosfera destrueixen els àtoms de l'aire i produeixen una cascada de milions de partícules. Aquestes partícules brillen només durant unes mil·lionèsimes de segon ("nanosegons")

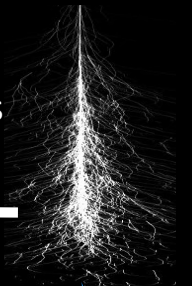
Telescopis Txerènkov

Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACTs)

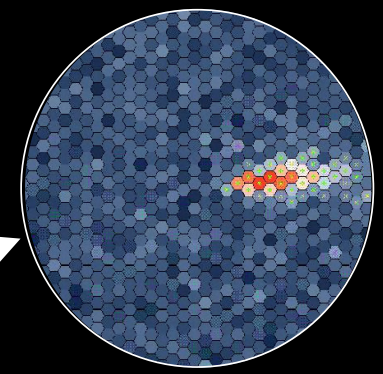
Raig γ



Pluja de partícules
(Cascada e-m)

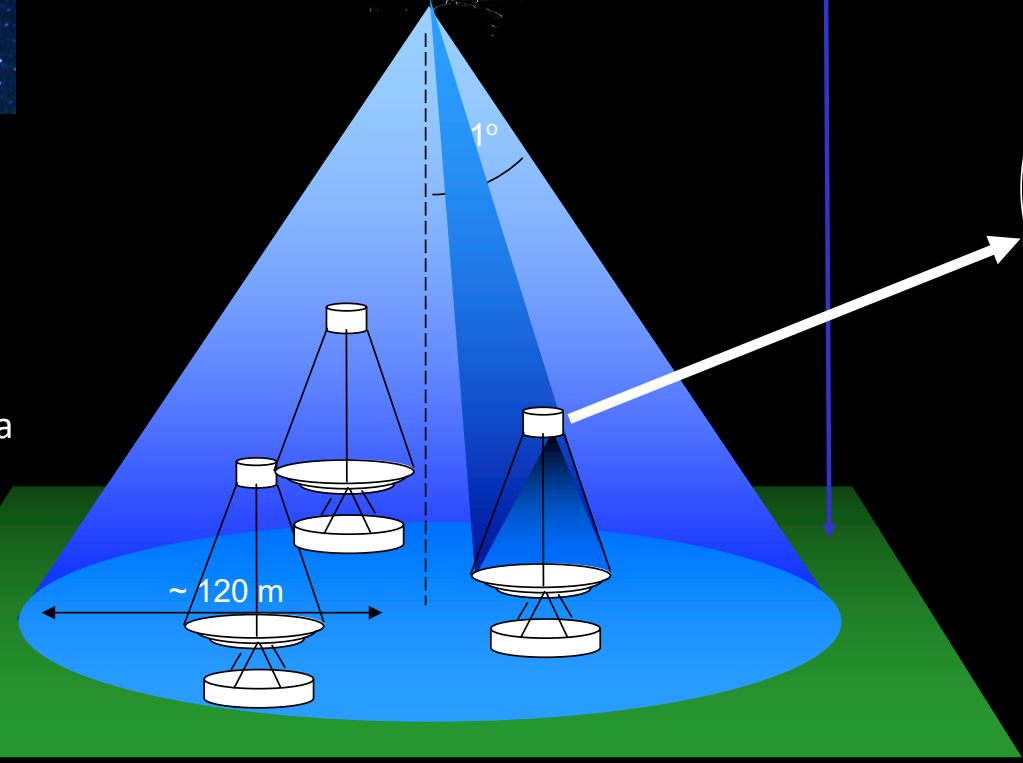


~ 10 km



Flaix de radiació Txerènkov

- 5-20 ns
- $300 < \lambda < 500$ nm (llum blava)



MAGIC: Major Atmospheric Gamma Imaging Cerenkov



- Telescopis especialment dissenyats per detectar GRBs propers.
- Retard típic de 50 s després de rebre una alerta.

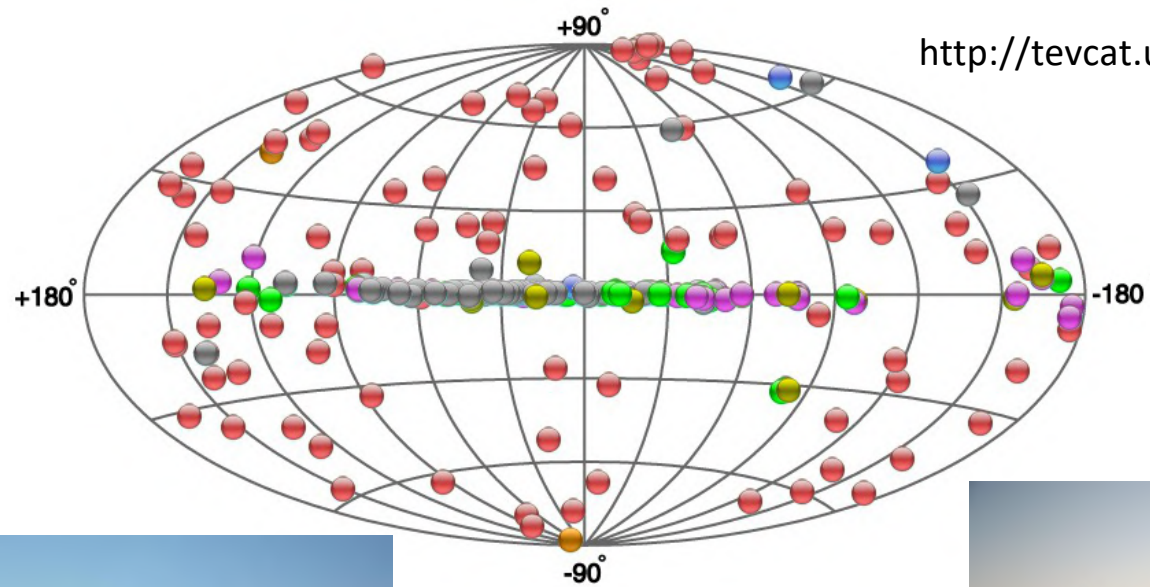
L'Univers en raigs gamma de molt alta energia VHE ($E_\gamma > 100 \text{ GeV}$)

247 fonts detectades

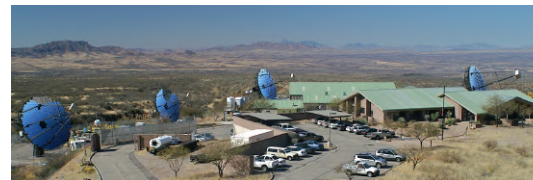
35 % extragalactics
35% galactics
30% no identificats

Source Types

- Extended TeV Halo PWN
- Binary XRB PSR Gamma BIN
- HBL IBL FRI FSRQ
Blazar LBL AGN
(unknown type)
- Shell SNR/Molec. Cloud
Composite SNR
Superbubble
- Starburst
- DARK UNID Other
- uQuasar Star Forming
Region Globular Cluster
Cat. Var. Massive Star
Cluster BIN BL Lac
(class unclear) WR

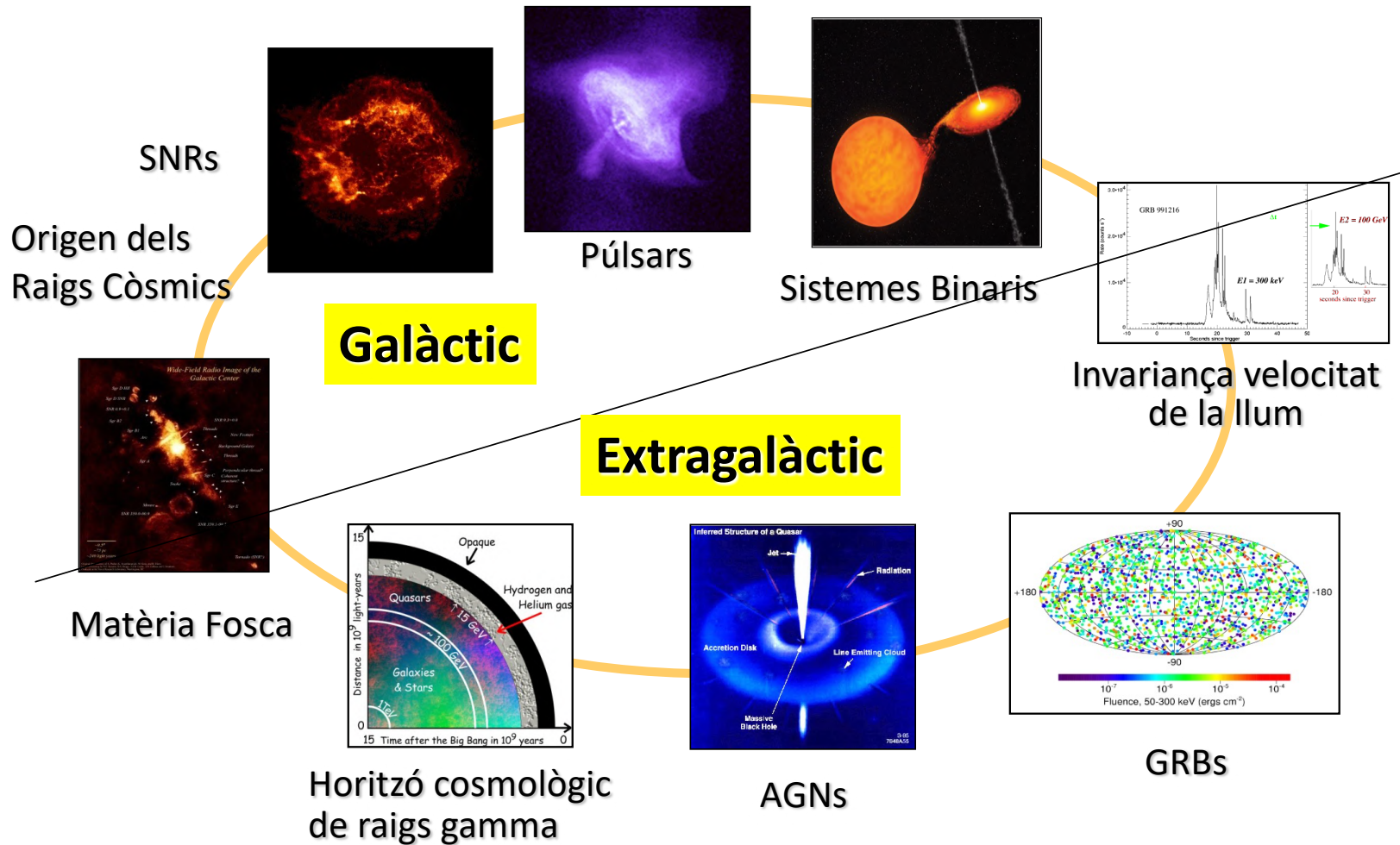


<http://tevcat.uchicago.edu/>

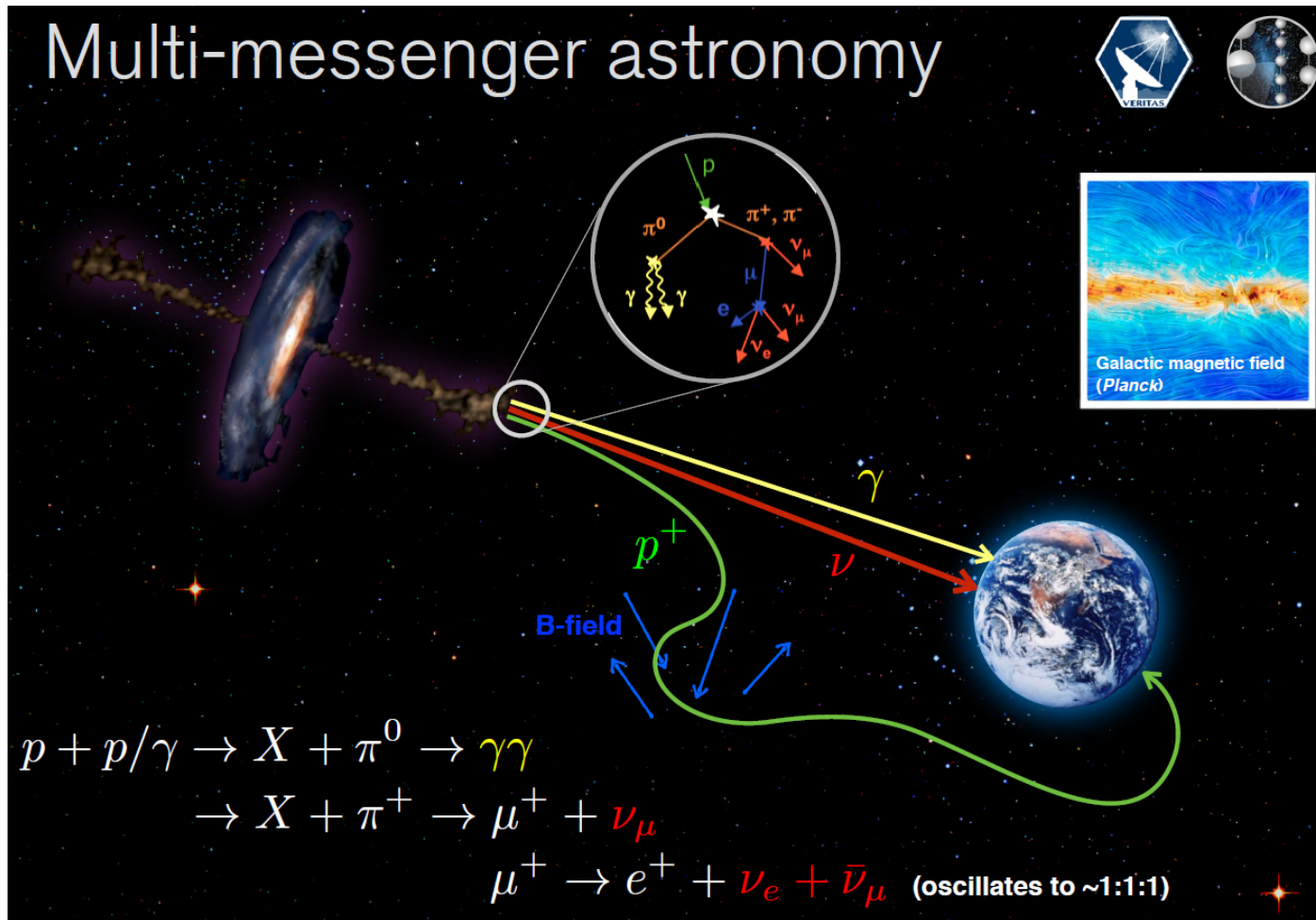


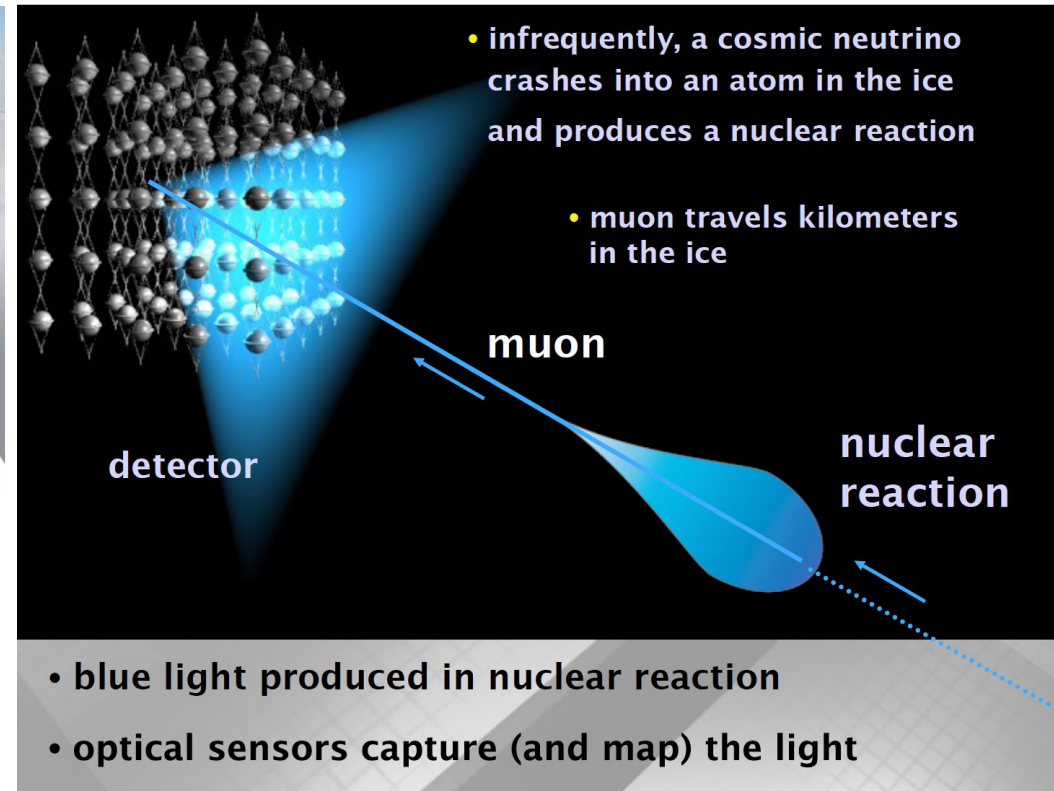
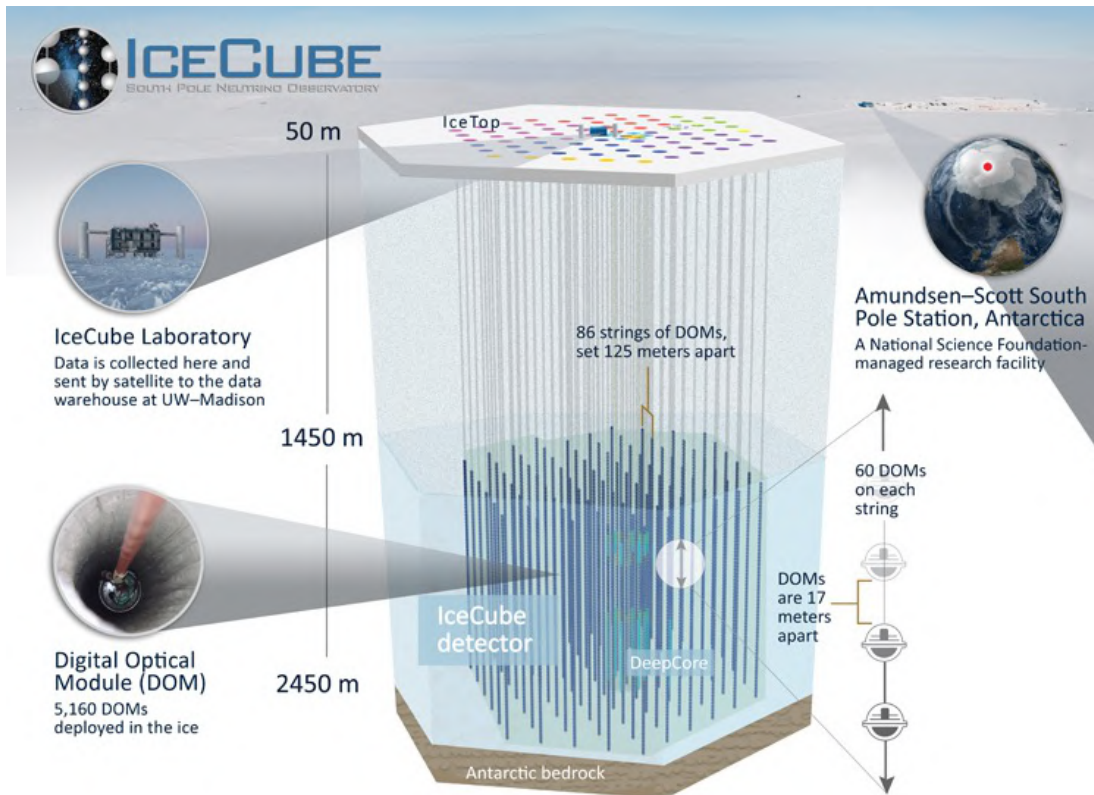
○ GRB190114C (MAGIC Col., Nature 2019)

Explorant l'Univers gamma. Processos altament energètics



Noves finestres per explorar l'Univers: Neutrins

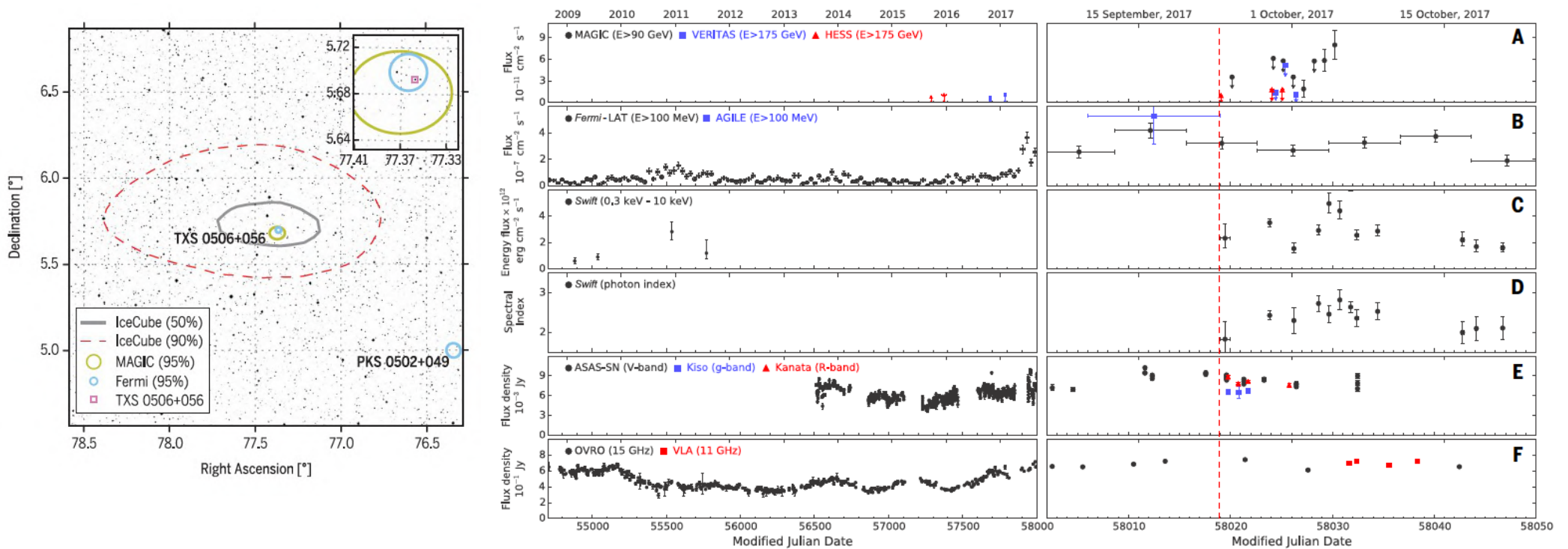




- Els neutrins no s'observen directament, però quan interaccionen amb el gel produeixen partícules secundàries carregades elèctricament que, al seu torn, emeten llum de Tserènkov, com a resultat de viatjar pel gel més ràpid que la llum en el gel.
- Fins l'any 2017, les deteccions de fonts astrofísiques de neutrins eren el Sol i la supernova 1987A.

Detecció d'un neutrí precedent d'un blàzar

El 22 de setembre de 2017, l'observatori de neutrins IceCube va detectar un neutrí d'alta energia ($E_\nu \sim 290$ TeV), que arribava des d'una direcció coherent amb la ubicació del brillant blàzar de raig gamma TXS 0506+056.



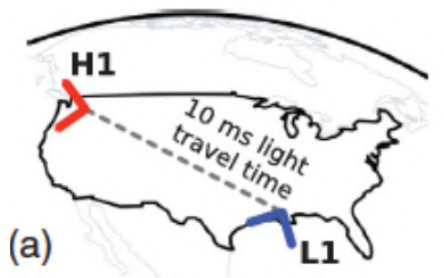
Aquesta és la primera observació d'un neutrí en coincidència espacial i temporal amb un blàzar actiu que emet raigs gamma de molt alta energia.

Noves finestres per explorar l'Univers: Ones gravitacionals

El 1916, l'any després de la formulació final de les equacions de camp de la relativitat general, Albert Einstein va predir l'existència d'ones gravitatòries (GW)

- Les ones gravitacionals es creen per **masses en moviment**, igual que les ones e-m es creen per càrregues en moviment. Aquestes ones són produïdes per sistemes molt massius que pateixen grans acceleracions, com dos forats negres en òrbita que estan a punt de fusionar-se en un de sol.
- La gravetat és la més feble de les quatre forces fonamentals → Les ones gravitacionals són **extremadament febles**.
- Una ona gravitacional forta produirà desplaçaments de l'ordre de 10^{-18} m, és a dir 1000 vegades més petit que el diàmetre d'un protó.
- Es necessiten diversos interferòmetres per **detectar** i **localitzar** amb confiança les fonts d'ones gravitacionals.

LIGO : Laser Interferometer Gravitational-waves Observatory



Una ona gravitacional interactua amb la matèria comprimint objectes en una direcció mentre els estira en direcció perpendicular. Per tant, els actuals detectors d'ones gravitacionals d'última generació tenen forma de L i mesuren les longituds relatives dels braços mitjançant interferometria.



Primera detecció d'ones gravitacionals



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

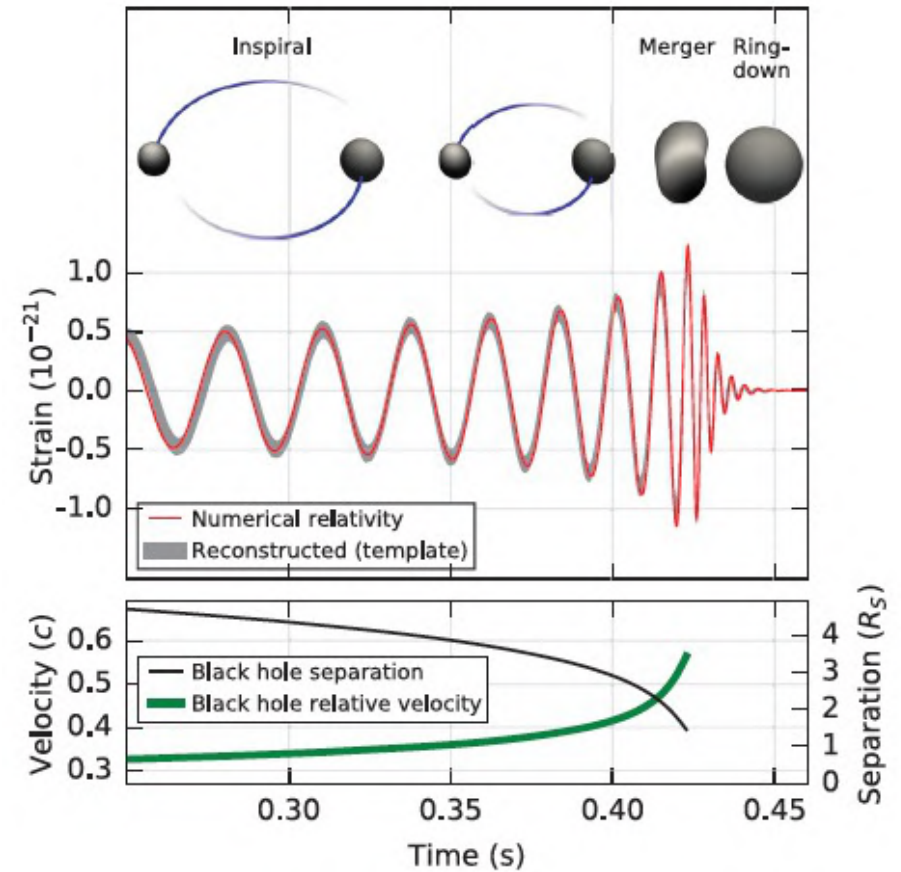
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

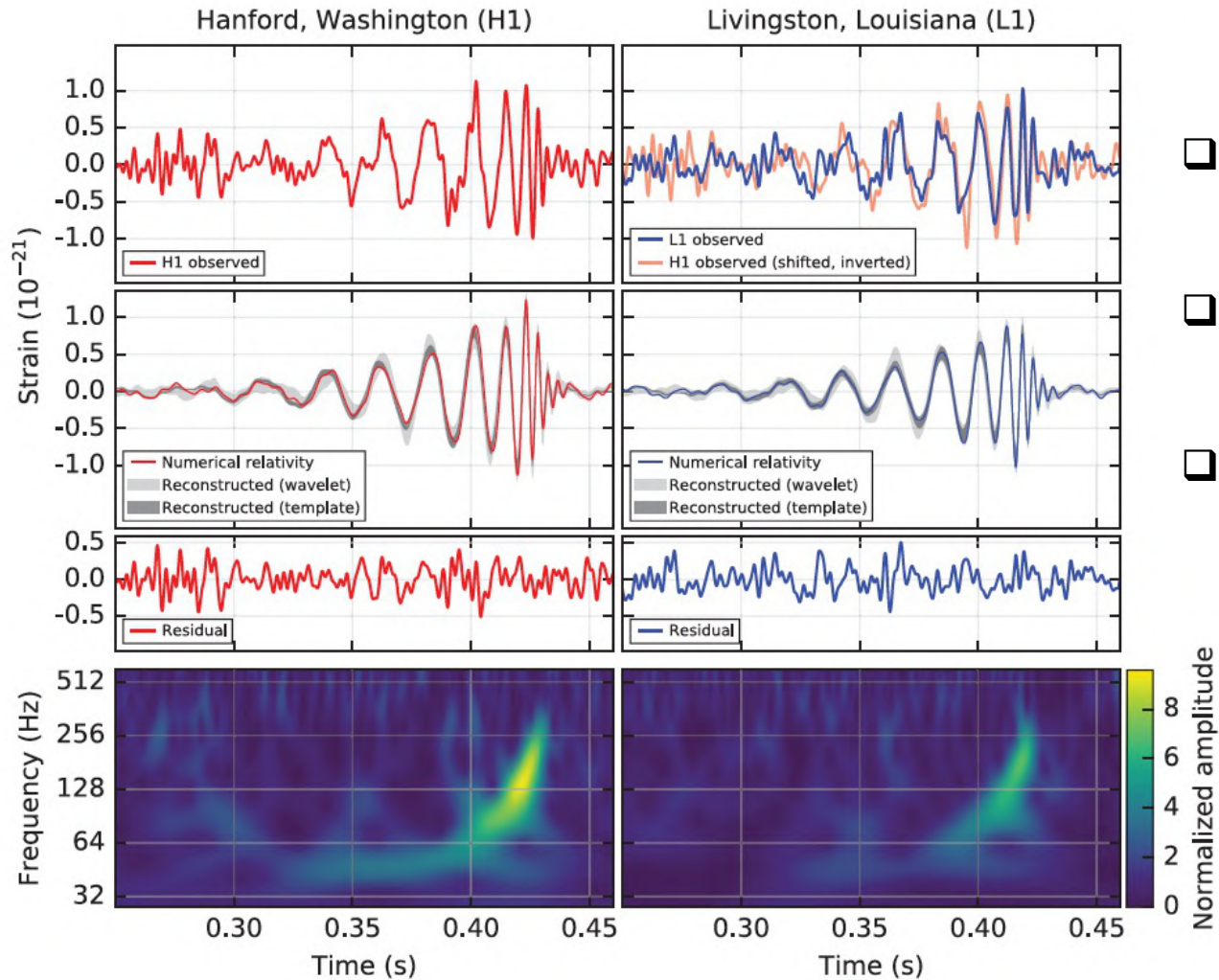
On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by $(1+z)$ [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	410^{+160}_{-180} Mpc
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



Primera detecció d'ones gravitacionals



- ❑ LIGO ha detectat ones gravitacionals de la fusió de dos forats negre de massa estel·lar.
- ❑ La forma del senyal detectat s'ajusta a les prediccions de la relativitat general.
- ❑ Aquestes observacions demostren l'existència de sistemes estel·lars binaris de forats negres.

Gràcies



Photograph by NASA

National Geographic's *Exploring Space*