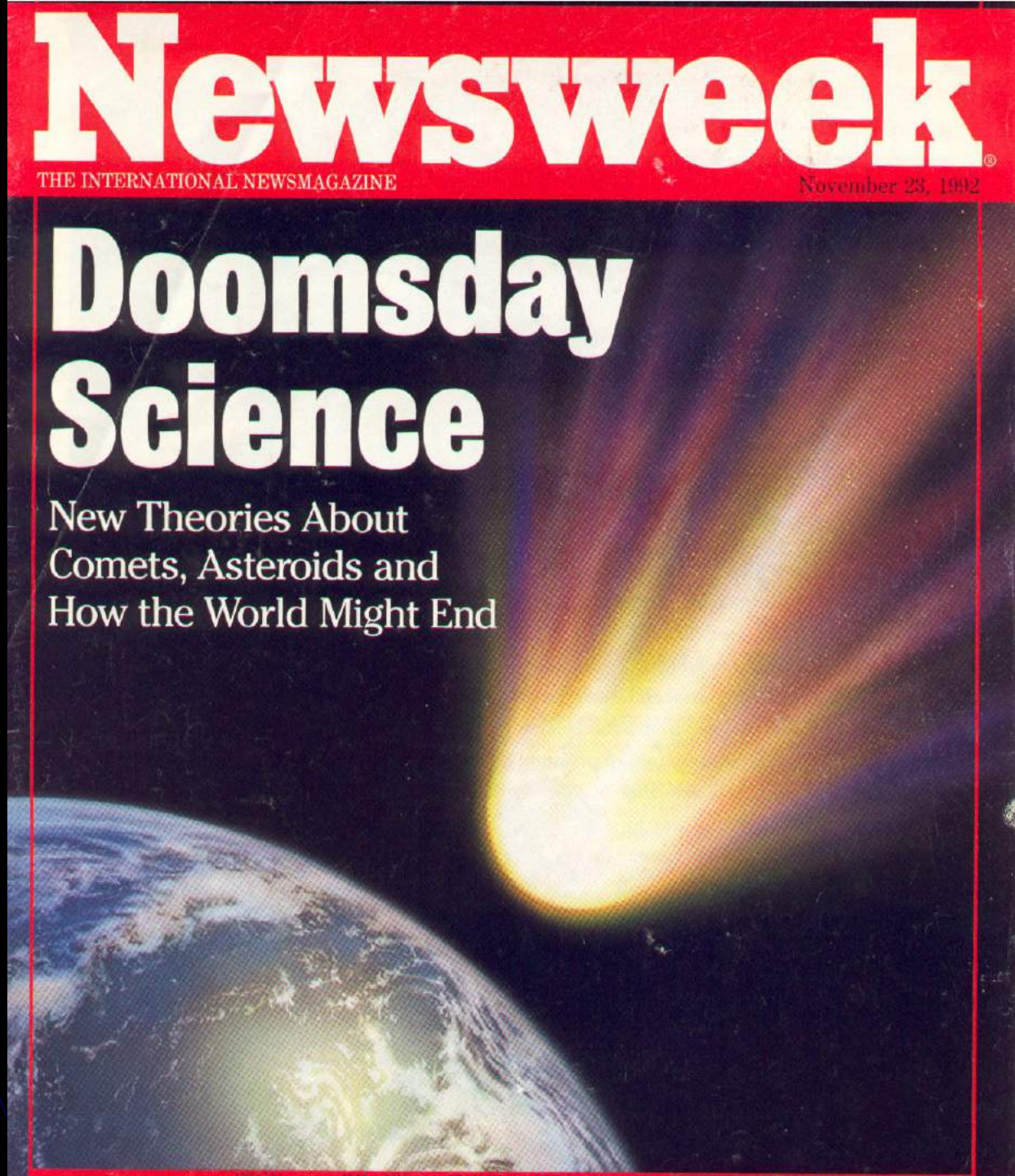
La Ciencia de las Catástrofes Naturales

Gonzalo Tancredi
Facultad de Ciencias

Día del Juicio Final

(c) Javier Sánchez

La Ciencia del *Día del Juicio Final*



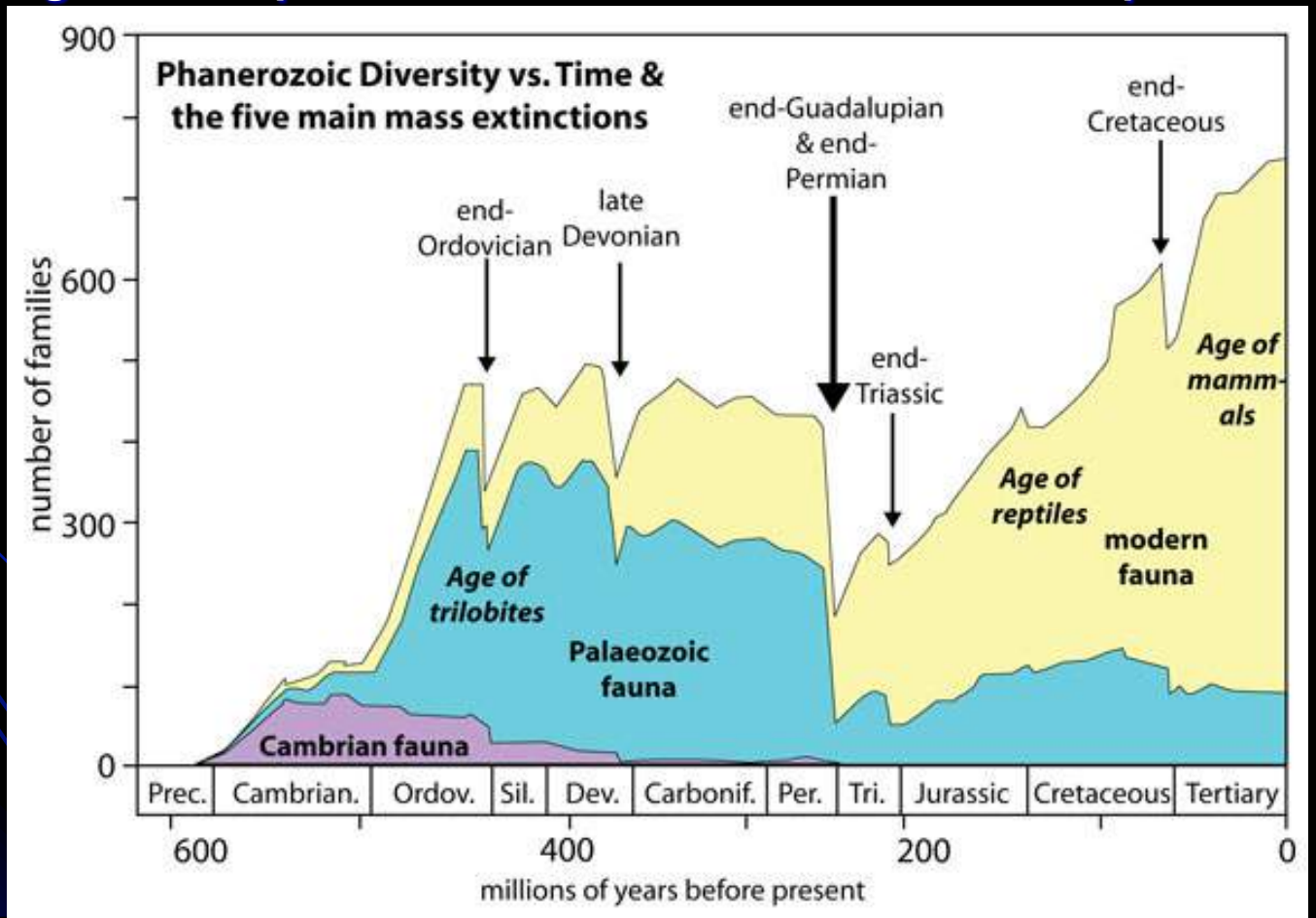
The Economist
SEPTEMBER 11TH–17TH 1993
THE NEXT 150 YEARS
The future surveyed
after page 56
GERMANY UNDER REPAIR
pages 25 and 80
ANOTHER CAR GIANT
page 57
PALESTINE AND BEYOND
pages 12, 37 and 64
The threat from space

TIME
COSMIC CRASH
A shattered comet is about to hit Jupiter, creating the biggest explosion ever witnessed in the solar system. Could it happen here on Earth? Yes ...

The Economist
Israel's annexation misjudgment
Commercial property in trouble
Why the world neglects the Uighurs
Fortnite as an Olympic sport
JUNE 27TH–JULY 3RD 2020
The next catastrophe
(and how to survive it)

Catastrofismo *versus* Gradualismo
Extinciones Masivas

Incremento sustantivo en la tasa de extinción de varias familias con una distribución geográfica amplia durante un corto intervalo de tiempo geológico

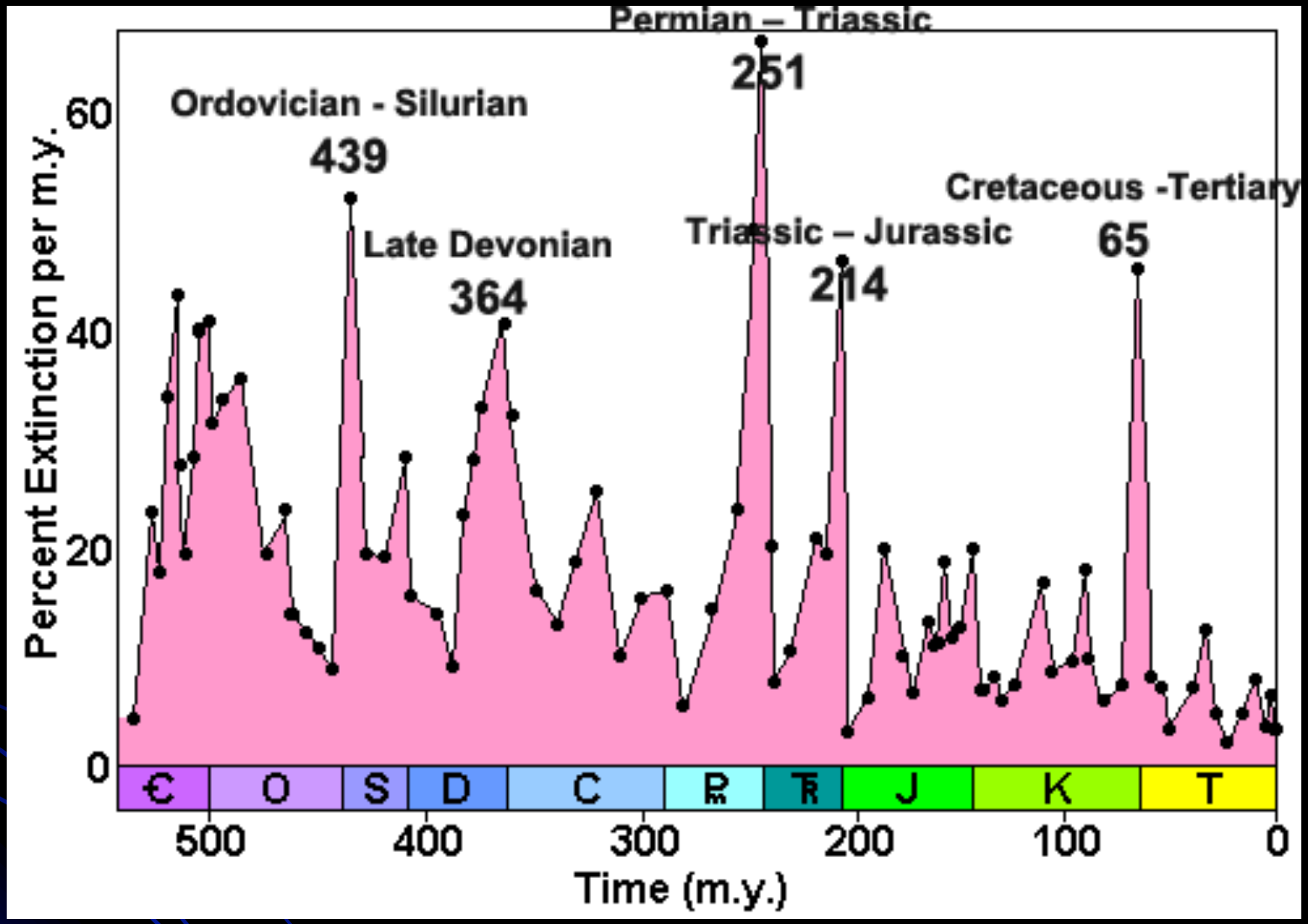


Las 5 grandes extinciones

Las grandes extinciones marinas					
Nombre	Mega-años	Familias %	Generos %	Especies %	Especies terrestres
Cretácico – Terciario	65	16	47	85	18% de vertebrados
Triásico – Jurásico	214	22	53	83	??
Pérmico – Triásico	251	53	82	95	70% of especies terrestres
Devónico tardío	364	22	57	83	Poco conocido
Ordóvico - Silúrico	439	25	60	85	No existentes

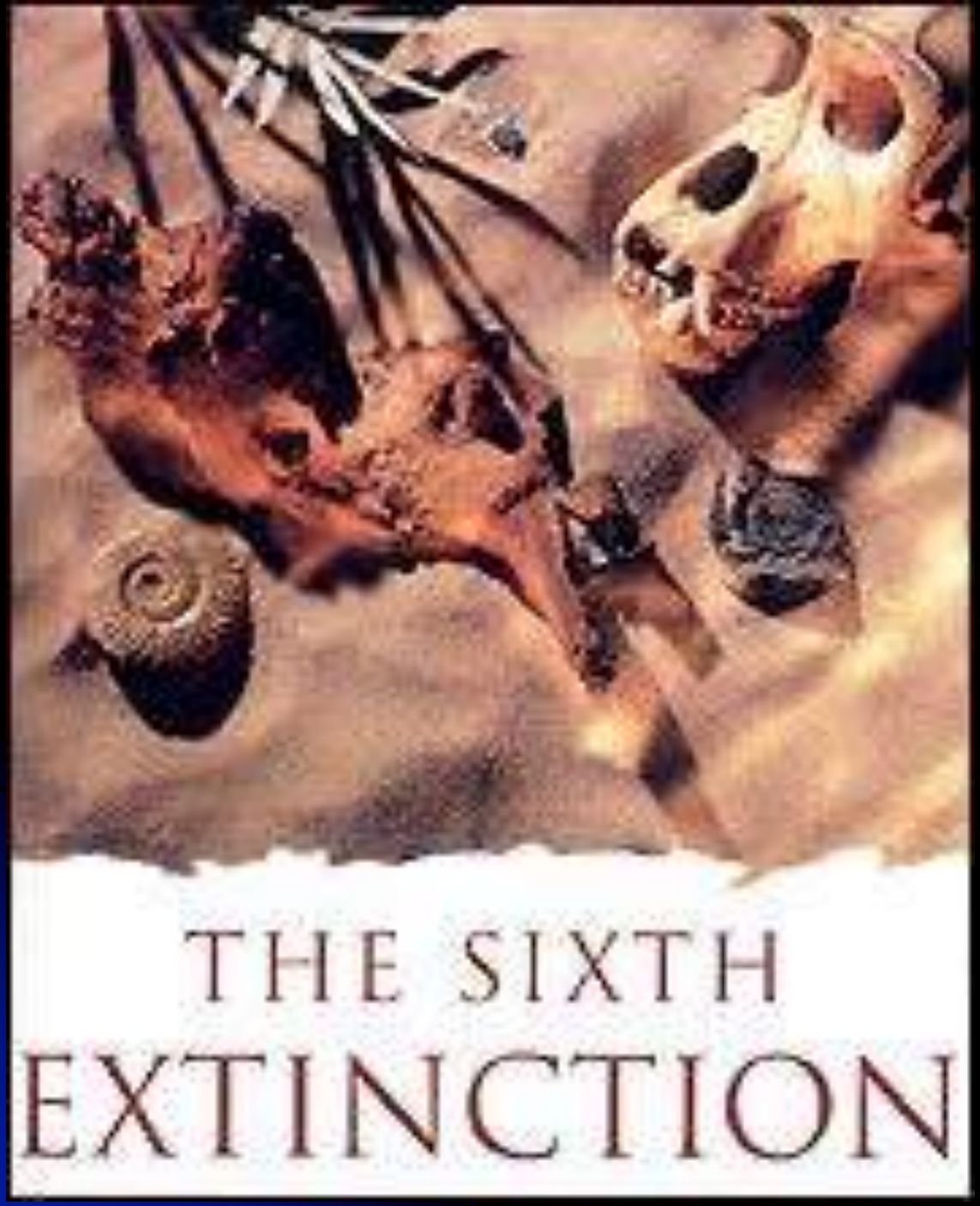
99.9 % de las especies que han habitado la Tierra están extinguidas

Las catástrofes dan oportunidades a otras especies



Tasa presente: 5 familias por siglo

5000 familias por millón de años !!!



¿La sexta extinción?

Causa:

¿El desarrollo de la Humanidad?

¿Qué ha cambiado en las predicciones sobre "el fin del mundo"?

En las últimas décadas, la ciencia nos ha permitido conocer cuáles son las amenazas reales.
Reconocemos la vulnerabilidad de la Tierra.
Y se comienza a tomar acciones para la mitigación de los efectos.

Definiciones

- Mortandad = evento que produce gran número de muertes en un corto lapso de tiempo en un determinado grupo humano.

- Las agrupamos según su origen en:
  - Fenómenos naturales de origen biológico
  - Fenómenos naturales de origen geológico
  - Fenómenos Artificiales

Mortandades naturales de origen biológico
Pandemias

Nombre	Agente	Fecha	Alcance	Número de muertes y % de población
Plaga de Justiniano	Bacteria	541–542	Europa	25–50 millones; >50% Europa
Peste negra	Bacteria	1346–1353	Europa, Asia y África norte	>50 millones; >30% Europa
Viruela	Virus	1520-1600	América	12-15 millones; >50 % América
Gripe española	Virus	1918–1920	Mundial	20-50 millones; 1-3% mundial
HIV/AIDS	Virus	1981–presente	Mundial	>30 millones; ~0.5% mundial

Grandes epidemias de la historia

Número de muertes causadas

Peste antonina (*165-180*):
Contraída por soldados romanos en Oriente Próximo, llegó a matar 5.000 personas al día en Roma
5M

Viruela japonesa (*735-737*):
Un tercio del total de la población japonesa falleció a causa de esta enfermedad
1M

Cocoliztli 2 (*1545-1548*):
Los exploradores y colonos españoles llevaron esta variante de la salmonela a México, donde acabó con cerca de la mitad de la población nativa
12-15M

Plaga italiana (*1629-1631*) 1M

Gripe española (*1918-1920*):
Su origen más probable es EE.UU. En España, país neutral en la I Guerra Mundial, no fue censurada, por lo que se creyó que solo afectaba a este país
20-50M

Tercera pandemia de peste (*1894-1903*) 10M

Tuberculosis (*2012*) 1,2M

Gripe de Hong Kong (*1968-1969*) 1M

Cólera 7 (*1961-act.*) 570.000

MERS (*2012-act.*) 858

Cólera 6 (*1899-1923*) 1,5M

Gripe A (*2009*) 284.000

0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400 1500 1600 1700 1800 1900 2020

Ébola (*2014-2016*) 11.323

SARS (*2002-2003*) 774

Cinco primeras pandemias de cólera (*1817-1896*) 2,8M

Gripe asiática (*1957-1958*) 2M

Gripe rusa (*1889-1890*) 1M

Plaga de Justiniano (*541-542*):
Transmitida por ratas llegadas en barco de China e India, provocó un profundo debilitamiento del Imperio bizantino
25-50M

Cocoliztli 1 (*1519-1520*) 5-8M

Cocoliztli 3 (*1576-1578*) 2-2,5M

Peste negra (*1346-1353*):
La segunda gran pandemia fue llevada a Europa por barcos genoveses provenientes de Crimea. Acabó con alrededor del 30% de la población europea
25-50M

Sida/VIH (*1981-act.*) 32M

Peste persa (*1772-1773*) 2M

Cartografía:
Álvaro Merino (2020)
Fuente:
OMS (2019); National Geographic (2014); *Epidemics and pandemics*, J. N. Hays (2014); Emerging Infectious Deseases (2002);Marseille City of Culture (2020); *History of the human plague in Iran*, F. Azizi (2010); Encyclopedia Britannica (2020)

elordenmundial.com

Mortandades naturales de origen geológico

Terremotos

Los más intensos

Nombre	Fecha	Escala Ritcher
Valdivia, Chile	Mayo 22, 1960	9.4–9.6
Prince William Sound, Alaska, USA	Marzo 27, 1964	9.2
Océano Índico, Sumatra, Indonesia	Diciembre 26, 2004	9.1–9.3

Los más letales

Nombre	Fecha	Escala Ritcher	Muertes (miles)
Shaanxi, China	Enero 23, 1556	8.0	820–830
Océano Índico, Sumatra, Indonesia	Diciembre 26, 2004	9.1–9.3	230
Haiti	Enero 12, 2010	7.0	100–316

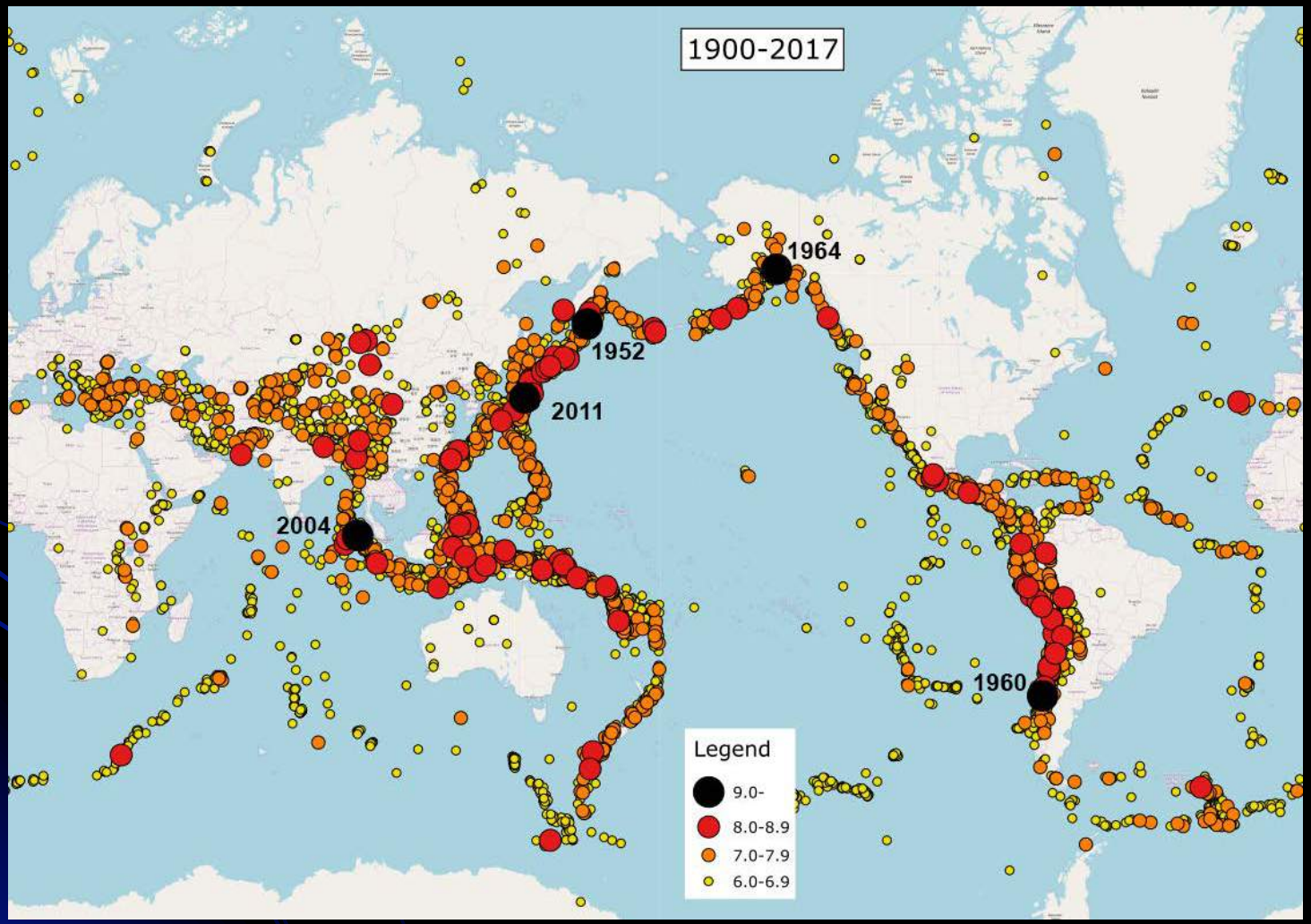
Los más dañinos

Nombre	Fecha	Escala Ritcher	Costo
Tōhoku, Japón	Marzo 11 2011	9.0	$249 mil millones
Hanshin Japón	Enero 17, 1995	6.9	$312 mil millones

El más inoportuno

Nombre	Fecha	Escala Ritcher
Océano Atlántico, Lisboa, Portugal	Noviembre 1, 1755 (Día de Todos los Santos)	8.5–9.0

Mayores terremotos desde 1900



Mortandades naturales de origen geológico

Volcanes

Los mas destacados de la Historia

Lugar	Año	VEI	Impacto
Mt. Tambora, Isla Sumbawa, Indonesia	Abril 1815	7	4600 muertes Año sin verano
Mount Pinatubo, Filipinas	Junio 1991	6	>100mil afectados Descenso de T~0.5-1C
Krakatoa, Indonesia	Agosto 1883	6	36mil muertes Descenso de T~1.2C
Huaynaputina, Perú	Febrero 1600	6	1500 muertes Invierno muy frío
Vesubio	Agosto 79	5	Destruyó Pompeya y Herculano

VEI – Volcanic Explosivity Index (1-8)

Mortandades de origen artificial
Guerras

Guera	Número muertes (millones)	Año	Lugar
Segunda Guerra Mundial	40 – 85	1939–1945	Mundial
Conquista de Mongolia	40 – 70	1206–1324	Eurasia
Rebelión Taiping	20 – 100	1850–1864	China
Primera Guerra Mundial	20	1914–1918	Mundial
Total en China	135 – 250	Historia escrita	China
Total todas guerras	300 – 750	Historia escrita	

Conclusiones

- Dentro de los fenómenos naturales, las pandemias han sido la causa de las principales mortandades humanas, tanto las pandemias de origen bacterial como virósicas.
- Los fenómenos geológicos han causado bajas mortandades y localizadas. Pero hay registros de eventos geológicos mas extremos en el último millón de años.
- Las guerras han producido las mayores mortandades durante la historia escrita.
- El potencial bélico presente tiene capacidad de aniquilar a la Humanidad.

¿Cuál y cuándo es la próxima catástrofe?

Las amenazas astronómicas para la vida en la Tierra

La ciencia del Fin del Mundo
El libro por completar….

- Amenazas terrestres
  - MegaTsunamis
  - MegaTerremotos
  - MegaErupciones volcánicas e Inundaciones de basaltos
  - Inundación universal
  - Tierra helada. Snowball Earth
  - El efecto Invernadero no antrópico: un Venus caliente o un Marte frío
  - Variación del campo magnético terrestre
  - Mareas y la rotación del Sistema Tierra-Luna
- Amenazas planetarias
  - Impactos de cometas y asteroides
  - Compañero desconocido del Sol – Nemesis
  - Planetas extraviados
  - Actividad Solar
  - La evolución del Sol
- Amenazas galácticas
  - Pasaje de Estrellas cercanas
  - Heliosfera y la Burbuja Local
  - Pasaje del Sol por el plano de la Galaxia
  - Pasaje por los brazos espirales
  - Rayos cósmicos y gamma en los pasajes fuera del plano galactico
  - Supernova cercanas
  - Ráfagas de rayos Gamma
  - Hipernovas
  - Agujeros negros a la deriva
  - El agujero negro galáctico
- Amenazas extragalácticas
  - Colisión de la Vía Láctea y Andrómeda
  - Supercúmulo de Virgo
- Amenazas universales
  - La geometría del Universo
  - Big crunch
  - El aislamiento
  - Big Rip
  - Inestabilidad del Vacío

¿Cúando es el Fin del Mundo?

AVISO: No voy a dar una fecha.
Solo un rango de tiempo.

Tipos de amenazas

Las amenazas las podemos clasificar en dos grandes tipos:

- **Amenazas Aleatorias**: son aquellas asociadas a un evento que tiene una cierta probabilidad de ocurrencia en una escala de tiempo

  Ej.: el impacto de un asteroide o cometa, la llegada de una eyección de masas coronales provenientes del Sol, el pasaje cercano de una estrella, o la explosión de una supernova.
- **Amenazas Deterministas**: son aquellas que seguramente vayan a ocurrir en un rango de tiempo en el futuro.

  Ej.: la evolución del Sol como gigante roja, la colisión de la Vía Láctea y Andrómeda, o el destino final del Universo.

- Las amenazas deterministas ocurrirán si o si; generalmente tenemos una estimación del tiempo a futuro en que el evento ocurrirá.
- Para las amenazas aleatorias sabemos que el evento ocurre con cierta frecuencia, pero no podemos precisar cuando.

“Cuasi-Certezas”

Consideremos un evento con una frecuencia de ocurrencia promedio de 1 evento cada X nro. de años (X = período del evento).

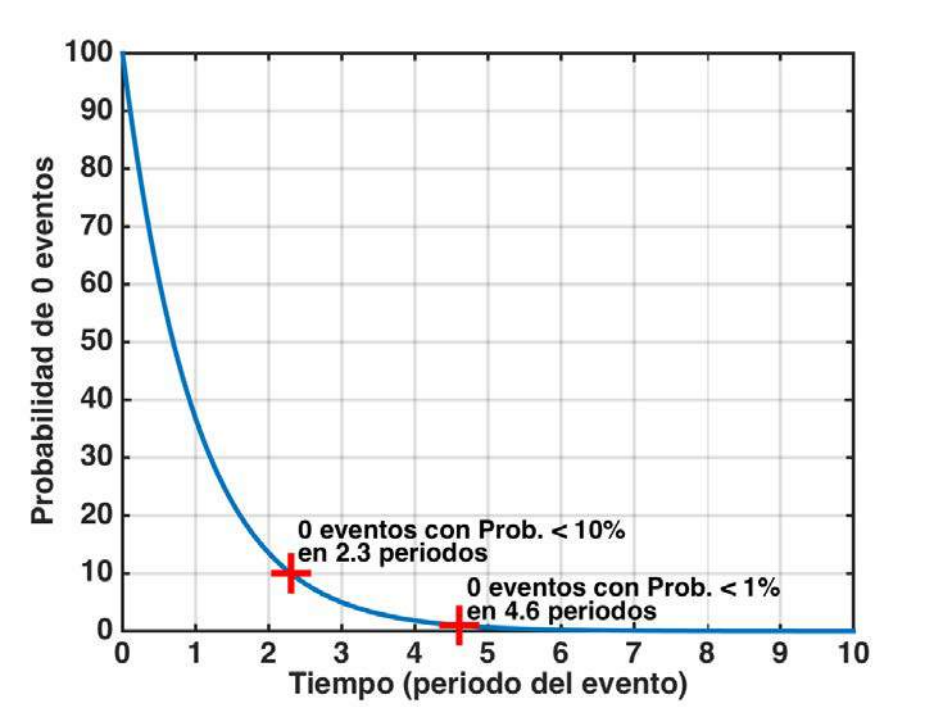
La ocurrencia de los eventos es un proceso de Poisson.

La probabilidad de 0 eventos en un tiempo T es

$$P(0,T) = e^{-\lambda T} \qquad \text{donde } \lambda = 1/X$$

Consideramos como **“Certeza de ocurrencia”** del evento, cuando tiene una muy alta probabilidad de ocurrencia en una cierta escala de tiempo.

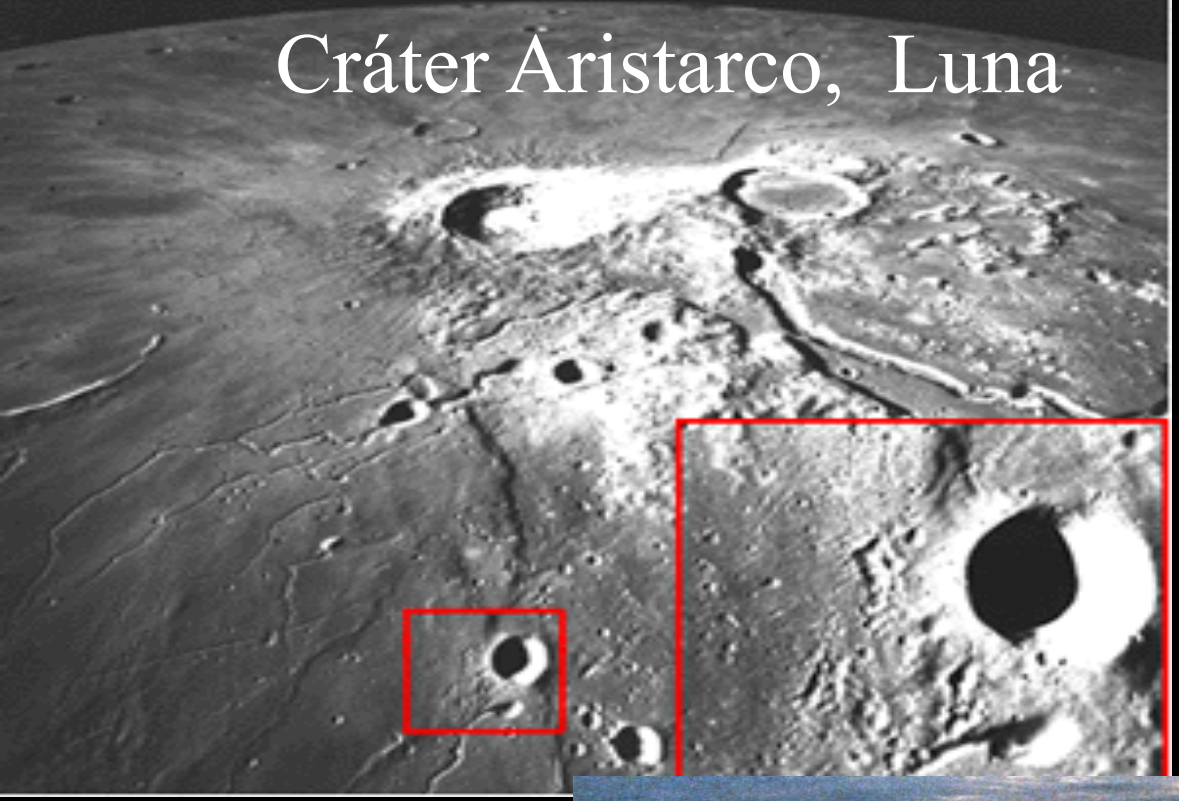
Por ejemplo, si asumimos el valor de 90% de probabilidad, diremos que en un tiempo equivalente a 2.3 periodos típicos del evento hay una cuasi-certeza de que el fenómeno ocurrirá.



AMENAZAS PLANETARIAS

Impactos de cometas y asteroides

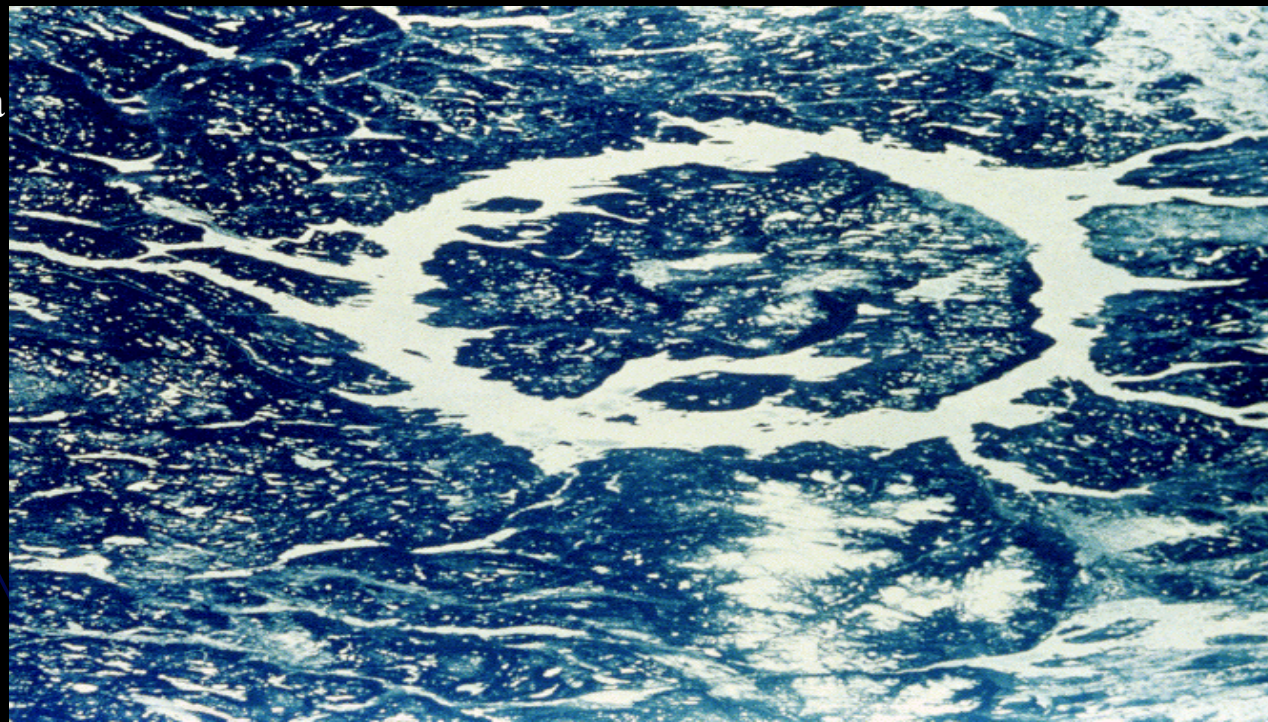
The End of the World (Coronet, July 1947)
Chesley Bonestell

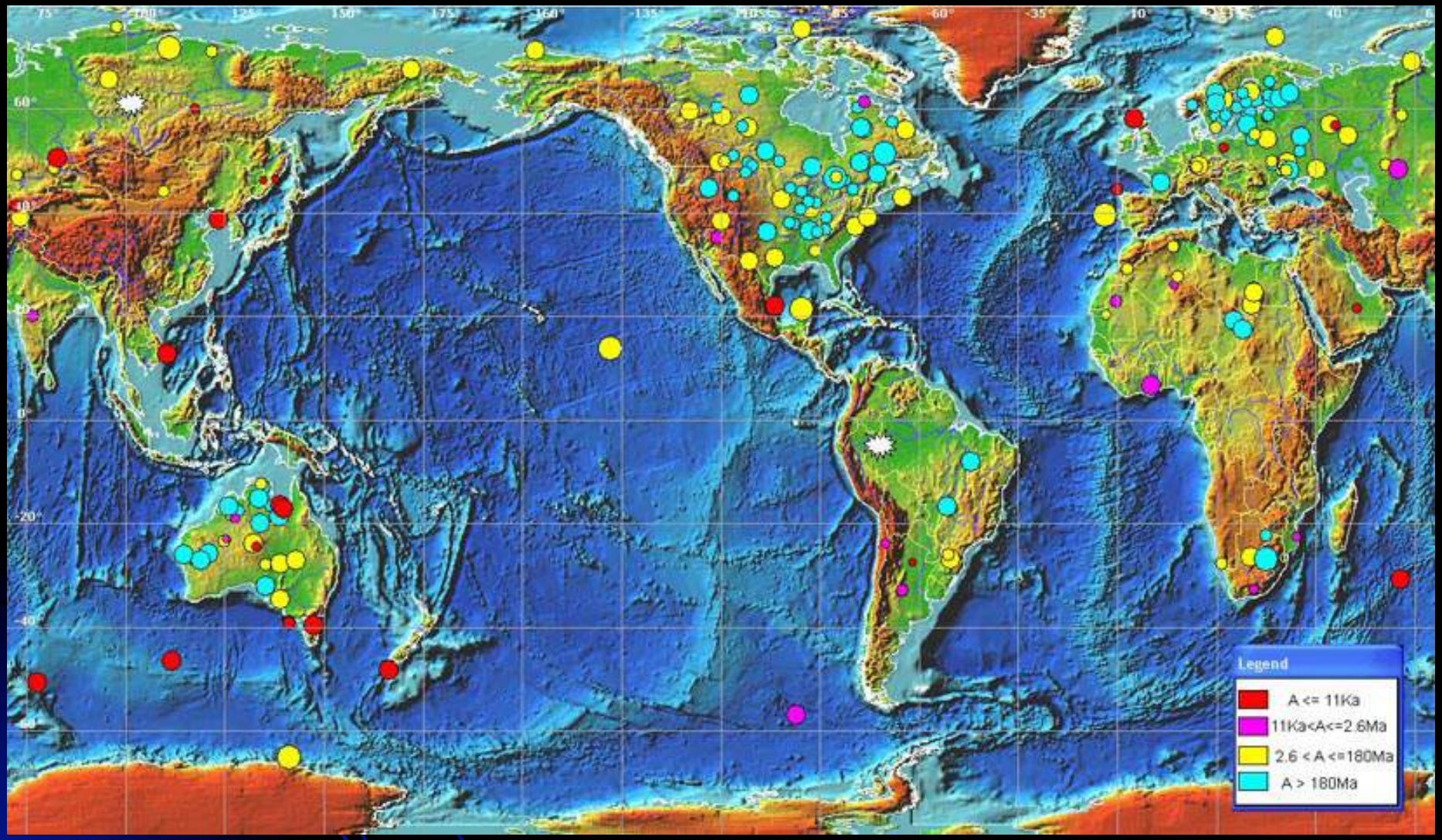


Cráter Meteórico Barringer, Arizona
1.2 km, 49.000 año

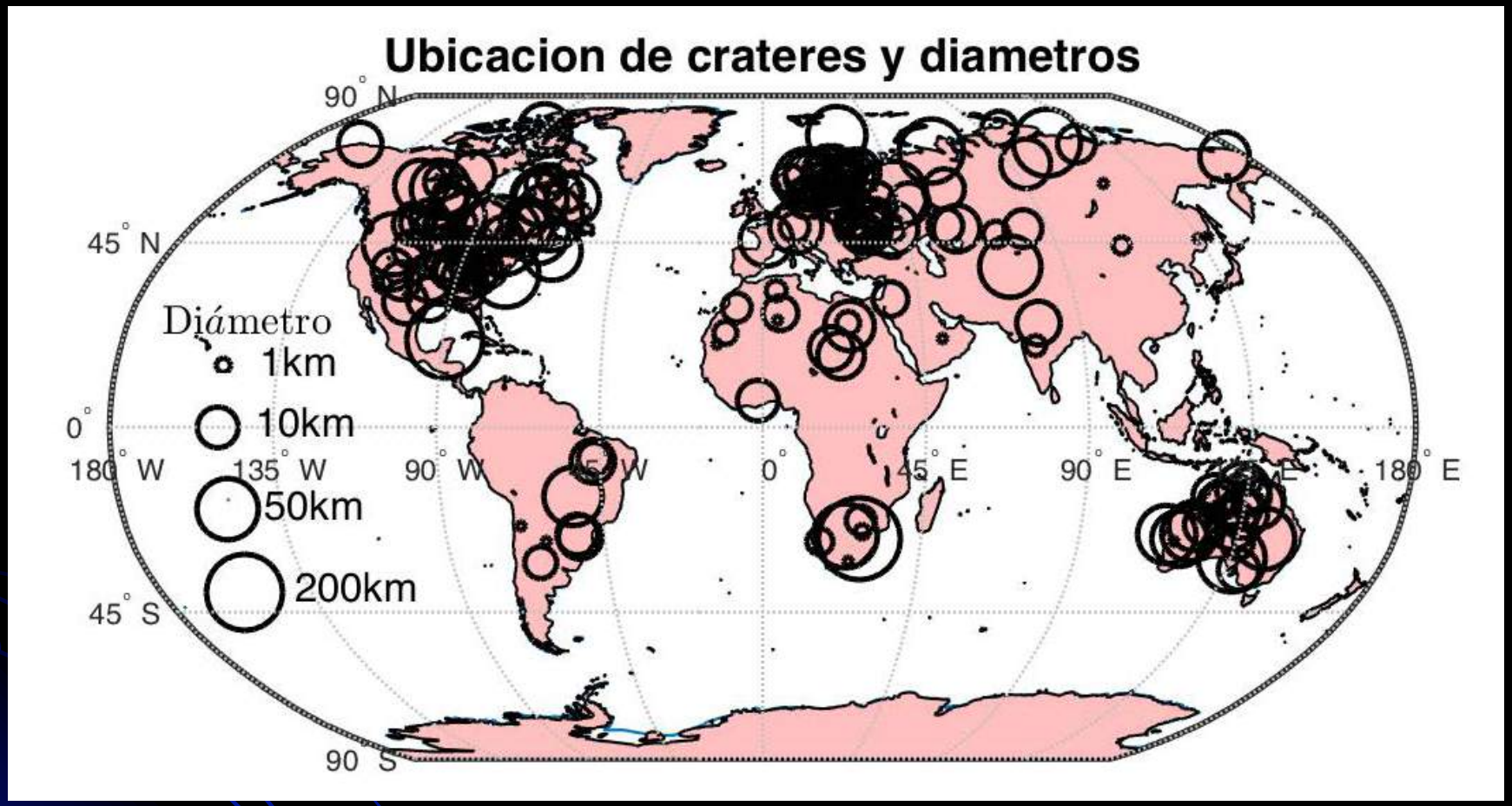
Cráter Manicouagan, Canada
100 km, 212 Maño

Crater Doble Clearwater, Canada
32 y 22kkm, 290 Maño





Mapa de las estructuras de impacto confirmadas en la superficie de la Tierra (180) y en el fondo oceánico (24).

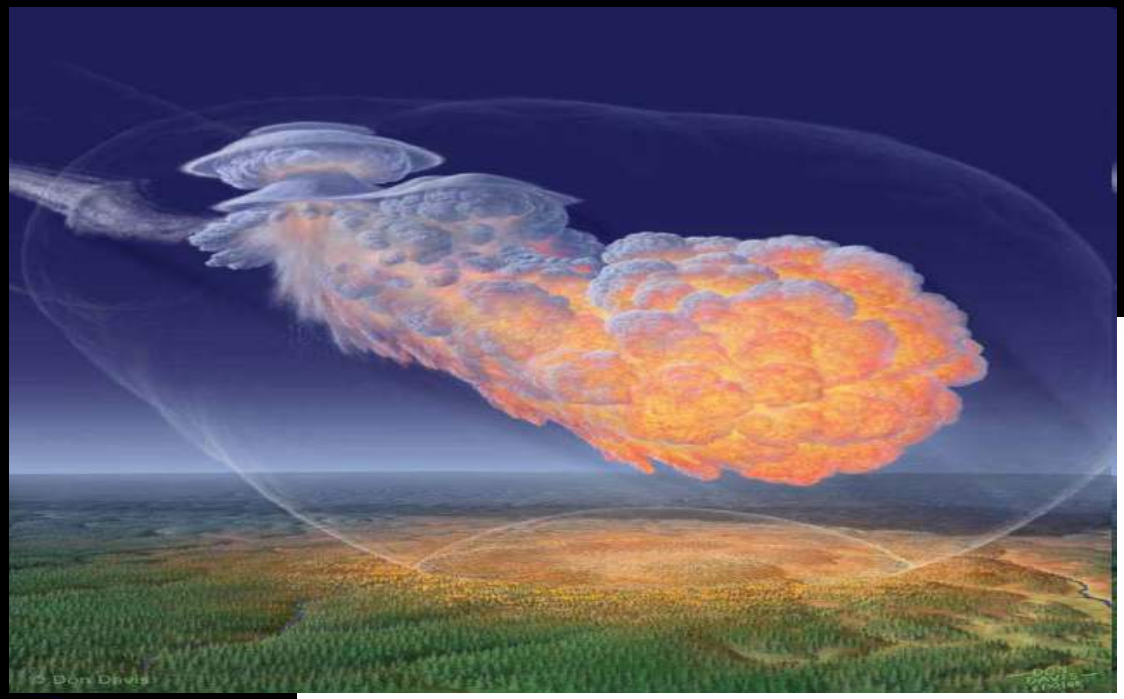


Mapa de la ubicación de cráteres confirmados y más probables de la Tierra. Ubicación y tamaños de los cráteres tomados de *The Earth Impact Database* (http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/).

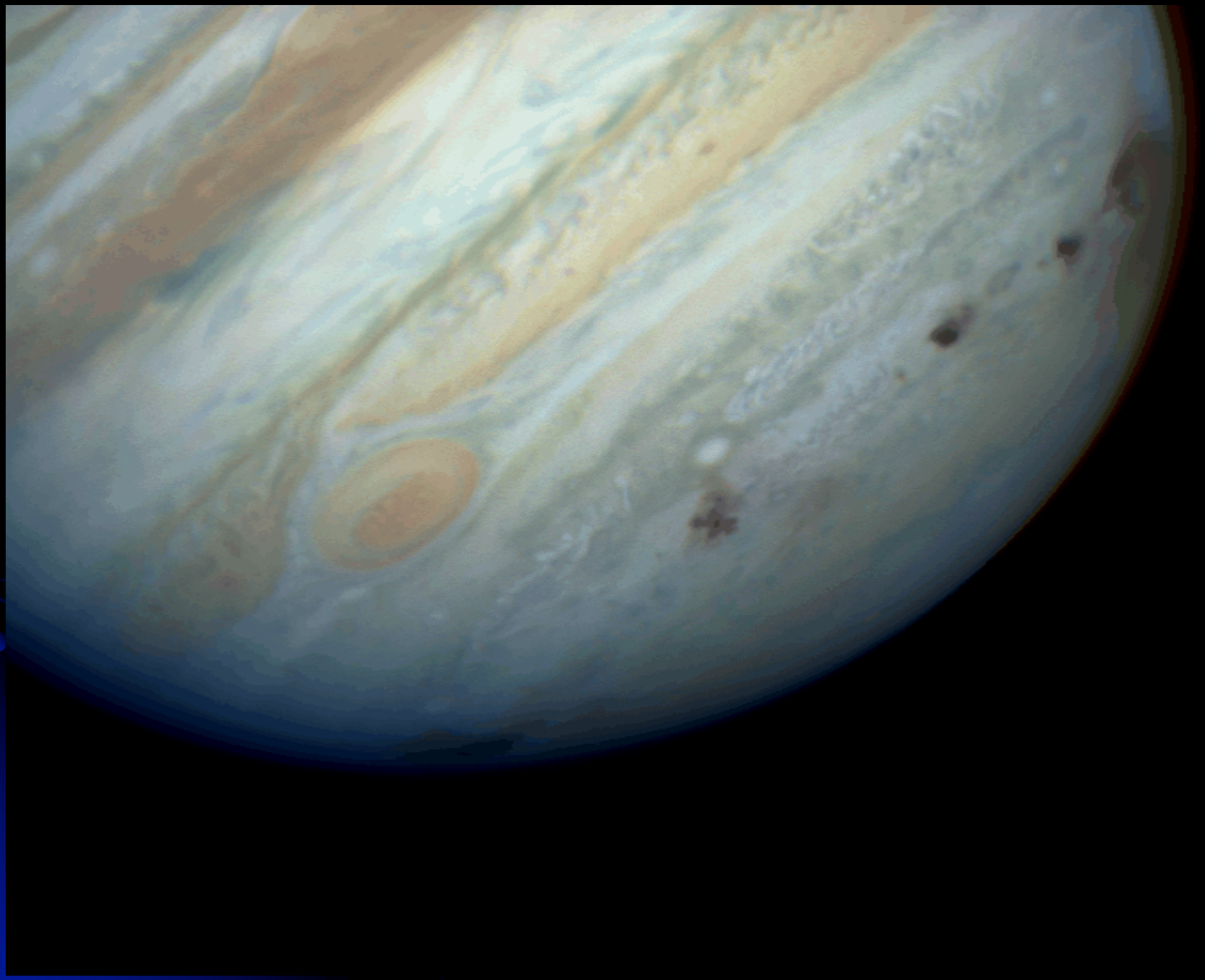
Tunguska, 1908

Devastación de la floresta

¿Que pasó en Tunguska en 1908?



Comet P/Shoemaker-Levy 9 (1993e) • May 1994
A B C D E F G H K L N P Q R S U V W

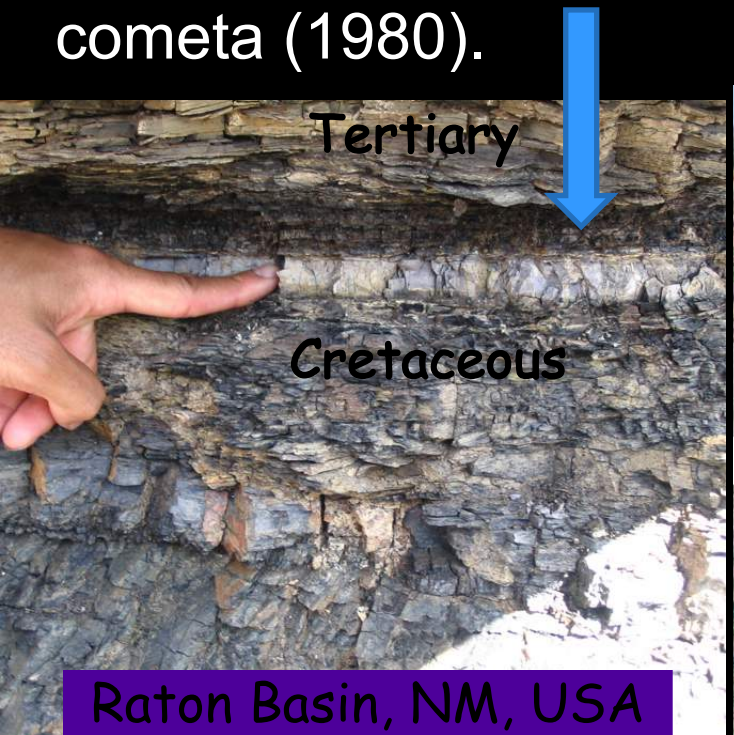


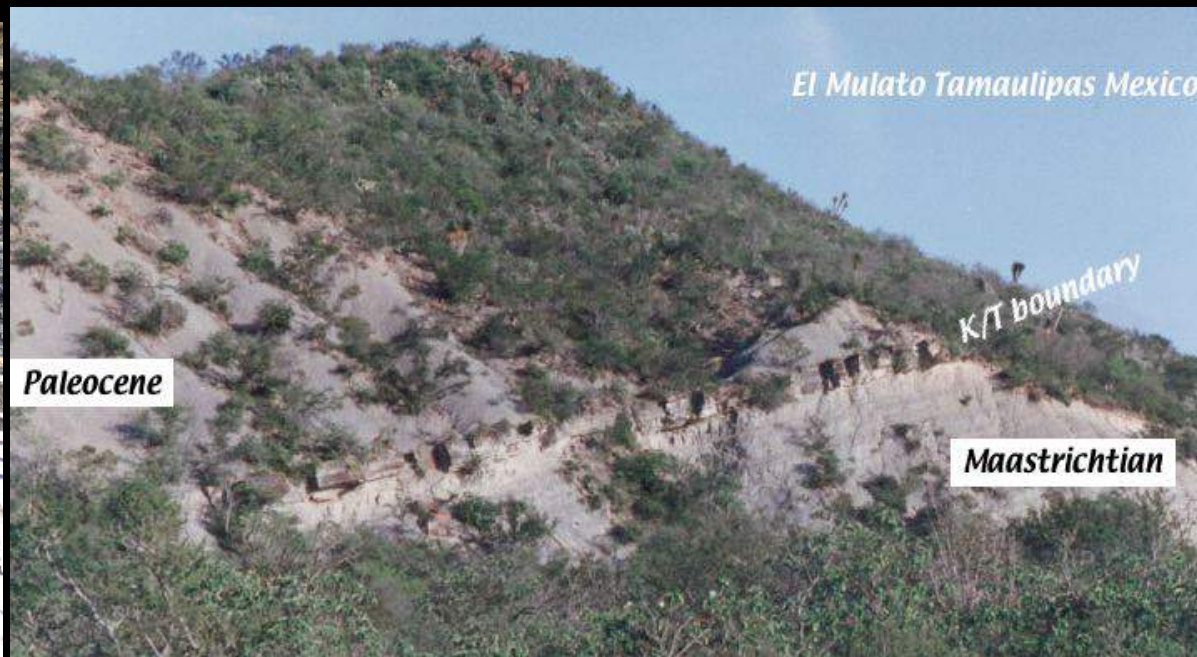
La extinción de los dinosaurios

El límite Cretácico/Terciario (K/T)

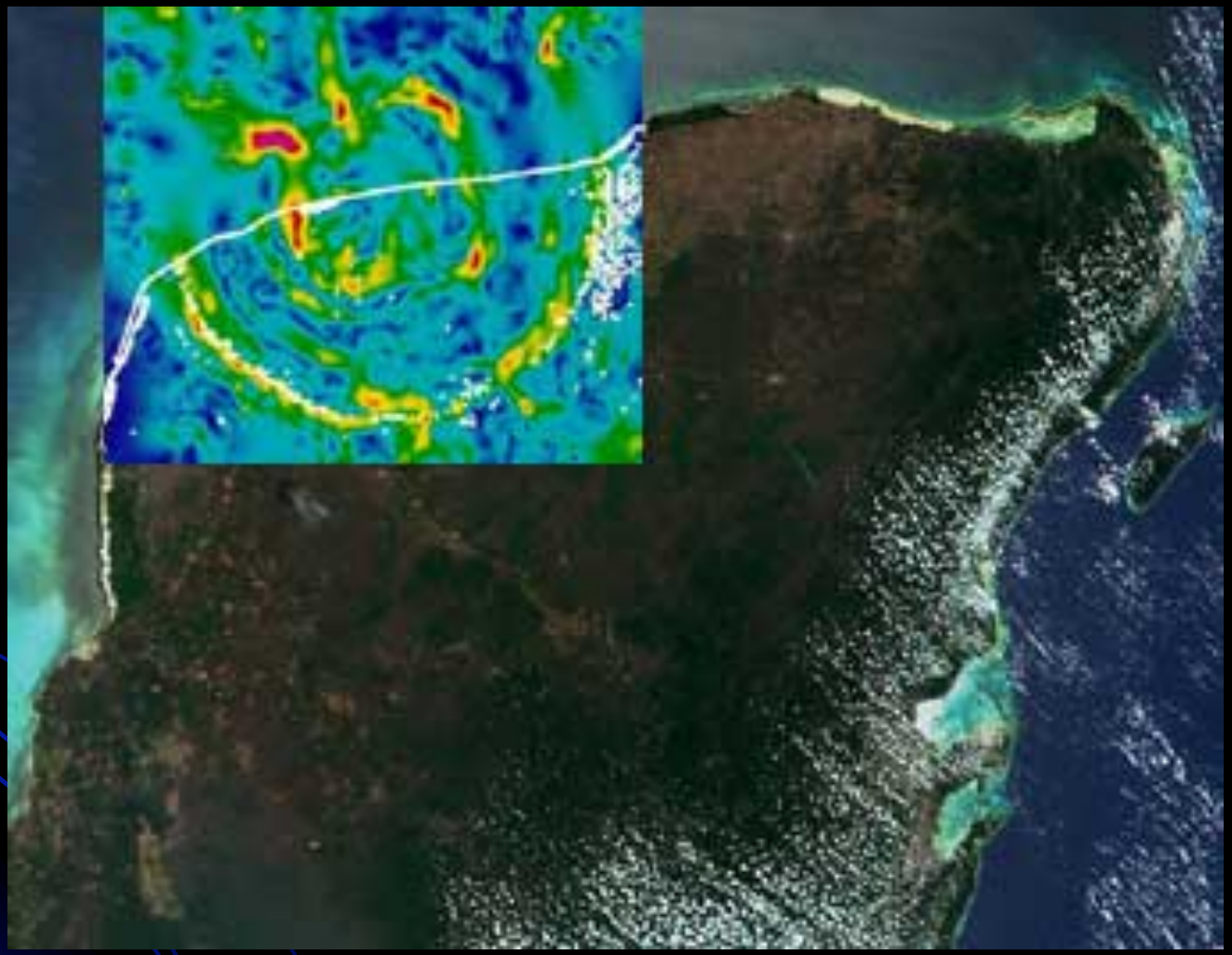
Divide la “Era de los Dinosaurios"
de la “Era de los Mamíferos“

Concentración anómala de Iridio, proveniente de un asteroide o cometa (1980).

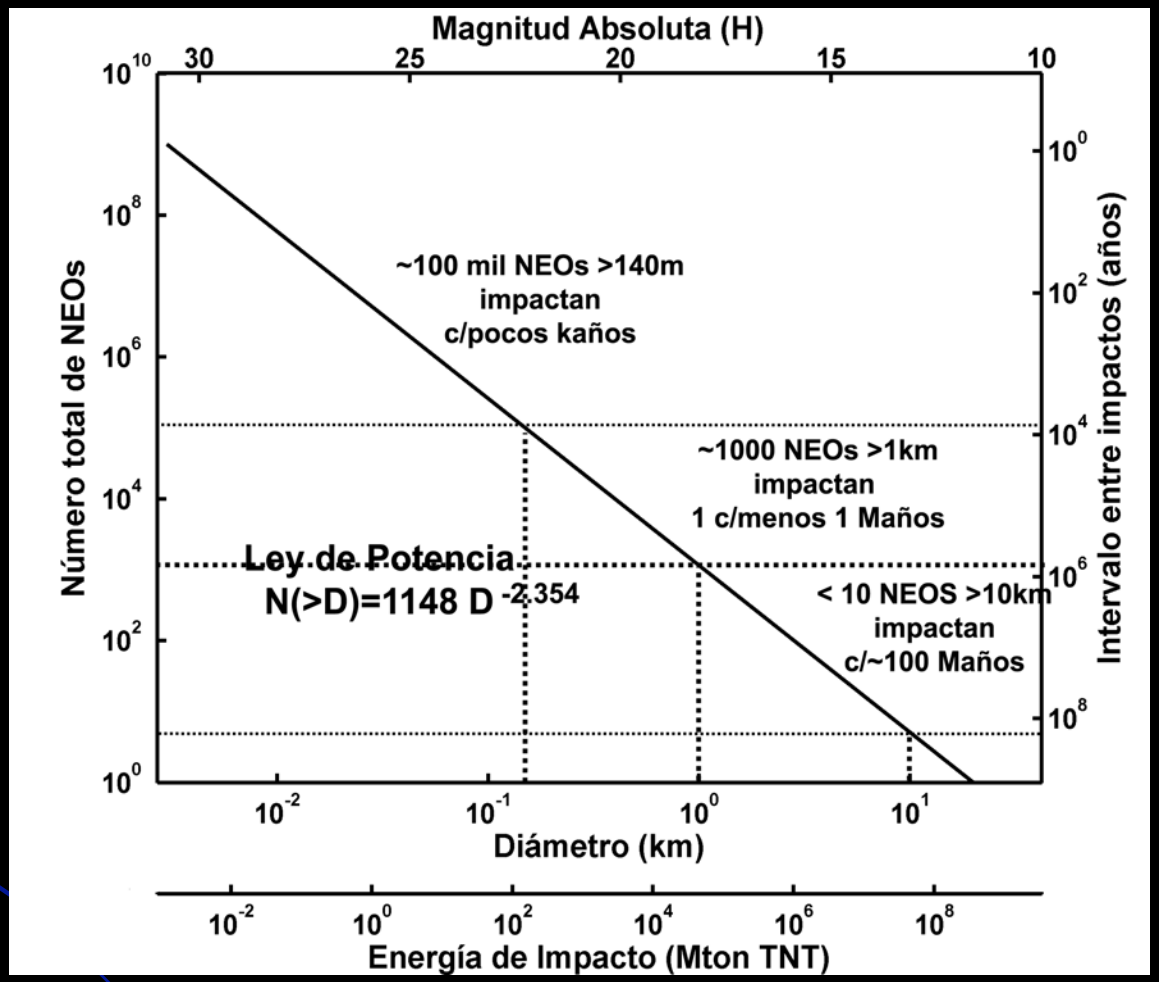




Cráter de Chicxulub

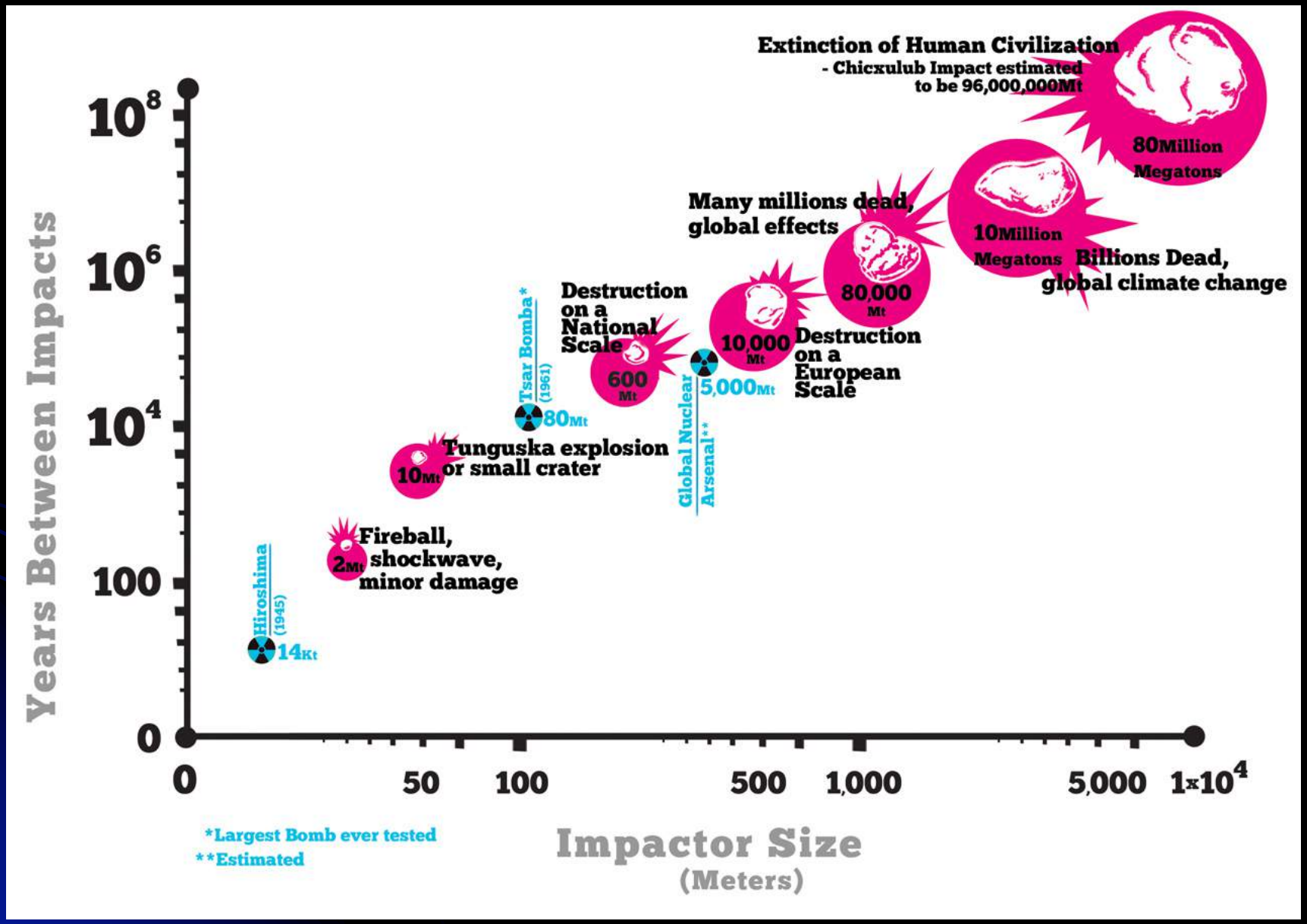


Cráter de 180 kilómetros de diámetro, formado hace 65 Maños, causante de la extinción de los dinosaurios



Distribución cumulativa de NEAs en función de diversos parámetros como: magnitud absoluta, tamaño o energía de impacto. Se considera una ley potencial como buen ajuste a los datos observados (NASA's NEO Report, 2007). También se muestra la frecuencia de impacto y la comparación con alguno de los eventos de impacto.

Tasa de impactos contra la Tierra



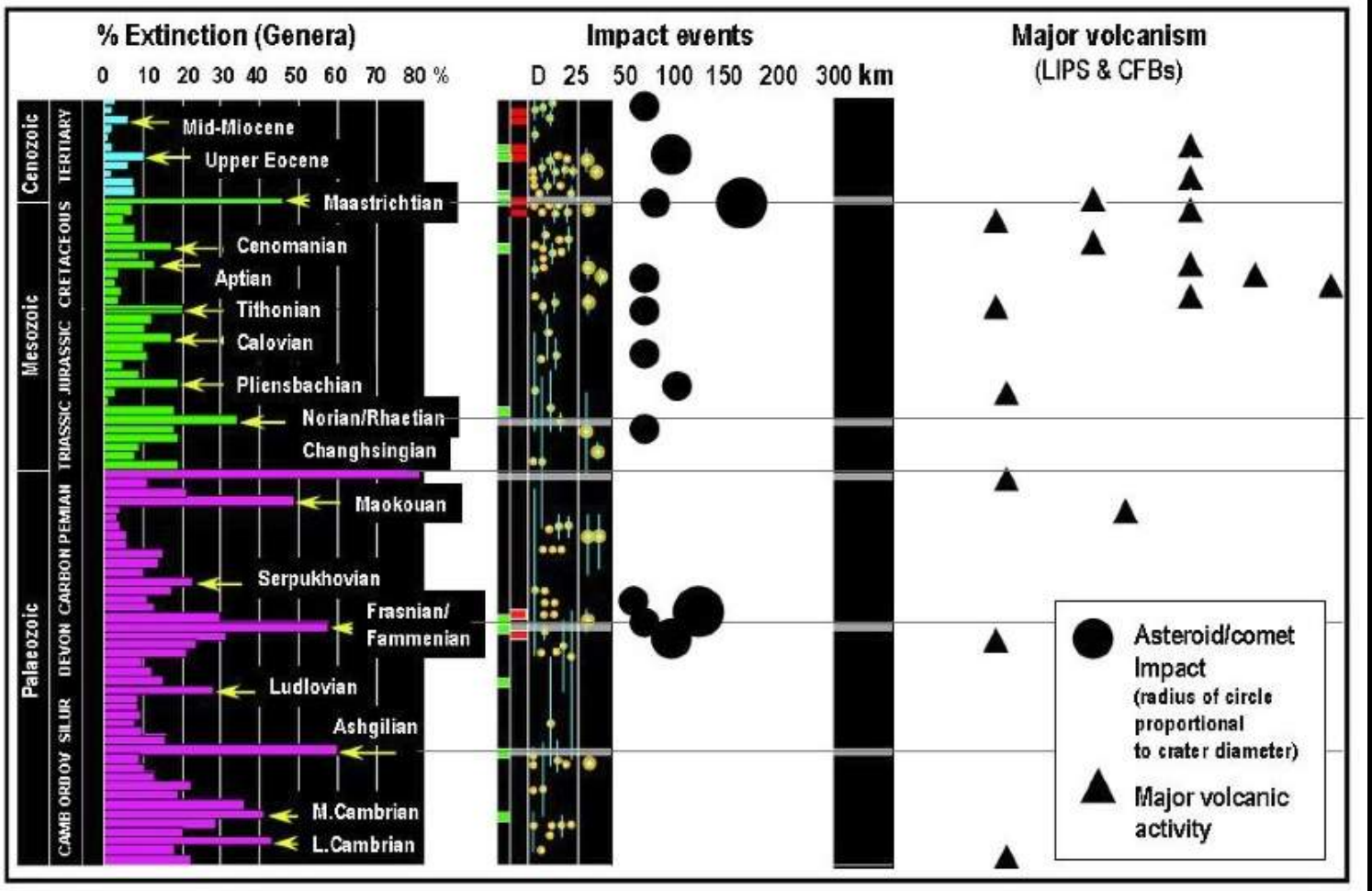
Riesgos Comparativos para USA y Canada

RIESGO ANUAL PROMEDIO DE MUERTE EN PARTES POR MILLON

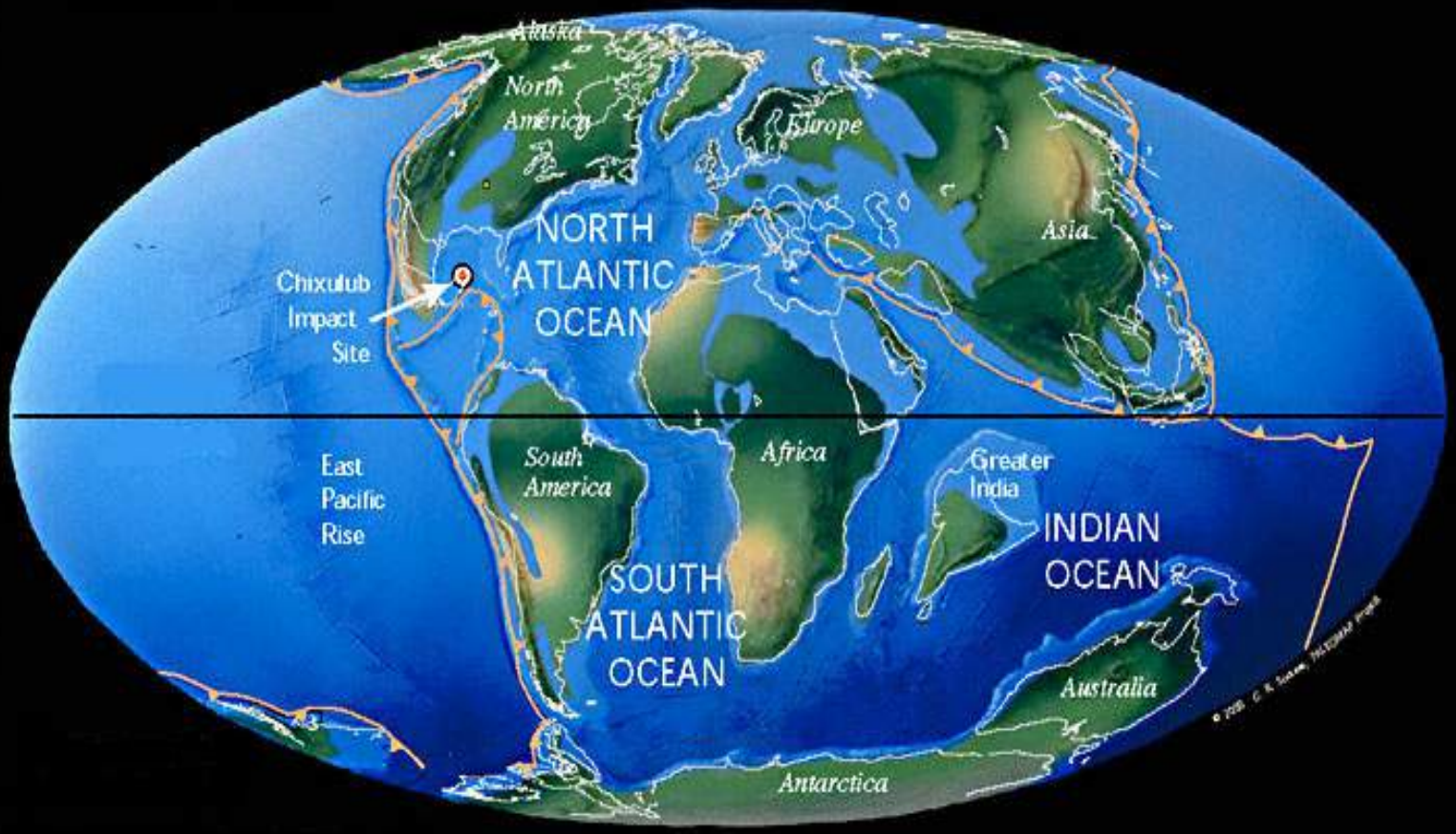
300	Accidentes (no automotores)
200	Homicidios y suicidios
160	Accidentes automotores
10	Incendio
5	Electrocutarse
1	Accidents de aviones
0.5	**IMPACTOS DE ESCALA MUNDIAL**
0.3	Tormentas e inundaciones (en descenso)
0.1	**IMPACTOS LOCALES / REGIONALES**
0.1	Terremotos
0.01	**IMPACTOS TIPO TUNGUSKA**
<0.01	Accidentes nucleares (objetivo de diseño)

La extinción de los dinosaurios

"Today's asteroid encounter was a near miss, but some scientists warn that an actual impact could have serious long-term effects on life on Earth as we now know it."



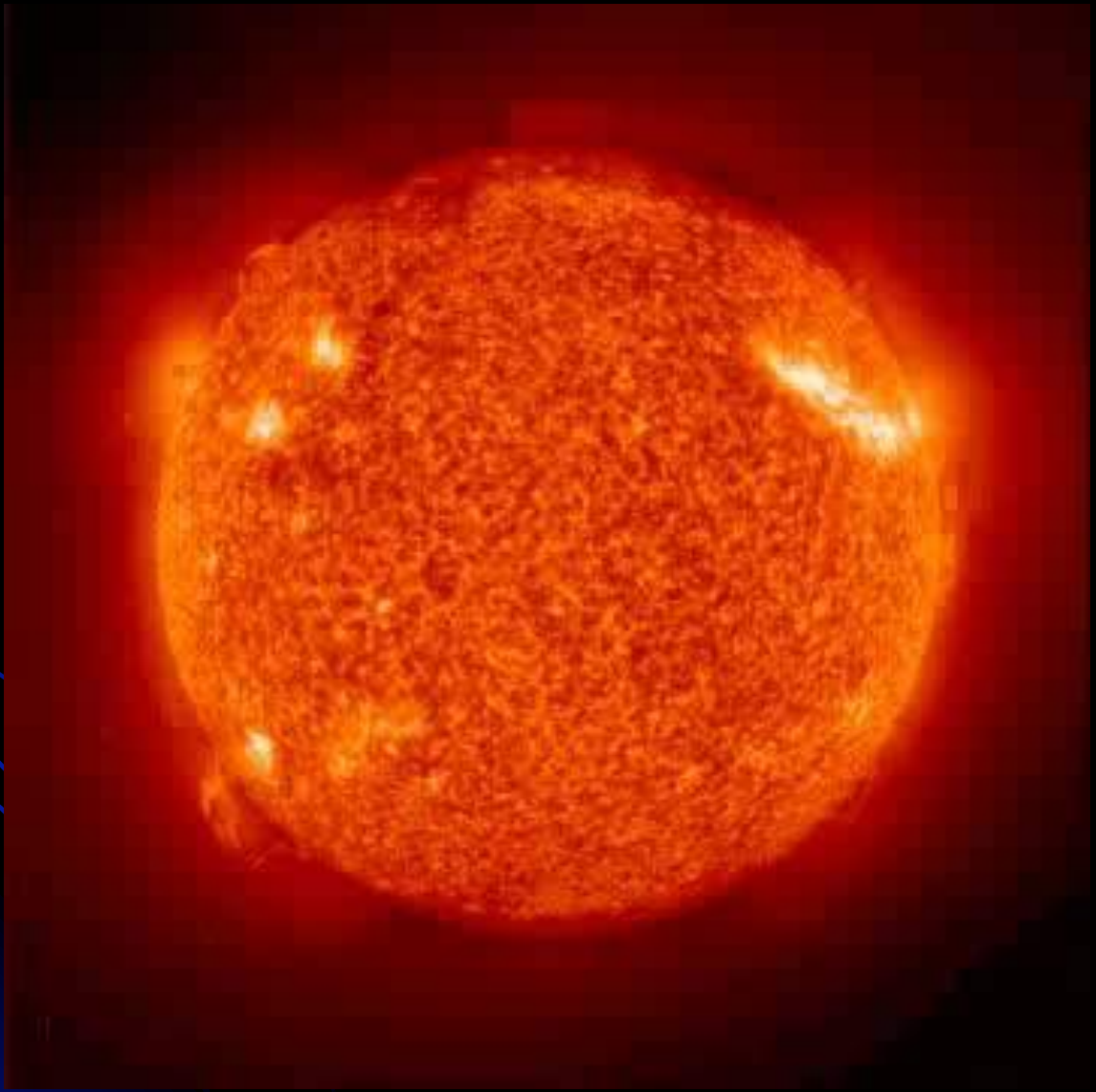
Tasas de extinción de géneros durante el Fanerozoico. Se compara con cráteres de impacto (el tamaño de los círculos es proporcional al diámetro del cráter) y los principales eventos volcánicos: grandes provincias ígneas (Large Igneous Province – LIPs) e inundaciones de basalto continentales (Continental Flood Basalts - CFBs) (adaptado de Keller, 2005 y de Glikson, 2009).

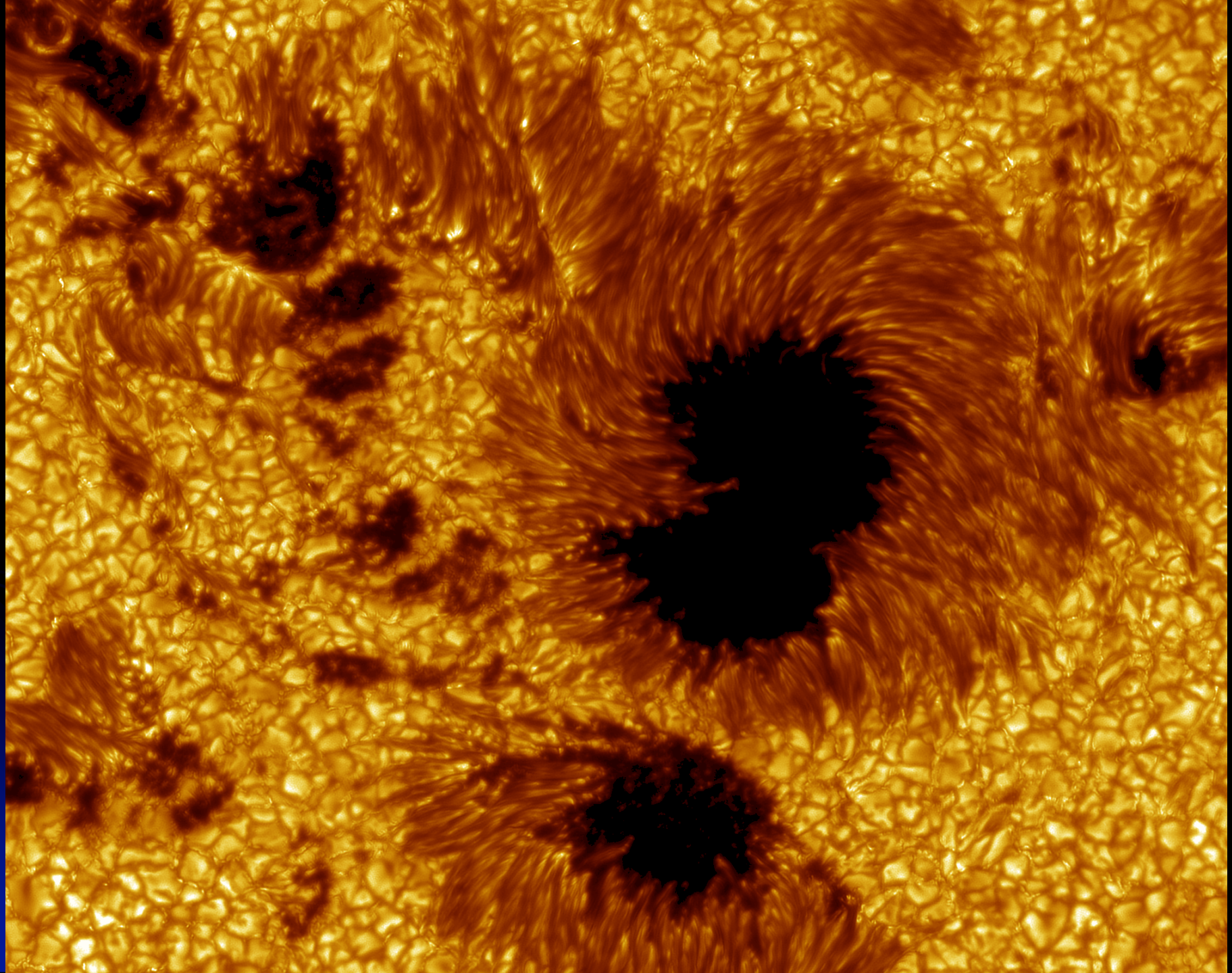


Paleomapa de la Tierra para el momento del evento K-T (65 Ma). Mapa adaptado del PaleoMap Project (Scotese 2003) para mostrar la ubicación del cráter de Chicxulub y los Deccan Traps.

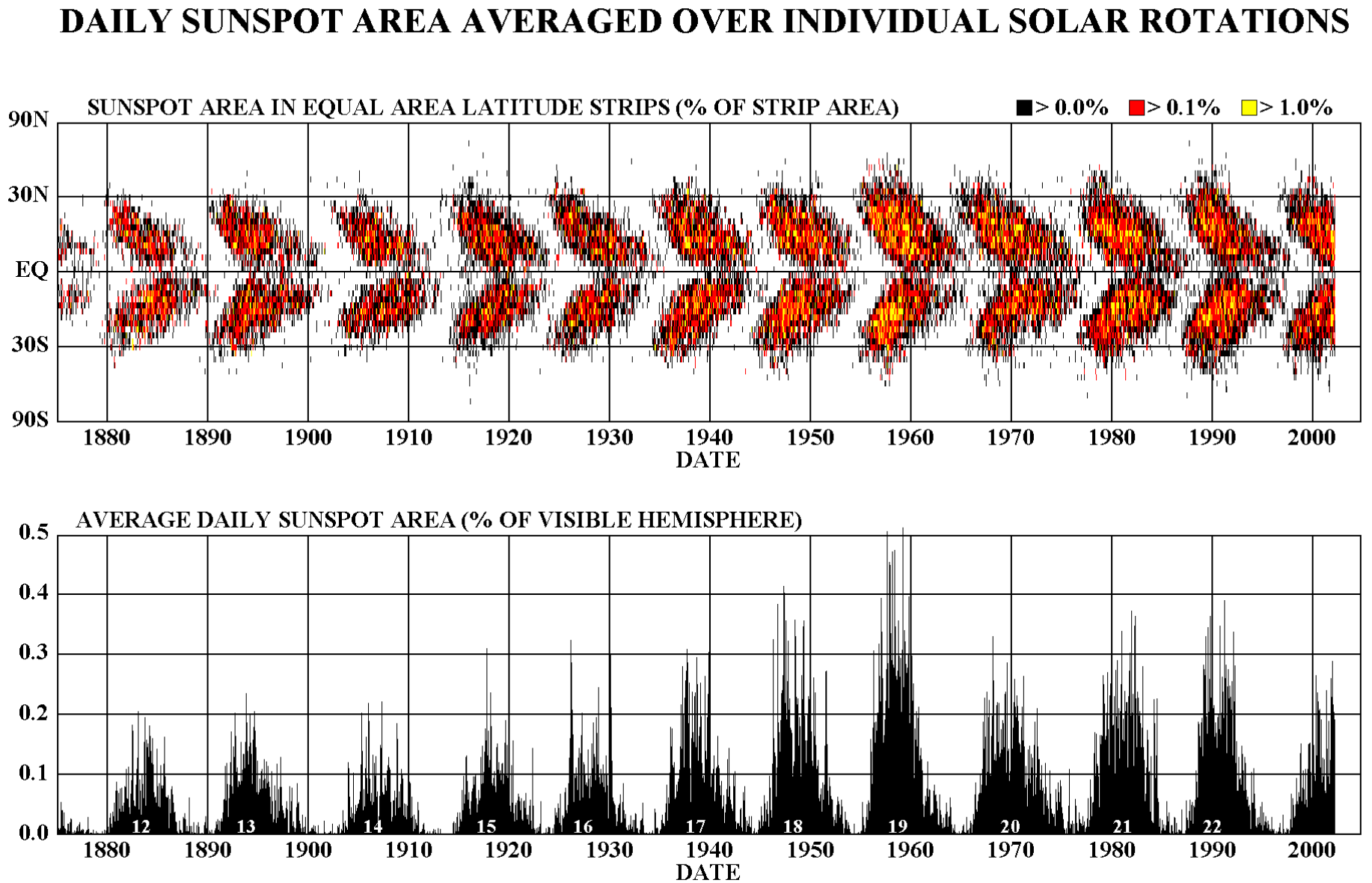
Alternativas de deflección

Actividad Solar

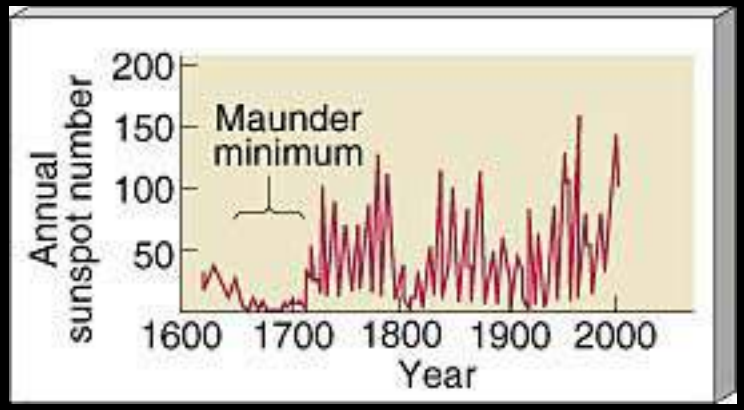




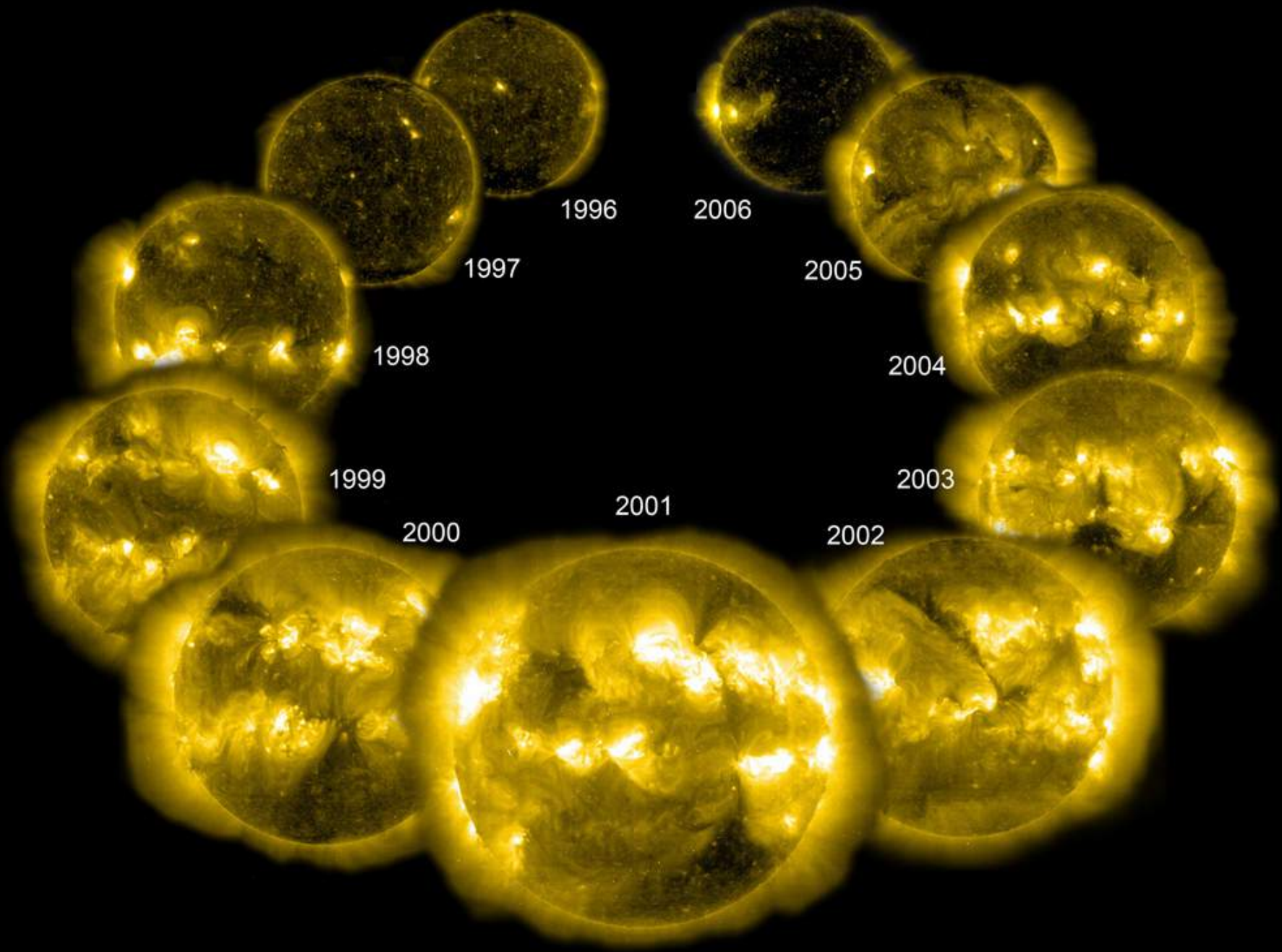
El Ciclo de Actividad Solar de ~11 años



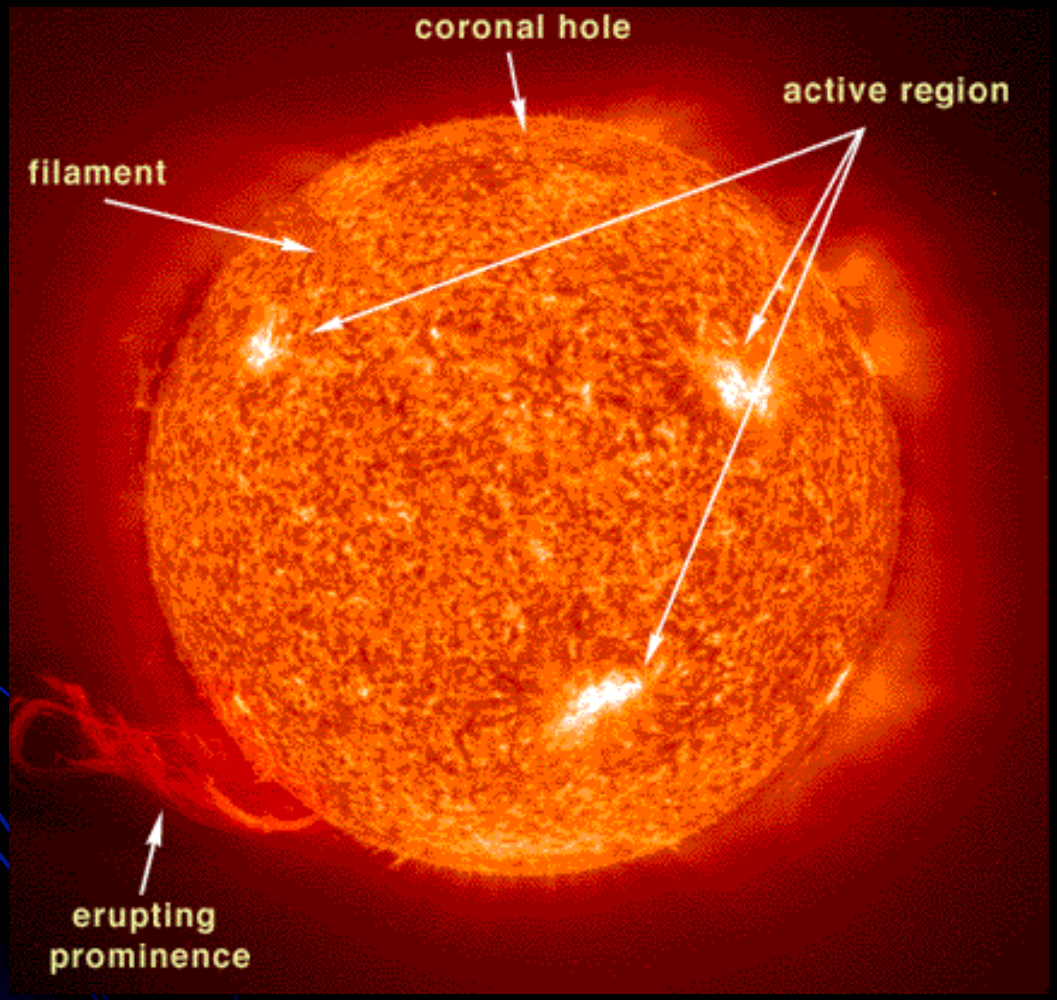
Mínimo de Maunder y pequeña era glacial

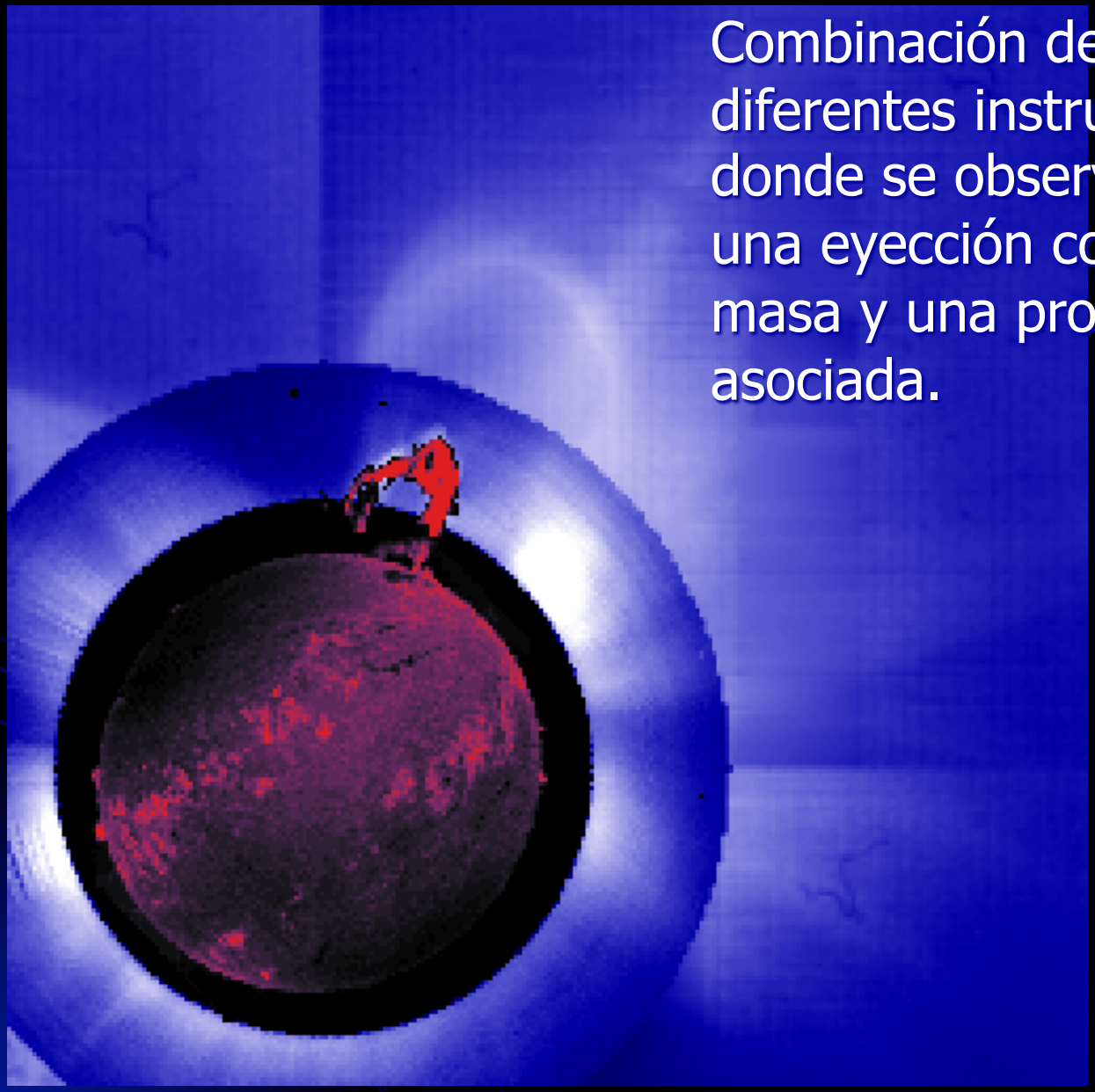


Nevando en el verano de Holanda (principio sXVII)


1996
2006
1997
2005
1998
2004
1999
2003
2001
2000
2002

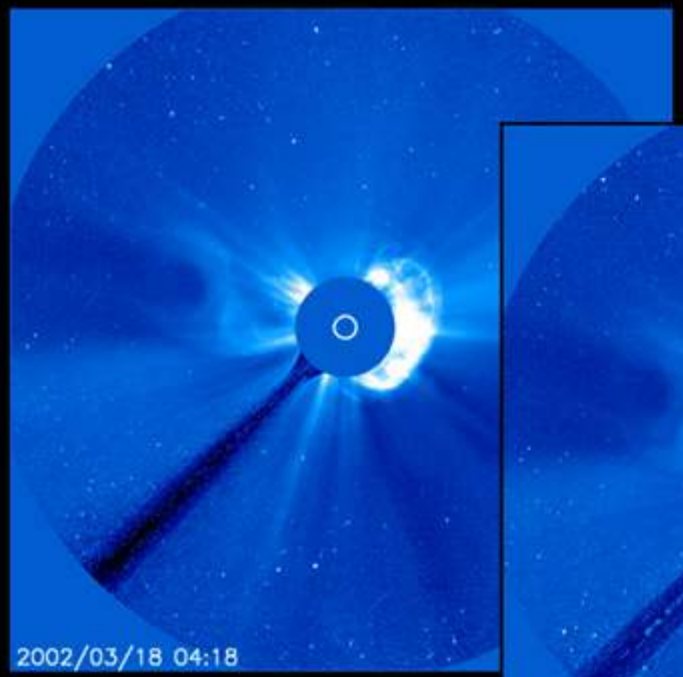
Otras formas de actividad

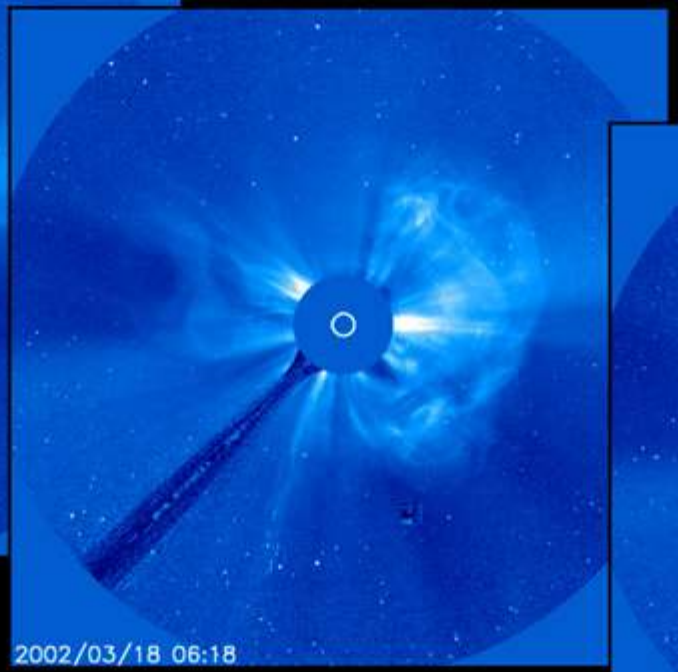


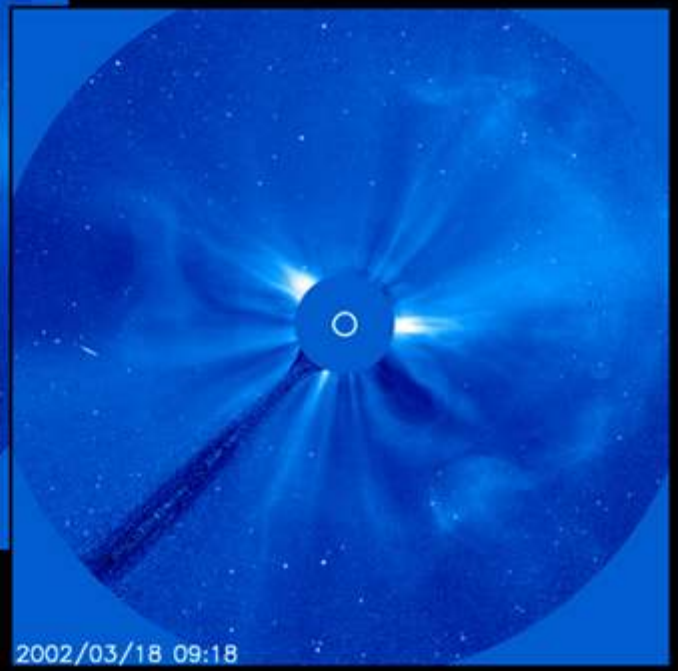


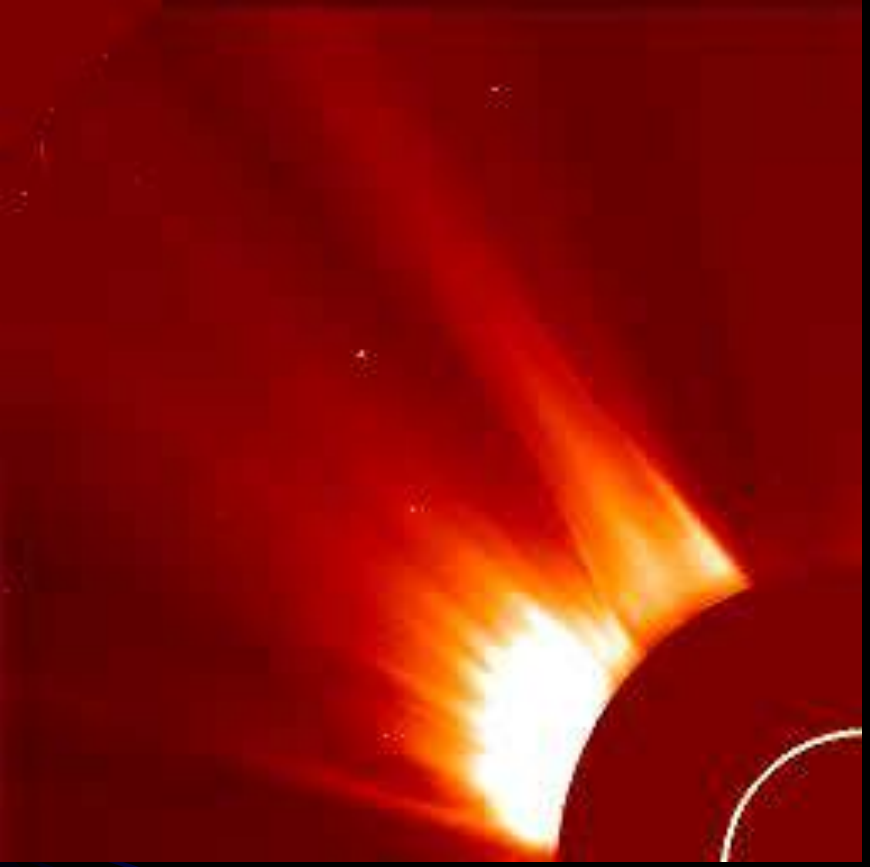
Combinación de imágenes de diferentes instrumentos donde se observa la corona, una eyección coronal de masa y una protuberancia asociada.

Eyecciones de masa coronales (CME)

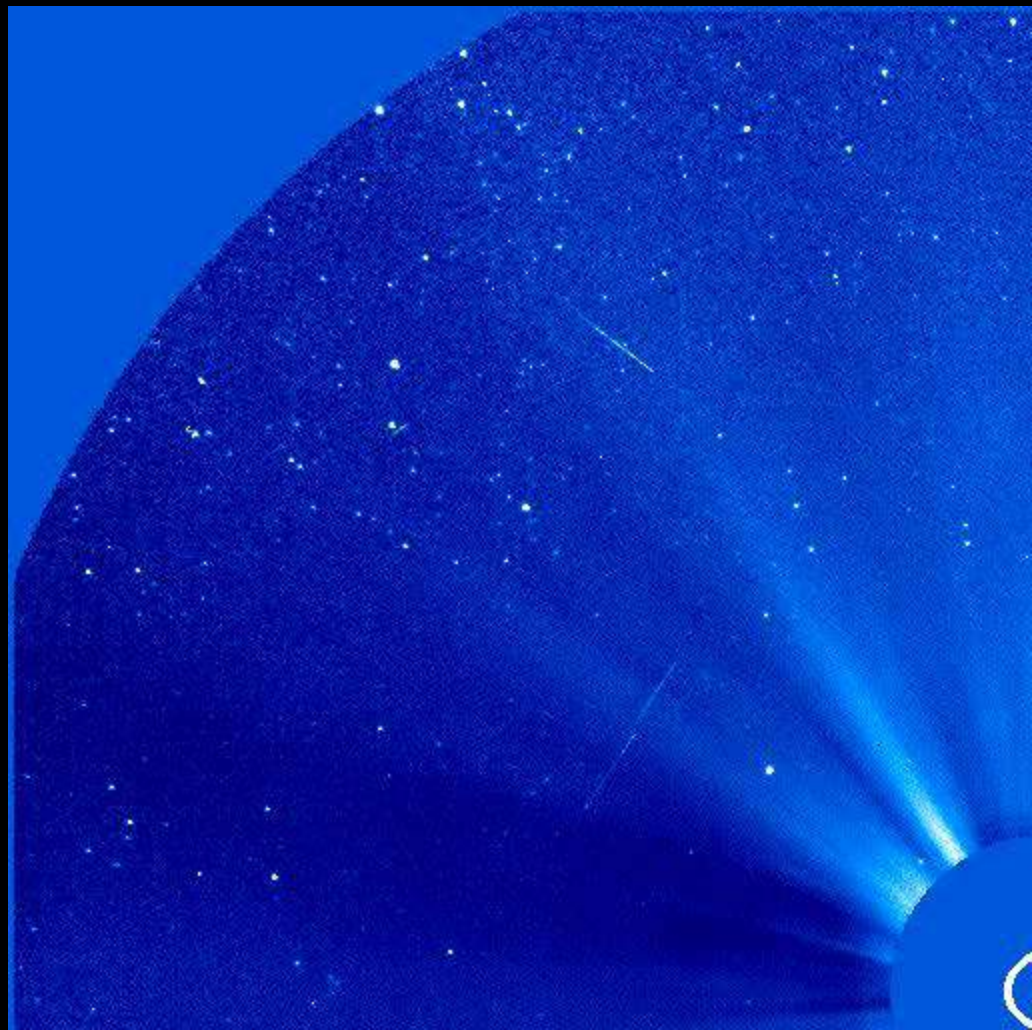




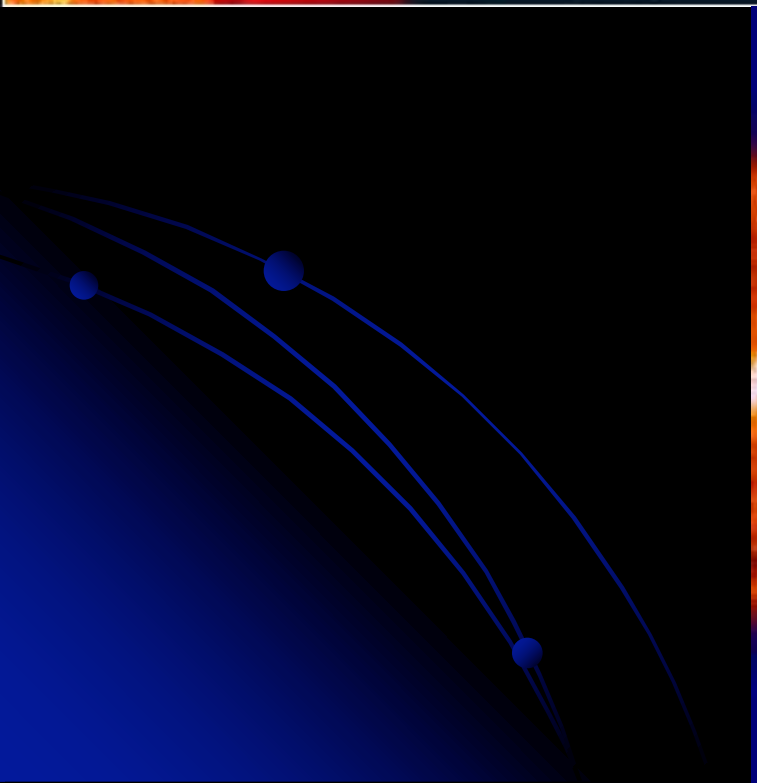


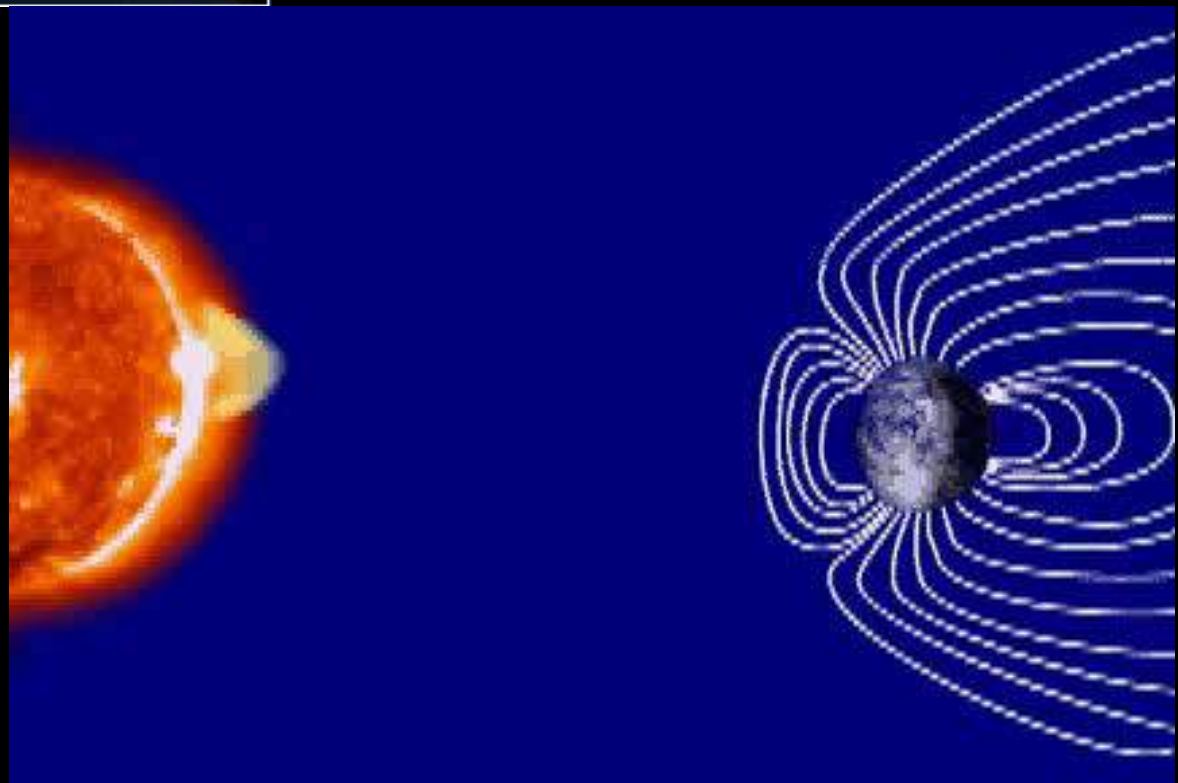


Eyecciones de masa coronales: burbuja de plasma inyectada en el espacio interplanetario. Se detectaron por primera vez en 1971.



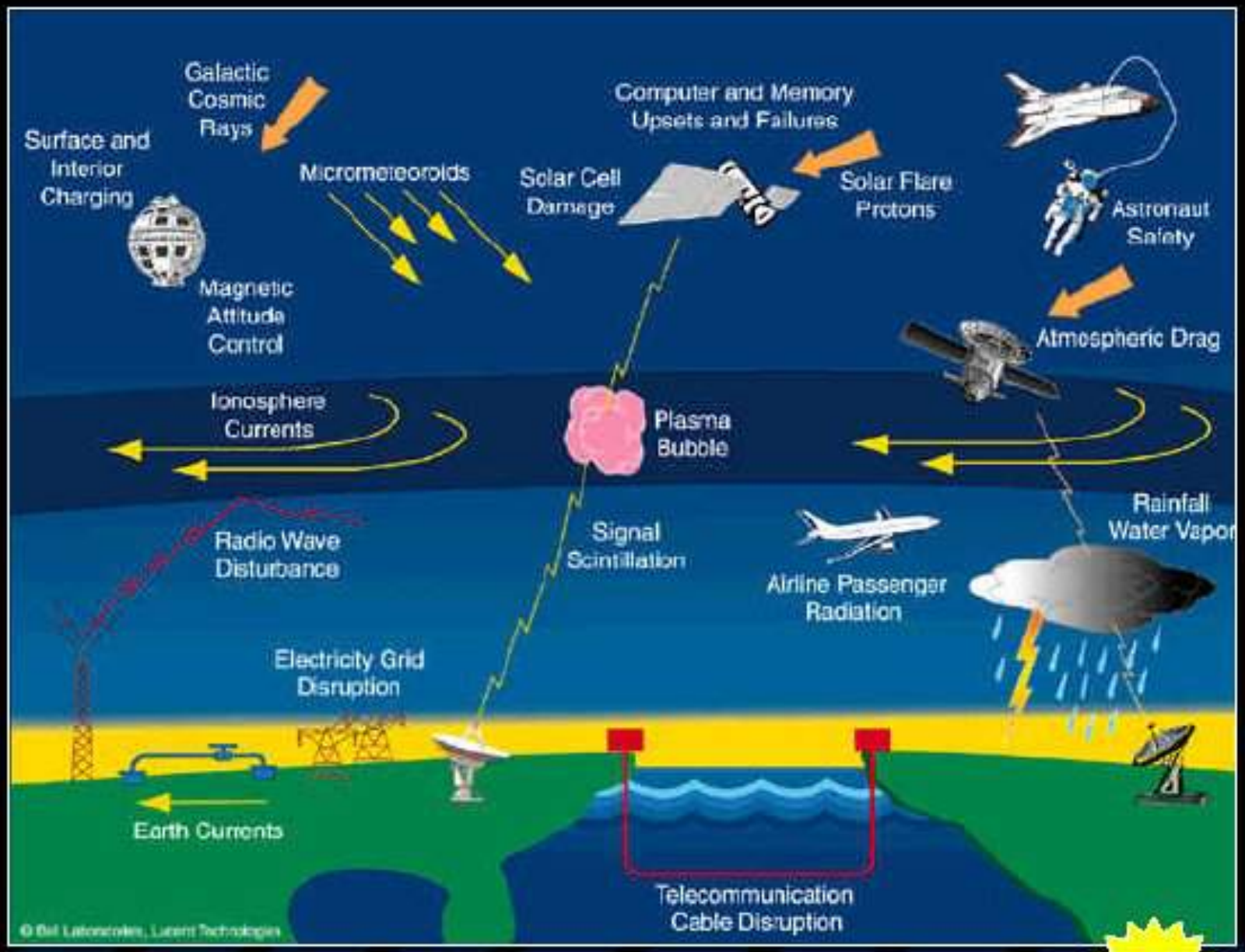
Interacción CME-magnetósfera



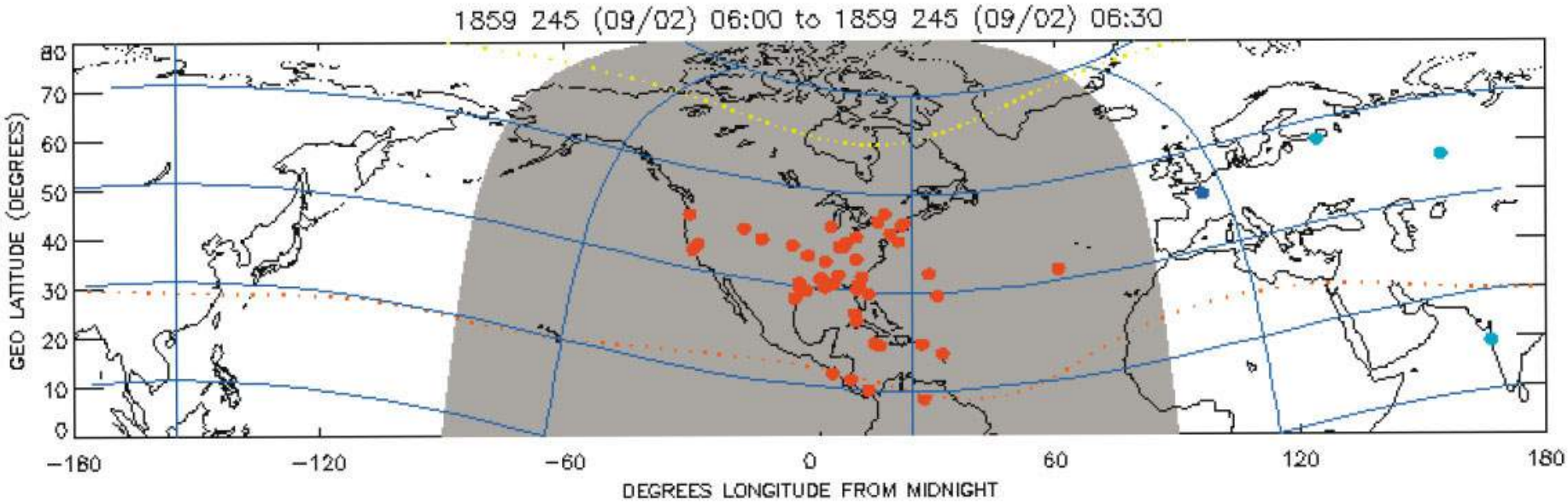


Aurora boreal

Efectos en la tecnología de las CME y viento solar



La supertormenta solar de 1859
Evento Carrington



Locations of reported auroral observations during the first ~1.5 hours of the September 2, 1859, magnetic stor
(orange dots). Courtesy J.L. Green, NASA

En los días previos se observaron grandes manchas, fulguraciones y ocurrieron un par de CMEs.

Colapsó el telégrafo.

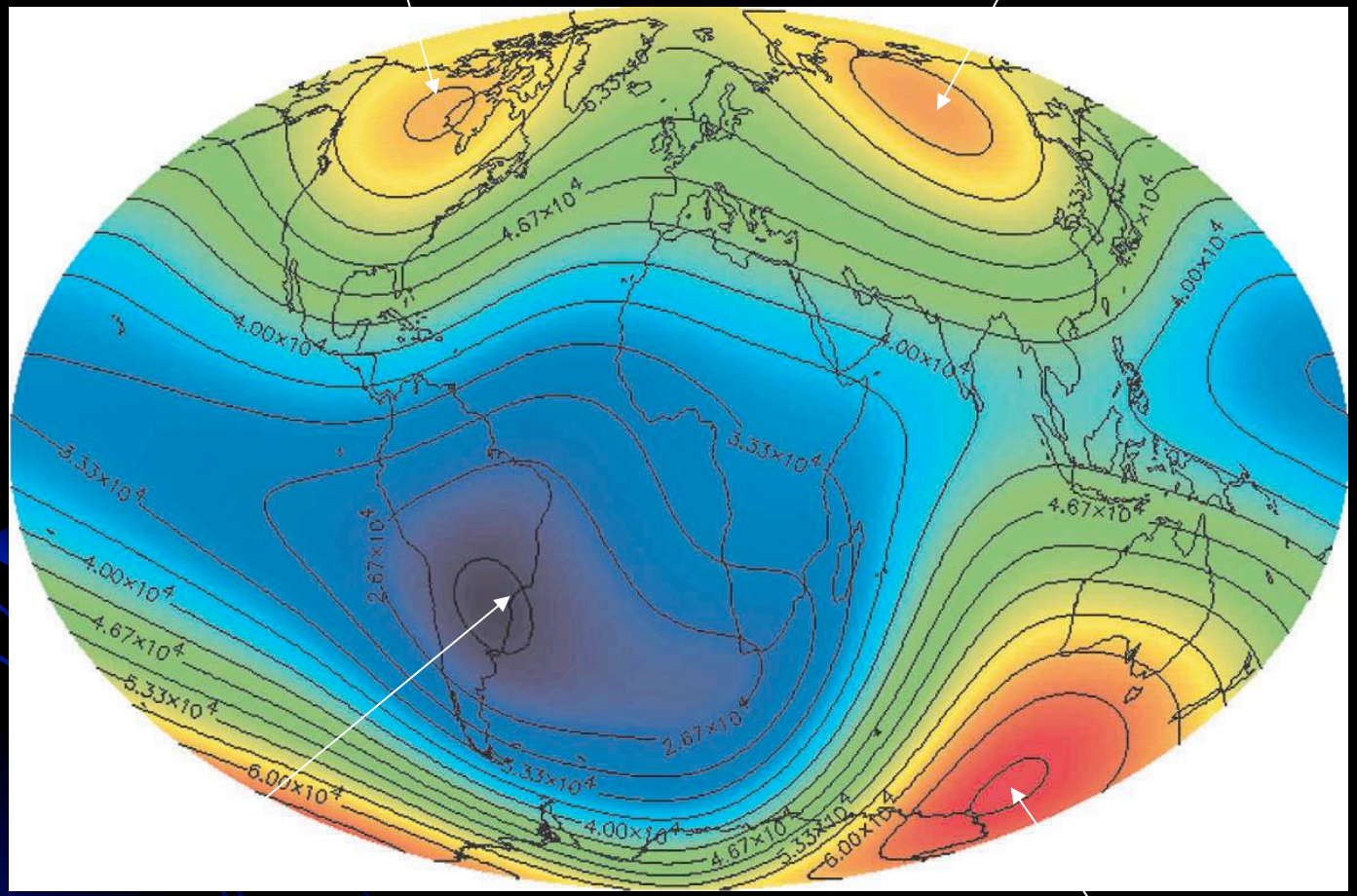
Un evento de este tipo cada pocos cientos de años.

Las consecuencias actuales superarían > 100 mil M USD

CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

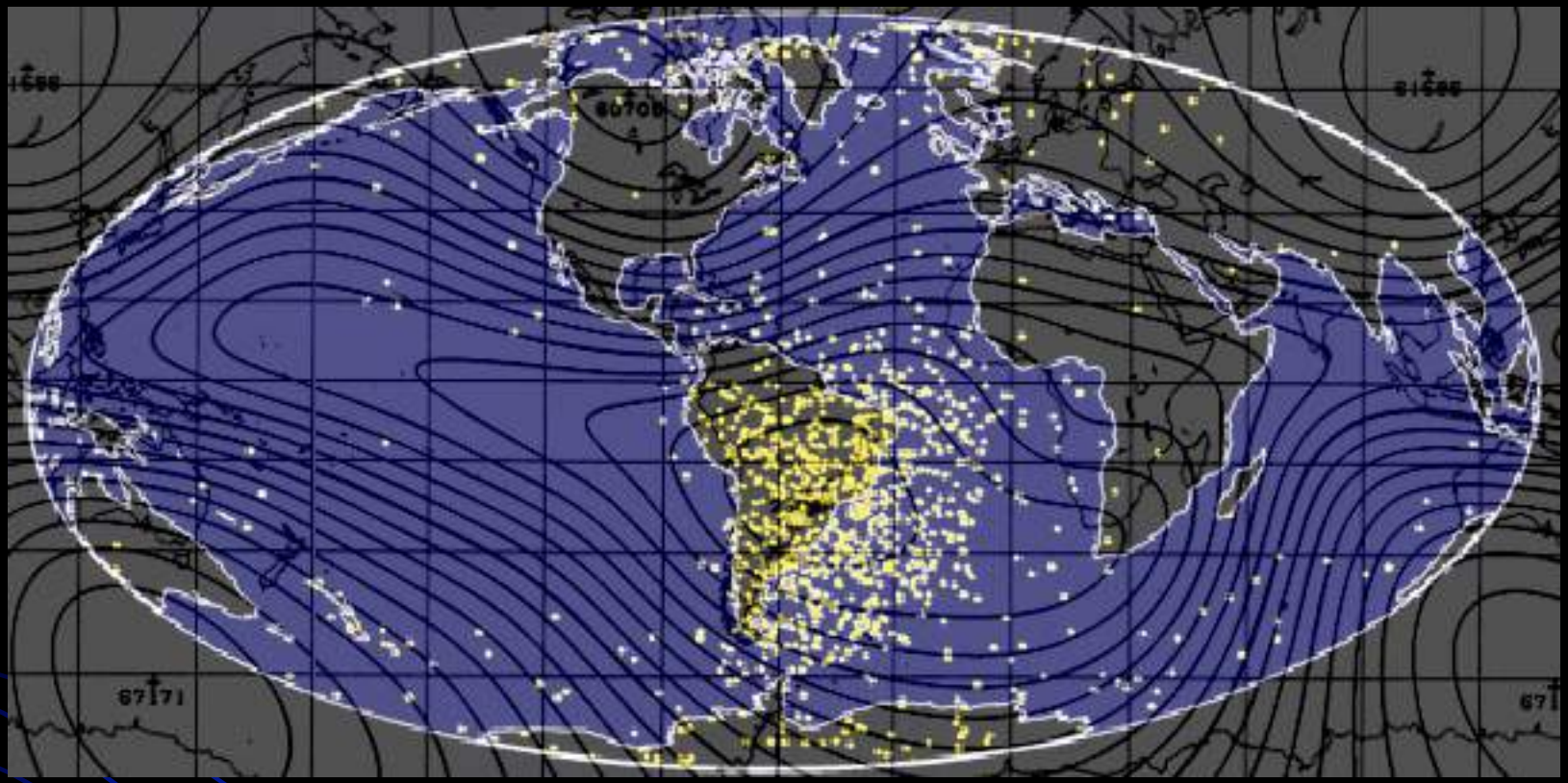
POLO GEOMAGNETICO NORTE

POLO GEOMAGNETICO SECUNDARIO



ANOMALIA MAGNETICA DEL ATLANTICO SUR

POLO GEOMAGNETICO SUR

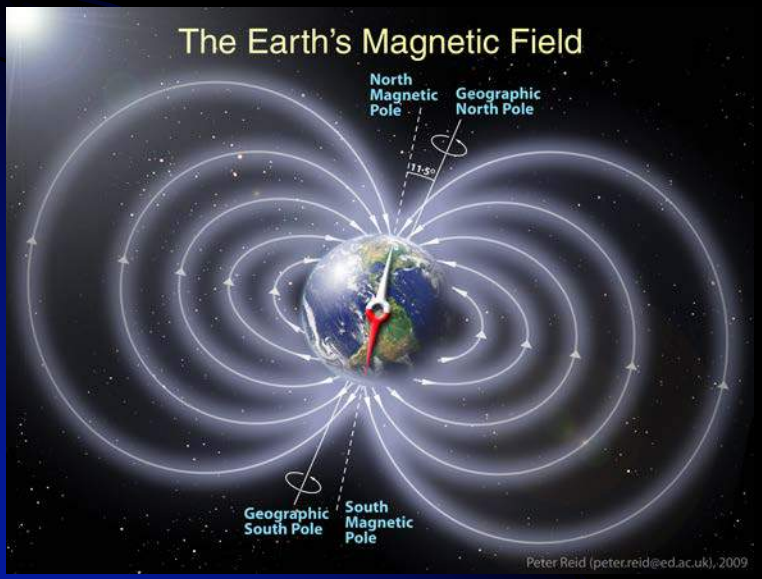


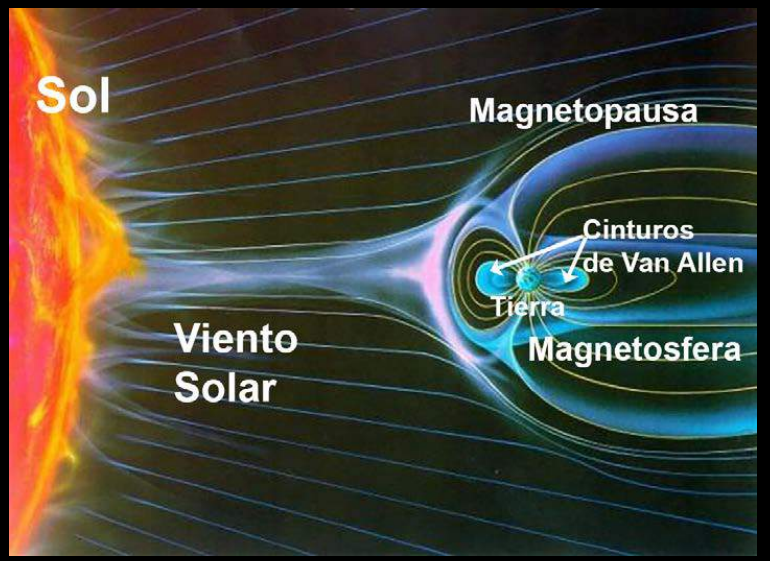
Desperfectos de memoria (memory upsets) detectados por el satélite UOSAT. Superimpuesto los niveles de intensidad de campo magnético.

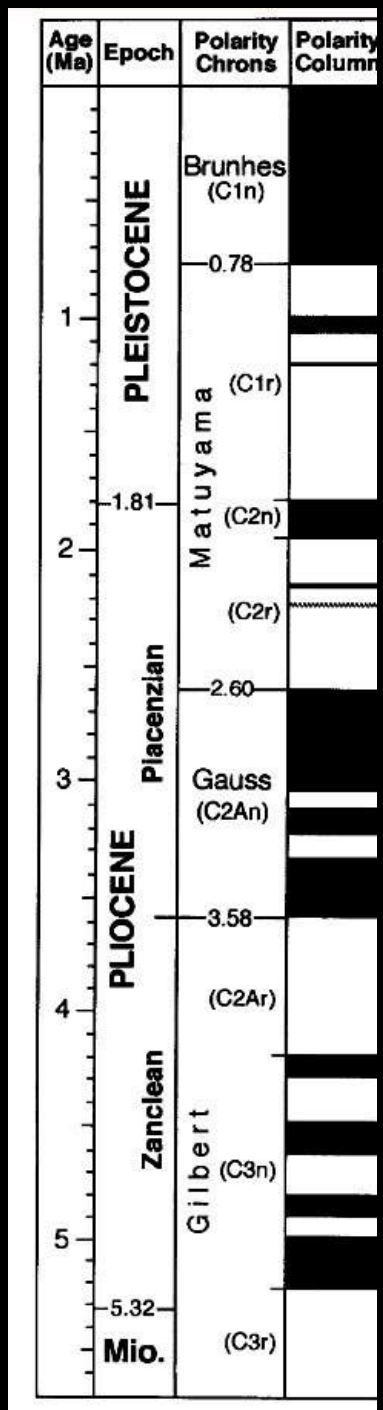
Campo Magnético Terrestre

Inversiones de la polaridad del campo magnético terrestre

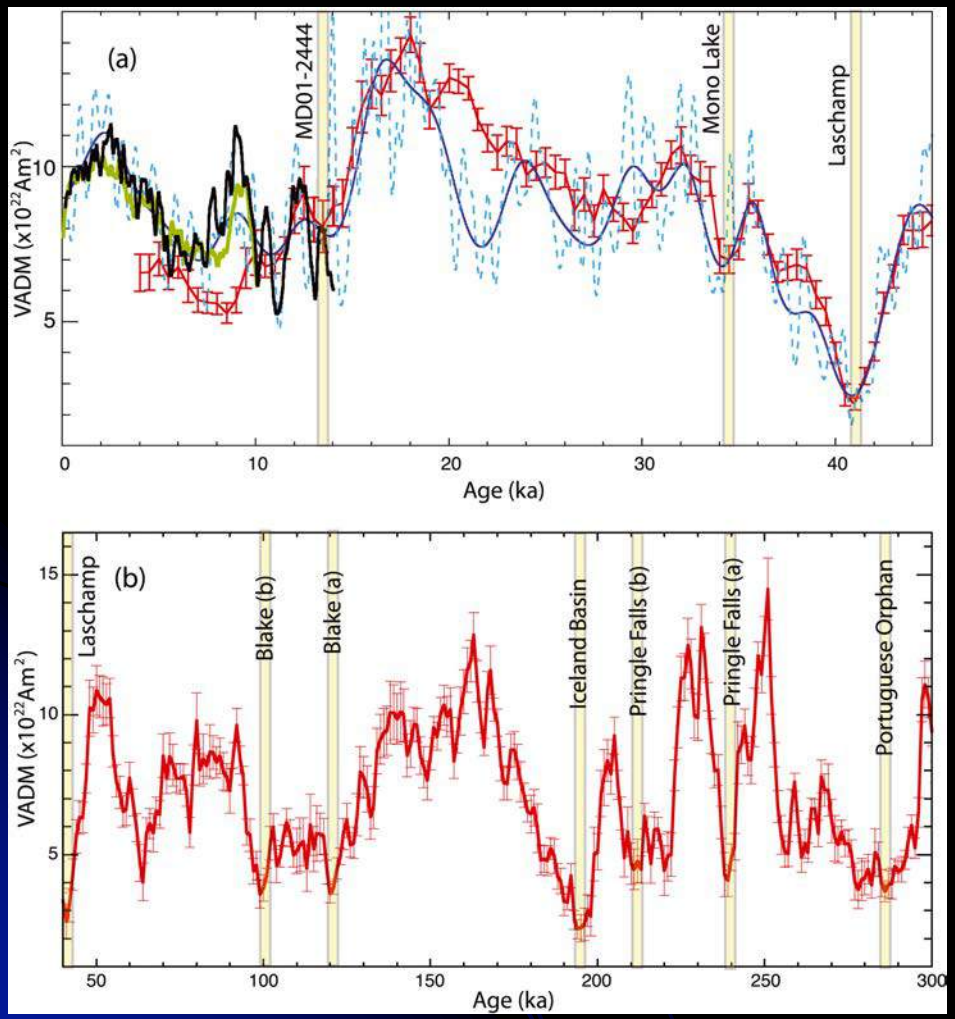
Que pasa la intensidad del campo magnético en el momento de las inversiones?
Se debilitará el “escudo” que nos protege del flujo de partículas energéticas proveniente del Sol.







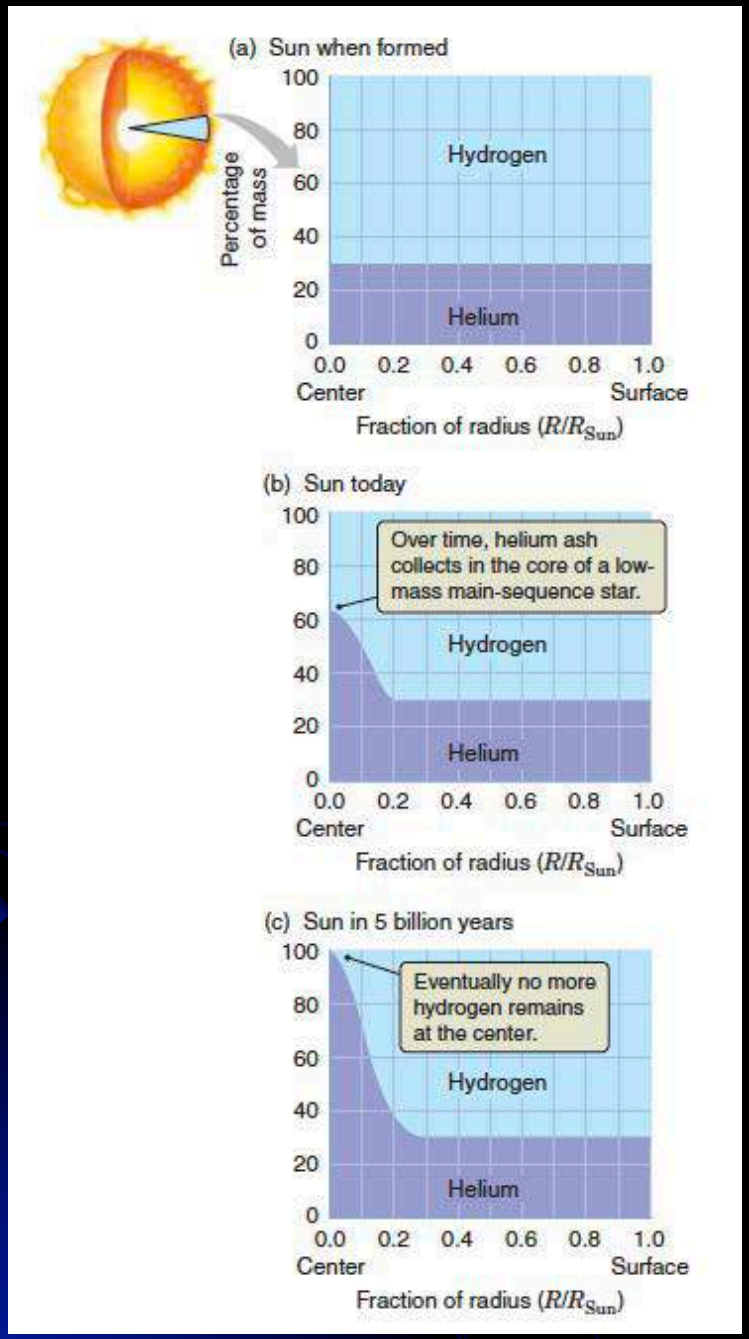
Evolución del campo magnético



Virtual axial dipole moment (VADM): Intensity of an imaginary axial (along the Earth's rotation axis) centric (located in the centre of the Earth) dipole that would produce the estimated archaeo-/palaeointensity at the sampling site.

La evolución del Sol

The End of the World (Coronet, July 1947)
Chesley Bonestell



Evolucion de la relacion H/He en el Sol

Figure 16.2 Chemical composition of the Sun is plotted here as a percentage of mass against distance from the center of the Sun. (a) When the Sun formed 5 billion years ago, it was evenly mixed: about 30 percent of its mass was helium and 70 percent was hydrogen. (b) Today, the material at the center of the Sun is about 65 percent helium and 35 percent hydrogen. (c) The Sun's main-sequence life will end in about 5 billion years, when all of the hydrogen at its center will be exhausted.

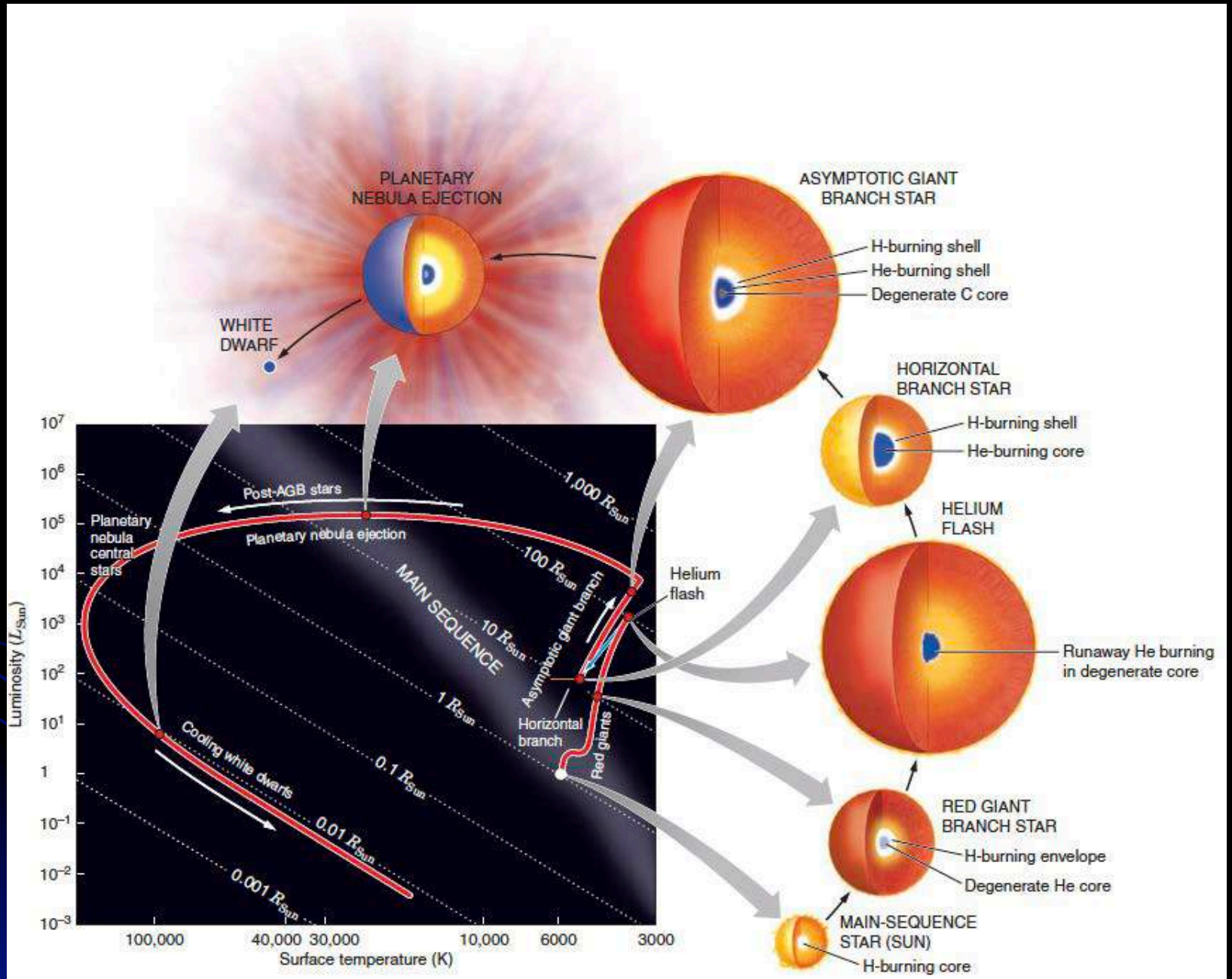
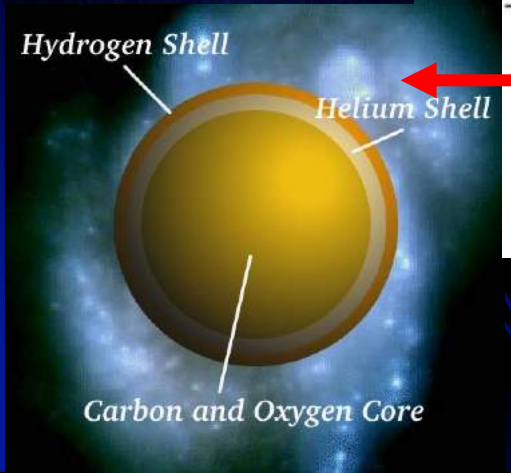
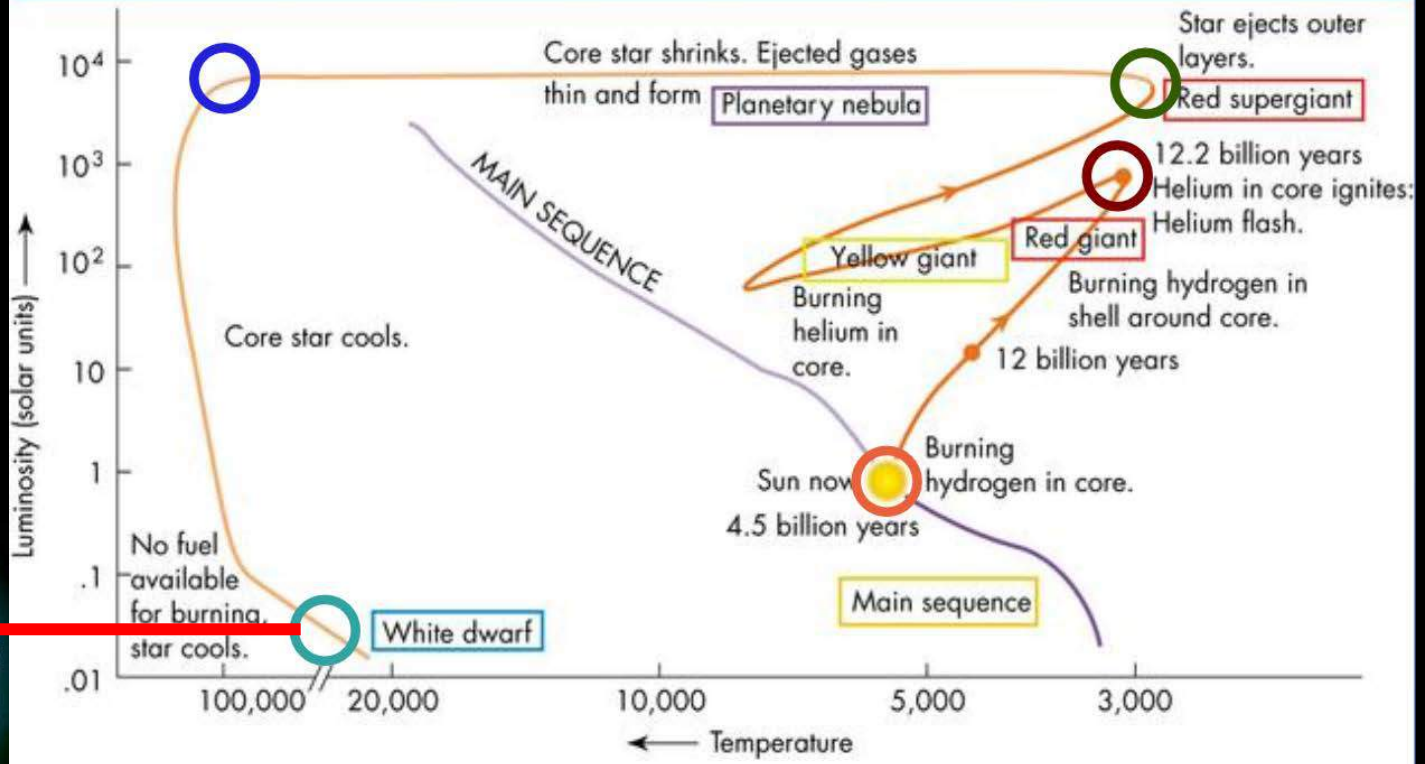


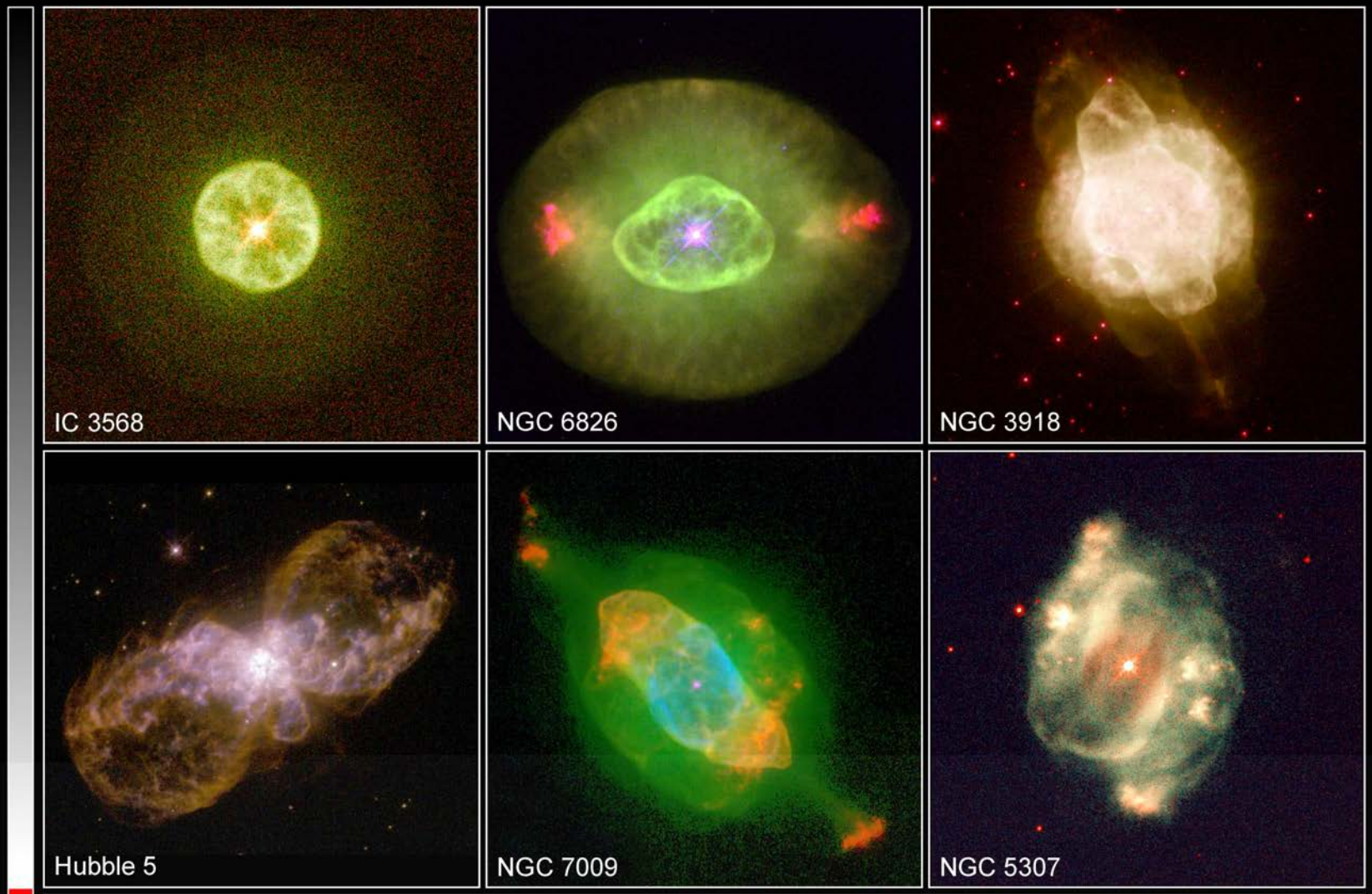
Figure 16.13 This H-R diagram summarizes the stages in the post-main-sequence evolution of a 1-M_{Sun} star.

EVOLUCION ESTELAR



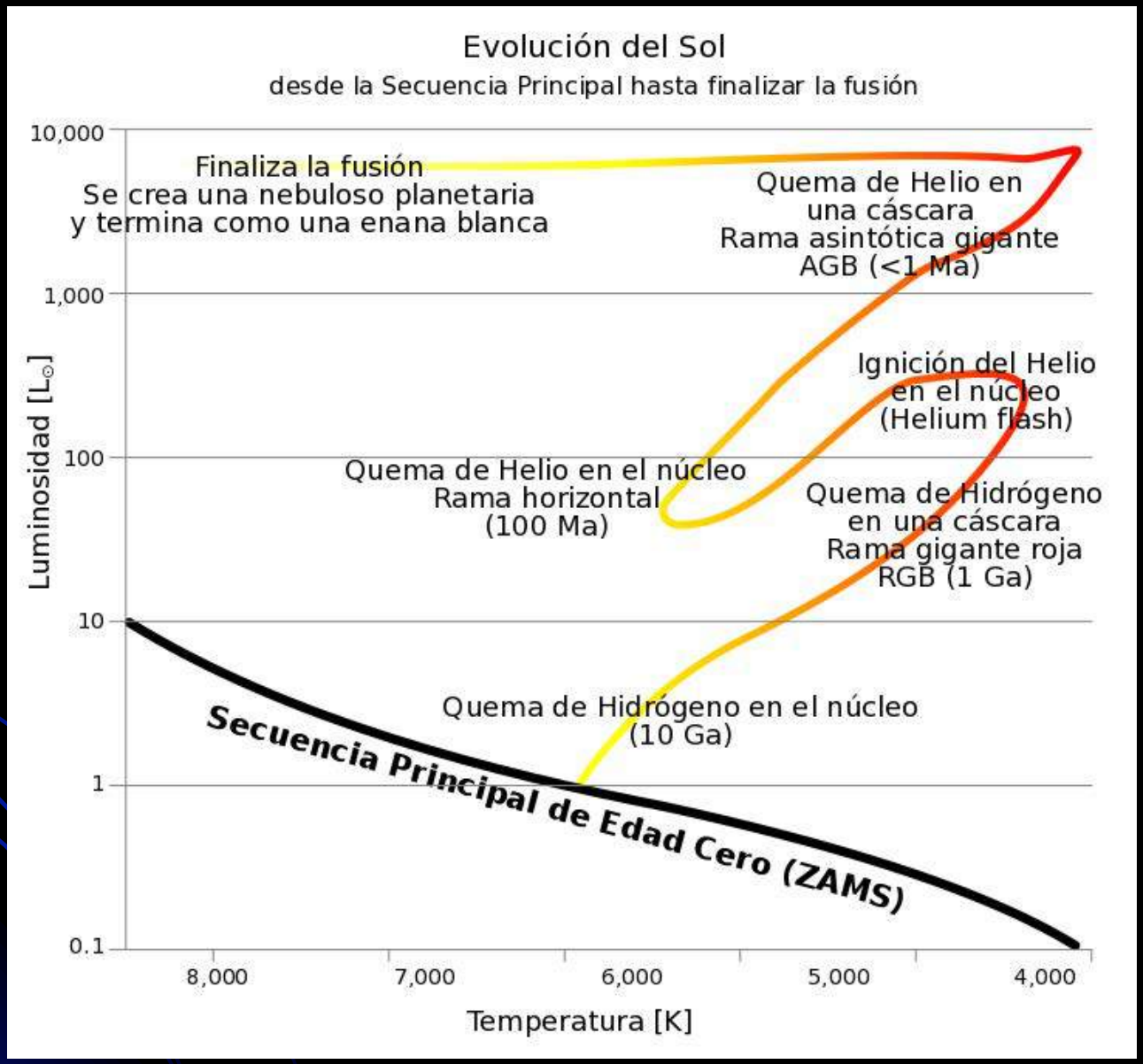
	~9 billion yrs	~1 billion yrs	~100 million yrs	~10,000 yrs	
Time spent as	Main sequence →	Red giant →	Yellow giant →	Planetary nebula →	White dwarf
Sun's age	4.5 billion yrs (now)	12.2 billion yrs	12.3 billion yrs	12.3305 billion yrs	12.3306 billion yrs



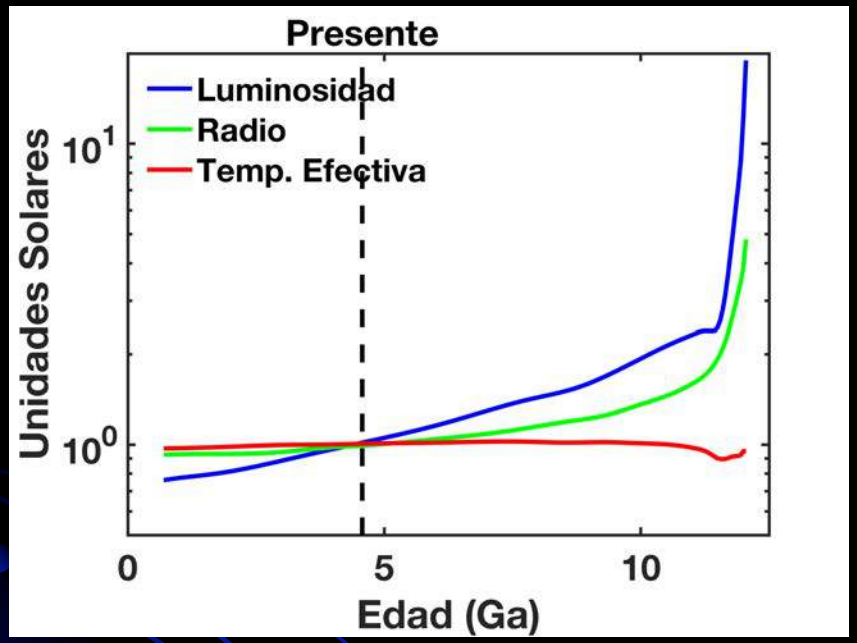


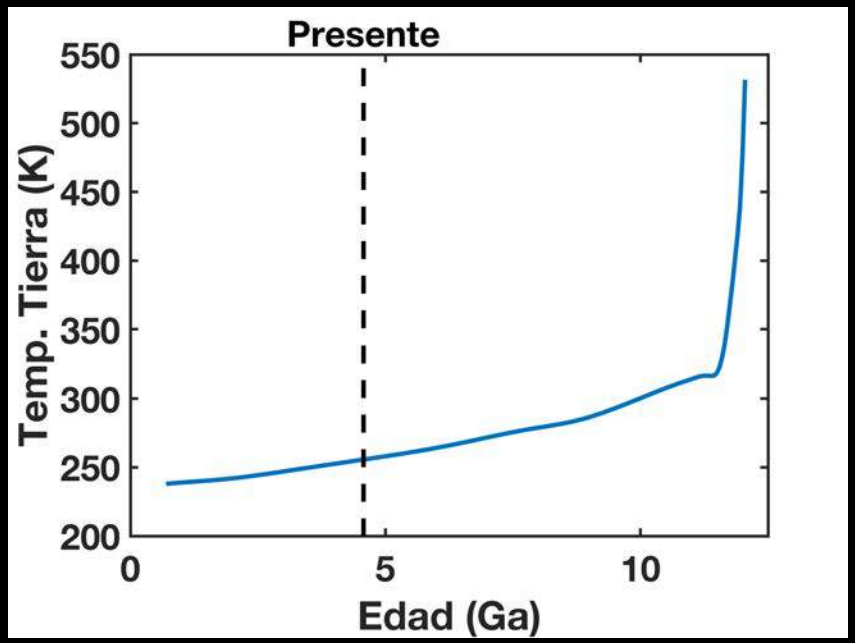
Planetary Nebula Gallery
Hubble Space Telescope • WFPC2

PRC97-36b • ST ScI OPO • December 17, 1997 • H. Bond (ST ScI), B. Balick (University of Washington) and NASA


Evolución del Sol
desde la Secuencia Principal hasta finalizar la fusión
Finaliza la fusión
Se crea una nebuloso planetaria
y termina como una enana blanca
Quema de Helio en
una cáscara
Rama asintótica gigante
AGB (<1 Ma)
Ignición del Helio
en el núcleo
(Helium flash)
Quema de Helio en el núcleo
Rama horizontal
(100 Ma)
Quema de Hidrógeno
en una cáscara
Rama gigante roja
RGB (1 Ga)
Quema de Hidrógeno en el núcleo
(10 Ga)
Secuencia Principal de Edad Cero (ZAMS)
10,000
1,000
100
10
1
0.1
Luminosidad [L⊙]
8,000
7,000
6,000
5,000
4,000
Temperatura [K]

Evolución del Sol

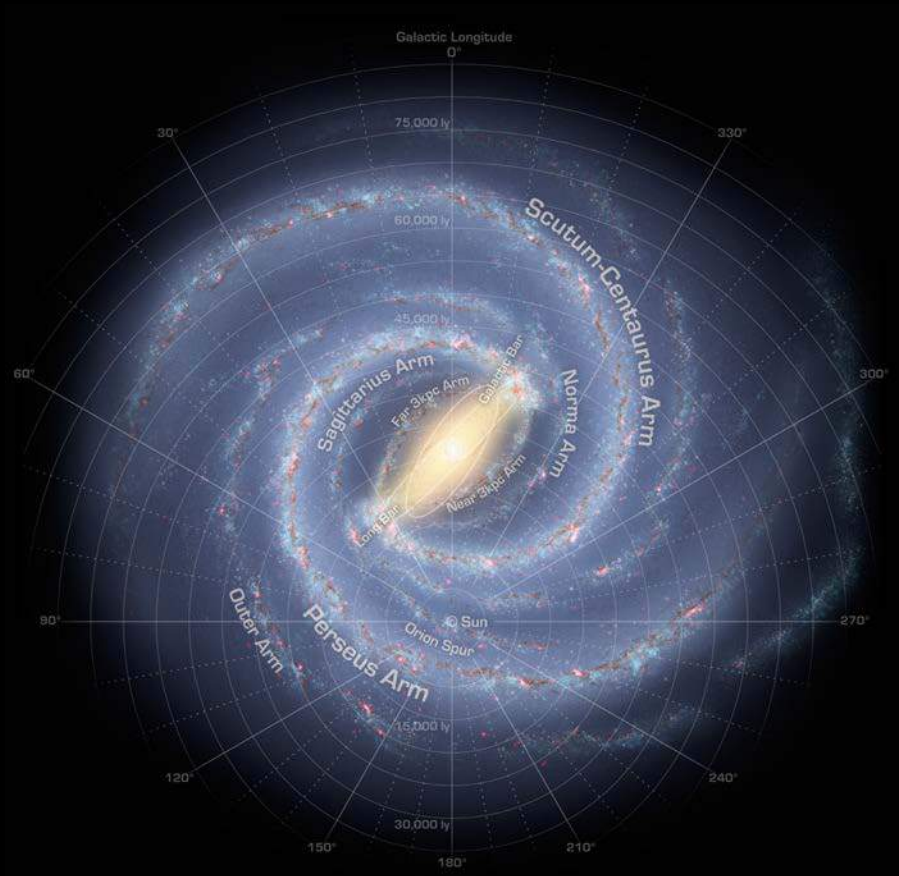




Las temperaturas en la Tierra alcanzarán valores extremos (>100ºC) dentro de 7.42Ga. No obstante, ya dentro de 5 Ga las temperaturas medias en la Tierra serán superiores a las máximas temperaturas en el presente. El Sol RGB se tragaría a la Tierra y su pérdida total tendrá lugar dentro de 7.59 Ga.

AMENAZAS GALACTICAS

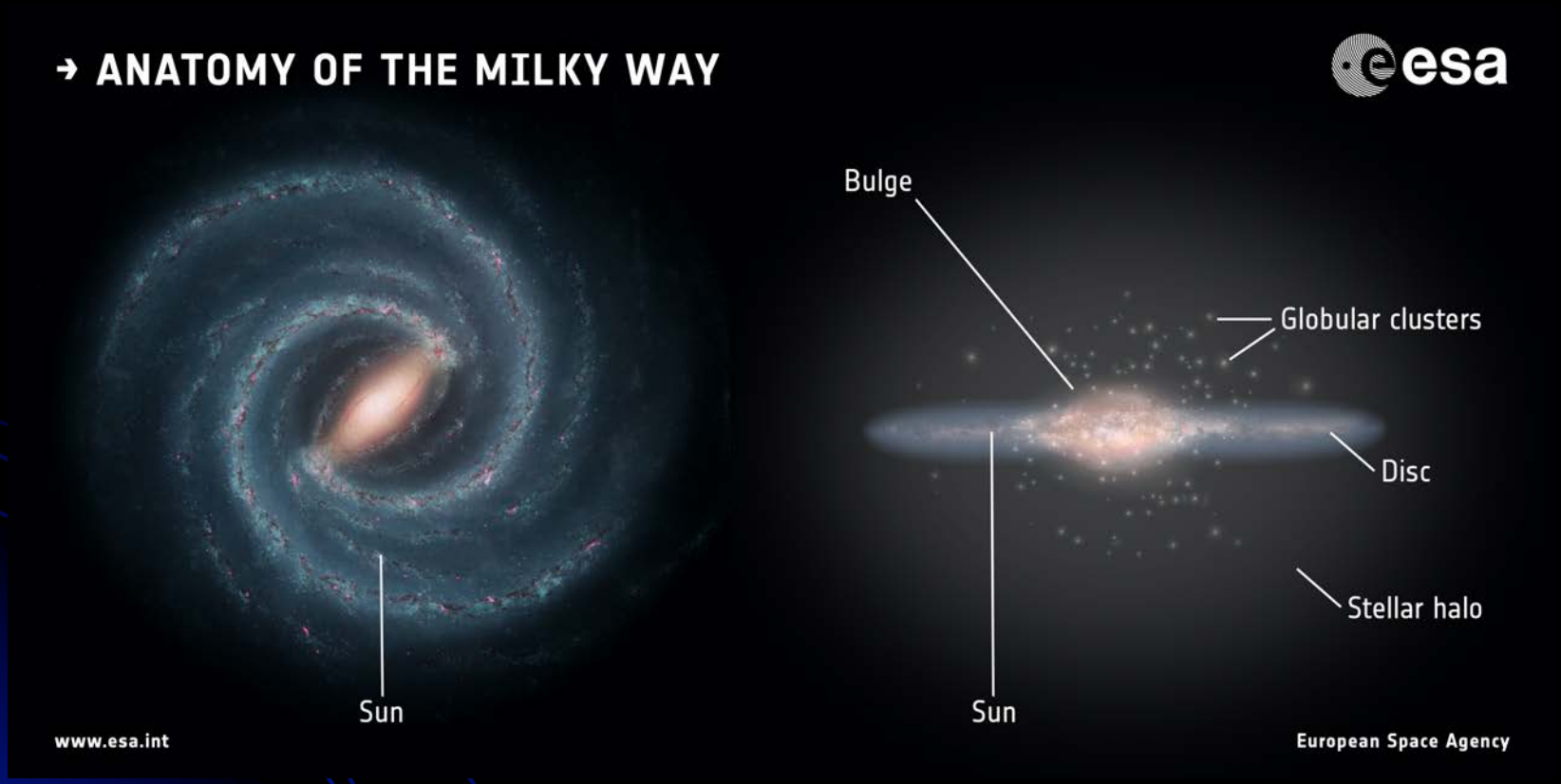
Ubicación del Sol en la Vía Láctea



La Vía Láctea tiene un diámetro entre 30 y 55 *kpc*; y un espesor promedio de ~300 *pc*.
Contiene de 100 a 400 mil millones de estrellas.
Las estrellas y los gases en un amplio rango de distancias desde el centro galáctico orbitan a aproximadamente 220 *km/s*.
Se pueden identificar las siguientes estructuras:

- Centro galáctico y bulto central
- Disco galáctico y brazos espirales
- Halo

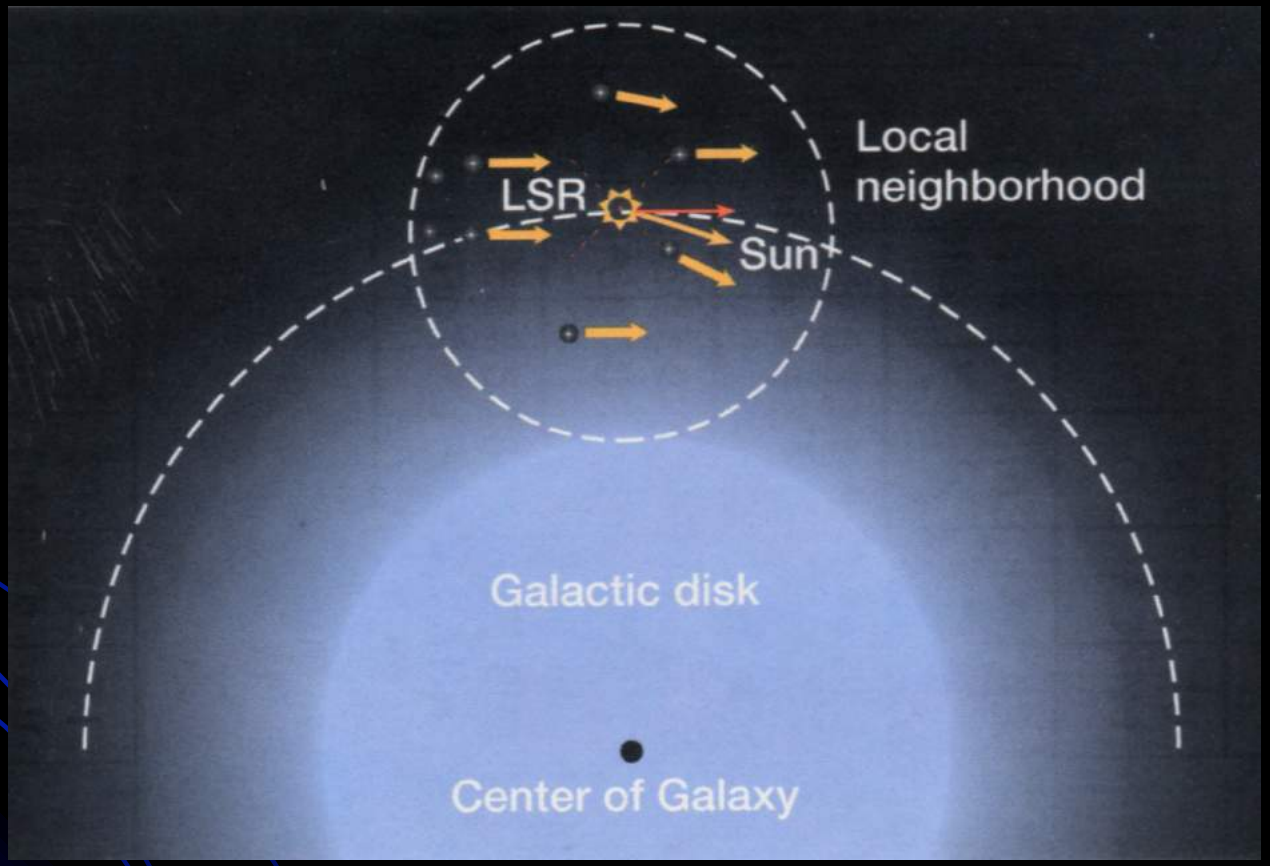
Estructura de la Vía Lactea



El Sistema Solar en la Vía Láctea

- El Sistema Solar está ubicado dentro del disco, a unos ~8.5 *kpc* del centro galáctico.
- El movimiento de las estrellas en la Galaxia lo podemos separar en dos componentes: el movimiento orbital medio alrededor del centro galáctico, y un movimiento perpendicular al plano galáctico. El movimiento de las estrellas cercanas al Sol tiene una velocidad promedio de ~220 *km/s*. En relación con las estrellas cercanas que definen el Local Standard of Rest (LSR), el Sol se mueve a una velocidad de ~15 *km/s*, y su trayectoria está inclinada ~ 25◦ respecto del plano de la Galaxia.
- El período orbital del Sol entorno al centro galáctico es de ~240 millones de años, y hace una excursión entre ~ 8 y 9 *kpc* del centro. La oscilación vertical respecto al plano de la Galaxia tiene una amplitud de ~85 *pc*, y un período del movimiento vertical de ~70-80 millones de años, lo que lleva a que el Sol cruce el plano galáctico cada ~35-40 millones de años. El Sol pasó por el plano galáctico hace unos 2-3 millones de años, moviéndose hacia el hemisferio norte galáctico. En el presente, el Sol se ubica a ~12 *pc* del plano galáctico, alejándose del mismo.

Vecindad y Local Standard of Rest



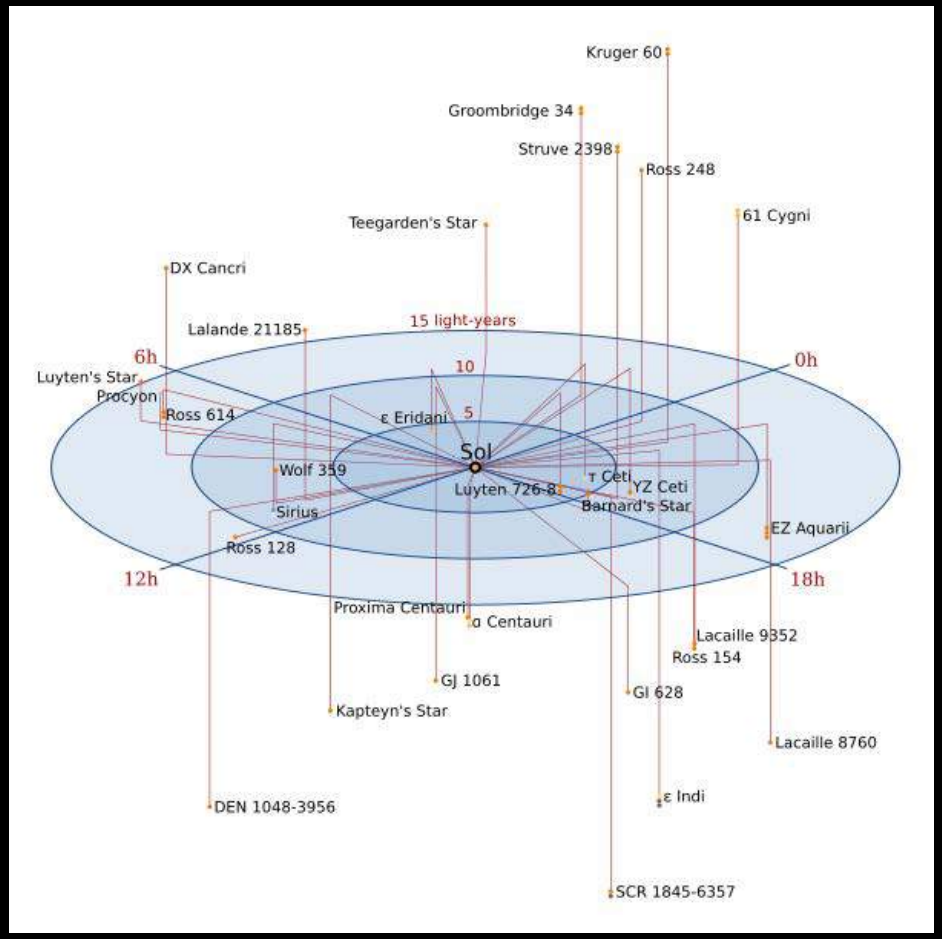
Pasaje de estrellas cercanas

Estrellas cercanas

- El Sol tiene una velocidad respecto al LSR en la dirección del ápex (que se sitúa en la constelación de Hércules, al suroeste de la estrella Vega) de 16.5 km/s. La velocidad típica de las estrellas del vecindario solar es de ~15−20 km/s. Por lo que la velocidad relativa o velocidad de encuentro de las estrellas del vecindario con el Sol es la suma cuadrática de ambas, lo que da ~25 km/s.

Nombre del sistema	Nombre de estrella	Magn. Abs (m_V o m_J) *	Dist. (años luz)	Dist. (pc)	Clase espectral
Sistema Solar	Sol	4.85			G2V
Alfa Centauri	Próxima Centauri	15.53	4.24	1.30	M6Ve
	Alfa Centauri A	4.38	4.37	1.34	G2V
	Alfa Centauri B	5.71	4.37	1.34	K1V
Estrella de Barnard		13.22	5.96	1.83	M4Ve
Luhman 16	Luhman 16A	14.2 J	6.59	2.02	L8
	Luhman 16B	14.2 J	6.59	2.02	T1
WISE 0855-0714		8.2 J	7.27	2.23	Y2
Wolf 359 (CN Leonis)		16.55	7.78	2.39	M6V
Lalande 21185		10.44	8.29	2.54	M2V
Sirio	Sirio A	1.42	8.58	2.63	A1V
	Sirio B	11.34	8.58	2.63	DA2
Luyten 726-8	Luyten 726-8A - BL Ceti	15.4	8.73	2.68	M6Ve
	Luyten 726-8B - UV Ceti	15.85	8.73	2.68	M6Ve
Ross 154 (V1216 Sagittarii)		13.07	9.68	2.97	M4Ve

* - Magnitud Absoluta en filtro V (visible) o filtro J (infarrojo). Se especifica una J para magn. m_J



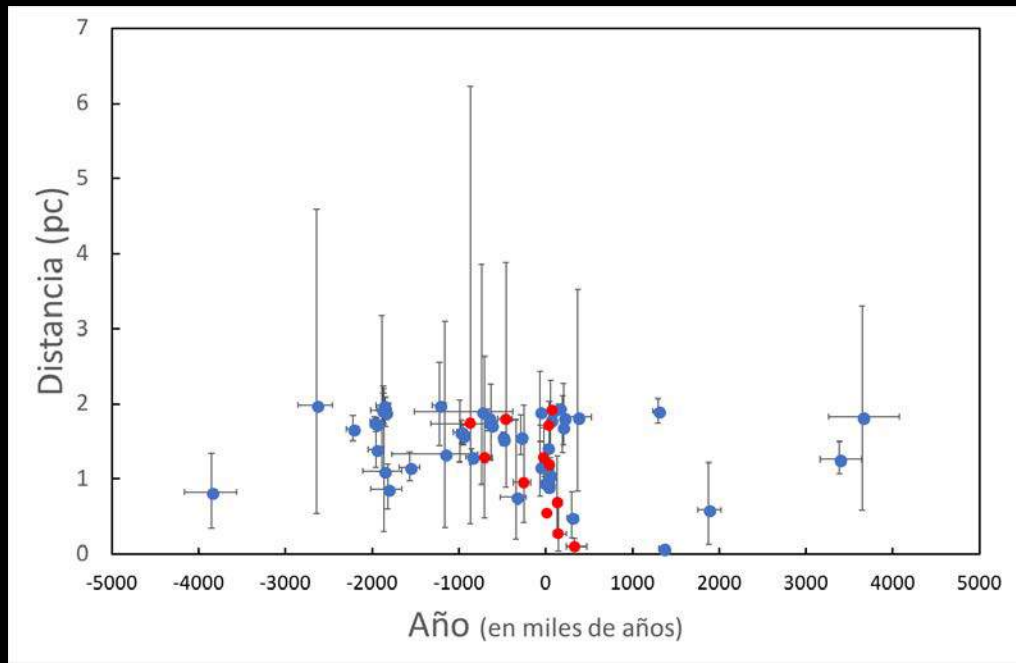
El mapa muestra todos los sistemas estelares a 14 años-luz del Sol (Sol), con excepción de las enanas marrones descubiertas después de 2009. Las estrellas dobles y triples se muestran "apiladas", pero la verdadera ubicación es la estrella más cercana al plano central.

Pasaje de estrellas cercanas

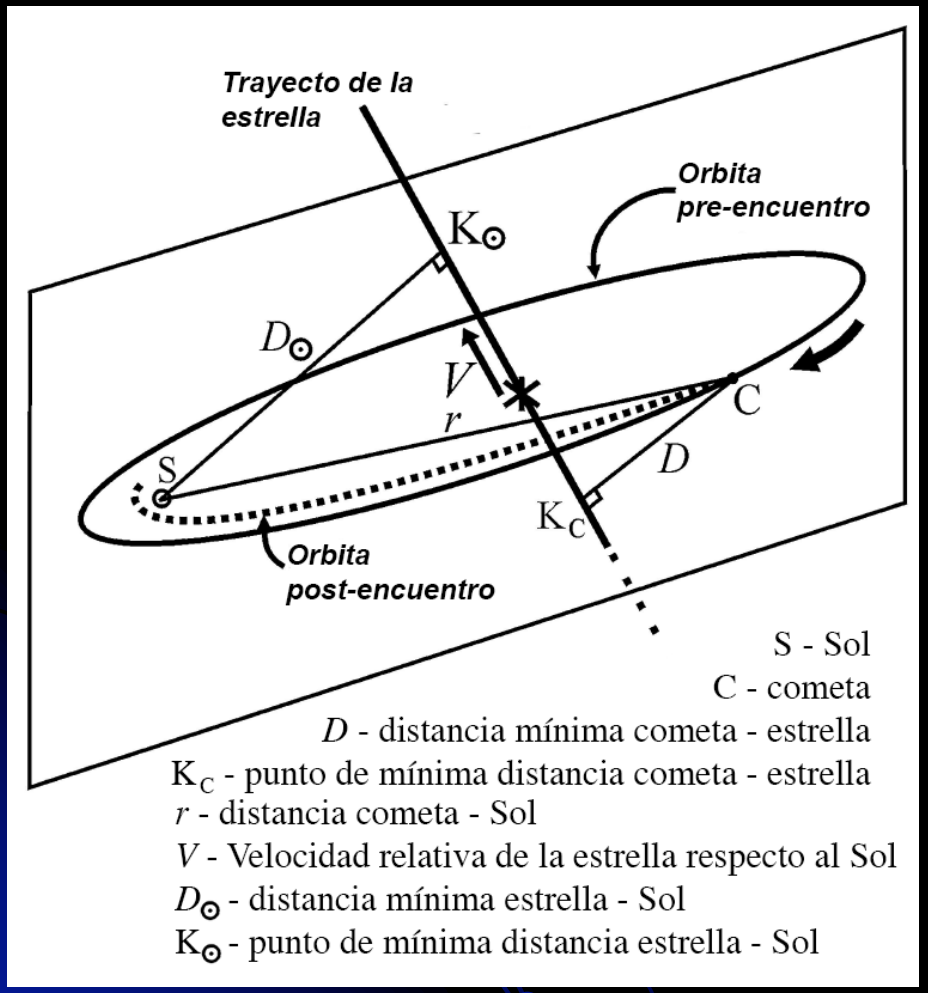
HIP #	HD #	Otro denominación	t.ph	d.ph	v.ph	d	Tipo espectral
			k.a.	pc	km/s	pc	
89825	168442	Gliese 710	1354	0.08	14	19	K7Vk
85605		TYC 2079-1800-1	332	0.103	21	6.8	K o M
63721	113447		146	0.273	34	4.6	F3V
91012	171278		302	0.486	364	110.3	F3IV/V
23311	32147		10	0.55	816	8.7	K3V
85661	158576		1877	0.593	47	89.2	F2IV/V
55606			133	0.689	920	120.2	G0
75159	136459		-344	0.761	368	120.5	F5V
103738	199951	γ Microscopii	-3852	0.826	18	70.2	G8III
22111	30223	TYC 4744-1394-1	-1821	0.87	121	225	K0III
71683	128620	α Centauri A	28	0.902	34	1.3	G2V
71681	128621	α Centauri B	28	0.912	30	1.3	K1V
70890		Proxima Centauri	27	0.94	33	1.3	M5Ve
3829		de van Maanen	-15	0.952	270	4.3	DZ7
42525			-252	0.955	60	14.6	F8

HIP # - Número en el catálogo Hipparcos
HD # - Número en el catálogo Henry Draper
TYC - Número en el catálogo Tycho
t.ph. – Tiempo de pasaje perihélico (en kiloaños)
d.ph – Distancia perihélica en el pasaje (en parsecs)
v.ph – Velocidad perihélica en el pasaje (en km/s)
d – Distancia actual de la estrella (en parsecs)
Tipo espectral – Ver Tabla 2
En rojo se destacan las estimaciones con un alto grado de incertidumbre.

Bailer-Jones (2017) estima que la tasa de encuentros de todos los tipos estelares dentro de los 5 pc de distancia al Sol es de 545±59 cada millón de años, y de 87±9 dentro de 2 pc.



Efectos del pasaje de estrellas cercanas



El cambio de velocidad del cometa respecto al Sol es proporcional a la masa de la estrella perturbadora e inversamente proporcional a la distancia mínima a la estrella y su velocidad relativa.

Efectos en la Nube de Oort

- El cambio en la velocidad del cometa puede producir que éste sea enviado hacia el Sistema Solar interior o sea eyectado hacia el espacio interestelar. El pasaje cercano de una estrella puede remover un número importante de cometas de la Nube de Oort, lo que puede implicar que en un corto período de tiempo un gran número de cometas sean enviados hacia el Sistema Solar interior.
- La órbita que adquiere un cometa mediante este proceso es una órbita cuasi-parabólica, con afelio en la Nube de Oort ($Q \sim 10^4$ AU) y perihelio que puede alcanzar la región planetaria ($q < 50$ AU), por lo que el semieje mayor de la órbita ($a \sim 5000$ AU). El tiempo que demorarían los cometas, luego del pasaje de la estrella, en llegar a la región planetaria, que sería de algunos cientos de miles a millones de años. Durante un lapso de tiempo de ese orden, la tasa de cometas que llegan desde la Nube de Oort podría aumentar en varios órdenes de magnitud, y con eso aumentar la frecuencia de impactos. Estamos frente a una lluvia de cometas.

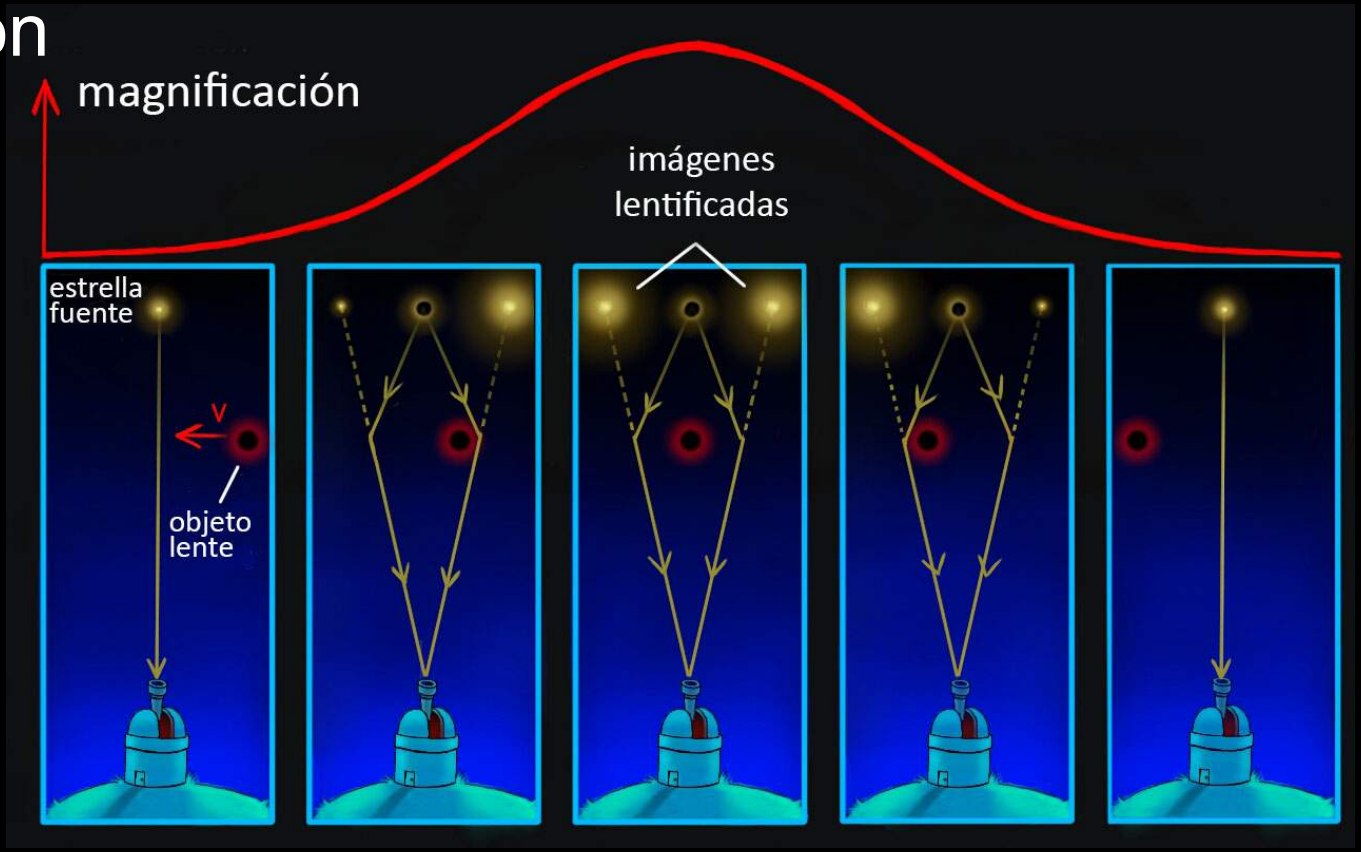
Efectos posibles

- Se estima que un encuentro que perturbe profundamente la Nube de Oort ($D_{\odot}$ ~ 2x10^4 AU) ocurre cada 5 millones de años.
- Se esperaría que la aproximación estelar más cercano durante la vida del Sistema Solar haya sido a una distancia de ~700 AU. Tal encuentro hubiera resultado en una gran perturbación de la nube de Oort y hubiera expulsado muchos cometas al espacio interestelar.
- Si la estrella ingresara en la región planetaria (distancia mínima < 100 UA), los planetas del Sistema Solar sufrirían perturbaciones de sus órbitas entorno al Sol. Las probabilidades de un evento de este tipo son muy bajas. Hay menos de 4% de probabilidad de que una estrella ingrese a menos de 100 UA en los próximos 7.6 Ga que quedan antes de la destrucción de la Tierra por la expansión del Sol.

Planetas errantes

Detección

Por lentificación gravitacional

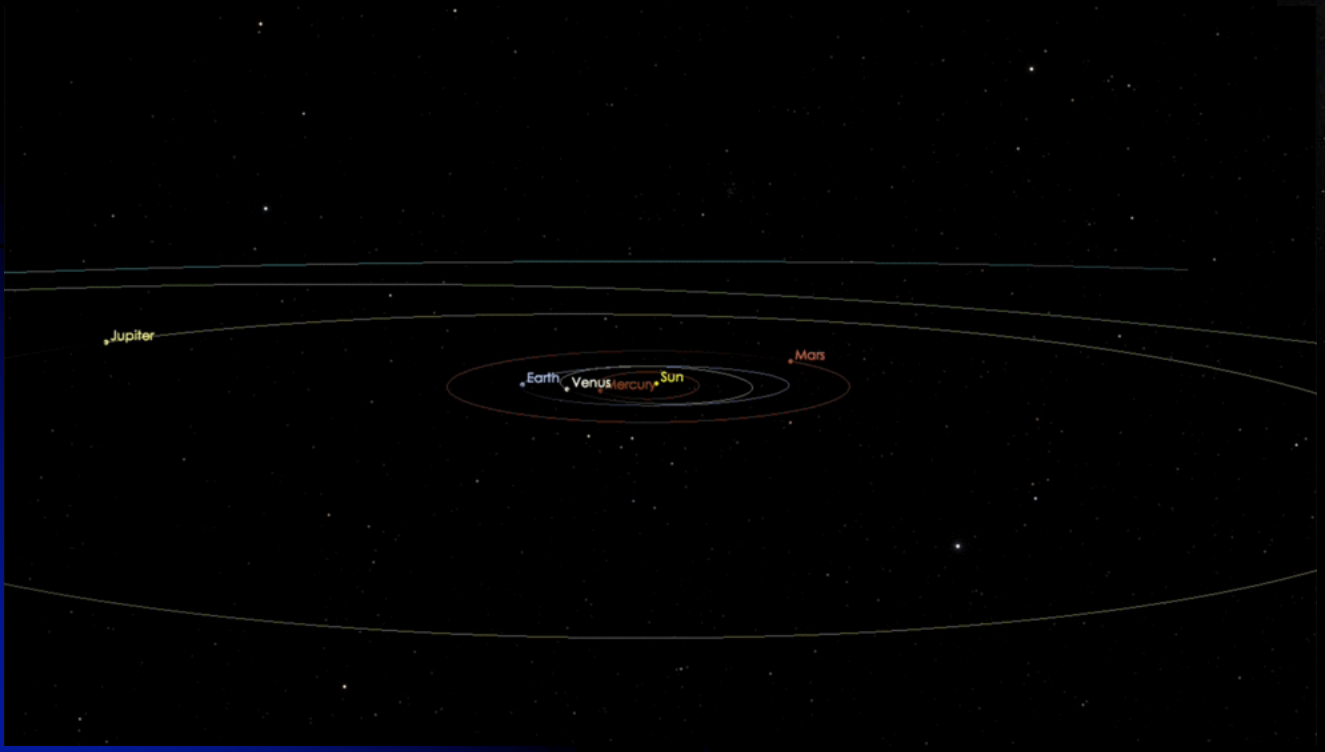


Por Imagen directa: Un planeta del tamaño de Júpiter cuya superficie fuera un espejo sería detectable por Gaia si se ubica a menos de 1000 UA (0.005 pc)

Previsibilidad

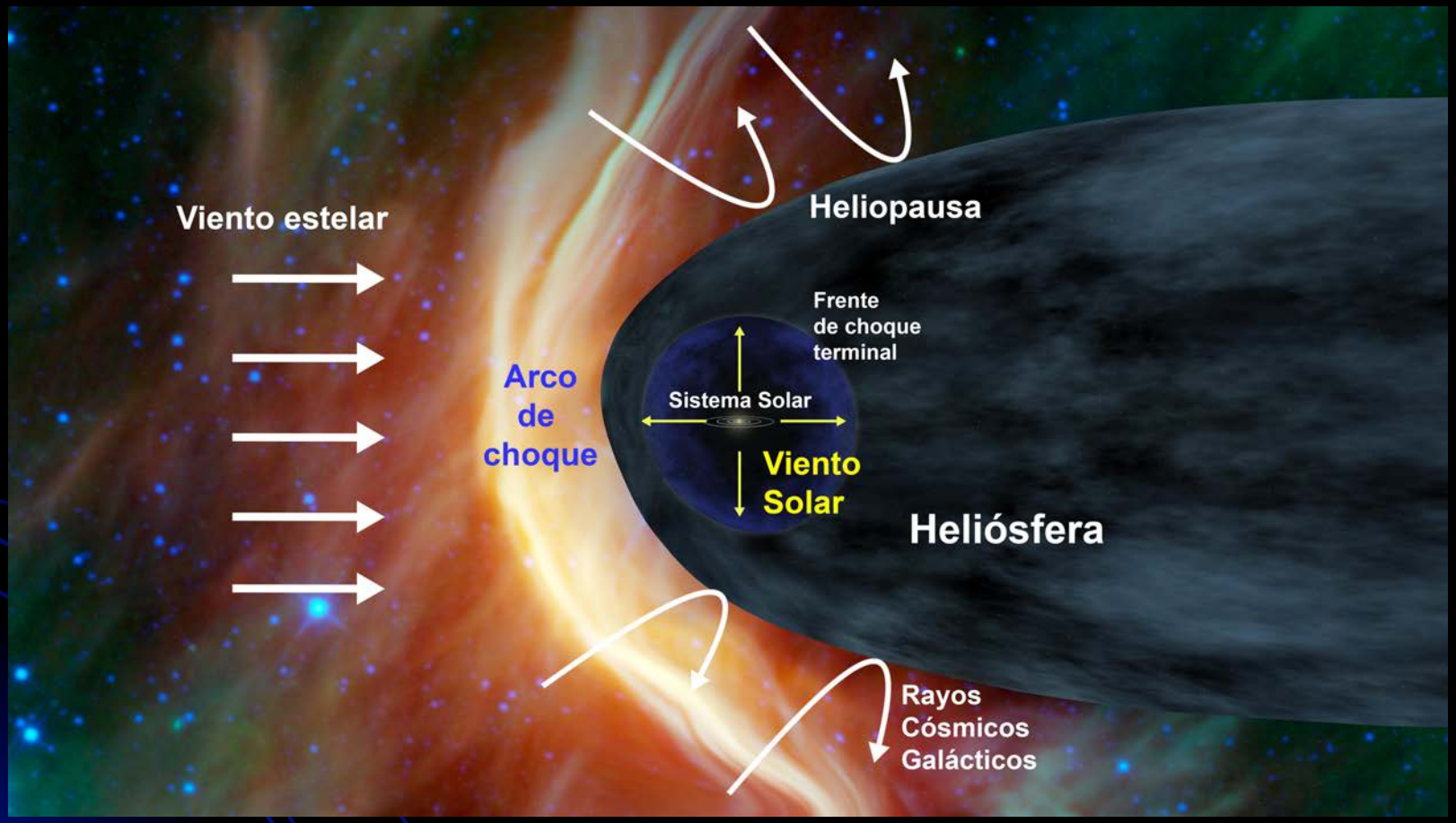
- Si el número de planetas errantes es comparable al número de estrellas de nuestra Galaxia, la probabilidad de una aproximación cercana (menos de 100 UA) es muy baja, aún en escalas de giga-años.

El caso de 1I/‘ Oumuamua



Burbuja local

Heliósfera


Viento estelar
Heliopausa
Frente
de choque
terminal
Arco
de
choque
Sistema Solar
Viento
Solar
Heliósfera
Rayos
Cósmicos
Galácticos

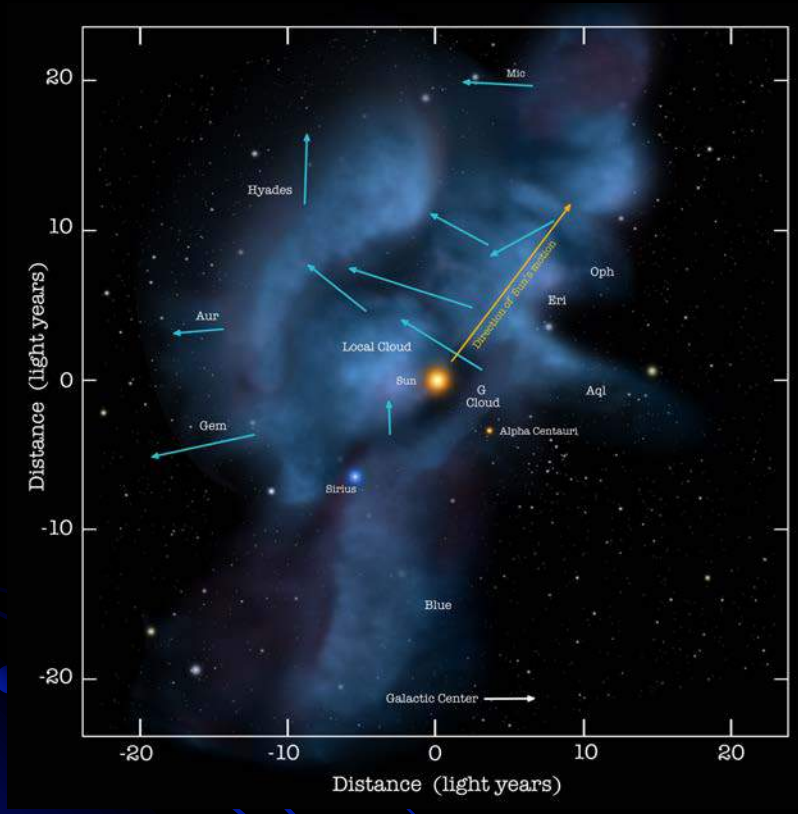
Interacción Medio Interestelar – Viento Solar

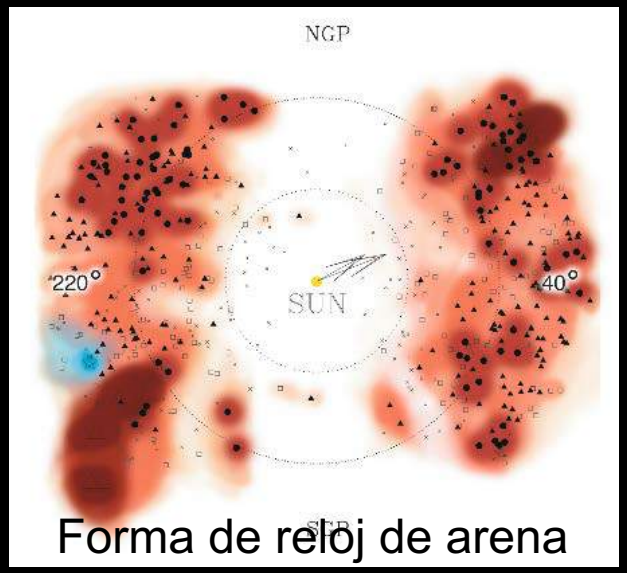
- El medio interestelar en nuestra Galaxia no es homogéneo. La densidad promedio es de 0.5 átomos / cm^3.
- El flujo del ISM ejerce presión sobre el viento solar. La presión total del ISM sobre el Sistema Solar se ve contrarrestada por la presión hidrodinámica (ram pressure) del viento solar.
- Presión hidrodinámica del ISM es $p_{ram} \propto n_H v_{ISM}^2$.
- Presión del viento solar $p_{vs} \propto 1/r^2$
- El radio de la heliósfera r_{HS} se calcula como la distancia a la cual la presión del viento solar se iguala a la presión del ISM ($p_{vs} = p_{ram}$). Para un viento solar constante, $r_{HS} \propto 1/\sqrt{p_{ram}}$.
- Actualmente el radio de la heliósfera se ubica a ~ 100 UA.

Variaciones del ISM

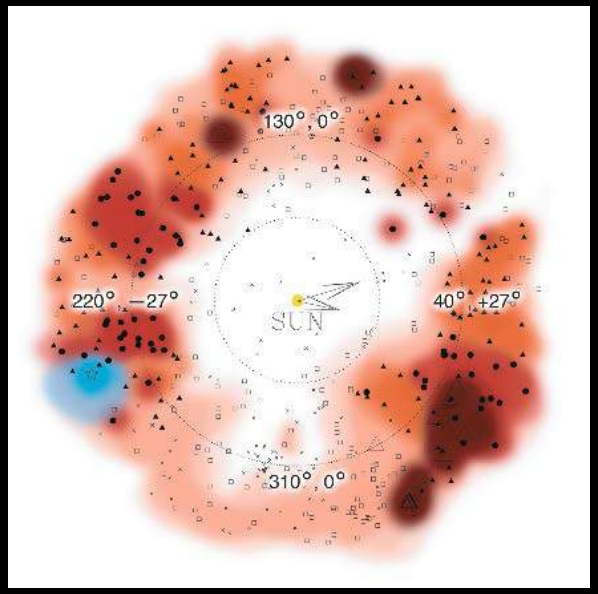
- Un medio interestelar de alta velocidad y alta densidad aumenta la presión hidrodinámica del ISM, y genera una heliósfera pequeña.
- En un encuentro con ISM denso o muy rápido, los flujos de partículas como neutrones, rayos cósmicos y polvo aumentan notablemente a la distancia de la órbita terrestre. El paso del remanente de una explosión de supernova cercana puede comprimir la heliósfera a un tamaño que permite que el material interestelar, incluido el material eyectado de la supernova, llegue directamente a la Tierra.
- Cuando el Sol pasa a través de una región poco densa y altamente ionizada, los neutrones, los iones capturados y los rayos cósmicos anómalos estaban completamente ausentes en la región de la Tierra.

Burbuja Local

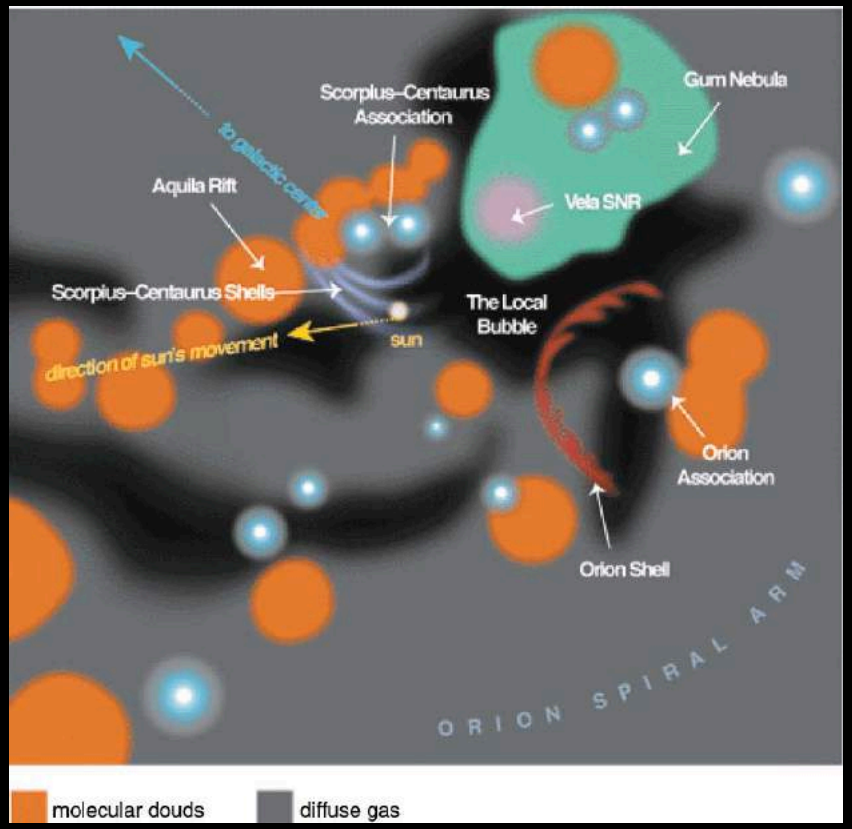




Forma de reloj de arena



El Sol se ubica en el presente dentro del brazo espiral de Orión, pero al interior de una cavidad, una burbuja, donde la densidad es muy baja.
Se denomina a esta región como la Burbuja Local. La densidad en la Burbuja Local es menos de 1/10 de la densidad promedio en la Galaxia ($n_H \lesssim 0.05$ at/cm^3).



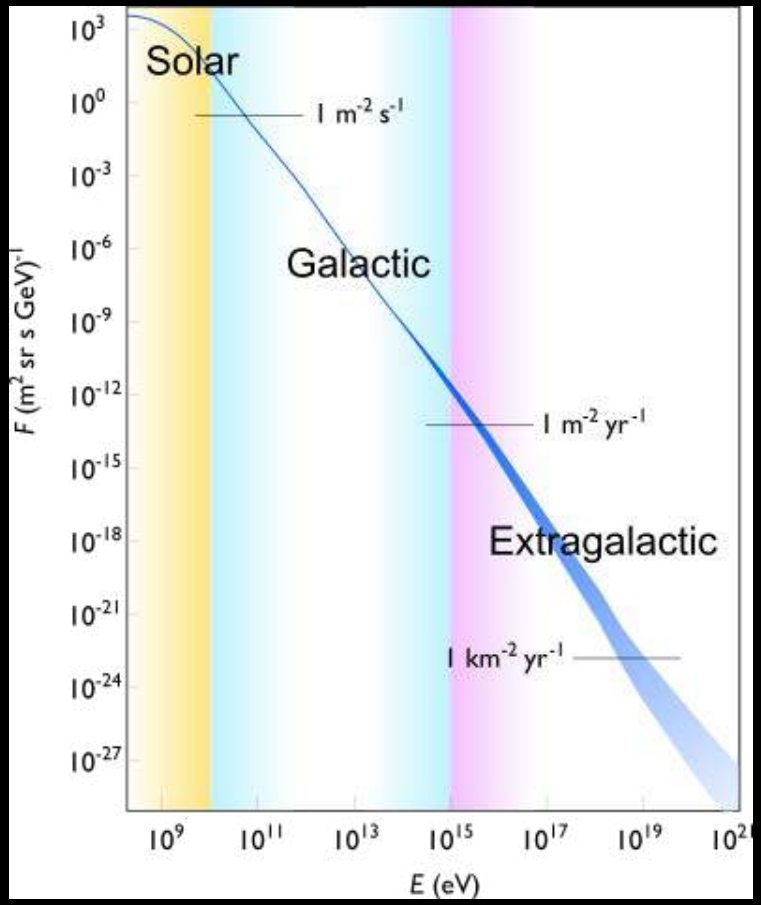
Se cree que la Burbuja Local es el resultado de explosiones de supernovas ocurridas hace algunos pocos Maños, que dejaron una cavidad de gas ionizado caliente y empujaron la mayor parte de la materia evacuada, junto con el campo magnético congelado, formando una cáscara de gas frío y neutro y polvo. El gas al interior de la burbuja esta muy caliente (~ millón K), lo que produce una emisión en rayos X.

Salida de la Burbuja Local

- El Sol ha estado en el espacio casi vacío del interior de la Burbuja Local durante varios millones de años. En algún momento entre 40,000 y 150,000 años atrás, el Sol comenzó a encontrar nubes de material más denso. Estas nubes provienen de la dirección de la Asociación O-B Scorpius-Centaurus.
- Durante los últimos 40,000 años, el Sol se encontró con un flujo de ISM cálido de densidad intermedia (n_H ~ 0.3 at/cm^3) y a una temperatura T ~ 7.000 K. Esta región es denominada la Nube Interestelar Local (Local Interestelar Cloud – LIC). El LIC al igual que el resto de las nubes cercanas se mueven a una velocidad relativa al Sol de ~28 km/s.
- Dentro de ~4,000 años, el Sol saldrá del LIC. La siguiente nube que el Sol probablemente atraviese es la nube G o la nube Apex. Estas nubes no son homogéneas, con regiones de densidad más de 15 veces la del LIC, o más de cien de veces superior a la de la Burbuja Local.
- Es de esperar que la heliósfera sufrirá una contracción significativa en los próximos miles de años, alcanzando distancias comparables a los planetas exteriores. Lo que aumentará el flujo de partículas como neutrones, rayos cósmicos y polvo interestelar.

Flujo de rayos cósmicos

- De los rayos cósmicos primarios, ~ 90% son protones; ~9% son partículas alfa; ~1% son núcleos de elementos más pesados; y ~ 1% son electrones solitarios.
- Un aumento del flujo de rayos cósmicos galácticos y extragalácticos como producto de una contracción de la heliósfera, aumentaría el flujo de los rayos cósmicos mas energéticos (>1GeV) .
- Los rayos cósmicos ionizan las moléculas de nitrógeno y oxígeno en la atmósfera, lo que conduce a la pérdida de ozono yla producción continua de una serie de isótopos inestables radioactivos.
- Aumentan los desperfectos en dispositivos electrónicos.



Movimiento del Sol en la Galaxia

Pasaje por los brazos espirales

- La frecuencia con la que el Sol atraviesa los brazos espirales depende de la velocidad angular relativa alrededor de la Galaxia, entre el Sistema solar, con velocidad angular ($\Omega_{\odot}$) y la velocidad de los brazos espirales (Ω_{BE}). El período entre dos pasajes consecutivos se calcula como: $\Delta T = 2\pi \,/\, m\,(\Omega_{\odot} - \Omega_{BE})$, donde *m* es el número de brazos espirales.
- Fuera del círculo solar hay cuatro brazos; mientras que dentro del círculo solar es más incierto si los brazos son 2 o 4. Considerando una velocidad respecto de los brazos de Perseus y Carina- Sagittarius de $(\Omega_{\odot} - \Omega_{BE}) \sim 11\ km\ s^{-1} kpc^{-1}$, y asumiendo 4 brazos en la Galaxia, se estima que cada ~ 140 Maños el Sistema Solar cruza un brazo espiral. Se estima que el ancho de los brazos espirales a la distancia del Sol del centro galáctico es de ~3 *kpc* y que la distancia entre brazos es algo mayor (10 *kpc*). Un pasaje por un brazo espiral duraría unos ~30 Maños y otros ~110 Maños hasta un nuevo pasaje.
- El Sistema Solar se ubica aproximadamente a mitad de camino entre dos pasajes por brazos espirales, siendo su último pasaje hace ~50 Maños por el brazo de Carina-Sagittarius, y el próximo en ~60 Maños por el brazo de Perseus.

Consecuencia de Pasaje por los brazos espirales

- Los pasajes por los brazos espirales tienen una duración comparable con la vida de una estrella masiva tipo O-B, por lo que hay una mayor probabilidad de que ocurra una explosión de supernovas durante estos períodos.
- Los brazos espirales de la Galaxia son ricos en gas y polvo, bajo la forma de hidrógeno atómico neutro (regiones HI) y nubes frías y densas de hidrógeno molecular (H_2). Las más grandes se llaman Nubes Moleculares Gigantes (GMCs) con masas ~10^5 $M_\odot$ y diámetros de ~50 *pc*. La separación media entre las GMCs, a la distancia del Sol al centro galáctico, es ~500 pc. La frecuencia de los encuentros penetrantes del Sistema Solar con las GMC es bastante baja: entre 1 y 10 durante la edad del Sistema Solar.
- Durante un encuentro penetrante con una GMC, el efecto dinámico más relevante ocurre durante las aproximaciones cercanas a los grumos masivos, lo que podría inducir una lluvia de cometas provenientes de la Nube de Oort.
- Otro efecto posible asociado al ingreso del Sistema Solar en una densa GMC sería el cambio climático dramático causado por el polvo interestelar que se acumula en la atmósfera de la Tierra. La capa de polvo estratosférico proveniente de partículas interestelares podría proporcionar un oscurecimiento de la superficie de la Tierra generando una era de hielo moderada.

Pasaje del Sol por el plano de la Galaxia y las fuerzas de marea galácticas

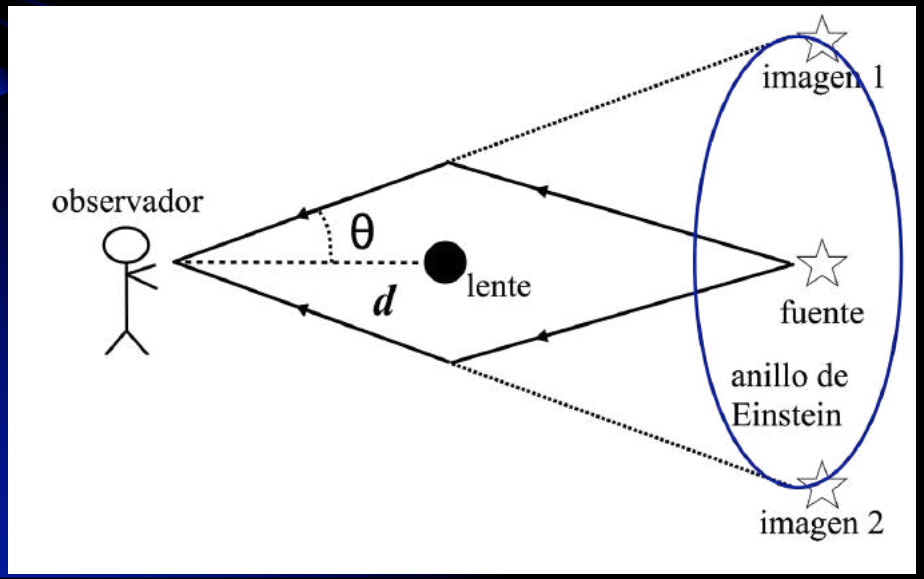
- El movimiento del Sol en la Galaxia está determinado por la acción del potencial gravitatorio debido al disco galáctico, al bulto central y a la materia oscura. El potencial no es kepleriano (debido un cuerpo central masivo).
- Consideremos dos cuerpos como el Sol y un cometa lejano de la Nube de Oort, la diferencia de fuerza gravitacional debida al potencial galáctico, se denomina como marea galáctica. La acción de la marea galáctica determina el límite exterior de la Nube de Oort.
- El potencial del disco galáctico depende de la altura de la estrella respecto al plano de la Galaxia, teniendo su valor máximo cuando la estrella se ubica sobre el plano.
- ,El Sol cruza el plano de la Galaxia cada ~35-40 millones de años; aunque anteriormente se han publicado valores entre 26 y 30 millones de años.
- Durante los pasajes por el plan de la Galaxia, la Nube de Oort sufre una mayor perturbación; lo que podría conducir a la eyección de un mayor número de cometas tanto hacia el espacio interestelar como hacia el interior del Sistema Solar. Se podría esperar durante el período de algunos millones de años un aumento del flujo de cometas proveniente de la Nube de Oort.

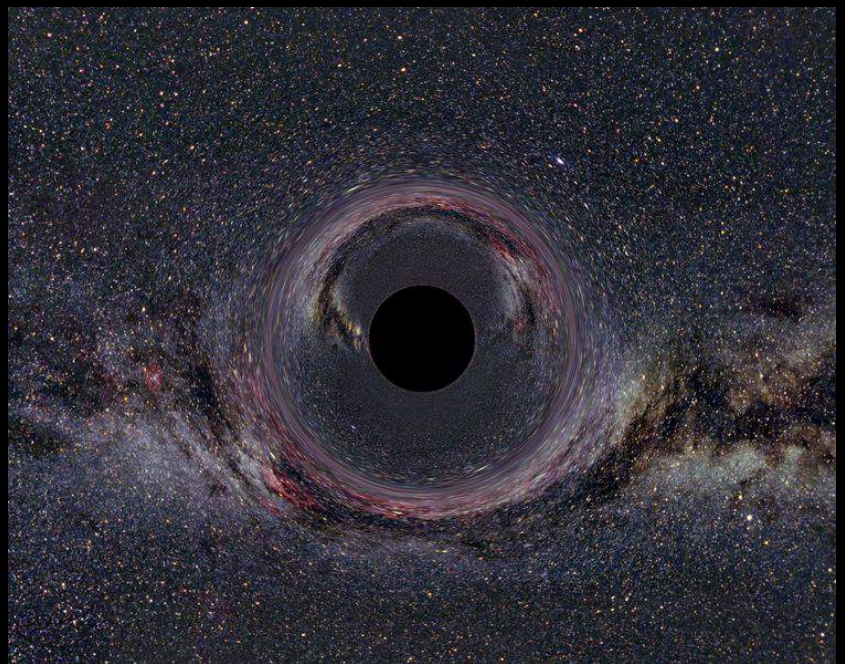
Consecuencias de los pasajes por el plano de la Galaxia

- Ha habido intentos de encontrar una periodicidad en el registro extinciones masivas y de edades de cráteres de impacto con períodos entre 26 y 30 millones de años, pero las estadísticas de correlación son dudosas.
- Las simulaciones numéricas muestran que, si bien existe un aumento en el número de cometas eyectados de la Nube de Oort durante el pasaje por el plano galáctico, el aumento del flujo se dispersa en un largo período de tiempo, lo que dificultaría su identificación en el registro geológico.
- El último pasaje por el plano galáctico ocurrió hace 2-3 millones de años, por lo cual faltan mas de 30 millones de años para un próximo pasaje.

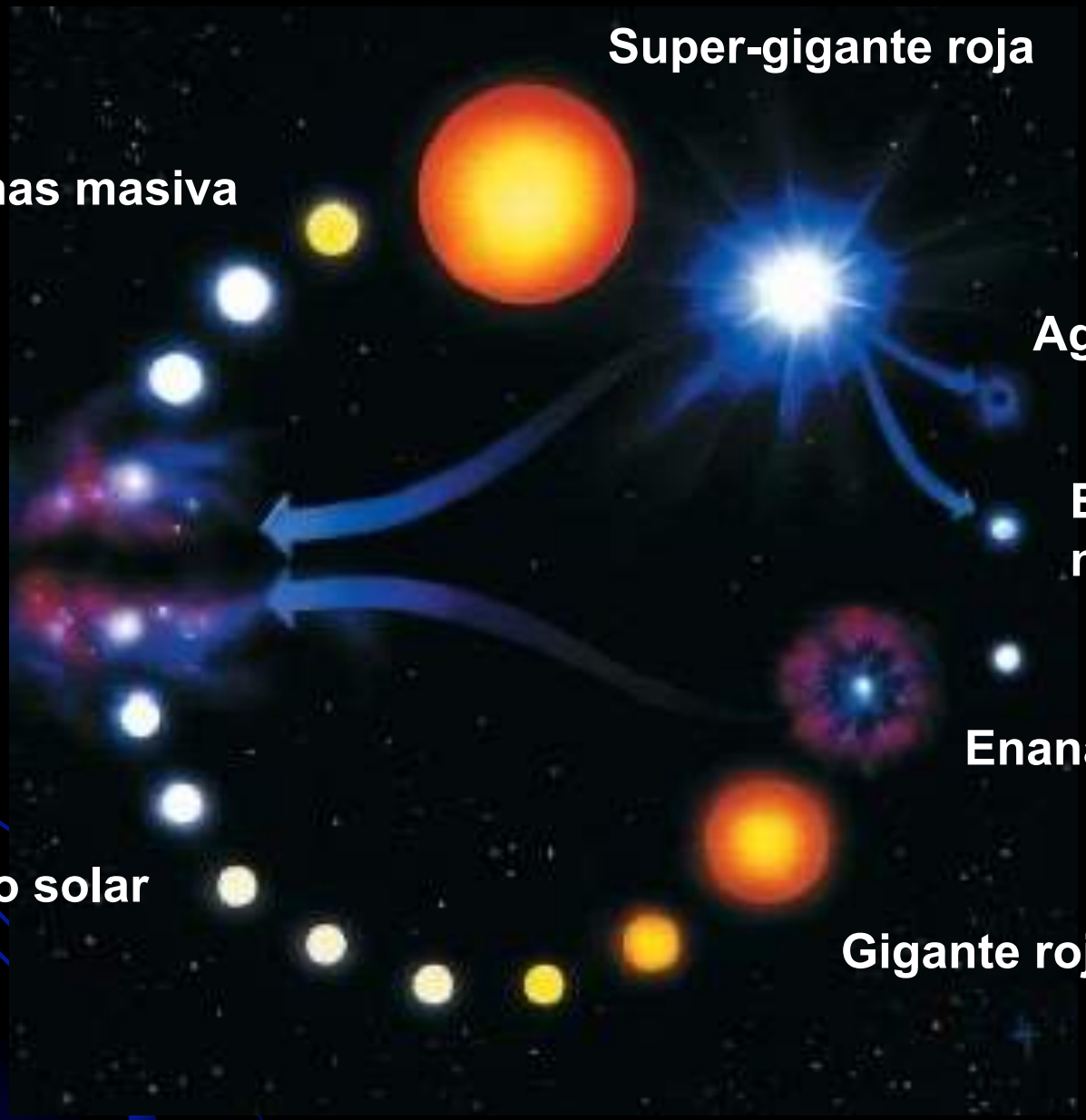
Agujeros negros a la deriva

- El agujero negro más cercano conocido es V616 Monocerotis (A0620-00) que forma parte de una binaria de rayos X. Se ubica a ~1000 *pc* y tiene una masa de 11 $M_{\odot}$. Este agujero es tan distante que no tendría ningún efecto sobre nuestro Sistema Solar.
- Otra forma de detección remota de un agujero negro puede ser a través de los efectos que causa su fuerte campo gravitacional: lente gravitacional.
- la perturbación gravitatoria de los agujeros negros aislados resulta un peligro mucho menor que el resto de las estrellas de la Galaxia.

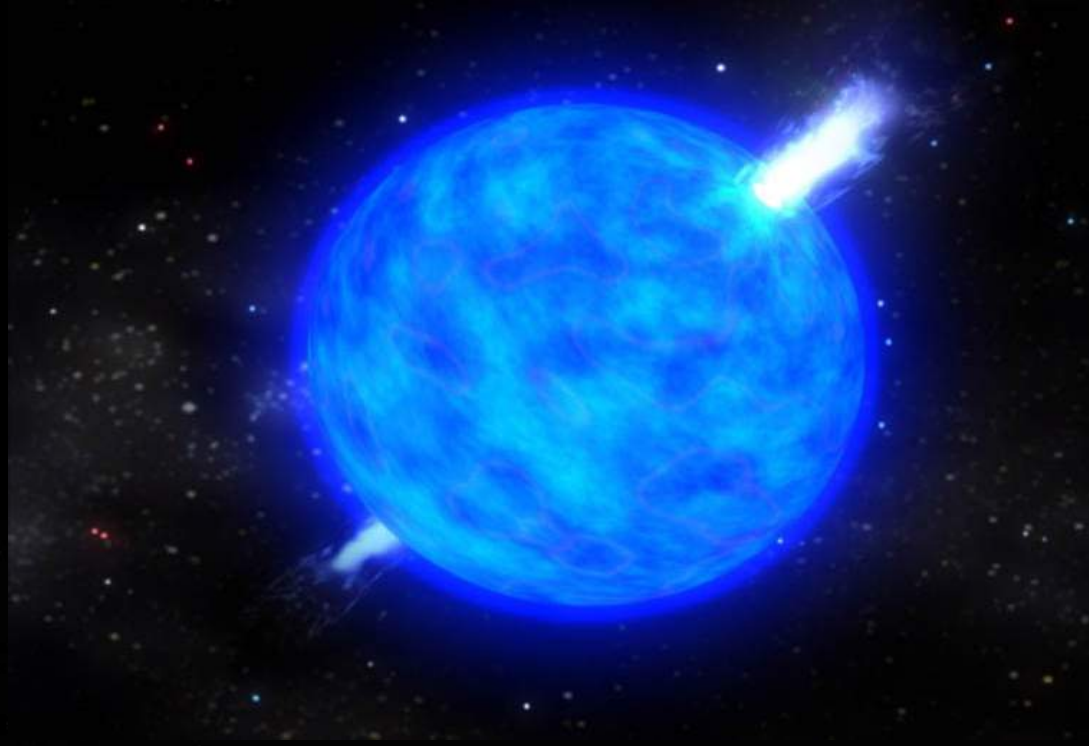


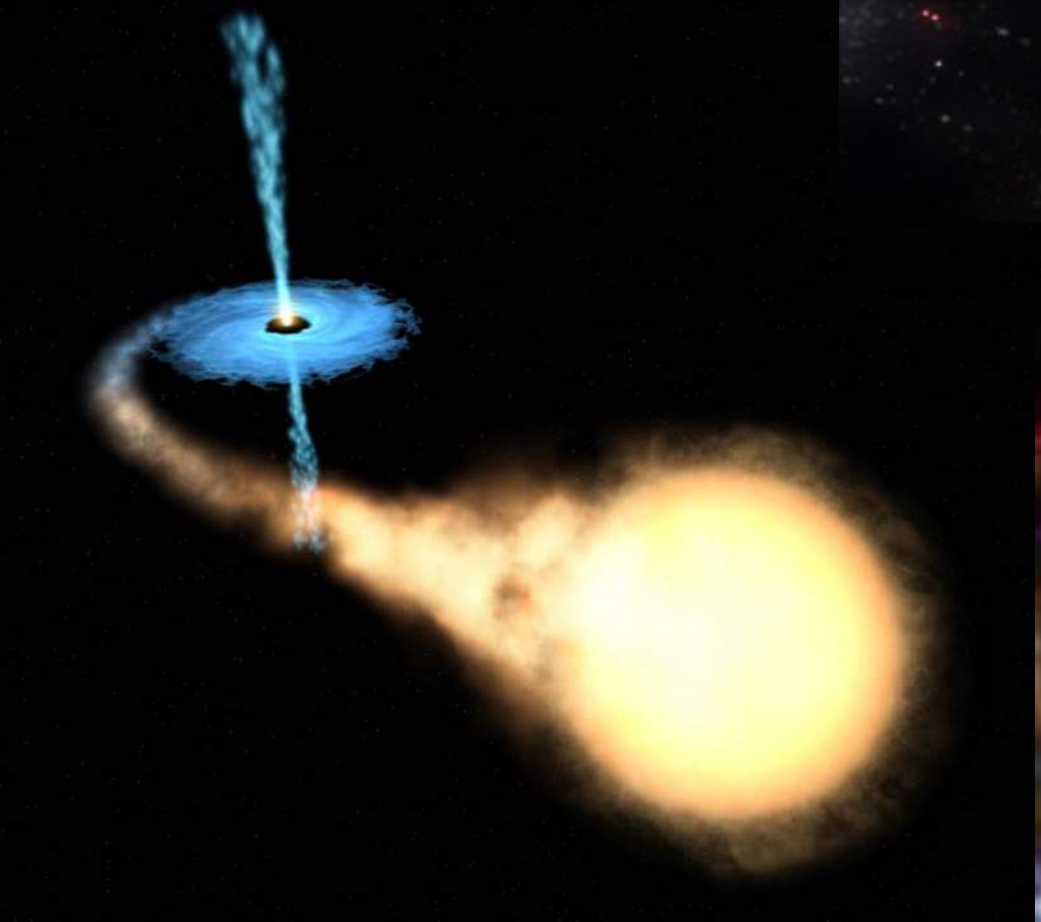


Supernova cercanas y destellos de rayos gamma


Super-gigante roja
Estrella mas masiva
Agujero negro
Estrella de neutrones
Enana blanca
Estrella tipo solar
Gigante roja

Agujeros negros con discos de acreción que explotan

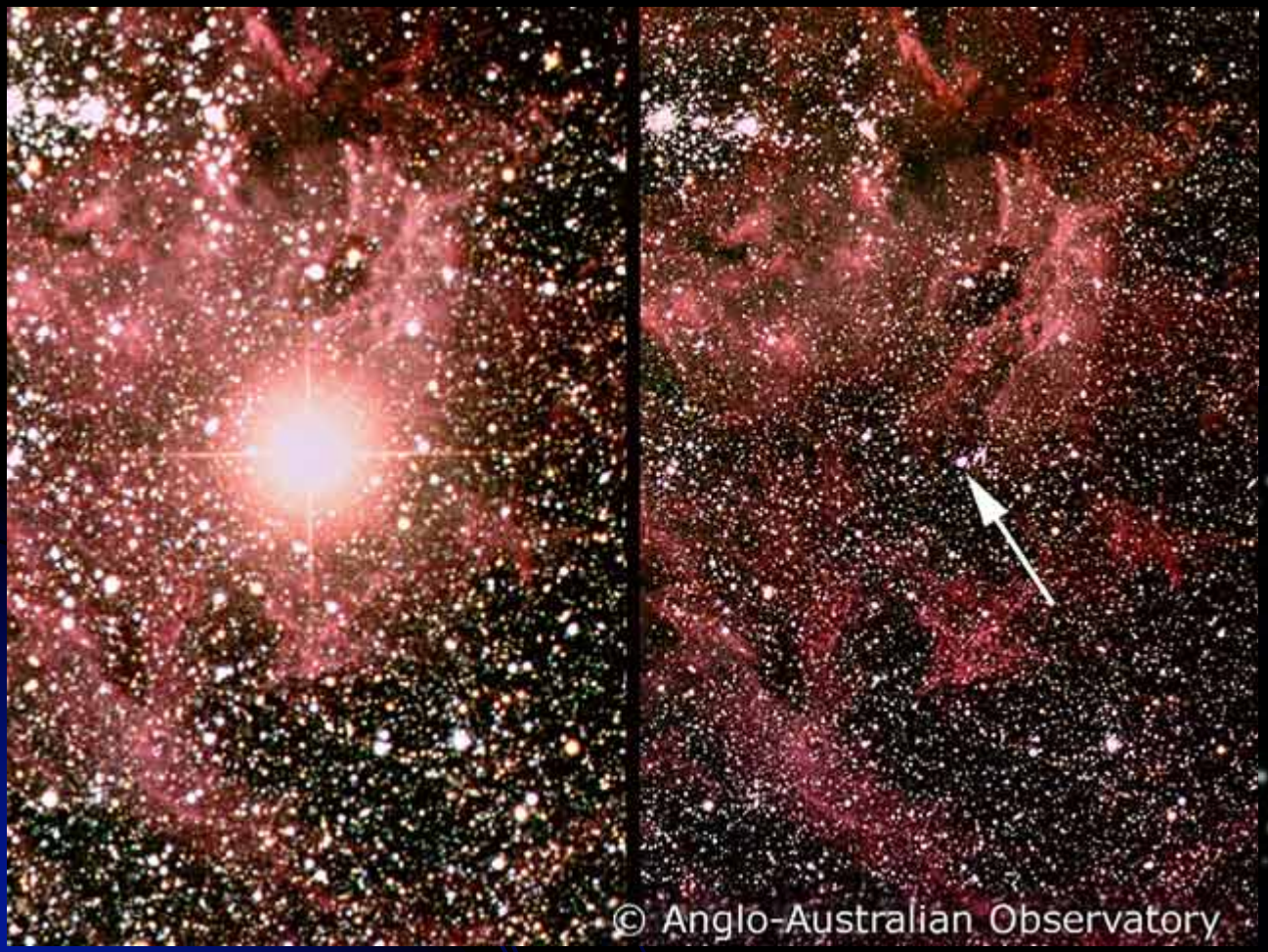




SN1987A en la nebulosa de Magallanes

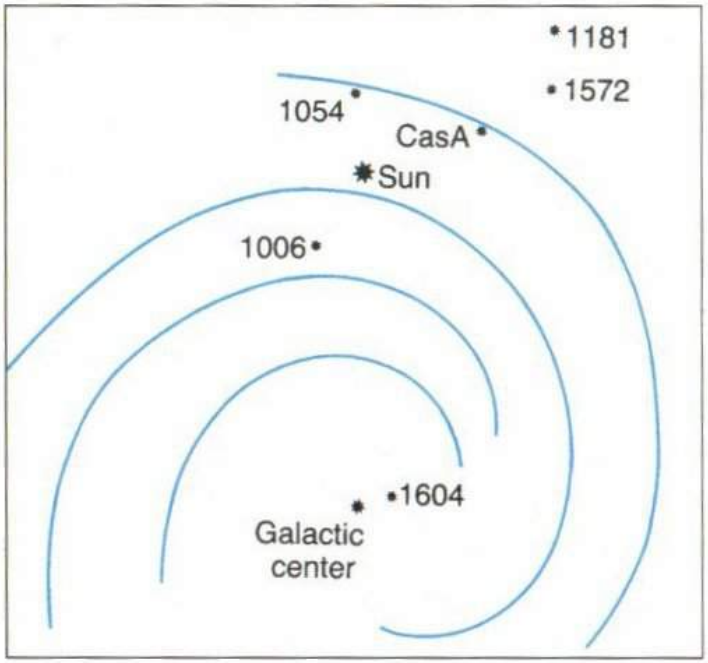
Después

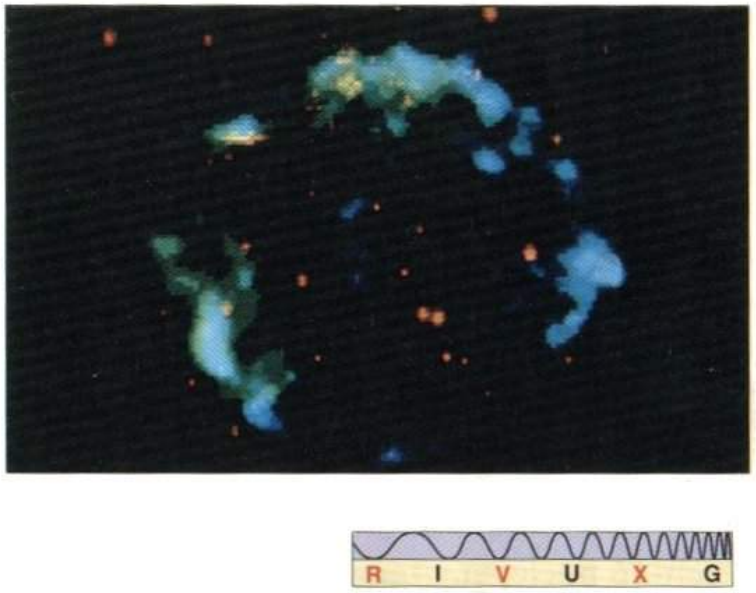
Antes



en 1994

Supernovas cercanas





1 supernova en un radio de 100 pc cada 500.000 años
1 supernova en la Galaxia cada 20-150 años

Geminga
(150 pc, explotó 300 mil años atrás)

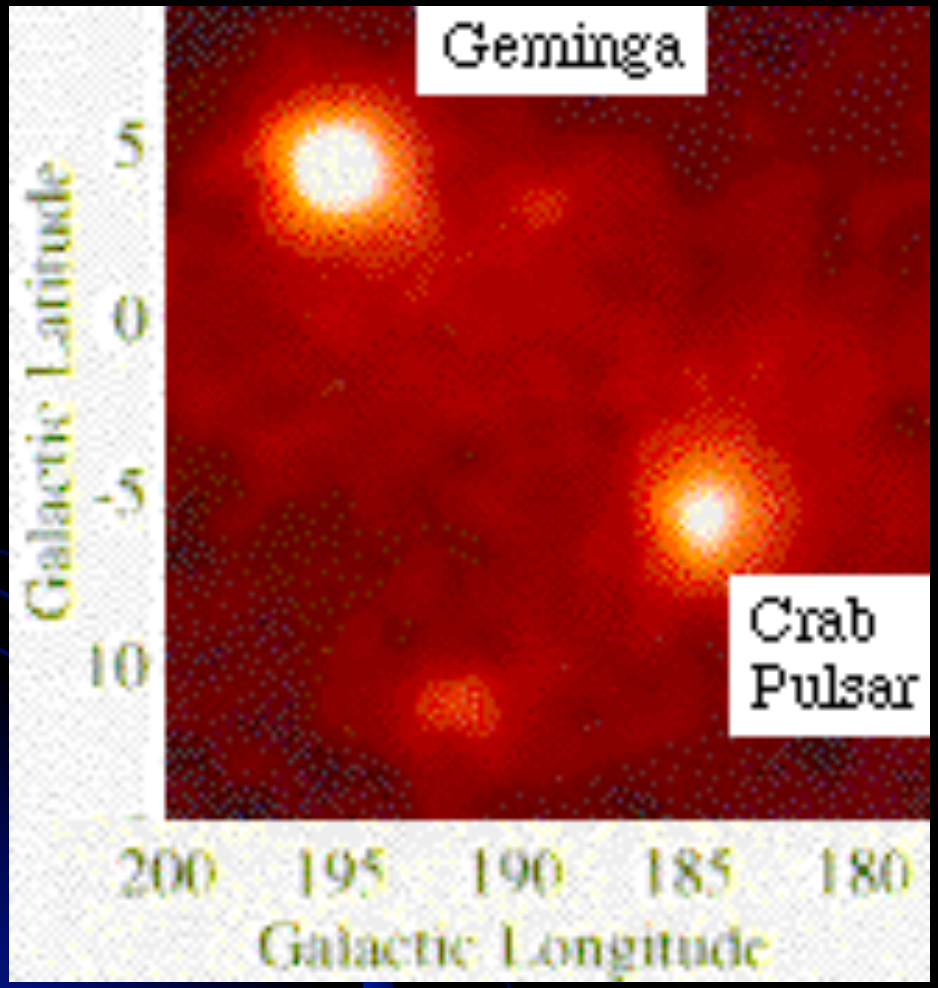


Imagen en rayos γ (2da fuente en el cielo)

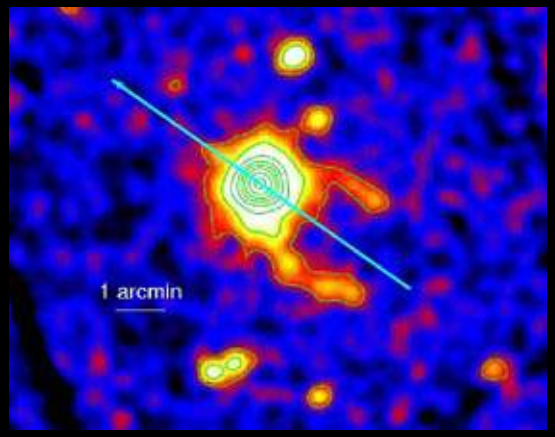
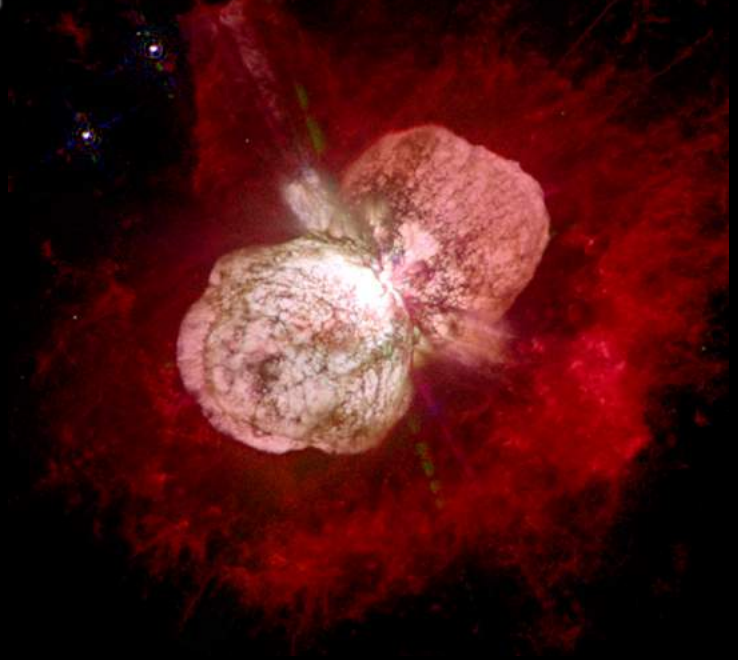


Imagen en rayos X

Eta Carina - hipernova

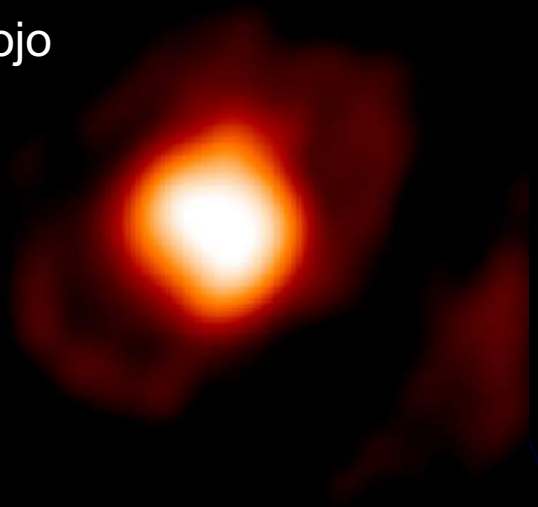
Rayos X

Optico

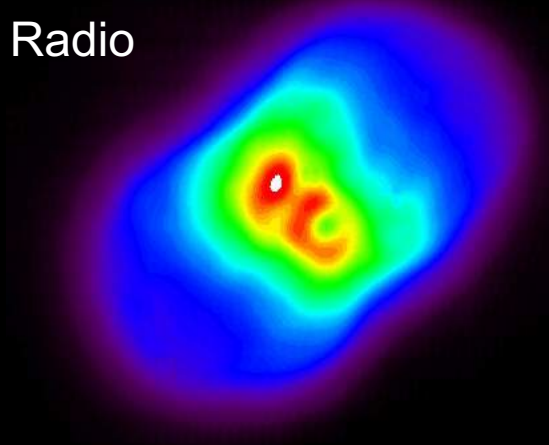


Estrella próxima a una explosión de supernova pero a 7000 años luz que produciría un destello de rayos gamma

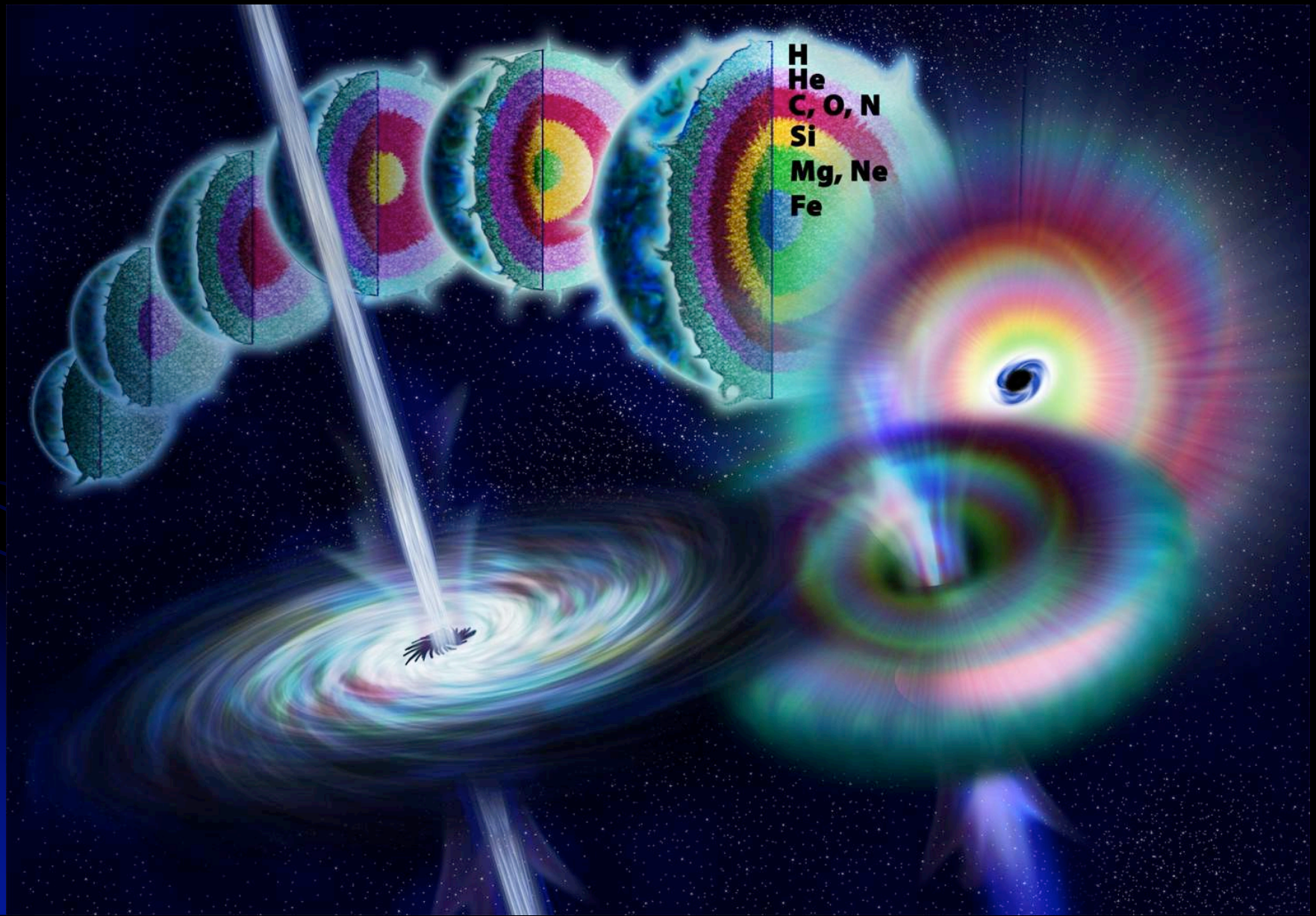
Infrarrojo

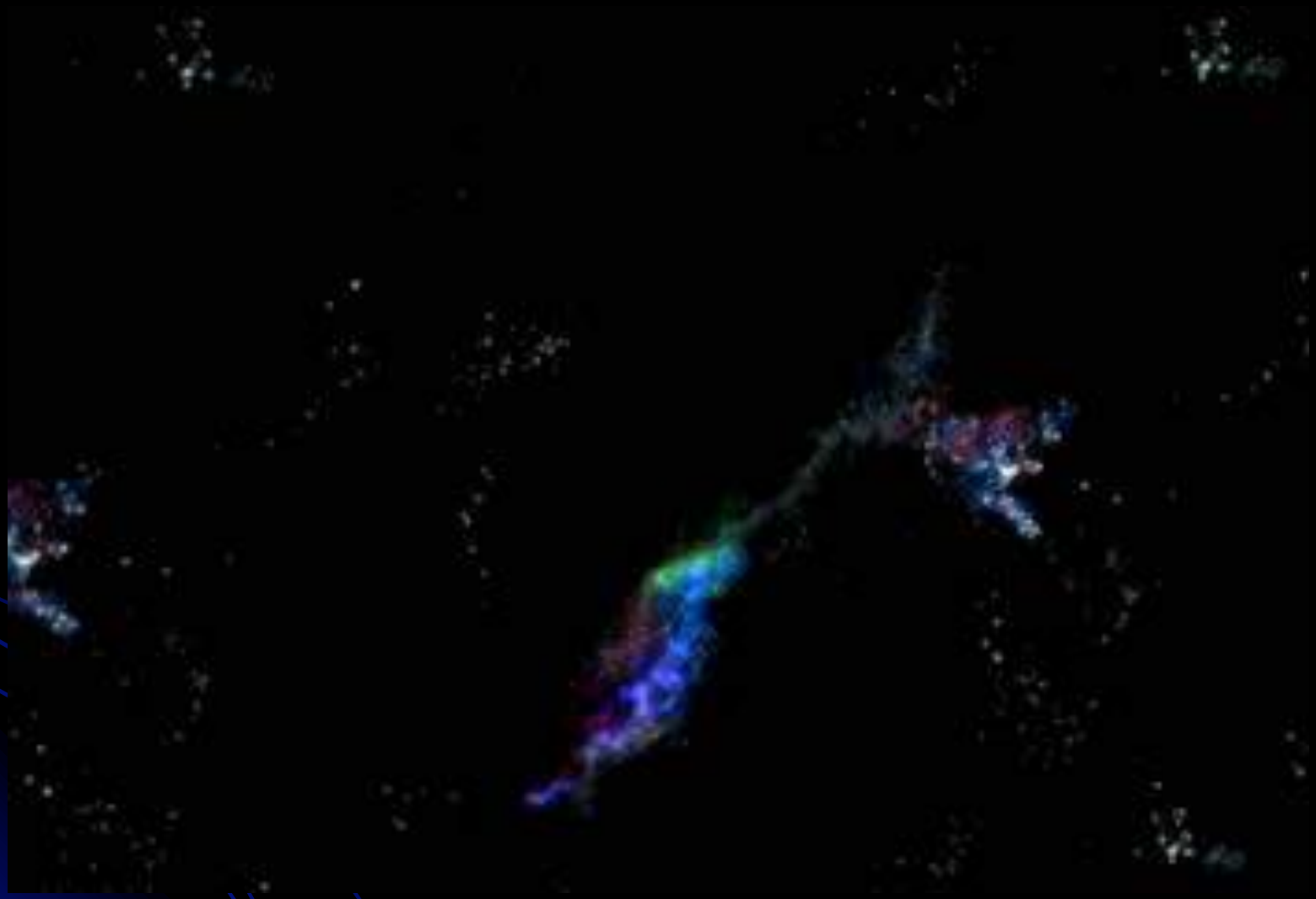


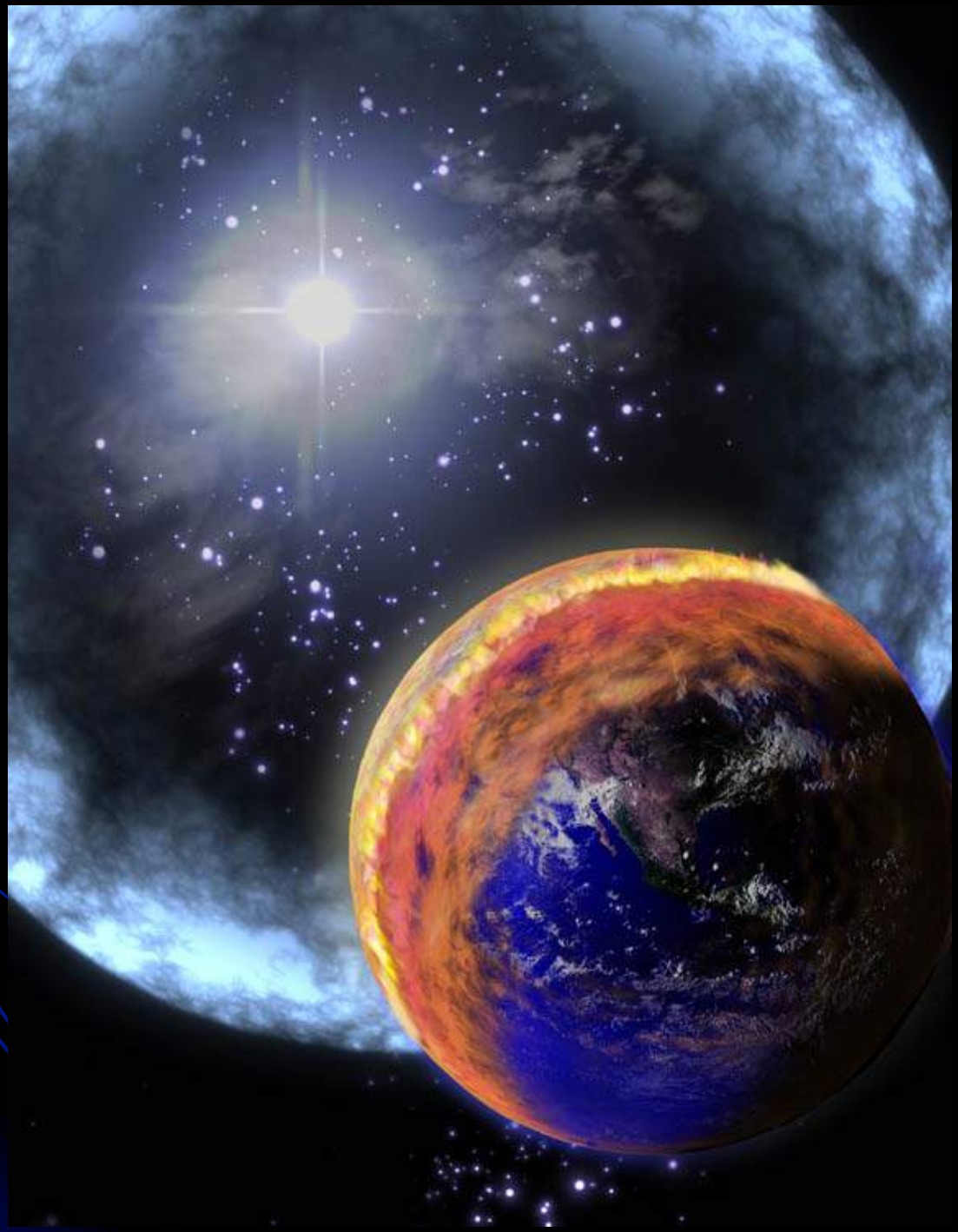
Radio



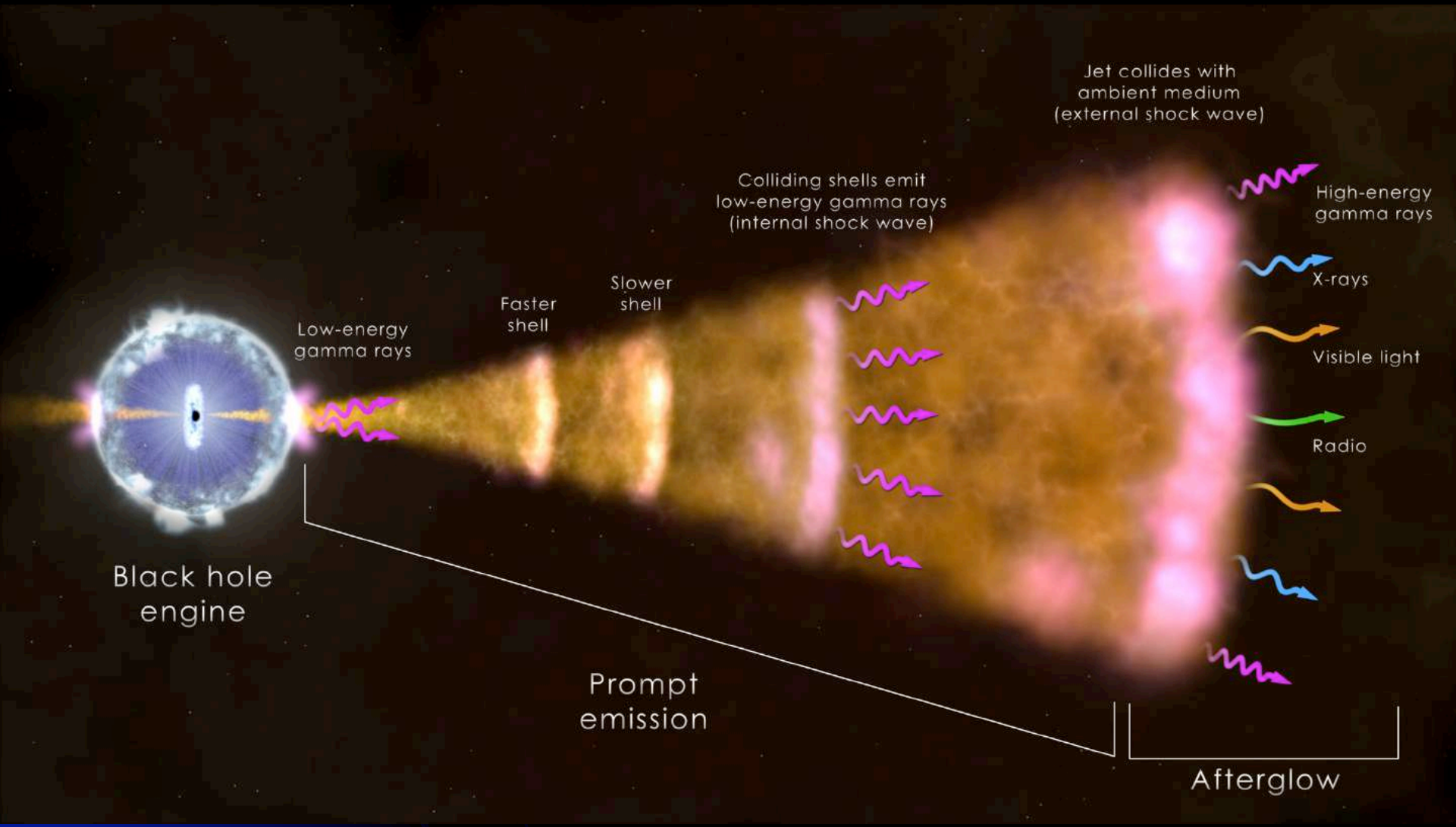
Gamma Ray Burst







Efecto de explosión de Rayos Gamma



Candidatos a progenitor de Supernova cercanas					
Estrella	Constelación	Distancia presente (pc)	Clase espectral	Masa	Tipo SN
IK Pegasi	Pegasus	50	A8m:/DA	1.65/1.15[a]	Ia
Spica	Virgo	80	B1III-IV/B2V	11/7[a]	II
Alpha Lupi	Lupus	140	B1.5III	10	II
Antares	Scorpius	170	M1.5Iab-b/B2.5V	12/7[a]	II o Ia
Betelgeuse	Orion	200	M2Iab	8–17	II
Pi Puppis	Puppis	250	K3Ib	12	II
Rigel	Orion	260	B8Ia	23	II
Gamma^2 Velorum	Vela	300	WC8	9	Ib

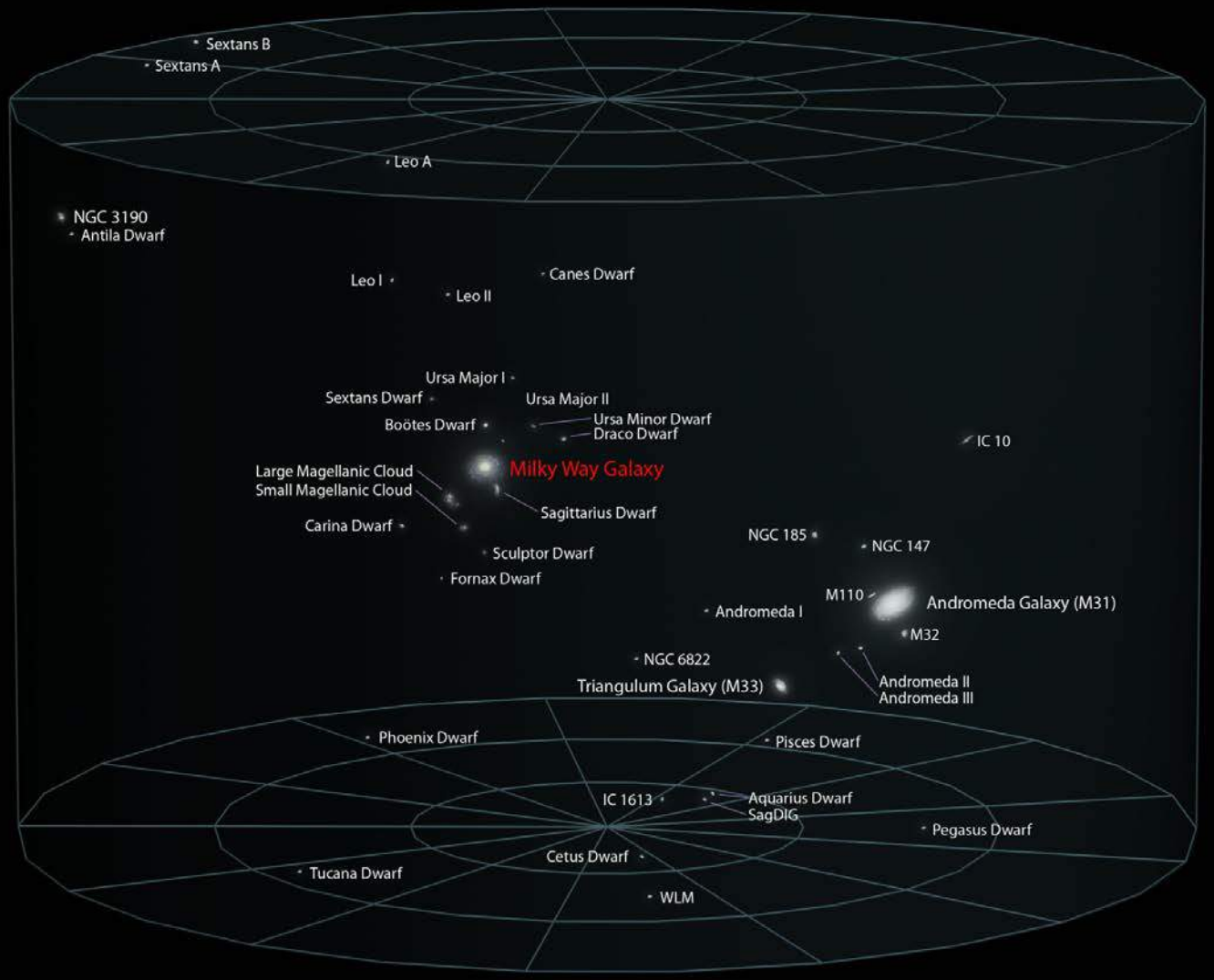
Candidatos a hipernova					
Nombre	Asociación	Masa	Distancia (kpc)	Clase espectral	Sistema
Cygnus OB2-516	Cygnus OB2	100	1.4	O5.5V	Binaria?
Cygnus OB2-12	Cygnus OB2	110	1.6	B5Ia	Binaria
HD 93129 A	Carina OB1	110	2.3	O3.5V	Triple
Eta Carinae A	Carina OB1	100 - 200	2.3	O	Doble
WR25A	Carina OB1	110	2.3	WN	Binaria

Consecuencias de una Explosión de Rayos de Gamma

- En hemisferio expuesto
  - Intenso flujo de radiación de alta energía por algunos segundos
  - Ionización de la atmósfera
  - Posible pérdida de atmósfera
  - Destrucción de ozono
- A nivel global
  - Lluvia ácida
  - Reducción de ozono
  - Destrucción de plancton

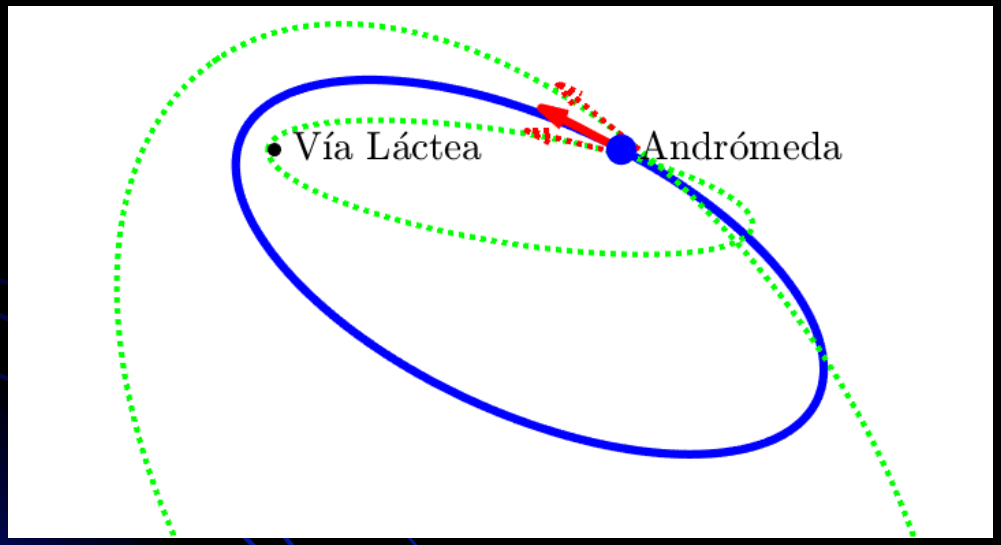
AMENAZAS EXTRAGALACTICAS

Local Galactic Group



Colisión de la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda

- Andrómeda se ubica a una distancia de 770 ± 40 *kpc* de la Vía Láctea.



Estimación parámetros de la colisión

	Distancia pericéntrica (kpc)	Tiempo para mínima distancia (Gaños)	Velocidad en pericentro (km/s)
Nominal	79	4.0	557
Mínimo	14	3.5	1346
Máximo	238	4.7	314

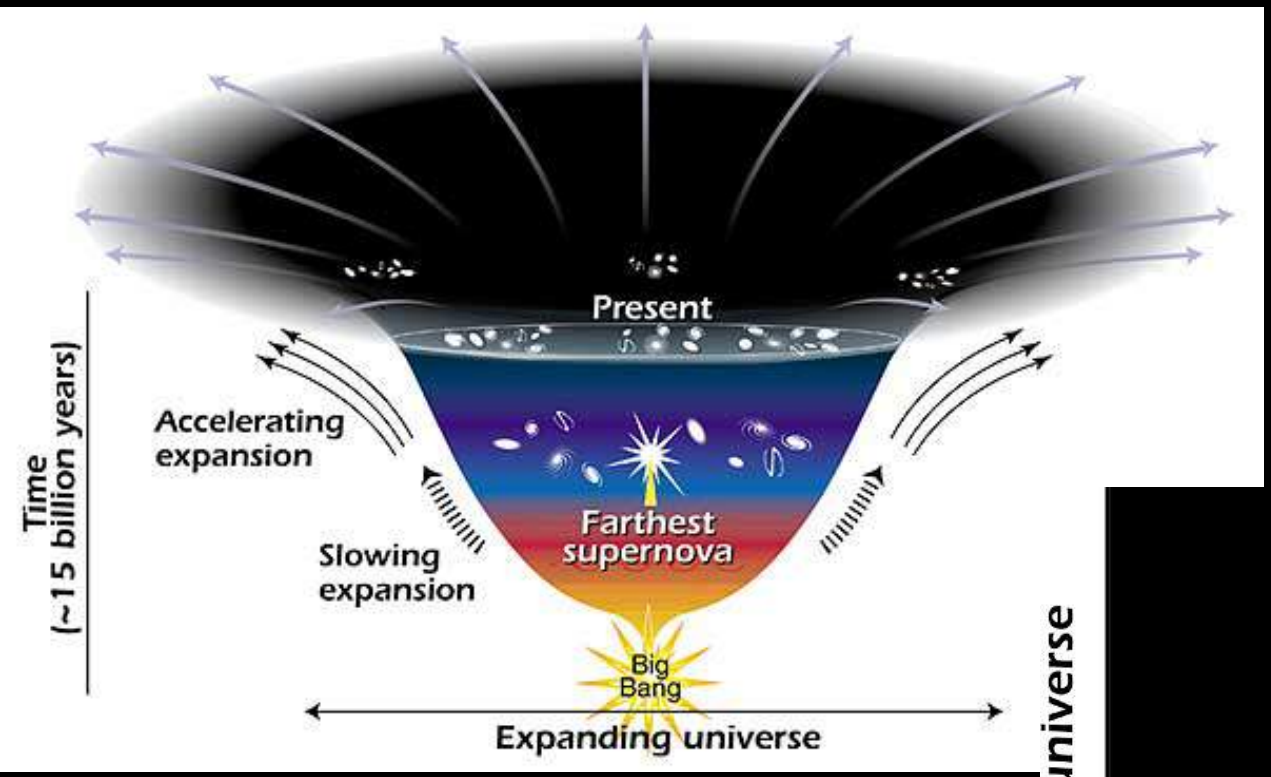
Consecuencias de la colisión de galaxias

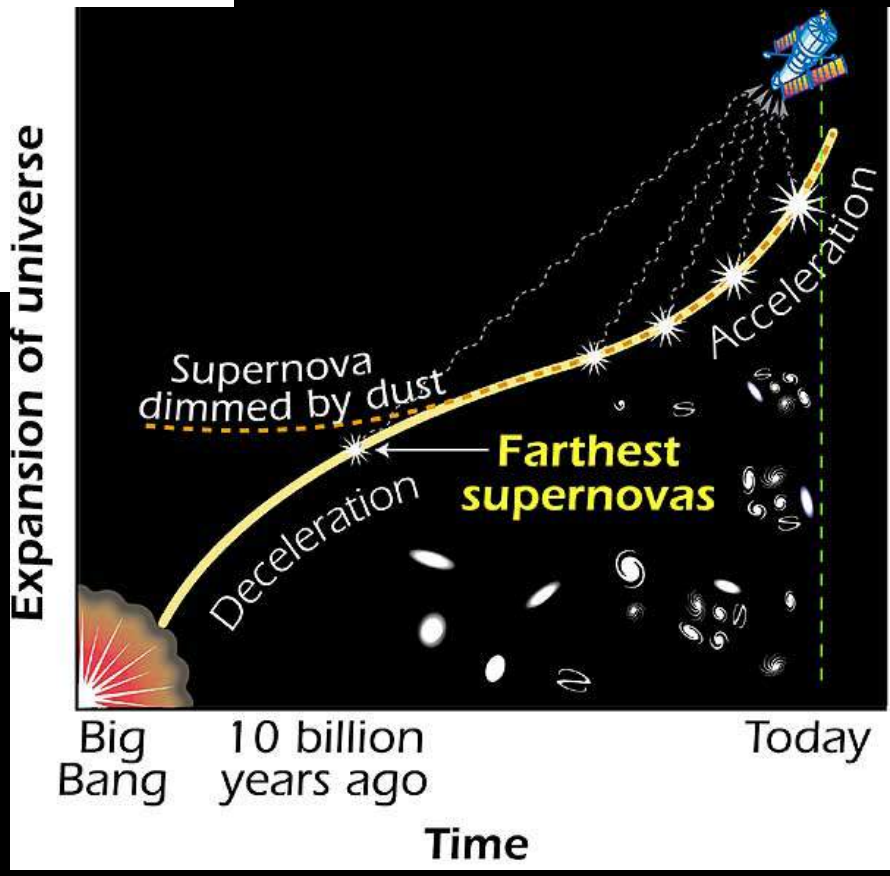
- Aumento de la frecuencia de colisión y encuentros cercanos entre estrellas: efecto perturbador sobre los cometas de la nube de Oort con poco tiempo de previsibilidad.
- Aumento en la tasa de formación estelar por compresión de nubes Hidrógeno, pero las galaxias estarán evolucionadas.
- Fusión de los agujeros negros supermasivos centrales de las dos galaxias y posible producción de un quasar o un núcleo galáctico activo (AGN), e intensa onda gravitacional.
- Posible aproximación al agujero negro supermasivo de Andrómeda

- Se formaría una nueva galaxia, posiblemente una galaxia elíptica gigante.
- El resto de las galaxias del Grupo Local se irán uniendo a esta galaxia supermasiva.

AMENAZAS UNIVERSALES

El destino final


Present
Accelerating expansion
Time (~15 billion years)
Farthest supernova
Slowing expansion
Big Bang
Expanding universe


Expansion of universe
Supernova dimmed by dust
Acceleration
Farthest supernovas
Deceleration
Big Bang
10 billion years ago
Today
Time

Certezas en escala de décadas o siglos

siglos

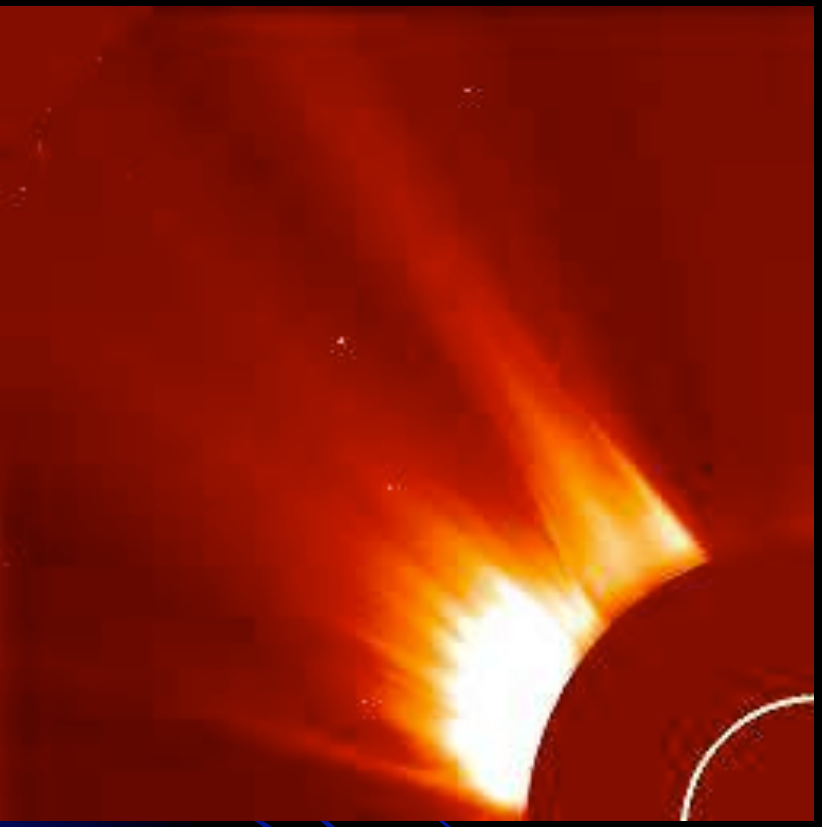
Impactos regionales

Un objeto que impactará con la Tierra con consecuencias catastróficas para un área equivalente a un pequeño país (algunos cientos de miles de km^2).

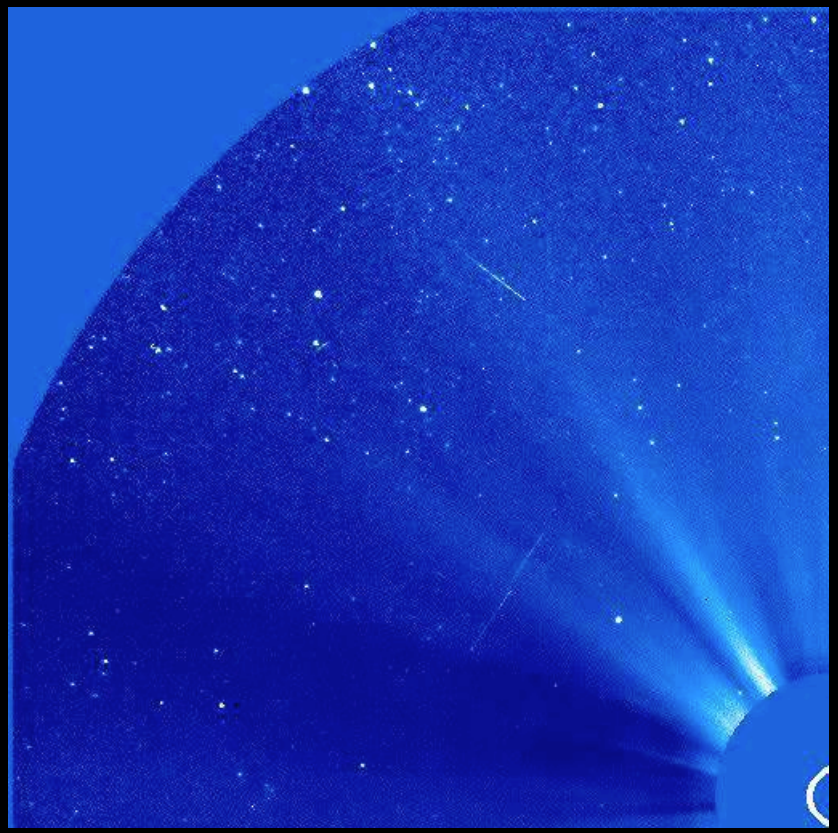
Tunguska (1908)

siglos

Actividad solar

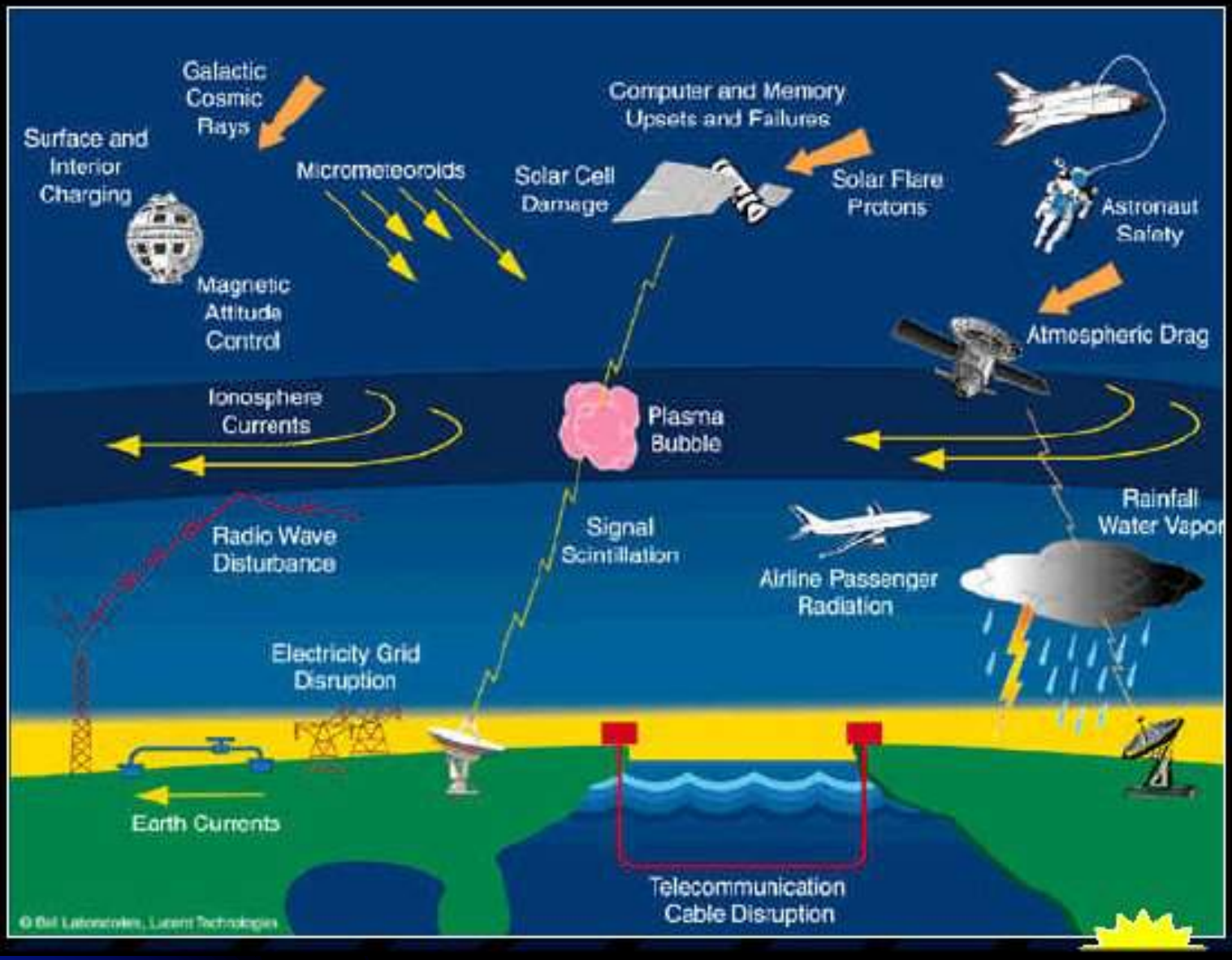


Se producirá una tormenta solar y una eyección de masa coronal que afectará a la gran mayoría de los satélites artificiales y tendrá consecuencias sobre gran parte del equipamiento electrónico en la superficie de la Tierra.



Eyecciones de masa coronales: burbuja de plasma inyectada en el espacio interplanetario.
Se detectaron por primera vez en 1971.

Efectos en la tecnología de las CME y viento solar siglos



Certezas en escala de varios decenas de miles a millones de años (M.años)

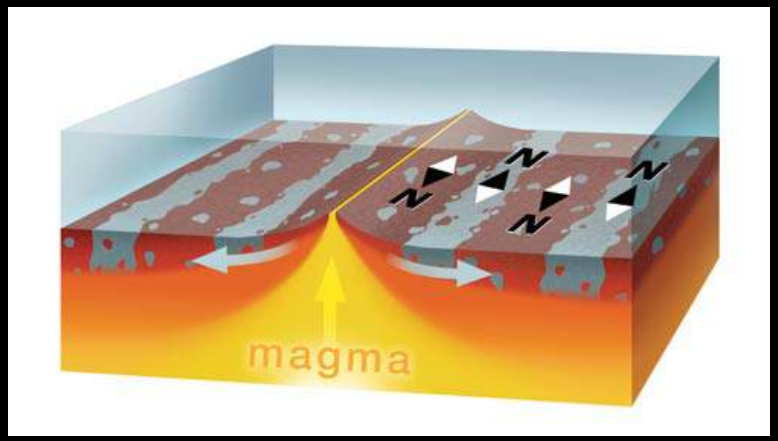
Impactos globales

M.años

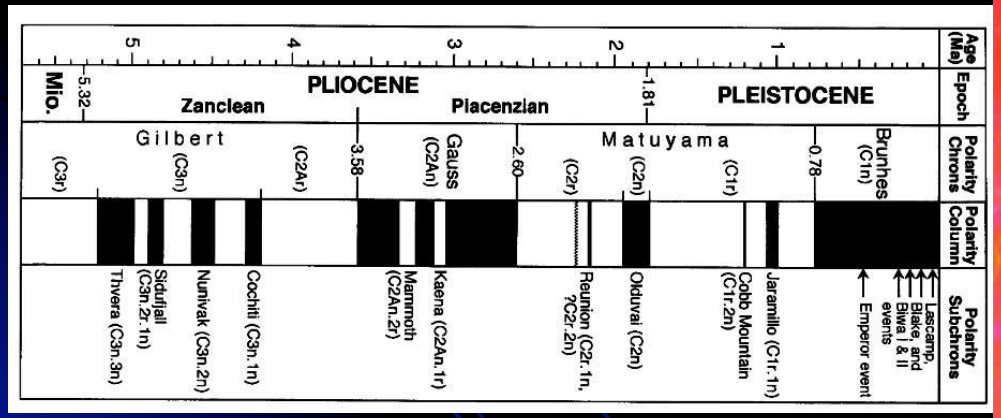
Ocurrirá un impacto de un asteroide o cometa que podría producir una extinción masiva de la vida en la Tierra.

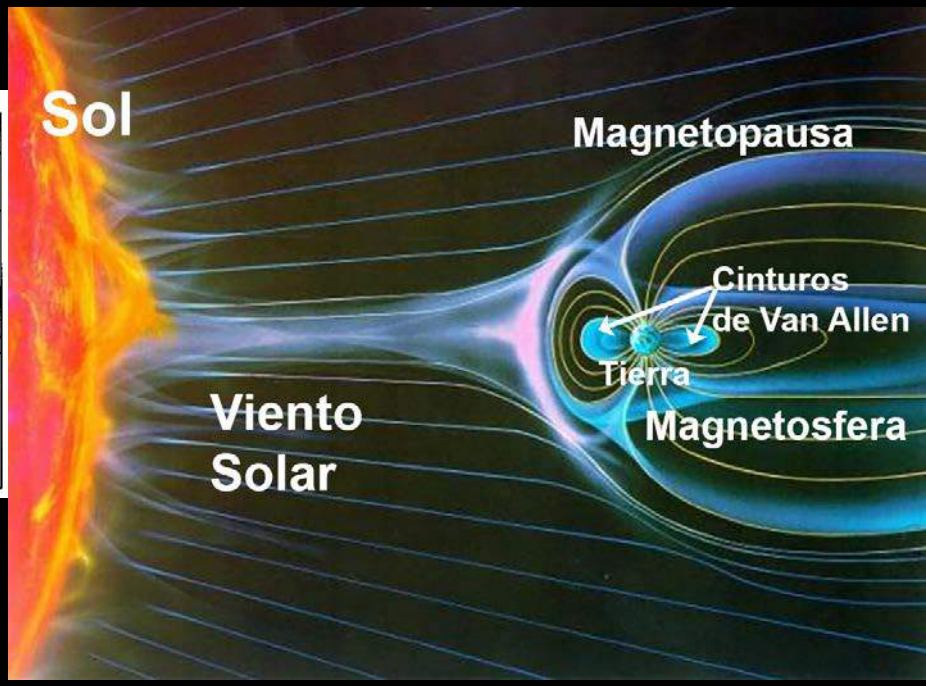
Campo Magnético Terrestre

M.años



Se producirá la inversión del campo magnético terrestre, pasando por un breve período (años, cientos, miles ???) en el que la intensidad del campo magnético será muy baja. Desaparecerá el “escudo” que nos protege del flujo de partículas energéticas proveniente del Sol.





Explosión de supernova

M.años

Explotará una estrella supernova cercana lanzando un intenso flujo de partículas energéticas hacia el Sistema Solar.

Nube estelar con proto-estrellas

Estrella tipo solar

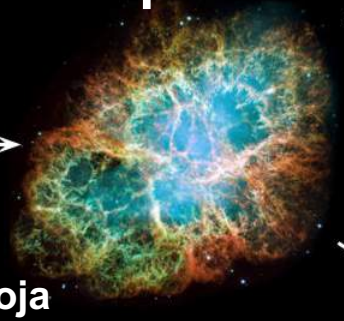
Gigante roja

Nebulosa planetarias

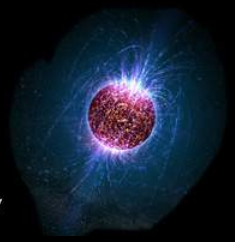
Enana blanca

Estrella mas masiva

Super-gigante roja

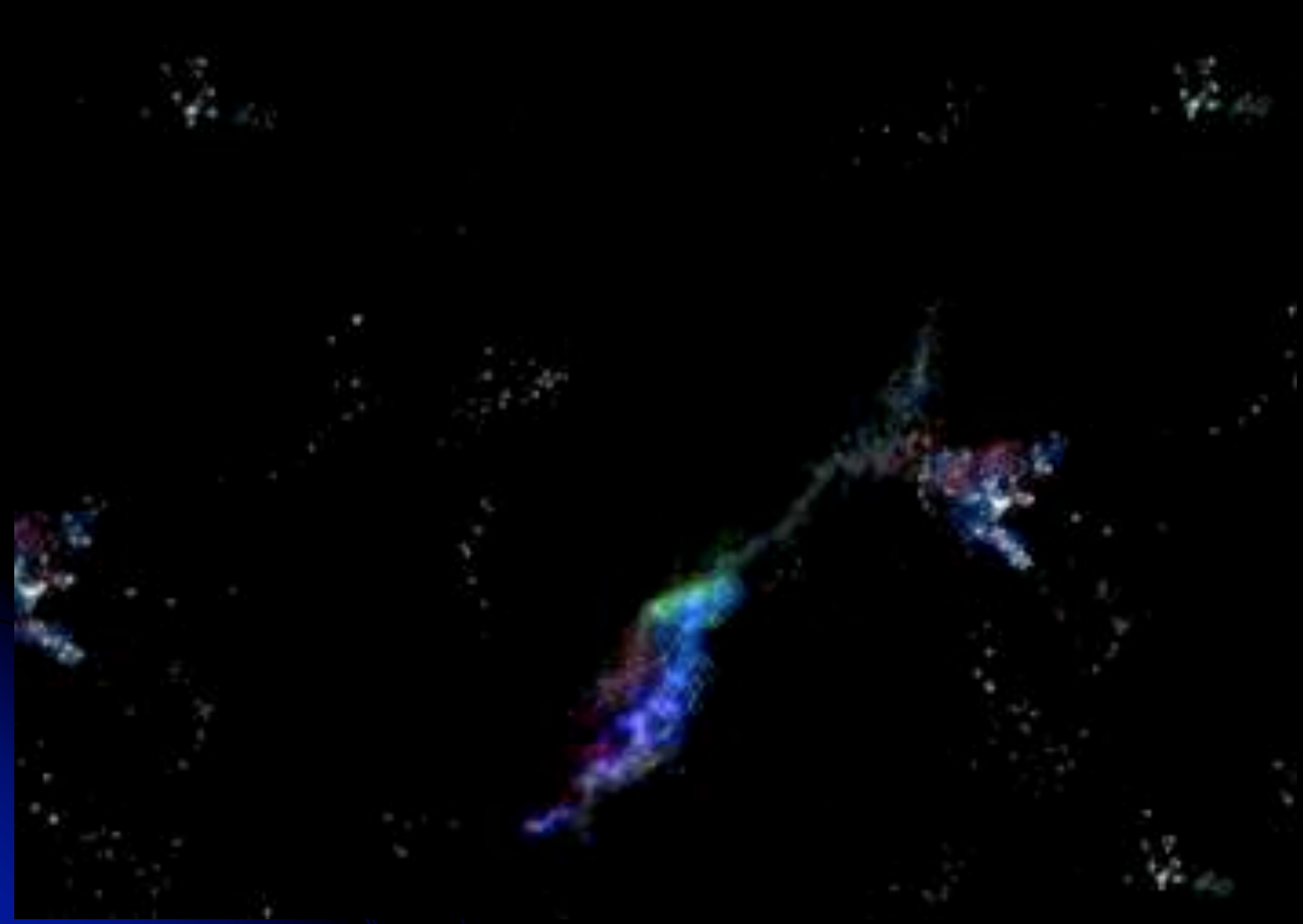


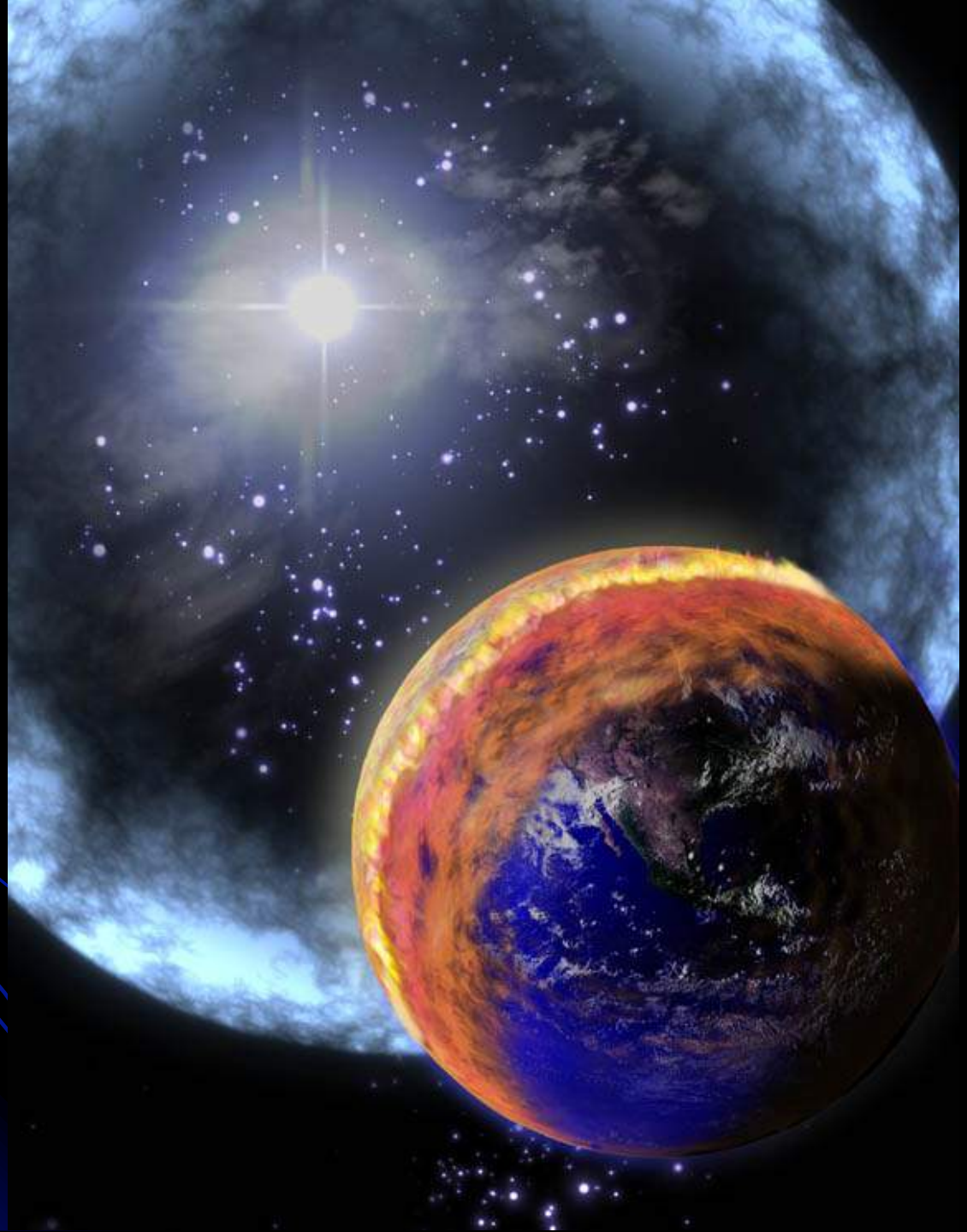
Supernova



Estrella de neutrones

Agujero negro



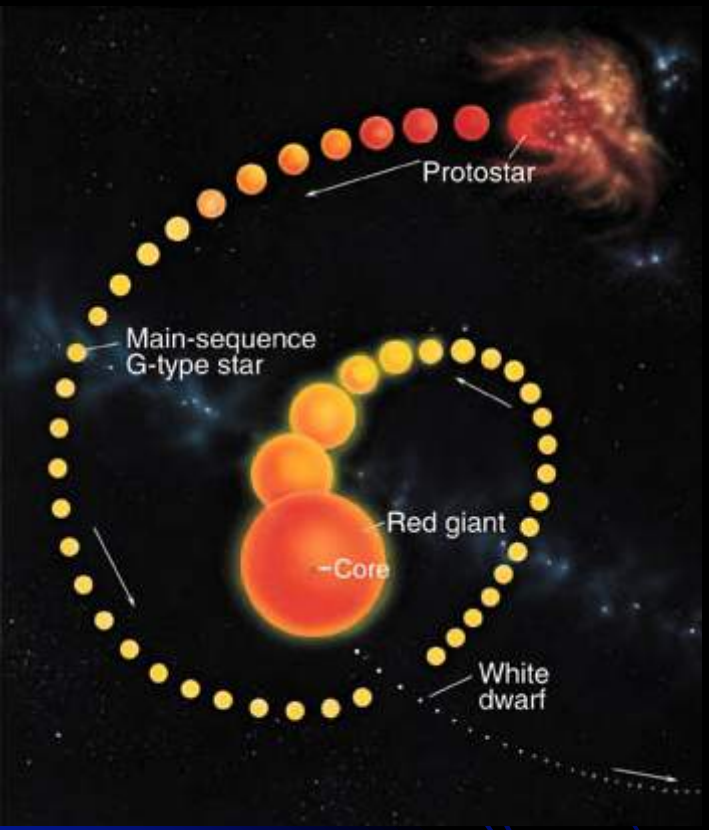


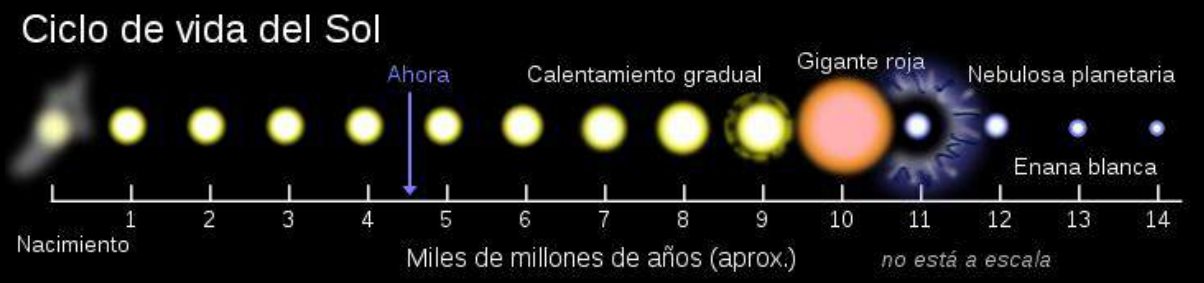
Certezas en escala de miles de millones de años (Giga-años=10^9)

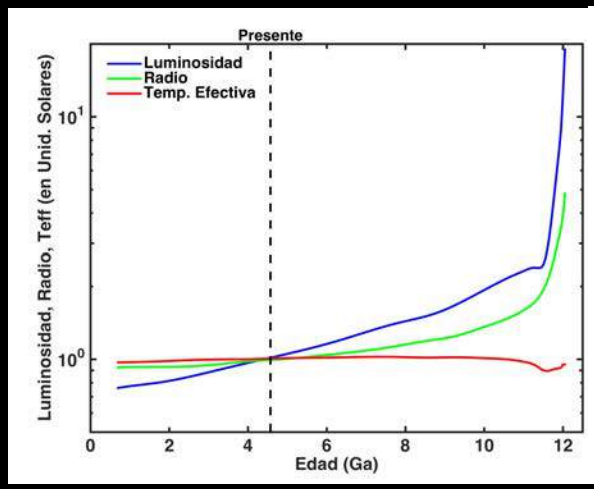
Evolución del Sol

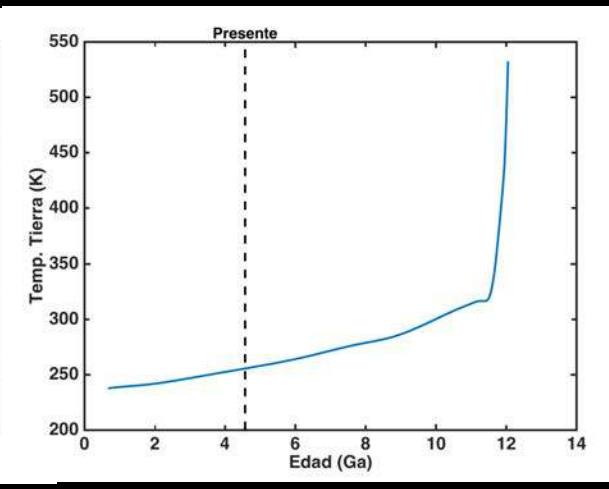
G.años

El Sol evolucionará a una estrella gigante roja, expandiéndose hasta engullir a la Tierra (dentro de 7.6 Gaños)



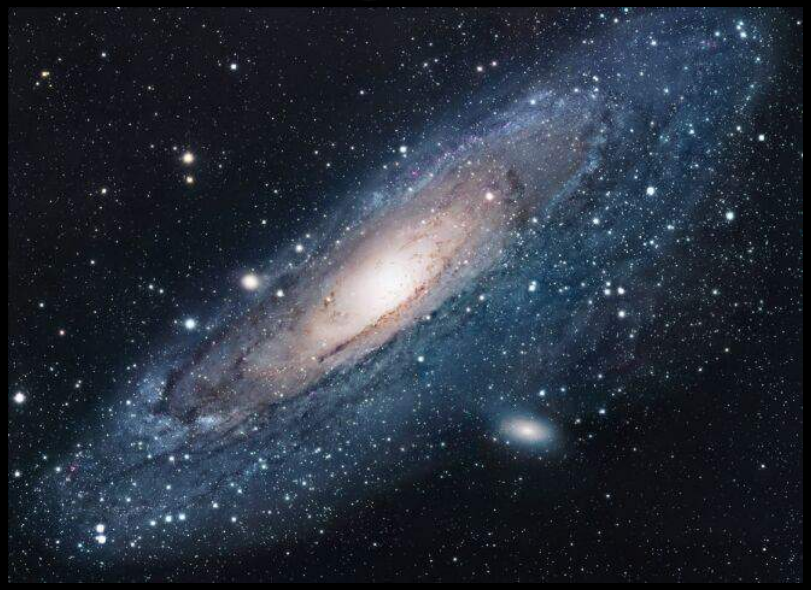






Impacto de galaxias

G.años



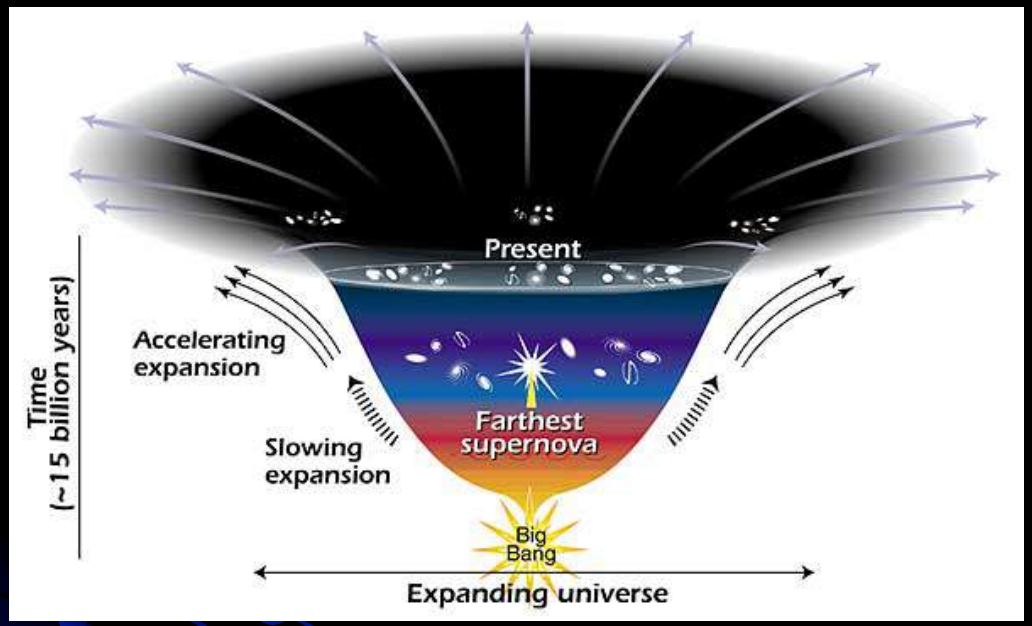
La galaxia de la Vía Láctea colisionará con la Galaxia de Andrómeda, lo que aumentará las chances de colisión o pasaje cercano de estrellas masivas.

Galaxia de Andómeda
2.5 Maños luz

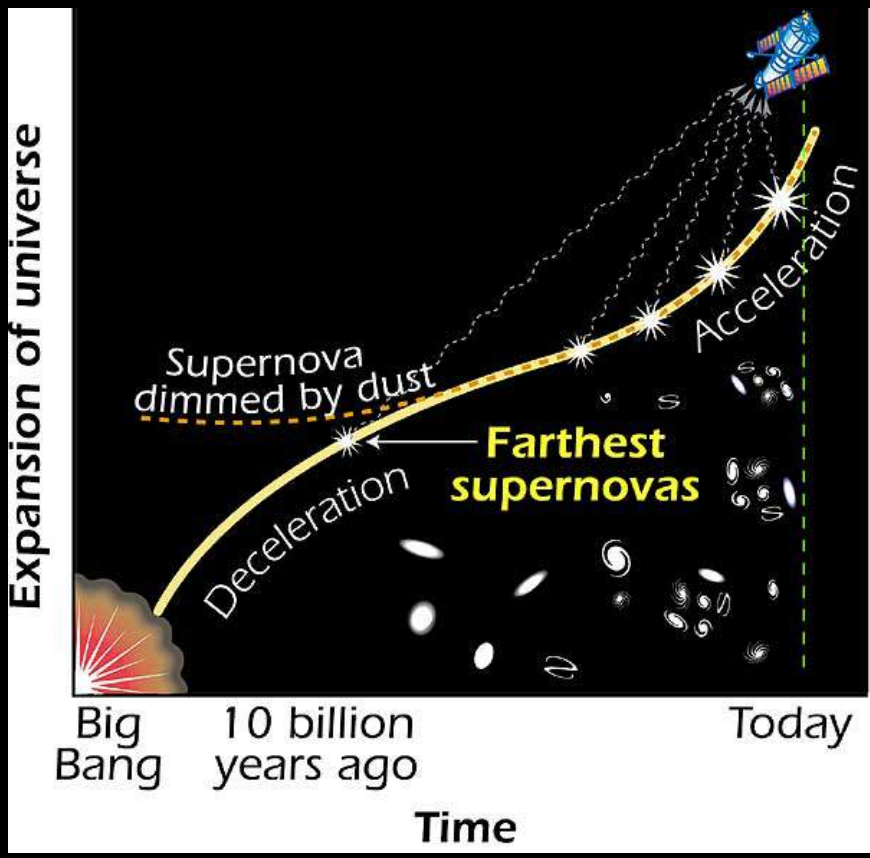
Certezas (????) en escala de billones de años (Tera. años $=10^{12}$)

T.años

Destino final del Universo



El universo seguirá expandiéndose en forma acelerada, disminuyendo su temperatura. Se volverá un universo oscuro y frío. La aceleración de la expansión producirá un desgarramiento de la materia.



“Bienaventurado el que lee y oye las palabras de esta profecía, y guarda las cosas en ellas escritas; porque el tiempo esta cerca.”

Apocalipsis de San Juan c.1 v.3

THE END