

Creación/Destrucción de pares

Asignatura: FÍSICA MODERNA

Docente: Prof. Hugo Fort



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Facultad de Ciencias

Ernesto Elenter (eelenter@gmail.com)

Silvia Hernández (shernandezmattos@gmail.com)

Abril 2024

Contenido

- Introducción
- Creación de pares
- Aniquilación de pares
- Caso de Aplicación: Astrofísica Estelar
- Bibliografía

Introducción: ¿Qué es un fotón?

- Partícula elemental portadora de todos los tipos de radiación electromagnética.
- Masa invariante (o masa en reposo)=0
- Velocidad=c

Transportan Energía y Momento lineal, relacionados con la frecuencia ν (longitud de onda λ) a través de:

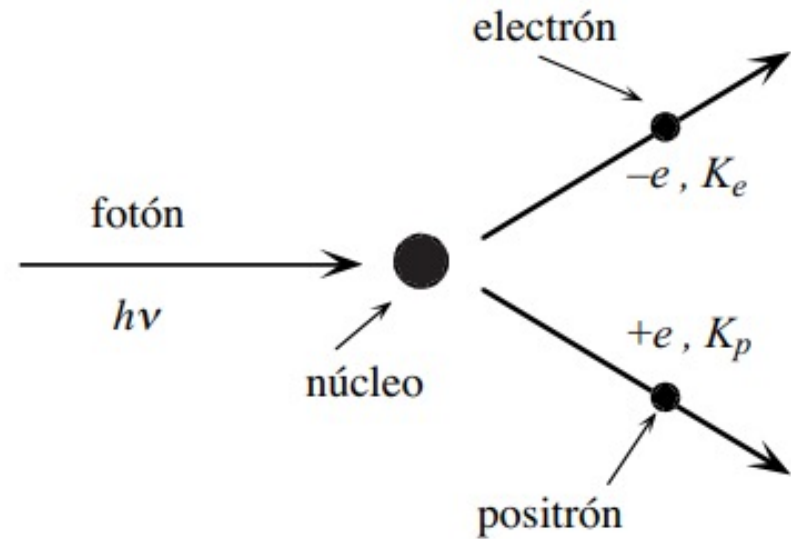
- $E=h\nu=hc/\lambda$
- $p=E/c=h/\lambda$

Introducción: Interacciones del fotón

- Pueden ser:
 - Creados: radiación emitida (ej. transiciones moleculares, atómicas, aniquilación de pares)
 - Destruídos: radiación absorbida (ej. transiciones moleculares, atómicas, creación de pares)
- Pueden interactuar con otras partículas (ej. creación de pares) mostrando comportamiento corpuscular en estos casos.

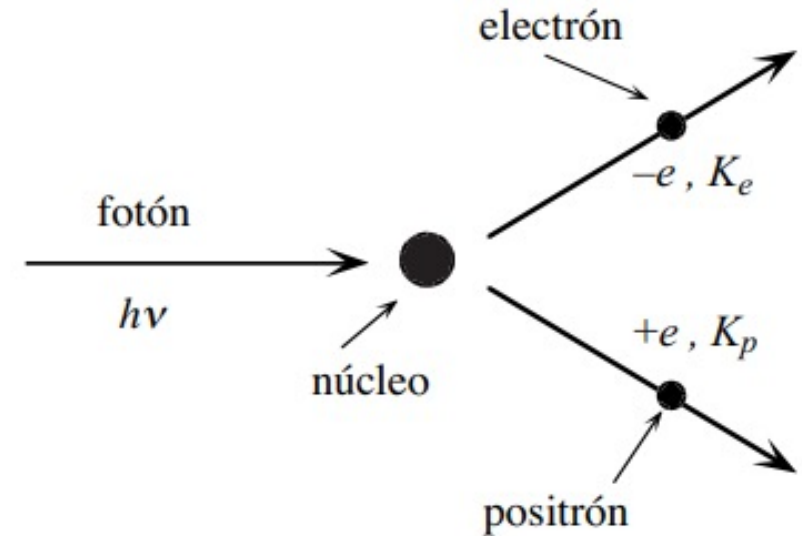
Creación de pares

- Un fotón de alta energía colisiona con un núcleo atómico.
- Pierde toda su energía y se generan 2 partículas: un electrón y un positrón.
- Positrón es la antipartícula del electrón (igual masa, carga opuesta).



Creación de pares

- Principios utilizados:
 - Conservación de la carga
 - Conservación del momento lineal
 - Conservación de la energía



$$h\nu = E_- + E_+ = (m_0c^2 + K_-) + (m_0c^2 + K_+) = K_- + K_+ + 2m_0c^2$$

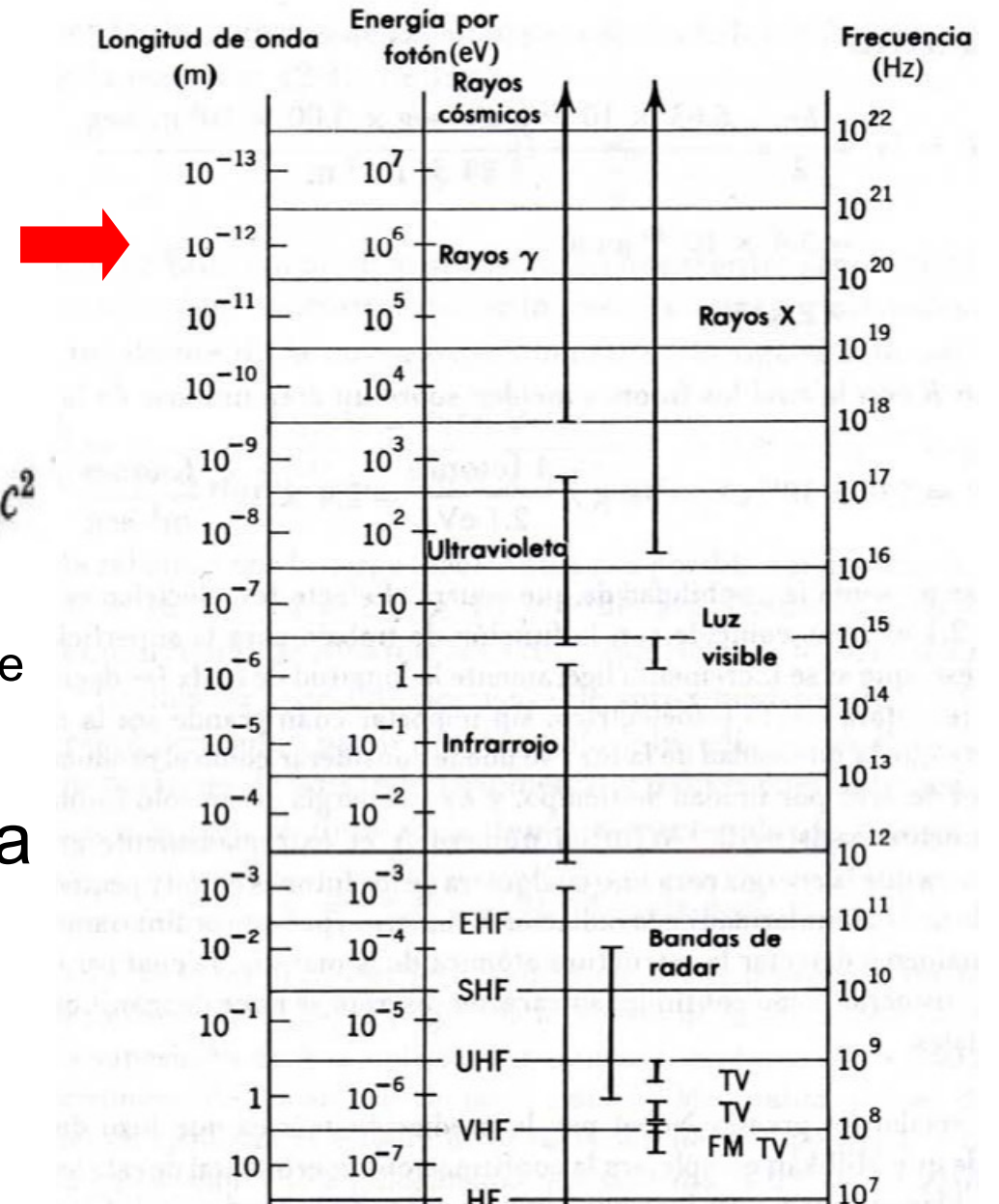
Nota: Energía Relativista considerando la energía de reposo ($m_0 \cdot c^2$) más la energía cinética K .

Creación de pares

- Energía mínima requerida:

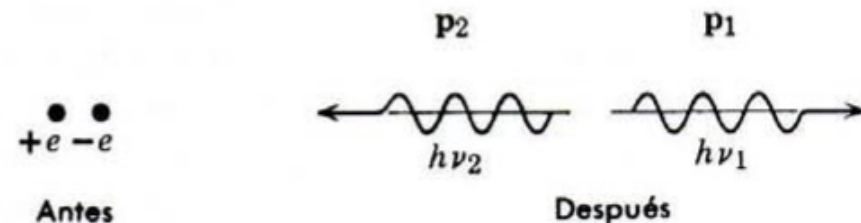
$$h\nu = E_- + E_+ = (m_0c^2 + K_-) + (m_0c^2 + K_+) = K_- + K_+ + 2m_0c^2$$

La energía mínima es $2m_0c^2$, con $m_0 = m_e$
 $2m_e c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$) lo cual corresponde a una longitud de onda de $0,012 \text{ \AA}$ (Rayos Gamma o Rayos X cortos)



Aniquilación de pares

- Un electrón y un positrón inicialmente en reposo y cercanos, se unen y se aniquilan, generando 2 fotones.
- Al menos 2 fotones para conservar el momento lineal.
- La materia se transforma en energía radiante.

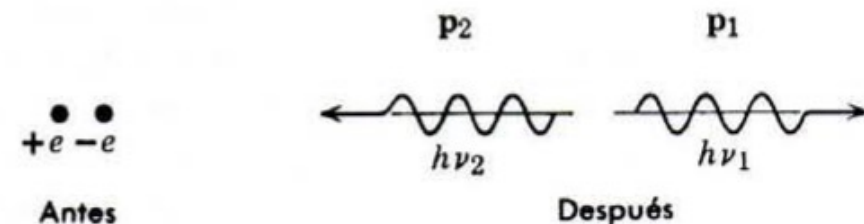


Aniquilación de pares

- Momento lineal inicial es 0 por tanto el momento lineal final debe ser 0.

$$p_1 = p_2 \text{ o } h\nu_1/c \text{ y } \nu_1 = \nu_2 = \nu$$

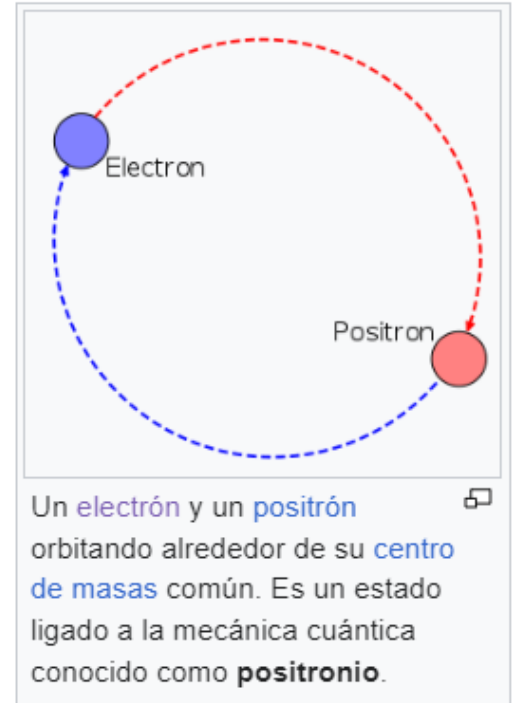
$$m_0c^2 + m_0c^2 = h\nu + h\nu$$



$h\nu = 0,51 \text{ MeV}$ corresponde a un fotón de longitud de onda $0,024 \text{ \AA}$.

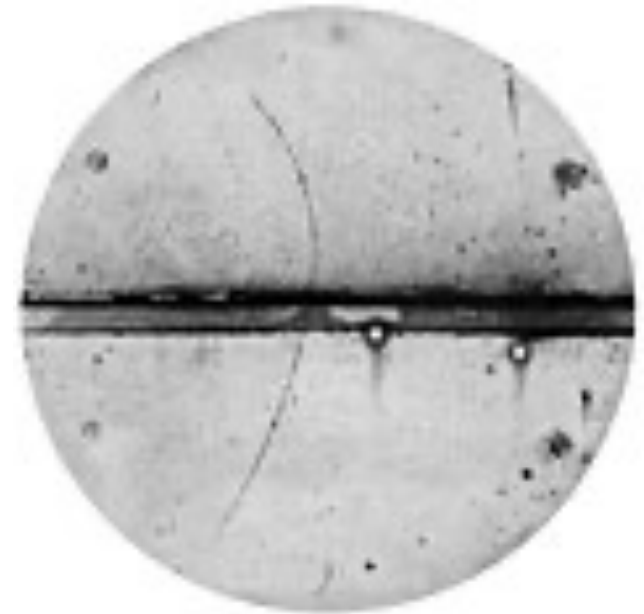
Aniquilación de pares

- Desde la creación del par electrón-positrón a su destrucción en fotones, se crea un átomo exótico (con partículas elementales distintas de solo electrones y protones): **Positronio**
- Es muy inestable (10^{-7} segundos)



Cómo se descubrió el fenómeno

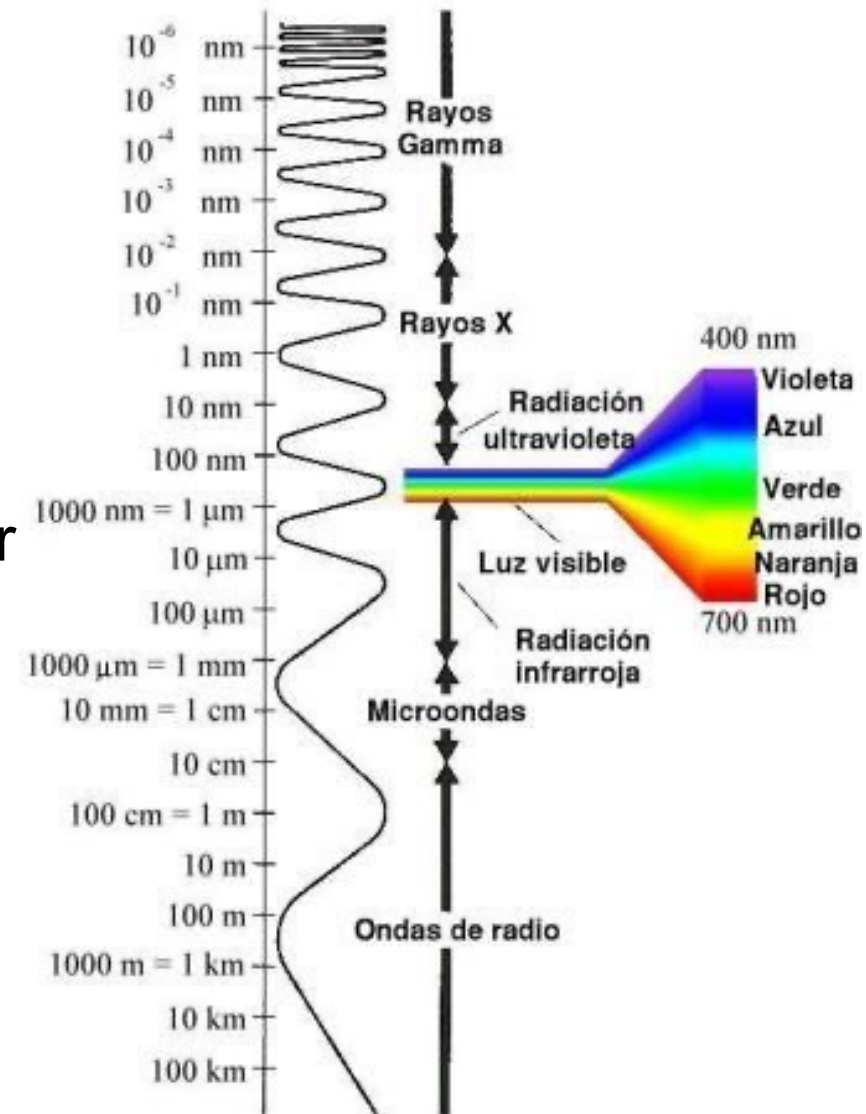
- En la naturaleza los pares Electrón- Positrón se producen por fotones de RAYOS CÓSMICOS.
- En el laboratorio se obtienen con aceleradores de partículas.
- En 1933, Anderson encontró evidencia de la producción de pares investigando la radiación cósmica:
- Flujo de fotones de alta energía.
- Mediante cámara de niebla con una placa delgada de plomo, dentro de un campo magnético.
- En algún punto aparecía un par de partículas cargadas.
- Partículas desviadas por el campo magnético en direcciones opuestas (evidencia de cargas de signo opuesto).



Fuente Wikipedia: Fotografía en una [cámara de niebla](#) por [C.D. Anderson](#), del primer positrón identificado

Caso de Aplicación en Astrofísica Estelar

- Fotones de alta energía pueden convertirse en un par de partículas (electrón + positrón) al colisionar con un núcleo.
- Condición: $h\nu > 2m_e c^2$ (1,02 MeV) se satisface a $T \approx 1,2 \times 10^{10}$ K ($kT^* \approx h\nu \approx 2m_e c^2$), pero incluso a $T^* \approx 1,2 \times 10^9$ K (cola de distribución) ya se comienzan a crear pares.
- A esas temperaturas se generan Rayos Gamma, con energías del orden de MeV.
- Cuando el centro de una estrella alcanza estas temperaturas, se comienzan a crear pares de partículas. implica un mayor número de partículas.



Caso de Aplicación en Astrofísica Estelar

En el diagrama Densidad-Temperatura de las Estrellas, aparecen zonas de INESTABILIDAD, donde no es posible mantener el equilibrio hidrostático*.

Están definidos por el exponente adiabático (γ_a) del gas estelar. (Cuando se puede modelar como un proceso adiabático: $P = k_a \rho^{\gamma_a}$):

Se prueba que es INESTABLE cuando: $\gamma_a < 4/3$

El exponente adiabático de un gas depende del No. de partículas.

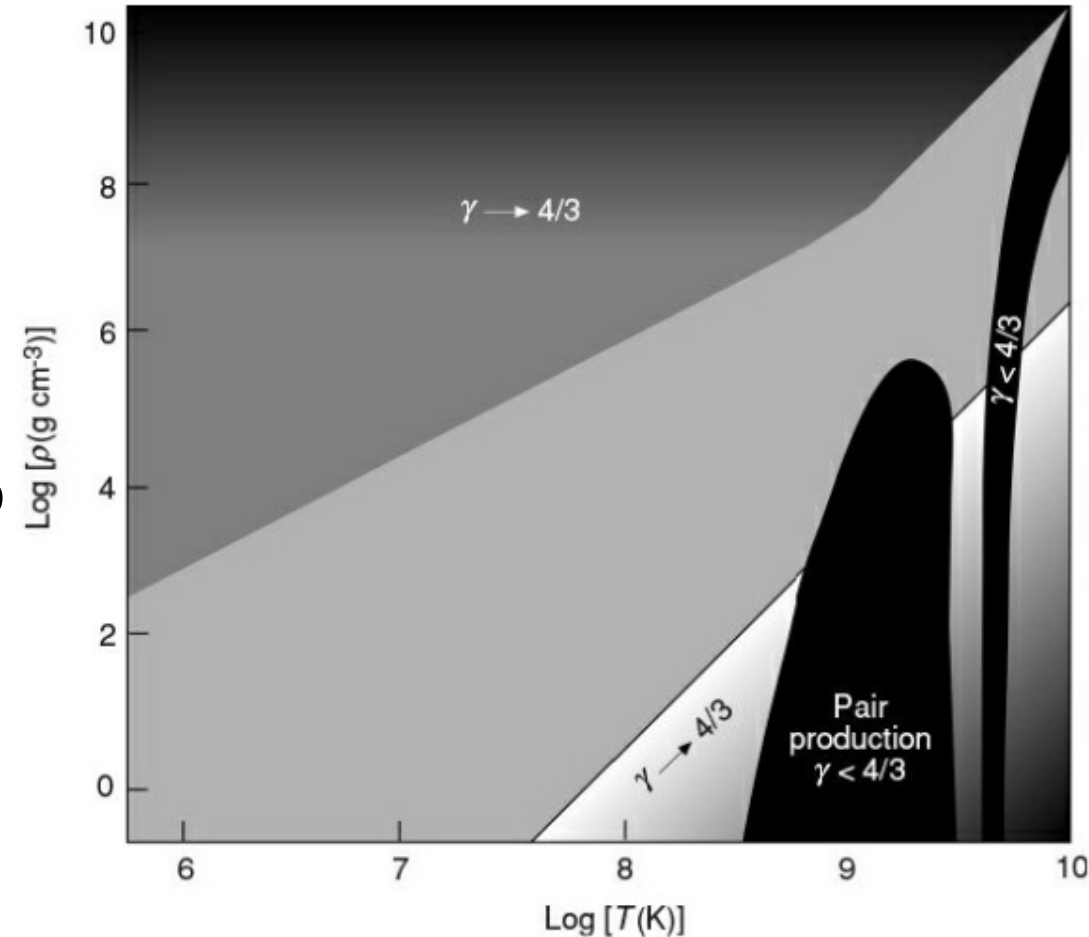


Figure 7.3 Outline of the stable and unstable zones in the temperature-density diagram.

Fuente: Theory of Stellar Structure and Evolution (D. Prialnik)

*Equilibrio hidrostático en el núcleo de una estrella refiere al balance entre la atracción gravitatoria y la fuerza opuesta producida por la presión del gas.

Caso de Aplicación en Astrofísica Estelar

Las estrellas muy masivas (ej. 100 masas solares), evolucionan hasta llegar a la zona de INESTABILIDAD de Creación de Pares.

Aumenta cantidad de partículas, se pierde el equilibrio hidrostático.

Al llegar a esa zona experimentan un **EVENTO CATASTRÓFICO**, lo que explica su muy corta vida. (no llegan a quemar elementos pesados).

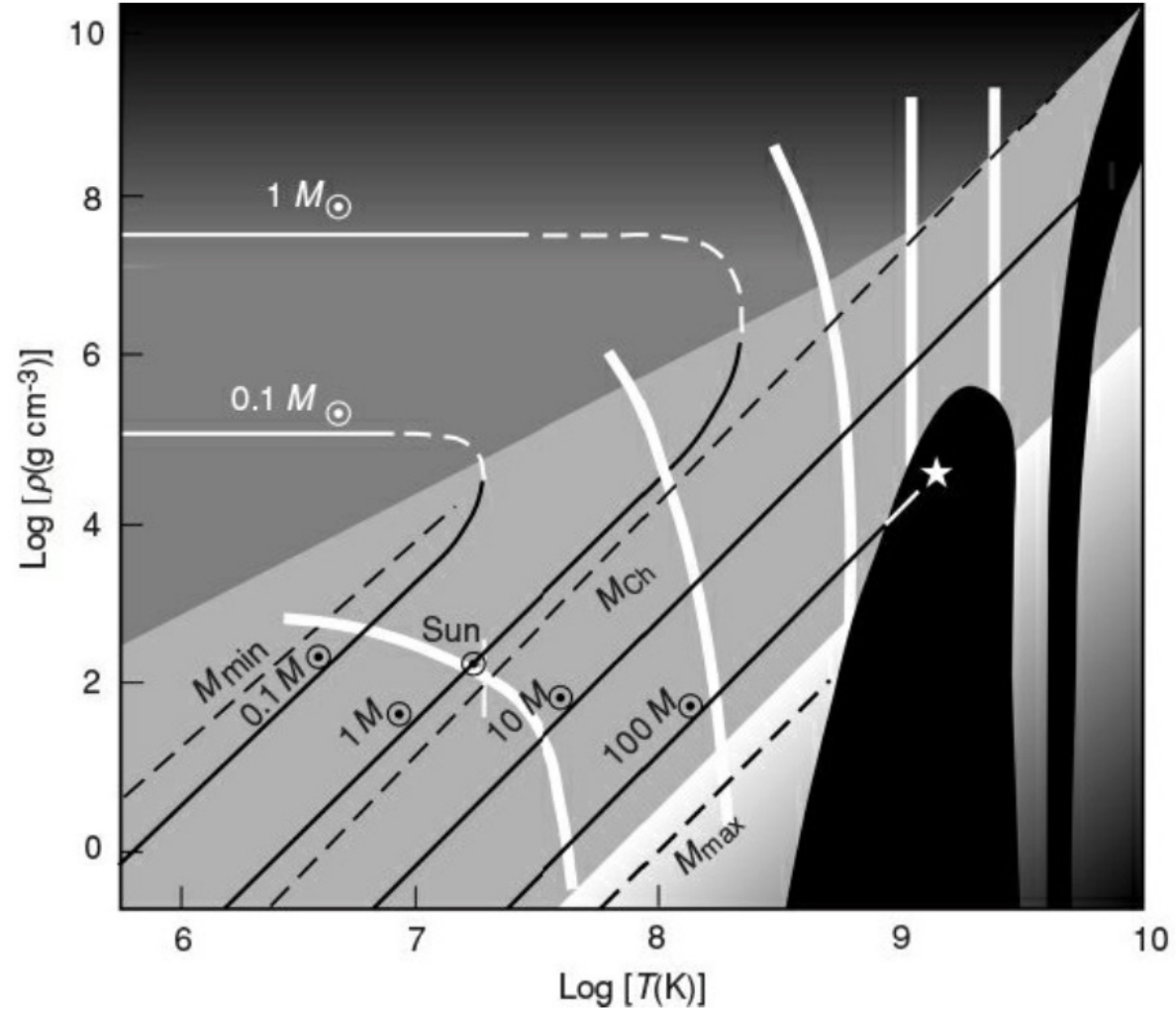


Figure 7.5 Schematic illustration of the evolution of stars according to their central temperature-density tracks.

Fuente: Theory of Stellar Structure and Evolution (D. Prialnik)

Caso de Aplicación en Astrofísica Estelar

Se cree que la Supernova SN 2006gy explotó debido al mecanismo de CREACIÓN DE PARES.

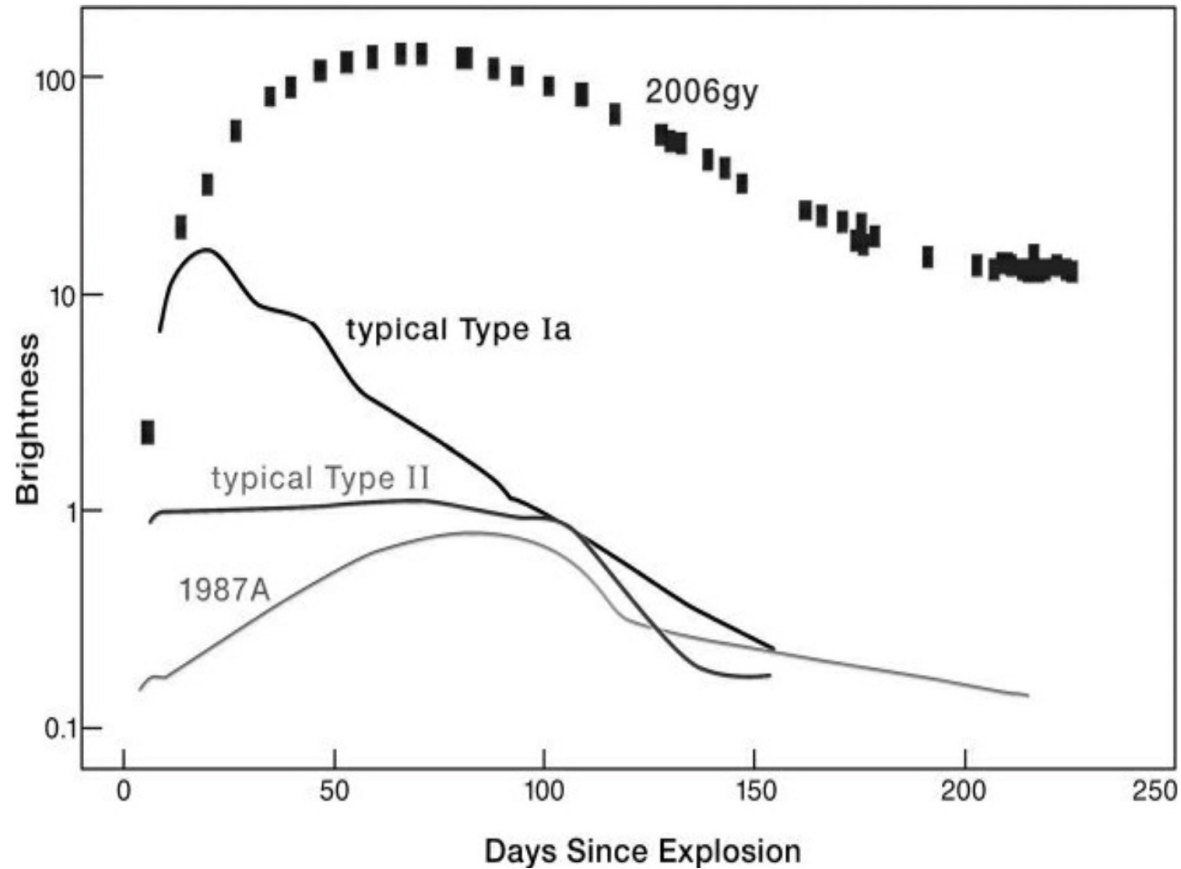
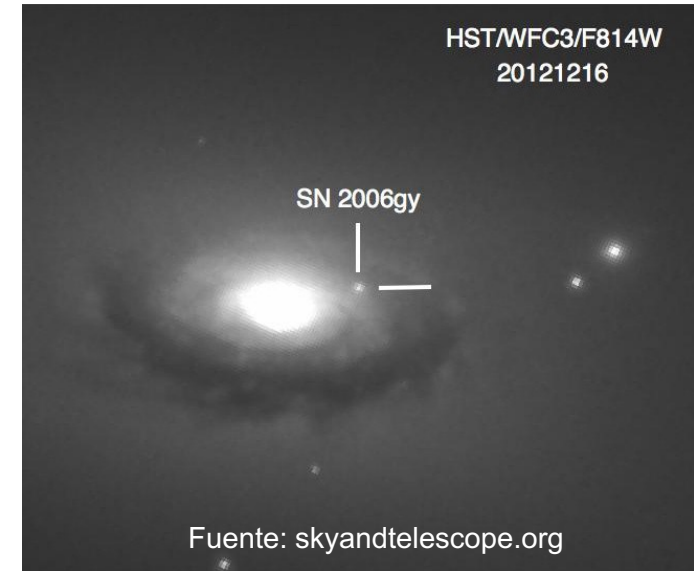


Figure 10.9 Light curve of supernova SN2006gy, compared with typical light curves of Type II and Type Ia supernovae and with SN 1987A. (Adapted from NASA/CXC/UC Berkeley/N. Smith et al.)

Fuente: *Theory of Stellar Structure and Evolution* (D. Prialnik)



GALAXIA NGC 1260 (Constelación Perseo)
Distancia: 72 MPc (238 Millones de Años Luz)

Precursor: Estrella supermasiva de 150 masas solares.

Fue la Supernova mas brillante jamás registrada

Conclusiones

- Fotones de alta energía (Rayos Gamma, $\lambda \approx 0,012 \text{ \AA}$) pueden transformarse y CREAR un par ELECTRÓN+POSITRÓN.
- El proceso de ANIQUILACIÓN de pares consiste en que un ELECTRÓN y un POSITRÓN se unen y se “aniquilan” formando 2 FOTONES ($\lambda \approx 0,024 \text{ \AA}$).
- Completa un tercer experimento que muestra la naturaleza CORPUSCULAR de la luz. (junto al Efecto Fotoeléctrico y Efecto Compton).
- Estos experimentos muestran la cuantización de la radiación electromagnética (comportamiento CORPUSCULAR). ya que no pueden explicarse considerando a la radiación sólo como ondas.
- Primera evidencia experimental fue obtenida por Anderson (1933) estudiando la radiación cósmica.

Bibliografía

- [1] Eisberg, Resnick, *Física cuántica*.
- [2] Gratton, *Introducción a la mecánica cuántica*. 2003
- [3] Wikipedia.
- [4] D. Prialnik, *Theory of Stellar Structure and Evolution*.
- [5] Krane, *Modern Physics (3rd Edition)*.

Muchas gracias!!!

Preguntas??