

MÓDULO DE INSTRUMENTACIÓN

INSTRUMENTACIÓN CIENTÍFICA

(CLASE 13)

Detección de Luz (Fotones)

(Práctica)

Dennis Cazar Ramírez, Harold Yepes Ramírez

09 de marzo de 2021

"Science can
amuse
and fascinate us
all, but it is
Engineering
that changes
the world."

Isaac Asimov

IE



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics
LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea



CONTENIDO:

1. Fundamento teórico y experimental. Conceptualización.
2. Arreglo experimental.
3. Aprendizaje práctico.
4. Lecturas adicionales, recursos web y bibliográficos.

1. Fundamento teórico y experimental. Conceptualización.





¿QUE ES LUZ (FOTONES)? Algunas definiciones

Maxwell → “la luz es un fenómeno electromagnético”. Conjunto de ecuaciones que forman la base del **electromagnetismo clásico**, la óptica clásica y los circuitos eléctricos.

Acerca de los campos y potenciales en electrodinámica, de las ecuaciones de Maxwell se sabe que:

And God said
 $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$
 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
 $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$
and then there was
"Light"

- Divergencia del campo eléctrico (Ley de Gauss para campo estático).
- Divergencia del campo magnético (Ley de Gauss para campo estático).
- Rotacional del campo eléctrico (Ley de inducción de Faraday).
- Rotacional del campo magnético (ley de Ampere-Maxwell).

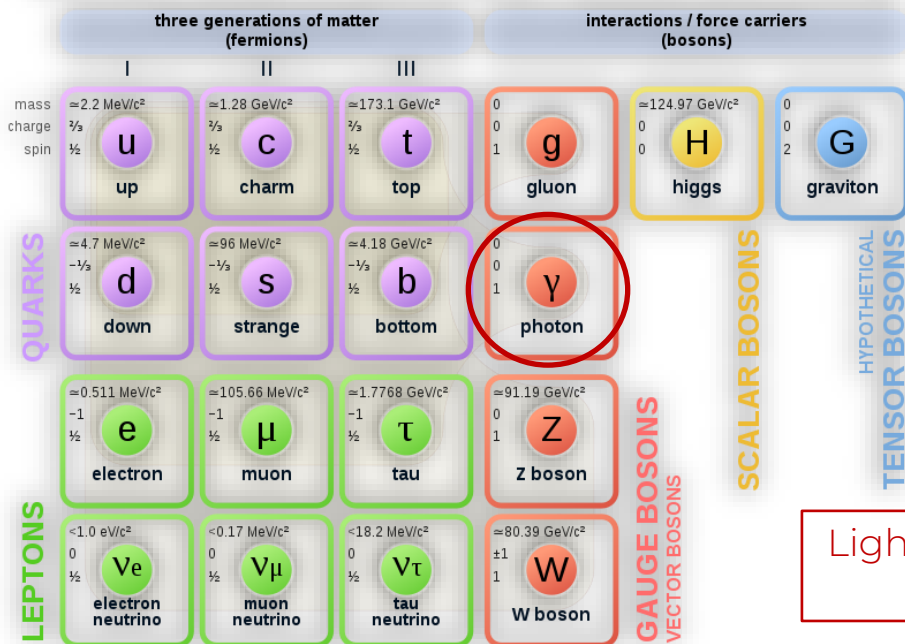


Fundamento teórico

Electromagnetismo Moderno → Cada fuerza se describe mediante una **teoría cuántica de campos** (QFT) con electrodinámica cuántica (QED). Las interacciones entre partículas cargadas están mediadas por el intercambio de fotones.

- La fuerza electromagnética está descrita por una QFT, correspondiente al intercambio de una partícula portadora de fuerza de spin-1, “Bosón de Gauge” (campo vectorial).

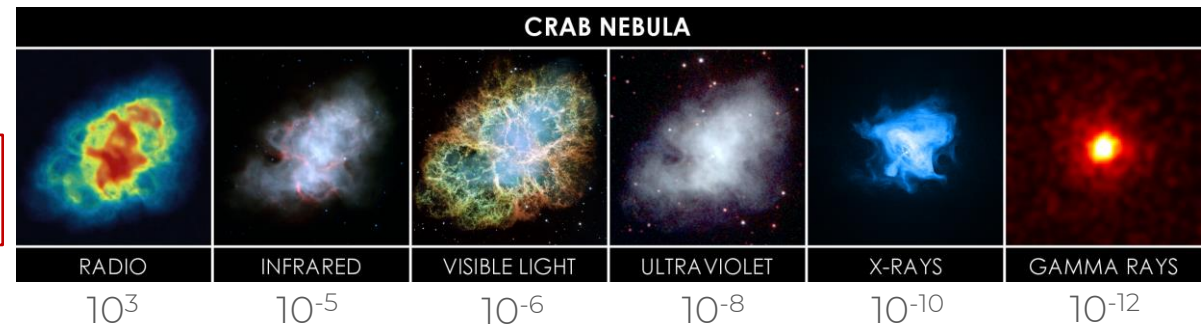
Standard Model of Elementary Particles and Gravity



Física Subatómica → Partícula del Modelo Estándar, quantum de luz, responsable (portador) de una (electromagnética) de las 4 fuerzas fundamentales de la naturaleza:

- Las partículas interactúan a través de fuerzas causadas por campos. Las fuerzas están siendo transportadas por Bosones.

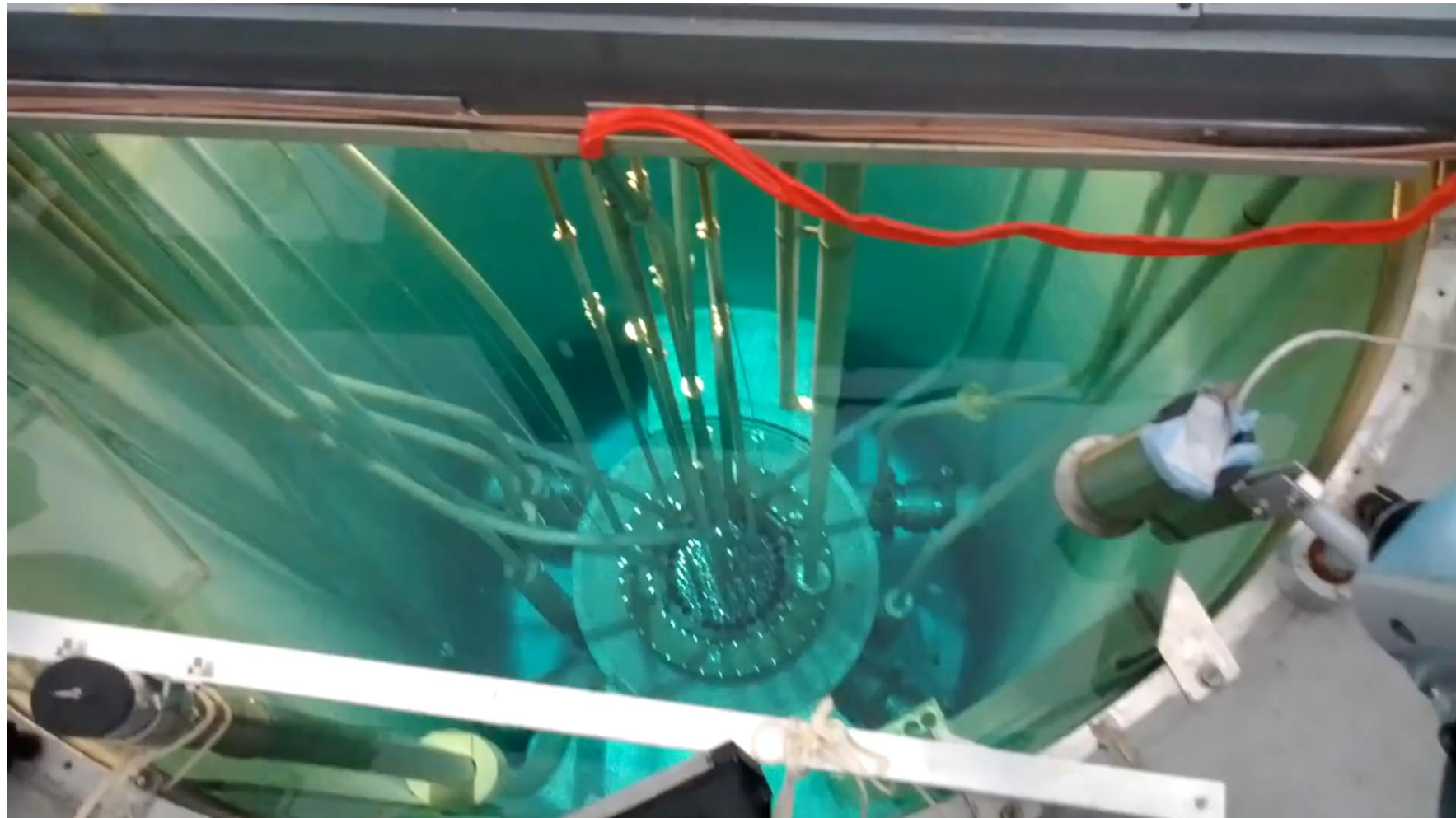
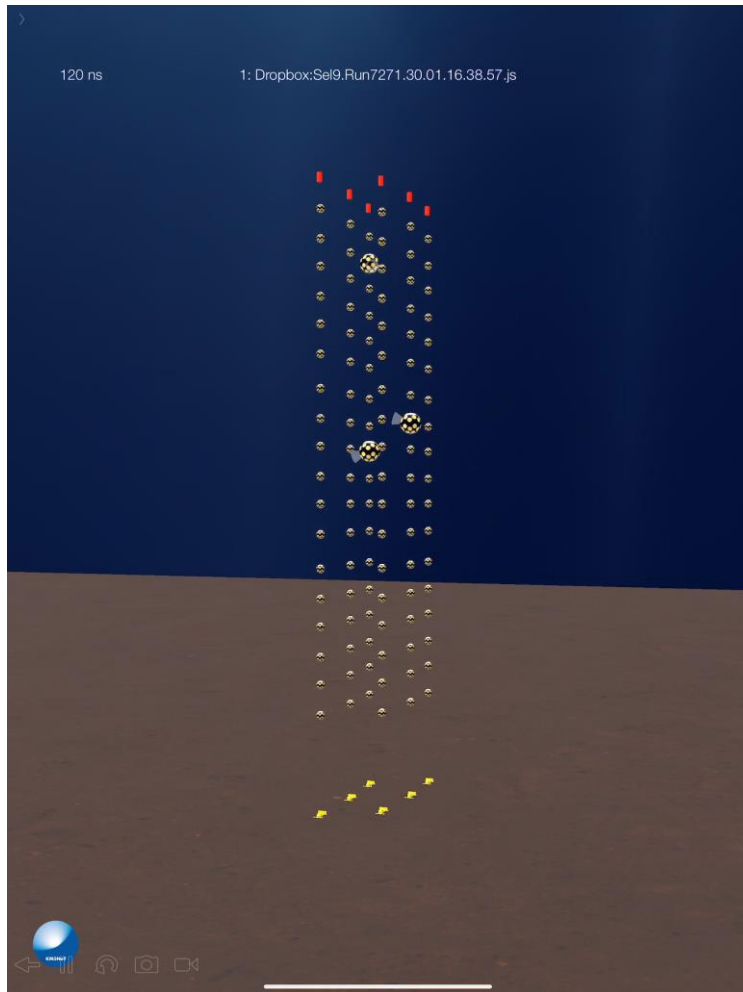
Light - Electromagnetic Spectrum



Wavelength [m]



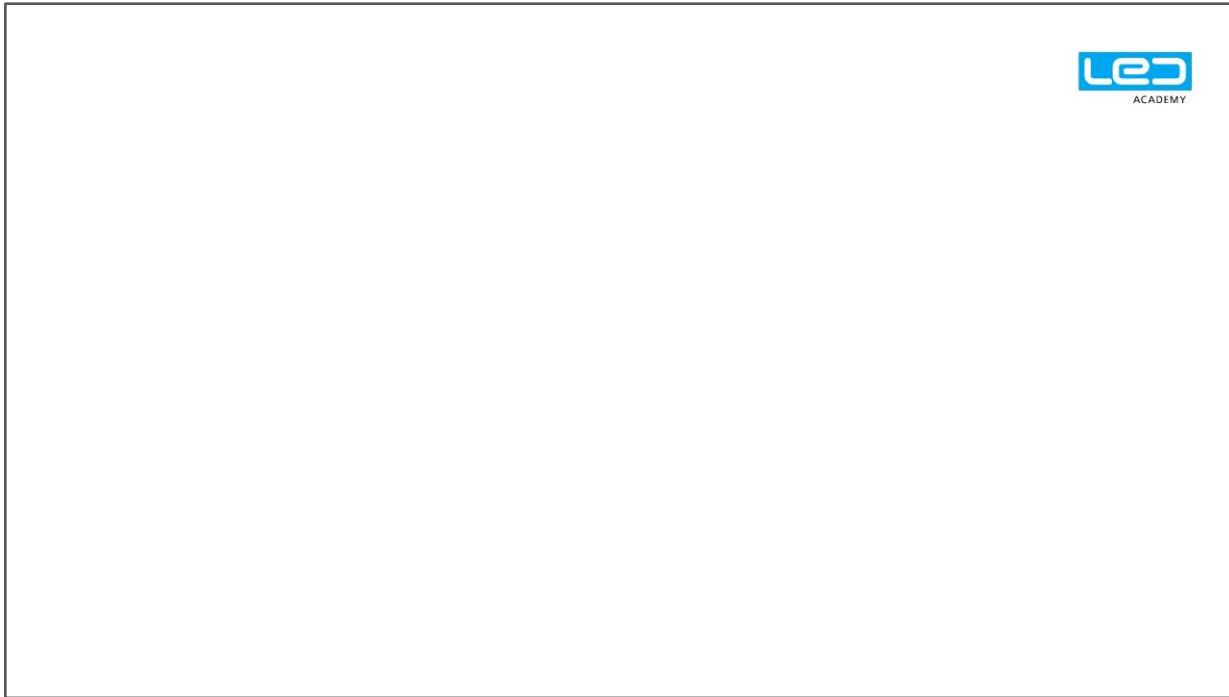
FUENTES DE LUZ (FOTONES): NATURALES (ej. Efecto Cherenkov)





FUENTES DE LUZ (FOTONES): ARTIFICIALES

(ej. Recombinación en Semiconductores, Emisión Estimulada)



LED
ACADEMY



MANIPULACIÓN DE FOTONES \equiv FOTÓNICA

Generación y aprovechamiento de luz y otras formas de energía radiante cuya unidad cuántica es el fotón \rightarrow Fuentes (origen) + Sensores Ópticos (detección) + Instrumentación Asociada (lectura de información A/D vinculada a señales eléctricas de los sensores/sistemas de detección).



¿COMO INTERACCIONA LA LUZ?

Dentro de los mecanismos mas importantes a través de los cuales una partícula interacciona con la materia, atravesándola o depositando energía en su camino, son:

Partículas Cargadas:

Ionización. Rayos Delta. Radiación Cherenkov.
Radiación de Frenado (Bremsstrahlung).

Partículas Neutras: fotones (bosón)

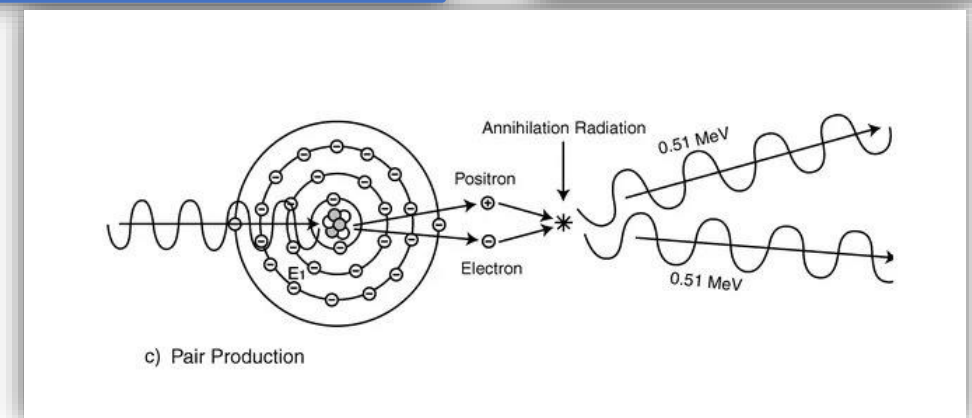
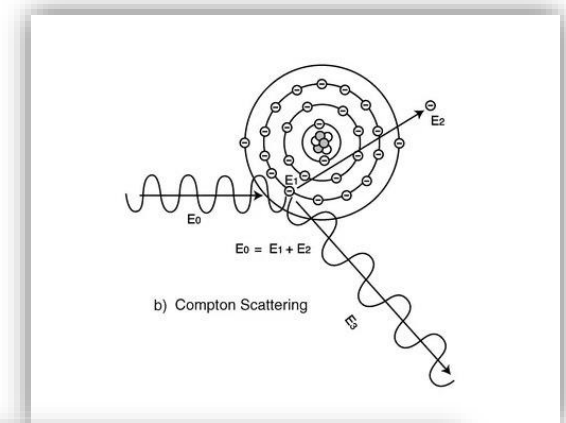
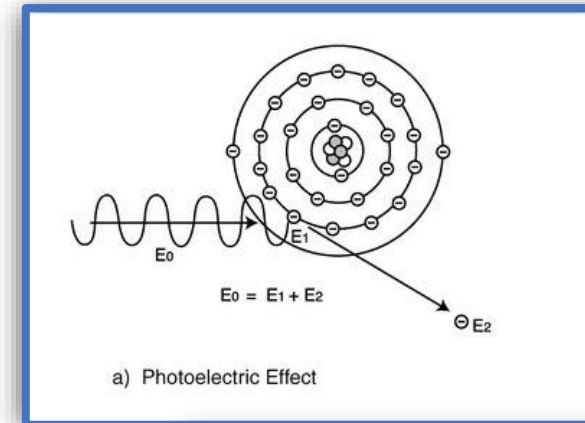
Efecto Fotoeléctrico. Dispersión Compton.
Producción de pares (ej., positrón-electrón).

Partículas Neutras: neutrinos (leptón)

Interacción Débil.

Hadrones: bariones ($\geq 3q$, impar), mesones ($\geq 2q$, par)

Interacción Fuerte.

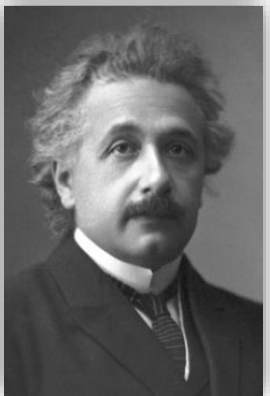
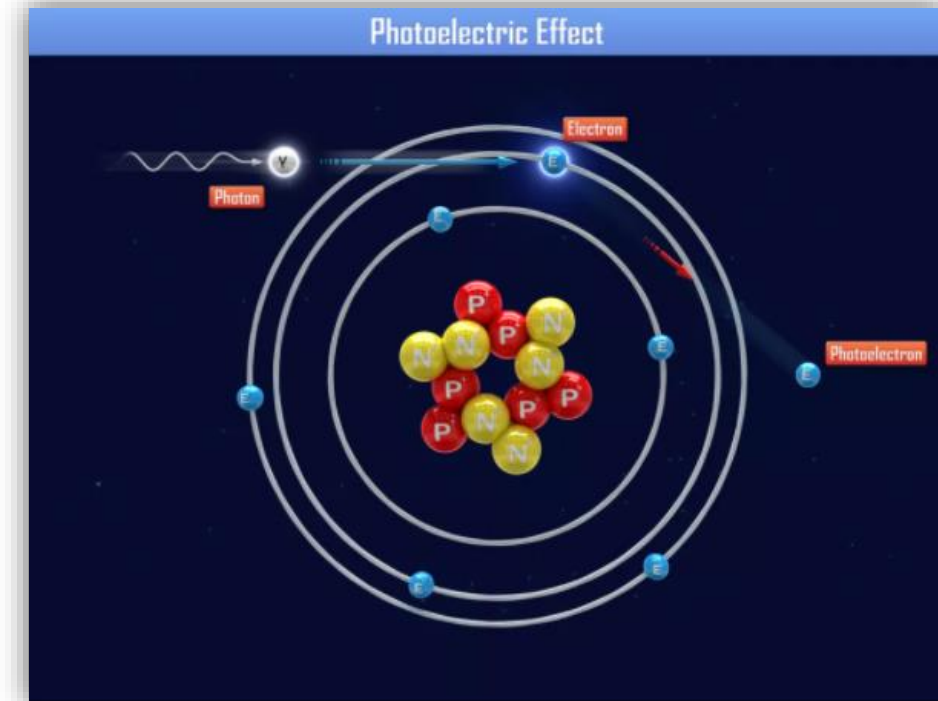




Fundamento teórico

Efecto Fotoeléctrico:

- ✓ Constituye uno de los principales efectos usados en tecnología de sensores ópticos.
- ✓ Sucede cuando el fotón incidente es absorbido por un electrón en el átomo o metal, y el (foto)electrón es expulsado/emitado de la “superficie”.
- ✓ Los (foto)electrones solo son emitidos por efecto fotoeléctrico si el fotón alcanza o excede una “Energía Umbral”.



THE
NOBEL
PRIZE

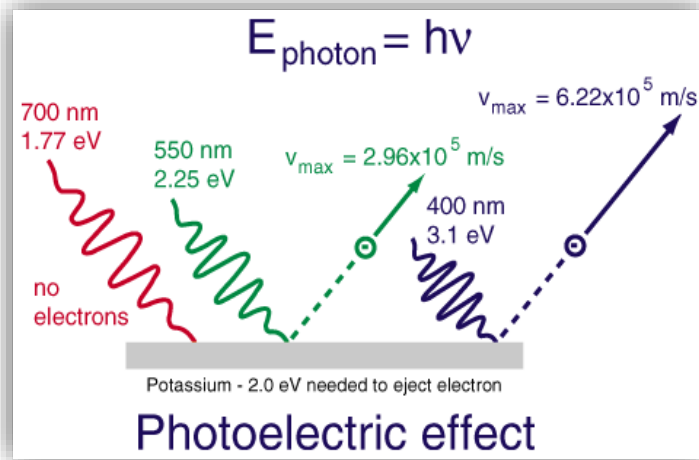
The Nobel Prize in Physics 1921 was awarded to Albert Einstein "for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect."

La teoría de Einstein predice que: *“la energía cinética máxima del fotoelectrón emitido depende solo de la frecuencia de la luz incidente y no de su intensidad”.*



Fundamento teórico

Fenomenológicamente, el fotón interactúa con un electrón ligado en el átomo, y un fotoelectrón energético es emitido desde una de sus capas ligadas:



La energía cinética (T o E_e) del fotoelectrón emitido es estimada como:

$$T = h\nu - W$$

(Ecuación de Einstein)

$$eV_o = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2 = h\nu - W$$

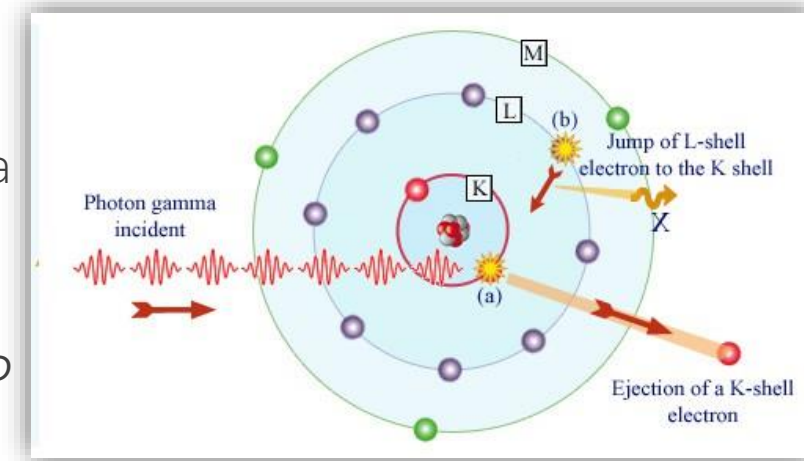
$h\nu$ = energía del fotón incidente.

W = energía de enlace del fotoelectrón en su capa original (E_b), función de trabajo del material, o **Energía Umbral** ($h\nu_0$).

Para fotones(rayos)- γ :

Para $E \geq 10^2 \text{ keV}$ \rightarrow el fotoelectrón transporta la mayor parte de la energía del fotón incidente ($h\nu$).

Después de la interacción fotoeléctrica \rightarrow creación de un *átomo absorbente ionizado* con una vacante en una de sus capas ligadas:





Fundamento teórico

Los fotones pueden cambiar de dirección inelásticamente o elásticamente (ej. Compton) o ser absorbidos (“desaparecer”) (fotoeléctrico, producción de pares) por/en la materia (átomos, electrones).

La **absorción de fotones** puede explicarse desde la atenuación exponencial de un haz de fotones:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

x = longitud del camino en el material o espesor,

$I(x)$ = intensidad del haz de fotones después de x distancia, con $I_0 = I$ (en $x = 0$), y

μ = coeficiente de absorción (relacionado con coeficiente de atenuación de masa $\mu' [\text{cm}^2/\text{g}] = \mu / \rho$).

La **probabilidad de absorción de un fotón** por la materia viene dada por la suma de las secciones eficaces discutidas anteriormente:

$$\sigma = \sigma_{ph} + \sigma_c^{atom} + \sigma_{pair} \quad ; \quad \sigma_c^{atom} = Z\sigma_c^e$$

N_A = número de Avogadro

ρ = densidad del material

A = peso molecular

La **probabilidad de absorción de fotones por unidad de longitud** viene dada por el producto de la sección eficaz y la densidad de átomos (N):

$$\mu = N\sigma$$

$$\mu = \frac{N_A \rho}{A} \sum_i \sigma_i$$



Fundamento teórico

Fotoeléctrico y producción de pares → energía de los fotones completamente absorbida.

Dispersión Compton

→ parte de energía de los fotones absorbida → $\mu_c = \mu_{cs} + \mu_{ca}$

Coeficiente de absorción de masa

$$\mu_a = \mu_{ph} + \mu_{as} + \mu_{pair}$$

Coeficiente de atenuación de masa

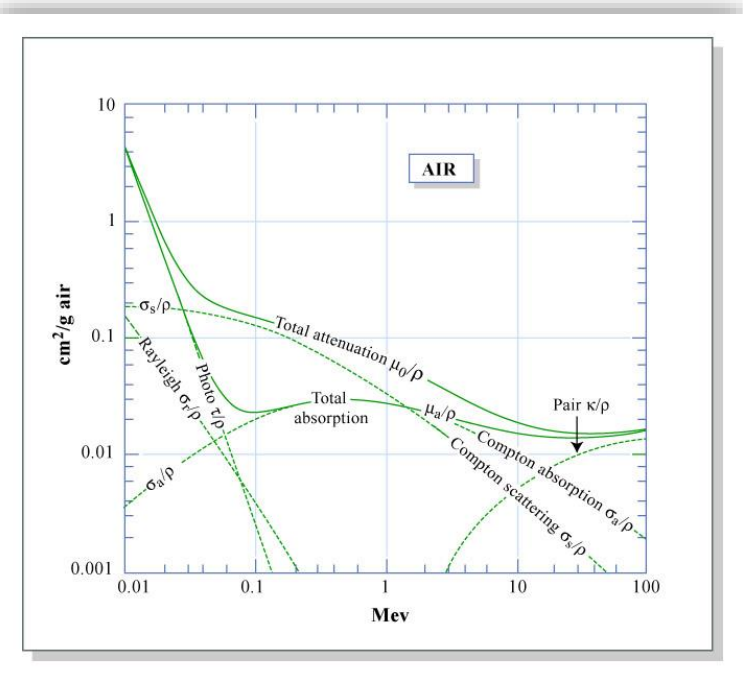
$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_{pair}$$

Sección eficaz de dispersión de energía →

$$\sigma_{cs} = \frac{E'_y}{E_y} \sigma_c$$

Sección eficaz de absorción de energía →

$$\sigma_{as} = \sigma_c - \sigma_{cs}$$



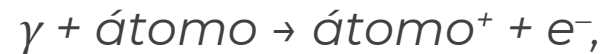
Coeficiente de atenuación de masa para fotones (ej., aire) es calculado a partir de tablas de secciones eficaces atómicas.

Sidney Yip. 22.101 Applied Nuclear Physics. Fall 2006. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu>. License: Creative Commons BY-NC-SA.



Fundamento teórico

De tal forma, el efecto fotoeléctrico puede reducirse a ser explicado como un interacción:



donde la sección eficaz (σ) de interacción escala con el número atómico (Z) y la energía (E) como:

$$\sigma \propto Z^5/E^3.$$

➤ Por aproximación de Born, a energías intermedias, puede deducirse:

$$\sigma_{Photo} = 4\sqrt{2}\sigma_0\alpha^4 Z^5 \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{7/2} \quad \epsilon = E_\gamma/m_e c^2 \quad (\epsilon = \text{energía reducida del fotón})$$

pudiendo ser expresada en términos de la sección eficaz de Thompson (σ_0), para una dispersión elástica fotón – electrón:

$$\sigma_0 = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = 0.66 \text{ barn}$$

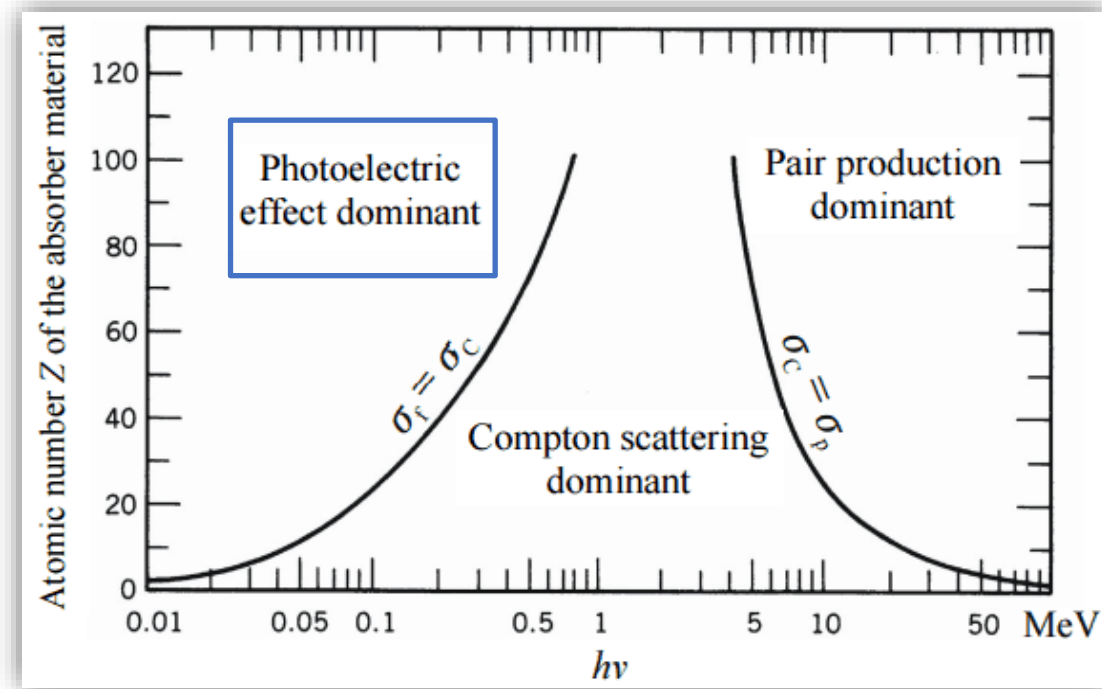


Fundamento teórico

➤ Para altas energías ($\epsilon \gg \gg 1$), la sección eficaz fotoeléctrica puede describirse a través de la expresión:

$$\sigma_{Photo} = \frac{3}{2} \sigma_0 \alpha^4 Z^5 \left(\frac{1}{\epsilon}\right)$$

mayor absorción por efecto fotoeléctrico para materiales absorbentes con valores grandes de Z ($\sigma \propto Z^5$).



XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX



Fundamento teórico

La **desexcitación del átomo excitado** se hace a través de dos efectos, con escala de tiempo 10^{-16} s:

- Efecto Auger: $\text{átomo}^+ \rightarrow \text{átomo}^{++} + e^-$,

Electrones Auger depositan energía localmente debido a su pequeña energía (<10 keV).

- Fluorescencia: $\text{átomo}^+ \rightarrow \text{átomo}^+ + \gamma$,

Fotones (rayos-x) interactúan a través de efecto fotoeléctrico. “Rango” más largo.



Asuntos claves del efecto fotoeléctrico: “mensajes para llevar a casa”

1. Teóricamente, el efecto fotoeléctrico es difícil de tratar rigurosamente, debido a la complejidad de las funciones de onda de Dirac para los electrones atómicos.
2. Domina a bajas energías de los rayos- γ .
3. Conduce a la emisión de fotoelectrones por la materia cuando la luz (fotones) incide sobre ellos.
4. La energía máxima que puede recibir un electrón en cualquier interacción es $h\nu$.
5. Los electrones solo son emitidos por efecto fotoeléctrico si el fotón alcanza o supera un umbral de energía.
6. Un electrón libre (ej., de una nube atómica) no puede absorber toda la energía del fotón incidente. Este es el resultado de la necesidad de conservar tanto el momento como la energía.
7. La sección eficaz para la emisión de $n = 1$ (capa K) fotoelectrones es mayor que la de $n = 2$ (capa L) fotoelectrones. Este es el resultado de la necesidad de conservar el momento y la energía.
8. El efecto fotoeléctrico viene acompañado de la emisión de rayos-x o electrones Auger (desexcitación del átomo).

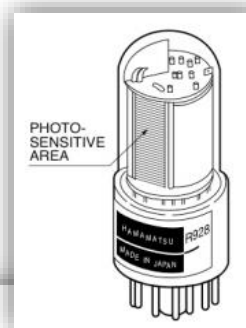
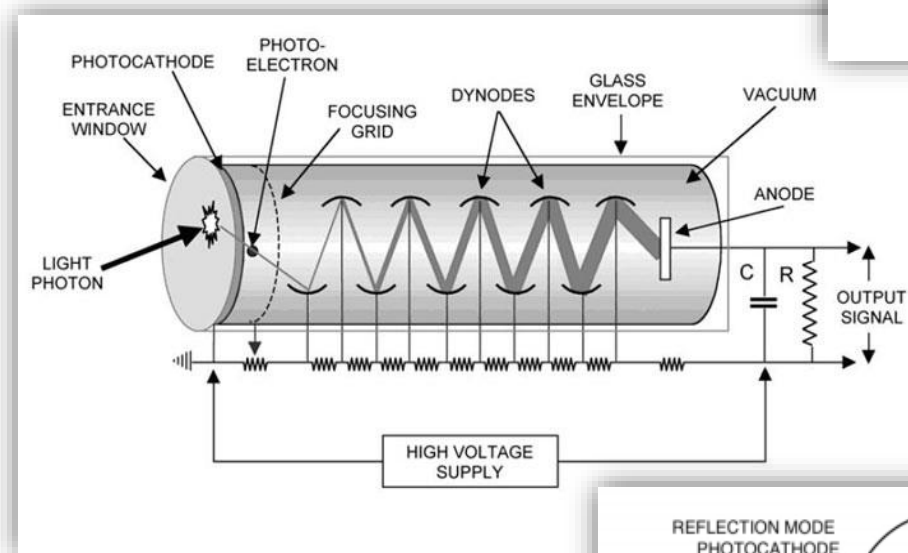
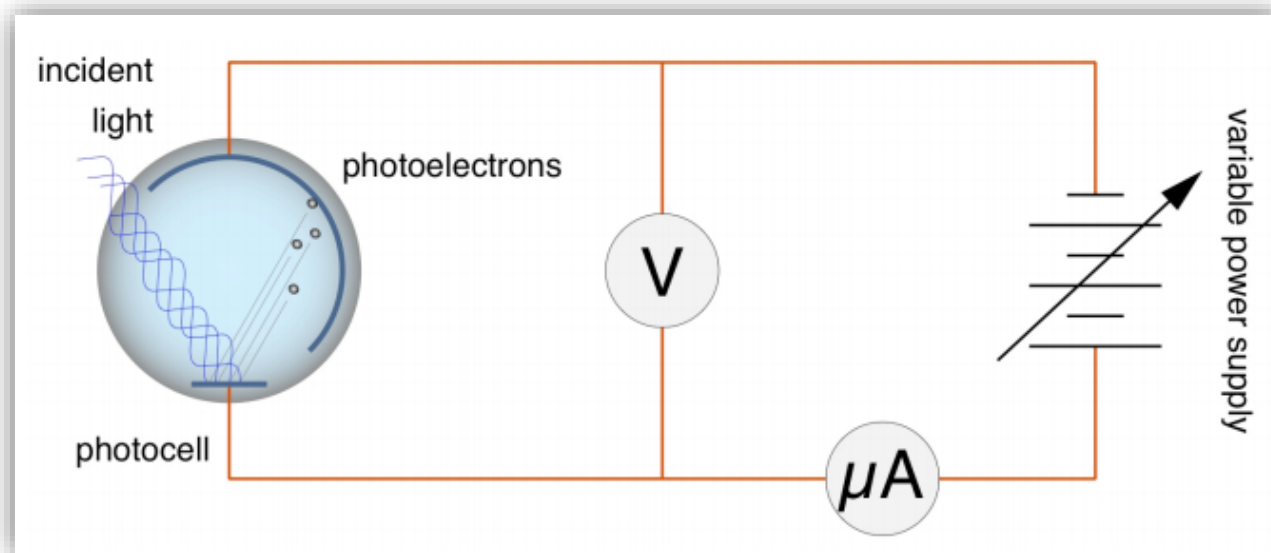


Fundamento experimental

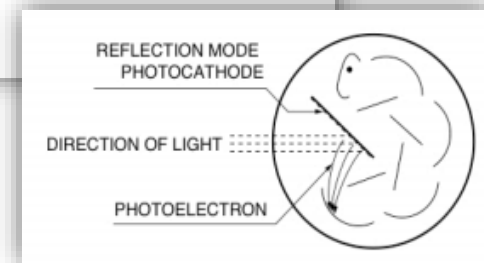
DETECCIÓN DE LUZ (FOTONES):

Sensores ópticos: foto-multiplicadores de tubo de vacío (Photo-Multipliers Tubes o PMTs)

El efecto fotoeléctrico “convierte” luz en electrones, los cuales pueden ser medidos como una “foto-corriente”, permitiendo responder a entornos muy bajos de iluminación:



Un PMT es un dispositivo muy sensible usado para detector fotones vía efecto fotoeléctrico.

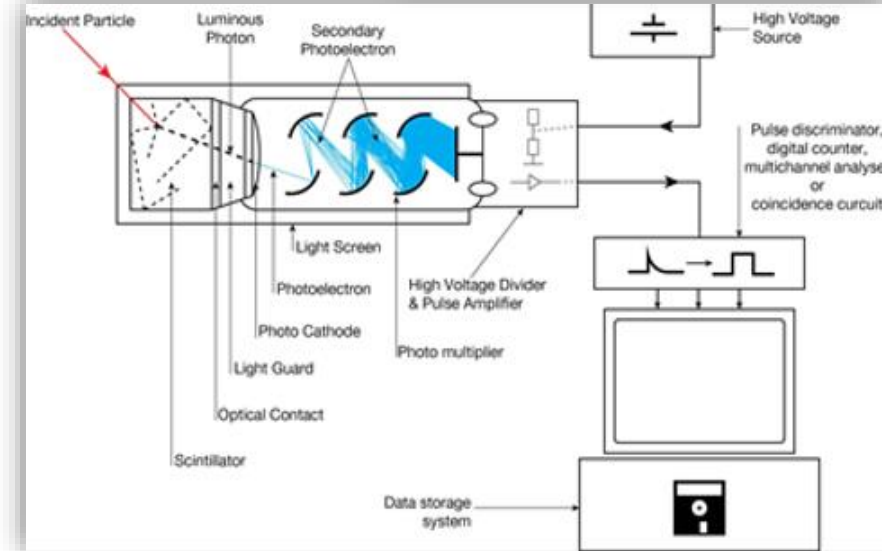
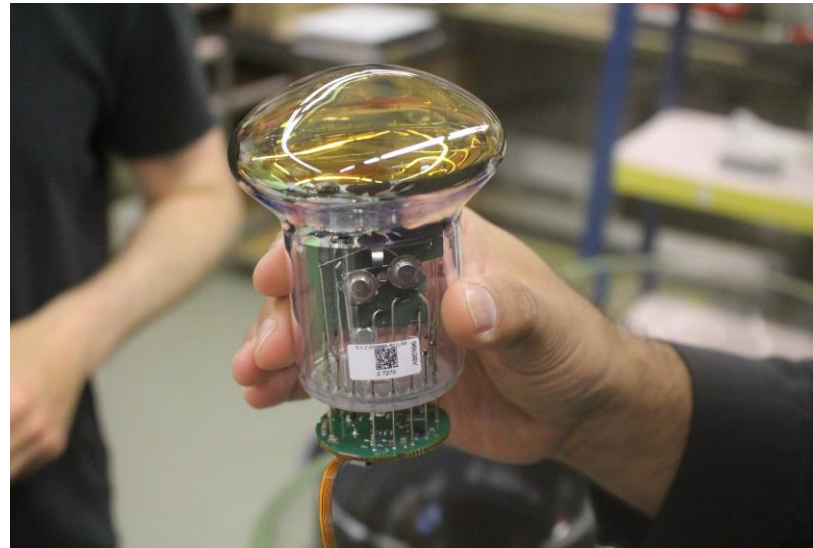
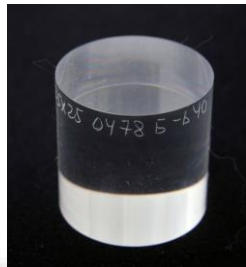
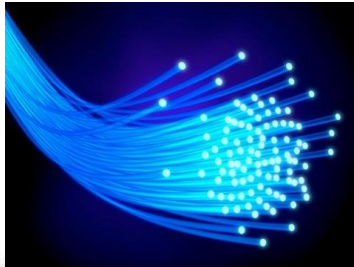
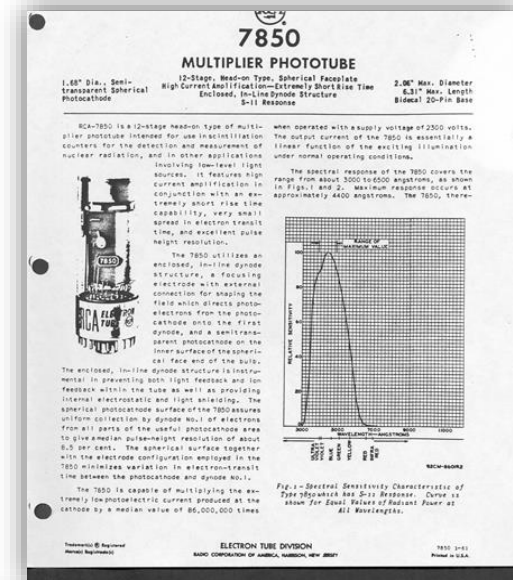




Fundamento experimental

El PMT, por tanto, “convierte” fotones en señales eléctricas, amplificadas a un nivel útil mediante la emisión de electrones secundarios.

- ✓ Principales **fenómenos físicos asociados:** *fotoemisión y emisión secundaria.*
- ✓ Dentro de la **instrumentación asociada:** centelladores, cambiadores de longitud de onda (*WLS*), dispositivos de multiplexado denso por división en longitudes de onda (*DWDM*), fibras ópticas (guías de luz), etc.





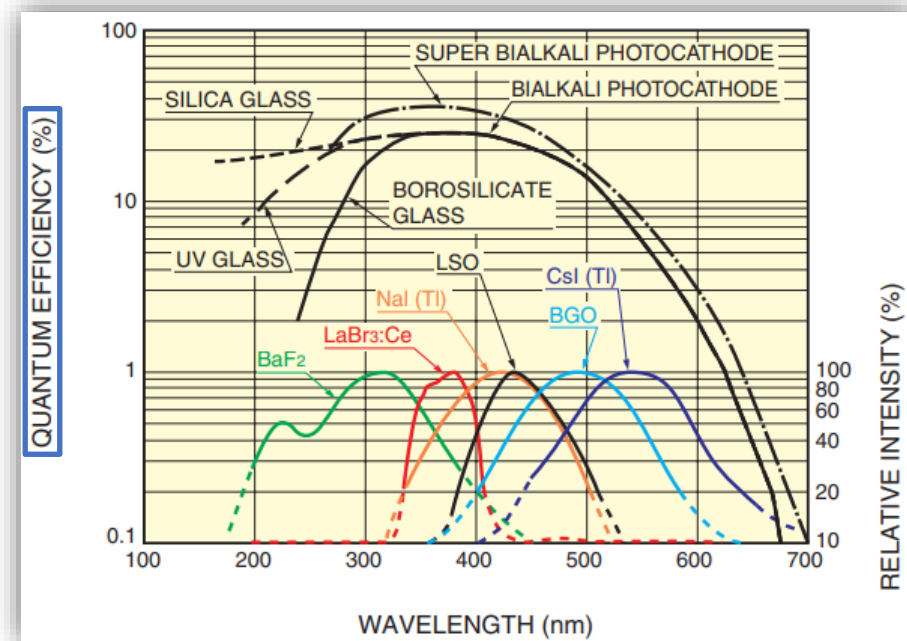
Fundamento experimental

Los PMTs amplifican la foto-corriente desde un “fotocátodo” (cátodo fotoemisor) de metal alcalino (con función de trabajo baja), creando pulsos de millones de electrones que pueden ser registrados.

Algunos factores que impactan el **desempeño de un PMT**:

- Divisores de Voltaje.
- Características espectrales (ej. sensibilidad radiante, **eficiencia cuántica**) en función de la longitud de onda.
 - Materiales de la “ventana” / sensibilidad espectral (ej., cristales, zafiros, sílice, vidrio-UV, borosilicato).
 - **Materiales del fotocátodo y composición** (ej., bi-alcalino, multi-alcalino). Sensibilidad luminosa (iluminancia).
- Características temporales (ej. pulsos tempranos, pulsos tardíos, corriente oscura).

Ej., la eficiencia cuántica (η) puede ser obtenida desde la sensibilidad radiante S_k [A/W] usando la siguiente ecuación:



η : número de fotoelectrones emitidos por el fotocátodo con respecto al número de fotones incidentes.

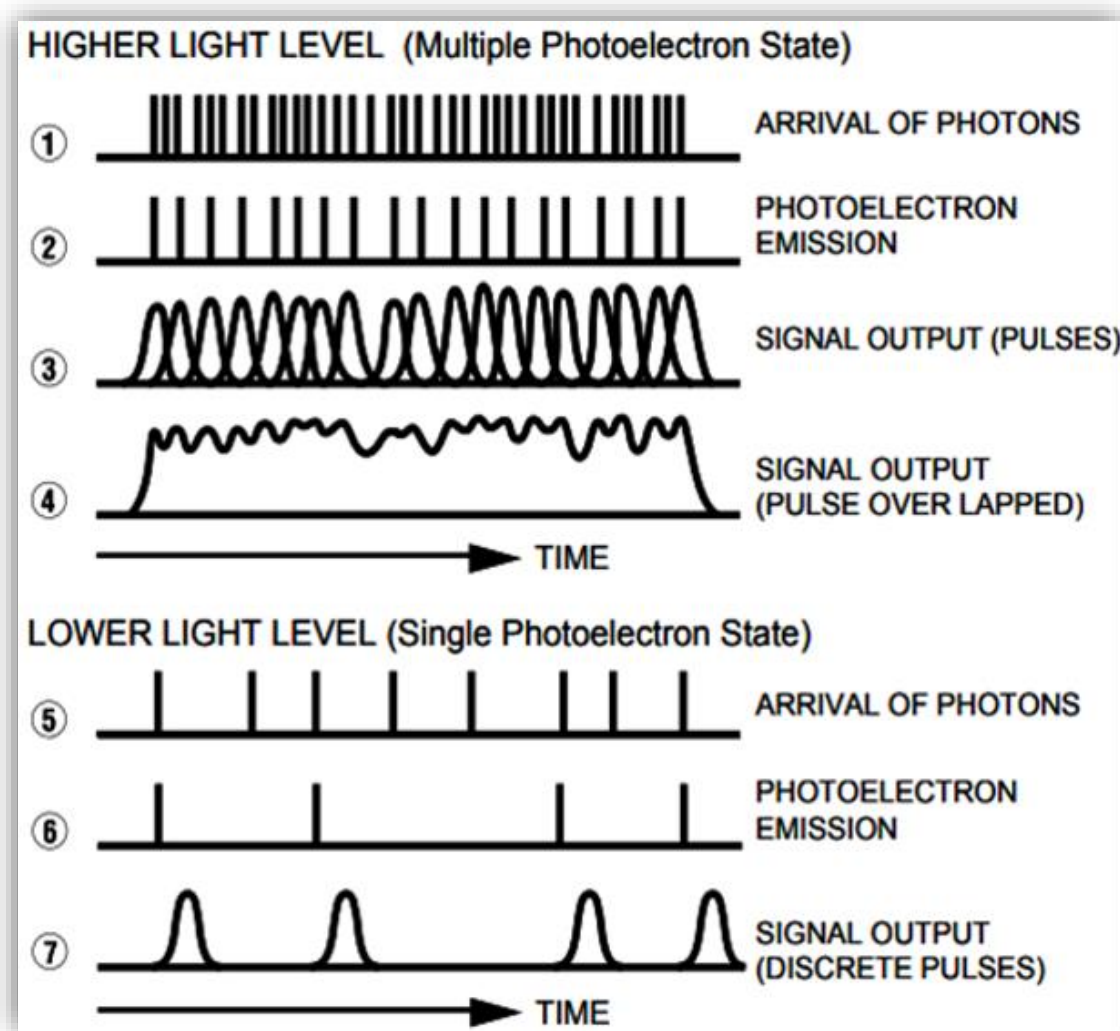
$$\eta (\%) = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} \cdot S_k = \frac{1240}{\lambda} \cdot S_k \cdot 100 (\%)$$

$$\begin{aligned} h: & 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \\ c: & 3.00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \\ e: & 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \end{aligned}$$



Fundamento experimental

Un PMT puede funcionar en **dos modos de trabajo**:



Flujo de fotones múltiples: pulsos de salida superpuestos

- ✓ Si el número de pulsos de fotoelectrones del PMT es demasiado grande para detectarlos individualmente, se puede medir una fotocorriente promedio.
- ✓ El flujo de fotones se puede calcular a partir de la sensibilidad radiante S_k [A/W].

Eventos de fotones individuales: pulsos de salida discretos

- ✓ Los pulsos de los fotoelectrones de un PMT pueden ser contados, dando lugar a la medida de fotones por segundo.
- ✓ Este método de detección se denomina modo de "conteo de fotones".



Fundamento experimental

Algunas aplicaciones:

Espectrofotometría.

Equipamiento médico (PET).

Biotecnología.

Medidas ambientales.

Inspección de pozos petroleros.

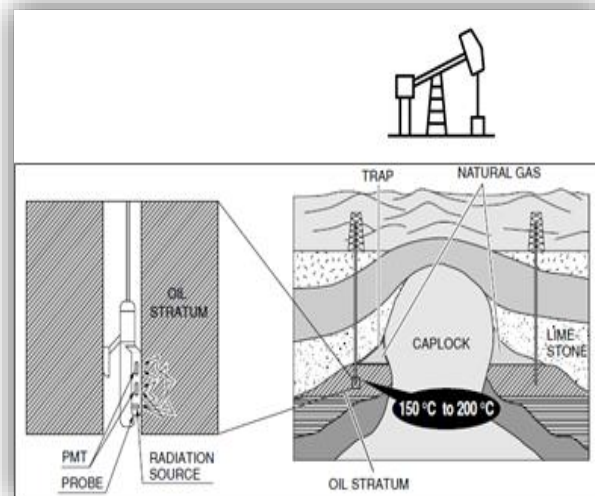
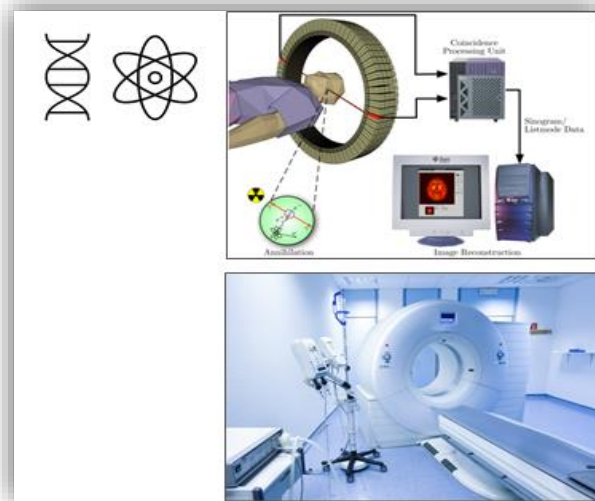
Monitores de radiación.

Medidas industriales.

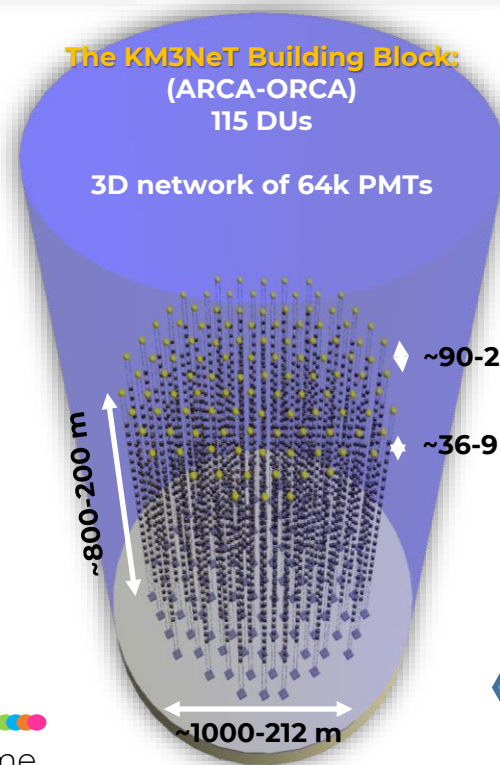
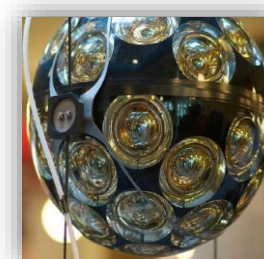
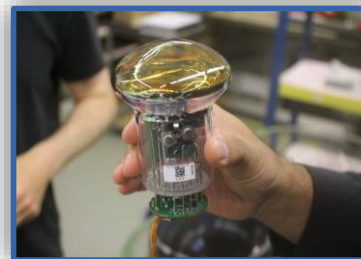
Aplicaciones aeroespaciales.

Espectrometría de masas.

Análisis de superficies de sólidos.



Física de Altas Energías (ej. neutrinos).

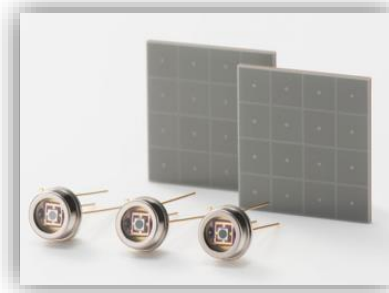




Fundamento experimental

Sensores ópticos: foto-multiplicadores de Silicio (*Silicon Photo-Multipliers* o SiPMs)

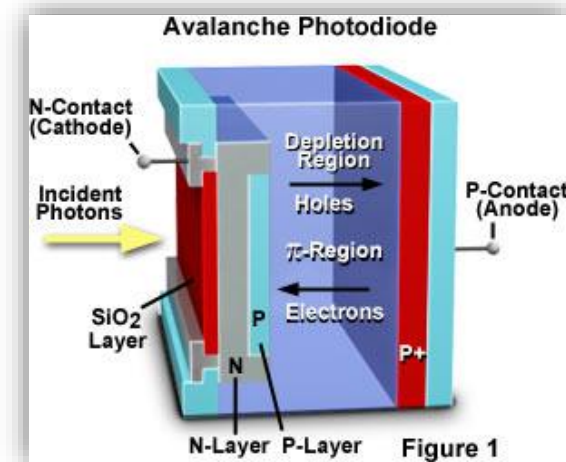
- ✓ Están compuestos por una **matriz de alta densidad de fotodiodos** de avalancha (*Avalanche Photo-Diodes* o APDs) pudiendo ser operados en modo Geiger (G-APD).
- ✓ Otros nombres: APD de único fotón (*Single-Photon Avalanche photoDiode* o SPAD) o contador de fotones de varios píxeles (*Multi-Pixel Photon Counter* o MPPC).



El APD:

Semiconductor a base de *Si*, contiene una unión-*pn*: región-*p* dopada positivamente con región-*n* dopada negativamente, intercalando un área de carga neutra o zona de carga espacial (*depletion region*).

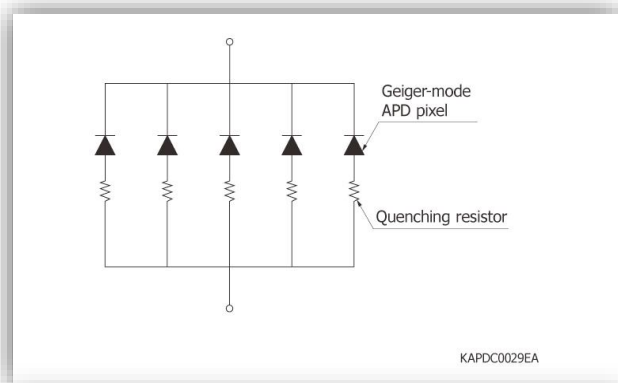
- Incidencia de fotones en el diodo.
- Paso a través de la capa de SiO_2 .
- Paso a través de capas *n* y *p*.
- Zona de carga y excitación de electrones libres y huecos.
- Migración al cátodo y al ánodo, respectivamente.



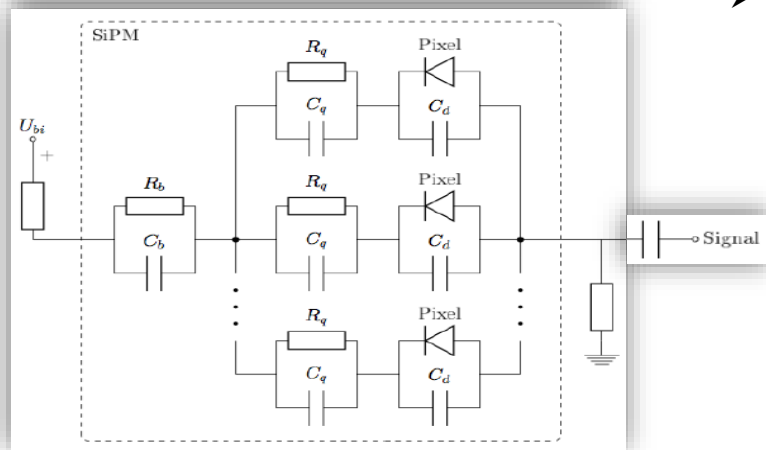


Fundamento experimental

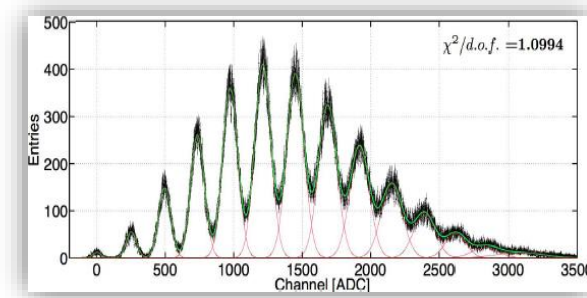
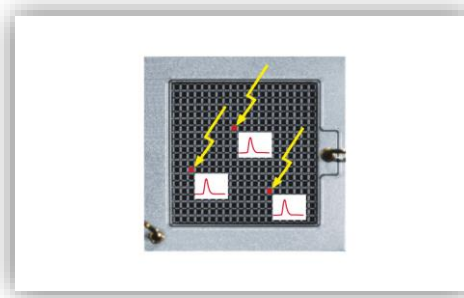
Elemento básico de un SiPM: píxel \rightarrow combinación G-APD + resistencia de *quenching* (apagado). Varios píxeles son conectados eléctricamente y dispuestos en 2D.



KAPDC0029EA



- ✓ Cada píxel emite un pulso con la misma amplitud cuando detecta un fotón.
- ✓ Pulsos generados por varios píxeles son emitidos mientras se superponen entre sí:
 - Si tres fotones inciden en diferentes píxeles y se detectan al mismo tiempo, el SiPM emite una señal cuya amplitud es igual a la altura de los tres pulsos superpuestos.



Cada píxel genera siempre un solo pulso, sin importar cuantos fotones inciden al mismo tiempo sobre él: la linealidad de salida empeora con el aumento de fotones incidentes en la matriz.



Fundamento experimental

Algunas aplicaciones:

Medición de distancias (LiDAR).

Equipamiento médico (PET) (*).

Citometría de flujo.

Contador de partículas (*).

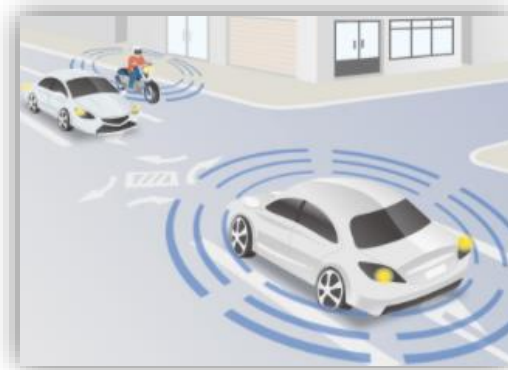
Oftalmoscopio láser de barrido (SLO).

Monitor de higiene.

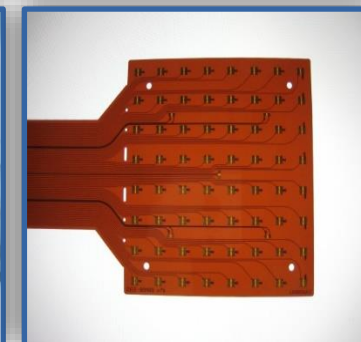
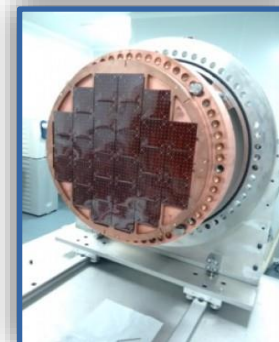
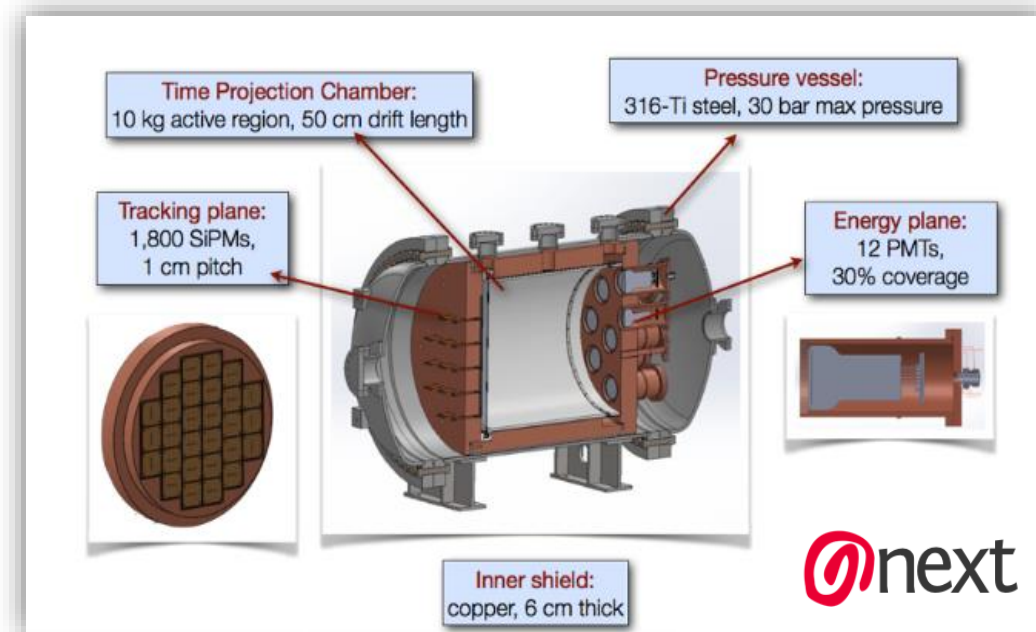
Computación cuántica y criptografía.

Medición de fluorescencia y quimioluminiscencia.

* Versatilidad con PMTs, en particular.



Física de Altas Energías (ej. neutrinos).





Fundamento experimental

ANÁLISIS DE DATOS Y ESTADÍSTICA DE CONTEO: tres modelos específicos de relevante utilidad

1. Distribución Binomial: generalmente aplicable a todos los procesos de p -constante. Engorroso para muestras grandes. Asociando:

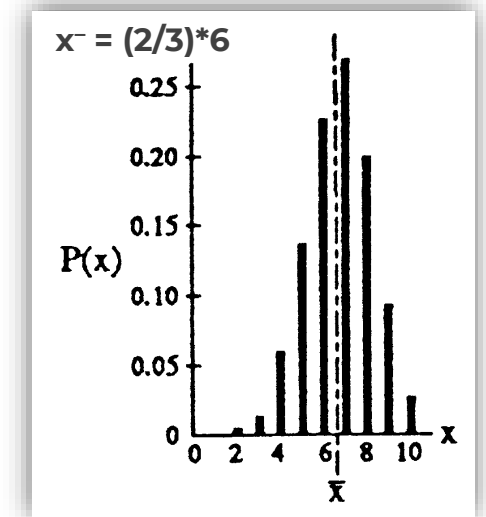
n = número de ensayos, extracciones, eventos u **observaciones**.

p = probabilidad de acierto para cada observación.

Podemos predecir la probabilidad de contar exactamente " x " aciertos:

$$P(x) = \frac{n!}{(n-x)!x!} p^x (1-p)^{n-x}$$

$P(x)$: "función de distribución de probabilidad" (PDF) esperada



Normalización:

$$\sum_{x=0}^n P(x) = 1$$

Valor medio esperado:

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^n x \cdot P(x)$$
$$\bar{x} = p \cdot n$$

Varianza esperada:

$$\sigma^2 = \sum_{x=0}^n (x - \bar{x})^2 \cdot P(x)$$
$$= np(1-p) = \bar{x}(1-p)$$

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\text{variance}}$$
$$\sigma = \sqrt{\bar{x}(1-p)}$$



Fundamento experimental

2. Distribución de Poisson: simplificación de la distribución binomial si la probabilidad de acierto “ p ” es pequeña ($p \ll 1$).

$$P(x) = \frac{(pn)^x e^{-pn}}{x!}$$

$P(x)$: "función de distribución de probabilidad" (PDF) esperada

Normalización:

$$\sum_{x=0}^n P(x) = 1$$

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{x}$$

Valor medio esperado:

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^n x \cdot P(x)$$

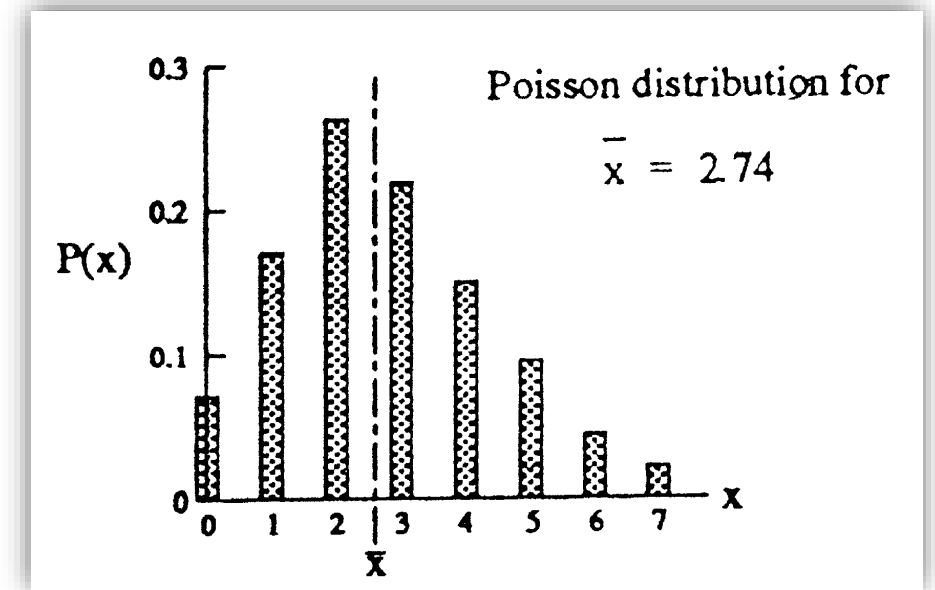


$$P(x) = \frac{(\bar{x})^x e^{-\bar{x}}}{x!}$$

$$\bar{x} = p \cdot n$$

Varianza esperada:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sum_{x=0}^n (x - \bar{x})^2 \cdot P(x) \\ &= pn = \bar{x} \end{aligned}$$

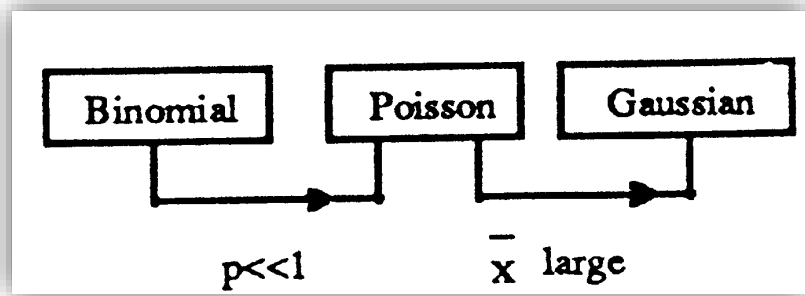


El valor de $\bar{x} = pn$ a menudo se conoce como “**tasa media de observaciones**”.



Fundamento experimental

3. Distribución Gaussiana: simplificación adicional permitida si la *tasa media de observaciones* ($\bar{x} = pn$) es grande.



$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{x}}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\bar{x}}}$$

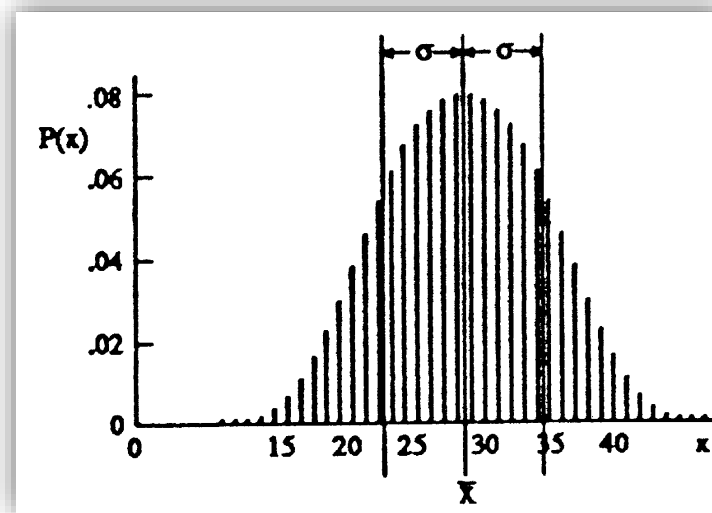
$P(x)$: "función de distribución de probabilidad" (PDF) esperada

Valor medio esperada, varianza esperada, desviación estándar:

$$\bar{x} = pn \qquad \sigma^2 = \bar{x} \qquad \sigma = \sqrt{\bar{x}}$$

Normalización:

$$\sum_{x=0}^n P(x) = 1$$



Uso correcto de estimadores:

Podemos aplicar $\sigma = \sqrt{x}$ solo si x representa un número contado de observaciones.

➤ No aplica directamente a:

- Tasas de conteos.
- Sumas o diferencias de cuentas.
- Promedios de cuentas independientes.
- Cualquier cantidad derivada.

➤ "Fórmula de propagación de errores" debe considerarse.



LA SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PREVIA A LA EXPERIMENTACIÓN:



Simulador señal / ruido para conteo de fotones (Hamamatsu Photonics):

La relación señal-a-ruido (*Signal-to-Noise ratio*, S/N) es una figura de mérito que se utiliza para describir qué tan discernible es la señal del ruido.

En aplicaciones de detección de luz, con ganancia 1, la S/N está fundamentalmente definida como:

$$S/N = S_{input} \times PDE / (n^2_{\text{photon-shot}} + n^2_{\text{dark-shot}} + n^2_{\text{readout}})^{1/2} .$$

En ocasiones encontrada en otras formas, debido a diversos factores, como la naturaleza del esquema de lectura en el conteo de fotones, una definición más popular viene siendo:

$$S/N = N_{total} / (N_{total} + 2N_{dark})^{1/2} = N_{total} / (\sigma^2_{T-D} + \sigma^2_D)^{1/2} .$$

Asumiendo la combinación RMS de ruidos disparados por cuentas oscuras y fotoseñales.

Hamamatsu y Altas Energías → ATLAS, CMS, ALICE. Pierre Auger. IceCube, KM3NeT, Super-K, Hyper-K ...



Fundamento experimental

Hamamatsu dispone de una herramienta en línea, como **primera frontera, para la elección de un fotosensor** de acuerdo a las necesidades, como uno de los muchos factores a considerar para el rendimiento óptimo del sistema de detección:



Inputs principales para conteo de fotones con PMT:

Sensibilidad de conteo.
Longitud de onda.
Tasa de cuentas oscuras.
Resolución para par de pulsos.

Inputs principales para conteo de fotones con SiPM:

Eficiencia de fotodetección.
Cuentas oscuras.
Ancho de pulso TTL.

Probar PMT → variar parámetros.

Probar SiPM → variar parámetros.

PMT Vs SiPM.



🌀 EJEMPLO DE CONCEPTUALIZACIÓN (TEÓRICA) – I: en aula, no entregable

Consideramos el efecto fotoeléctrico en plata, la longitud de onda (λ_0) del umbral fotoeléctrico en este material es 325 nm. Calcular la velocidad del electrón liberado de una superficie de plata por luz UV de $\lambda = 253.6 \text{ nm}$.

Solución:

De acuerdo a la relación de Einstein, la energía cinética del fotoelectrón puede calcularse como:

$$T = h \nu - h \nu_0$$

donde,

ν = frecuencia del fotón incidente,

ν_0 = frecuencia umbral.

➤ La energía correspondiente para la luz UV (λ) sería:

$$E = h\nu = 1.241 / 253.6 \text{ eV} = 4.894 \text{ eV}$$

➤ y para la longitud de onda (λ_0) del umbral fotoeléctrico:

$$E = h\nu_0 = 1.241 / 325 = 3.818 \text{ eV}$$



Conceptualización

De esta forma podemos calcular la energía cinética del electrón librado como:

$$T = 4.894 \text{ eV} - 3.818 \text{ eV} = 1.076 \text{ eV},$$

y de allí la velocidad del electrón:

$$T = (1/2)(mv^2) = (mc^2v^2)/(2c^2) = (0.511 \times 10^6 \text{ eV}^2)/(2c^2) = 1.076 \text{ eV},$$

siendo extraída como:

$$\mathbf{v = 2.05 \times 10^{-3}c = 6.15 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}}$$



🌀 EJEMPLO DE CONCEPTUALIZACIÓN (EXPERIMENTAL) – II: en aula, no entregable

Se utiliza un detector de Silicio para medir la intensidad de un haz de fotones de 150 keV. Se encuentra que la relación señal / ruido (S/N) es 300. Determine el ruido introducido por la electrónica asociada.

Solución:

Primero calculamos el nivel de ruido estadístico, partiendo de la estimación del número de pares de carga generados. Suponiendo que toda la energía incidente se absorbe en el volumen activo del detector, el número de pares de huecos de electrones generados es:

$$N = E_{dep} / W = (150 \times 10^3) / 3.6 \quad (\text{para silicio } W = 3.6 \text{ eV} / \text{par-de-carga})$$

$$N = 4.17 \times 10^4 \text{ pares-de-carga}$$

Las fluctuaciones estadísticas asociadas con la generación de pares de carga están dadas por:

$$\sigma_{stat} = \sqrt{FN} = \sqrt{(0.1)(4.17 \times 10^4)} \quad (\text{para Silicio y Germanio } F \approx 0.1)$$

$$\sigma_{stat} = 64.5 \text{ pares-de-carga}$$



Conceptualización

El ruido debido a la electrónica se puede estimar a partir de la expresión de la relación S/N de la siguiente manera:

$$S/N = N / (\sigma_{stat}^2 + \sigma_{elec}^2)^{1/2} ,$$

Despejando σ_{elec} de la ecuación tenemos:

$$\sigma_{elec} = [(N/(S/N))^2 - \sigma_{stat}^2]^{1/2} ,$$

$$\sigma_{elec} = [(4.17 \times 10^4 / (300))^2 - 64.5^2]^{1/2} ,$$

$$\sigma_{elec} = 123 \text{ pares-de-carga}$$



🌀 EJERCICIO DE CONCEPTUALIZACIÓN (TEÓRICA) – I: en casa, entregable

Ahora nos enfocamos en el caso de fotones de alta energía. Un fotón de rayos- γ de ^{137}Cs cuando incide sobre un trozo de uranio expulsa fotoelectrones de su capa- K . Su momento magnético nuclear medido con un espectrómetro magnético de rayos- β , arroja un valor de $Br = 3.083 \times 10^{-3} \text{ Wb} / \text{m}$. La energía de enlace de un electrón- K en uranio es 115,59 keV.

Determine:

- La energía cinética de los fotoelectrones.
- La energía de los fotones de rayos- γ .





🌀 EJERCICIO DE CONCEPTUALIZACIÓN (EXPERIMENTAL) – II: en casa, entregable

Se encuentra que una fuente radiactiva tiene una tasa de conteo de 5 cuentas / segundo.

¿Cuál es la probabilidad de observar:

- a) ninguna cuenta en un período de 2 segundos?
- b) ¿Cinco cuentas en 2 segundos?



2. Arreglo experimental





Arreglo experimental

ONLINE: VIA ZOOM

- [Banco de prueba experimental](#) construido por el Prof. Dennis Cazar en la USFQ: 3 pasos simples.



**1. Banco de pruebas
(diseño experimental)**

2. Calibración del sistema



3. Operación del sistema



3. Aprendizaje práctico





Aprendizaje práctico

OFFLINE: VIA MATTERMOST, entregable

- Con referencia al banco de prueba experimental presentado anteriormente, se usará un formato de datos equivalente **para trabajo extraclase**, de los tantos que disponibles en el experimento LAGO.



Mattermost®



The Latin American Giant Observatory (LAGO)

DATA SET





4. Lecturas adicionales, recursos web y bibliográficos



LECTURAS ADICIONALES:

What, exactly, is a photon?

<https://amp-spie-org.cdn.ampproject.org/c/s/amp.spie.org/news/photonics-focus/novdec-2020/what-exactly-is-a-photon>

Eight things you might not know about light

<https://www.symmetrismagazine.org/article/eight-things-you-might-not-know-about-light>

The Simple Idea Behind Einstein's Greatest Discoveries

<https://www.quantamagazine.org/einstein-symmetry-and-the-future-of-physics-20190626/>

Explaining the laser's light: classical versus quantum electrodynamics in the 1960s

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00407-015-0166-8>

Photomultiplier Tubes: basics and applications. Fourth Edition

https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT_handbook_v4E.pdf



A technical guide to silicon photomultipliers (MPPC) - Overview

<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-note/sipm-mppc-technical-note/index.html>

Simulating Silicon Photomultiplier Response to Scintillation Light

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4519993/>

Photon Counting SNR Simulator

https://hub.hamamatsu.com/us/en/interactive_tools/photon-counting-snr-simulator/index.html

Photon Counting in Astrophotometry. Fundamentals and Some Advices for Beginners.

Romualdas KALYTIS. Astronomical Observatory, Lithuania.

<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/131254>



RECURSOS WEB:

Online Particle Physics Information

<https://scientific-info.cern/search-and-read/online-resources/online-particle-physics-information>

Physics LibreTexts: Interaction of Radiation with Matter

[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Nuclear_and_Particle_Physics/Book%3A_Introduction_to_Applied_Nuclear_Physics_\(Cappellaro\)/08%3A_Applications_of_Nuclear_Science_\(PDF_-_1.4MB\)/8.01%3A_Interaction_of_Radiation_with_Matter](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Nuclear_and_Particle_Physics/Book%3A_Introduction_to_Applied_Nuclear_Physics_(Cappellaro)/08%3A_Applications_of_Nuclear_Science_(PDF_-_1.4MB)/8.01%3A_Interaction_of_Radiation_with_Matter)

MIT Open Course Ware – Applied Nuclear Physics – Fall 2006

<https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-101-applied-nuclear-physics-fall-2006/#>



Nuclear Power: light-matter interaction

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/photoelectric-effect/>

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/compton-scattering/>

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/>

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/pair-production/>

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/interaction-radiation-matter/interaction-gamma-radiation-matter/gamma-ray-attenuation/>



RECURSOS BIBLIOGRÁFICOS:

Particle Detectors. Second Edition. Claus Grupen and Boris Shwartz.

Chapter 1 – Interactions of particles and radiation with matter – 1.2 “interaction of photons”.

Radiation Detection and Measurement. Third Edition. Glenn F. Knoll.

Chapter 3 – Counting statistics and error prediction.

Chapter 4 – General properties of radiation detectors.

Chapter 8 – Scintillation detector principles.

Chapter 9 – Photomultiplier tubes and photodiodes.

Physics and Engineering of Radiation Detection. Second Edition. Syed Naeem Ahmed.

Chapter 2 – Interaction of radiation with matter – 2.3 “interaction of photons with matter”.

Chapter 6 – Scintillation detectors and photodetectors.

Chapter 9 – Essential statistics for data analysis.

Chapter 10 – Software for data analysis.



Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments. Second Edition. William R. Leo.

Chapter 2 – Passage of Radiation Through Matter – 2.7 “the interaction of photons”.

Chapter 4 – Statistics and Treatment of Experimental Data.

Chapter 5 – General Characteristics of Detectors.

Chapter 7 – Scintillation Detectors.

Chapter 8 – Photomultipliers.

Chapter 9 – Scintillation Detector Mounting and Operation.

Chapter 10 – Semiconductor Detectors.

Statistical Data Analysis. First Edition. Glen Cowan.

Chapter 1 – Fundamental Concepts.

Chapter 2 – Examples of Probability Functions.

Chapter 5 – General Concepts of Parameter Estimation.

Chapter 9 – Statistical Errors, Confidence Intervals and Limits.



Probability and Statistics in Particle Physics. First Edition. Frodesen, Skjeggestad, Tofte.

Chapter 2 – Probability and Statistics.

Chapter 3 – General Properties of Probability Distributions.

Chapter 4 – Special Probability Distributions.

Chapter 6 – Comparison of Experimental Data with Theory.

Chapter 7 – Statistical Inference from Normal Samples.

Chapter 8 – Estimation of Parameters.



<http://laconga.redclara.net>



contacto@laconga.redclara.net

@lacongaphysics



lacongaphysics



Latin American alliance for
Capacity buildiNG in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.