

FÍSICA TEÓRICA 1 – 2do. Cuatrimestre de 2024

GUÍA 5: ONDAS PLANAS

1. **Cronómetros a cero.** Encontrar las amplitudes de las ondas reflejadas y transmitidas en el problema de una interfase entre dos dieléctricos (μ, ϵ , y μ', ϵ') para incidencia TM y TE. Registrar el tiempo. Repetir una vez por día. Discontinuar si los síntomas persisten luego de 2 semanas.
2. **Problema de las dos interfases.** Una lámina dieléctrica de permitividad ϵ_2 y espesor d separa dos medios semiinfinitos que tienen permitividades ϵ_1 y ϵ_3 ($\mu = 1$ en todo el espacio). Una onda plana de amplitud E_i incide sobre la interfase que separa los medios 1 y 2, formando un ángulo θ con la normal.

- (a) Considere por separado los casos TE y TM. Escriba el sistema de ecuaciones que determina todos los campos. Preste atención a las fases que sobreviven luego de eliminar las dependencias temporales y espaciales sobre cada interfase. Resuelva las ecuaciones para los campos. Descanse unos minutos.
- (b) Método alternativo y mucho más práctico: primero, notar que en la segunda interfase el problema involucra sólo tres ondas, de manera que las amplitudes están relacionadas por los coeficientes de transmisión y reflexión usuales, T_{23} y R_{23} . Eso elimina dos incógnitas de un plumazo (pero atención a las fases). En la primera interfase descomponga el problema como la superposición de dos problemas de tres ondas, con una onda incidente a cada lado de la interfase. ¡Haga un dibujo, diantres! Eso da, sin ningún trabajo, dos ecuaciones. La solución es inmediata y vale tanto para incidencia TM como TE. En particular, demuestre que el campo reflejado hacia el primer medio y el transmitido hacia el tercero tienen las siguientes amplitudes respecto del campo incidente:

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{R_{12} + R_{23}e^{2i\alpha}}{1 + R_{12}R_{23}e^{2i\alpha}}, \quad \frac{E_t}{E_i} = \frac{T_{12}T_{23}e^{i\alpha}}{1 + R_{12}R_{23}e^{2i\alpha}},$$

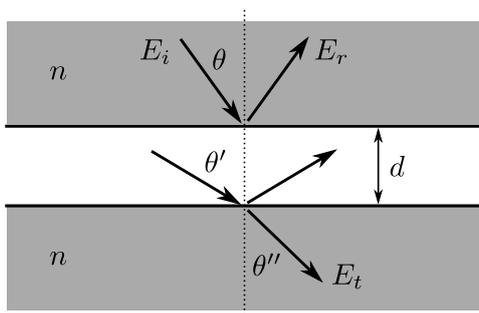
donde R_{ij} y T_{ij} son los coeficientes de reflexión y transmisión para una sola interfase y $\alpha = n_2 \cos \theta' \omega d / c$, siendo θ' el coseno del ángulo que forman con la normal los vectores de onda en el segundo medio. (Puede ser útil saber que: $T_{ij}T_{ji} = 1 - R_{ij}^2$ y que $R_{ij} = -R_{ji}$.)

- (c) Para $\theta = 0$, calcule el **promedio temporal** de los vectores de Poynting en los tres medios. Verifique que son iguales.
 - (d) Para $\theta = 0$, qué condición deben cumplir d y los ϵ_i para que no haya onda reflejada en el medio 1.
3. **Reflexión total interna.** Sobre una superficie dieléctrico–vacío, incide desde el dieléctrico (índice n real, $\mu = 1$) una onda plana linealmente polarizada con polarización TM, con un ángulo mayor que el ángulo crítico.
 - (a) Encontrar el vector de onda de la onda transmitida. Escribir explícitamente la parte real y la parte imaginaria del vector de onda. ¿En qué dirección se propaga la onda transmitida? ¿En qué dirección se atenúa? ¿Cuál es la longitud típica de atenuación?
 - (b) Mostrar que en la zona de vacío no hay, en promedio, flujo del vector de Poynting en la dirección normal.

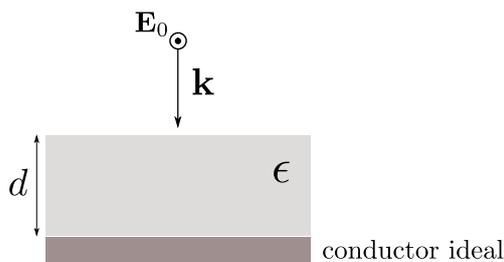
(c) Si la onda en la situación anterior incidiera además con el ángulo de Brewster, no habría tampoco onda reflejada. ¿Es esto posible?

4. **Reflexión total interna frustrada.** Considerar de nuevo el problema de las dos interfases, donde ahora el primer y el tercer medio tienen índice de refracción $n > 1$ y el medio central tiene $n' = 1$, como muestra la figura. En todo el espacio es $\mu = 1$. Suponer que la onda incidente es de tipo TE y que incide con un ángulo θ mayor (pero no muy próximo) al ángulo crítico entre el dieléctrico y el vacío. Notar que la figura es convencional: el vector de onda en la capa intermedia va tener parte real e imaginaria, y el ángulo θ' no puede en realidad dibujarse.

- (a) ¿Cuánto vale θ'' ?
- (b) Hallar la amplitud de la onda reflejada en el primer medio y la de la onda transmitida en el tercero.
- (c) Verificar que para $d = 0$ y $d \rightarrow \infty$ se recuperan los resultados previsibles. ¿Cuál es la escala de longitud con la que debe compararse d para saber si el problema puede aproximarse por alguno de esos dos casos?
- (d) Encontrar el comportamiento de la amplitud de la onda transmitida cuando d es próximo a cero y cuando $d \rightarrow \infty$. Es decir, diga cómo tiende la amplitud a los valores límite del ítem anterior.
- (e) Usando esas expresiones, encuentre en cada caso el valor medio de la componente normal del vector de Poynting en el tercer medio.



5. Una onda plana linealmente polarizada incide sobre un **espejo** en forma normal (lo que quiere decir que da lo mismo considerar que es TE o TM). El espejo está compuesto por una lámina dieléctrica de espesor d depositada sobre un conductor ideal, como muestra la figura (recordar: campos nulos dentro del conductor ideal). El dieléctrico tiene $\mu = 1$ y permitividad ϵ real. Plantee las condiciones de contorno y resuelva los campos en todo el espacio. Independientemente, verifique su solución usando los resultados del problema 2 a través de algún límite adecuado.



6. **Reflexión y transmisión en un buen conductor.** Considerar el problema de incidencia de una onda plana sobre una interfase vacío–conductor óhmico. El conductor ocupa el semiespacio $0 < z$. Asumir que $\epsilon = \mu = 1$ en todo el espacio, y que la conductividad σ del conductor es independiente de la frecuencia. Asimismo, asumir que $\omega \ll \sigma$, de modo que la corriente de desplazamiento en el conductor puede despreciarse. La onda incide desde el vacío con un ángulo θ .

- (a) Teniendo en cuenta todas las aproximaciones señaladas, encontrar la relación de dispersión $k(\omega)$ en el conductor.
- (b) Encontrar el **vector** de onda en el conductor, eligiendo la solución que es apropiada para la región $0 < z$. Escribir explícitamente la parte real y la parte imaginaria del vector de onda. ¿En qué dirección se propaga la onda transmitida? ¿En qué dirección se atenúa? ¿Cuál es la longitud típica de atenuación? ¿Qué pasa con la dirección de propagación a medida que el espesor pelicular $\delta \rightarrow 0$?
- (c) Encontrar las amplitudes (complejas) de las ondas reflejadas y transmitidas. Estudiar el límite $\delta \rightarrow 0$. Considerar los casos TE y TM.
- (d) Demostrar que para un buen conductor el coeficiente de intensidad reflejada $r = |R|^2$ es aproximadamente $r \approx 1 - 2\delta\omega/c$ para incidencia normal.
- (e) Calcular la longitud de atenuación en cobre para una frecuencia de 60 Hz ($\sigma \approx 5 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$), y para ondas de radio de 100 kHz en agua de mar ($\sigma \approx 5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$).

7. **Presión de radiación.**

- (a) Hallar la presión de radiación producida por una onda plana que incide normalmente desde el vacío sobre un **conductor perfecto**. Verificar que es igual a la densidad de energía de la onda.
- (b) Demostrar que la densidad de energía y la presión ejercida son también iguales en el caso en que la onda incide normalmente sobre una **superficie totalmente absorbente**.
- (c) ¿Qué radio debe tener una esfera hecha de un material con densidad 1 g cm^{-3} , que absorbe toda la luz que le llega, para que la presión de radiación de la luz solar compense la atracción gravitatoria del Sol? Aproximar la potencia de la radiación solar por $P = 4 \times 10^{26} \text{ W}$.

8* **Reflexión total externa.** Cuando rayos X inciden sobre la superficie de un metal con un ángulo mayor que cierto ángulo crítico θ_0 , sufren reflexión total. Para ángulos menores, los metales son transparentes a los rayos X. Como la incidencia ocurre en general desde el vacío, se habla de reflexión total externa. El ángulo θ_0 suele ser muy próximo a $\pi/2$, con lo que la incidencia es casi rasante. El fenómeno se usa para construir telescopios de rayos X. A diferencia de los espejos ordinarios, la incidencia rasante obliga a usar espejos sumamente elongados, prácticamente tubos cilíndricos. Calcular θ_0 como función de la frecuencia de los rayos X para el caso de polarización TE. Para eso, calcular la conductividad $\sigma(\omega)$ del metal aproximando a los electrones como libres, con una densidad $n \approx 8 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Usar como dato que la conductividad a bajas frecuencias es $\sigma_0 \approx 5 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}$. Estos son datos típicos para el cobre. La frecuencia de los rayos X comprende el rango $10^{17} \text{ Hz} \lesssim \omega \lesssim 10^{20} \text{ Hz}$.