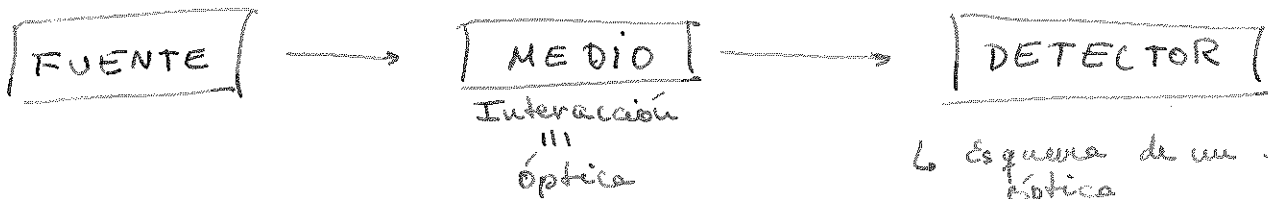


T. 1 - EXPERIMENTOS EN ÓPTICA

①



• Radiación e.m. \leftarrow cae E al detector \rightarrow proceso inverso
Fuente genera REM

• Medios - stmas materiales que $\begin{cases} \text{SÍ} \\ \text{NO} \end{cases}$ intercambian E con radiación

son sistemas $\begin{cases} \text{activos} \rightarrow \text{absorción; generat. de radiación} \\ \text{pasivos} \rightarrow \text{interaccionan sin variar la energía} \end{cases}$

\rightarrow trabajaremos con stmas pasivos (lentes, ... ideales)

x cambio dirección de propagación
x cambio polarización (rotadores, láminas retardadoras)
 \hookrightarrow transformaciones unitarias
x \vec{E} cambia, $\vec{E} \vec{E}^* = \mathbf{I} = \frac{E}{E_0}$ no

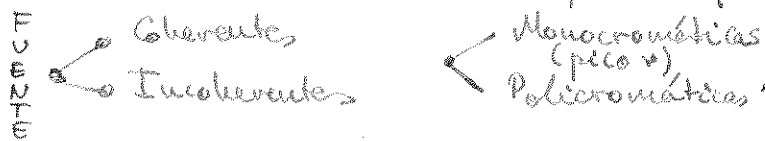
• Fuente luminosa \rightarrow radiación en el visible $\begin{cases} \lambda \in [400, 800] \text{ nm} \\ \nu \in [4, 8] \cdot 10^{14} \text{ Hz} \end{cases}$
 $E = h\nu \in [1, 3] \text{ eV}$
 \equiv espectro óptico

\rightarrow bajas ν , interacción luz materia descrita x onda clásica, modelo ondulatorio, eqs de Maxwell

\rightarrow altas ν , modelo corpuscular, fotones

\rightarrow frontera \rightarrow mezclas, región interesante xa estudiar C.E.M.
 \rightarrow coincide con espectro óptico

\rightarrow región gener. campo EM corresponde a tamaños materia $\approx \lambda$
x moléculas: infrarrojo
x límite atómico: espectro óptico



\rightarrow filtro cromático interferencial, pierdes 99% luz, sólo pasa banda estrecha alrededor de λ , mejor partir ya de láser o lámpara espectral puntual



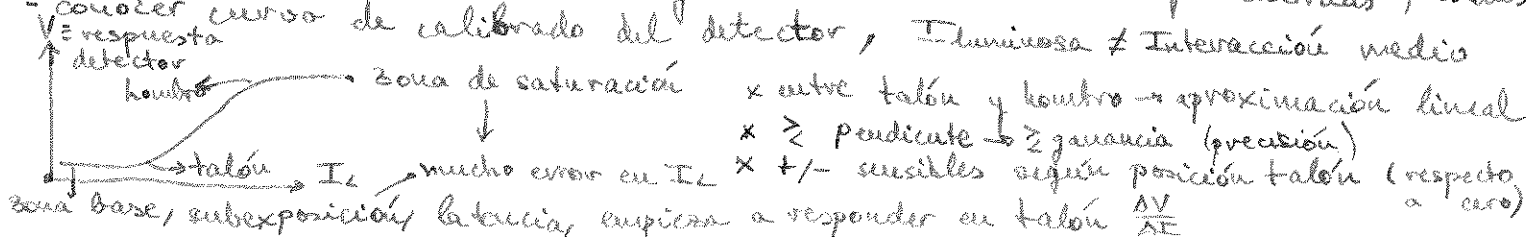
\rightarrow seleccionar adecuadamente la fuente de radiación según lo que busques

x prisma: evitar extensa policromática \rightarrow se superponen colores, mejor lineal la convierte en lineal mediante una rendija xa analizar su espectro

• Detectores

- energía campo E.M \rightarrow otra magnitud (V, I si células fotoeléctricas - fotodiodos)

- conocer curva de calibrado del detector, $I_{\text{luminosa}} \neq$ Interacción medio



- no \exists detector de rango amplio, elegir detector según intervalo (+ fuente) ②
- x Resolución espacial
 - baja \rightarrow áreas grandes, pero muy sensibles, útiles xa saber cantidad de energía total que llega
 - alta \rightarrow - sensibles, pero muy pequeños, útil xa analizar variats de intensidad espacio, moviéndolos or con una matriz. la mapa cantidad energía \equiv imágenes digital (Hb nudo AV e- x abel, emite fotón)

x si curva espectral no plana \rightarrow + sensible a ciertas λ s, cambia curva de calibrado (λ)
 Sensibilidad espectral $\lambda \rightarrow I_c$ \rightarrow combinar dtos detectores de dtas

OJO

- permite clasificar espectro radiat en colores
- \exists tipos de conos con curvas de sensibilidad espectral dtas que comparan y envía señal combinada proporcionada arbol rayo verde
- no espectro detallado sino suma x bloques $10, 5-4 \rightarrow$ = suma xo dtas \rightarrow my color \rightarrow my color del espectro
- \cong proporciones \rightarrow my color xo + brillante \rightarrow my color \rightarrow my color del espectro
- deficientes cromáticos: \exists tipo de conos no está, + espectros en my color \rightarrow my color \rightarrow my color del espectro
- \equiv dicromata, distingue - xo no lo veu al revés! FB VR \equiv GB, colapsa 2 dimensión
- rotura química, pigmentos \rightarrow señal eléctrica nervio óptico, fobólisis \rightarrow sodio, lámparas carretera
- \cong pigm. rato \rightarrow \cong señal x célula
- niveles medios y altos de radiación \rightarrow conos (3 tipos)
- niveles bajos \rightarrow bastones (1 tipo, no vemos colores)
- máximo de sensibilidad luminosa de ojo \rightarrow 550nm (amarillo-verdoso)
- distinta resolución espacial en todo el campo de visión \rightarrow sodio, lámparas carretera
- la distribución conos - bastones se concentran + en punto central, \rightarrow exterior \rightarrow visión periférica (linda caídas, ...)

EXPERIMENTO

- óptica paraxial
- banco \equiv camil de óptica \rightarrow cubrante sólo en altura
- lente, diafragma, polarizador, prisma, microscopio \rightarrow medio
- \angle ojo fotocélula \rightarrow detectores $\left\{ \begin{array}{l} \text{subjetivo} \\ \text{objetivo} \end{array} \right.$
- al repetir medida, \neq resultado experim \rightarrow fluctuaciones, medida \rightarrow intensidad angular
- lo grado en anticumbre en sensibilidad + fluctuación medida
- error \rightarrow sistemático: deficiente técnica de medida, error de calibrado, se repite en todas las medidas, difícil detectar, no x estadística \rightarrow convergen a ojo
- aleatorio: oscilaciones alrededor de un valor medio (exs experim) \rightarrow distribución normal (gaussiana)
- la muestra población \rightarrow estimamos valor central, difere estadística
- er. sensibilidad \gg er. estadíst $\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ \rightarrow diferencia entre ambos
- \rightarrow $D < 2\%$ \rightarrow error de dispersión \rightarrow Propagad de errores
- si no \rightarrow + medidas

T.2 - LIMITACIÓN DE RAYOS EN SISTEMAS ÓPTICOS

- tamaño finito de lentes → pérdida de rayos

★ DIAPHRAGMA DE APERTURA de un sistema óptico es aquel que limita más fuertemente el cono de rayos que viene del punto axial del objeto y va a O' (el último que limita, no el q + por delante, ni el + pequeño)

- diafragma circular
- $O' \in$ intersección q O
- depende de posición del objeto, \neq D.A. absoluto, aunque sí D.A. natural en ciertos montajes donde O suele estar fijo (telescopios, microscopios plus enfoque)
- depende de los elementos q quiten o pongan
- no es el físico, \neq pupilas (ficticias)

★ PUPILA SALIDA de un sistema óptico es la imagen final del D.A. a través de los elementos que la luz encuentra al pasar.

★ PUPILA DE ENTRADA de un S.O. es la antiimagen del D.A. a través de los elementos que hay antes de él (del sentido de propagación de la luz)

- x objeto ficticio cuya imagen coincide con el objeto real D.A. → imagen P.E.
- x utilizar fórmulas al revés, truco generador, no consecuencia

- Si no hay elementos ANTES del D.A. → D.A. \equiv P.E.
 DESPUÉS → D.A. \equiv P.S.

- cálculos con exceso de conjugación, puede caer en cualquier posición
- premisa: conoces D.A. → trazado gráfico

Método → método sistemático

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'} \quad ; \quad \frac{y'}{y} = \frac{s-f'}{f'}$$

→ e.g.a, tamaño

- 1) $O \rightarrow O'$ (pasar O x todo sistema se saca imagen olvidando diafragmas)
 - 2) $X_j, p_j' \rightarrow X_j', p_j'$ (pasar todos elementos a espacio imagen, con sus nuevos diámetros y posiciones, \rightarrow a través de los instantes, después)
 $X_{j+1} = X_j'$
 - 3) Medir todos los ángulos respecto a O' , α_j
 $\alpha_j = \alpha_{\text{mín}} \rightarrow X_j \equiv \text{D.A.}, X_{j+1} \equiv \text{P.S.}, \text{antiimagen}(X_j) \equiv \text{P.E.}$
- ★ Si O' en $\infty \rightarrow$ hacer proceso de límite
 \rightarrow el ∞ objeto (p_j'/X_j') del espacio imagen \equiv P.S., $X_j \equiv$ D.A., anti(X_j) \equiv P.E.

- Punto extraaxial, puede pasar D.A. x o no otro elem (lente) → recorte
 D.A. recorta como axial, lentes extra-recorte del no axial
 \rightarrow viciado: recorte de rayos adicional al q entra x D.A. (axial)
 impide mantener velos de intencionalidades de objeto extenso
 no réplica fiel del objeto

- x Campo de plena iluminación del objeto: región circular en el plano del objeto centrado en E_{obj} que contiene a los puntos que no sufran viciado \rightarrow conserva velos fotométricos $\rightarrow O'$, réplica fiel, útil en instr. óptico
- x Campo (de iluminación) límite: región circular sobre el plano de O centrado en S.O. que contiene puntos cuyos rayos reciben al \perp rayo tras atravesar sistema $\rightarrow O'$ viciado
- x Campo de contorno \rightarrow zona intermedia donde se degradada la intensidad, hay viciado

- vignetado extremo \rightarrow lo controla diafragma de campo o extensión \neq D.A o intencio

$\hookrightarrow \geq D.C \rightarrow \geq$ zona objeto ves

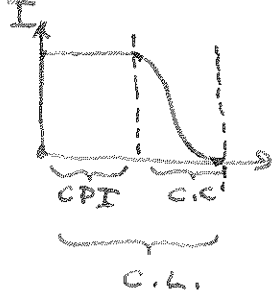
- Campo contorno réplica falsa, efecto no deseado

\hookrightarrow eliminar aun a costa de perder campo de visio

Cuando C. límite \equiv C. illum. plena \rightarrow limita correcta del campo = vignetado 0% ó 100%, binario

\hookrightarrow perder campo (falso)

\hookrightarrow aumentar C.I.P., O_i' extremo visible \equiv intuso O_o'



- instrumentos ópticos diseñados / O' en ∞

• lupa 1 etapa

• microscopio 2 etapas $\left\{ \begin{array}{l} \text{objetivo} \rightarrow + \text{ cerca objeto} \equiv \text{D.A.} \\ \text{ocular} \rightarrow " " \text{ ojo} \end{array} \right. \rightarrow \text{conjugar focales}$
 $O_o \rightarrow$ O intenu. sobre f_2 lente $\hookrightarrow O_i'$

\hookrightarrow llevar C. lím. a C.I.P. con diafragma (de campo) adicional sobre imagen intermedia si O inaccesible

• telescopio

O en $\infty \rightarrow$ campos angulares

W lím, elimina C. contorno con diafragma de campo en imagen intermedia \rightarrow límites vignetado

\rightarrow en el de balillo virtual, inaccesible, y O en $\infty \rightarrow$ no se puede limitar

→ facilitar observación en las mejores condiciones xa el ojo (si lejos o pequeño, ...)

IO / objetivos: imagen focal se proyecta sobre detector extenso o pantalla de observación (p.ej. proyector)
 condic. diseño: imagen aumentada y real ... se ve en " ... no prolonga
 subjetivos: imagen directamente al ojo humano
 cond. diseño: imagen virtual, preferiblemente en el ojo + desde el ojo subtendida > ángulo θ original \approx + caras, no hace falta que sea más grande

objetos < { próximos xo muy pequeños → microscopios \approx ver obj. peq.
 grandes, " " alejados (oo) → telescopios \approx " " lejano
 b vemos peq xo no lo son

- combinados xa distas intermedias
- todo lo vemos a través del ojo

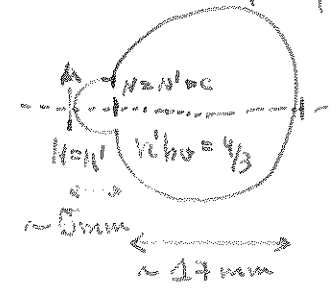
OJO (ver imagen) → 

- es dióptica opaca
- protuberancia → córnea, no opaca
- 2 cámaras separadas x cristalino → humor acuoso: $n = 1.336$
- músculos cuerpo ciliar suspenden cristalino, que se abomba (lente flexible)
- humor vítreo, + protuberancia q humor acuoso
- capa de fotorreceptores → retina
 - x células nerviosas \leftarrow conos \leftarrow concentrados en mácula/fovea \leftarrow descentrado de eje
 - bastones \leftarrow dispersados
- x región sin fotorreceptores: salida nervio óptico \approx punto ciego \leftarrow fibras ópticas / nervios ópticos
- no simetría de revolución, aberraciones, gravedad, córnea, no planos focales / principales / nodales
- no es sistema centrado

xa hacer instrumentación \rightarrow simplificar xa diseñarlos, aproximar x superficies esféricas centradas, cálculos stuma. equivalente planos $\leq \frac{p}{h}$ en aproximación paraxial

⇒ Modelo de Emsley (no preciso en cómo se forma imagen xo sí de cara a óptica instrumental)


planos X = periferia conjugado o-o' axiales; N = nodal, H = principal



- A: vértice ojo
- centro curvatura ojo en planos nodales
- H, H' en vértice
- N, N' en c. curvatura
- } dioptrio esférico \approx ojo
- f separa 1 \leftrightarrow 1/3
- distas, promedio

f' (5mm, 1/3, 1) \approx 22mm → objetos en el ojo quedan enfocados en la retina.

- ↳ Eultrape = observador estándar
- pupila entrada sobre vértice ojo
- D. apertura → Pupila, iris → controla intensidad luz
- ↳ aborrecido

- Capacidad acomodación del ojo → actúa cuerpo ciliar sobre cristalino
- en reposo: $f' = 22\text{mm}$, visión nítida en ∞ , \leftarrow desenfocado 
- objetos + cercanos, presión, $C \pm$ quieto no aumenta R curvatura del dioptrio
↳ ya caer en retina
- \geq presión ... \pm máximo esfuerzo de acomodación (depende de potencia muscular y rigidez/flexibilidad cristalino)
- Lo Punto límite de enfoque \equiv punto próximo P
- ojo desacomodado, ∞ y retina se conjugan, $\infty \equiv$ punto remoto R
- enfocar a distas distas sucesivas, no simultáneas con nitidez
- de ∞ a P gracias a capacidad acomodación, $< P \rightarrow$ no vis nítidas
- ↳ emétrope → medidas adecuadas
- ↳ amétrope → ojo desacomodado no enfoca al ∞ , $R < \infty$, oculto entre P y R
↳ descomparación potencia - tamaño ojo



- $P \leftrightarrow R$: intervalo de visión nítida

- $X \equiv$ ametropía $\equiv \frac{1}{f}$

$\Delta \text{Am} \equiv$ amplitud de acomodación $\approx \frac{1}{f} - \frac{1}{P} \rightarrow$ capacidad esfuerzo del ojo
↳ depende edad, \sim cte en pobl. edad, zona, > 40 años \rightarrow presbicia

- Carácter punto remoto $\left\{ \begin{array}{l} \text{real} \rightarrow \text{Miopía} \dots \text{exceso de potencia en reposo} \rightarrow \text{lente divergente} \\ \text{virtual} \rightarrow \text{Hipermetropía} \dots \text{potencia insuficiente, no relajarse} \rightarrow \text{lente convergente} \end{array} \right.$
↳ vista cansada, $f' \neq$ iguales
↳ ver mal de cerca, \rightarrow lente convergente
- Cámara estenopeica \rightarrow todo enfocado, cerca y lejos
- ↳ tamaño imagen retiniana depende de ángulo subtendido \propto tamaño $\rightarrow t \propto$

- Aumento visual $\beta' = \frac{y'_{\text{intr}}}{y'_{r,0}} \rightarrow$ ganancia no en tamaño imagen sino en proyección
↳ so subjetivo

- $\beta' = \frac{\tan w'}{\tan w} \approx \frac{w'}{w} \rightarrow$ inversa $|\beta'| > 1$, $w' > w \rightarrow$ ganancia en S.O. subj.

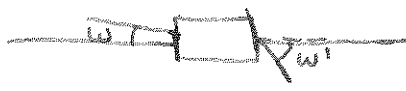
- ↳ > 0 : muy orientada, imágenes derechas
- ↳ < 0 : \neq " " " invertidas

- Imagen retiniana está invertida, entesa que se queda = orientada con y sin instrum
- info relevante: w desde el vértice ojo, $\approx w, = y_v$
- instrumentos diseñados para emétopes, no sin forzar

Sist. telescópico

sistema afocal, foco en ∞

∞ converge en plano focal $\rightarrow \infty$, sist. equivalente $f' = \infty$

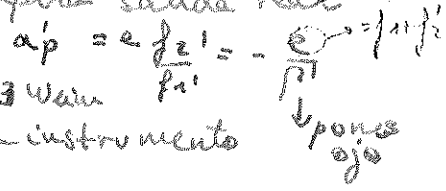


- Desplazamiento afocal/confocal $F_1' = F_2 \rightarrow \beta' = -\frac{f_1'}{f_2'}$, $|f_1'| > |f_2'| \rightarrow |\beta'| > 1$
- Objetivo siempre convergente, ocular $< \frac{d}{c}$

stma. útil

Anteojo astronómico o de Kepler

- x imagen real intermedia invertida \rightarrow imagen final invertida, $\beta' < -1$
- x objetivo $\equiv D.A$, imagen montura \rightarrow través ocular \rightarrow pupila salida real
- x en PS \rightarrow se colapan todos haces de rayos
- x extensión angular del objeto \rightarrow de 0 se llegan con dttto $w, \exists w_{lim}$
- x diafragma intermedio xa limitar virchado propio del instrumento
- x retículo xa alinear



- x apuntador arriba xa im. decha
- x mikopis desplazan ocular

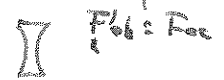
Anteojo terrestre

- x stma. inversor. $\beta'_T = \beta'_I \cdot \beta'_E > 0$, $\beta'_E < 0$
- x \rightarrow + largo, dmia si $a_1 = 2f_{EI} = a_1' \rightarrow$ conjugan 2 planos con la mínima longitud (+ compacto), $\beta' = -1$
- x espejos si + pequeños, prismáticos \rightarrow 2 prismas R total, $(-1) \cdot (-1) > 0$



Anteojo de Galileo

- x ocular divergente, stma. afocal $F_1' = F_2$, $\beta' = -\frac{f_1'}{f_2'} > 0$
- x + compacto!



- x no im. intermedia real, no limitar campo, retículo,...
- x efecto cerradura, P.S. virtual \rightarrow no puedes eliminar

- + cerca \rightarrow + w, xo $\exists P \neq 0$, $w'_{lim} \rightarrow$ no acercar t, si aun así pequeños \rightarrow microscopio

lupa o microscopio simple: 1 stma. convergente, imágenes derechas lente delgada

microscopio (compuesto): objetivo \approx amplificador \rightarrow ocular amplía imagen interm. $>$ amplid q lupa

x objeto entre foco objeto y lente / imagen virtual decha. aumentada, algo entre P y R (intervalo de visión nítida)

x Sistemas focales \rightarrow 2 posiciones q se conjugan con p. remoto y próximo observador



de: profundidad de enfoque se conjuga con intervalo de visión nítida = antiimagen IVN en espacio objeto

$\Delta z = -\frac{f_1^2}{p + 2f_1}$ (emétrope), Z_0 : de foco imagen a ojo \rightarrow dip-ojo, lupa, posición ojo

$Z \equiv \bar{P}'$, si $Z_0 = 0$, ojo en F' , $\Delta z = -\frac{f_1^2}{p} = \text{Ampl}^2 \cdot z$ V observador, = trozo xa dcha posición en emétrope

distancia de enfoque: posición extrema límite intervalo enfoque de = ORS lente, emétrope $F_1'S' = \Delta z$, $F_1'S + O'S = \Delta z$

x lupa: aux visual cuando condiciones óptimas de observar objeto directamente o en R \rightarrow O'R en R \rightarrow mántos mejores: w', β' , en foco lupa \rightarrow en ∞

$\beta' = -\frac{p'}{f_1} = \beta'(f_1/p) \rightarrow$ lupa: observador

aumento comercial: $\beta'_M = \frac{250}{f_1(\text{mm})}$ ($p = 250 \text{ mm}$)

x lo \rightarrow $\beta'_M > 20 \rightarrow f_1 = 2,5$

x en cada situación, $\beta' \neq \beta'_M$, $> 0 <$, xa del orden si w_{lim} de F' en R.

Microscopio

$\beta' = -\frac{p}{f'}$ $\rightarrow f' < x_a > \beta' \rightarrow$ apertura $<$, $f_{\text{uno}} <$, + aberturas

- proceso en cascada, $\beta' = \beta' \beta'$
- rompes acopladas afocal x_a y veas obj. próximos respecto a telescopio
- ocular $\hat{=}$ lupa sobre imagen intermedia
- 0 en foco objeto del sistema conjunto / imagen final en ∞
 $\neq F'_{ob}$ \hookrightarrow de los planos principales, $\neq f'_{oc}$

$\beta'_{in} = -\frac{p}{f'_{in}} = \left(-\frac{t}{f'_{ob}} \right) \left(-\frac{p}{f'_{oc}} \right) \beta'$ aux visual ocular (2 etapas)

$f'_{in} = -\frac{f'_{ob} f'_{oc}}{t}$ β' : aux lateral objetivo $y \rightarrow y'$, $< t$
 \hookrightarrow distancia entre F'_{ob} y $F'_{oc} \hat{=}$ intervalo óptico, $\neq 0$ si st. no afocal

$\beta'_{in} = \beta' \beta'$, $\beta'_{in \infty} = \beta'_{in} (p = 250 \text{ mm})$

si no dice nada, supones $t = 160 \text{ mm} \rightarrow \times 20 \hat{=} \beta'_{ob} = -20 \rightarrow f'_{ob} = 8 \text{ mm}$
 t grande \rightarrow aux grande f' pequeñas, $\beta'_{in \infty} = 2/5 \rightarrow f'_{oc} = 20 \text{ mm}$

- Pupila de salida del microscopio β'_{ob}
- \times objetivo como D. Apertura \rightarrow imagen P.S

$t \gg f'_{ob}, f'_{oc}$
 $160 \gg 8, 20$

\rightarrow práctica $\hat{=}$ en F'_{oc} , imagen $\times \infty$
 ap $\times F'$ imagen microscopio

- se trabaja con $z'_A = 0 \rightarrow$ ojo en ocular
- buena aproximación, prof. enfoque $\Delta z \approx 4 \mu\text{m} \rightarrow$ si no atinas: desenfocado
- \rightarrow utilidad \times medir posición axial a partir del enfoque
- \hookrightarrow en microscopio mueves global \times en focar, no ocular

T.-4 FUENTES P. OR. EMISIÓN ESPONTÁNEA

radiación espontánea \rightarrow luz natural
 em. estimulada \rightarrow láser (artificial)

FUENTE \rightarrow estudiar interacción radiat-materia

- modelo semiclásico de Einstein: materia estados energéticos cuantizados
 radiación = onda continua
- Bohr, niveles, efecto fotoeléctrico
- suma material $\rightarrow \approx 2$ estados de energía posibles $\begin{matrix} \text{---} E_2 \\ \text{---} E_1 \end{matrix} \Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$
- N° estados x unid volumen en un t \equiv Población nivel i: $N_i(t)$
 La cambian con radiación c.e.m (isótr, homog, despolariada, distr. energética uniforme en todo el sistema W)
- $W(\nu, t) \equiv$ densid. de energía del C.E.M. espectral
- si interacción nula: $\frac{\partial W}{\partial E} = 0, \frac{\partial N_i}{\partial t} = 0$

Procesos elementales de intercambio

1. Absorción estimulada $\begin{matrix} \uparrow \\ \text{---} \\ \downarrow \end{matrix} \quad h\nu_0 = \Delta E$

- Salto 1 \rightarrow 2 absorbiendo $E = h\nu_0$, c.e.m. mengua
- proceso instantáneo (sin estados intermedios)
- Probables/unid t de que ocurra $\propto W(\nu_0)$
- Coeficiente de Einstein de absorción estimulada $B_{12} \rightarrow$ depende de material suma. considerado y transición
- $B_{12} W(\nu_0, t) = \frac{N_{\text{absorción}}}{\text{suma}/t} = \frac{N_{\text{absorbidos}}/t}{N_{\text{total en 1}}}$
- $B_{12} W N_1 = \frac{dN_{12}}{dt}$ \rightarrow candidatos a ser excitad
- estimulado x prese c.e.m (si = 0, absorción)

2. Emisión espontánea $\begin{matrix} \downarrow \\ \text{---} \\ \uparrow \end{matrix} \quad h\nu_0 = \Delta E$

- Probabilidad de desexcitación espontánea / t con $W=0$ (espontánea)
- Coeficiente de Einstein de emisión espontánea $A_{21} = Z_{21}^{-1}$
- Z_{21} : vida media, promedio en desexcitarse
- $A_{21} \cdot N_2(t) = \frac{dN_{2 \text{ esp.}}}{dt}$ (desexcitados / t)
- mayoría fuentes emite así \Rightarrow luz incoherente, natural, muchas con-tribuciones, microscópicas sin correlación entre ellas (\leftarrow LED, lámpillas, láser pasivos)

\rightarrow Cuerpo negro $\begin{matrix} \text{abs. est.} & \text{desexc.} \\ \text{---} & \text{---} \\ \frac{dN_2}{dt} = -B_{12} W(\nu_0, t) N_2(t) + A_{21} N_2(t) = -\frac{dN_2}{dt} \end{matrix}$ aislado $N = N_1 + N_2$

En Δ termodinám. estable: $\left. \frac{dN_1}{dt} \right|_{\log} = \left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{\log} = 0 \rightarrow W_{\text{eq}} = \frac{A_{21}}{B_{12}} \cdot e^{-\frac{h\nu_0}{kT}}$
 \rightarrow no describe correctam. distr. Planck si A_{21}, B_{12} son característicos del suma. $\begin{matrix} \dots N_2 \\ \dots N_1 \end{matrix}$ \rightarrow no f(t) \rightarrow $\begin{matrix} \text{LED} \\ \text{lámpilla} \\ \text{láser pasivos} \end{matrix}$ \rightarrow $\begin{matrix} \text{Eulerian} \\ \text{distr.} \end{matrix}$

\rightarrow añadir emisión dependiente del c.e.m.
 \rightarrow emisión estimulada

A = espont
B = estim.

3. Emisión estimulada

- desexcitación causada por prese campo magnético → desexcitación proceso elemental instantáneo
- probabilidad desexcitación suma. con estímulo x. em. est / t ∝ W(ν₀, t)

$$\frac{dN_{21}^{est}}{dt} = B_{21} W(\nu_0, T) N_2(t)$$

- en fase con campo incidente, direcc. propagada, polarizada del haz, sincronizado
- ↳ amplifica luz, no ruidosa (aleatoria) sino amplif. auténtica, fiel



- semilla, proceso en cascada, P >> → 99%
- contribución de luz es monocromática ≠ luz natural + dirigida, polarizada, coherente temporal

- x necesitamos estados excitados → energía de bombeo + que sea + probable em. est ↔ em. esp. (fluoresce, ruido)
- x cuerpo negro 10⁶ + prob e. esp, si aplicos W, cambia, crece en cascada en Δt. y B₂₁ es independiente

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{21} N_2 + B_{21} W N_2 - B_{12} N_1 W$$

$$\Delta t \rightarrow A_{21} \gg B_{21}, \frac{dN_1}{dt} = 0 \rightarrow W^0(\nu_0) = \frac{A_{21}}{B_{12} \left(e^{\frac{h\nu_0}{k_B T}} - 1 - \frac{B_{12}}{B_{21}} \right)} \leftrightarrow \frac{8\pi\nu_0^3/c^3}{e^{\frac{h\nu_0}{k_B T}} - 1}$$

Relaciones de Einstein:

- $\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{8\pi h \nu_0^3}{c^3} \rightarrow \checkmark$ dep. suma, no de W
- $B_{21} = B_{12}$
- sólo 1 indep.
- ✓ capaces describir interacción, c. negro ΔE
- $\frac{1}{t} \equiv \frac{\text{tasa de esp.}}{1 \text{ v. e. est. kg}} = \frac{A_{21}}{B_{21} W^0(\nu_0)} \cdot e^{\frac{h\nu_0}{k_B T} - 1} = f(T, \nu_0)$ ↑ frecuencia de transición
- ~ 10⁵, 10¹⁰
- < ν₀ → + fácil → Láser antes q láser! → cambiar factor con aporte E (microondas)
- 1^{er} laser (rubí): en frangio próximo 1,5 μ, ... rojo (He-Ne)
- mejores bombos → laser a frecuencias mayores (UV, ... X) ~ 10⁷ veces, desplazado estado ↑ + agresivo
- focalizas + q natural
- monocromáticos (≪ ancho banda q lámpara espectral) → precisión espectroscopía
- → resolución espectral → reacciones nucleares, transic. atómicas profundas
- x: estructura fina, materia
- congelar átomos, estructura M, interferencia haces monocromáticos, paras. (ou fines) ~ 8
- desexcitación no radiativas → 2 choques, picodau E_{pp} Escii
- ↳ vida media < x no estar completa^o aislado
- complicar modelo, + coeficientes
- A₂₁ efectivo → desexcitación, $\frac{1}{A_{21}} \equiv$ vida media
- ↳ to2 mercury "

→ Fuentes cómites Tamb → 20²⁰ em. espont.

↳ tubos fluor.
↳ bombillas
↳ Lámparas espectrales:

- gas a baja presión en ampolla de vidrio, interacción baja en el medio
- estados atómicos \approx q átomo aislado, pocos choques.

↳ modelo Bohr, niveles energéticos, si no das E → mayoría en Efund en Δ
↳ no hay desdoblamiento, subniveles rot. vibra, choques, asimetría ^{SV aceleras}

- al excitar átomos lámpara espectral con chorro e⁻ que colisionan + transfieren E interna → saltan a niveles dtos → decaen según vida media emitiendo ν discreto → espectro discreto: líneas espectrales a fund. o intermedios
- Espectro emisión del elem de la lámpara = huella dactilar de estructura niveles atómico
↳ sirve xa identificar

x Lámpara de vapor de sodio

- Tamb → sólido, excitar → vapor sublimado, luces amarillas carentes
- a alta presión: + ancha, difusa
- eficiencia luminosa xa humano (ojo + sensible al amarillo)

x Lámpara de Hg → azul - antopostas

- > Intensid no - efectivas, frecuas en región azul-verdosa a alta presión no muchas líneas en UV, se pierden, + cristal especial xa parar
- poco eficiente xa chemia humana (espectro visible)
- poco mercurio

x Tubo fluorescente

- lámpara de Hg con truco xa devolver UV al visible
- absorbe UV y decae + probablemente en 2 pasos intermedios generando luz visible
- ↳ estructura de conversión de frecuas ópticas: 1 fotón UV → 2 visibles.
- pintura fluorescente paredes: sólido, no gas, mucha interacción, desdoble niveles (múltiples)
- ↳ 2 bandas E, casi continua, gran q estados, muchas posibilidades
- ↳ espectro prácticamente continuo ν_{UV} → muy eficaces energéticamente

- gas Hg → se genera e⁻ libres → chispa alta voltaje xa iniciar (cebador)
- aceleras e⁻ libres con SV entre electrodos → excitan átomos

• cebador consume mucho (genera gran cantidad energía), cada vez cuenta más xq en extremos se acumula mercurio sólido, polvo, presión gas se reduce, tubos se agotan xq no puedes mantener corr. e⁻ en interior

• tubo azul → mezcla gases o pintura dta xa q sea + cálida, convergen tanto foto combinando 2 en 1 muy placón (uestión subjetiva)

- parpadear 50 veces/s, 2 niveles excitados $\sim 10^{-5}$ s, respuesta rápida, xpe acido
- no pasa nada si e⁻ quietos, todos se desexcitan xo no es probable que en cualquier carga positiva, ioniza secundaria se mantiene → al haber de nuevo campo (para cebador)

se aceleran y vuelven a excitar átomos
• no se aprecia, frecuas crítica de fusión del ojo < 100 Hz. pero \neq bombilla, continuo

• e⁻ inercia, remanente luz al apagar, ya estáticos / frecuas no fluoresce

• arranque consume mucho
< 1/2 hora mejor no apagar, se agotan (cebador)

x Bajo consumo

- otro tipo de gases, + sofisticado, cebado electrónico, menor consumo, + compacto
- \approx pintura fluoresce $\times 10^{-5}$ Fosforesce $\times 10^{-2}$, difere t decais, cola \gg , sí apreciable
- absorben λ 's largas; nunca sirven xa IR al visible, conservad E, conversión a la baja prob. absorber 2 fotones muy baja, sí mucha altura

Cuerpo a T cte, aportando = q lo q emite, T estable, Δt
 emiten \approx cuerpo negro a = temperatura (radid espectral) \times potencia

cumplen ley Boltzmann $W_\lambda(T) = \sigma T^4 \cdot \epsilon$ \rightarrow emisividad ≤ 1 \rightarrow Factor atenuad
 Wien $\lambda_{max} \cdot T = cte \rightarrow \lambda_{max}$ en visible $\rightarrow 2000K$

Cuerpo gris, < potencia xo sin cambiar forma, λ_{max} = posición

x Bombilla incandescente

- \approx cuerpo negro, λ_{max} emisión en visible $\rightarrow 2000K$, λ largas cae lento, llega a infrarrojos, microondas \rightarrow gran cola, se pierde radid, - eficientes, transmiten calor, excita térmica gases/sólidos, no son fuentes frías (xq emite en IR)
- Lo bloquear si objeto sensible al calor \rightarrow filtros anticalóricos \times luz negra (emite UV)
- (p.ej. acetato de polivinilo / cristal líquido proyector \rightarrow absorben IR, iluminas sin calentur)

estados vibrx sólidos \rightarrow microondas/IR, excita térmica, temperatura

- luz visible excita estados electrónicos
- fluorescente no eficaces xa recuperar calor, sólo se pintan xa mejor difusión
- disipa calor $\gg (50Hz)^{-1} \cdot \frac{1}{2} \rightarrow$ no varía T, sólido no sigue, siempre = potencia con 10 dígitos
- bombillas no parpadlean, tubos sí (\gg) $\epsilon = \frac{1}{50}$

- filax R grande, gran calentax, ef. Joule $\approx 2000K$, I deposita potencia $P = RI^2$
- conductor + q no se funde a $2000K \rightarrow$ alea tungsteno-volframio, \approx amarillo
- filaxs muy finos, alta T fusión, frágiles si calientes, se rompen
- proceso dinámico \rightarrow I \times Joule calienta conductor, x calentax cambia R (\gg), se vaporiza filax en parte ($< S \rightarrow > R$), al $> R \rightarrow < I$, $\rightarrow < T$, parte del sublimado vuelve, $\frac{1}{2} \leq R$ equilibrio tras oscilas, etapa estacionaria. (equilibrio gases)
- T_{est} depende del grosor (fracción!), si al enfriarse no vuelve todo lo sublimado \rightarrow + fino, poco a poco, llegará punto en que se vaporice 100% \rightarrow se funde, λ semilla (fracción T_{est})
- dilata longitudinal despreciable

- Cada vez q enciendes y apagas \rightarrow no vuelve todo lo sublimado al filax, = V \times fracción, al final gas en $\bar{v} = 1$

- a potencia límite $\approx 300W$ (y se pierde gran parte), en aire T_{amb}

\rightarrow potencia \rightarrow otro tipo de filaxs \rightarrow inhibir parcialx sublimax filax

- en presE gases halógenos \rightarrow añades en bombilla

$\therefore a = T \rightarrow >$ filax sólido, puedes subir T \rightarrow bombilla, halógenas

x Bombillas halógenas

- + azul
- no son de bajo consumo, consume + E, > T, son + potentes es faros coches potentes proyectores diap.
- + trabajen a T superior, + calientes y peligrosas xq vidrio + frágil
- usas cristal (f vidrio, no cristalino) ordenado, bulbo que rodea
↳ resistE a T
- si modifica local, gruesa, absorbe no uniformes, + q el resto, calentado difere
↳ rompe estructura cristalina ↳ pasa a vidrio, fisura, pierdes gas halógeno
- ↳ se funde (evitar mancharlas)
- aquí tampoco pintora xq caída brocha en UV
- halógeno no interviene en radiat, > T Xenon sí
- si llueve ↳ cristal grueso, calor focos (TV)



x LED

- semiconductor gapE $\begin{matrix} \equiv \\ \equiv \\ \equiv \end{matrix}$ $\begin{matrix} \text{aquí } \approx 0 \\ \text{e}^- \end{matrix}$ banda de conducción
↳ aquí ligaz, agitE térmica, no conducen
- genera estados intermedios con impurezas pin, excites...

- diodo, transistor



↳ si aplicas V se pueden difundir, se recombinan en banda de valencia, al desexcitarse emiten luz

- si diodo al revés, > V, prob. <
- I repone e⁻, huecos xa regenerar choque
- emiten sobre todo en región contacto
- proteges en cápsula
- ilumina, alternativa al fluorescente ↳ alta eficie, duran pilas
- todavía pocas frecuas

- Semáforos ✓✓ ↳ evita reflejo v nieve ↳ color
↳ consume poco
↳ ✓ visibilidad
↳ se funde 1 solo

(- tubos de Ne $\hat{=}$ q Hg, todos en azul, plástico, o mezcla ↳ otros tonos)
↳ consume poco

- LCD: pantalla, TV, OLEDs, orgánicos, bajo consumo, miniatura, + píxels, + resolución
- ↳ útil xq señales x ahora + bajas, display bien no mal el ancho de banda de transmisión
- 3D, HD, >> 600 líneas, amplitud - fase, Japón ya lo usas... TV adaptadas

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

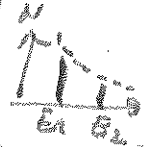
- fuente luz x emisión estimulada
- máser 1954 Townes (ondas), → 1960 Maiman rubí sintético ~ 1μm
- 1961 He-Ne: λ = 632,8nm ... UV... X
- medio activo: Nd-YAG, líquidos, rodamina
- alta potencia, baja eficiencia; ventajas cirugía
- De gas → He-Ne, Ar, CO2 (contar, infrarrojo)
- semiconductor titanio-safiro, pulsado gran I,
- diodos láser (rojos, verdes → + caro, + susceptible ojo, + potente, - difusión → estrella)
- probab. inducir em. est α intensidad incidente

→ cuesta avanzar, my proporción q em. est, luego proceso en cascada
 necesario que gran proporción átomos estén en estado excitado
 = inversión de población

medio material → medio activo (sólo algunos es factible em. estim.)

- amplifica > ancho + largo, xo no fácil mono cristal/gas NV electrones avanzados
- ↳ mejor que circule varias veces (os) ⇒ cavidad óptica: confine radiación
- ↳ se va acumulando, libera pulsos internos y contos, evita difusión calor
- ir reponeiendo átomos al estado excitado

en Δ : $P_{em} = N_1/N_2 > 1$ → no hay amplificación



- ↳ inventar pobla xa q haya + emisiones q absorción $\frac{N_1}{N_2} < 1$, fotón incidente sea susceptible de amplificar y no ser absorbido
- ↳ comunicar E xa desplazar de posición de ΔE ⇒ bombeo energético → $N_2 > N_1$
- + competir con em. esp.



- mecanis de extracción → extraiga parte luz → pr. espejo T = 0,01%
- ↳ no mucho xq compensar con bombeo, poca eficaz

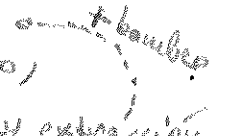
↳ E pequeña xo interesante → peu elevada, 1 W/mm²
 → larga longitud propaga, colimado, direccionable
 → monocromática, coherente, polarizada controlable (si coloca algo...)

si no → natural láser polar. aleatorio

source, si es modo continuo: simultáneas - continuo

Bombes, pérdidas x fluorescencia/amplif. si es p. finito, en direcc. buena se amplifican, rebotan, → mecanis extracción

- ↳ pulsado → absorbente saturable, E pérdidas grandes, absorbe casi todo, se satura, resto se amplifica → selo x obturador, E & saturad.
- emite en poco tiempo
- ↳ otra opción: modular bombeo ≠ chop [] obturador - pulsos cortos xo b. q. en huecos
- ↳ pulsos ultra cortos, modula en amplitud, fase, sincronizar modos, acoplar en huecos



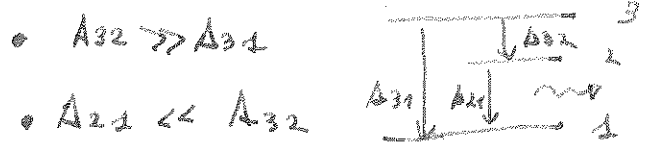
He-Ne, He: partícula intermedia medio activo

Lo definen $e^- \rightarrow Ne$ baja, He $\rightarrow \rightarrow e^- \rightarrow He \rightarrow Ne$ bola blanca billar

Lo Ne absorbe como E interna las ^{si transmite eficaz} colisiones

- 1^{er} láser: bombeo incoherente - flash
- * bombear con otro láser, estimulas en IR \rightarrow sacar visible
- * transferir energía a reacción química, molécula compleja, energía residual de enlace
- Lo x bombeo se acopla a molécula y la rompe \rightarrow láser excímero
- si en bombeo sólo intervienen 2 niveles \rightarrow láser no funciona estacionario, no inversión de población, el - hacer intervenir 3 niveles energéticos
- se q ritmo estable $N_2 > N_1$ con bombeo etc.

Condiciones de Bloembergen: (sobre prob. de escape espontánea) se q bombeo eficaz, pueda amplif.



$A_{32} \gg A_{31}$
 $A_{21} \ll A_{32}$
 \rightarrow bombear de 1 a 3, se acumulan en 2, pocos vuelven a 1 se evitar pérdidas

Lo no decaiga espontáneamente, se mantenga latente en 2 hasta estímulo

$z_{32} < z_{31}, z_{21} > z_{32}$
 $10^{-6} \downarrow \downarrow 10^{-9} s$
 $10^{-3} \downarrow \downarrow 10^{-3} s \rightarrow t$ grande, nivel 2 es metaestable

- si niveles definidos \rightarrow bombeo selectivo, ΔE exacta, no interesa
- Lo haces 3 gordo $\equiv 3$ (+ Bloemb.)



vencer inicialmente la desproporción del ΔE , requiere unida

\rightarrow costaría - si vas a E mayores $\rightarrow E_2, E_3$ no tanta desproporción \equiv sistemas de 4 niveles

$z_{31}, z_{32} \gg z_{32}$
 $z_{21} \gg z_{31} \dots$ metaestable 2 \rightarrow + fácil x q 1 pobla 2 - 1 < q entre 1 - 0
 \rightarrow \leq requeridos de bombeo, buen medio activo

RATE EQUATIONS \rightarrow describen dinámica pobla niveles, densid

$\frac{dN_2}{dt} \left(A_{32}, \dots \right), \frac{dW}{dt} (\nu_0, t) = \dots \neq b W(\nu_0, t) \rightarrow$ mecany pérdida

\rightarrow suponemos buen medio activo

$\frac{dN_2}{dt} \approx p$ (bombeo) $\cdot [B_{21} W(\nu_0, t) + A_{21}] N_2(t)$

$\frac{dW}{dt} = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 W(\nu_0, t) - b W(\nu_0, t)$, em. esp. , amplif.

\rightarrow láser en estado estacionario $W(\nu_0, t) = W'(\nu_0, t) + W_e(\nu_0, t)$

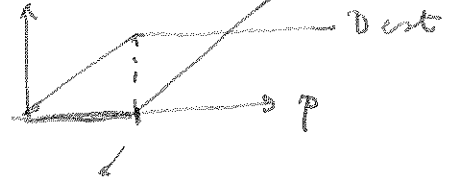
$\frac{dW_e}{dt} (\nu_0, t) = B_{21} N_2 W - b W_e \rightarrow$ pérdidas \neq útil, lo que sacamos

Lo despreciamos \rightarrow ganamos láser en cavidad
 fluorescencia

emisión cte
 $\frac{dW_e(\%)}{dt} \Big|_{est} = 0$, $\frac{dN_2}{dt} \Big|_{est} = 0 \rightarrow N_2^{est} = \frac{b}{B_{21}} \approx D_{est}$

$W_e^{est}(\%) = P/b - A_{21}/B_{21} \rightarrow$ esta sí depende lineal P indep. bombes, sólo Δ probabls $N_2 \leftrightarrow N_1$

aprox. orden 0 $W_e^{est}(\%)$



\rightarrow bombes no cambia D_{est} xo sí la pot E del láser, saturada, no mejoras inversión pobla

$\times \exists$ nivel de bombes mínimo $p_{min} = b \frac{A_{21}}{B_{21}}$

\times si $<$, W negativa, no se alcanza estado estacionario, no se alcanzan D_{est} xo compensar pérdidas

• En realidad: anchura niveles de energía (sólo bien definida n. fund.)

- \exists probabilidad $2 \rightarrow 1 \Rightarrow \Delta E$ definida bien $\frac{\Delta E}{h} \approx \frac{1}{\tau}$

- banda de energía: $<$ cuanto $>$ vida media

\hookrightarrow sistema metaestable: ΔE pequeña xo no nula, anchura natural de línea espectral $\approx \frac{1}{\tau}$

- banda de frecuencias \rightarrow + estrecho cuanto + metaestable
 capas de amplificar \rightarrow si $P=0 \rightarrow$ em-est $t_b = 0$

• Choques átomos, disminuye de 2 a 1, intercambio E transacc, nuevos canales de excitat, $\tau_{21} < \rightarrow$ amp P de excit $\rightarrow \Delta E$, ensancha ϕ extra $>$ \rightarrow ensanchas homogéneas, to 2 átomos $\times =$

• Ensanchas adicional \times Efecto Doppler

- átomo se mueve \rightarrow resonante xo otra frecuencia

\rightarrow colectividad moléculas, luz encuentra... magnitud (kT) sentido

$\rightarrow \times$ grupos de velocidad se amplifica banda espectral dta \rightarrow ancho \rightarrow ensanchas Doppler inhomogéneas, cambia con T, tipo de ϕ de banda no producido $\times = \times$ to 2 átomos sí xo \times grupos, cada uno 1 manera \rightarrow

\rightarrow luz láser no estricta ϕ monocromática $\Delta \lambda \approx 2pm$
 \rightarrow monocr. ϕ lámpara espectral $\approx nm$, \rightarrow ϕ cualquier fuente convencional \rightarrow

• ϕ (T), ensanchas $\propto T$, + choques, sólido vibran tb.

\times extra: etalon, frecuencias permitidas, espejos confinantes, // //

si bien \rightarrow to quedas 1 sola línea, \rightarrow monocromático lam \ll anchura natural

\hookrightarrow + efecto ϕ Doppler
 interferencias destructivas en general \times aleatorio salvo modos cavid^o óptica, que se replican vectores exactos

Cavidad óptica < tipos espejos, aspectos técnicos - construcción efectos sobre el c.e.m. amplificado de la cavidad óptica donde se genera y esté confinado

- > 2 espejos planos -> confina paralelo, si no paralelos -> 0. -> poco útil
- > mejor 2 esféricos, h, a -> n reflejos
- > la cavidad es estable $\forall n$ si t_1', r_1' acotados $\frac{r_1'}{r_2'} < 90^\circ$

$\Rightarrow 0 \leq g_1 g_2 \leq 1$, $g_i = 1 - \frac{L}{r_i}$
 L: separación entre espejos
 r_i : radio curvatura (construcción) ≥ 0
 $r_i = R_i \rightarrow$ cóncavo (de donde viene luz)
 $r_i = -R_i \rightarrow$ convexo

Si se cumple $g_1 g_2 = 1$
 la cavidad marginalmente estable, sólo algunas familias de rayos confinadas $1 \neq \delta$
 la cavidad inestable, no confina (plano-paralela $g_1 g_2 = 1$)

- Inestables < 2 cóncavos depende
- 2 convexos siempre
- conc-conc dep.
- convex-plano siempre


- x Con céntrico: $R_1 = R_2$
- x Con focal: $r_1 = r_2$, C sobre vértice


Resonador con céntrico, semi esférico, con focal, plano p -> marginal y est.
 \Rightarrow Preferible: Semi con focal (ver figura) $(R_1 = R_2)$ $g_1 g_2 = 1/2$

Espejos cavidad láser:


- retienen gran % energía EM, sale poco (< 1%, pérdidas a causa de pensar x bombas)
 la reflecta elevada

La parte grande en salida, en interior gran cantidad E

- espejo de baño  -> si impurezas, difunde, no refleja bien
 la xa q no se vale, aluminio + cristal burbuja vidrio ideal
 puestas siempre

dentro cavidad sellada -> no necesario proteger, espejo $L =$ cara 
 refleja bien no absorción 5-10% -> pérdidas ex a.Boas + calentamiento
 la se rompe si no refrigeras -> ruido, + gasto energía

vidrio no se calienta, transmite, pierdes 40%
 la atacar láminas otra u, reflexión extra, interferes $\Delta L = m \lambda$
 la alternada u, d -> $R \sim 99,9\%$, y no se absorbe!

la buscas interferencia constructiva en la reflexión xa una d, reflecta 
 subtransmitancia, $R + T = 1$ ($A = 0$), para $H_e = H_r$, transmite usual, verde, ves e se través

-> no intercambiar espejos xa otra d
 lo contrario ($u + \frac{1}{2}$) λ -> int destructiva -> tratar antirreflejante, no múltiple
 ves ojo ve +, dentro en visible 550nm, en 400 nm, pure periódico