

Interferència i Difracció

Estudi i visualització dels fenòmens d'interferència i difracció mitjançant la seva
simulació amb OpenGL



Houda El Fezzak Bekkouri
David García Tejeda

Departament de Física
Universitat Politècnica de Catalunya

Física dels dispositius de memòria

Enginyeria informàtica

Barcelona, Maig 2023

Índex

1	Introducció	1
2	Modelatge d'Ones de Llum	3
2.1	El Camp Elèctric	3
2.1.1	Interferència	5
2.1.2	Difracció	6
3	Simulació	7
3.1	Organització del codi	7
3.1.1	Constants	7
3.1.2	Funcions auxiliars	8
3.2	LLum provinent de dues escletxes	9
3.3	LLum provinent d' N escletxes	11
3.3.1	Experiment b	11
3.3.2	Experiment c	12
3.4	LLum provinent de 2 escletxes amb xarxa de difracció	14

Introducció

En aquest document descriurem els passos realitzats per tal de simular els fenòmens de difracció i interferència i poder visualitzar i estudiar els patrons generats.

L'estructura d'aquest projecte es subdivideix de manera que en el primer apartat observem el cas en que el fenomen d'interferència sorgeix degut a dues esclatxes, les quals a nivell pràctic considerarem com dues fonts d'ona. A continuació generalitzem aquesta observació al cas on hi ha N esclatxes, estudiant d'aquesta forma les conseqüències d'incrementar aquest nombre i la informació geomètrica que l'addició algebraica d'aquestes ones ens ofereix. El tercer apartat consisteix en simular el fenomen de difracció, terme que utilitzarem en referència a la interferència que es forma a partir d'una sola esclatxa d'amplada no negligible. En aquest cas estudiem la interferència que es produeix entre ones secundàries.

Per últim, estudiem el patró d'interferència que es forma a partir de combinar els últims apartats, observant els efectes de disposar de N esclatxes d'amplada no negligible.

Una de les propietats principals de les ones que ens permet descriure aquestes fenòmens és el principi de superposició, que dicta la forma en què les ones emergents interactuen per formar un patró d'interferència.

Si el principi de superposició per a les ones no fos cert, la interferència de les ones no es produiria de la manera en què l'observem i l'entenem. La interferència és un fenomen que deriva de la naturalesa additiva de les pertorbacions de les ones, de forma que quan dues o més ones es troben en un punt determinat de l'espai i el temps, les seves amplituds es combinen ja sigui de manera constructiva o destructiva, donant lloc als patrons d'interferència que observarem en les nostres simulacions.

Principi de Superposició d'Ones

El principi de superposició s'expressa mitjançant l'afirmació de que les ones superposades s'afegeixen algebraicament per crear una ona resultant.

Considerem l'equació diferencial d'ona per a una ona unidimensional:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (1.1)$$

on $u(x, t)$ es la funció d'ona que descriu la perturbació en un punt (x, t) , i v es la velocitat de propagació de l'ona.

Suposem que tenim dues solucions d'aquesta equació: $u_1(x, t)$ y $u_2(x, t)$. Això significa que cadascuna d'aquestes funcions satisfà l'equació d'ona per si mateixa.

Ara, considerem la superposició d'aquestes dues ones:

$$u(x, t) = Au_1(x, t) + Bu_2(x, t) \quad (1.2)$$

on A i B són constants que representen l'amplitud de cada ona.

Per demostrar el principi de superposició, substituïm aquesta superposició en l'equació d'ona (1.1) i verifiquem si la solució compleix amb l'equació.

Comencem per la segona derivada parcial respecte del temps:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial t^2}(Au_1(x, t) + Bu_2(x, t)) = A \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + B \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}$$

Ara, calculem la segona derivada parcial respecte de la posició:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(Au_1(x, t) + Bu_2(x, t)) = A \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}$$

Substituint aquestes derivades parcials en l'equació d'ona (1.1), tenim:

$$A \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + B \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} - v^2 \left(A \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} \right) = 0$$

$$A \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} \right) + B \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} \right) = 0$$

Donades les premisses de que $u_1(x, t)$ i $u_2(x, t)$ són solucions de la equació d'ona (1.1), cada terme en parèntesis es igual a zero. Per tant, tenim:

$$A \cdot 0 + B \cdot 0 = 0 \quad A \cdot 0 + B \cdot 0 = 0$$

Concloem que l'equació es compleix i la superposició $u(x, t) = Au_1(x, t) + Bu_2(x, t)$ també satisfà l'equació diferencial d'ona. Així, queda demostrat que la superposició de dues solucions de l'equació d'ona també es una solució vàlida de la mateixa equació.

Aquesta demostració, degut a les seves premisses, aplica a qualsevol tipus d'ona governada per una equació diferencial lineal, com és el cas de les Equacions de Maxwell en electromagnetisme, o les Equacions de Schrödinger en el contexte de la mecànica quàntica.

“El principi de Huygens estableix que cada punt en un front d’ona es pot considerar com una font d’ondícules secundàries, i el front d’ona en un moment posterior és l’envolvent d’aquestes ones. Aquest principi ens permet entendre els fenòmens de difracció i interferència, ja que les ones secundàries generades per diferents punts del front d’ona es combinen i interfereixen per produir els patrons observats. Tractant cada punt com una font d’ones secundàries, podem analitzar el comportament de la llum mentre es propaga a través d’obstacles i interactua amb diferents superfícies. ”

Hecht, E. (2017).
Òptica. Pearson.

Principi de Huygens

En la simulació que portarem a terme en aquesta pràctica, la representació de les esclatxes com a fonts d’ona és necessària per capturar amb precisió els fenòmens d’interferència i difracció, ja que hi ha limitacions inherents a les capacitats computacionals actuals que impedeixen una simulació exacta del comportament real de la llum.

En un experiment físic tradicional, sovint s’utilitza una font de llum que es col·loca rere les esclatxes perquè la llum passi a través d’elles i produeixi els patrons d’interferència i difracció en una pantalla o superfície. No obstant això, en una simulació basada en shaders d’OpenGL, aquesta aproximació directa no és factible.

En la simulació, treballem amb representacions discretes de les esclatxes i de la pantalla en forma de píxels. Cada píxel es processa independentment utilitzant els shaders d’OpenGL, i el càlcul del comportament de la llum es fa en funció d’aquestes representacions discretes. Això implica que no podem simular de manera directa i precisa una font de llum puntual rere les esclatxes que il·lumini tota la superfície.

Per tant, per aconseguir una simulació realista, considerem les esclatxes com a fonts d’ona en lloc de tenir una font de llum rere d’elles. En aquest contexte, estem aplicant el principi de Huygens per modelar la propagació de la llum a través de les esclatxes i generar els patrons d’interferència i difracció esperats.

Aquesta aproximació es basa en la premissa de que cada punt de l’apertura actua com una font d’ones secundàries. Si el principi de Huygens no fos vàlid, aquesta suposició no seria precisa.

Modelatge d’Ones de Llum

2.1 El Camp Elèctric

La simulació de les ones de llum té com objectiu recrear el comportament de la llum i els fenòmens implicats, com són la interferència i la difracció.

Segons la teoria de l’Electricitat i el Magnetisme, les partícules carregades que estan en repòs són *elèctriques*, les partícules carregades que es mouen a una velocitat constant són *magnètiques*, i les partícules carregades que s’acceleren emeten radiació electromagnètica que es desplaça a la velocitat de la llum.

Les partícules carregades no poden interactuar instantàniament, sinó que hi ha un camp d'energia que media la seva interacció. Aquest camp d'energia és el que anomenem camp electromagnètic. En altres paraules, la llum és el transport d'energia d'una part del camp electromagnètic a una altra.

El camp elèctric és principalment responsable de la interacció de la llum amb la matèria, com ara la reflexió, la refracció i la difracció. Determina la polarització i la intensitat de la llum i regeix la seva interacció amb partícules carregades o materials amb propietats elèctriques.

Per tant, en simular el camp elèctric, podem captar i analitzar de manera efectiva les característiques principals i els efectes de la llum en els fenòmens d'interferència i difracció.

En aquesta pràctica, al implementar la representació gràfica d'aquests fenòmens, el concepte de camp elèctric s'utilitza per a modelar el comportament de les ones emeses per les fonts virtuals de l'escena. En l'equació donada:

$$E(\vec{r}, t) = \frac{A}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} \cdot \cos(k|\vec{r} - \vec{r}_1| - \omega t)$$

$E(\vec{r}, t)$ representa el camp elèctric en un punt \vec{r} de l'espai i temps t originat per una font puntual monocromàtica localitzada a \vec{r}_1 . Degut al principi de superposició, el camp elèctric en un punt \vec{r} creat per N fonts es calcularà mitjançant:

$$E(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^n E_i(\vec{r}, t)$$

Intensitat mitjana

Comencem amb l'equació per al quadrat del valor mitjà del camp elèctric en funció del temps, representada per $\langle E^2 \rangle$:

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E^2(t) dt$$

on T representa el període de l'ona.

Per simplificar el càlcul, dividim el període T en M parts iguals, que denotarem com $\Delta t = \frac{T}{M}$. Això ens permet reescriure la integral com una suma sobre aquests intervals:

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^M \int_{t_{j-1}}^{t_j} E^2(t) dt$$

on t_{j-1} i t_j representen els límits de l'interval j -èsim.

A continuació, introduïm la notació $E(r, j)$ per representar el camp elèctric en un punt donat r durant l'interval j -èsim. L'integral es pot escriure de la següent manera:

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^M \int_{t_{j-1}}^{t_j} E(r, j)^2 dt$$

Jà que cada interval té una durada de Δt , podem substituir la integració per la mitjana del valor quadrat del camp elèctric durant l'interval:

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^M \Delta t \cdot E(r, j)^2$$

Simplificant obtenim:

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left(\frac{T}{M} \cdot E(r, j)^2 \right)$$

que es pot escriure com:

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E(r, j)^2$$

En aquesta pràctica, utilitzarem aquesta expressió per calcular la intensitat mitjana en el temps del camp elèctric en un punt específic \vec{r} .

2.1.1 Interferència

El fenomen de la interferència es pot explicar mitjançant el principi de superposició, el qual estableix que quan dues o més ones es solapen en l'espai, la pertorbació resultant és igual a la suma algebraica de les pertorbacions individuals. Quan les ones interfereixen, les seves pertorbacions s'addicionen o es resten, depenent de la seva fase relativa, produint així una interferència constructiva o destructiva, respectivament.

La interferència és constructiva si l'amplitud total és major a l'amplitud individual de cada ona.

D'altra banda, la interferència destructiva es produeix quan les ones estan fora de fase i es combinen de forma que les pertorbacions s'oposen. Matemàticament, la interferència destructiva es pot descriure com la resta de les amplituds de les ones, donant com a resultat una amplitud resultant més baixa o fins i tot l'extinció completa.

Per poder observar els patrons d'interferència, la llum incident ha de satisfer les següents dues propietats:

- Les fonts d'ona han de ser *coherents*; és a dir, les ones que emanen d'aquestes fonts han de mantindre una relació de fase constant
- La llum ha de ser monocromàtica, de forma que consisteix en una sola longitud d'ona $\lambda = \frac{2\pi}{k}$

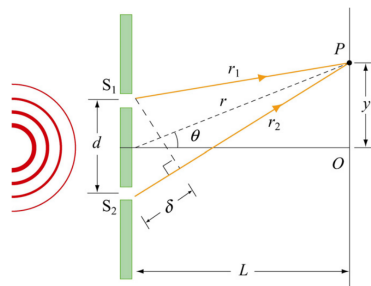


Figure 2.1: Experiment de la doble escletxa

Si prenem com exemple l'experiment de la doble esclatxa¹ (Figura 2.1), al existir una distància d entre les esclatxes, per arribar al punt P la llum que prové de l'esclatxa S_2 haurà de viatjar una distància extra $\delta = r_2 - r_1$. Considerant que la distància fins a la pantalla és molt més gran que la distància entre les esclatxes, la suma d' r_2 i r_1 es pot aproximar per $2r$. Així, la diferència de camí, δ , esdevé:

$$\delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta$$

El fet que les dues ones estiguin en fase o fora de fase es determina pel valor de δ . La interferència constructiva es produeix quan δ és zero o un múltiple enter de la longitud d'ona λ :

$$\delta = d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{interferència constructiva})$$

D'altra banda, quan δ és igual a un múltiple senar de $\frac{\lambda}{2}$, les ones estaran fora de fase a P , resultant en una interferència destructiva amb una franja fosca a la pantalla. La condició per a la interferència destructiva ve donada per:

$$\delta = d \sin \theta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (\text{interferència destructiva})$$

2.1.2 Difracció

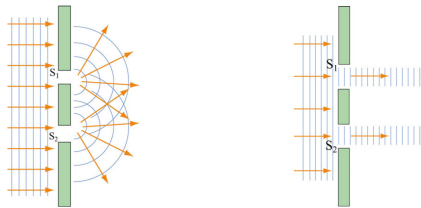


Figure 2.2: Principi de Huygens

L'interferència i la difracció són dos fenòmens estretament relacionats que es poden explicar utilitzant el principi de Huygens. Segons aquest principi, cada punt d'una ona que arriba a un obstacle es comporta com una font secundària d'ones. Aquestes ones secundàries es propaguen en totes les direccions, creant ones difractades. Quan aquestes ones difractades es combinen amb ones provinents d'altres punts de la font original, es produeix l'interferència. Així, la difracció i l'interferència estan estretament lligades: la difracció permet que les ones s'expandeixin i es propaguin en diferents direccions, mentre que la interferència determina com aquestes ones es combinen o es resten en diversos punts de l'espai.

¹Young, T. (1802). On the theory of light and colors. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 92, 12-48.

Difracció a través d'una única escletxa d'amplada no negligible

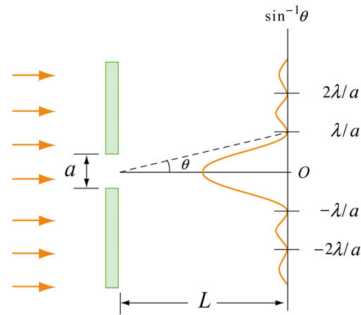


Figure 2.3: Distribució de la intensitat per a la difracció produïda per una sola escletxa

Quan una ona (com ara la llum) passa a través d'una sola obertura, s'estén i interfereix amb ella mateixa, creant un patró de regions brillants i fosques alternants. En el cas del màxim central, les ones secundàries que provenen de tota l'amplada de l'obertura arriben a la mateixa regió de la pantalla amb la mateixa fase, és a dir, estan en fase constructiva. Això provoca una major intensitat en aquesta regió, creant el màxim central brillant.

Els màxims als costats del màxim central són menys intensos i més estrets a causa de la interferència de les ones. A mesura que l'ona passa a través de l'obertura, es difracta i s'estén. Aquesta difracció provoca una disminució de la intensitat (brillantor) de la llum en les regions allunyades del centre. La difracció de l'ona de llum al voltant dels marges de l'obertura provoca que les ones secundàries s'estenguin en angles més pronunciats. Això implica que les regions on es produeix interferència destructiva es concentren en angles més petits, fent que els màxims als costats siguin més estrets en comparació amb el màxim central.

Simulació

3.1 Organització del codi

3.1.1 Constants

- Les constants i variables amb el prefix *i* són variables uniformes que són utilitzades per passar dades des de l'entorn del programa cap al codi del shader.
- *LIGHT_DECAY_FACTOR*: Aquesta constant representa el factor de decaïment de la intensitat lumínica. És un valor petit ($1.0e - 5$) utilitzat per atenuar la intensitat de la llum a mesura que es propaga en la distància.
- *INTEGRATION_STEPS*: Aquesta constant representa el nombre de passos d'integració a realitzar. Determina la granularitat del procés d'integració. Durant la pràctica hem detectat que no es necessari

un gran nombre de passos de integració, de fet en no més de 20 es suficient per poder aproximar amb molta precisió el valor real.

- *ZOOM*: Aquesta constant representa el nivell de zoom de la simulació. Determina el factor d'escalat aplicat a les coordenades de l'espai de la simulació.
- *TIME_ZOOM*: Determina l'escalat del temps a la simulació.

3.1.2 Funcions auxiliars

- `vec3 colorRamp(float t)`: Aquesta funció retorna un color interpolat en funció d'un valor de temps (t). Utilitza dos colors, *up* i *down*, per generar una rampa de colors. El color de sortida és una interpolació lineal entre els dos colors, basada en el valor de temps proporcionat.
- `vec2 getSt()`: Aquesta funció retorna les coordenades normalitzades (entre 0 i 1) de l'espai de la simulació en funció de les coordenades del fragment (`gl_FragCoord`) i la resolució de la pantalla (`iResolution`). A continuació, es realitzen una sèrie d'operacions per ajustar i escalar les coordenades en funció del zoom (`iZoom`).
- `float lightValue(vec2 st)`: Aquesta funció calcula el valor d'intensitat lumínica en funció de les coordenades st de l'espai de la simulació. Implementa una disminució d'intensitat quadràtica inversa a mesura que augmenta la distància des de l'origen (0,0) fins a les coordenades st . S'utilitza per calcular el decaïment de la intensitat lumínica a mesura que la llum es propaga.
- `float light(vec2 st, float t)`: Aquesta funció calcula el valor d'intensitat lumínica d'una ona de llum en funció de les coordenades st de l'espai de la simulació i un valor de temps t . Aplica una funció sinusoidal que varia en base a les coordenades i el temps. Això permet simular l'ona de llum en moviment.

Càlcul de la intensitat resultant

La funció `light` té com a finalitat calcular la intensitat d'una ona de llum en una posició donada \vec{r} i en un temps t .

La funció rep dos paràmetres: \vec{r} , que representa la posició en forma de vector de dues dimensions `vec2 st`, i t , que indica el temps en forma de valor real `float t`.

Primer es calcula la distància l com la magnitud de la diferència entre \vec{r} i la posició de la càmera. A continuació, es calculen el nombre d'ona $k = 2\pi/\lambda$ i la freqüència $f = 1/T$ de l'ona de llum. A partir d'aquests valors, s'obté la freqüència angular ω que és igual a $2\pi f$.

Un cop es tenen el nombre d'ona k , la freqüència angular ω i la distància l , es calcula la intensitat de l'ona de llum en aquesta posició i temps. Finalment, s'aplica un factor de correcció a la intensitat de la llum calculada si el mode d'integració està desactivat, per tal de normalitzar-la al rang de 0 a 1.

La decisió de no multiplicar per l'amplitud a la funció `light` s'ha pres basant-se en la idea que aquesta operació no aportava gran rellevància a la representació gràfica ni al resultat final del projecte. La multiplicació per l'amplitud generaria un valor mitjà de \vec{E} més gran en cada punt, però de manera uniforme. Llavors, aquesta operació no aportaria una contribució substancial al resultat final, excepte per desplaçar el gràfic en l'eix y. Per tant, s'ha optat per prescindir de la multiplicació per l'amplitud en favor de mantenir la proporció i la distància entre els màxims de l'ona, aspectes considerats més rellevants en el marc d'aquest projecte.

La funció `net(vec2 st, float off, float t, float separation)` calcula la intensitat neta en una posició donada `st` sumant les intensitats de llum de diverses fonts. Itera sobre N fonts amb una separació especificada, calcula la posició de cada font basant-se en l'offset i la separació, i acumula les intensitats. A través d'aquest procés, la funció ens permet combinar les contribucions de diverses fonts de llum per simular els fenòmens corresponents.

L'interferència entre les ones que provenen de les dues esclatxes es produeix en funció de la diferència de longitud de camí entre aquestes ones. Com hem vist abans, en punts on aquesta diferència de longitud de camí és un múltiple enter de la longitud d'ona, es produeix interferència constructiva i s'obtenen màxims de brillantor. En canvi, en punts on aquesta diferència de longitud de camí sigui un múltiple enter de mitja longitud d'ona, es produeix interferència destructiva i s'obtenen franges fosques.

3.2 Llum provinent de dues esclatxes

En aquest primer apartat l'objectiu era observar la distribució de les intensitats deguda a la interferència de llum provinent de dues esclatxes d'amplada infinitesimal.

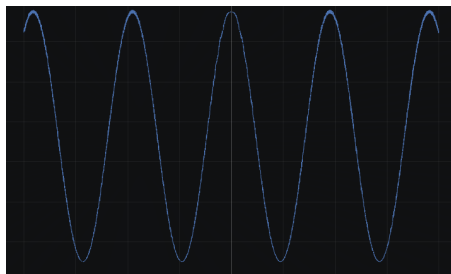


Figure 3.1: Distribució de la intensitat per a la interferència produïda per dues esclatxes

Podem observar que els resultats obtinguts en la simulació es corresponen amb els esperats a nivell teòric, ja que en un sistema de doble esclatxa perfecte amb esclatxes infinitesimalment petites, obtenim un patró d'interferència tal que al integrar sobre les intensitats observades en la pantalla obtenim una distribució sinusoidal.

No obstant això, en la realitat, les esclatxes no poden ser infinitesimalment petites, i això introdueix complicacions en el patró d'interferència.

En aquest cas tenim que a mesura que augmenta l'angle θ , la brillantor de les franges disminueix i esdevé imperceptiblement fosca a angles més grans. Això es deu al fet que es superposa un patró de difracció d'una

sola escletxa al patró ideal de la doble escletxa. L'amplada finita de cada escletxa permet que la llum que hi passa a través interfereixi amb ella mateixa, provocant la cancel·lació completa en angles definits.



Figure 3.2: Patró de franges alternants observat en l'experiment de la doble escletxa amb feixos de llum reals

La difuminació del patró cap a l'esquerra i la dreta, com observem a la Figura 3.2 és causada per un altre fenomen: la difracció. És la interferència de la llum procedent de diferents parts de l'obertura amb ella mateixa.

En la simulació que s'ha dut a terme, com podem observar a la Figura 3.1, degut a què sí hem pogut tractar les escletxes com fonts d'ona virtuals d'amplada infinitesimalment petita, el patró resultant sí segueix una distribució sinusoidal.

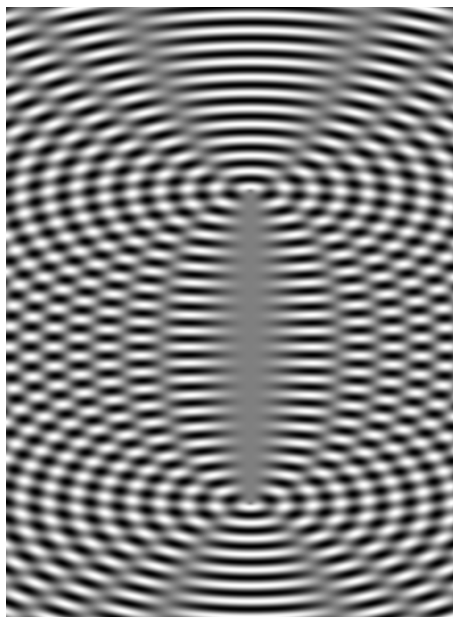


Figure 3.3: Distribució de la superposició de les ones generades per dues escletxes d'amplada negligible

En la figura 3.3 observem la representació dels fronts d'ona creats per les dues fonts (blanc representa un punt màxim de la ona, mentre que negre un punt mínim, la interferència totalment destructiva es produeix en totes les zones grises, on ja no hi ha ona). Cal destacar que tal com en aquesta imatge com en les subseqüents, l'expressió del càlcul del camp elèctric utilitzada s'ha simplificat esborrant la component de divisió per la distància amb l'objectiu de no veure distorsionats els resultats amb valors alts de distància del centre projectat del focus a la pantalla. Al final del document es troben representats els dos càlculs i com afecten a la representació final, i es pot observar com la simplificació no afecta als resultats, però d'aquesta manera obtenim una escala més uniforme per a tots els valors de la secció d'amplada de la pantalla.

3.3 LLum provinent d' N esclatxes

En aquesta secció extenem l'observació a N esclatxes de mida negligible.



Figure 3.4: Distribució de la intensitat per a la interferència produïda per $N = 5$ esclatxes

Mitjançant diverses execucions, hem pogut observar que es compleix que el nombre de màxims secundaris es correspon a $N - 2$, on N és el nombre d'esclatxes.

Quan hi ha N esclatxes, cadascuna emet ones de llum que interfereixen amb la llum provinent d'altres esclatxes. Aquesta interferència crea punts de màxims i mínims en la distribució d'intensitat en la pantalla de visualització.

El punt central correspon al màxim principal, que és el punt on les ones de llum de totes les esclatxes interfereixen de manera constructiva, de forma que totes les ones estan en fase i es sumen constructivament, creant un màxim d'intensitat en aquesta posició.

Els punts següents a l'esquerra i la dreta del màxim principal corresponen als primers màxims secundaris. En aquestes posicions, les ones de llum de $N - 1$ esclatxes interfereixen constructivament, mentre que l'ona de llum d'una sola esclatxa interfereix destructivament. Això crea punts de màxims addicionals, però amb menor intensitat que el màxim principal.

```

1 Slit 0:  up&down up&down up&down
2 Slit 1:  ....up&down up&down up&down
3 Slit 2:  .....up&down up&down up&down

```

L'anterior és un exemple que ens permet visualitzar la generació d'aquests màxims secundaris. En aquest cas obtenim interferència constructiva entre l'esclatxa 0 i 2, degut a que els seus màxims s'alineen, parcialment cancel·lada per l'esclatxa 1.

La raó per la qual, amb N esclatxes, es generen $N - 2$ pics secundaris en la distribució de la intensitat es deu a què per a N esclatxes, només hi han $N - 1$ retards de fase (*fencepost problem*). Quan es parla dels pics secundaris, s'elimina un dels retards de fase, de manera que només en queden $N - 2$.

Per tant, queda demostrada la correctesa dels resultats experimentals, que es corresponen amb l'afirmació que el nombre de màxims secundaris en la distribució d'intensitat quan hi ha N esclatxes és $N - 2$.

3.3.1 Experiment b

Concretament ens preguntem per xarxes de difracció de $N = 3, 45$ i 10 punts focals, considerant una distància entre esclatxes $a = 0.01\text{mm}$, $L = 200\text{mm}$ i alçades de pantalla 15mm , i la variació de la intensitat a la pantalla.

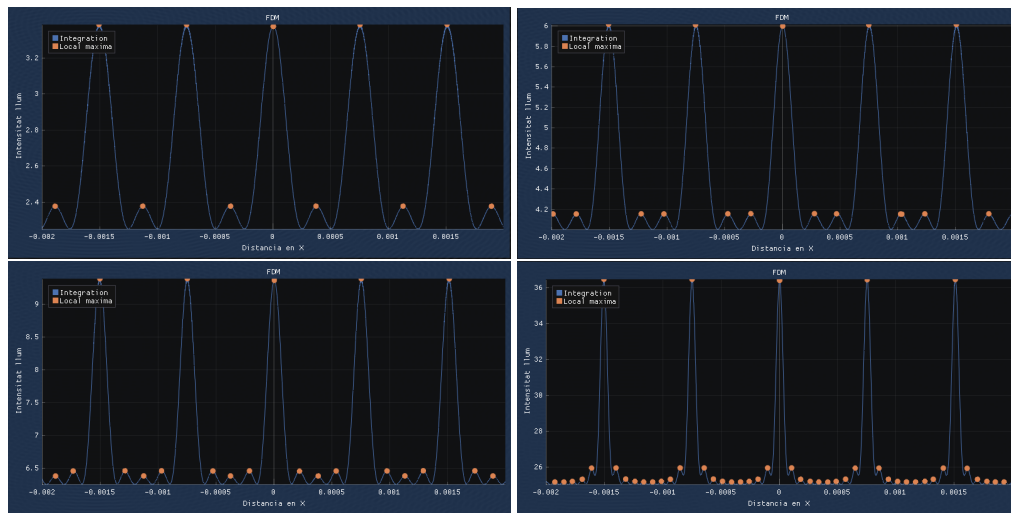


Figure 3.5: Variació del plot de les intensitats amb un augment del paràmetre N (3, 4, 5, 10)

Podem observar que la distància entre pics augmenta proporcionalment amb N , com podem veure en les següents representacions,

La intensitat dels pics també augmenta com es d'esperar, ja que estem simulant més focus puntuals i la seva interferència resulta en una suma major.

Al final aquest experiment ens dona resultats molt raonables, si augmentem el nombre de fonts puntuals, cada cop s'assembla més a una xarxa de difracció d'un alt nombre de focus, el que seria equivalent a engrandir la esclatxa en el fenomen de difracció.

3.3.2 Experiment c

El mateix ens preguntem per una xarxa de difracció de mida 0.001mm (la que correspon a l'apartat c de la pràctica).

Si variem N aconseguim una millor simulació de la difracció fins a un cert valor on la millora ja no resulta apreciable (≈ 50). Això és degut a que a diferència del cas anterior la distància entre cada focus canvia per a poder simular de forma consistent una sola esclatxa d'amplada $d = 0.002\text{mm}$. Per tant només augmentem la resolució de la simulació.

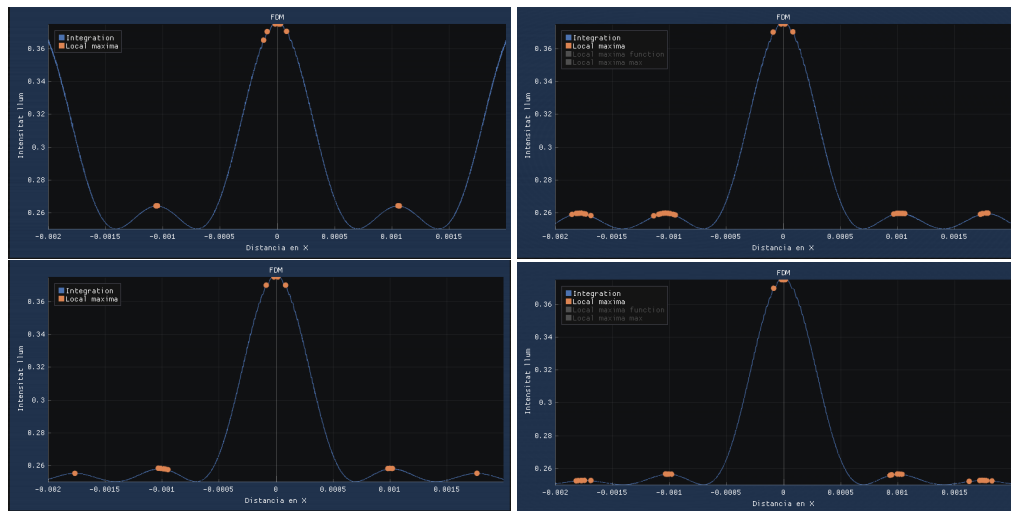
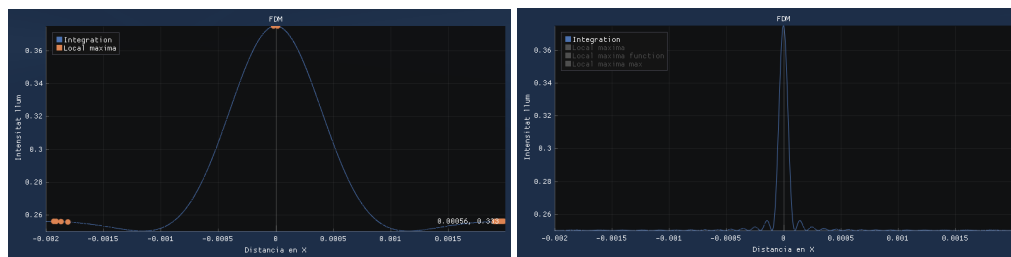


Figure 3.6: Nombre de fonts virtuals (3, 4, 5, 10)

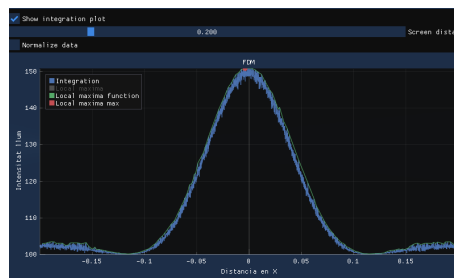
Una variació en el paràmetre d influeix en l'amplada del pic central, amb una major d obtenim un pic més ample.

Figure 3.7: Variació segons d

Finalment una variació en el paràmetre L té un efecte similar, com era d'esperar, obtenim una taca més gran a la pantalla, però de menor intensitat (ja que és més lluny de la font).

Per últim també es demanava l'amplada del pic central amb una distància de la pantalla de 200mm.

Nosaltres hem trobat que l'amplada d'aquest pic és de 23mm, mesurat amb l'amplada entre els seus dos punts mínims.

Figure 3.8: Valor de $\langle E^2 \rangle$ amb una distància del laser de $D = 200mm$

3.4 Llum provinent de 2 esclatxes amb xarxa de difracció

En aquest apartat corresponent al apartat d de la pràctica s'estudia l'efecte de la difracció combinat amb la interferència, per fer-ho es simulen dues esclatxes separades per una distància d on cadascuna es simula com una xarxa de difracció amb N punts focals virtuals. El resultat esperat seria la combinació dels dos fenòmens.

L'objectiu es una simulació de dues esclatxes amb amplada $d = 0.02mm$, utilitzant $N = 20$ fonts puntuals amb centres amb una separació de $0.1mm$.

I mitjançant les observacions experimentals podrem respondre sobre com varia el diagrama d'intensitat si variem els valors de λ , d i L .

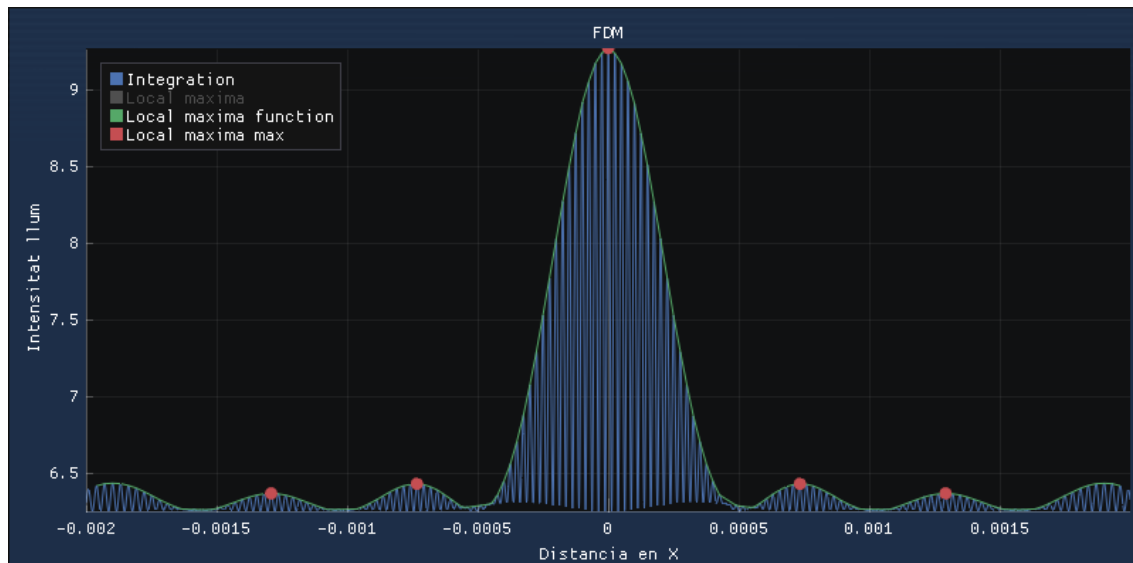


Figure 3.9: Distribució de la intensitat per a la interferència produïda per $N = 5$ focus virtuals per esclatxa

També podem mostrar el resultat de la simulació en el que veuriem a la pantalla per una certa distància dels focus emissors canviant un petit paràmetre del codi per trobar la intensitat de la llum en cada punt de la pantalla.

Es pot veure el fenòmen de interferència en els patrons sinusoidals petits i el de difracció en els dos patrons grans.

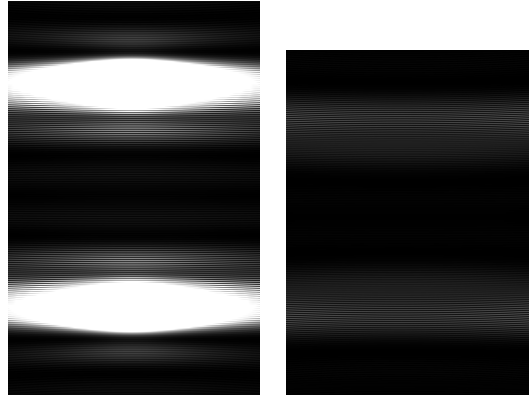


Figure 3.10: Resultat emissiu de la pantalla

En un resultat es mostra el càlcul de la mitjana del camp elèctric tenint en compte la distància al focus emissor, amb l'altre no. Com la diferència de magnitud del centre dels focus a la resta de la pantalla es molt gran no es pot representar de forma correcta gràficament en una pantalla sense fer una correcció de color, que nosaltres ja no em fet perquè no formava part del àmbit del treball, però sí que ens serveix per apreciar l'efecte.