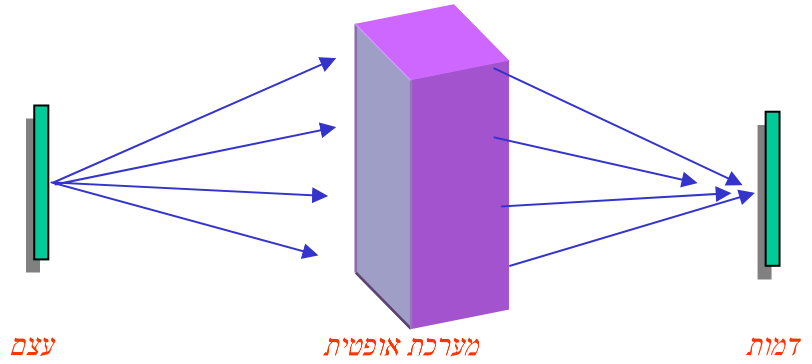
דימות

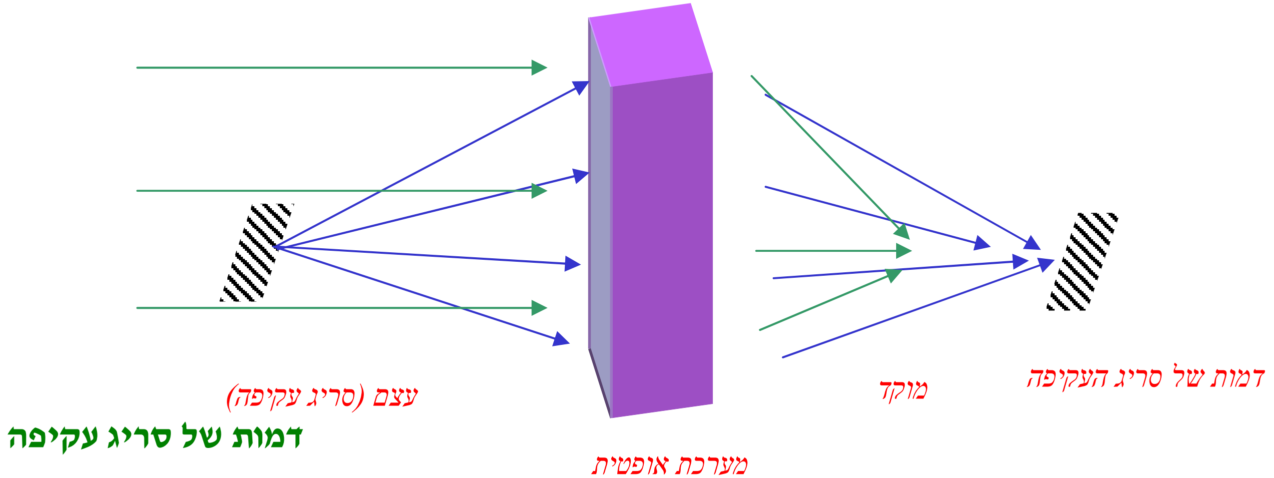
- יצירת דמות (או דימות) הוא התוצר של כל מערכת אופטית.
- אופטיקה גאומטרית מסבירה כיצד נוצרת הדמות מקרנים או חזיתות גל על ידי שימוש בחוק סְנֵל או בעיקרון פֶּרְמָה, אבל אינה חוזה את אפשרויות ומגבלות המערכת האופטית.
- מגבלות כאלו נובעות למשל מאיכות ירודה של הרכיבים, אבל ישנם תהליכים יותר עמוקים הקובעים את הביצועים האפשריים במערכת מושלמת.



מערכת אופטית פשוטה

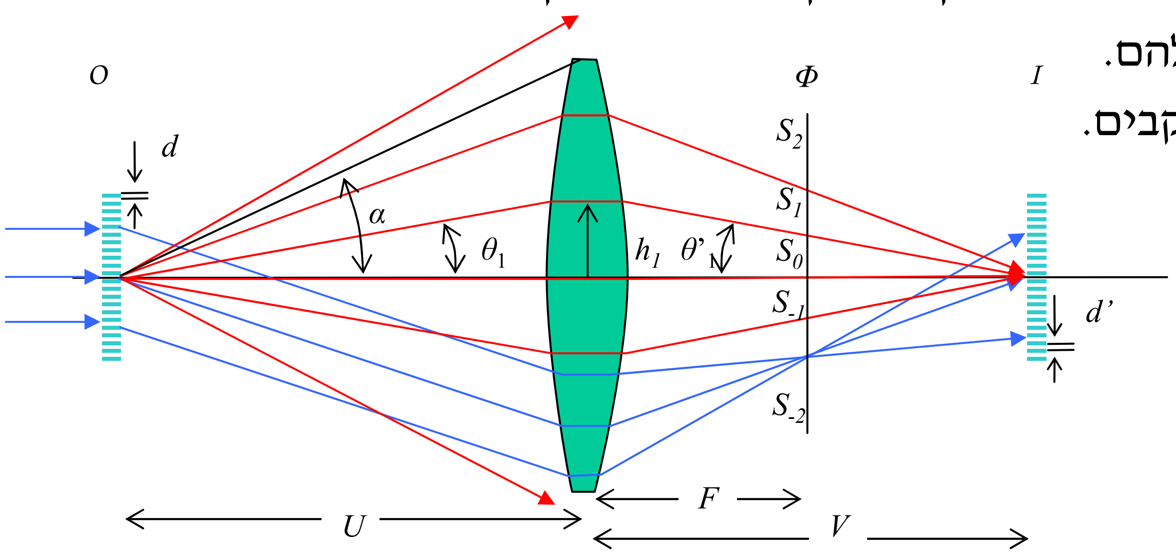
דימות ועקיפה

- ניתן לחשוב על הדמות כעצם מחזורי, ועל ידי כך להבין את תהלך יצירת הדמות.
- הרעיון הוצע לראשונה על ידי אֲבֶּה (Abbe) בשנת 1867.
- קרנים המגיעות מאינסוף (גלים מישוריים) מתמקדים במישור המוקד של המערכת האופטית (חצים ירוקים).
- אם נתבונן על העצם המחזורי ועל דמותו כפי שהיא משתקפת במערכת האופטית (חצים כחולים), נוכל להשתמש בסדרים השונים של העצם המחזורי להבנת מגבלות המערכת.
- בקרוב הפרקסיאלי (הקרוב לציר האופטי) כל סדר כזה יהיה גל מישורי.
- גלים מישוריים אלו ישברו על ידי המערכת האופטית ויצרו אוסף נקודות במישור המוקד שלה.
- לאחר מכן ימשיכו ויצרו את דמות העצם המחזורי במישור הדמות של העצם.



תהליכי עקיפה

- נפרק את תהליך יצירת הדמות לשני שלבים עוקבים:
  - שלב היציאה ממישור העצם O דרך מיקוד הסדרים השונים במישור המוקד $\mathcal{F}$.
  - שלב יצירת הדמות הסופית במישור I.
- בשלב הראשון ניקח לדוגמה אלומה מקבילה הפוגעת בסריג ומוטה לסדר מסוים (-2 ; קרנים כחולות), המרוכזות (בגלל מקבילותן) במישור המוקד של העדשה.
- כל סדר יוצר מוקד משלו, וסכומם הוא עקיפת פראונהופר של העצם.
- המוקדים $S_2, S_1, S_0, S_{-1}, S_{-2}$ מהווים סדרה של מקורות נקודתיים במרחקים שווים.
- הדמות הסופית היא תבנית עקיפה שלהם.
- כלומר, יש כאן שני תהליכי עקיפה עוקבים.



יצירת דמות של סריג עקיפה.

קשר זויתי

- ניקח כל זוג של סדרים הפוכים S_j, S_{-j} היוצרים פסי התאבכות של יאנג במישור הדמות I.
- אם אורך המחזור (מרווח) של סריג העצם הוא d, הסדר S_j מופיע בזוית θ_j הנתונה, בזויות קטנות, על ידי

$$\theta_j \approx \sin\theta_j = j\lambda/d$$

- הקירוב של זויות קטנות יתברר מיד כמיותר. ניתן לראות מהציור כי

$$\theta_j \approx \tan\theta_j = h/U \qquad \theta'_j \approx \tan\theta'_j = h/V$$

- ועל כן

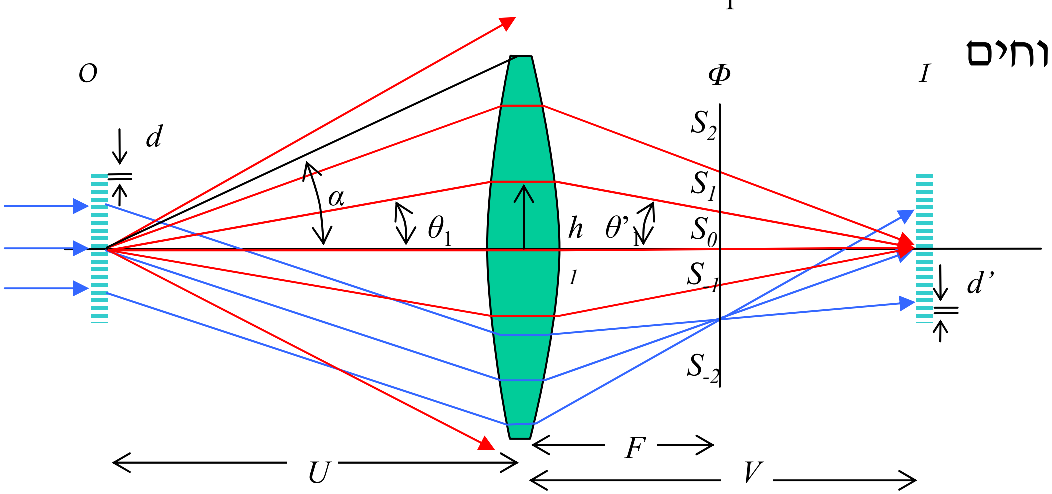
$$\theta'_j \approx U\theta_j/V$$

- הגלים מהסדרים הראשונים S_1 ו-S_{-1} מתכנסים לדמות בזויות $\pm\theta_1$'.
- לכן הם יוצרים פסי התאבכות מחזוריים במרווחים

$$d' = \lambda/\theta'_1 \approx \lambda V/\theta_1 U = Vd/U$$

- כך נוצרה דמות מוגדלת ; ההגדלה היא

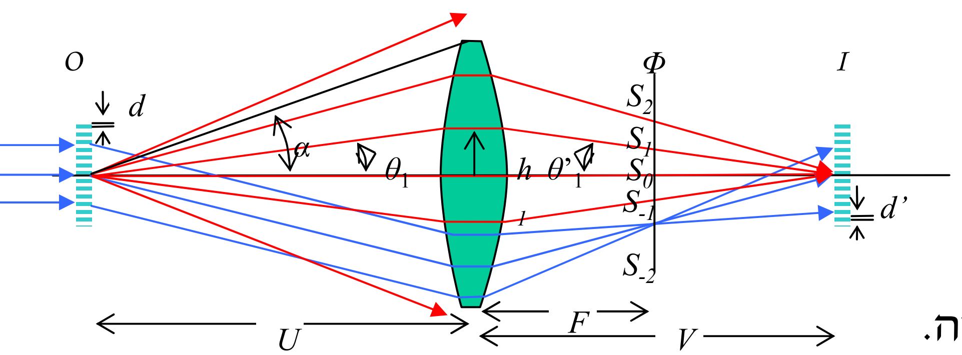
$$m = V/U$$



יצירת דמות של סריג עקיפה.

הסריג כמשל

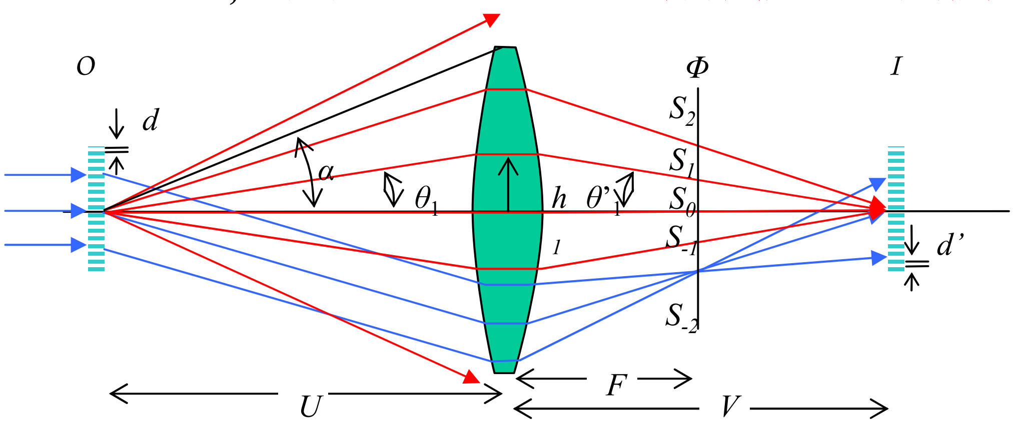
- נוצרים פסי התאבכות מחזוריים במרווחים $d' = \lambda/\theta_1' \approx \lambda V/\theta_1 U = Vd/U$
- פסי התאבכות מהסדרים הגבוהים יוצרים הרמוניות של הסריג מחזורי במרווחים d'/j.
- הסדרים הגבוהים הם תורמים ליצירת פרטי התמונה.
- הפרט העדין ביותר בדמות נקבע על ידי הסדר הגבוה ביותר של העקיפה שעברה למעשה את העדשה.
- סדר האפס תורם משרעת קבועה, והוא חשוב ביותר.
- ללא סדר האפס תמונות ההתאבכות של הסדרים הראשונים יופיעו בחצי המחזור של התמונה.
- הדבר נובע מכך שאנו רואים עוצמה, לא משרעת; לפונקציה $\sin^2 x$ חצי המחזור של $\sin x$.
- עם זאת, תוספת הקבוע משחזרת את המחזוריות הנכונה לעוצמה.
- ניקח את הפונקציה
$$(c+\sin x)^2 = c^2 + 2c\sin x + \sin^2 x$$
- גם לפונקציה זו חצי המחזור של $\sin x$.



- השימוש בסריג אינסופי כעצם הוא פישוט של הבעיה.
- אם היינו משתמשים בסריג סופי, היו סדרים משניים שהיו מעבירים מידע.
- אם העצם מסובך יותר, היינו צריכים לתקן את התוצאה הפשוטה לעיל.
- יתרון השימוש בסריגים הוא ביטוי קל של משמעות גבול ההפרדה.

תנאי אַבֵּה

- בנינו את הדמות רק בתנאי שזויות העקיפה היו קטנות.
- אַבֵּה (Abbe) הבין כי ניתן להשתמש בזויות גדולות אם נשמר היחס $\sin\theta' = \sin\theta$ לכל θ, זאת לעומת שמירת היחס $\theta' = \theta$.



- אם מתקיים

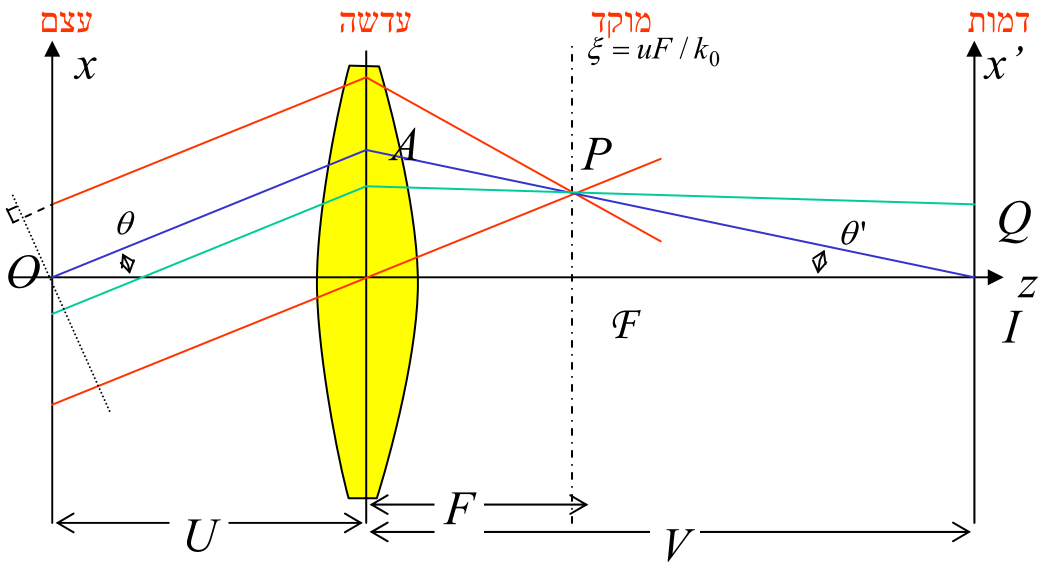
$$\frac{\sin\theta_j}{\sin\theta'_j} = m$$

אז מחזור פסי ההתאבכות בדמות הוא

$$d'_j = \frac{\lambda}{\sin\theta'_j} = \frac{m\lambda}{\sin\theta_j} = md_j$$

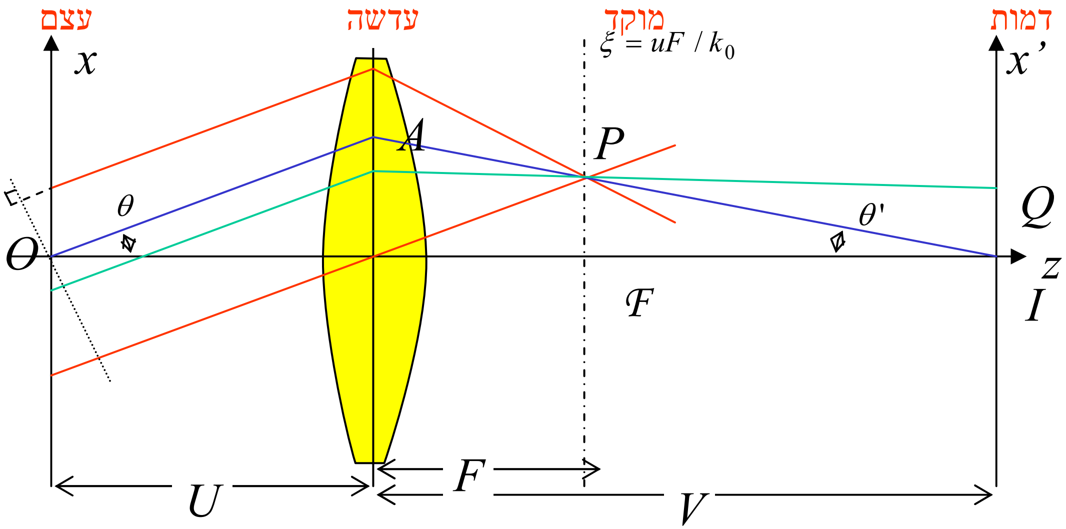
- במקרה כזה להרמוניות יש בדיוק המחזור הנכון להתאים למחזור הבסיסי $d'j$ והדמות היא מושלמת ככל האפשר.
- עדשה המקיימת תנאים אלו היא עדשה עצמית של מיקרוסקופ רב עוצמה.
- תנאי אבה אינו דורש שהיחס יהיה קבוע במערכת דימות מסוימת, אלא מחייב שהתנאי הזה יתקיים למניעת עיוותי המערכת בזוויות גדולות θ' ו-θ .
- תנאי זה לא מתקיים למשל בעדשה פשוטה.

תאור יצירת הדמות



- ראינו בצורה איכותית את הרעיון שיצירת הדמות יכולה להחשב כתהליך עקיפה כפול.
- ראינו גם שתנאי אבה נדרש לקיום תהליך העקיפה.
- נקבע כעת את התנאים לדימות בצורה מתמטית במרחב העצם במימד אחד. ההרחבה לשני מימדים מיידית.
- הניתוח מבוסס על תורת הגל הסְקַלָרִי של העקיפה ומניח שהעצם מואר אחידות ובצורה קוהרנטית על ידי גל מישורי.

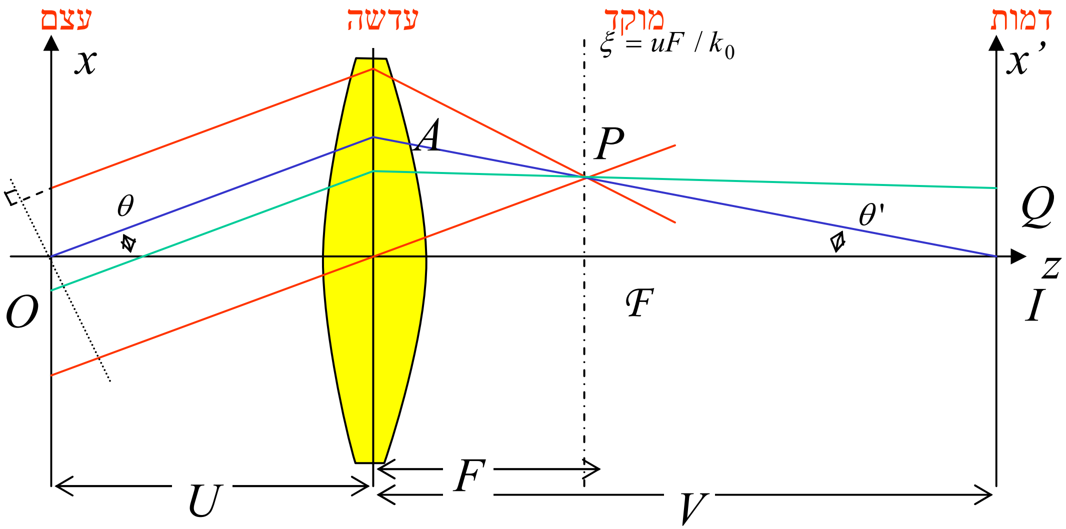
דימות בעדשה



- העצם מואר אחידות ובצורה קוהרנטית על ידי גל מישורי .
- הגל היוצא מהעצם מיוצג על ידי הפונקציה המרוכבת $f(x)$.
- פונקציה זו גם מוכפלת על ידי $\exp(-i\omega_0 t)$ הנישא ללא שינוי לאורך כל המשוואות, ועל כן יוזנח כאן.
- העצם מודמה על ידי עדשה כך שמרחקי העצם והדמות הם U ו-V ומימדי העצם קטנים ביחס ל-U.
- משרעת הגל המגיע לנקודה P במישור המוקד $\mathcal{F}$ של העדשה היא התמרת פוריה של $f(x)$ כולל פיגור המופע הנובע מהמסלול OAP :

$$\psi(u) = e^{ik_0 \overline{OAP}} F(u) = e^{ik_0 \overline{OAP}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\, e^{-iux}\, \mathrm{d}x$$

עיקרון הויכנס



- המשרעת במוקד

$$\psi(u) = e^{ik_0 \overline{OAP}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\, e^{-iux}\, \mathrm{d}x$$

- גם כאן וקטור הגל הוא $k_0 = 2\pi/\lambda$.
- u מתאים לנקודה P:

$$u = k_0 \sin\theta$$

- המשרעת $b(x')$ בנקודה Q במישור הדמות ניתנת לחישוב מעיקרון הויכֶנְס (Huygens) במישור המוקד $\mathcal{F}$
- גורם של $1/r$ הנובע מהתאבכות גלים כדוריים לא מוכלל כאן בגלל שאין לו השפעה על הפיסיקה.
- המרחק האופטי מ-P עד Q הוא

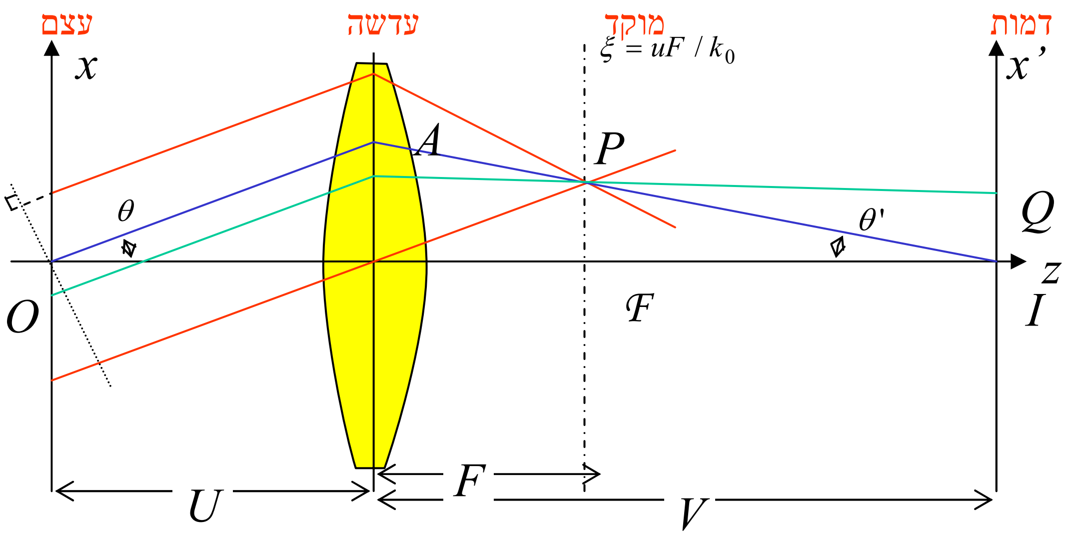
$$\overline{PQ} = PQ = \sqrt{PI^2 + x'^2 - 2x' PI \sin\theta'}$$
$$\approx PI - x'\sin\theta' \;;\; x' \ll PI$$

עצם ודמות

- המרחק האופטי מ-P עד Q הוא

$$PQ \approx PI - x'\sin\theta'$$

- אם תנאי הסינוס של אַבֶּה מתקיים אזי כאשר ההגדלה m קיים $\sin\theta = m\sin\theta'$.



- מציבים גם $u = k_0 \sin\theta$ ומקבלים

$$PQ = PI - \frac{x'u}{mk_0}$$

- המשרעת בנקודה Q תהיה לכן

$$b(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(u)\, e^{ik_0 PQ}\, \mathrm{d}u$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik_0 PI} \psi(u)\, e^{-ix'u/m}\, \mathrm{d}u$$

- זוהי התמרת פוריה השניה בבעיה. מציבים את $\psi(u)$ ומקבלים את הקשר בין הדמות ובין העצם:

$$b(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ e^{ik_0 \overline{OAP}+PI} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\, e^{-iux}\, \mathrm{d}x \right\} e^{-ix'u/m}\, \mathrm{d}u$$

הקשר בין עצם ודמות

- קיבלנו את הקשר בין הדמות ובין העצם:

$$b\left(x'\right)=\int_{-\infty}^{\infty}\left\{e^{ik_0\,\overline{OAP}+PI}\int_{-\infty}^{\infty}f\left(x\right)e^{-iux}\,\mathrm{d}\,x\right\}e^{-ix'u/m}\,\mathrm{d}\,u$$

- יש כאן תלות בגורם המעריכי $\exp\left(ik_0 OAP+PI\right)$.
- תלות זאת נראה במבט ראשון כתלויה במיקום הנקודה P, ועל כן תלויה בפרמטר u.
- אבל המסלול האופטי בין O ובין I אינו תלוי בנקודה P, כיון שהם מישורים צמודים לפי עקרון פֶּרְמָה.
- לכן גורם זה הוא קבוע, שווה ל- $\exp\left(ik_0 OI\right)$, ויכול להיות מוצא מחוץ לאינטגרל:

$$b\left(x'\right)=e^{ik_0 OI}\int_{-\infty}^{\infty}\left\{\int_{-\infty}^{\infty}f\left(x\right)\;e^{-iux}\,\mathrm{d}\,x\right\}e^{-ix'u/m}\,\mathrm{d}\,u$$

- האינטגרלים זהים לאלו במשפט התמרת פוריה ההפוכה, ועל כן

$$b\left(x'\right)=e^{ik_0 OI}\,f\left(\frac{-x'}{m}\right)$$

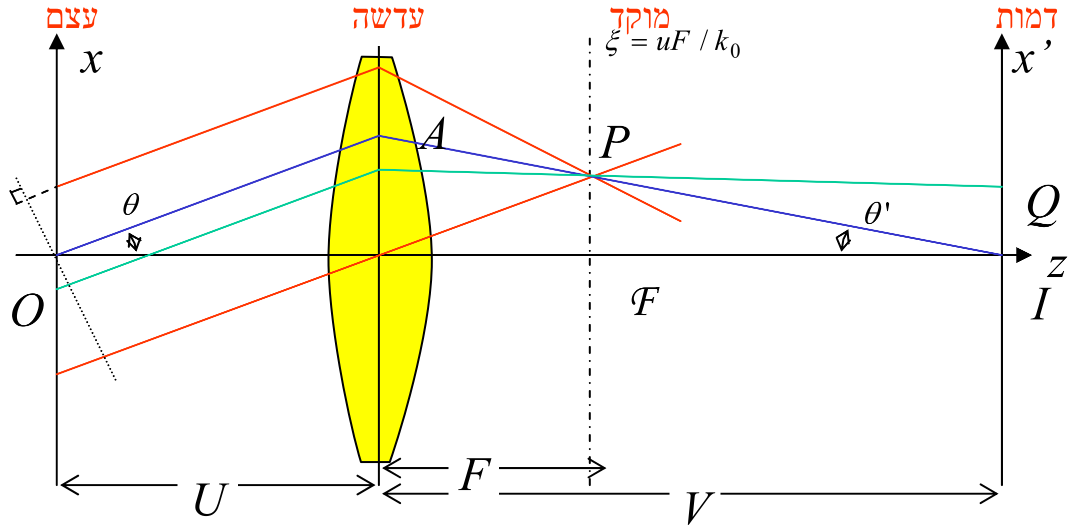
התמרת ההתמרה

$$b(x') = e^{ik_0 OI} f\left(\frac{-x'}{m}\right)$$

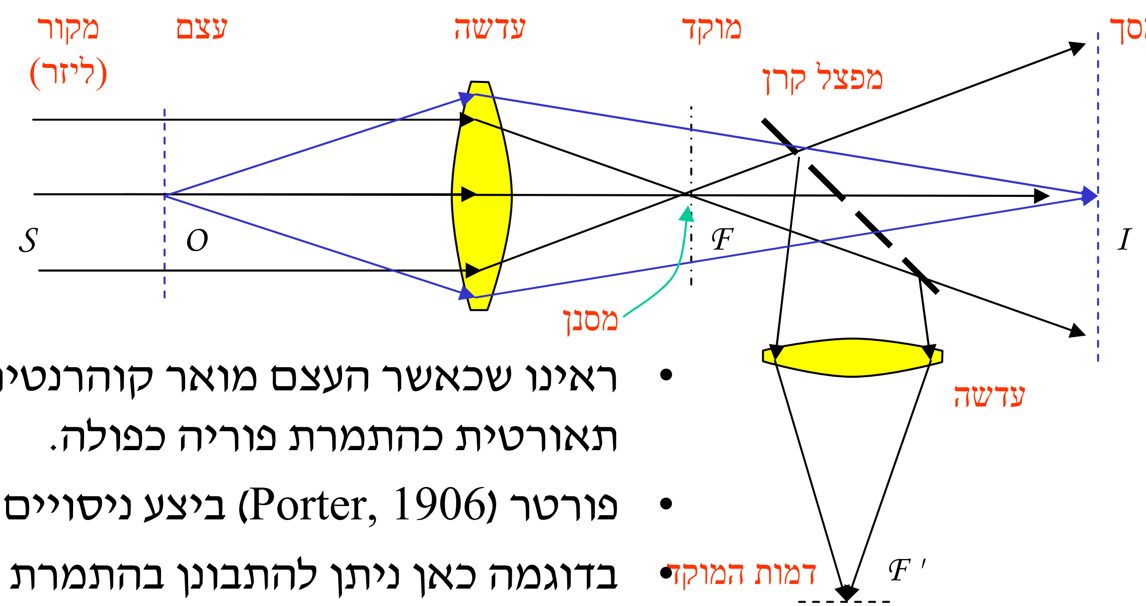
- משוואה זו מיצגת את העובדה הידועה שהדמות היא העתק הפוך של העצם, מוגדל בשיעור m.
- תוצאה זו הוכחה לראשונה על ידי צֶרְנִיקֶה (Zernike) וניתנת לניסוח כך:

דמות אופטית יכולה להיות מיוצגת על ידי התמרת פוריה של התמרת פוריה של העצם.

- ההנחה תקפה בדיוק רק אם העדשה היא מתוקנת היטב, כלומר היא מצייתת לחוק הסינוס של אַבֵּה. במקרה כזה, המסלול OPI בלתי תלוי לחלוטין בנקודה P.



הדגמת התמרת ההתמרה

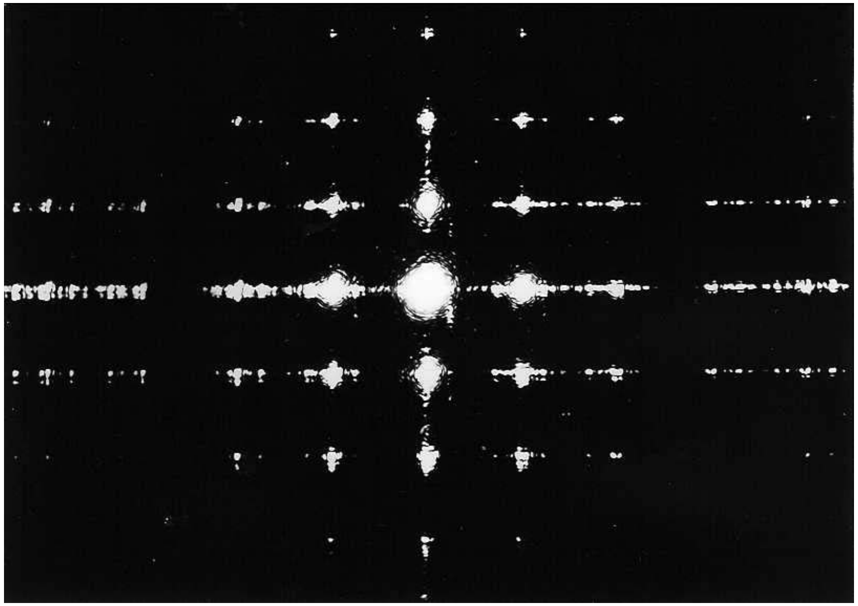


- ראינו שכאשר העצם מואר קוהרנטית הדמות יכולה להחשב בצורה תאורטית כהתמרת פוריה כפולה.
- פורטר (Porter, 1906) ביצע ניסויים להוכחת התוצאה.
- בדוגמה כאן ניתן להתבונן בהתמרת הבינים ובמקביל בתמונה הסופית.
- מסכה שקופה למחצה מוארת באמצעות קרן קוהרנטית מקבילית.
- עדשה מדמה את המסכה על מסך.
- התאורה במישור המוקד היא העקיפה של פראונהופר של העצם.
- הדמות היא התמרת פוריה של עקיפה זו.
- כדי להוכיח שההמשך הוא התמרת פוריה ניתן לשנות את העברת העקיפה במישור המוקד על ידי מסננים נוספים ולהתבונן בתוצאה בדמות הסופית.
- תהליכים כאלו נקראים סינון מרחבי ודומים לסינון זמני במעגלים חשמליים.

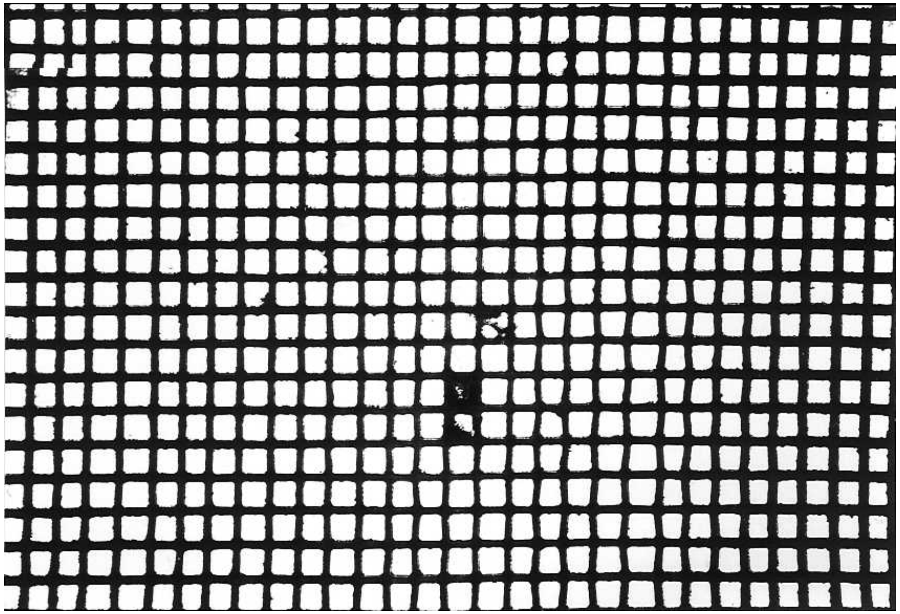
דוגמות להתמרות אופטיות

- נתבונן תחילה בעצם המורכב מפיסת גאזה.
- זהו עצם דו מימדי ובבסיסו גם מחזורי, עם סטיות קלות ממחזוריות, וכן פגמים כמו חורים סתומים.
- העצם מונח במישור הכניסה ואנו מתבוננים במישור העקיפה או המסכה ובמישור הדמות.
- תמונת העקיפה כוללת נקודות מוגדרות היטב, המתאימות למחזור הגאזה.
- מתקבל גם פילוג אור נוסף סביב כל אחד מהסדרים המבטא את הרכיבים הלא-מחזוריים.

תמונת עקיפה



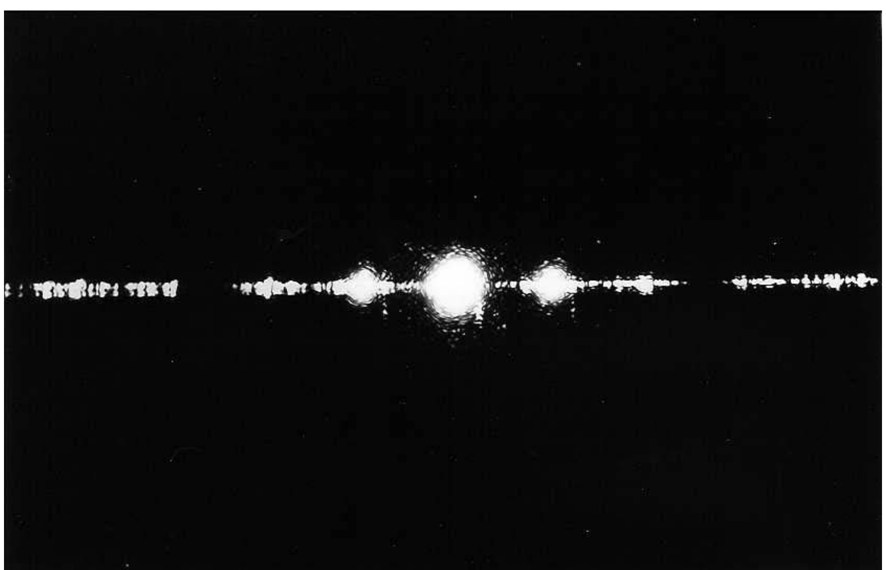
דמות



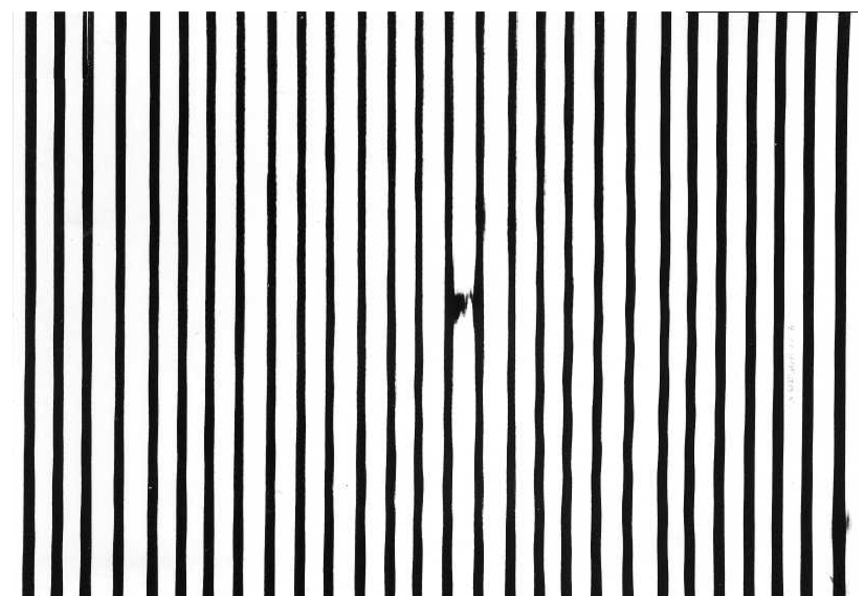
מסכה אופקית

- נתבונן שוב בעצם המורכב מפיסת גאזה.
- כעת נכניס מסכות שונות למישור המוקד ועל ידי כך נסתיר חלקים מתמונת העקיפה.
- המסכה מעבירה רק סדרים שעל הציר האופקי.
- הדמות נעשית אוסף של קוים אנכיים:
- זהו העצם שהיה נותן את המסכה כתמונת העקיפה שלו.

מסכה



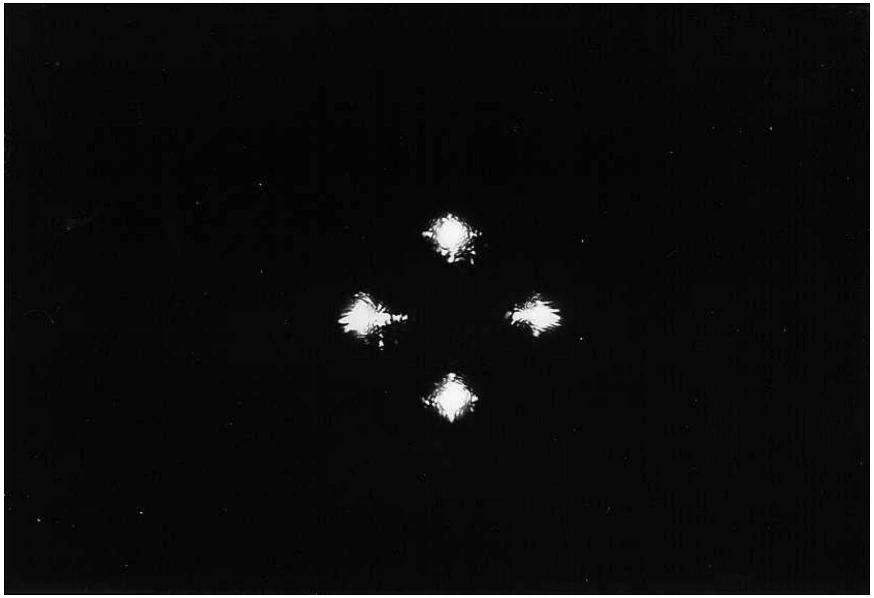
דמות



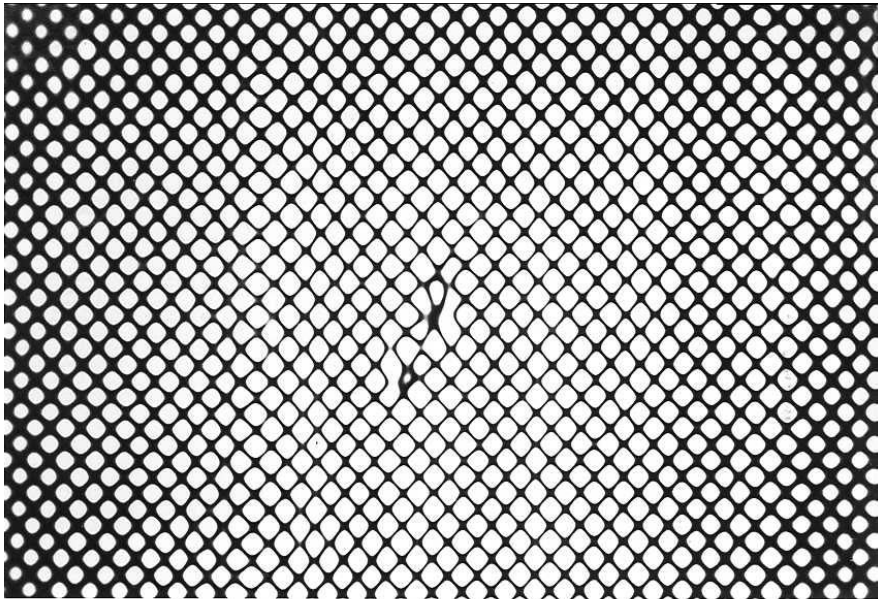
מספר סדרים

- המסכה מעבירה רק את הסדרים $(0 ,1\pm)$ ו- $(1\pm ,0)$.
- אנו מקבלים גאזה אחרת בצפיפות שונה ובכיוונים אחרים.
- העוותים נותרים בעינם, שכן הם תורמים לתמונת העקיפה בכל הנקודות.

מסכה



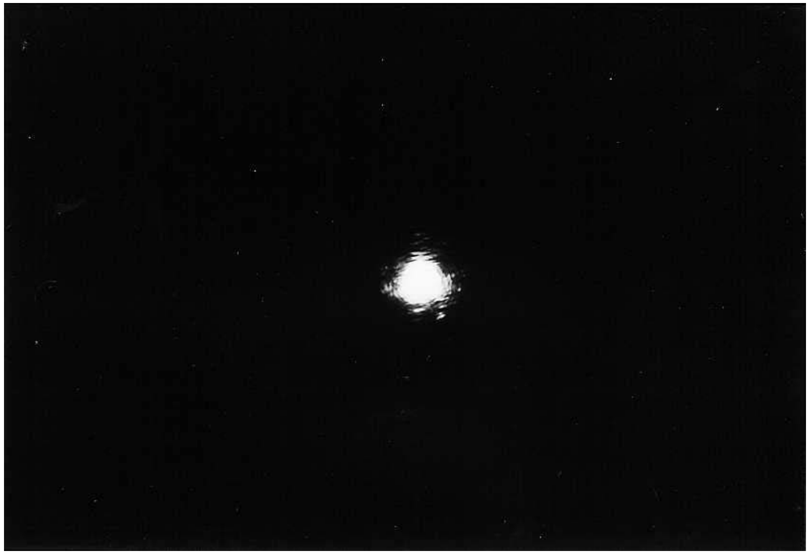
דמות



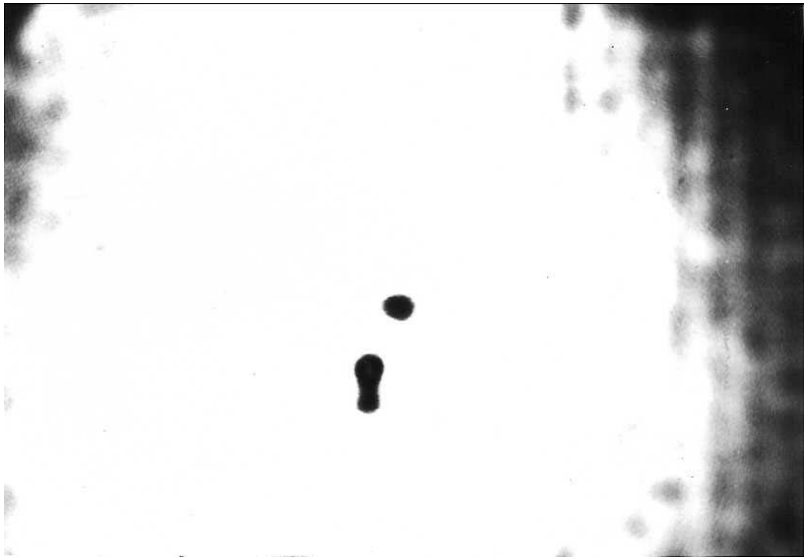
סדר האפס

- המסכה היא סדר האפס עצמו, יחד עם האזור עד לחצי המרחק לסדרים הבאים.
- בדמות הנוצרת אין כל גאזה, ורק העוותים נותרים, במיוחד החורים החסומים.

מסכה



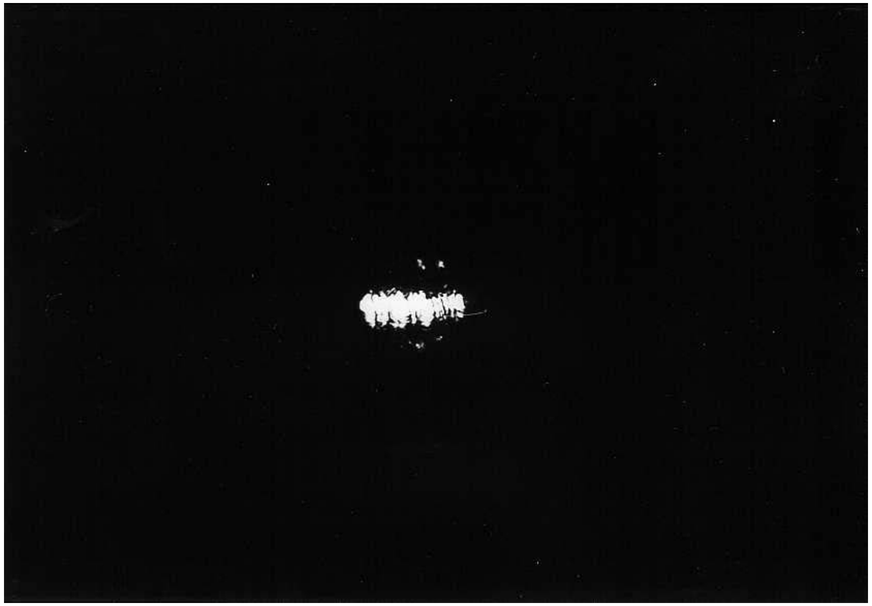
דמות



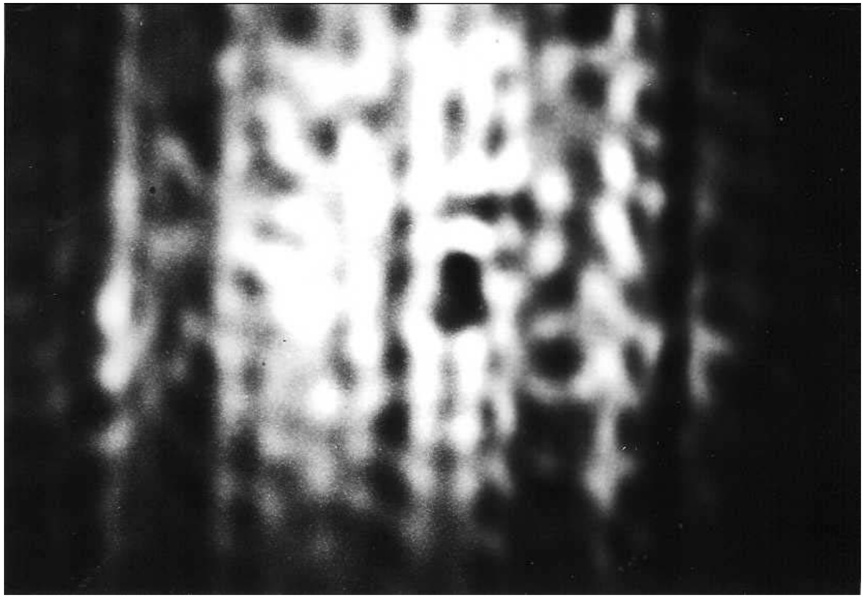
סדר האפס

- נעביר במסכה חלק קטן של תמונת העקיפה הרחוק מהמרכז
- כאן מודגשות בתמונה הסטיות ממחזוריות מושלמת, בכיוון ובתדר המרחבי שהמסכה העבירה.

מסכה



דמות



בעית המופע

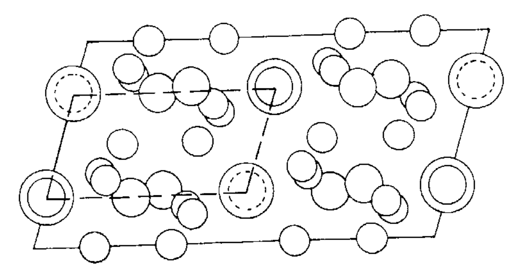
- נתיחס לאפשרות של הפרדת שני שלבי תהליך יצירת הדמות.
- נניח שאנו רוצים לצלם את תמונת העקיפה במישור המוקד ובניסוי אחר להאיר את התמונה באור קוהרנטי ולראות את תמונת העקיפה שלו.
- האם לא ניצור על ידי כך את תמונת העקיפה של תמונת העקיפה ועל ידי כך נשחזר את הדמות המקורית?
- הפגם במהלך מחשבה זה קשור למופע של תמונת העקיפה.
- התאורה $\psi(u)$ היא מרוכבת ומכילה משרעת ומופע כאחד.
- צילום משמר רק את העוצמה $|\psi(u)|^2$ והמופע אובד.
- תהליך עקיפה שני יקרה ללא המופעים החסרים ועל כן לא יוכל בהכרח לשחזר את התמונה המקורית.
- מכיון שתהליך זה מניח שכל המופעים הם אפס, תיתכן התשובה הנכונה רק כאשר בתמונה המקורית כל המופעים היו אפס.

המופע בתמונת העקיפה

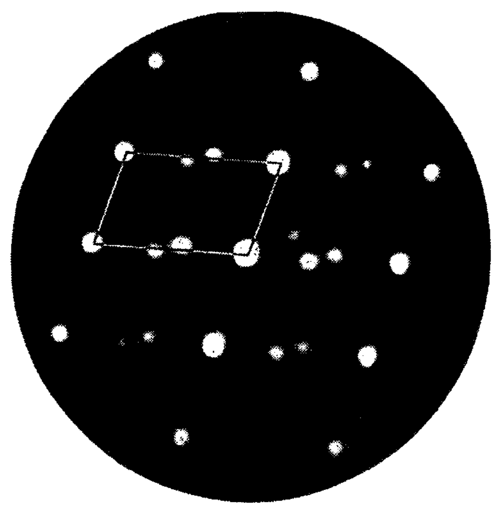
- הבעיה שהמופעים בתמונת העקיפה הרשומה אינם ידועים בדרך כלל מוכרת כבעית המופע.
- פתרון בעית המופע הוא מרכזי בחשיבותו לתמונות עקיפה של קרני רנטגן, כאשר יש צורך ליצור דמות של גביש שצולמה תמונת העקיפה שלו.
- בעיה דומה קיימת גם באסטרונומיה, כאשר מודדים את תמונת העקיפה של עצם שמיימי, ויש לחשב את תמונת העצם עצמו.
- אחת מהגישות לבעיה היא לגלות את המופע החסר מתוך עיון במידע בתמונת העקיפה, תוך ידיעה חלקית של העצם.
- למשל במקרה האסטרונומי, התמונה חייבת להיות חיובית, ובין הכוכבים עצמם אין מקורות אור.
- זוהי הגישה של שחזור מופע, ויש לה הצלחה חלקית בשנים האחרונות.

מיקרוסקופ קרני רנטגן

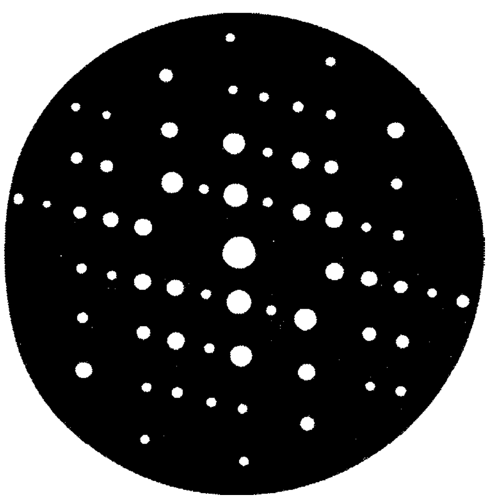
- ניסוי מעין זה בוצע על ידי בראג (Bragg) בשנת 1939, ונקרא על ידו מיקרוסקופ קרני רנטגן.
- שיחזור העצם בוצע על ידי ייצוג חלק מתמונת העקיפה של הגביש בצורת חורים בלוח אטום, כאשר שטח כל חור יחסי לעוצמת כתם העקיפה של קרן הרנטגן.
- תמונת העקיפה של פראונהופר של הלוח היא על כן דמות של מבנה תא היחידה.



תיאור המבנה



הטל האטומים בתא היחידה

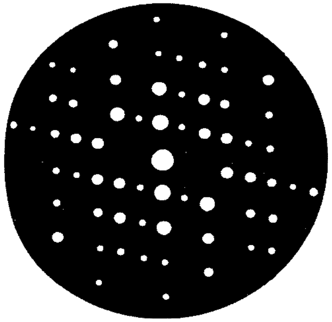


חורים המיצגים עקיפה מדיופסיד

$CaMg(Si_2O_3)_2$

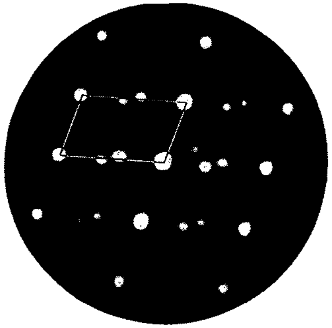
שיטת האטום הכבד

- רעיון זה הוא הבסיס של שיטת האטום הכבד לפתרון בעית מבנה גבישים.
- פתרון זה ישים לכל מולקולה שניתנת לגיבוש וכוללת אטום כבד או כמה אטומים כבדים באותו מקום בכל תא יחידה.
- אטומים כבדים אלו שולטים על תמונת העקיפה ולמעשה קובעים את מופע כל הגלים העוקפים.
- עם ידיעה זאת על המופעים, ניתן לבנות את תא היחידה.
- זאת היתה השיטה לגילוי מבנה החלבונים, המוגלובין ומיוגלובין (Perutz and Kendrew).
- שיטה זו עדין היחידה השימושית לרוב המולקולות המסובכות.

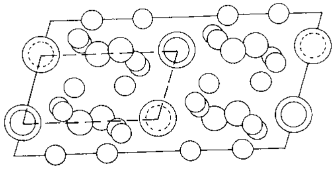


חורים המיצגים עקיפה מדיופסיד

$CaMg(Si_2O_3)_2$



הטל האטומים בתא היחידה



תיאור המבנה

פונקצית פריסת הנקודה

- האור היוצר דמות במערכת אופטית מוגבל זויתית על ידי המפתח.
- לכן יש חשיבות לגודל המפתח ולקוהרנטיות של האור, והם מגבילים את כושר ההפרדה.
- במקרה של עצם מאיר או מואר בצורה לא קוהרנטית משתמשים באבן הבוחן של ריילי (Rayleigh).
- זהו המצב בטלסקופים הצופים בכוכבים, או במיקרוסקופים המגדילים עצם פלורסנטי.
- כל נקודה בעצם יוצרת במישור הדמות את תמונת העקיפה של פראונהופר של המפתח המגביל, בהגדלה הנקבעת לפי מרחק העצם.
- תמונת עקיפה זו קרויה פונקצית פריסת הנקודה (point-spread function).
- עצם גדול יותר יכול להחשב כאוסף של נקודות כאלו, וכל אחת יוצרת פונקצית פריסת נקודה דומה.
- בגלל חוסר הקוהרנטיות אנו מחברים את **עוצמות** הפונקציות לקבלת הדמות הסופית.
- אי לכך הדמות היא **קונבולוציה** של עצמת העצם ופונקצית פריסת הנקודה.

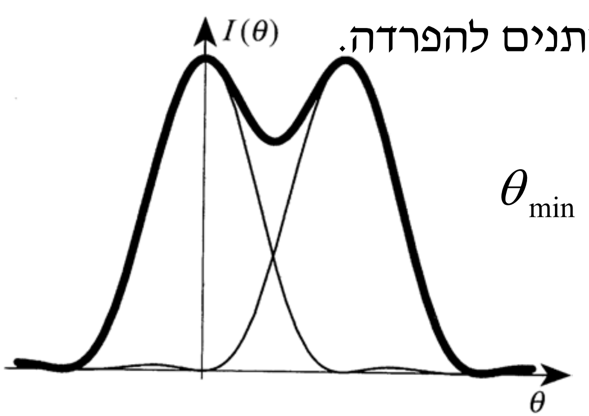
אבן הבוחן של ריילי

- אם נתבונן בשתי נקודות קרובות בעצם שביניהן זוית קטנה, נוכל לשאול מתי הן מופרדות בדמות.
- אם למפתח קוטר D, אזי עוצמת תמונת העקיפה שלו, כפונקציה של הזוית θ, היא
- $$I(\theta)=\left[\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}k_0 D\sin\theta\right)}{\frac{1}{2}k_0 D\sin\theta}\right]^2$$
- לפי אבן הבוחן של ריילי,

שתי נקודות בַּעצם מופרדות אם השיא המרכזי של האחת נמצא מחוץ למינימום הראשון של השניה.

- לפונקציה $I(\theta)$ יש אפס ראשון באותו מקום שיש לפונקציה $J_1(x)$, כאשר $x=3.83$. אזי

$$\tfrac{1}{2}k_0 D\sin\theta_1 = \pi D\sin\theta_1/\lambda = 3.83$$



- הזוית θ_1 היא המרחק הזויתי המזערי בין מקורות לא קוהרנטיים הניתנים להפרדה.
- מכיון ש- $\theta_1 << 1$, גבול ההפרדה על פי ריילי הוא

$$\theta_{\min} = \theta_1 = 3.83\lambda/D = 1.22\lambda/D \quad \text{(Rayleigh)}$$

אבן הבוחן של סְפֵּרוֹ

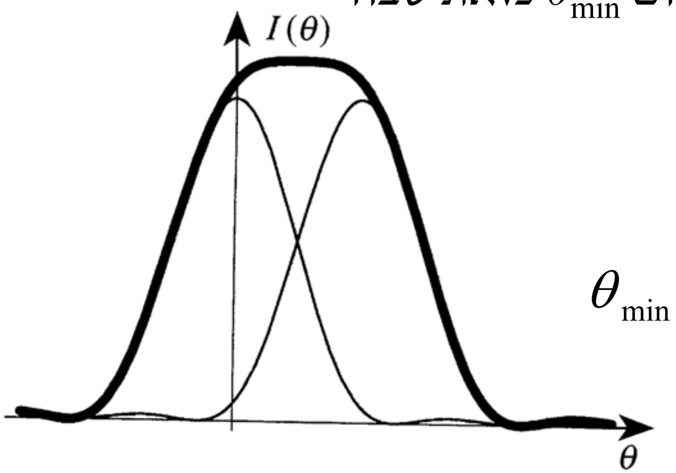
- גבול ההפרדה על פי ריילי היה

$$\theta_{\min} = \theta_1 = 3.83\lambda / \pi D = 1.22\lambda / D \quad \text{(Rayleigh)}$$

- רק ההפרדה הזויתית של המקורות של המקורות משפיעה כאן.
- מניחים גם שעוצמות המקורות שוות.
- קיים גם כושר הפרדה המתאים לעין, שלה רגישות מירבית להבדלי העוצמה. זהו כושר ההפרדה על שם סְפֵּרוֹ (Sparrow) לפיו

שתי נקודות עצם מופרדות אם לפילוג העוצמה המשולב שלהן יש נקודת מינימום לאורך הקו המחבר את מרכזיהן.

- אם עוצמות הנקודות שוות, אבן הבוחן של סְפֵּרוֹ תיתן זוית מינימום $\theta_{\min}$ כזאת שבה

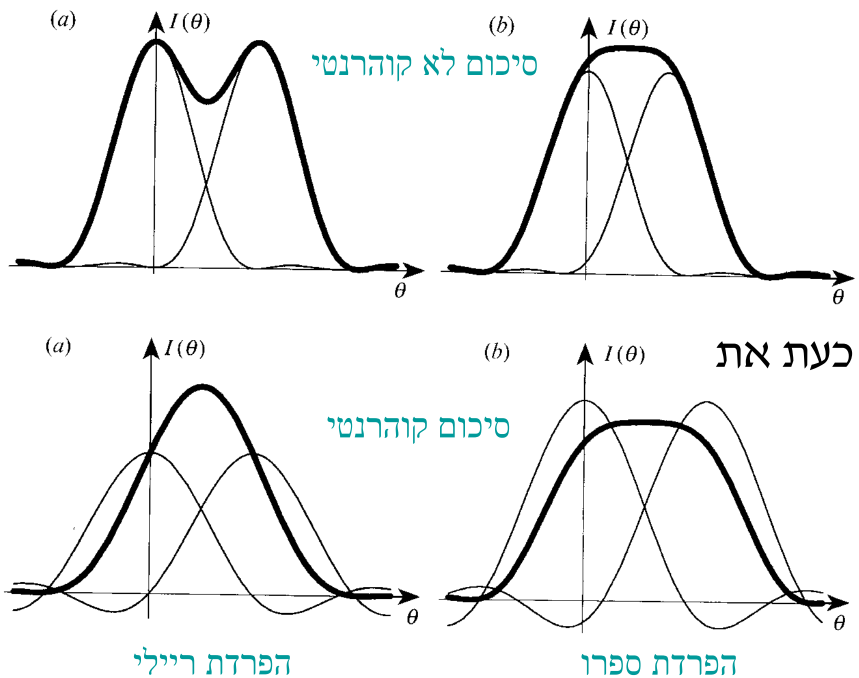


$$\left(\frac{\mathrm{d}^2 I}{\mathrm{d}\theta^2}\right)_{\theta = \theta_{\min}/2} = 0$$

- לאחר גזירת פונקציות בסל, מקבלים

$$\theta_{\min} = 0.95\lambda / D \quad \text{(Sparrow)}$$

מקורות קוהרנטיים

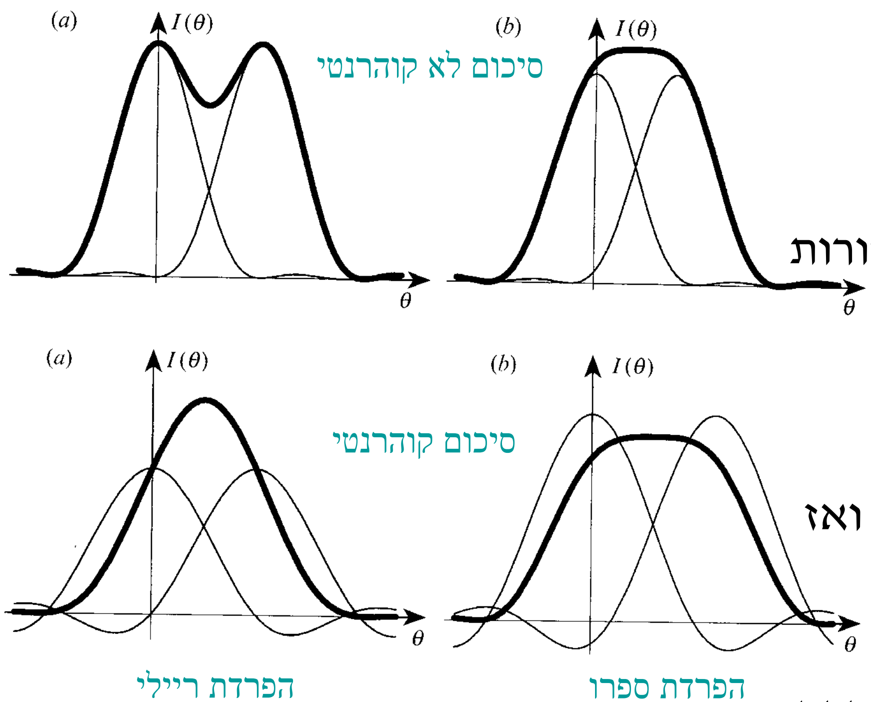


- מה קורה כשהמקורות קוהרנטיים?
- אם שני מקורות האור פולטים באותו מופע, יש להוסיף כעת את **משרעותיהן** של פונקציות פריסת הנקודה

$$A(\theta)=\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}k_0 D\sin\theta\right)}{\frac{1}{2}k_0 D\sin\theta}$$

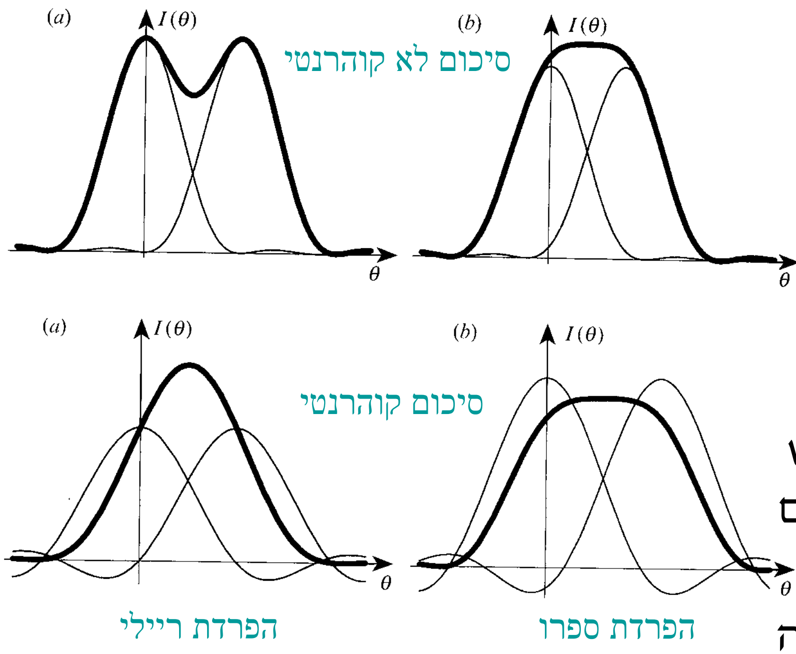
- תנאי ריילי נותן את אותה תוצאה כמו קודם, $\theta_{\min}=1.22\,\lambda/D$ כי האפס של פונקצית פריסת הנקודה לא השתנה; אבל הנקודות אינן מופרדות.
- לעומת זאת, תנאי ספרו נותן כעת $\theta_{\min}=1.46\,\lambda/D$.

הפרדת מקורות



- בתמונה רואים את העוצמה לרוחב התמונה של שני מקורות בזויות $\theta = 0$, $\theta = \theta_{\min}$.
- במקרה הלא קוהרנטי אנו רואים את סכום העוצמות $I(\theta) + I(\theta - \theta_{\min})$.
- בחיבור המקורות הקוהרנטיים, מחברים את המקורות ואז מעלים ברבוע לקבלת העוצמה, $|A(\theta) + A(\theta - \theta_{\min})|^2$.
- במקרה הלא קוהרנטי מתאימה הפרדת ריילי ואילו במקרה הקוהרנטי אינה מתאימה.

שיפור ההפרדה?



- הנחנו שהפרש המופע בין המקורות הקוהרנטיים הוא 0.
- אם נניח במקום זה הפרש של π, אזי נקבל עוצמה של $|A(\theta) - A(\theta - \theta_{min})|^2$.
- עוצמה זו תמיד מתאפסת באמצע, ללא תלות במרחק המקורות.
- לעומת זאת, כאשר שהמקורות מתקרבים, ההפרש מתאפס בגלל התאבכות הורסת ביניהם.
- לכך יש השפעה יישומית חשובה במסכות הסחת-מופע, שיש בהן שימוש בפוטו-ליתוגרפיה בהתקנים מיקרו-אלקטרוניים לשיפור ההפרדה של רכיבים צמודים על ההתקן.
- רכיבים חילופיים מכוסים לסרוגין במסכה שקופה המוסיפה את הפרש המופע π כדי להבטיח קו כהה בין דמויותיהם.
- עם זאת, לרוב הארה לא קוהרנטית משפרת את ההפרדה.

דוגמה להפרדה

- השוואה בין תאורה קוהרנטית ולא-קוהרנטית של זוג חורים.
- במקרים (a)-(c) נבחר המפתח כך שמרחק החורים מתאים לקריטריון ריילי
- (a) בתאורה לא-קוהרנטית,
- (b) בתאורה קוהרנטית באותו מופע,
- (c) בתאורה קוהרנטית במופע הפוך.
- במקרים (d)-(e) אותו זוג חורים מודמה דרך מפתח שבו הם בגבול ספרו בתאורה :
- (d) בתאורה לא-קוהרנטית,
- (e) בתאורה קוהרנטית במופע הפוך.
- בשורה התחתונה אנו רואים את אותן דמויות בחשיפה קצרה יותר.