

הפרדה במיקרוסקופ

- ראינו שכושר ההפרדה טוב יותר בדרך כלל כאשר המקורות לא קוהרנטיים.
- למרות זאת, רוב המיקרוסקופים משתמשים באור קוהרנטי ברובו או בחלקו.
- הדבר נובע ממימדיו הקטנים של העצם הנמדד וקשיים מעשיים בייצור אור לא-קוהרנטי מרחבית.
- תורת אבה מתייחסת לתאורה קוהרנטית ולכן די מספיקה לדיון של הפקדה במיקרוסקופ. נחזור לדגם של עצם מחזורי.
- ההפרדה הניתנת להשגה בעדשה נתונה או מערכת דימות מוגבלת על ידי סדר העקיפה הגבוה ביותר שניתן להעביר במפתח העדשה.
- אם לעצם מחזור d אזי הסדר הראשון יופיע בזווית הנתונה על ידי

$$\sin \theta_1 = \lambda / D$$

- כדי לדמות עצם במחזור כה, חצי המפתח הזוויתי של העדשה חייב לקיים $\alpha \gg \theta_1$
- על כן המחזור המזערי הניתן לדימות ניתן על ידי

$$d_{\min} = \lambda / \sin \alpha$$

שיפור ההפרדה

- המחזור המזערי הניתן לדימות ניתן על ידי

$$d_{\min} = \lambda / \sin \alpha$$

- ניתן להשרות את העצם בתווך בעל מקדם שבירה μ כאשר אורך הגל בחומר הוא λ/μ .
- נכתוב את המחזור המזערי בתלות ב**מפתח המספרי** (numerical aperture) המוגדר

$$\text{NA} = \mu \sin \alpha$$

- במקרה של ההפרדה הקוהרנטית נקבל

$$d_{\min} = \lambda / \mu \sin \alpha = \lambda / \text{NA}$$

- הנחנו עד כה שהתאורה מקבילה לציר והתנאי לקבלת אפס ושני סדרים ראשונים נדרש לבנית דמות במחזור הנכון.

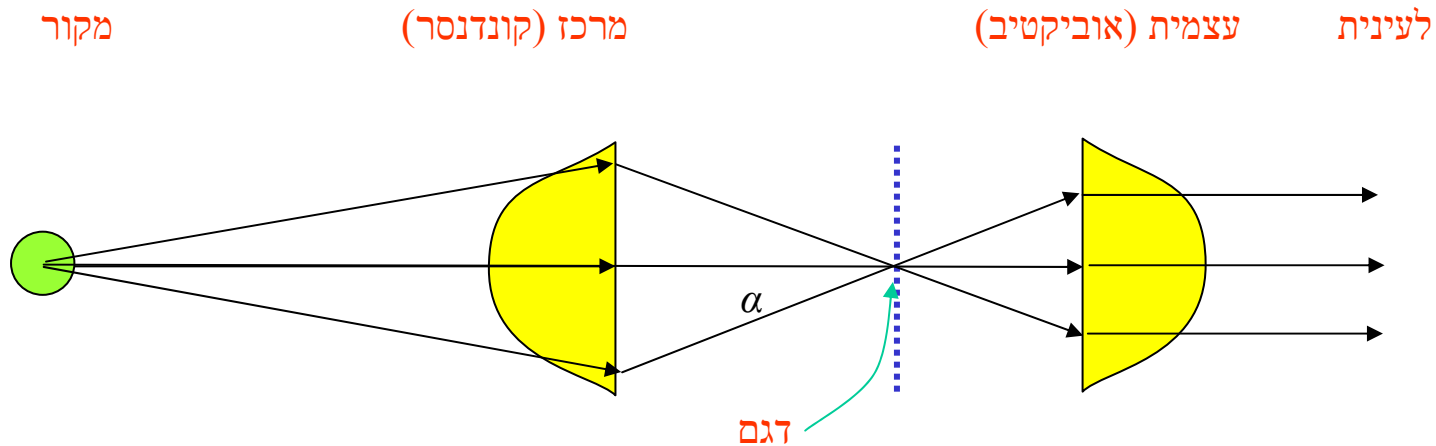
- למעשה, המחזור הנכון יודמה אם סדר האפס והסדר הראשון יעברו דרך העדשה.

- על כן נשפר את ההפרדה על ידי הארת העצם באור הפוגע בזווית α לציר, כך שסדר האפס מצליח לעבור. במקרה זה התנאי שיעבור הסדר הראשון בצד אחד יהיה

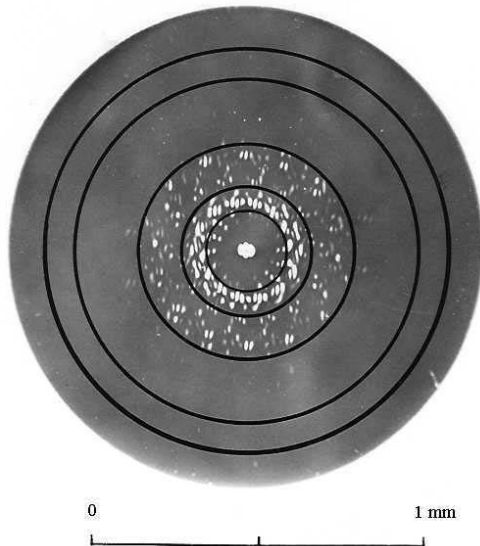
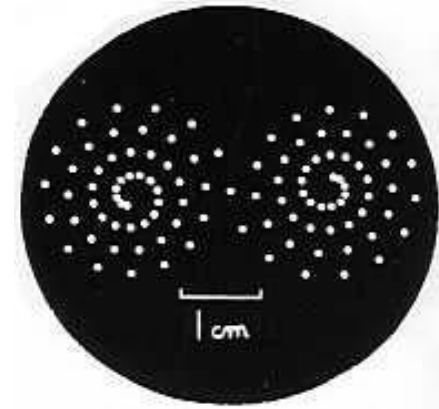
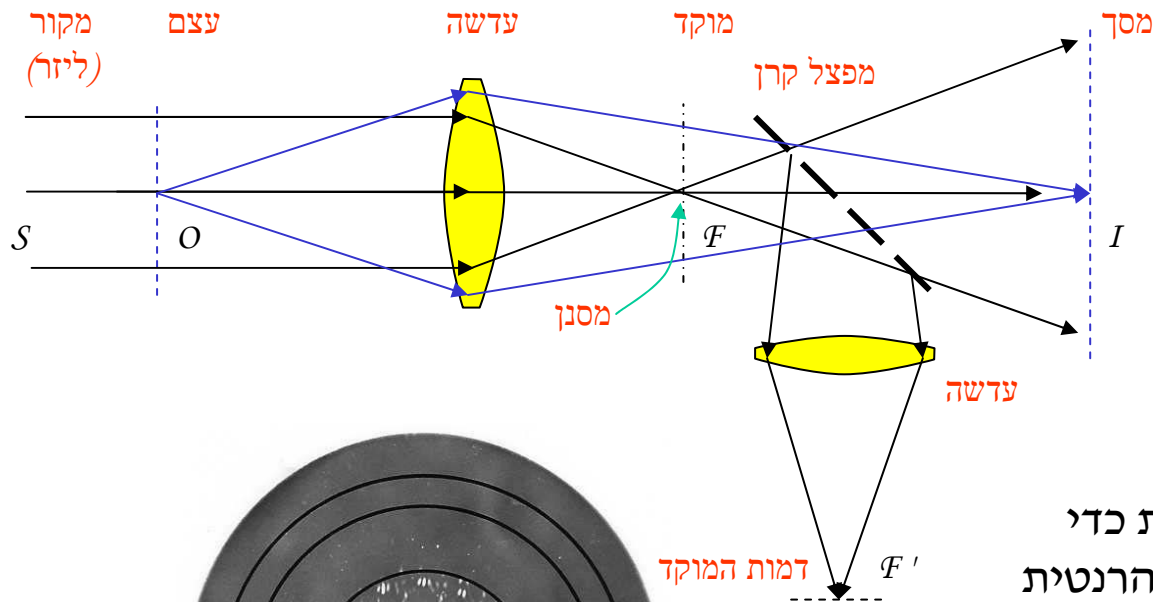
$$d_{\min} = \lambda / 2\mu \sin \alpha = \lambda/2 \text{ NA}$$

שיפור ההפרדה

- קיבלנו שהתנאי שיעבור הסדר הראשון בצד אחד יהיה
$$d_{\min} = \lambda / 2 \mu \sin \alpha = \lambda/2 \text{ NA}$$
- זו ההפרדה המירבית בעדשה נתונה, וכמגבלת ההפרדה הקיצונית ביותר.
- כדי להגיע להפרדה זו יש להאיר את העצם בצורה איזוטרופית בחרוט של אור שחצי זוויתו α כדי לקבל הפרדה גבוהה בכל הכיוונים.



דוגמה להפרדה

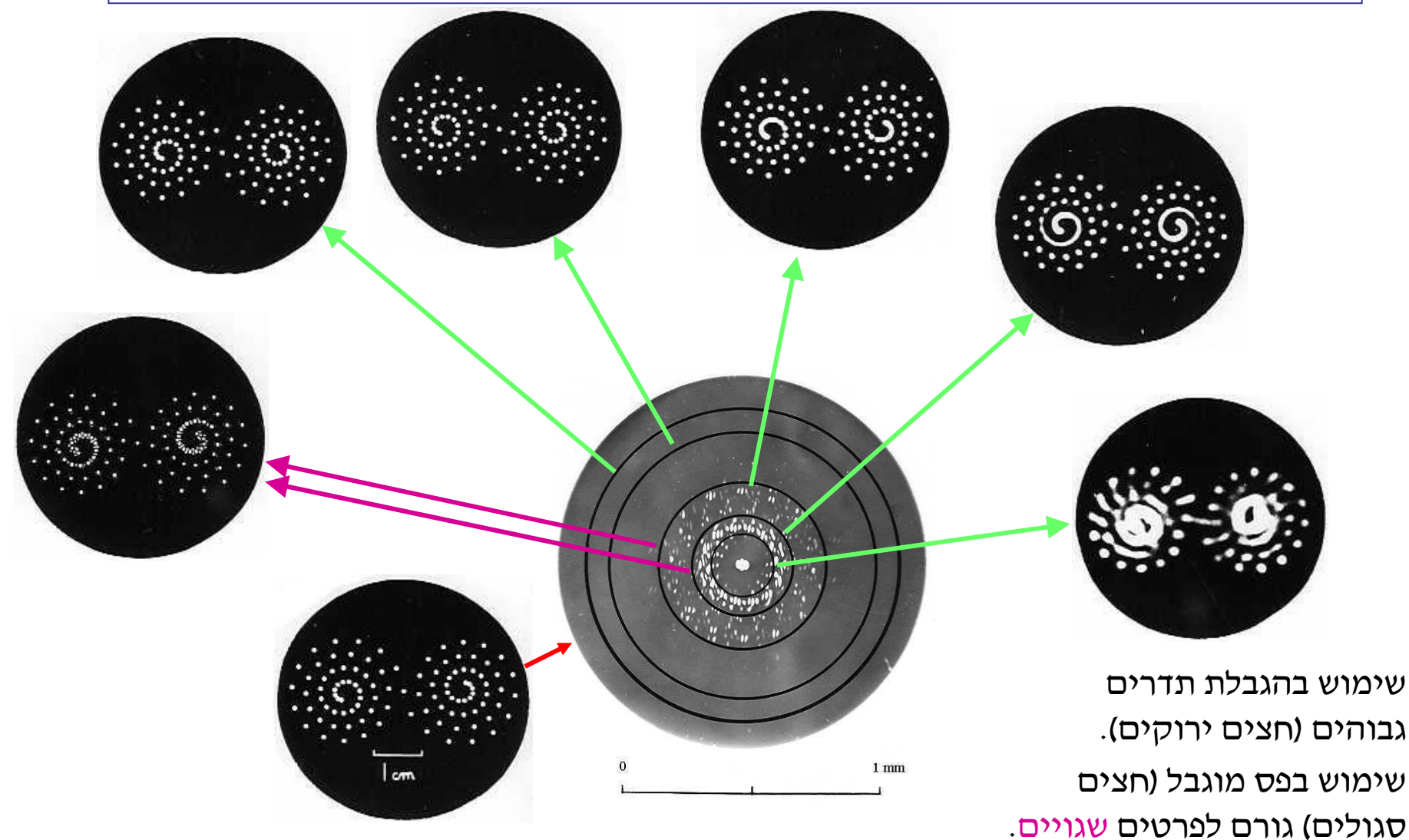


• הליזר כמקור הוחלף במנורת כספית כדי להראות את ההשפעה של תאורה קוהרנטית חלקית, החשובה ביותר במיקרוסקופיה מעשית.

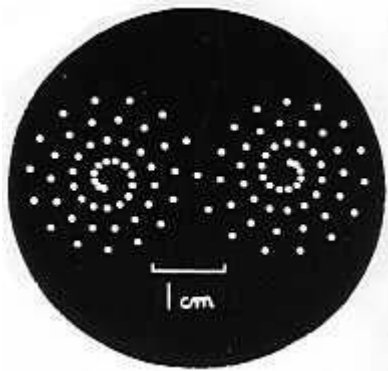
• משתמשים במערכת שבה יש שתי יציאות (לאחר סינון ודימות חוזר) : דמות המוקד ודמות העצם.

• העיגולים מסמנים מסננים שונים שנבחרו.

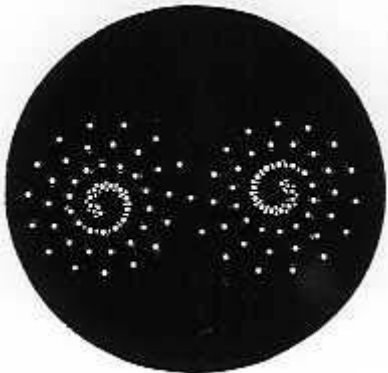
איבוד ההפרדה



ההפרדה כקונבולוציה



מקור

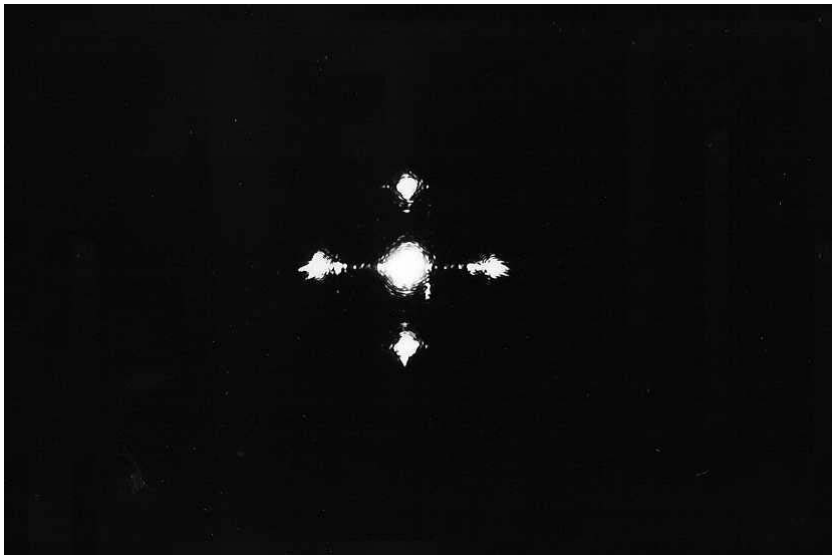


דמות עם פרטים שגויים

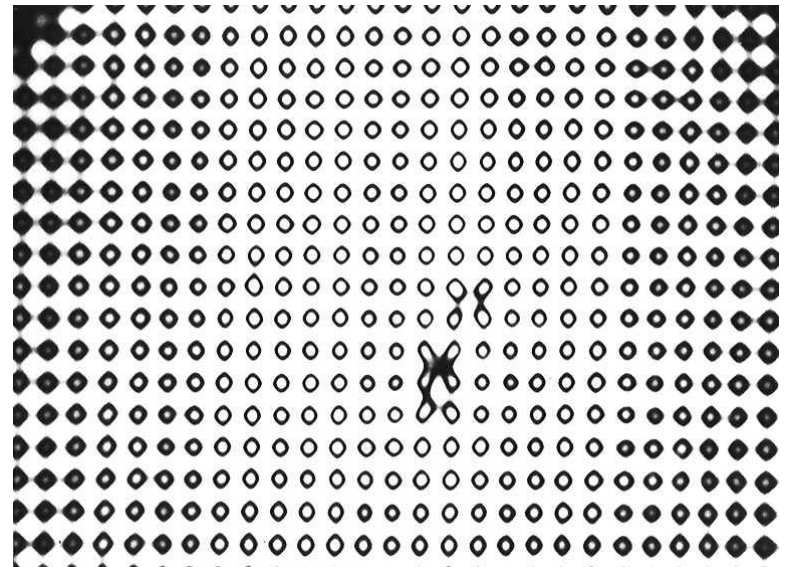
- ניתן לראות את גבול ההפרדה הנכפה באמצעות מפתח סופי גם כהדגמה של משפט הקונבולוציה.
- במערכת מוארת קוהרנטית, הגבלת ההתמרה האופטית על ידי מפתח סופי יוצרת פונקצית פריסת נקודה במישור הדמות.
- משרעת פונקצית פריסת הנקודה (ולא עוצמתה) עוברת קונבולוציה עם העצם בעת יצירת הדמות.
- התוצאה היא שוב טשטוש התמונה, אבל בגלל הקוהרנטיות כאן, חלקים סמוכים של התמונה יכולים להתאבד.
- התוצאה יותר מסובכת מהמקרה הלא-קוהרנטי, ויכולים להיווצר פרטים שגויים.
- במקרים רבים, הפרטים השגויים יכולים להיות בהפרדה גבוהה מגבול ההפרדה המותר.
- השימוש במכשיר אופטי קרוב לגבול ההפרדה שלו עלול ליצור אפקטים כאלו.
- בדמויות המתקבלות למשל במיקרוסקופ אלקטרוני יש להיזהר מפרטים שגויים.
- כאשר התפרסמה תורת אבה טענו הרבה אנשי מיקרוסקופיה שבגלל פרטים אלו התורה אינה נכונה.

פרטים שגויים

- נניח שמפתח מישור המוקד של המכשיר מגביל את ההתמרה לחמשת הסדרים הראשונים בלבד.
- עבור הדגם של גאזה מקבלים תוצאות לא נכונות בעליל.
- בולטת יצירת נקודות בהירות באמצע הצטלבויות קווי הגאזה.
- נקרב את הגאזה על ידי דגם חד-מימדי באמצעות גל ריבועי.
- אם מתמירים רק את הסדרים הראשונים, כולל סדר האפס, של הגל הריבועי, ניתן לקבל הערכה מדויקת של הנקודות הבהירות.



העברה של הסדרים הראשונים בלבד



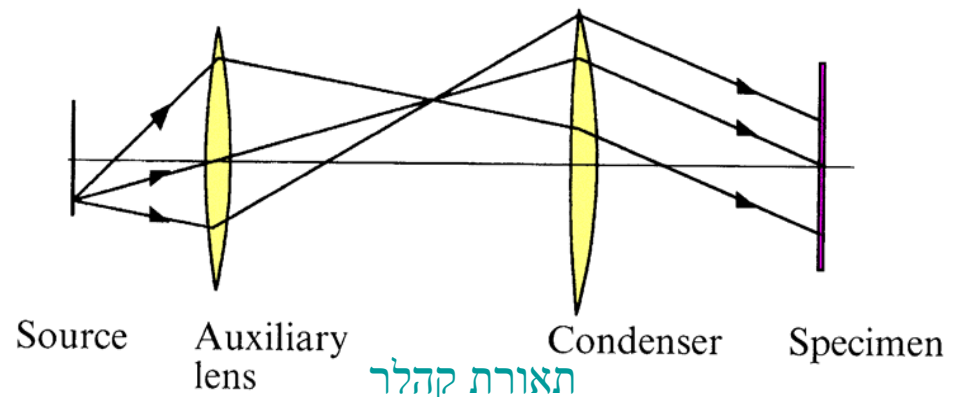
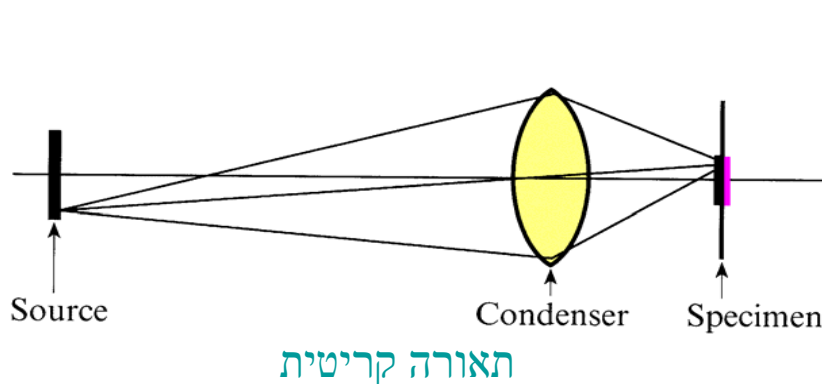
דמות עם פרטים שגויים

ריכוז האור

- אם נשתמש באופטיקה גיאומטרית בלבד, הקונדנסר (מֶרְכֵּז) במיקרוסקופ משמש בסך הכל להארת העצם בעוצמה רבה.
- לפי תורת הגלים יש חשיבות ל**קוהרנטיות** של האור הפוגע.
- לכן יש חשיבות גם לִמְרָכֵז, כמו לכל חלק אחר במערכת האופטית.
- במקרה האידיאלי, העצם יכול להיות מואר באור לא-קוהרנטי לחלוטין.
- תאורה כזאת נוכל לקבל למשל ממקור גדול חיצוני כמו למשל השמים או ממנורת להט גדולה.
- העוצמה של גופים אלו אינה מספקת, ונאלצים להשתמש בעדשה למקד את האור על העצם.
- הדמות אינה יכולה להיות מושלמת, וכל נקודה במקור יוצרת דמות סופית של העצם.
- לכן נקודות סמוכות בעצם מוארות על ידי אור קוהרנטי בחלקו.
- ככל שאיכות הִמְרָכֵז תהיה גרועה יותר, כך יוצרו יותר פרטים שגויים.

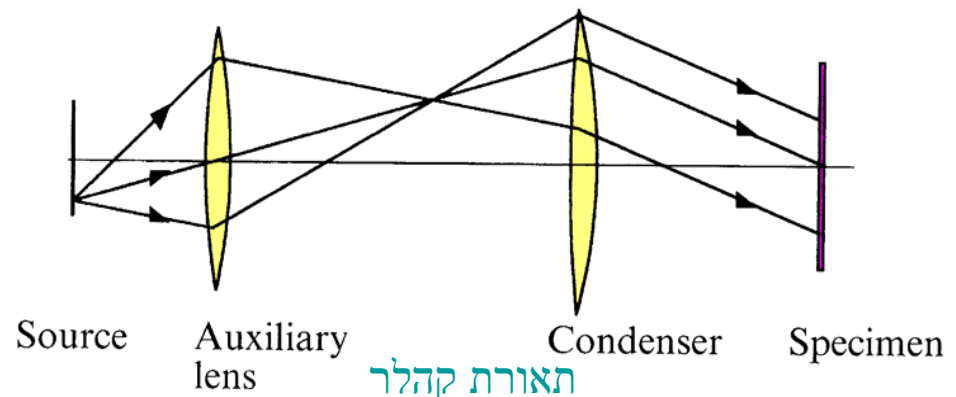
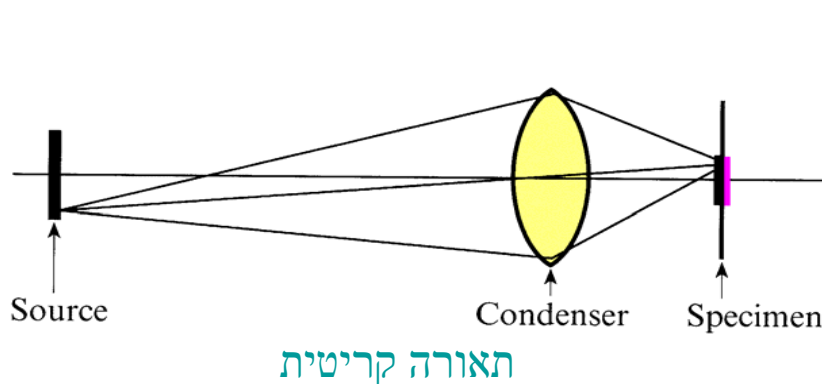
תצורות תאורה

- לרוב משתמשים באחת משתי תצורות תאורה.
- **התאורה הקריטית** נוצרת כדמות של המקור ישירות על העצם באמצעות מִרְכָּז.
- חסרונה של התאורה הקריטית שהיא מראה פגמים במקור המודמה ישירות על העצם.
- תצורה שאינה מוגבלת בגלל המקור היא **תאורת קהֶלר** (Köhler). כאן נעשה שימוש במקור גדול.
- למרות שכל נקודה במקור יוצרת דמות קוהרנטית, סך הכל של הדמויות מהמקור כמעט אינו קוהרנטי:
- סיכום כל הנקודות עם המופעים האקראיים שלהם יוצר תמונה כמעט לא-קוהרנטית.
- מיקום העצם נקבע כך שהמִרְכָּז מדמה עליו בקירוב את העדשה המשנית.
- רצוי שהעדשה המשנית תהיה מוארת בצורה אחידה.
- תאורה אחידה מובטחת אם העדשה המשנית איננה קרובה יותר מדי למקור, אפילו למקור לא אחיד.



קוהרנטיות בתצורות התאורה

- בשתי תצורות התאורה יוצרת המערכת תאורה בשדה שעומק הקוהרנציה המרחבית שלה הוא r_c .
- בתאורת קהלר במיוחד $r_c = 0.61 \lambda / NA_c$, כאשר NA_c הוא המיפתח המספרי של המִכְרֵז.
- בתצורת התאורה הקריטית כל נקודה עצמאית במקור יוצרת דמות במישור העצם שגודלה דיסקת אירי, שגם היא גורמת בקירוב לקוהרנטיות בשיעור r_c .
- עיוותים במִכְרֵז תמיד יעלו את הקוהרנטיות מעל r_c .
- אם NA_c גדול משל עצמית המיקרוסקופ, ואיכותו האופטית טובה, r_c יהיה קטן מגבול ההפרדה.
- במקרה זה, נקודות סמוכות נפרדות כמעט אינן קוהרנטיות הדדית.
- אי לכך, גבול ההפרדה נתון על ידי ריילי או ספרו, ונמנעים פרטים שגויים.
- הקטנת המפתח המספרי משפרת לרוב את ניגוד הדמות, אך יוצרת פרטים שגויים.



סינון מרחבי

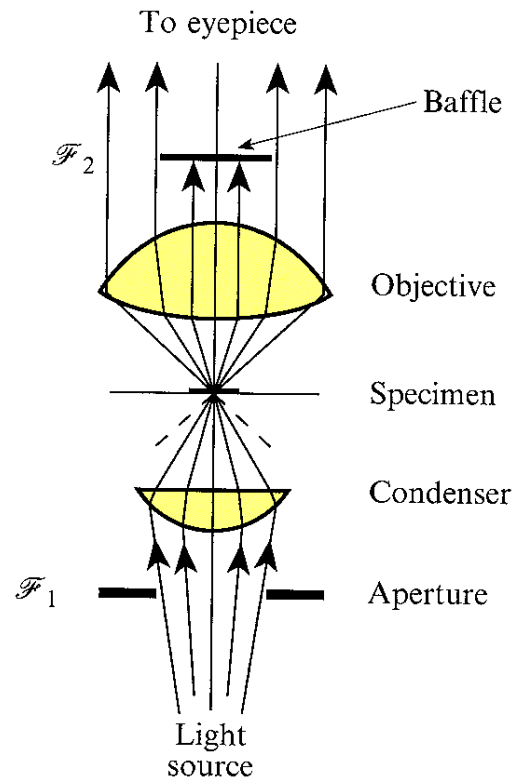
- ניתן להשתמש במכשירים אופטיים ללא הבנה.
- אנו מנסים לגלות את מגבלותיהם ואת התנאים שבהם שימושם אופטימלי.
- יש גם עניין רב במקרים בהם המכשירים ניתנים להרחבה למקרים שבהם אין דרך רגילה לפתרון.
- משתמשים בשיטות הקרויות **סינון מרחבי** וניתנות לביטוי באמצעות שימוש במסכות.
- מסכות אלו משנות את העוצמה ואת המופע של האור במישור המוקד האחורי של העדשה, שהוא המישור בו נמצאת התמרת פוריה של עצם מואר קוהרנטית.
- מסכות אלו למעשה משנות את התמרת פוריה או את ספקטרום התדרים המרחבי של העצם.
- ניתן לראות במסכות אלו מקבילה למסננים אלקטרוניים שבהם משנים את ספקטרום התדרים הזמני של אות חשמלי.
- כאשר נעשה שימוש באור לא-קוהרנטי, התמרת פוריה במישור המוקד האחורי של העדשה לא תקפה, אולם העקרונות להלן עדין ישימים.
- השיטות להשגת סינון מרחבי הן לרוב מקורבות.

דימות ברקע כהה

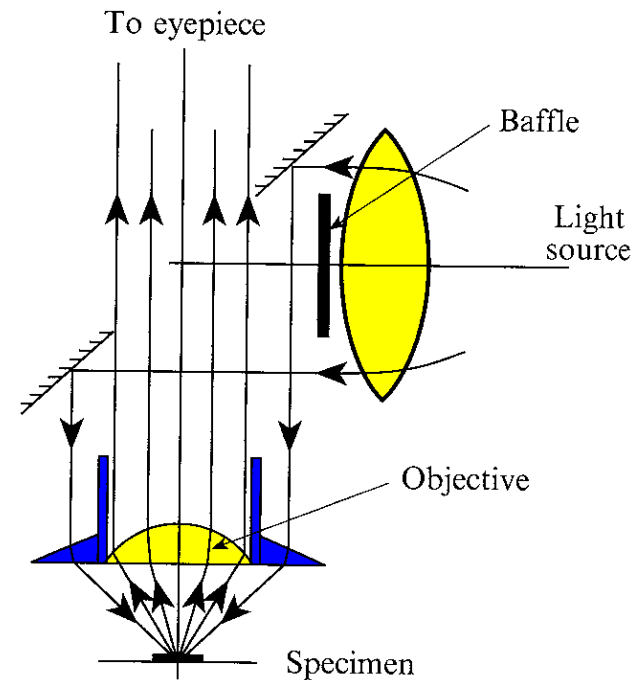
- נניח שברצוננו לדמות עצם קטן מאוד שאינו מאיר בעצמו.
- בשיטת התאורה הרגילה, אור מציף את העצם וחלק זעיר ממנו מתפזר לעצמית.
- במקרה זה כמעט כל האור שיגיע ישירות לעצמית יהיה חזק עד כדי סינוור והסתרת האור מהעצם.
- ניתן לכוון את התאורה הישירה שתגיע בזווית ועל כן לא תגיע לעינית.
- שימוש רב נעשה בשיטה זו לתצפית בתנועה בראונית.
- השיטה טובה למשל אם אנו רוצים רק לדעת את מקומו של העצם.
- השיטה שקולה ליצירת דמות על ידי חלק קטן ולא מרכזי של ההתמרה, תוך איבוד מידע על העצם.
- עבור דמות סבירה של העצם עלינו להשתמש בחלק גדול ככל האפשר של ההתמרה (בכל התדרים המרחביים האפשריים).
- הדימות ברקע כהה מושג על ידי הסתרת אור מוחזר או מועבר ישירות, תוך פגיעה מזערית בשאר.
- שיטה זו טובה גם לדימות עצם מופע שלו בליעה נמוכה.

מערכות דימות ברקע כהה

הדימות ברקע כהה מושג על ידי הסתרת אור מוחזר או מועבר ישירות, תוך פגיעה מזערית בשאר.



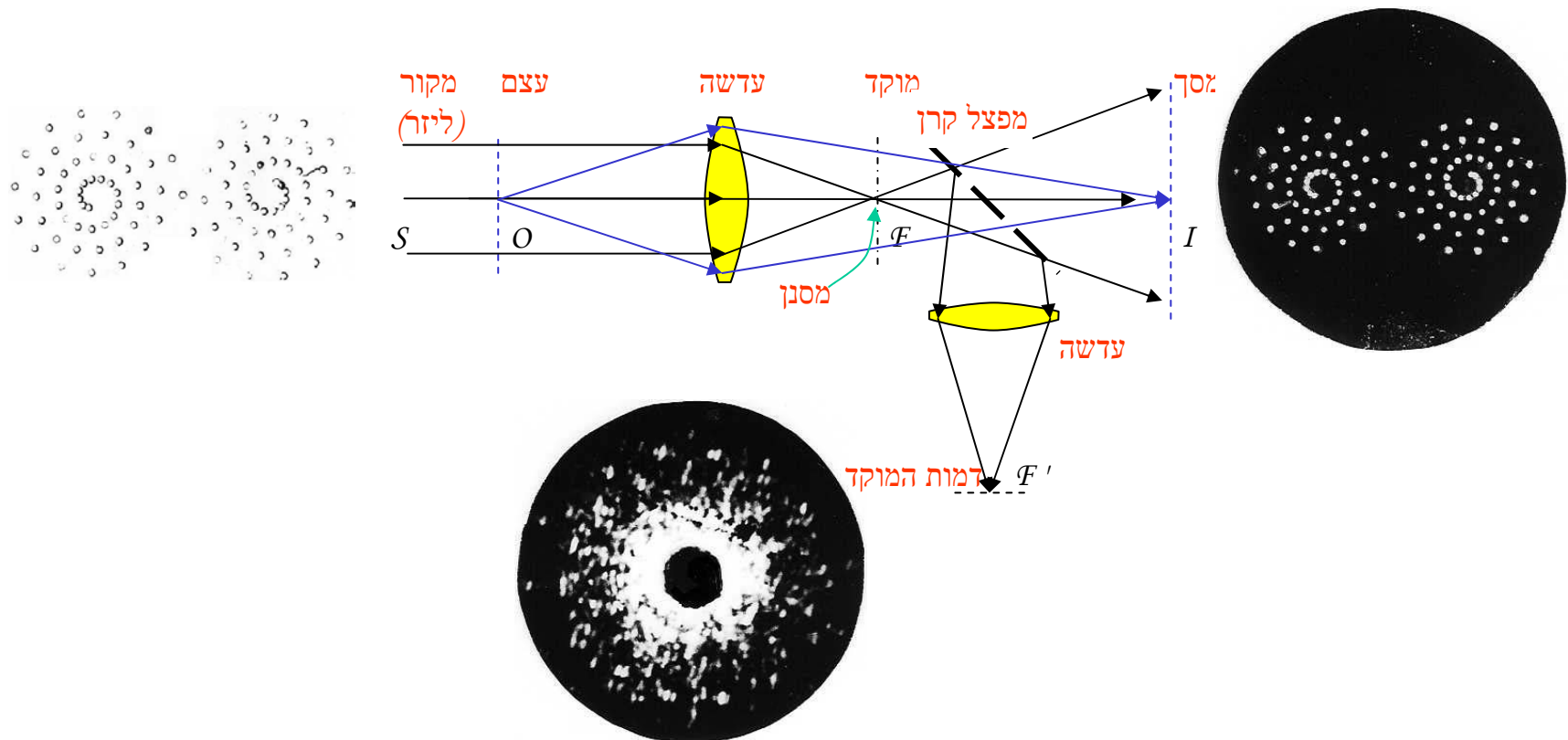
דימות בשדה כהה בהעברה: האור המגיע ישירות מהמקור מוסתר לאחר העצמית.



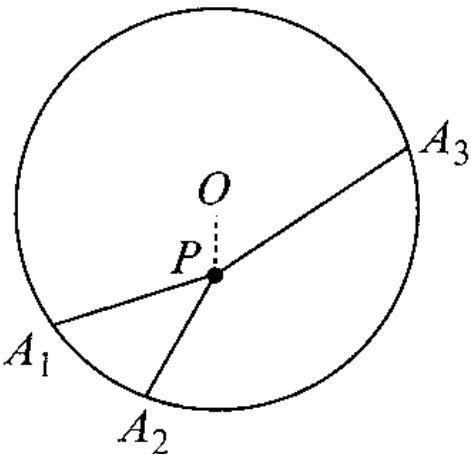
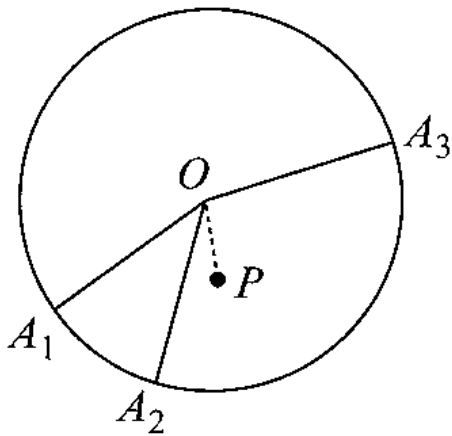
דימות בשדה כהה בהחזרה, כאשר המקור מאיר חרוט סביב העצם

מערכות דימות ברקע כהה

- את העיקרון של הדימות ברקע כהה ניתן להבין גם מתוך המערכת בציור.
- המקור הוא סרט שקוף מנוקב.
- על השיא המרכזי של ההתמרה נשים נקודה שחורה קטנה.
- נקבל את הנקודות בהירות על רקע כהה, בגלל איבוד נקודת האפס במרחב פוריה.



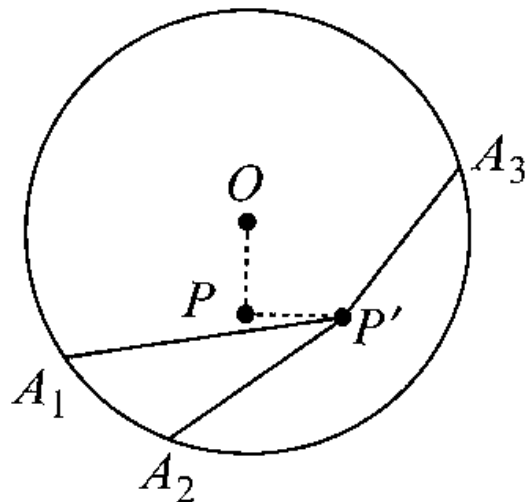
ניגוד מופע



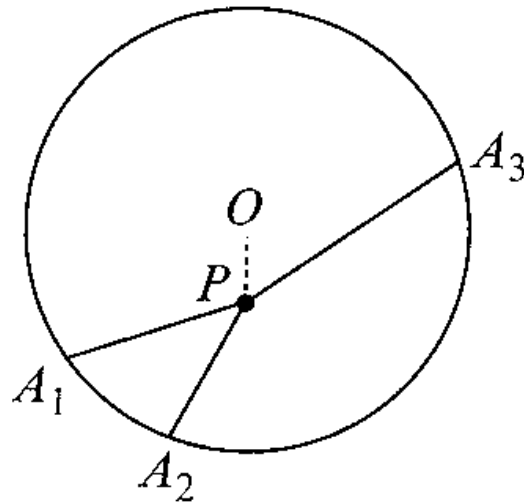
- **מיקרוסקופיה בניגוד מופע** היא שיטה נוספת ליצירת ניגוד מעצם מופע.
- כיון ששינוי מופע משמעותיים נראים לרוב בגלל העקיפה מהם, השיטה באה לידי ביטוי במקרים שבהם המופע דווקא קטן.
- ניתן להבין את השיטה בהסתמך על דימות בשדה כהה. נניח שאנו מיצגים את משרעת האור המועבר על ידי העצם כווקטור במישור מרוכב.
- הווקטורים המייצגים את המשרעת המרוכבת בנקודות שונות שווים באורכם, אך בעלי מופע שונה. בציור OA_1, OA_2, OA_3 הם וקטורים אופייניים.
- בדימות מושלם נקודות הדמות המתאימות הן בעלות אותה משרעת מרוכבת (פרט לגורם קבוע הניתן להזנחה) ועל כן עוצמתן שווה ואין ביניהן ניגוד.
- נניח שכל וקטור OA הוא סכום של קבוע OP והשארית PA , כאשר הסכום הווקטורי של כל ה- PA הוא אפס.
- כיון שהווקטורים OA הם בכיוונים שונים, כל ה- PA הם בעלי אורכים שונים.
- לפי ההגדרה, לוקטור OP משרעת קבועה ומופע קבוע בכל הנקודות, ולכן מתאים להתמרת פוריה של פונקצית δ במרכז מישור פוריה.
- זהו סדר האפס של העקיפה.
- בשיטת הרקע הכהה, מסתירים את סדר האפס, ולכן מחסרים את הווקטור OP מכל הווקטורים OA .

שיטות הרקע הכהה וזרניקה

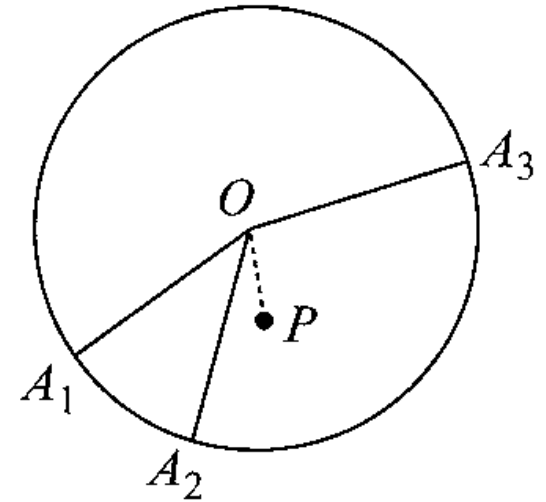
- OA_1, OA_2, OA_3 הם וקטורים אופייניים בעלי אותה משרעת ומופעים שונים.
- כל וקטור OA הוא סכום של קבוע OP והשארית PA , כאשר הסכום הוקטורי של כל ה- PA הוא אפס.
- לשארית הוקטורים PA אורכים שונים ועל כן מושג ניגוד העוצמה.
- בשיטת **הרקע הכהה**, מסתירים את סדר האפס, ולכן מחסרים את הוקטור OP מכל הוקטורים OA .
- בשיטת **זרניקה** (Zernike) משנים את מופע הוקטור OP בשיעור $\pi / 2$.
- שינוי המופע גורם להחלפתו בוקטור PP' . וקטורי נקודת הדמות $P'A$ הם שוב בעלי אורכים שונים.
- יתרון שיטה זו הוא שנעשה שימוש בכל האור המועבר על ידי העצם.
- ברור שהערך המדויק של המופע אינו חשוב ביותר, כך שניתן להשתמש באור לבן.



שיטת זרניקה



שיטת הרקע הכהה



וקטורים שווי-משרעת

שיטות ניגוד מופע

- שיטת ניגוד המופע ניתנת לתאור אנליטי, כאשר שינויי המופע $\varphi(x) \ll 1$.
- פונקצית ההעברה המרוכבת היא

$$f(x) = Ae^{i\varphi(x)} \approx A + iA\varphi(x)$$

- כאן העוצמה היא

$$|f(x)|^2 = A^2$$

- שינוי המופע של סדר האפס (האיבר שאינו תלוי ב- x) בשיעור $\pi/2$ נותן את הפונקציה

$$f_1(x) = iA + iA\varphi(x) \approx iAe^{\varphi(x)}$$

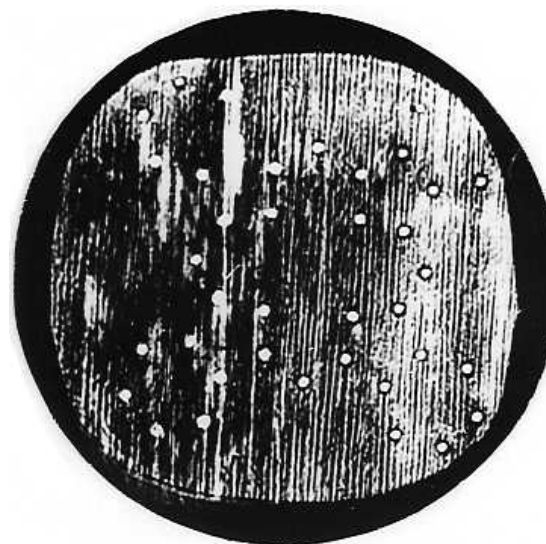
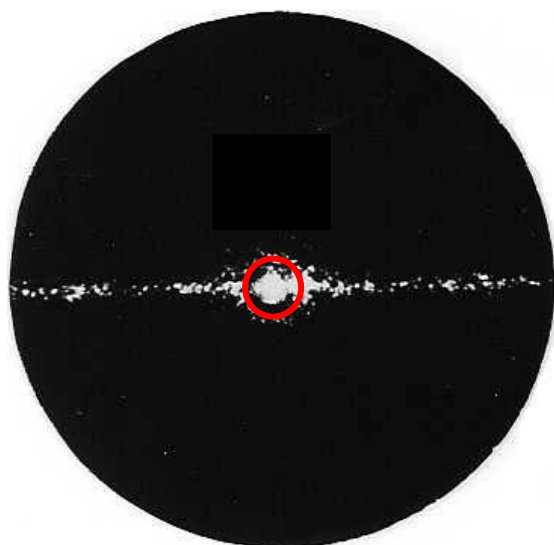
- ומכאן שהעוצמה היא

$$|f_1(x)|^2 = A^2 e^{2\varphi(x)} \approx A^2 [1 + 2\varphi(x)]$$

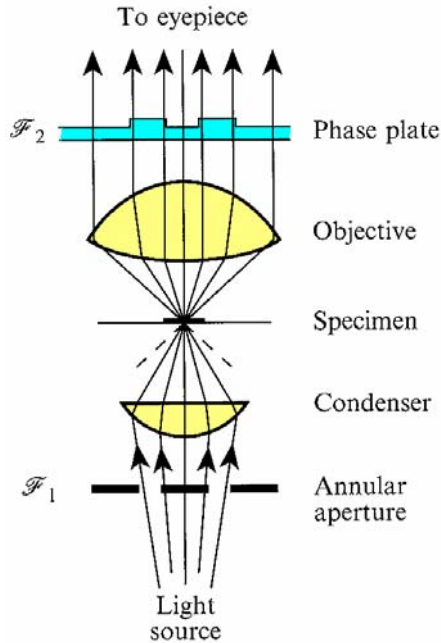
- זהו שינוי ממשי של העוצמה, התלוי קווית במופע.

דימות בניגוד מופע

- עקיפת פראונהופר של מסכת מופע הכוללת חורים בקוף.
- מסנן מרחבי, המורכב מלוח שקוף עם חור קטן מונח על סדר האפס.
- שים לב לאי הסדירות בעובי המסכה המופיע יחד עם החורים.



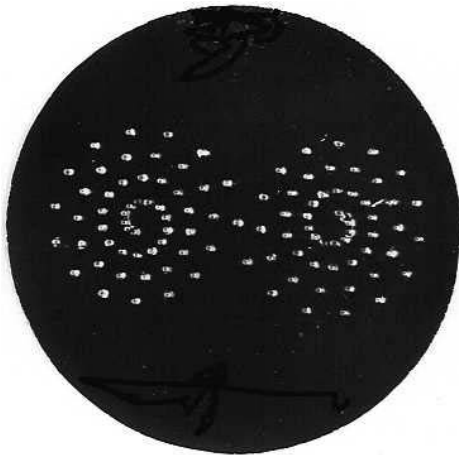
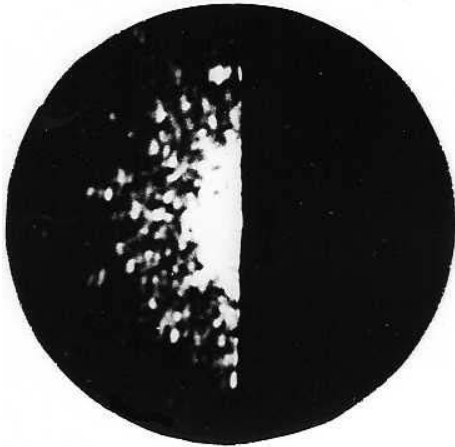
תאורה לא קוהרנטית



מערכת אופטית במיקרוסקופ
ניגוד מופע. מסכת המופע נמצאת
באותו מקום שבו נמצאת דמות
הטבעת הנוצרת בעדשות העצמית
והמרכז. נעשה שימוש בתאורת
קהלר.

- השימוש בתאורה לא-קוהרנטית אינו פשוט, כי אין התמרה מדויקת שסדר האפס שלה ניתן לזיהוי.
- הקרן המאירה מוגבלת במפתח טבעתי במישור המוקד מתחת למרכז, ודמות אמיתית של מפתח זה נוצר במישור המוקד האחורי של העצמית.
- לוח המופע הוא טבעת דקה שקופה מנודפת שעוביה ושמידותיה מתאימות לדמות המפתח הטבעתי.
- כל האור שלא הוטה בדרכו חייב לעבור דרך לוח זה.
- הדמות הסופית נוצרת על ידי התאבכות בין האור הלא מוסח ובין האור המוסח העובר לידו.
- התנאים הטובים ביותר מתקבלים רק בקירוב, כיון שחלק מהאור המוסח יעבור גם הוא דרך הלוח, מה שיוצר הילות אופיניות סביב צעדי המופע.
- לוח המופע מיוצר על ידי נידוף בריק של חומר דיאלקטרי כגון קריליט, Na_3AlF_6 , על לוח זכוכית תומך.
- כאשר העצם יוצר רק הבדלי מופע קטנים, סדר האפס של העקיפה שלו הוא חזק במיוחד ואז שינויי מופע יוצרים הבדלים גדולים מדי בדמות.
- לכן מייצרים את לוח המופע כך שיעביר רק 10% - 20% מן האור.
- הלוח נראה כטבעת קטנה כהה על רקע שקוף, והוא בבירור פשרה בין דימות ברקע כהה ובין דימות בניגוד מופע.

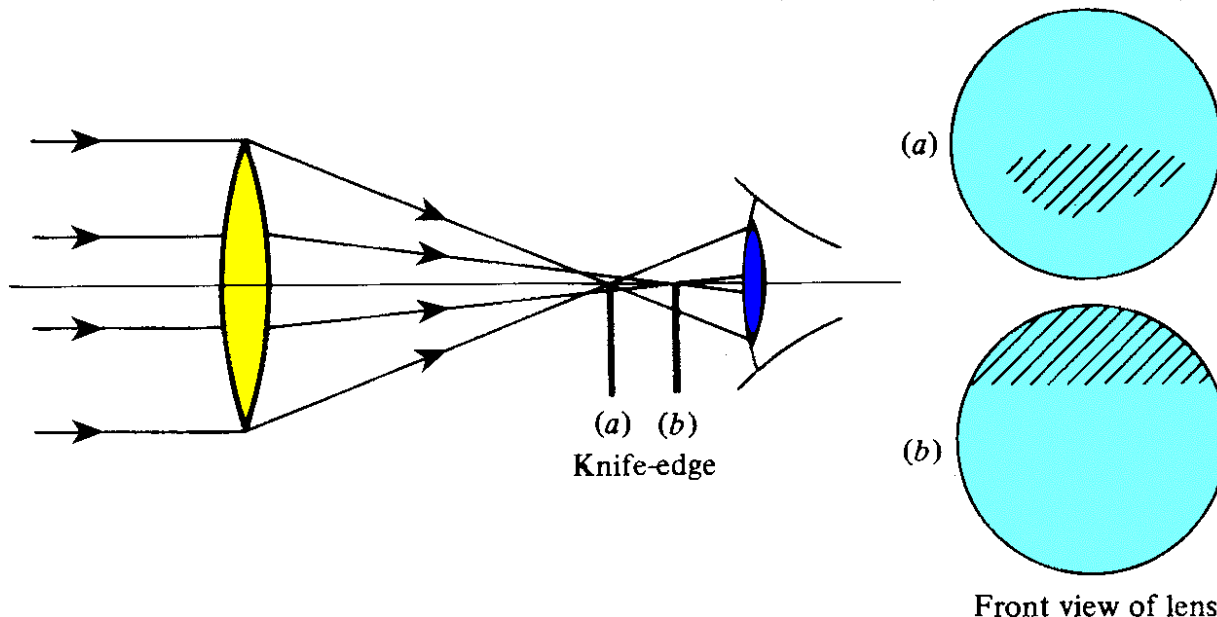
שיטת שלירן



- שיטה חלופית ליצירת ניגוד מעצם מופע הוא לחתוך את השיא המרכזי באמצעות קצה חד של סכין, ועל ידי כך לחתוך חצי ההתמרה.
- למעשה העצם הנחקר מונח בקרן מקבילה קוהרנטית הממוקדת על ידי עדשה מתוקנת למניעת אברציה כדורית.
- מעבירים להב סכין במישור המוקד של העדשה עד שהוא בדיוק חופף את המוקד, ומקבלים דמות ברורה של העצם.
- דמות זו מראה רק חלק מרכיבי העצם, שקשה לנתח אותם במדויק.
- זוהי שיטת שלירן (schlieren, חיתוך בגרמנית) ויש שני יישומים חשובים.

מבחן פוקו

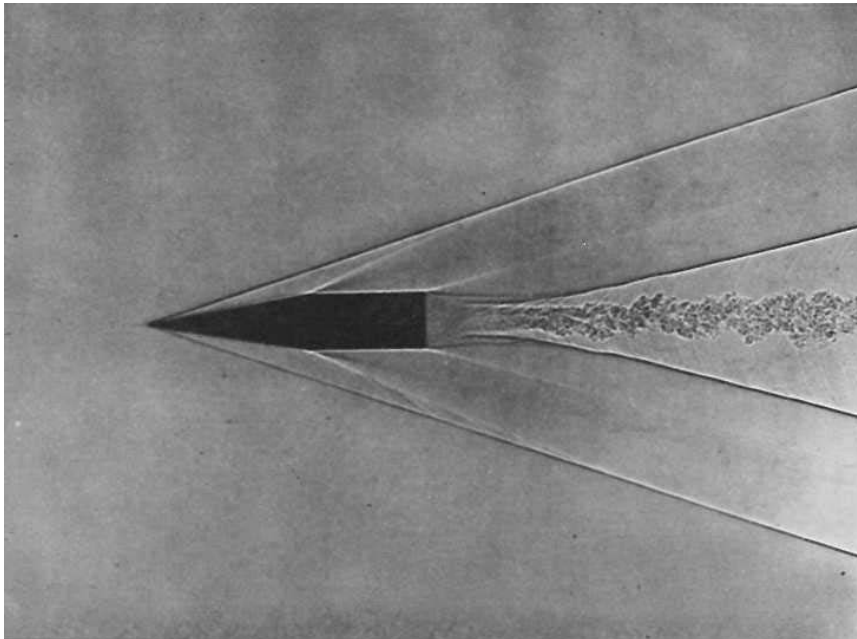
- השימוש הראשון בשיטת שלירן היא כמבחן קובע של איכות עדשות.
- אם עדשה סובלת מעיוותים היא לא תייצר מוקד מושלם.
- במקרה ואין מוקד מושלם, להב הסכין לא יוכל להמצא במקום שבו תחתך מחצית ההתמרה.
- אם מביטים בעדשה עצמה כאשר להב הסכין חולף במישור המוקד, עוצמת הקרינה הנראית על דמות העדשה משתנה.
- אנו יכולים לזהות אלו שינויים נדרשים לשיפור העדשה ובאיזה אזורים שלה.
- זהו מבחן להב הסכין של פוקו (Foucault knife-edge test).
- מבחן פוקו משמש גם לזיהוי מדויק מאוד של מיקום המוקד.



דמות של עדשה עם עיוות כדורי במבחן פוקו (a) כאשר להב הסכין במישור המוקד השולי ו-(b) כאשר הוא במישור המוקד הצירי. במקרה זה רק אור מהחלק התחתון של העדשה מגיע לעין, ועל כן חלק זה נראה בהיר.

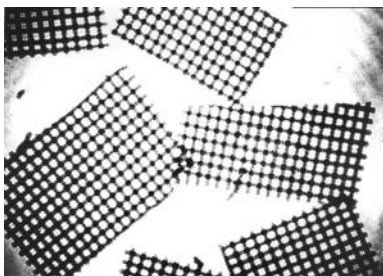
מדידת נוזלים

- שימוש נוסף בשיטת שלירן חשוב בדינמיקה של נוזלים.
- במנהרת רוח צפיפות האויר היא קבועה, ולכן גם מקדם השבירה קבוע.
- לכן זהו עצם שבו אין שינוי משרעת ומופע.
- גלים והפרעות אחרות במנהרת האויר ישנו את מקדם השבירה המקומי וייצרו עצם מופע.
- באמצעות שיטת שלירן ניתן לבחון שינויים אלו בעין כעוצמה בדמות הסופית.
- הבדל חשוב בין שיטת ניגוד המופע ובין שלירן הוא שהאחרון פועל בציר אחד בלבד.
- שיטות שלירן לרוב מכוונות להנחית אבל לא להסיר לחלוטין את סדר האפס, מה שמעלה בצורה משמעותית את הרגישות.



תמונת שלירן של עצם
בצורת קליע במאך 3.62

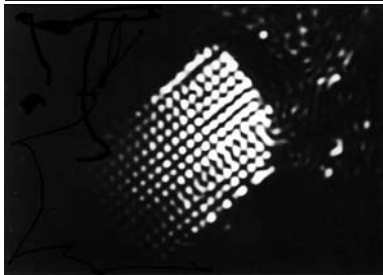
ניגוד עקיפה



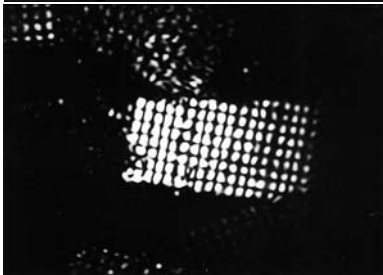
סריג



תמונת עקיפה



בחירת סדר
עקיפה



בחירת סדר
עקיפה אחר

- משתמשים בשיטות סינון מרחבי במיקרוסקופ האלקטרוני באותה מידה כמו במיקרוסקופ האופטי.
- במיקרוסקופ האלקטרוני המפתח המספרי קטן מאוד בגלל שאין אפשרות לקבל עדשות אלקטרוניים מתוקנות לחלוטין.
- כאשר מתבוננים בחומר גבישי במיקרוסקופ אלקטרוני ניתן להשתמש רק בחלק קטן מאוד של מישור פוריה העלול לכלול רק סדר עקיפה אחד וסביבתו המיידית.
- כפי שראינו, סדר זה מספיק ליצור דמות במימד גדול מתא היחידה.
- השיטה קרויה **ניגוד עקיפה** או **דימות בשדה כהה**, ונזקקת למסנן מרחבי המכיל מפתח הבורר סביבת סדר בודד אחד שונה מ-0.
- אם למשל אנו בוחנים דגם רב-גבישי ומדמים אותו דרך מפתח לא ממורכז, רק אותם גבישונים שלהם נקודות עקיפה הנמצאות בתוך המפתח יופיעו בדמות, והשאר יעלמו.
- בהדמיה אופטית בוחרים סדרים מסוימים כדי לקבל רק גבישונים מסוימים.
- דמות המתקבלת בדרך זו קרויה דמות הסריג.
- יש סכנה של קבלת מבנים לא נכונים אם המפתח נמצא מול הסדרים הלא-מתאימים.