به نام خدا

المپیاد فیزیک رزونانس
مهر ۱۴۰۵
سهراب ملکی

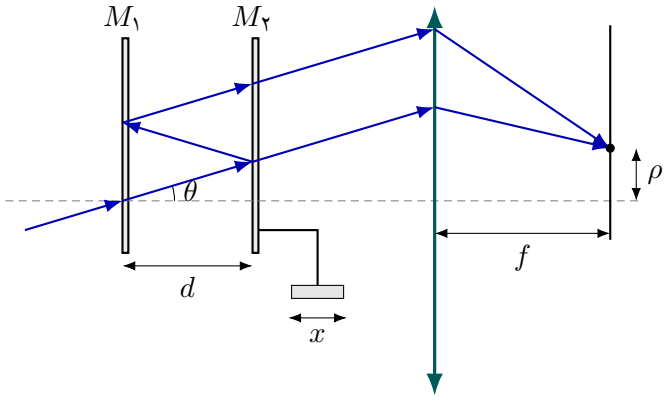
تداخل‌سنج فابری–پرو

توجه: برای دسترسی به صورت سوال و مطالب دیگر یا اطلاع‌دادن ایرادهای احتمالی، به کانال گروه رزونانس به آدرس Resonance_edu@ یا این پیوند مراجعه کنید.

صورت سوال

دو آینهٔ تخت، موازی و یکسان $M_۱$ و $M_۲$، با فاصلهٔ d از یکدیگر قرار دارند. هر آینه کسر R از شدت نور فرودی را بازمی‌تاباند و کسر $۱ - R$ را عبور می‌دهد؛ جذب ناچیز است و $۰ < R < ۱$. فضای میان آینه‌ها هواست که ضریب شکست آن را برابر یک می‌گیریم. هر پرتوی فرودی، پس از بازتاب‌های پیاپی، مجموعه‌ای از پرتوهای عبوری موازی ایجاد می‌کند.

نورِ یک منبع گسترده زاویه‌های کوچک مختلفی نسبت به محور عمود بر آینه‌ها دارد. یک عدسی همگرا با فاصلهٔ کانونی f، پرتوهای عبوری با زاویهٔ یکسان θ را در یک نقطه از صفحهٔ کانونی جمع می‌کند؛ نشان دهید که فاصلهٔ این نقطه تا مرکز تصویر $\rho = f \tan\theta$ است.



شکل ۱. مسیر دو پرتوی عبوری؛ بازتاب‌های بعدی رسم نشده‌اند. x قرائت ریزسنجِ متصل به آینهٔ متحرک است. شکل مقیاس واقعی ندارد.

الف) اختلاف فاز (۳ نمره)

زاویهٔ پرتو در فضای میان آینه‌ها θ است. مجموع تغییر فاز ناشی از دو بازتاب داخلی در هر رفت‌وبرگشت را صفر بگیرید؛ فاز مشترک عبورها اهمیتی ندارد. **۱.** با مقایسهٔ دو پرتوی عبوری متوالی روی یک جبهه‌موج مشترک، اختلاف فاز δ را بیابید. **۲.** چرا قرار دادن طول مسیر رفت‌وبرگشت $۲d/\cos\theta$ به جای اختلاف راه، درست نیست؟ شرط هم‌فازشدن همهٔ پرتوهای عبوری را بنویسید.

ب) شدت و نوارهای روشن و کم‌نور (۳ نمره)

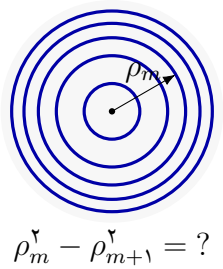
دامنهٔ موج فرودی را A_{in} و شدت آن را I_{in} بنامید. دامنهٔ نخستین پرتوی عبوری برابر $(۱-R)A_{\text{in}}$ است. **۱.** دامنهٔ پرتوی عبوری بعدی چند برابر دامنهٔ پرتوی قبلی است؟ با جمع موج‌ها، نسبت شدت عبوری I به I_{in} را بر حسب R و δ به دست آورید. **۲.** شرط بیشینه و کمینهٔ شدت را بنویسید و $I_{\max}/I_{\text{in}}$ و $I_{\min}/I_{\text{in}}$ را بیابید. آیا نوارهای کم‌نور کاملاً خاموش‌اند؟

راهنمایی: اگر به جمع‌های مثلثاتی نیاز داشتید، برای $|q|<۱$ می‌توانید از روابط زیر استفاده کنید. ضرایب دو مؤلفهٔ با اختلاف فاز $\pi/۲$ را جداگانه جمع کنید و مجموع مربع آن‌ها را بگیرید:

$$\sum_{j=۰}^{\infty} q^j\cos(j\delta)=\frac{۱-q\cos\delta}{۱-۲q\cos\delta+q^۲},\qquad \sum_{j=۰}^{\infty} q^j\sin(j\delta)=\frac{q\sin\delta}{۱-۲q\cos\delta+q^۲}.$$

پ) حلقه‌های تداخلی (۲ نمره)

۱. توضیح دهید چرا نوارهای روشن، دایره‌های هم‌مرکزند. اگر m عدد صحیح مرتبهٔ یک حلقهٔ روشن باشد، شعاع آن را در تقریب $\theta \ll ۱$ بر حسب m, d, f, λ پیدا کنید. فقط مرتبه‌هایی را در نظر بگیرید که شعاع حقیقی و زاویهٔ کوچک دارند. **۲.** اختلافِ مربع شعاع دو حلقهٔ روشن متوالی را بیابید. با افزایش d، حلقه‌ای با مرتبهٔ ثابت به سمت مرکز می‌رود یا از مرکز دور می‌شود؟



شکل ۲. طرح تک‌فام در صفحهٔ کانونی؛ پهنای حلقه‌ها صرفاً شماتیک است.

قرارداد اندازه‌گیری در ادامهٔ سوال: فاصلهٔ آینه‌ها به کمک یک سازوکار کاهنده تغییر می‌کند. رابطهٔ قرائت ریزسنج x و فاصلهٔ آینه‌ها در بازهٔ آزمایش خطی است:

$$d=d_۰+\alpha(x-x_۰),\qquad \alpha>۰.$$

مقدار α نامعلوم است. همهٔ قرائت‌ها در یک جهتِ چرخش پیچ ثبت می‌شوند. شمارش نوارها در مرکز تصویر، یعنی $\theta=۰$، انجام می‌شود. «عبور N نوار» یعنی تغییر از یک بیشینهٔ مرکزی تا بیشینهٔ مرکزیِ N چرخه بعد؛ بیشینهٔ آغازین شمارهٔ صفر دارد. بنابراین، روشن‌شدن و کم‌نورشدن را دو نوار جداگانه نمی‌شماریم.

ت) مدرج‌کردن ریزسنج با جیوه (۳ نمره)

با یک پالایهٔ سبز، تنها خط سبز جیوه با طول موج معلوم $\lambda_{\mathrm{Hg}} = ۵۴۶٫۰\,\mathrm{nm}$ به دستگاه می‌رسد. سه اندازه‌گیری زیر از یک قرائت آغازین مشترک انجام شده‌اند. داده‌های این سوال آموزشی‌اند؛ پراکندگی آماری و خطای قرائت را در محاسبات عددی نادیده بگیرید.

تعداد نوار N_{Hg}	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰
تغییر قرائت $\Delta x_{\mathrm{Hg}}\ (\mathrm{mm})$	۰٫۵۴۶۰	۱٫۰۹۲۰	۱٫۶۳۸۰

۱. رابطهٔ N_{Hg}، Δd و λ_{Hg} را استخراج کنید و از آن فرمولی برای α به دست آورید. **۲.** α را محاسبه کنید. افزایش $۱٫۰۰\,\mathrm{mm}$ در قرائت ریزسنج، فاصلهٔ آینه‌ها را چقدر تغییر می‌دهد؟ **۳.** آیا از این داده‌ها می‌توان خودِ فاصلهٔ اولیهٔ آینه‌ها $d_۰$ را نیز تعیین کرد؟ دلیل بیاورید.

ث) اندازه‌گیری طول موج زرد سدیم (۲ نمره)

لامپ جیوه را با لامپ سدیم عوض می‌کنیم. نور زرد سدیم در واقع شامل دو خط نزدیک به هم با طول موج‌های $\lambda_۱ < \lambda_۲$ است. **فقط در این قسمت** یک گزینشگر طیفیِ ایده‌آل، خط کوتاه‌تر را عبور می‌دهد؛ دانستن طرز کار آن لازم نیست و مقدار طول موج را از پیش نمی‌دانیم. با همان سازوکار مکانیکی، برای شمارش $N_{\mathrm{Na}} = ۱۰۰$ نوار، قرائت ریزسنج به اندازهٔ $\Delta x_{\mathrm{Na}} = ۰٫۵۸۹۰\,\mathrm{mm}$ افزایش می‌یابد.

۱. $\lambda_۱$ را با استفاده از α به دست آورید. **۲.** رابطه‌ای برای $\lambda_۱/\lambda_{\mathrm{Hg}}$ بنویسید که مستقیماً بر حسب شمارش نوارها و تغییر قرائت‌های دو آزمایش باشد.

برای بخش بعد: اکنون گزینشگر را برمی‌داریم و هر دو خط زرد وارد دستگاه می‌شوند. دو خط، نسبت به هم ناهمدوس‌اند؛ یعنی شدت‌های ثبت‌شدهٔ آن‌ها جمع می‌شوند و جملهٔ تداخلِ پایدار بین خودِ دو خط نداریم. هر خط به‌تنهایی خانواده‌ای از حلقه‌ها می‌سازد.

بررسی را به ناحیه‌ای کوچک نزدیک مرکز تصویر محدود کنید که در آن $\cos\theta \simeq ۱$ و اختلافِ مرتبهٔ دو خانواده تقریباً در تمام ناحیه یکسان باشد. **همسازی** یعنی قله‌های دو خانواده تقریباً بر هم بیفتند. در **ناهمسازی**، قله‌های هر خانواده تقریباً وسطِ فاصلهٔ دو قلهٔ متوالی خانوادهٔ دیگر قرار می‌گیرند. این تعریف دربارهٔ جای حلقه‌هاست، نه لزوماً محوشدن طرح.

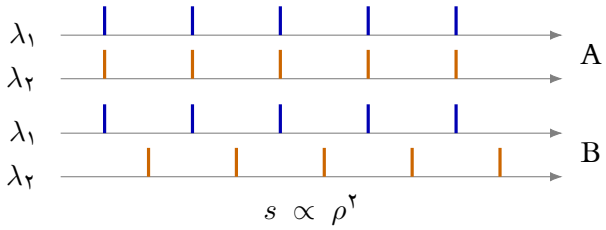
ج) دو طول موج نزدیک و چرخهٔ همسازی (۴ نمره)

برای هر خط، «مرتبهٔ پیوسته» را $u_i = ۲d/\lambda_i$ تعریف کنید؛ لازم نیست u_i عدد صحیح باشد. اختلاف مرتبه را $\eta = u_۱ - u_۲ > ۰$ بنامید.

۱. نشان دهید همسازی و ناهمسازی، به‌ترتیب به چه مقادیری از η مربوط‌اند. چرا هنگام تغییر d، دو خانواده با آهنگ یکسان حرکت نمی‌کنند؟

۲. اگر افزایش فاصلهٔ آینه‌ها بین دو ناهمسازیِ متوالی D باشد، رابطه‌ای دقیق در مدل نزدیک‌محور، بین $D, \lambda_۱, \lambda_۲$ به دست آورید. سپس با فرض $\Delta\lambda = \lambda_۲ - \lambda_۱ \ll \lambda_۱$، یک فرمول تقریبی برای $\Delta\lambda$ بنویسید.

۳. فاصلهٔ یک ناهمسازی تا *نخستین همسازی پس از آن*، چه نسبتی با D دارد؟ آیا در ناهمسازی باید انتظار داشت تمام تصویر یکنواخت و حلقه‌ها ناپدید شوند؟ پاسخ را با ماهیت تداخل چندپرتویی و جمع شدت‌ها توضیح دهید.



شکل ۳. نمایش شماتیک جای قله‌ها در ناحیهٔ نزدیک محور: A همسازی و B ناهمسازی. دو رنگ فقط برای تمایز خانواده‌ها هستند.

چ) استخراج جدایی دو خط از داده‌ها (۳ نمره)

سه ناهمسازیِ متوالی و همسازیِ میان دو مورد نخست در قرائت‌های زیر ثبت شده‌اند:

وضعیت	ناهمسازی اول	همسازی بعدی	ناهمسازی دوم	ناهمسازی سوم
x (mm)	۰٫۸۰۰	۳٫۶۹۴	۶٫۵۸۸	۱۲٫۳۷۶

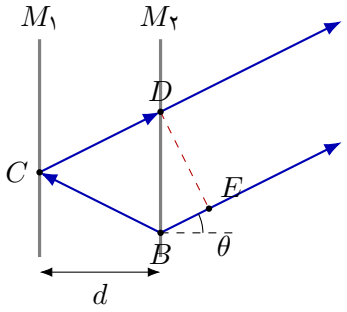
۱. با استفاده از ناهمسازی اول و سوم، D و سپس $\Delta\lambda$ را به دست آورید. چون $\lambda_۱$ معلوم است، یک بار نیز بدون تقریب $\lambda_۱\lambda_۲ \simeq \lambda_۱^۲$، مقدار $\lambda_۲$ را محاسبه کنید. **۲.** با استفاده از همسازیِ ثبت‌شده، سازگاری داده‌ها را بررسی کنید. اگر فاصلهٔ ناهمسازی تا همسازی را به‌اشتباه فاصلهٔ دو ناهمسازی بگیریم، جدایی محاسبه‌شده تقریباً چند برابر می‌شود؟ **۳.** چرا بهتر است پیچ ریزسنج را در یک جهت بچرخانیم و فاصلهٔ چند چرخه را اندازه بگیریم؟

پاسخ‌نامه

الف) اختلاف فاز — ۳ نمره

یک پرتو در B از آینهٔ دوم خارج می‌شود؛ پرتوی بعدی پس از مسیر $B \to C \to D$ از همان آینه خارج می‌شود. با انتخاب E روی پرتوی اول به گونه‌ای که DE بر راستای پرتوهای خروجی عمود باشد، D و E روی یک جبهه‌موج‌اند. در نتیجه:

$$BC + CD = \frac{۲d}{\cos\theta}, \qquad BD = ۲d\tan\theta, \qquad BE = BD\sin\theta.$$



پس اختلاف راه باید پس از کسر پیشروی پرتوی اول محاسبه شود:

$$\Delta\ell = \frac{۲d}{\cos\theta} - ۲d\tan\theta\sin\theta = \boxed{۲d\cos\theta}, \qquad \boxed{\delta = \frac{۴\pi d\cos\theta}{\lambda}}.$$

طول رفت‌وبرگشت به‌تنهایی کافی نیست، زیرا نقاط خروج دو پرتو متفاوت‌اند. شرط هم‌فازی:

$$\delta = ۲\pi m \quad \Longleftrightarrow \quad \boxed{۲d\cos\theta = m\lambda}.$$

ب) شدت عبوری — ۳ نمره

هر بازتاب دامنه را در $\sqrt{R}$ ضرب می‌کند؛ هر رفت‌وبرگشت شامل دو بازتاب است. پس دامنهٔ پرتوی شمارهٔ j برابر $A_j = (۱-R)R^j A_{\text{in}}$ است، با $j = ۰, ۱, \ldots$. از جمع دو مؤلفهٔ موج و روابط راهنما:

$$\frac{I}{I_{\text{in}}} = (۱-R)^۲\left[\left(\sum R^j\cos j\delta\right)^۲ + \left(\sum R^j\sin j\delta\right)^۲\right]$$

$$= \boxed{\frac{(۱-R)^۲}{۱-۲R\cos\delta+R^۲}} = \frac{۱}{۱+\dfrac{۴R}{(۱-R)^۲}\sin^۲(\delta/۲)}.$$

$$\delta = ۲\pi m: \qquad ۲d\cos\theta = m\lambda, \qquad I_{\max} = I_{\text{in}},$$

$$\delta = (۲m+۱)\pi: \quad ۲d\cos\theta = (m+\tfrac{۱}{۲})\lambda, \quad I_{\min} = I_{\text{in}}\left(\frac{۱-R}{۱+R}\right)^۲.$$

برای $۰ < R < ۱$ کمینه صفر نیست. در بازتابندگی بالا، قله‌های عبور باریک‌اند و ناحیه‌های میان آن‌ها بسیار کم‌نورند.

پ) هندسه و حرکت حلقه‌ها **۲ نمره**

شدت فقط به زاویهٔ θ با محور بستگی دارد، نه به سمت آن؛ بنابراین همهٔ نقاط با ρ یکسان شدت یکسان دارند. با استفاده از $\cos\theta \simeq ۱ - \theta^۲/۲$ و $\rho \simeq f\theta$:

$$۲d - d\frac{\rho_m^۲}{f^۲} = m\lambda \quad \Longrightarrow \quad \boxed{\rho_m^۲ = \frac{f^۲}{d}(۲d - m\lambda)}.$$

مرتبه با رفتن به سمت بیرون *کاهش* می‌یابد؛ بنابراین برای دو حلقهٔ متوالی:

$$\boxed{\rho_m^۲ - \rho_{m+۱}^۲ = \frac{f^۲\lambda}{d}}.$$

برای $m > ۰$ ثابت، افزایش d مقدار $۲ - m\lambda/d$ و در نتیجه شعاع را افزایش می‌دهد. حلقه‌ها از مرکز به بیرون حرکت می‌کنند و با افزایش مرتبهٔ مرکزی، حلقه‌های تازه در مرکز پدید می‌آیند. در شکل ۲، فاصلهٔ خودِ شعاع‌ها برابر نیست؛ فاصلهٔ مربع شعاع‌ها برابر است.

ت) ضریب تبدیل ریزسنج **۳ نمره**

در مرکز تصویر $\theta = ۰$ است؛ بین دو بیشینهٔ متوالی، $۲d/\lambda$ یک واحد زیاد می‌شود. پس برای N چرخه:

$$\boxed{۲\Delta d = N\lambda}, \qquad \boxed{\alpha = \frac{\Delta d}{\Delta x} = \frac{N_{\mathrm{Hg}}\lambda_{\mathrm{Hg}}}{۲\Delta x_{\mathrm{Hg}}}}.$$

با $۰/۰۰۰۵۴۶۰\,\mathrm{mm} = ۵۴۶/۰\,\mathrm{nm}$، هر سه ستون نتیجهٔ یکسان می‌دهند:

$$\alpha = \frac{۱۰۰(۰/۰۰۰۵۴۶۰)}{۲(۰/۵۴۶۰)} = \boxed{۰/۰۵۰۰۰}.$$

این ضریب بدون‌بعد است. افزایش $۱/۰۰\,\mathrm{mm}$ در قرائت ریزسنج، فاصلهٔ آینه‌ها را به اندازهٔ $۰/۰۵۰۰\,\mathrm{mm} = ۵۰/۰\,\mu\mathrm{m}$ افزایش می‌دهد. داده‌ها فقط تغییر مرتبه را تعیین می‌کنند؛ مرتبهٔ مطلق آغازین معلوم نیست، پس $d_۰$ تعیین نمی‌شود. حتی روشن‌بودن آغازین مرکز فقط می‌گوید $۲d_۰ = m_۰\lambda_{\mathrm{Hg}}$، با $m_۰$ نامعلوم.

ث) طول موج خط کوتاه‌تر سدیم **۲ نمره**

$$\lambda_۱ = \frac{۲\alpha\Delta x_{\mathrm{Na}}}{N_{\mathrm{Na}}} = \frac{۲(۰/۰۵۰۰۰)(۰/۵۸۹۰)}{۱۰۰}\,\mathrm{mm} = \boxed{۵۸۹/۰\,\mathrm{nm}}.$$

با حذف α میان دو آزمایش:

$$\boxed{\frac{\lambda_۱}{\lambda_{\mathrm{Hg}}} = \frac{N_{\mathrm{Hg}}}{N_{\mathrm{Na}}}\,\frac{\Delta x_{\mathrm{Na}}}{\Delta x_{\mathrm{Hg}}}}.$$

اگر قله‌های هر دو خانواده را مخلوط بشماریم، N دیگر تغییر مرتبهٔ یک طول موج مشخص نیست. دو قله ممکن است نزدیک هم یا منطبق باشند؛ پس نمی‌توان هر قلهٔ مشاهده‌شده را یک دورهٔ یک خط معین دانست. گزینشگر این ابهام را در بخش ث برطرف می‌کند.

ج) همسازی، ناهمسازی و جدایی طیفی **۴ نمره**

۱. قله‌ها برای مرتبه‌های صحیح و کمینه‌ها برای مرتبه‌های نیم‌صحیح رخ می‌دهند. بنابراین اگر اختلاف مرتبهٔ دو خانواده صحیح باشد، قله‌ها در تقریب نزدیک‌محور تقریباً روی هم می‌افتند؛ اگر نیم‌صحیح باشد، قله‌های یک خانواده میان قله‌های دیگری قرار می‌گیرند:

$$\eta = ۲d\left(\frac{۱}{\lambda_۱} - \frac{۱}{\lambda_۲}\right), \qquad \begin{cases} \eta = k & \text{همسازی}, \\ \eta = k + \frac{۱}{۲} & \text{ناهمسازی}. \end{cases}$$

چون $\lambda_۱ < \lambda_۲$، در یک افزایش معین d، مرتبهٔ خط کوتاه‌تر بیشتر افزایش می‌یابد؛ همین لغزش تدریجی دو خانواده، چرخهٔ همسازی را می‌سازد. لازم نیست در لحظهٔ همسازی خودِ مرکز تصویر روشن باشد: شرط، برابریِ فازهای دو طرح به پیمانهٔ ۲π است.

۲. بین دو ناهمسازی متوالی، η یک واحد زیاد می‌شود. پس:

$$۲D\left(\frac{۱}{\lambda_۱} - \frac{۱}{\lambda_۲}\right) = ۱, \qquad \boxed{D = \frac{\lambda_۱\lambda_۲}{۲(\lambda_۲ - \lambda_۱)}}.$$

در نتیجه:

$$\boxed{\Delta\lambda = \frac{\lambda_۱\lambda_۲}{۲D} \simeq \frac{\lambda_۱^۲}{۲D}}.$$

می‌توان به جای $\lambda_۱^۲$ از $\bar{\lambda}^۲$ با $\bar{\lambda} = (\lambda_۱ + \lambda_۲)/۲$ استفاده کرد؛ زیرا $\lambda_۱\lambda_۲ = \bar{\lambda}^۲ - (\Delta\lambda)^۲/۴$. تقریب با میانگین، اگر میانگین مستقلاً معلوم باشد، خطای نسبیِ مرتبهٔ دوم دارد؛ تقریب با $\lambda_۱$ خطای نسبیِ مرتبهٔ اول.

۳. از ناهمسازی تا نخستین همسازی، تغییر η برابر $۱/۲$ است؛ پس تغییر فاصلهٔ آینه‌ها $D/۲$ خواهد بود. این تمایز، منشأ ضریب دو در استفاده از داده‌هاست.

چرا حلقه‌ها الزاماً محو نمی‌شوند؟ شدت کل برابر $I_۱ + I_۲$ است. شکل شدت هر خط در فابری–پرو سینوسی نیست. حتی اگر شدت دو خط برابر باشد، قرارگرفتن قلهٔ یکی در کمینهٔ دیگری لزوماً مجموع را ثابت نمی‌کند. برای نمونه، با تعریف $F = ۴R/(۱-R)^۲$، اگر دو فاز به اندازهٔ π متفاوت باشند، شدت کلِ نرمال‌شده به شدت ورودیِ هر خط برابر است با

$$\frac{۱}{۱ + F\sin^۲(\delta/۲)} + \frac{۱}{۱ + F\cos^۲(\delta/۲)}.$$

در $\delta = ۰$ مقدار آن $۱ + ۱/(۱+F)$ و در $\delta = \pi/۲$ مقدار آن $۲/(۱ + F/۲)$ است؛ این دو برای $F > ۰$ برابر نیستند. در بازتابندگی بالا، معمولاً دو ردیف قلهٔ باریکِ درهم‌رفته دیده می‌شود. شدت‌های نابرابر دو خط نیز محوشدن کامل را تضمین نمی‌کنند.

ج) تحلیل داده‌ها و نکته‌های آزمایش **۳ نمره**

بین ناهمسازی اول و سوم دو چرخه وجود دارد، نه سه چرخه. تغییر قرائت در هر چرخه:

$$B = \frac{x_۳ - x_۱}{۲} = \frac{۱۲/۳۷۶ - ۰/۸۰۰}{۲} = ۵/۷۸۸\,\mathrm{mm}.$$

پس تغییر واقعی فاصلهٔ آینه‌ها در یک چرخه برابر است با

$$\boxed{D = \alpha B = (۰/۰۵۰۰۰)(۵/۷۸۸) = ۰/۲۸۹۴\,\mathrm{mm} = ۲۸۹۴۰۰\,\mathrm{nm}}.$$

از فرمول تقریبی:

$$\Delta\lambda \simeq \frac{(۵۸۹/۰)^۲}{۲(۲۸۹۴۰۰)}\,\mathrm{nm} = ۰/۵۹۹۳۸\,\mathrm{nm} \simeq \boxed{۰/۵۹۹\,\mathrm{nm}}.$$

برای حل بدون تقریبِ حاصل‌ضرب طول موج‌ها، $\lambda_۲ = \lambda_۱ + \Delta\lambda$ را در رابطهٔ دقیق جایگذاری می‌کنیم:

$$۲D\Delta\lambda = \lambda_۱(\lambda_۱ + \Delta\lambda), \qquad \boxed{\Delta\lambda = \frac{\lambda_۱^۲}{۲D - \lambda_۱}}.$$

$$\Delta\lambda = \frac{۵۸۹/۰^۲}{۵۷۸۸۰۰ - ۵۸۹/۰}\,\mathrm{nm} = ۰/۵۹۹۹۹۰\ldots\,\mathrm{nm}, \qquad \boxed{\lambda_۲ \simeq ۵۸۹/۶\,\mathrm{nm}}.$$

ارقام اضافه فقط برای مقایسهٔ تقریب‌ها نوشته شده‌اند؛ دقت داده‌های ورودی آن‌ها را توجیه نمی‌کند. پاسخ فیزیکی جدایی دو خط، حدود $۰/۶۰۰\,\mathrm{nm}$ است.

برای بررسی همسازی ثبت‌شده:

$$x_H - x_۱ = ۳/۶۹۴ - ۰/۸۰۰ = ۲/۸۹۴\,\mathrm{mm} = \frac{B}{۲}, \qquad \alpha(x_H - x_۱) = ۰/۱۴۴۷\,\mathrm{mm} = \frac{D}{۲}.$$

بنابراین داده‌ها با پیش‌بینی بخش ج سازگارند. اگر $D/۲$ را به جای D در فرمول جدایی بگذاریم، جدایی محاسبه‌شده تقریباً دو برابر می‌شود.

با عوض‌کردن جهت چرخش، لقی پیچ می‌تواند باعث شود ریزسنج حرکت کند ولی آینه بلافاصله حرکت نکند. نزدیک‌شدن به همهٔ قرائت‌ها از یک جهت، اثر این لقی را کاهش می‌دهد. اندازه‌گیری چند چرخه نیز، برای خطای تقریباً ثابت در قرائت دو انتها، خطای نسبیِ فاصلهٔ هر چرخه را کم می‌کند؛ این کار خطای ضریب کالیبراسیون را به‌خودی‌خود حذف نمی‌کند.