

Optische Spektroskopie (OPS) Prismenspektrometer

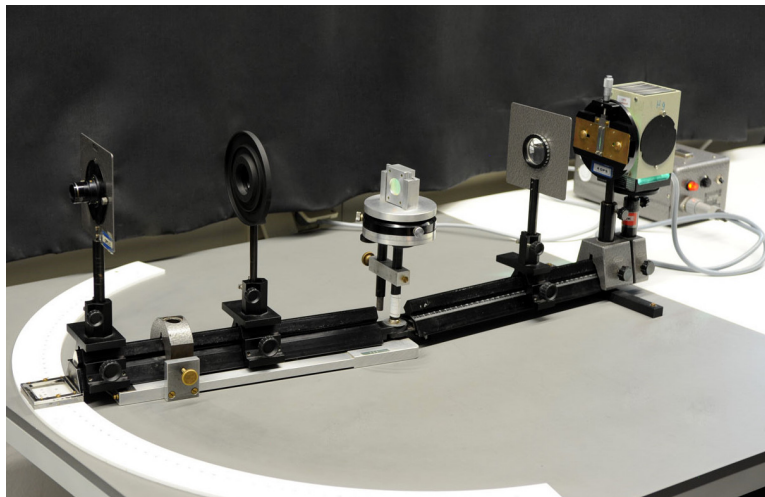
Praktikumsskript

Grundpraktikum

Berlin, 13. April 2022

Freie Universität Berlin

Fachbereich Physik



Ziel dieses Versuchs ist die phänomenologische und experimentelle Einführung in elementare Grundlagen der optischen Spektroskopie als bedeutsame wissenschaftliche und angewandte Untersuchungsmethode in vielen naturwissenschaftlichen Arbeitsgebieten.

Motivation

Mit Hilfe der Spektroskopie ist es möglich, Strahlung nach ihren Wellenlängen zu ordnen. Betrachtet man das Spektrum einer Glühlampe, der Sonne oder eines Festkörpers, so ist dieses kontinuierlich. Betrachtet man hingegen die Spektren von kleinen Molekülen oder einzelnen Atomen, so ergibt sich ein Linienspektrum. Dieses Linienspektrum ist spezifisch für das untersuchte Material. Dadurch ist es möglich mit Hilfe der optischen Spektroskopie Substanzen hinsichtlich ihrer Bestandteile zu analysieren. Die Anwendung spektroskopischer Methoden ist vielfältig - im Kleinen wie im Großen. In der Astronomie beispielsweise lässt sich die Zusammensetzung von Sternen bestimmen, während in der Biophysik die Funktion von Proteinen untersucht werden kann.

Physikalische Grundlagen

Prisma

Der Durchgang von Licht durch transparente Medien stellt ein Resonanzphänomen dar mit einer als Dispersion bezeichneten Frequenz- bzw. Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex n . Licht verschiedener Wellenlänge wird demzufolge an einer Grenzfläche unterschiedlich gebrochen und so in seine spektralen Anteile zerlegt. Bei einem Prisma hängt der gesamte Ablenkwinkel bei Durchgang durch die beiden Grenzflächen neben dem Brechungsindex zusätzlich von der Richtung des einfallenden Lichtes ab. Einfache Verhältnisse ergeben sich für den Sonderfall, dass ein Lichtstrahl das Prisma parallel zur Basis und damit symmetrisch durchläuft. Der gesamte Ablenkwinkel wird in diesem Fall minimal (Minimalablenkung). Für den Eintritts- und Austrittswinkel an einer der Grenzflächen folgt aus den geometrischen Verhältnissen (siehe Abbildung 1):

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = n(\lambda) \quad \sin \quad \beta = \frac{\varepsilon}{2} \text{ und } \gamma = 2(\alpha - \beta) \text{ bzw. } \alpha = \frac{\gamma + \varepsilon}{2} \quad (1)$$

wobei ε der Winkel der *brechenden Kante* des Prismas ist. Aus dem Brechungsgesetz lässt sich dann mit Gleichung (1) der Brechungsindex des Prismenmediums berechnen. (Der Brechungsindex n_0 der umgebenden Luft hat den Wert 1,0003).

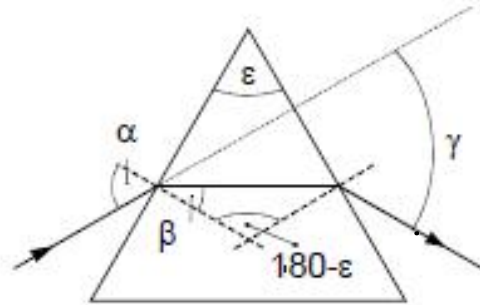


Abbildung 1: Strahlengang durch das Prisma

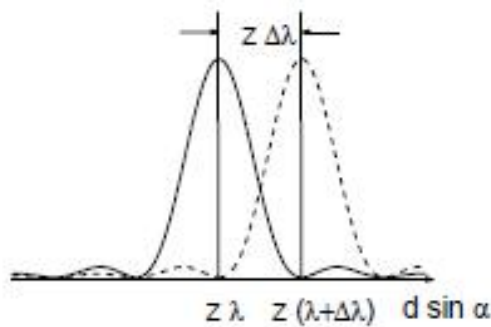


Abbildung 2: Rayleigh-Kriterium zur Unterscheidung zweier Maxima

Auflösungskriterien

Die Festlegung des Auflösungsvermögens eines Spektralapparats erfordert eine konventionelle Festlegung darüber, wann zwei Spektrallinien als getrennt betrachtet werden sollen. Zur quantitativen Bestimmung des Auflösungsvermögens wird hier das Rayleigh-Kriterium verwendet, das zwei Linien als getrennt (aufgelöst) betrachtet, wenn das Beugungsmaximum der einen Linie mit dem ersten Beugungsminimum der anderen Linie zusammenfällt (siehe Abbildung 2). Besitzen beide Linien die gleiche Intensität, so ist das Verhältnis der Intensität im Minimum der Doppellinie zur maximalen Intensität gleich $\frac{8}{\pi^2}$.

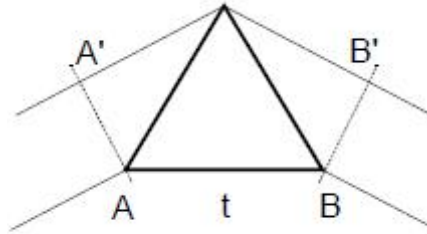


Abbildung 3: Auflösung des Prismas: Dargestellt sind zwei Wellenfronten vor und hinter dem Prisma.

Auflösungsvermögen des Prismas

Das endliche Auflösungsvermögen des Prismas ist beugungsbedingt, da es eine Begrenzung für den Strahlengang darstellt. Es lässt sich aus einer Betrachtung der optischen Weglängen am Prisma herleiten (siehe Abbildung 3).

$\overline{AA'}$ und $\overline{BB'}$ stellen zwei Wellenfronten vor und hinter dem Prisma dar, die zu einer Ablenkrichtung gehören, unter der entsprechend dem Rayleigh-Kriterium für die Wellenlänge λ das Hauptmaximum und für die Wellenlänge $\lambda + \Delta\lambda$ das erste Nebenminimum liegen sollen.

Für das Hauptmaximum (zu λ) dürfen die Strahlen keinen Gangunterschied aufweisen, während das erste Nebenminimum im Beugungsdiagramm (zu $\lambda + \Delta\lambda$) dann entsteht, wenn die Randstrahlen gerade einen Gangunterschied von einer Wellenlänge aufweisen. Für den Brechungsindex in Abhängigkeit von λ soll für die kleine Wellenlängendifferenz näherungsweise ein linearer Ansatz herangezogen werden:

$$n(\lambda) = n \text{ und } n(\lambda + \Delta\lambda) = n + \frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda \quad (2)$$

Da der optische Weg von A' nach B' wegen $n \approx 1$ für beide Wellenlängen gleich ist, muss ein Gangunterschied von λ an der Basis des Prismas (Basislänge t) entstehen:

$$(n + \frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda)t - nt = \lambda \quad (3)$$

Das Auflösungsvermögen des Prismas wird demnach durch die Basislänge t (die die Öffnung des Prismas darstellt) und die differentielle Dispersion $\frac{dn}{d\lambda}$ bestimmt.

Aufgaben

Prismenspektrometer

1. Aufbau und Justierung des Spektrometers (Beleuchtung, Kollimator, Fernrohr)
2. Messung des Winkels der brechenden Kante eines Prismas.
3. Aufnahme des Spektrums einer Quecksilber-Spektrallampe zur Kalibrierung des Spektrometers.
4. Spektroskopie einer unbekannten Lampe und Analyse der Lampenfüllung.
5. Aufnahme der Dispersionskurve $n(\lambda)$ und Bestimmung der differentiellen Dispersion $\frac{dn}{d\lambda}$ für die 577/579-nm-Linien von Quecksilber.
6. Bestimmung des Auflösungsvermögens des Prismas und Vergleich mit der theoretischen Erwartung.
7. Qualitative Beobachtung und Diskussion des Beugungsspektrums eines Beugungsgitters.

Apparatur und Geräte

- Goniometeraufbau (Winkel-Messeinrichtung) aus Dreikantschienen mit neig- und drehbarem Prismentisch.
- Optische Komponenten: Eintrittsspalt, Kollimatorlinse, Objektiv, Okular mit Fadenkreuz.
- Justier-Fadenkreuz (zur Winkelmessung am Prisma), Messspalt (zum Auflösungsvermögen).
- Spektrallampen mit Netzgerät: Hg-Lampe, unbekannte Lampen.

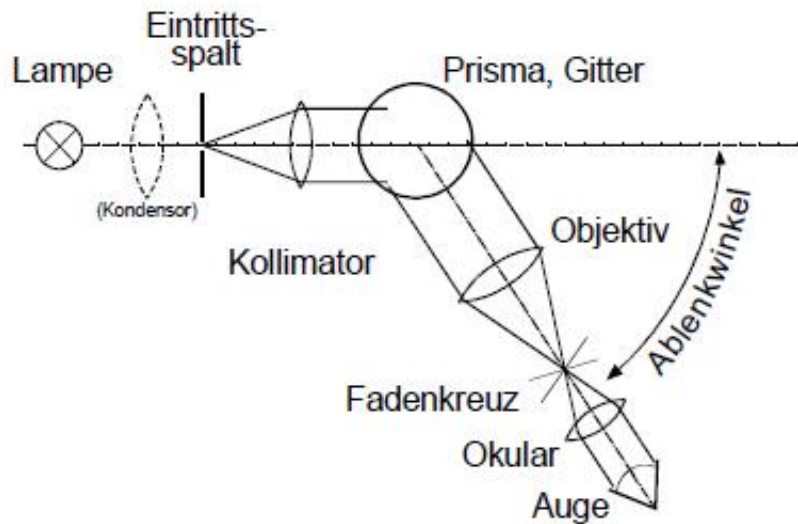


Abbildung 4: Aufbau

Versuchsdurchführung und Auswertung

Ein Spektralapparat (Spektrometer) für visuelle Beobachtung besteht aus einem Goniometer zur Winkelmessung, einem Eintrittsspalt mit Kollimator zur Erzeugung parallelen Lichts, dem dispersiven Element (Prisma, Gitter) und einem Beobachtungsfernrohr. Es wird meist durch einen Beleuchtungsapparat ergänzt, der dem Spektrometer das zu untersuchende Licht zuführt (Kondensor). Siehe auch Abbildung 4.

Fehlerabschätzung

Insbesondere bei optischen Versuchen sind alle Messeinstellungen zu wiederholen (Kontrollmessung), um aus der Reproduzierbarkeit bzw. den beobachteten Abweichungen Aussagen über die Fehler treffen zu können (Schätzfehler).

Zu Aufgabe 1: Justierung

Voraussetzung für quantitativ einwandfreie Ergebnisse optischer Experimente ist eine sehr sorgfältige Justierung des optischen Aufbaus, durch die darüber hinaus ein Verständnis für die Grundlagen der geometrischen Optik vermittelt wird. Zur Fest-

legung der Höhenachse ist der Prismmentisch in der Höhe fest eingestellt. Die übrigen Bauteile müssen gut auf diese Höhe ausgerichtet werden. Ein Beleuchtungsapparat ist wegen der hohen Leuchtdichte der Lampen nicht erforderlich und zur Justierung wird die Hg-Spektrallampe direkt hinter den Eintrittsspalt aufgestellt. Der Spalt stellt eine (in einer Raumrichtung) näherungsweise punktförmige, sekundäre Lichtquelle dar. Die Justierung des Kollimators erfolgt durch Autokollimation. Das vom Kollimator ausgehende Licht wird an einem auf dem Prismmentisch aufgestellten Spiegel reflektiert, wobei der Spalt bei richtiger Justierung des Kollimators scharf auf sich selbst zurück abgebildet wird. Die Justierung kann bei etwas seitlich verschobener Abbildung auf die eine Spaltbacke kontrolliert werden. Das Fadenkreuz des Okulars wird bei entspanntem Auge gegen einen diffus beleuchteten Hintergrund fokussiert. Das Okular wird dann am Ende des schwenkbaren Arms des Goniometers aufgestellt. Die Objektivlinse wird schließlich so justiert, dass der Spalt scharf auf die Beobachtungsebene im Okular abgebildet wird. Kriterium für eine einwandfreie Justierung ist Parallaxenfreiheit, d. h. dass sich das Spaltbild und das Fadenkreuz bei seitlicher Bewegung des Auges nicht gegeneinander verschieben. Ursachen für ein schlechtes Spaltbild können, neben falscher Justierung des Kollimators oder des Objektivs, ein zu weit geöffneter oder geschlossener, ein schräggestellter oder ein verschmutzter Spalt sein. Eine leichte Überstrahlung des Spaltes lässt sich dagegen unter den gegebenen Umständen nicht vermeiden. Der Winkel zwischen der Kollimator- und der Fernrohrachse kann an einer Winkelskala mit einem $\frac{1}{100}$ -Grad-Nonius abgelesen werden. Zur Gewährleistung einer hohen Ablesesicherheit ist der Gebrauch des Nonius vor Beginn der Messungen zu üben.

Prismenspektrometer

Zu Aufgabe 2 (Winkel der brechenden Kante; siehe Abbildung 5)

Zur Winkelmessung an der brechenden Kante wird an Stelle des Eintrittsspalts ein Fadenkreuz auf einer Mattscheibe in den Strahlengang gesetzt (Fadenkreuz zum Fernrohr), scharf gestellt und in der Höhe so ausgerichtet, dass die Schnittpunkte der beiden Fadenkreuze (im Kollimator und im Okular) zur Deckung gebracht werden können. Der Prismmentisch wird zunächst nach Augenmaß horizontal ausgerichtet und so gedreht,

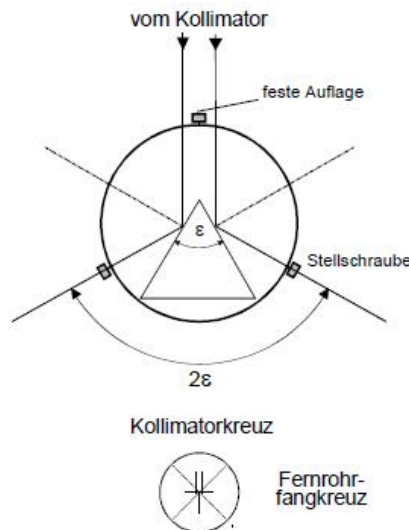


Abbildung 5: Ausrichtung des Prismas auf dem Prismenstisch

dass eine der drei Neigungs-Stellschrauben zum Kollimator zeigt, und die beiden anderen entsprechend in die Beobachtungsrichtungen. Dann wird das Prisma so auf dem Prismenstisch aufgestellt, dass das von den beiden Seitenflächen reflektierte Licht mit dem Fadenkreuz im Fernrohr beobachtet werden kann.

Das Prisma muss dabei vergleichsweise weit zum Fernrohr verschoben sein, da die Ausleuchtung sehr schmal ist und die Seitenflächen nur an der Spitze des Prismas trifft. Nun wird die Ausrichtung der Prismenseitenflächen senkrecht zur optischen Achse fein justiert, indem man sukzessive auf beiden Seiten die Fadenkreuze beobachtet und durch Justierung an den jeweils gegenüberliegenden Stellschrauben auf gleiche Höhe ausrichtet. Die Einstellungen sind so lange fortzuführen, bis die Höhe auf beiden Seiten übereinstimmt. Zum Schluss wird dann die Winkeldifferenz der beiden reflektierten Fadenkreuzschnittpunkte zur Bestimmung des Winkels der brechenden Kante des Prismas gemessen.

Zu Aufgabe 3 (Kalibrierkurve)

Das Prisma wird nun in Ablenkposition gebracht, wobei wieder auf eine gute Ausleuchtung zu achten ist. Dann wird die Minimalablenkung für die 546-nm-Linie eingestellt,

was bedeutet Minimalablenkung?

↳ kleinster Brechungswinkel
dicke grüne Linie



und das gesamte Spektrum der Quecksilberlampe aufgenommen. Die Positionen der optischen Komponenten auf den Dreikantschienen, und insbesondere die Position des Prismas, darf während dieser und den folgenden Messungen nicht verändert werden, da dabei die Zuordnung zwischen Wellenlängen und Ablenkwinkel (Kalibrierung) verloren gehen würde. Zur Auswertung wird der Zusammenhang zwischen Wellenlängen und Ablenk winkeln grafisch darzustellen. Um dabei der Genauigkeit der Messungen zu entsprechen, ist diese Kalibrierkurve auf DIN-A4-mm-Papier anzufertigen!

Zu Aufgabe 4 (Spektroskopische Aufgabe)

Siehe nachfolgende Hinweise zu den spektroskopischen Aufgabenstellungen.

Zu Aufgabe 5 (Dispersionskurve und differentielle Dispersion)

Für die Hauptlinien des Hg-Spektrums (579 nm, 577 nm, 546 nm, 492 nm, 436 nm und 405 nm) wird die Minimalablenkung einzeln eingestellt und die Ablenkung gemessen. Aus den Messungen können, ausgehend von Gleichung (1), die Brechungsindizes berechnet und die Dispersionskurve $n(\lambda)$ grafisch dargestellt werden. Die differentielle Dispersion für die 579/577-nm-Linien bestimmt man durch Konstruktion einer Tangenten an die Kurve bei dieser Wellenlänge.

Zu Aufgabe 6 (Auflösungsvermögen)

Da die Wellenlängen der Linien nicht verändert werden können, muss zur Realisation der Auflösungsgrenze die optisch wirksame Basislänge t des Prismas verkleinert werden. Dazu wird in den Kollimatorstrahlengang direkt vor dem Prisma ein zusätzlicher Messspalt eingebracht und soweit geschlossen, bis ein geeignetes und auf Minimalablenkung eingestelltes Linienpaar unter subjektiver Berücksichtigung der Auflösekriterien (Sparrow bzw. Rayleigh) gerade noch getrennt erscheint.

Die Untersuchung wird an dem 579,1/577,0-nm-Linienpaar von Quecksilber durchgeführt. Das experimentell beobachtete Auflösungsvermögen ergibt sich dann aus dem Verhältnis des Mittelwerts der Linien zur Differenz, und dem theoretisch erwartete Wert dieses Verhältnisses nach Gleichung (3). Die wirksame Basislänge t lässt sich aus der

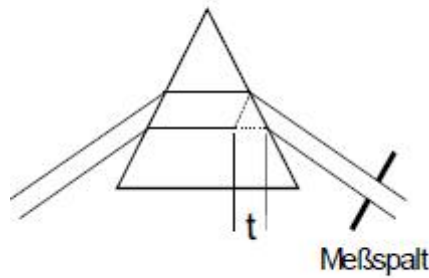


Abbildung 6: Bestimmung des Basislänge

eingestellten Spaltöffnung b , dem Ablenkwinkel γ und dem Prismenwinkel ε berechnen. Bei den Ablesungen an der Mikrometerschraube des Messspalts ist zu berücksichtigen, dass der Nullpunkt willkürlich verschoben liegt, und dass die Skala hinsichtlich der Öffnung des Spalts rückwärts zählt.

Zu Aufgabe 7 (Gitterspektrum)

Das Prisma wird durch ein Gitter ausgetauscht. Die charakteristischen Unterschiede der Spektren sind zu beobachten, zu protokollieren und im Bericht kurz qualitativ zu diskutieren.

Zu den spektroskopischen Aufgabenstellungen

Unbekannte Lampen

Das Spektrum einer (der drei vorhandenen) unbekannten Lampen ist aufzunehmen und die beobachteten Wellenlängen aus der Kalibrierkurve zu bestimmen. Das Ergebnis ist anhand der Tabelle ausgewählter Spektrallinien im Anhang dieses Skripts zu analysieren.

Spektrallinien

Spektrum der Hg-Spektrallampe und Spektrallinien von Cd, He und Zn

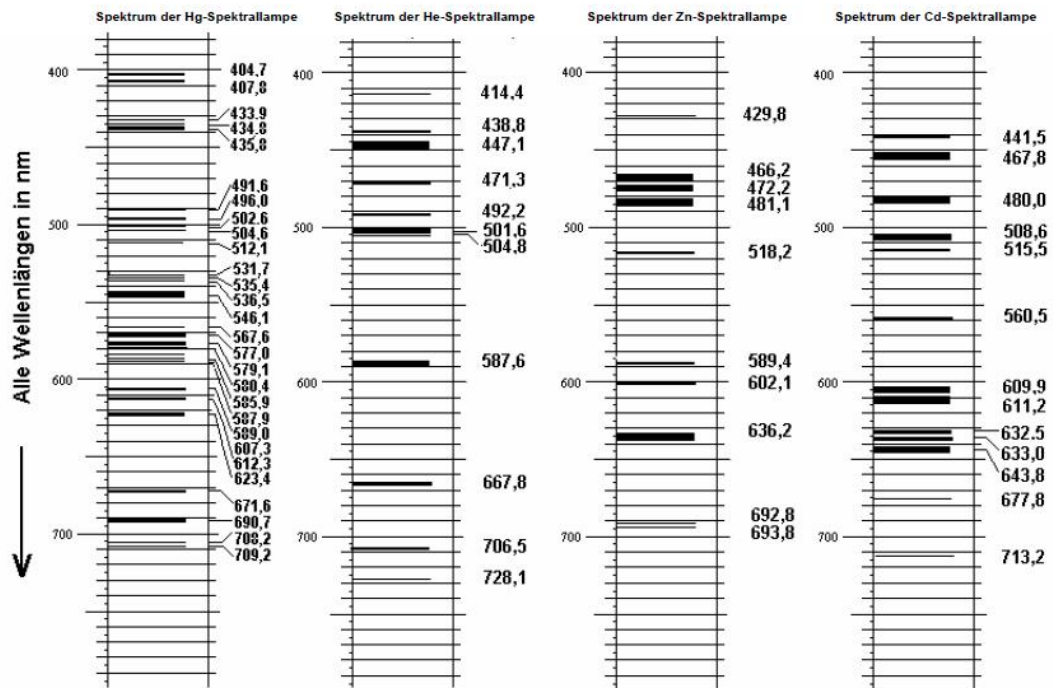


Abbildung 7: Spektrallinien der möglichen verwendeten Lampen

Spektrallinien

Zur Vereinfachung der Zuordnung der Linien sind hier noch einmal die beobachtbaren Linien ihren Farben entsprechend aufgelistet. (Bei sehr guter Justage ist es manchmal möglich noch weitere Linien zu beobachten. Über die Seite www.nist.gov kann man fehlende Linien finden.)

Spektrum der Hg-Spektrallampe

404,7 nm, 407,8 nm, 433,9 nm, 434,8 nm, 435,8 nm, 491,6 nm, 496,0 nm, 502,6 nm, 504,6 nm, 512,1 nm, 531,7 nm, 535,4 nm, 536,5 nm, 546,1 nm, 567,6 nm, 577,0 nm, 579,1 nm, 580,4 nm, 585,9 nm, 587,9 nm, 589,0 nm, 607,3 nm, 612,3 nm, 623,4 nm, 671,6 nm, 690,7 nm, 708,2 nm, 709,2 nm

Spektrum der He-Spektrallampe

414,4 nm, 438,8 nm, 447,1 nm, 471,3 nm, 492,2 nm, 501,6 nm, 504,8 nm, 587,6 nm, 667,8 nm, 706,5 nm, 728,1 nm

Spektrum der Zn-Spektrallampe

429,8 nm, 466,2 nm, 472,2 nm, 481,2 nm, 589,4 nm, 602,1 nm, 636,2 nm, 692,8 nm, 693,8 nm

Spektrum der Cd-Spektrallampe

441,5 nm, 467,8 nm, 480,0 nm, 508,6 nm, 515,5 nm, 560,5 nm, 609,9 nm, 611,2 nm, 632,5 nm, 633,0 nm, 643,8 nm, 677,8 nm, 713,2 nm