



Proyecto Teórico-Computacional

Espectroscópica de polarización en átomos de Cesio

Gabriel David Jiménez Estupiñán

Departamento de física, Universidad de los Andes
Bogotá D.C, Colombia

Profesor director: Mayerlin Nuñez PhD
Profesor revisor: Alejandro García Varela PhD

Resumen/ Abstract

Resumen

El estudio de los espectros atómicos es una de las áreas que ha tenido gran importancia en los últimos años. Esto se debe a sus diferentes aplicaciones como estabilizar láseres en frecuencia y la medición de campos magnéticos débiles. Para realizar esto se utilizan varias técnicas espectroscópicas como Espectroscopia de polarización, la cual será estudiada en este proyecto. Para esto, se analizó teóricamente los fundamentos que lleva acabo esta técnica y que tipo de señal se puede obtener a partir de esta. Además, se implementó una simulación de esta técnica con la transición D2 del Cesio con la cual se pudo comprobar experimentalmente. Todo esto con el objetivo de ser utilizada para estabilizar la frecuencia de un láser en un futuro.

Índice general

Resumen/Abstract	I
1 Introducción	1
2 Objetivos	3
2.1 Pregunta de investigación	3
2.2 Objetivo general	3
2.3 Objetivos específicos	3
3 Estado del Arte	4
3.1 Cesio	4
3.2 Reglas de Selección	5
3.3 Optical Pumping	5
3.4 Anisotropía en un gas	6
4 Metodología	10
4.1 Estudio teorico	10
4.2 Simulación	10
5 Resultados	11
5.1 Simulación de la señal de anisotropía	11
5.2 Comparación experimental	13
6 Conclusiones	15
Referencias	18

Índice de figuras

3.1	Dibujo de la suma de componentes del momento angular total atómico. . . .	4
3.2	Niveles de energía de el átomo de Cesio. Se observa dos grandes transiciones la D1 y D2. La transición que se usara es la D2 en específico la $F4 \rightarrow F5$. Sacado de [6, 12]	5
3.3	Optical pumping en una transición atómica del Cesio. Donde se utilizo polarización circular derecha σ^+	6
3.4	Imagen gráfica del estudio de la anisotropía en un gas atómico. En este caso se utiliza dos haces de luz láser con polarización σ^+ y π y una muestra atómica de Cesio.	7
5.1	Señal simulada de la anisotropía generada por la celda de cesio al ser un medio anisotrópico. Donde se observan las transiciones hiperfinas de la linea D2 del cesio y con las transiciones cruzadas o <i>crossover</i> generado por la tecnica de espectroscopia.	12
5.2	Montaje experimental de espectroscopia de polarización. Donde se utiliza un diodo láser con una rejilla de difracción para obtener una cavidad. La luz del láser es alineada por un sistema de espejos M1-M11 y medida con un acople de fibra óptica. Después, se divide en dos haces con un PBS con intensidades diferentes con el control de una lamina de media onda. Se utilizan otras laminas de onda para tener la polarización deseada y ser utilizada para la anisotropia. El haz menos intenso es usado como prueba y es el que es medido por un foto diodo.	13
5.3	Señal de espectroscopia de polarización obtenida por un restador de la transición D2 del Cesio. Donde se puede observar cada transición hiperfinas. Centrada en la frecuencia donde se desea estabilizar.	14

1

Introducción

El estudio de los espectros atómicos ha sido de gran importancia en las últimas décadas debido a sus diversas aplicaciones. Una de estas aplicaciones es la estabilización en frecuencia de láseres que sirven tanto en la industria como en la academia [1]. Un ejemplo de aplicación de los láseres estables en frecuencia es en la metrología donde se definen diferentes patrones de medición como el metro y el segundo [2]. Otra aplicación de los láseres estables en frecuencia, es la medición de campos magnéticos débiles con el propósito de investigación marina [3, 4]. Por lo tanto, poseer un láser estable en frecuencia es una herramienta beneficiosa en la investigación.

Hay diferentes técnicas de estabilización en frecuencia para un láser. En este proyecto se estudiara teóricamente la técnica de espectroscopia de polarización. Para esto, se utilizara como muestra atómica el Cesio. Esto se debe a que su estudio es fácil al ser un átomo hidrogenoide y toda su información espectral esta documentada en la literatura [5, 6]. Además, ha sido un elemento mayormente implementado para la creación de relojes atómicos y otras aplicaciones [7].

Como todo los elementos, el Cesio posee sus propias transiciones atómicas. La transición que se estudiara en este proyecto es la D2 debido a su gran variedad de niveles hiperfinos. Estos niveles hacen que se pueda ver diferentes transiciones hiperfinas lo cual hace mas versátil e interesante su estudio. Además, estas transiciones poseen diferentes reglas de selección al momento de ser excitadas por algún tipo radiación polarizada [8]. Estas transiciones y la forma en la que ocurren serán el tema principal en este proyecto.

Hay diferentes técnicas de espectroscopia para acceder a las transiciones atómicas: Espectroscopia de absorción saturada y Espectroscopia de polarización. Estas técnicas solucionan el problema de ensanchamiento *Doppler* el cual se produce por la distribución de velocidades que existe por el movimiento de los átomos en un gas[8]. Esta distribución genera un ensanchamiento en las líneas espectrales, ya que la frecuencia que ven los átomos depende de la velocidad de los mismos.

En este proyecto se centrará en espectroscopia de polarización, donde se utiliza la estructura hiperfina de los átomos para aprovechar la transiciones generadas por las diferentes reglas de selección. Estas reglas dependen de la polarización de la luz que incide sobre la muestra atómica. La absorción de luz polarizada genera que la muestra se vuelva anisotrópica, la cual

genera un cambio en el índice de refracción [4]. Para este proyecto se utilizarán dos haces de luz para estudiar este proceso. Al primer haz, el de bombeo, se le inducirá una polarización circular derecha o izquierda (σ^\pm) y al segundo haz, el de prueba, una polarización lineal (π) que puede escribirse como una combinación lineal tanto σ^+ y σ^- . El haz de bombeo es el encargado de generar la anisotropía en la muestra atómica. Como consecuencia de esto, se genera una birrefringencia cuando el haz de prueba pasa en la celda de Cesio y puede ser medida con un polarímetro [9]. La señal que da este sistema de detección puede ser usada para estabilizar la frecuencia del láser [10].

2

Objetivos

2.1. Pregunta de investigación

Debido a los diferentes aplicaciones que se obtienen mediante las técnicas de espectroscopia atómica y de las reglas de selección en átomos generadas por radiación polarizada, se puede llegar a la pregunta de, ¿Cuales son los principios básicos de la espectroscopia de polarización?

2.2. Objetivo general

Entender los principios básicos de espectroscopia de polarización y como se puede utilizar para obtener una señal de error para estabilizar la frecuencia de un láser.

2.3. Objetivos específicos

- Entender como es el funcionamiento del *Optical Pumping* en una muestra atómica.
- Comprender las características de un elemento cuando se vuelve anisotrópico .
- Realizar el calculo analítico de la interacción entre radiación polarizada y un medio anisotrópico.
- Simular la señal de la intensidad de un rayo de luz después de interactuar con un medio anisotrópico.

3

Estado del Arte

3.1. Cesio

La muestra atómica que se estudiara es el Cesio. Esto se debe a que es un átomo hidrogenoide, el cual solo posee un electrón en su ultima capa de energía haciendo fácil su estudio. Cuando se quiere empezar a estudiar los átomos se debe tener en cuenta las contribuciones energéticas. La primera es la interacción del núcleo con el electrón que es de tipo coulomb, la cual se puede escribir con el numero cuántico L . Después, se debe considerar el spin del electrón el cual es $S = 1/2$, esto hace que el momento angular total tome el valor $J = L + S$ cual tiene como nombre acople spin-orbita. El acople spin-orbita genera un división en el nivel de energía generando la estructura fina. Por ultimo, se debe considerar la interacción del spin que posee el núcleo, I , con el momento angular total spin-orbita J dando como resultado $F = I + J$ la estructura hiperfina [11]. La forma gráfica de como se puede ver esta suma de componentes esta en la Fig. 3.1

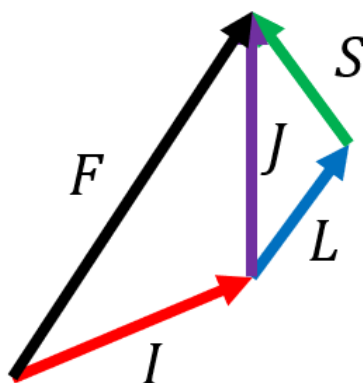


Figura 3.1: Dibujo de la suma de componentes del momento angular total atómico.

El Cesio posee un spin nuclear de $I = 7/2$ y sus niveles de energía considerando todas las contribuciones energéticas se pueden observar en la Fig.3.2. Donde se gráfica las

transiciones D1 y D2. La transición que se tendrán en cuenta en este proyecto es la D2 específicamente $F_4 \rightarrow F_5 = 351.7219606(15)$ THz o en longitud de onda $852.35638251(24)$ nm [6].

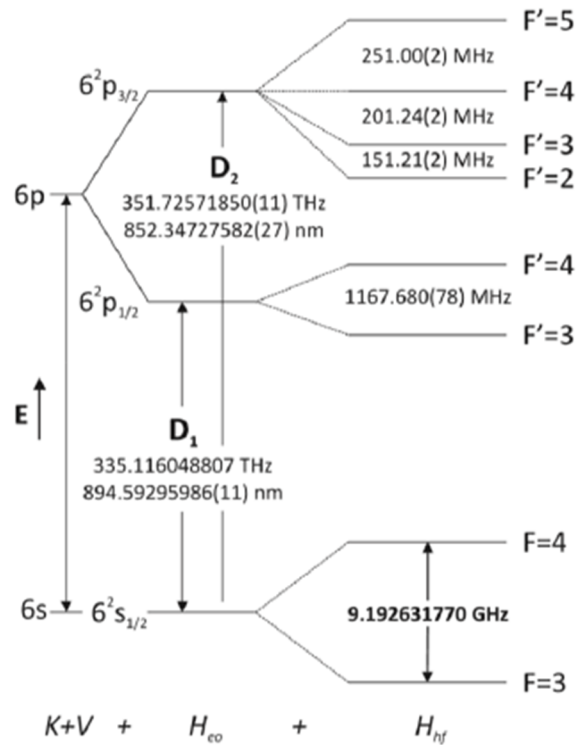


Figura 3.2: Niveles de energía de el átomo de Cesio. Se observa dos grandes transiciones la D1 y D2. La transición que se usara es la D2 en específico la $F4 \rightarrow F5$. Sacado de [6, 12]

3.2. Reglas de Selección

Cuando se hace incidir radiación a un electrón este solo puede hacer un tipo de transiciones específicas. Esto se debe a que la luz incidente tiene un momento angular asociado a su polarización y cuando interactúa con un electrón el estado final debe conservar el momento angular total del sistema. Esto hace que se creen las reglas de selección que imponen ciertas normas a los números cuánticos antes y después de la transición atómica. Las reglas de selección son las siguientes: $\Delta m = 1$ si la polarización es circular derecha σ^+ ; $\Delta m = -1$ se debe a polarización circular izquierda σ^- y $\Delta m = 0$ a polarización diagonal π [13].

3.3. Optical Pumping

Cuando un rayo de luz interactúa con algún elemento este puede ser absorbido si la frecuencia de la radiación es la misma que una transición atómica del elemento [9]. Además,

si la luz tiene una polarización establecida se puede jugar con las reglas de selección que se hablaron anteriormente con el objetivo de distribuir la poblaciones de átomos a niveles específicos. Lo cual hace que haya niveles de energía con una población mayor que otros [4, 9]. Esto se puede ver en un ejemplo como se indica en la Fig. 3.3: Se tiene la transición D2 del Cesio en específico de $F_4 \rightarrow F_3'$. Cada nivel de energía tiene sus propias proyección con respecto al eje z : Para F_4 se tiene $-4 \leq m_f \leq 4$ y F_3' se tiene $-3 \leq m_f' \leq 3$. Sin tener en cuenta la polarización de la luz los átomos pueden hacer la transición sin importar la dirección en donde apuntan. Pero, si la luz esta polarizada, ejemplo como circular derecha σ^+ , los átomos solo pueden hacer transición $\Delta m = 1$.

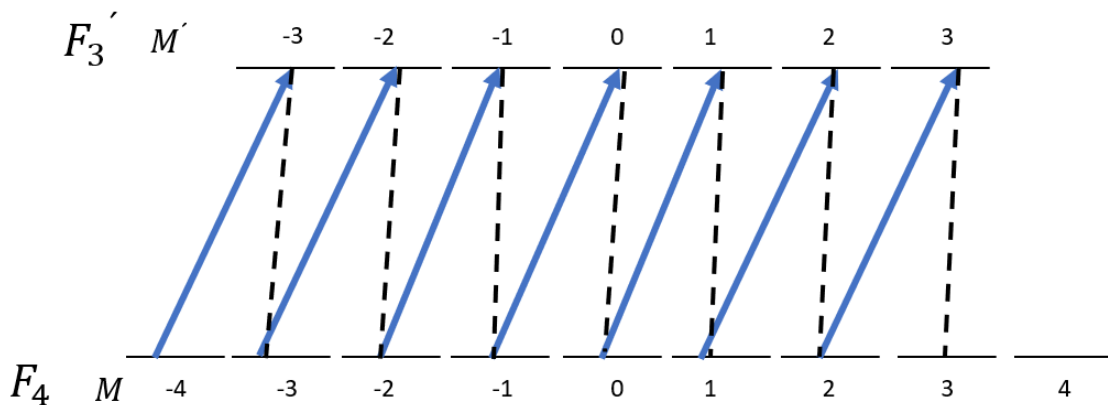


Figura 3.3: Optical pumping en una transición atómica del Cesio. Donde se utilizo polarización circular derecha σ^+

Las líneas puntuadas en la Fig 3.3 representan que cada transición tiene un tiempo de vida lo cual hace que los electrones emitan un fotón y se devuelvan al nivel base. Cuando esto pasa los electrones pueden hacer cualquier transición $\Delta m = \pm 1, 0$ pero en promedio los electrones tienden a decaer en $\Delta m = 0$ [9]. Entonces la poblaciones de átomos harán un recorrido en diagonal hasta llegar el estado $m_f = 3$. En este estado ya no pueden hacer la transición $\Delta m = +1$ por lo tanto los átomos se quedan en este nivel sin poder ser excitados por la radiación, esto se le llama *Optical Pumping* [9].

3.4. Anisotropía en un gas

El proceso de *Optical Pumping* se puede utilizar para volver un medio anisotrópico. Esto hace que el momento dipolar magnético de los átomos solo apunten a una dirección predeterminada. Para esto, se le incide a la muestra atómica un rayo de luz láser con una polarización σ^+ (el de bombeo) y hace que los átomos sean bombeados a un nivel específico como se muestra en la Fig 3.3[14]. Para poder utilizar este fenómeno y poder entender la anisotropía, se mandara otro haz de luz (el de Prueba) el cual tiene la misma frecuencia que el primero pero con polarización π y en dirección contraria al de bombeo como se muestra en la Fig 3.4.



Figura 3.4: Imagen gráfica del estudio de la anisotropía en un gas atómico. En este caso se utiliza dos haces de luz láser con polarización σ^+ y π y una muestra atómica de Cesio.

El haz de prueba va ser afectado por la anisotropía, de la Celda de Cesio, generada por el haz de bombeo. Esto pasa debido que se puede escribir la polarización lineal π como combinación lineal de tanto σ^+ y como σ^- . En este proyecto la polarización lineal va hacer específicamente diagonal 45 [15]:

$$\vec{E}_{45} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{E}_{\sigma^+} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \vec{E}_{\sigma^-} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Por lo tanto, la combinación lineal es de esta manera:

$$\vec{E}_{45} = a \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + b \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Donde las constantes son las siguientes:

$$a = \frac{1-i}{2}, b = \frac{1+i}{2} \quad (3.3)$$

Con esto se pueden entender varias cosas: la primera es debido a la anisotropía, generada por el haz de bombeo por al bombeo óptico, los átomos absorben mas la componente σ^- que la componente σ^+ esto se debe a las reglas de selección Fig. 3.3. Para ver como afecta esta anisotropía al haz de prueba, se puede escribir la ecuación de onda de este haz antes de estar en contacto con el gas atómico [9]:

$$\vec{E}_p = E_0 e^{i(\omega t - kz)} (a \hat{\sigma}^+ + b \hat{\sigma}^-) \quad (3.4)$$

Donde E_0 es la amplitud inicial de la onda, ω la frecuencia y k el vector de onda. Después de interactuar con la celda de Cesio, la ecuación cambia debido a la birrefringencia que esta genera al haz por se un medio anisotrópico [9]:

$$\vec{E}_{\sigma^+} = E_0 e^{\frac{\alpha^+ L}{2}} e^{i(\omega t - k^+ z)} \frac{a}{2} (\hat{x} + i \hat{y}) \quad (3.5)$$

$$\vec{E}_{\sigma^-} = E_0 e^{\frac{\alpha^- L}{2}} e^{i(\omega t - k^- z)} \frac{b}{2} (\hat{x} - i \hat{y}) \quad (3.6)$$

Esto hace diferentes fenómenos: La ondas tiene un desfase debido a la diferencia de sus vectores de onda. El cual se puede expresar por la diferencia entre el índice de refracción $n = \frac{ck}{\omega}$. Esto quiere decir que al estar en contacto con la celda de Cesio los vectores de onda k_{\pm} posee un ligera diferencia haciendo que sus índices de refracción cambien [9]

$$\Delta\phi = (k^+ - k^-)L = \left(\frac{\omega L}{c}\right)\Delta n \quad (3.7)$$

Además, los factores α_{\pm} son los factores que describen la absorción generada por la celda de Cesio. Los factores son diferentes debido al bombeo óptico generado por el haz de bombeo. Generando una diferencia entre la amplitud de las ondas, el cual se observa como:

$$\Delta E = \frac{E_0}{2} \left(e^{\frac{\alpha^+ L}{2}} - e^{\frac{\alpha^- L}{2}} \right) \quad (3.8)$$

Además del gas atómico, se debe tener en cuenta la birrefringencia pequeña generada por las ventanas de la celda de cesio debido al diferencia de presión que hay entre el gas y el medio ambiente. Esto genera otro cambio en el índice de refracción que se puede escribir como un numero complejo $n_{w\pm}d = b_{R\pm} + i\frac{c}{\omega}b_{i\pm}$ [14]. La expresión completa se puede escribir como:

$$\vec{E}_p = E_0 e^{-i\left(\frac{\omega}{c}(nL+b_R) - ib_{i-} - i\frac{\alpha L}{2}\right)} \left(\frac{e^{-i\phi} a}{2} (\hat{x} + i\hat{y}) + \frac{e^{i\phi} b}{2} (\hat{x} - i\hat{y}) \right) \quad (3.9)$$

Debido al gran numero de términos se simplifico un poco agrupando y nombrando las siguientes variables: $n = \frac{1}{2}(n_+ + n_-)$, $b_I = \frac{1}{2}(b_{i+} + b_{i-})$, $b_R = \frac{1}{2}(b_{R+} + b_{R-})$, $\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_+ + \alpha_-)$. Por ultimo, el desfase ϕ que se genera se expresa de esta manera:

$$\phi = \frac{\omega}{2c}(\Delta n L + \Delta b_R) - i\left(\frac{L}{4}\Delta\alpha + \frac{1}{2}\Delta b_I\right) \quad (3.10)$$

con : $\Delta n = n_+ - n_-$, $\Delta b_R = b_{R+} - b_{R-}$, $\Delta\alpha = \alpha_+ - \alpha_-$, $\Delta b_I = b_{i+} - b_{i-}$

Lo que se puede medir en el laboratorio es la intensidad de la luz por esto es necesario sacar esta cantidad. Para esto es necesario sacar el cuadrado del campo eléctrico debido a que es proporcional a la intensidad $I \propto E^2$. Para esto se debe sacar el complejo conjugado del campo para cada componente. Al realizar este calculo la intensidad de la componente x queda de la siguiente manera:

$$I_x = \frac{E^2}{16} e^{-2b_i - \alpha L} 2 \left(e^{\frac{L}{2}\Delta\alpha + \Delta b_i} + i e^{-i\frac{\omega}{c}(\Delta n L + \Delta b_R)} - i e^{+i\frac{\omega}{c}(\Delta n L + \Delta b_R)} + e^{-\frac{L}{2}\Delta\alpha + \Delta b_i} \right) \quad (3.11)$$

Y la intensidad en y se escribe como:

$$I_y = \frac{E^2}{16} e^{-2b_i - \alpha L} 2 \left(e^{\frac{L}{2}\Delta\alpha + \Delta b_i} - i e^{-i\frac{\omega}{c}(\Delta n L + \Delta b_R)} + i e^{+i\frac{\omega}{c}(\Delta n L + \Delta b_R)} + e^{-\frac{L}{2}\Delta\alpha + \Delta b_i} \right) \quad (3.12)$$

Debido a que se quiere ver la diferencia entre la absorción de una polarización con respecto a la otra, se debe hacer la diferencia entre las intensidades de cada componente $I_{signal} = I_y - I_x$ la cual queda:

$$I_{signal} = \frac{E_0^2}{16} e^{-2b_i - \alpha L} 4 \left(i e^{+i\frac{\omega}{c}(\Delta n L + \Delta b_R)} - i e^{-i\frac{\omega}{c}(\Delta n L + \Delta b_R)} \right) \quad (3.13)$$

Todas las constantes se meten en un termino inicial llamado I_0 , el cual es la intensidad inicial del haz de prueba y la parte imaginaria de la ecuación se puede escribir en un solo termino como :

$$I_{signal} = -I_0 e^{-2b_i - \alpha L} \sin\left(\frac{\omega}{c}(\Delta n L + \Delta b_R)\right) \quad (3.14)$$

Esta ecuación es muy similar a la presentada en [14]. La diferencia es que los autores toman la polarización del haz de prueba mas general. Esto hace que salga un ángulo de rotación cuyo máximo es $\frac{\pi}{4}$. En este calculo se escoge desde principio que la polarización del haz de prueba sea a $\frac{\pi}{4}$, entonces ya se esta considerando el caso máximo. EL ángulo de desfase generado por el gas atómico entre las dos intensidades como se ve en la ecuación (3.7) es muy pequeño. Adicionalmente, el otro desfase generado por la diferencia entre presiones es aun mas pequeño de tal manera que se puede aproximar el $\sin(\theta) \approx \theta$. Es más, se puede despreciar el desfase generado por la diferencia entre presiones debido a su diferencia significativa con el otro [9]. La intensidad de la señal queda así:

$$I_{signal} = -I_0 e^{-2b_i - \alpha L} \frac{\omega}{c} (\Delta n L) \quad (3.15)$$

La diferencia entre los índices de refracción toma la forma de $\Delta n = \frac{c}{\omega} \Delta \alpha_0 \frac{x}{1+x^2}$ debido a la relación de dispersión de "Kramers–Kronig"[9]. Donde $x = \frac{\omega_0 - \omega}{\Gamma/2}$ que es la escala de *Detuning* en unidades de el tiempo de vida de la transición Γ [4, 14] y el $\Delta \alpha_0$ es la máxima diferencia de la absorción en el centro de la señal. La señal final se expresa de la siguiente manera:

$$I_{signal} = -I_0 e^{-2b_i - \alpha L} (\Delta \alpha_0 \frac{x}{1+x^2}) \quad (3.16)$$

La forma de esta señal es de tipo dispersión la cual la hace ideal para ser utilizada en estabilizar la frecuencia de un laser [14].

4

Metodología

4.1. Estudio teorico

Para entender y comprender los diferentes fundamentos se utilizo el libro guía de *Laser Spectroscopy Demtronder* [9], el cual cuenta con todos los principios básicos en cuanto la espectroscopia atómica en diferentes materiales. La sección que se tome en cuenta es *Nonlinear spectroscopy* debido a que la espectroscopia de polarización es un proceso de absorción no lineal, el cual la potencia del haz afecta la muestra atómica y hace que pueda ser saturada. Después, se leyó el artículo científico de *Polarization spectroscopy of a closed atomic transition: applications to laser frequency locking* [14] debido a que en este se realizar un calculo similar al de este proyecto y un análisis experimental. Por ultimo, se utilizo la tesis de Juan I. Martinez [4] para poder comparar resultados y conseguir valores importantes para este trabajo como los valores teóricos de anisotropía de cada transición atómica.

4.2. Simulación

Para realizar ña simulacion de la señal, se utiliza el lenguaje de programación Python debido a su facilidad en usar herramientas matemáticas y gráficas. La herramienta para realizar las operaciones matemáticas es Numpy ya que es fácil de tratar con listas y poder aplicar operaciones. La otra herramienta para realizar las gráficas es Mathplotlib, la cual permite utilizar listas para realizar diferentes gráficas en 2D y 3D. El programa para realizar la simulación fue *Spyder anaconda*, el cual permite fácilmente la creación y modificación de código según la necesidades del usuario.

5

Resultados

5.1. Simulación de la señal de anisotropía

Para poder simular la señal de anisotropía se debe utilizar la intensidad teórica que se muestra en la ecuación (3.4). Este espectro solo es para una transición atómica, entonces para tener en cuenta las demás transiciones se deben sumar cada una de ellas. Además, teóricamente hay un factor promedio de anisotropía $\bar{A}_{F=4 \rightarrow F'}$, el cual se puede calcular según el tiempo en que la luz interactúa con los átomos y como se distribuye las poblaciones de estos [4]. Este factor es proporcional a la diferencia de absorción $\bar{A} \propto \Delta\alpha_0$ por ende, se utiliza $\bar{A}_{F=4 \rightarrow F'}$ ya que en la literatura se encuentra registrados los valores de cada transición. Por lo tanto, la señal de anisotropía queda de la siguiente manera:

$$A(\omega) = \sum_{F=4 \rightarrow F'}^{F'=3,4,5} \bar{A}_{F=4 \rightarrow F'} \left(\frac{\Delta\omega\Gamma/2}{(\Gamma/2)^2 + (\Delta\omega)^2} \right) \quad (5.1)$$

Pero a esta ecuación le falta unos términos. Estos términos son las frecuencia *crossover* debido a la técnica de espectroscopia que se utiliza. Al utilizar dos haces para poder realizar la espectroscopia de polarización y librarnos del efecto doppler, se generan unas transiciones de *crossover* o transiciones cruzadas. Esto pasa cuando la frecuencia de la radiación es justamente el promedio de dos frecuencias de transición:

$$\omega_{\text{crossover}}^{F=1 \rightarrow F'=2}_{F=1 \rightarrow F'=1} = \frac{\omega_{F=1 \rightarrow F'=1} + \omega_{F=1 \rightarrow F'=2}}{2} \quad (5.2)$$

En esta frecuencia algunos átomos hacen la transición $F = 1 \rightarrow F' = 1$ y otros a $F = 1 \rightarrow F' = 2$ por lo tanto se debe tener en cuenta estas frecuencias en la señal de anisotropía. Para esto, solo se debe sumar a la ecuación (5.1). Los valores anisotropía que toman estas transiciones son simplemente el promedio de la anisotropía entre las transiciones cruzadas:

$$\bar{A}_{\text{crossover}}^{F=1 \rightarrow F'=2}_{F=1 \rightarrow F'=1} = \frac{\bar{A}_{F=1 \rightarrow F'=1} + \bar{A}_{F=1 \rightarrow F'=2}}{2} \quad (5.3)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta las tres transiciones cruzadas generadas por las tres transiciones hiperfinas de la línea D2 dos del Cesio, la expresión toma la forma de la siguiente

manera:

$$A(\omega) = \sum_{F=4 \rightarrow F'_j}^{F'(j=3,4,5)} \bar{A}_{F=4 \rightarrow F'_j} \left(\frac{\Delta\omega_j \Gamma/2}{(\Gamma/2)^2 + (\Delta\omega_j)^2} \right) + \sum_{F=4 \rightarrow F'_i}^{F'(i=43,44,45)} \bar{A}_{F=4 \rightarrow F'_i} \left(\frac{\Delta\omega_i \Gamma/2}{(\Gamma/2)^2 + (\Delta\omega_i)^2} \right) \quad (5.4)$$

Con la ecuación (5.4) se puede hacer la simulación de la señal. Los valores de las anisotropías de cada transición se sacaron de la tesis de grado de Juan Ignacio Martínez [4] y las frecuencias utilizadas se sacaron de [6]. Los valores están registrados en la siguiente tabla:

Transición	Frecuencia angular THz	Valor promedio de Anisotropía
$F_4 \rightarrow F'_3$	351,721961	-7/72
$F_4 \rightarrow F'_4$	351,721508	-7/24
$F_4 \rightarrow F'_5$	351,721357	20/18

Cuadro 5.1: Valores de la anisotropía de cada transición atómica de la línea D2 del Cesio tomado de [4, 6].

La gráfica obtenida por la simulación se puede observar en la Fig. 5.1. Donde las líneas punteadas representan la frecuencia de las transiciones hiperfinas de la línea D2 del Cesio. Se logra apreciar que la señal de dispersión de la transición $F_4 \rightarrow F'_5$ posee mas anisotropía que las otras. Esto se debe a que la distancia entre los niveles de energía entre F_4 y F_5 es mas cercana que las otras, haciendo que los electrones no caigan a otros niveles de energía y mayormente estén en esta transición [14].

Simulación de la señal de Espectroscopia de polarización $F_4 \rightarrow F'_5$

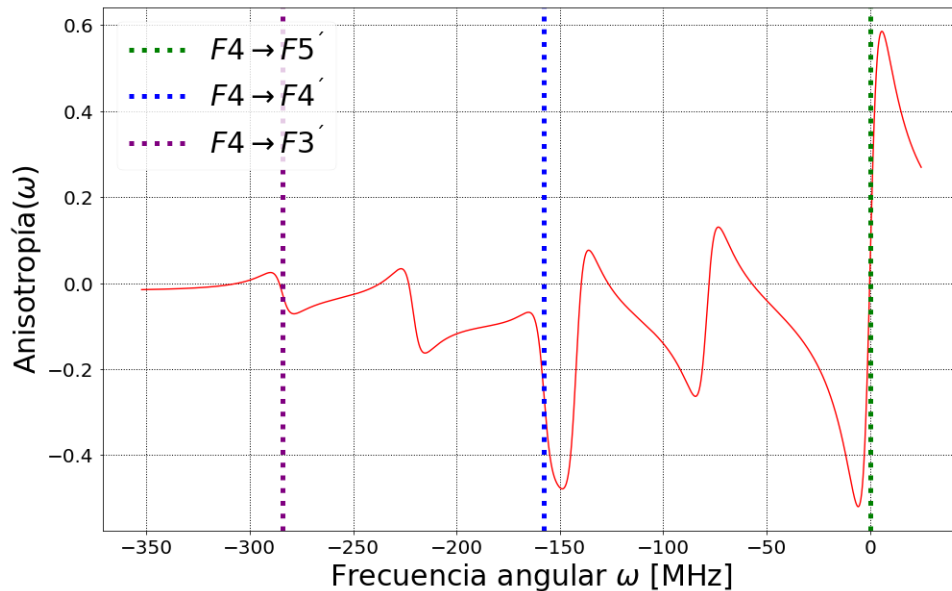


Figura 5.1: Señal simulada de la anisotropía generada por la celda de cesio al ser un medio anisotrópico. Donde se observan las transiciones hiperfinas de la línea D2 del cesio y con las transiciones cruzadas o *crossover* generado por la técnica de espectroscopia.

5.2. Comparación experimental

La señal simulada en al Fig.5.1 se puede comprobar experimental mediante el montaje experimental en la Fig. 5.2. En la figura se utiliza un láser 852 nm con una rejilla de difracción para conseguir un láser de una sola frecuencia. La rejilla se encuentra sobre un elemento piezo-eléctrico (piezo) para controlar la frecuencia de la luz por medio del ángulo de la misma. Se usan espejos dieléctricos (tholabs E03) denominados M1-M11. Un espejo especial espejo dicroico (ED) se usa para refleja un 5 % de la luz incidente la cual es acoplada a una fibra mono modo. Esta fibra esta conectada a un medidor de longitud de onda (Wavelength meter High Finesse WS200-6). La intensidad de la luz en el experimentos es controlada por medio de una lamina de media onda ($\lambda/2$) y un divisor de haz de polarización (PBS) que refleja o transmite la luz con intensidades diferentes dependiendo la polarización de este. Con este PBS se obtiene los dos haces el de prueba y el de bombeo. El de bombeo es alineado de tal manera que se encuentre en con el haz de de prueba en dirección contraria. En ambos haces se utilizan laminas de ondas para rotar la polarización de de los haces y conseguir la deseada, para el haz de bombeo se utiliza un $\lambda/4$ para circular y el haz de prueba una de $\lambda/2$ para una polarización diagonal. El es haz de prueba es reflejado por el prisma y enviado a la celda de cesio (Thorlabs GC25075-CS). Un foto diodo (Thorlabs FDG03) se encarga de medir la luz transmitida por la celda como función del la frecuencia de la luz láser y obtener la señal de anisotropía.

Montaje de espectroscopia de polarización

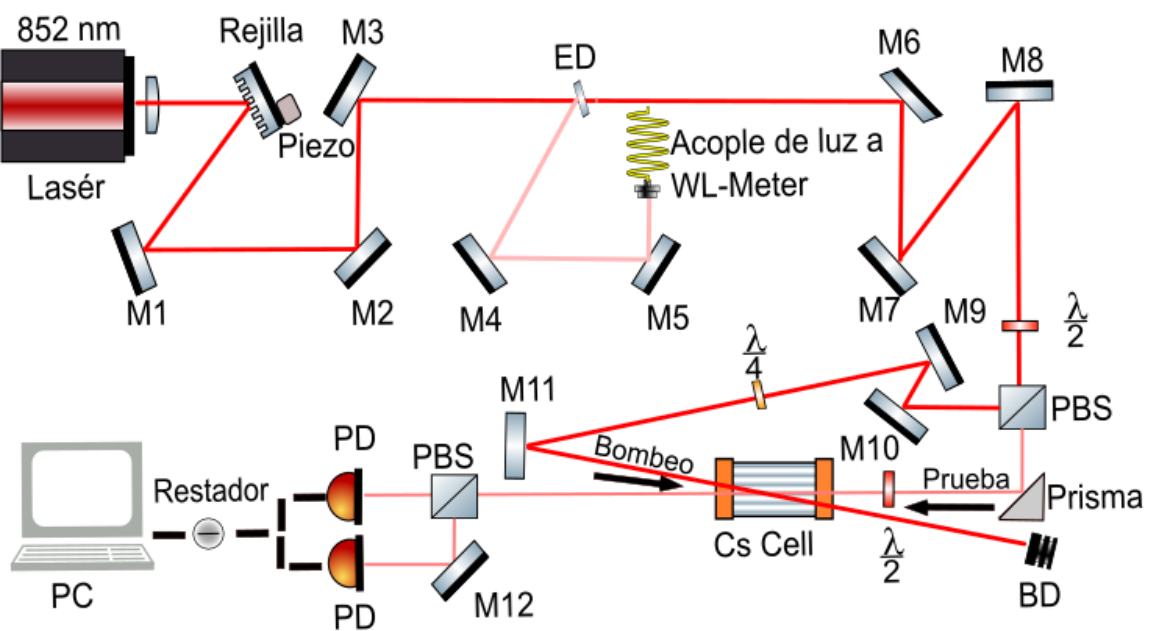


Figura 5.2: Montaje experimental de espectroscopia de polarización. Donde se utiliza un diodo láser con una rejilla de difracción para obtener una cavidad. La luz del láser es alineada por un sistema de espejos M1-M11 y medida con un acople de fibra óptica. Después, se divide en dos haces con un PBS con intensidades diferentes con el control de una lamina de media onda. Se utilizan otras laminas de onda para tener la polarización deseada y ser utilizada para la anisotropía. El haz menos intenso es usado como prueba y es el que es medido por un foto diodo.

La señal que se obtuvo gracias al montaje experimental se encuentra en la Fig 5.3. En esta señal los signos están al revés que la señal simulada 5.1. Esto se debe a que experimentalmente se restaron los haces de luz al revés. Pero, se ve claramente la señal de dispersión que debería dar. Adicionalmente, la anisotropía generada por la transición $F_4 \rightarrow F'_5$ es la mas grande en comparacion a las otras y concuerda con la teoría.

Espectroscopia de polarizacion

Espectroscopia de polarización de atomo de Cesio en la transición D2 en $F_4 \rightarrow F'_5$

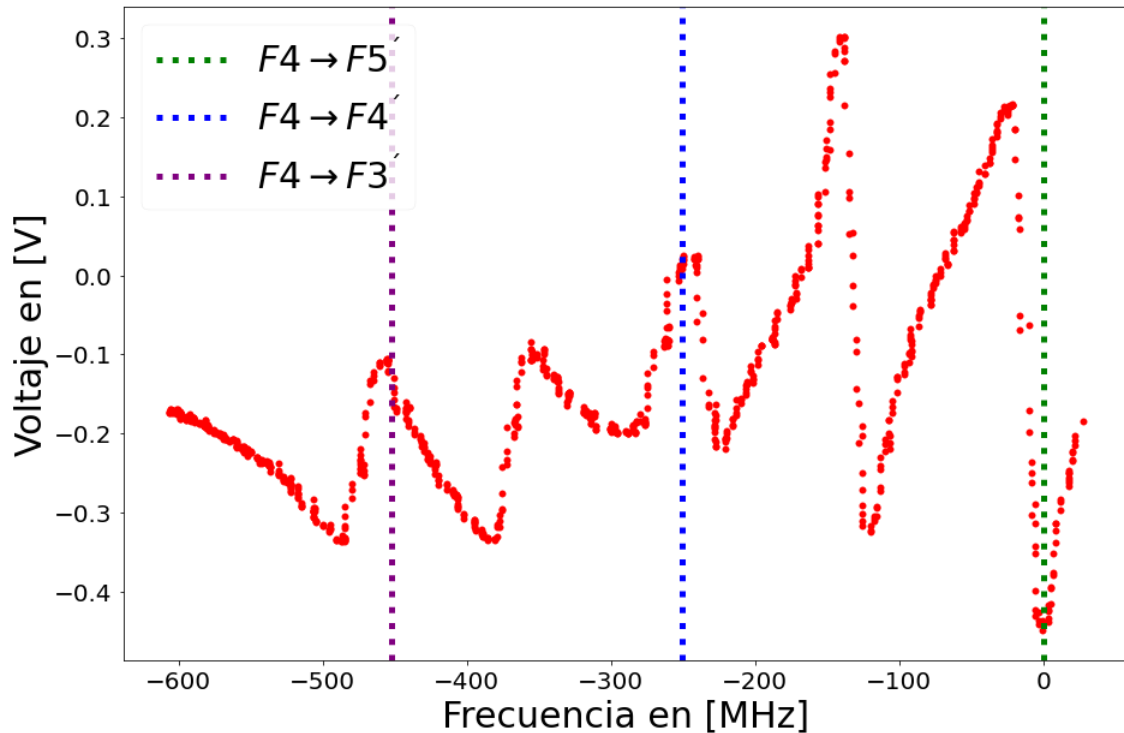


Figura 5.3: Señal de espectroscopia de polarización obtenida por un restador de la transición D2 del Cesio. Donde se puede observar cada transición hiperfinas. Centrada en la frecuencia donde se desea estabilizar.

6

Conclusiones

En este proyecto se trato de investigar y comprender cuales eran los fenómenos fundamentales de la técnica de espectroscopia de polarización. Además, de simular la señal de anisotropia que se genera al aplicar esta técnica espectroscópica. Por lo tanto, se puede concluir varias cosas. La primera, se pudo entender el proceso de *Optical Pumping* generado por las reglas de selección. Las cuales dependían de la polarización de la luz y se observan en la Fig. 3.3. La segunda, es la compresión del calculo teórico para obtener la señal de anisotropia. Que fue obtenida de la interacción de una fuente de luz polarizada con un medio anisotrópico y dio como resultado la ecuación (3.4). El tercero, es la simulación adquirida por la expresión (5.4). Donde se puede observar en la Fig. 5.1 y da muy similar a la reportada en la literatura [4, 9, 14]. Por ultimo, se puedo comprobar experimentalmente la similitud entre la señal simulada y la experimental con una ligeras diferencias debido a que la resta de las intensidades en el montaje experimental. Pero, se observa perfectamente el comportamiento de dispersión que se debía conseguir. Por ende, en este proyecto se pudieron cumplir todos los objetivos propuesto y se pudo obtener una señal para poder estabilizar la frecuencia de un láser a futuro.

Consideraciones éticas

En este trabajo se realizó un estudio experimental sobre espectroscopia de polarización en átomos de Cesio. En el cual se citan correctamente todas las fuentes utilizadas en el proyecto. Los datos experimentales se presentan con la veracidad y rigurosidad propias del trabajo científico. En el desarrollo de este proyecto no se realiza ningún estudio con poblaciones humanas ni con animales y no muestra algún tipo de conflicto de intereses. Por lo tanto, no se considera para ser revisado por el comité de ética de la facultad de ciencias.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda del grupo de Óptica Cuántica de la universidad de los andes. En especial a la profesora Mayerlin Nuñez por su apoyo, confianza y paciencia conmigo en este trabajo. Además, de los profesores Alejandra Valencia y Alonso Botero por las preguntas repetitivas en los seminarios que me generaban nuevas ideas para mejorar mi trabajo. A mis compañeros de laboratorio del Q402 por apoyarme en todo y ayudarme a pasar el malo rato que puede generar la investigación. Sobretudo a Michael y José por estar siempre conmigo en el Q506 y ayudarme en lo que podían cuando no entendía algo del tema. También, quiero dar gracias a Juan Ignacio por estar conmigo en cualquier duda sobre el tema tanto en la parte teórico como experimental.

Para finalizar, quiero agradecer a mi familia y amigos mas cercanos por el apoyo incondicional conmigo.

Gabriel
Bogotá, 2023.

Referencias

1. Stuhler, J. Quantum Optics route to market. *Nature Physics* **11**, 293-295 (2015).
2. Nichol, B. C. *et al.* An elementary quantum network of entangled optical atomic clocks. *Nature* **609**, 689-694 (2022).
3. Mitchell, M. W. y Palacios Alvarez, S. Colloquium : Quantum limits to the energy resolution of magnetic field sensors. en. *Rev. Mod. Phys.* **92** (abr. de 2020).
4. Bustamante, M. *Viabilidad de medir campos magnéticos externos mediante espectroscopia de polarización del átomo de Cesio* (2022).
5. Bauch, A. Caesium atomic clocks: function, performance and applications. *Meas. Sci. Technol.* **14**, 1159-1173 (ago. de 2003).
6. Steck, D. A. *Cesium D Line Data* <https://steck.us/alkalidata/cesiumnumbers.pdf>. Accessed: 2023-4-16.
7. Essen, L. y Parry, J. V. L. An atomic standard of frequency and time interval: A caesium resonator. en. *Nature* **176**, 280-282 (ago. de 1955).
8. Foot, C. J. *Atomic physics* (Oxford University Press, 2012).
9. Demtröder, W. *Laser Spectroscopy 2: Experimental Techniques* ISBN: 9783662446416. <https://books.google.com.co/books?id=13gaBgAAQBAJ> (Springer Berlin Heidelberg, 2015).
10. Yoshikawa, Y., Umeki, T., Mukae, T., Torii, Y. y Kuga, T. Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor. en. *Appl. Opt.* **42**, 6645-6649 (nov. de 2003).
11. Metcalf, H. J. y der, S. P. v. *Laser cooling and trapping* (Springer, 2002).
12. Nieto, M. *Estabilización en frecuencia de láser centrado en transición atómica de la línea D2 del cesio* (2020).
13. Cohen-Tannoudji, C., Diu, B. y Laloë, F. *Quantum Mechanics* (Wiley-VCH, 2020).
14. Pearman, C. P. *et al.* Polarization spectroscopy of a closed atomic transition: applications to laser frequency locking. *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **35**, 5141-5151 (dic. de 2002).
15. Collett, E. *Field Guide to Polarization* (SPIE, 2005).