

A Study of the Effect of Mueller Matrices and Stokes Vectors on Calculating the Polarization Parameters of the Linear, Circular, and Elliptical Light Field

Dr. Ghayath Yassin*
Dr. Mahmoud Ahmed**
Imad Abdullah***

(Received 7 / 9 / 2023. Accepted 4 / 1 / 2024)

□ ABSTRACT □

This research presents an analytical investigation into the transformation of the polarization wave equation into the parametric form in Stokes parameters, which in turn determines the distinctive polarization state of the material. The parameters were further transformed into the generalized matrix form with variable components. The general Mueller-Stokes matrix was solved for specific cases, considering specific ranges for variables such as density and temperature. These variables play a pivotal role in computing the variables of physical phenomena, such as optical activity. Our results exhibit a consistent alignment with experimental and theoretical outcomes in various studies in this field.

Keywords: Mueller – Stokes Matrices-Optical Activity-polarization of light field.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Latakia, Syria. ghayath.yassin@tishreen.rdu.sy

**Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Latakia, Syria. mahmoud.ahmed@tishreen.rdu.sy

***Postgraduate student (Master), Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Latakia, Syria. emad.abdulah@tishreen.rdu.sy

دراسة أثر مصفوفات مولر ومتجهات ستوكس على حساب بارامترات الاستقطاب للحقل الضوئي الخطي، الدائري، والإهليلجي

د. غياث ياسين *

د. محمود أحمد **

عماد عبدالله ***

(تاريخ الإيداع 7 / 9 / 2023. قُبِلَ للنشر في 4 / 1 / 2024)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة تحليلية لتحويل المعادلة الموجية الأستقطابية الى الشكل البارامتري في معاملات ستوكس التي بدورها تحدد الحالة الأستقطابية المميزة للمادة، كما تم تحويل المعاملات الى الشكل المصفوفي العام بمركبات متغيرة. تم حل مصفوفة مولر-ستوكس العامة في حالات خاصة بأخذ مجالات محددة لتغير المتحولات مثل الكثافة ودرجة الحرارة. تلعب هذه المتحولات دوراً محورياً في حساب متغيرات ظواهر فيزيائية مثل الفعالية الضوئية. نلاحظ تطابق نتائجنا مع نتائج تجريبية ونظرية في بحوث عديدة في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: مصفوفات مولر - ستوكس، الفعالية الضوئية، استقطاب الحقل الضوئي.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. ghayath.yassin@tishreen.rdu.sy

** أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. mahmoud.ahmed@tishreen.rdu.sy

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

emad.abdulah@tishreen.rdu.sy

مقدمة:

يتميز الضوء بأنه عبارة عن موجة تنتشر في الخلاء بسعة محددة وتنتشر في الأوساط المختلفة حيث تتغير سرعة وطول الموجة مع بقاء التردد ثابتاً، كما يتميز الضوء بخاصية الاستقطاب والترابط اللتين تعطينان للموجة الضوئية أهمية بالغة في التطبيقات مثل تطبيقات الفعالية الضوئية في صناعة الأدوية والحفاظ على المواد الغذائية وتفحص جودته، وكذلك في تطبيقات الأجهزة الليزرية بمختلف فروعها. من هنا أتت أهمية دراسة خواص الموجة والطاقات الرياضية والحاسوبية لتحديد اتجاه وشدة وطور حلول المعادلة الموجية الاستقطابية التي تنتج من هذه الحلول الرياضية [1]. وضع ستوكس طريقة رياضية محكمة لحل المعادلة العامة الاستقطابية بتجميع الحدود فيها على شكل مؤثرات سميت بارامترات ستوكس، كما صيغت لاحقاً نتائج هذا التمثيل بمصفوفات سميت مصفوفات مولر-ستوكس [3,14]. كل عنصر أو مصغر (*Minor*) من هذه المصفوفات له معناً فيزيائياً خاصاً ويحدد خواص ظاهرة فيزيائية محددة [14,15].

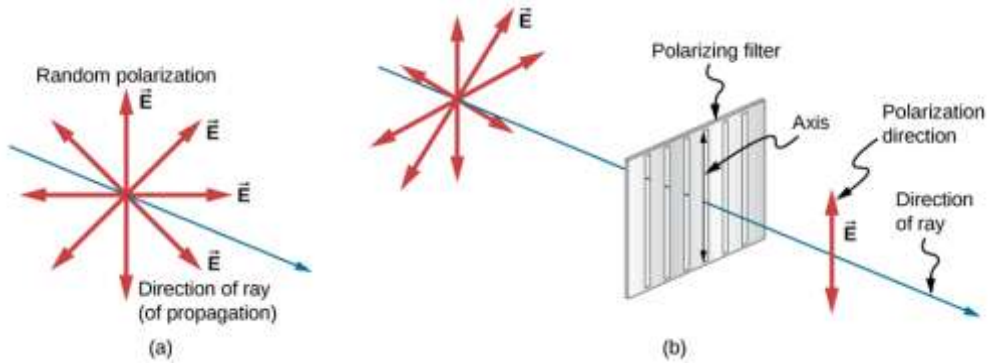
أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة أنواع الاستقطاب بطريقة مصفوفات مولر ومتجهات ستوكس وتبيان إمكانية تحديد نوع الحالة الاستقطابية تماماً بهذه الطريقة. تأتي أهمية البحث من الحاجة المهمة لتحديد حالات الاستقطاب للموجة الضوئية ومن ثم تحديد خواص المادة قيد الدراسة. يحدد اتجاه الاستقطاب في ظاهرة الفعالية الضوئية كون المادة المدروسة يمينية أو يسارية، هذا يعني أنه لا بد من حل مصفوفة مولر-ستوكس وإيجاد بارامترات المعادلة الموجية الاستقطابية وهنا تكمن أهمية هذا البحث الذي قمنا به وخاصة في مجال ظاهرة الفعالية الضوئية والليزر.

الاستقطاب: Polarization

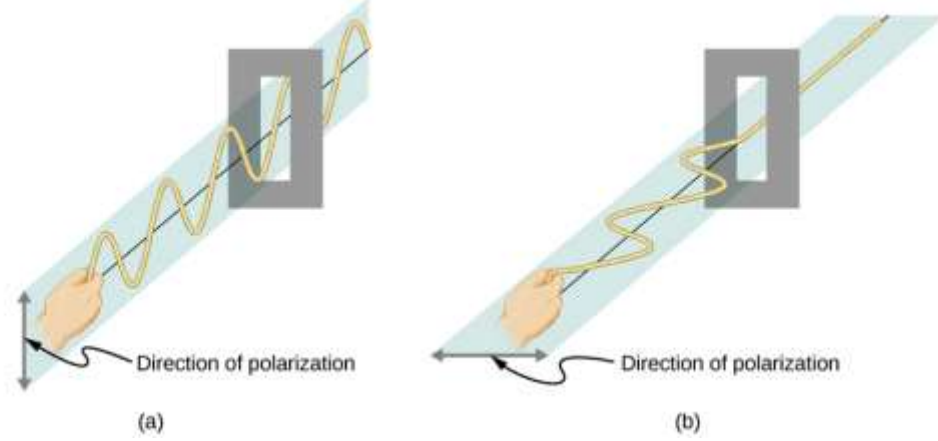
يعرف استقطاب الضوء على أنه الجهة التي يهتز بها متجه الحقل الكهربائي ونميز حالات خاصة للاستقطاب تكون غالباً مهمة في التطبيقات الصناعية وهي كثيرة، كما يختلف مفهوم استقطاب الضوء عن مفهوم الاستقطاب في علوم أخرى مثل استقطاب الذرات والجزيئات وثنائي القطب الكهربائي والمغناطيسي وغيرها من المفاهيم التي يدل عليها هذا المصطلح [2].

تصدر الشمس كما نعلم الضوء في كافة الاتجاهات وبالتالي يكون اتجاه الحقل الكهربائي عشوائياً كما يوضح الشكل (1)، حيث يكون الضوء في هذه الحالة غير مستقطباً:



الشكل (1): a- ضوء غير مستقطب، b- ضوء مستقطب.

ويمكن أن نقطب الضوء أي نجعله مستقطباً عن طريق وضع مقطب polaroid في طريقه، وقد تم تصنيعه من قبل E.H.Land في العام 1938. يسمح هذا المقطب لمركبة واحدة من الضوء بالمرور عبره وفق اتجاه محدد ويمتص المركبات الأخرى المعامدة لجهة الاستقطاب، وهذه المقطبات تكون إما مستويات عاكسة أو شفافة لمرور الضوء أو مواد أو بلورات تمرر الضوء بطرق محددة وقد تكون سائل. يبين الشكل (2) عملية توليد اهتزاز مستقطب [2,3].



الشكل (2): الشكل البسط لتوليد اهتزاز مستقطب.

سوف نستخدم في هذا البحث مصفوفات جون - مولر لإيجاد مركبات الحقل الكهربائي ولدراسة الأنواع المختلفة للاستقطاب وفق نموذج رياضي يعتمد الوصف المصفوفي للأشعة.

أنواع الاستقطاب: Types Of Polarization

يصنف استقطاب الضوء إلى ثلاث أنواع أساسية وهي كما يلي:

1. الاستقطاب الخطي: linear Polarized

حيث يهتز الحقل الكهربائي المركب الرئيس في الموجة الضوئية وفق مستقيم في مستوي الاهتزاز ونسمي قيمة هذا المستقيم باتجاه الاستقطاب. أغلب المنايع الضوئية في الطبيعة تشع ضوءاً غير مستقطب، فالضوء على العموم مركب من قطار من الأمواج تهتز وتنتشر في الوسط بشكل عشوائي.

2. الاستقطاب الدائري: Circular Polarized

عندما ترسم نهاية متجه الحقل الكهربائي مساراً دائرياً نقول عن الاستقطاب أنه دائري.

3. الاستقطاب القطعي الاهليلجي: Ellipse Polarized

عندما ترسم نهاية متجه الحقل الكهربائي قطع ناقص نسمي الاستقطاب اهليلجياً [1-7].

□ نأخذ فقط اتجاه الحقل الكهربائي للتعبير عن الاستقطاب نظراً لأن شدة الحقل الكهربائي بالقيمة المطلقة أكبر بكثير من شدة الحقل المغناطيسي الذين يرتبطان بالعلاقة:

$$\frac{|E|}{|B|} = C$$

حيث C سرعة الضوء في الخلاء.

يتم تمثيل استقطاب الحزمة الضوئية بمتجه الحقل الكهربائي الخاص بها، فإذا اعتبرنا z اتجاه الانتشار يكون متجه الاستقطاب في المستوي (x-y)، ويمكن التعبير عن متجه الاستقطاب بالمعادلة:

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_x(t) + \vec{E}_y(t) \\ = E_x \cos(\omega t + \delta_x) \vec{e}_x + E_y \cos(\omega t + \delta_y) \vec{e}_y \quad (1)$$

حيث E_x, E_y : سعات مركبات الحقل الكهربائي وفق المحورين x, y على التوالي.
 \vec{e}_x, \vec{e}_y : متجهات الوحدة على المحورين x, y على التوالي.
 ω : التردد الزاوي. δ_x, δ_y : طور المجال الكهربائي في اتجاهات المحورين x, y على التوالي. $\delta = \delta_x - \delta_y$:
 فرق الطور [8-11].

- يقسم الضوء المستقطب إلى ثلاث مجموعات حسب قيم E_x, E_y, δ (خطي، دائري، اهليلجي).
- لا يملك الضوء المستقطب خطياً فرق طور بين مركبات الحقل الكهربائي x, y (أي $\delta = 0$).
 - بينما يملك الضوء المستقطب دائرياً فرق طور ثابت وسعتي مركبات الحقل الكهربائي هي نفسها $\{E_x = E_y, \delta = 90^\circ\}$
 - ويكون الضوء مستقطب إهليلجياً من أجل جميع القيم الأخرى لـ E_x, E_y, δ .

طرائق البحث ومواده:

يقوم الوصف الرياضي للاستقطاب الضوئي (reflections) (Mathematical describing of light) وخاصة عندما ندرس الاستقطاب الناتج عن الانعكاس لعدة مرات (multiple) reflections على نموذج رياضي وضعه ستوكس Stokes وهو نموذج شعاعي يتم تمثيل الأشعة وفق مصفوفات تسمى مصفوفات مولر (Mueller matrices)، هذا الوصف الرياضي للاستقطاب يمكننا من حساب بارامترات ستوكس والتي بقياسها يتم قياس الشدة الضوئية وليس السعة. وتكون الشدة هي المقدار الملاحظ (observable quantities) ويهدف القيام بذلك سوف نكتب الحقل الكهربائي كما يلي [8,12,13]:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \quad (2)$$

وتكون المعادلة الرياضية العامة للاستقطاب الاهليلجي انطلاقاً من المعادلة (2) وذلك بعد تجميع المركبات وجمعها نحصل على:

$$\frac{E_x^2(z, t)}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2(z, t)}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \delta \quad (3)$$

تعرف هذه المعادلة بالمعادلة العامة للاستقطاب وهي تضمن جميع المعلومات المتعلقة باستقطاب الموجة الضوئية. عند حساب المقادير الفيزيائية مثل الشدة وحالة الاستقطاب نأخذ القيم الوسطية للمعادلة (3) والتي تكتب كما يلي:

$$\frac{\langle E_x^2(z, t) \rangle}{E_{0x}^2} + \frac{\langle E_y^2(z, t) \rangle}{E_{0y}^2} - 2 \frac{\langle E_x(z, t)E_y(z, t) \rangle}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \delta \quad (4)$$

بضرب طرفي المعادلة (4) بالمقدار $4E_{0x}^2E_{0y}^2$ نحصل على المعادلة [5]:

$$4E_{0y}^2 \langle E_x^2(z, t) \rangle + 4E_{0x}^2 \langle E_y^2(z, t) \rangle - 8E_{0x}E_{0y} \langle E_x(z, t)E_y(z, t) \rangle \cos \delta \\ = (2E_{0x}E_{0y} \sin \delta)^2 \quad (5)$$

بأخذ المتوسط الزمني لهذه الحدود نحصل على ما يلي:

$$\langle E_x^2(z, t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0x}^2$$

$$\langle E_y^2(z, t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0y}^2$$

$$\langle E_x(z, t) E_y(z, t) \rangle = \frac{1}{2} E_{0x} E_{0y} \cos \cos \delta$$

حيث استخدمنا العلاقة التكاملية التالية:

$$\langle E_i(z, t) E_j(z, t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E_i(z, t) E_j(z, t) dt$$

حيث: T : مدة أو زمن القياس $i, j = x, y$

بتعويض هذه القيم في المعادلة (5) نجد أن:

$$2E_{0y}^2 E_{0x}^2 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos \cos \delta)^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin \sin \delta)^2 \quad (6)$$

بإضافة وطرح المقدار $E_{0x}^4 + E_{0y}^4$ من الطرف اليساري من المعادلة (6) نجد:

$$E_{0x}^4 + E_{0y}^4 + 2E_{0y}^2 E_{0x}^2 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 - E_{0x}^4 - E_{0y}^4 - (2E_{0x} E_{0y} \cos \cos \delta)^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin \sin \delta)^2$$

أو

$$(E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^2 - (E_{0x}^2 - E_{0y}^2)^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos \cos \delta)^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin \sin \delta)^2 \quad (7)$$

سوف نتبع تمثيل ستوكس حيث أستخدم المصطلحات الآتية لكتابة الاختصارات الآتية وهي مسمّاة باسمه معاملات

ستوكس (Stokes, s parameters).

$$s_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2$$

$$s_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2$$

$$s_2 = 2E_{0x} E_{0y} \cos \cos \delta$$

$$s_3 = 2E_{0x} E_{0y} \sin \sin \delta$$

تسمى المعاملات s_0, s_1, s_2, s_3 بارامترات ستوكس للاستقطاب (*Stokes polarization parameters*) من أجل

موجة مستوية. [4,8,14]

وبعد تعويض هذه البارامترات في المعادلة (7) تصبح المعادلة بالشكل:

$$s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \quad (8)$$

نستطيع حساب شدة الموجة كمقدار حقيقي من المعادلة (8). حيث:

s_0 - يمثل الشدة الكلية للحقل الكهربائي (الموجة).

s_1 - يصف أرجحية (*preponderate*) الشدة لضوء مستقطب خطياً بشكل افقي على ضوء مستقطب خطياً بشكل عمودي.

s_2 - يصف أرجحية (*preponderate*) الشدة لضوء مستقطب 45^0 فوق الضوء المستقطب خطياً بزواوية سالبة

مقدارها 45^0 .

s_3 - يصف أرجحية (*preponderate*) الشدة لضوء مستقطب دائرياً يمينياً على ضوء مستقطب دائرياً يسارياً. [13-15]

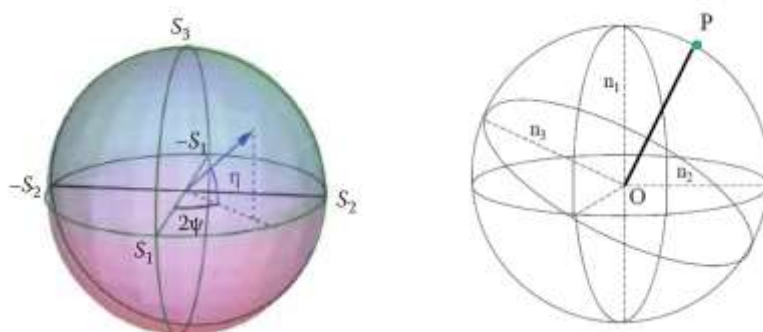
نلاحظ من العلاقة (8) التي تربط بارامترات ستوكس مع بعضها إنها عبارة عن معادلة كرة في الفراغ، قام

العالم بوانكاريه برسم هذه الكرة حيث أن محاور الكرة هي نفسها بارامترات ستوكس s_1, s_2, s_3 ونصف قطرها عبارة

عن s_0 ، كما هو موضح في الشكل (3).

يمثل سطح كرة بوانكاريه جميع حالات الاستقطاب التام الممكنة، بالتالي فإن الانتقال من نقطة إلى أخرى على سطح كرة بوانكاريه هو عبارة عن الانتقال من حالة استقطاب إلى حالة ثانية، وهذا ما يحدث عند مرور شعاع الضوء المستقطب عبر الجملة الضوئية، وهذه هي الآلية المتبعة في بحثنا، حيث أنه عند مرور شعاع الضوء المستقطب عبر المادة الفعالة ضوئياً فإن شعاع الضوء سوف يعاني من تغير في حالة الاستقطاب، أي أنه سوف ينتقل من نقطة على سطح كرة بوانكاريه إلى نقطة ثانية.

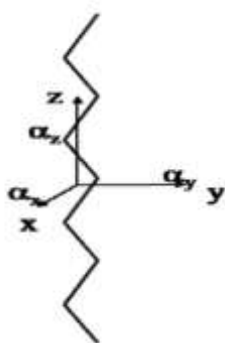
إن مركز كرة بوانكاريه يمثل الضوء غير المستقطب، والمجال من المركز إلى السطح يمثل حالات الاستقطاب الجزئي للضوء، هذا يعني أن جميع الجمل الضوئية يعبر عنها بنقاط من كرة بوانكاريه، يتجدد نوع الاستقطاب بإحداثيات نقطة من هذا السطح. إذا كانت مركبات قرينة الانكسار واحة أي متساوية نقول عن الوسط أنه متجانس المناحي. [8,13-15]



الشكل (3): كرة بوانكاريه.

يمكن تمثيل بارامترات Stokes الأربعة بمتجهات Stokes، والتي تصف الضوء المستقطب والضوء غير المستقطب، حيث تُعرّف بارامترات ستوكس الأربعة، S_0 و S_1 و S_2 و S_3 بواسطة ست قياسات تحدد حالة الاستقطاب يتم الحصول عليها باستخدام مقطبات مثالية [15-8,13]:

$$S = (s_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3) = (P_H + P_V \ P_H - P_V \ P_{45} \ P_R - P_L) = (I \ Q \ U \ V). \quad (9)$$



الشكل(4): يمثل مبدأ الفعالية الضوئية اللامتجانسة على المستوي الجزيئي في البوليمرات.

تمثل سلسلة البوليمر بخط متعرج، الاستقطابية α_z على طول المحور z يمكن أن تكون أكبر أو أصغر من تلك الموجودة على المحور x أو y وهذا يتبع للبوليمر المستخدم.

تُكتب بارامترات Stokes عادةً على شكل متجه S بأربعة عناصر ذات قيم حقيقية. s_0 هي الشدة الضوئية الكلية. S_1 هي مركبة التدفق الأفقي (0 درجة) المستقطب (P_H) مطروحاً منه مركبة التدفق الشاقولي (90 درجة) (P_V). عندما يكون $S_1 = 0$ ، يكون التدفق المقاس من خلال مستقطب خطي أفقي والذي يتم قياسه من خلال مستقطب خطي عمودي متساويين. وبالتالي، يقيس S_1 ارجحية الاستقطاب الأفقي على الاستقطاب العمودي ويكون سالباً إذا كان $P_V > P_H$. وبالمثل، S_2 هي التدفق 45 درجة (P_{45}) مطروحاً منه 135 درجة التدفق (P_{135}). أخيراً، يقيس S_3 الفرق بين التدفق المستقطب دائرياً (P_R) مطروحاً منه (P_L). غالباً ما يتم تسمية بارامترات Stokes (I و Q و U و V)، لا سيما في الاستشعار عن بعد وعلم الفلك.

تصبح العلاقة (9) بعض تعويض مركبات الحقل الكهريائي كما يلي:

$$S = (s_0 \ s_1 \ s_2 \ s_3) \\ = (E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \ 2E_{0x}E_{0y} \ \cos \cos \delta \ 2E_{0x}E_{0y} \\ \sin \sin \delta) \quad (10)$$

نستطيع من هذه العلاقة (10) استنتاج مختلف أنواع الاستقطاب لمركبات الحقل الكهريائي بمعرفة شدة الحقل الكهريائي.

النتائج والمناقشة:

أولاً: الاستقطاب الخطي افقياً (LHP: Linearly Horizontal Polarized Light)

يعبر عن متجه ستوكس للضوء المستقطب خطياً افقياً بالعلاقة:

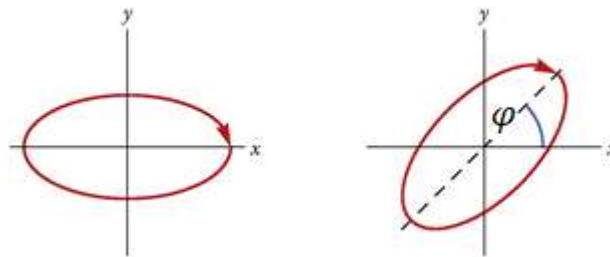
$$S_{LHP} = I_0(1 \ 1 \ 0 \ 0), \quad (11)$$

حيث $I_0 = E_{0x}^2$ تمثل الشدة الكلية.

تتحول متجهات Stokes عندما يتم تدوير حالة الاستقطاب بالنسبة إلى محاور الإحداثيات بواسطة زاوية φ ، كما في الشكل ادناه، حسب العلاقة:

$$S_{ER} = R_M(\varphi) \cdot S \\ = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \cos \cos 2\varphi \ -\sin \sin 2\varphi \ 0 \ 0 \\ \sin \sin 2\varphi \ 2\varphi \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \cdot (s_0 \ s_1 \ s_2 \ s_3) \\ = (s_0 \ s_1 \ \cos \cos 2\varphi - s_2 \ \sin \sin 2\varphi \ s_1 \ \sin \sin 2\varphi + s_2 \\ \cos \cos 2\varphi \ s_3) \quad (12)$$

يشير S_{ER} إلى متجهات Stokes التي تحدد دوران مستوي الاستقطاب الاهليلجي ((rotated ellipse). وبالتالي يتم تدوير متجهات Stokes، فيما يتعلق بنظام الإحداثيات الخاص بها بواسطة المصفوفة $R_M(\varphi)$ (مصفوفة التحويل لستوكس) كما هو موضح في الشكل (5)، أي أن S_{ER} متجه ستوكس لحزمة الخرج يساوي مصفوفة التحويل ضرب متجه ستوكس لحزمة الدخل وهي نفس المعادلة المعتمدة في المرجع [15].



الشكل (5): تغير زاوية مستوي الاستقطاب

Mueller Matrices : مصفوفة مولر :

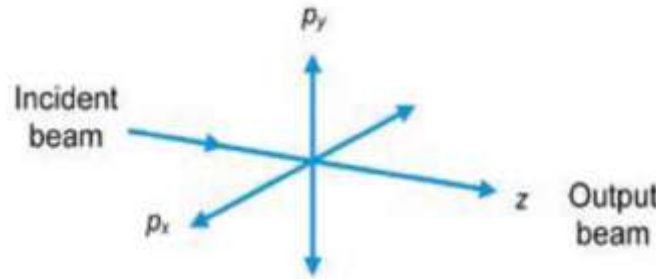
مصفوفة مولر M هي مصفوفة رابعة 4×4 تقوم بتحويل بارامترات ستوكس الداخلة S إلى بارامترات ستوكس الخارجة S' ، عن طريق ضرب متجه المصفوفة كما يلي:

$$\begin{aligned} M.S &= S' \\ &= \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} & m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ & & & & m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} & & & & \end{pmatrix} (s_0 \ s_1 \ s_2 \ s_3) \\ &= (s'_0 \ s'_1 \ s'_2 \ s'_3) \end{aligned} \quad (13)$$

من تعريف المصفوفة - الضرب المتجه ، فإن بارامترات Stokes الخارجة S' هي

$$S' = (s'_0 \ s'_1 \ s'_2 \ s'_3) = \begin{pmatrix} s_0 m_{00} + s_1 m_{01} + s_2 m_{02} + s_3 m_{03} & s_0 m_{10} + s_1 m_{11} + s_2 m_{12} + s_3 m_{13} & s_0 m_{20} + s_1 m_{21} + s_2 m_{22} + s_3 m_{23} \\ s_0 m_{30} + s_1 m_{31} + s_2 m_{32} + s_3 m_{33} & & & \end{pmatrix}$$

يرتبط كل عنصر من عناصر S بالعناصر الأربعة لـ S' بواسطة عناصر M . نظراً لأن عناصر S و S' هي أشعة ، فإن عناصر M هي نسب بدون أبعاد. نظراً لأن الأشعة حقيقية، فإن عناصر M هي قيم حقيقية، أخذنا بعين الاعتبار في دراستنا أن الأشعة حقيقة وهذا ما يتفق مع المراجع [4,13,15].
يوضح الشكل (6) اسقاط المعادلة (13) على الجملة الضوئية حيث نلاحظ حزمة الدخل تمثل S وحزمة الخرج تمثل S' والجملة الضوئية يعبر عنها بمصفوفة التحويل لمولر M .



الشكل (6): مخطط للجملة الضوئية.

مصفوفة التحويل لمولر تصف جميع الجمل الضوئية إذاً هي تعميم لمصفوفة التحويل لجونز وستوكس. إن السطر الأول والعمود الأول من مصفوفة جونز تمثل بارامترات ستوكس، نلاحظ من مصفوفة ستوكس المعبر عنها بالعلاقة (12) أنها تصف حالة مستقطب مثالي، بينما مصفوفة مولر تصف المستقطبات المثالية والغير مثالية وجميع الأنظمة الضوئية.

ثالثاً: مصفوفة مولر لسطح عاكس متماثل المناحي:

يمكن وصف معاملات المصفوفة للاستقطاب الناتج عن انعكاس الموجة الضوئية على سطح بين وسطين متماثلين المناحي، بواسطة معاملات الانعكاس لفرينل R_p, R_s . تعطى مصفوفة مولر لهذا السطح العاكس بالعلاقة:

يمكن ان يكون الضوء مستقطباً جزئياً أو كلياً وهذا يرتبط بآلية توليد الضوء وتفاعله مع الوسط. تم الكشف مؤخراً على أنواع جديدة من المركبات ذات الفعالية الضوئية حتى أن بعض الجمل الضوئية التي لا تتصف بالكيرالي (الجزئيات التي تقوم بتدوير مستوي استقطاب الضوء) عند وضعها في حزمة ضوئية كثيفة مستقطبة دائرياً أظهرت الخواص الكيرالية (chirality). لا يمكن تفسير هذه الظاهرة وفق الطرائق الكلاسيكية مباشرةً التي تدرس وفق الالكتروديناميك ويتطلب هذا استخدام نظرية الحقل والنظرية الكوانتية لتفسير مثل هذه الظواهر ونوصي في المستقبل أن تتم دراسة هذه الظاهرة (الفعالية الضوئية) وفق نموذج كمي متكامل يشمل الدراسة الحالية كحالة حدية (كلاسيكية) منه. من الطرق الحديثة والتي تعتبر طريقة خاصة جداً تسمى (nuclear magneto-optic spectroscopy (NMOS وهي جداً مهمة من الناحية النظرية والتجريبية مقارنة مع الطرق الأخرى وهي تعتمد على الاستقطاب هنا لكن هذه الدراسة كوانتية بامتياز ويجب متابعتها وتطويرها في البحوث القادمة.

References:

- [1]. I. Ashraf Zahid, **Preparatory School to the Winter College on Optics and Energy**, Quaid-I-Azam University Pakistan, (2010).
- [2]. Noah A. Rubin, Zhujun Shi AND Federico Capasso, **Polarization in diffractive optics and metasurfaces**, 2Department of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138, USA, (2021).
- [3]. MAX BORN and Emil Wolf, **Principles of Optics Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light**, OXFORD - LONDON * EDINBURGH* NEW YORK, TORONTO• SYDNEY • PARIS • BRAUNSCHWEIG FOURTH EDITION, (1970).
- [4].H. Arwin, S.Schoeche, J. Hilfiker, M. Hartveit, K. Järrendahl, Olga. R. Juárez-Rivera, Arturo M-Galván and R. Magnusson, **Optical Chirality Determined from Mueller Matrices**, Linköping University, Appl. Sci. 2021, 11, 6742. <https://doi.org/10.3390/app11156742>.
- [5].LAURENCE D. BARRON, **MOLECULAR LIGHT SCATTERING AND OPTICAL ACTIVITY**, Second edition, revised and enlarged, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2004.
- [6].Eugene Hecht, **Optics**, fifth edition, Adelphi University, (2017).
- [7].Grant.R.Fowles, **INTRODUCTION TO MODERN OPTICS**, DOVER PUBLICATIONS, INC, NEW YORK, Second Edition, (1975).
- [8].Beth Schaefer, Edward Collett, Robert Smyth, Daniel Barrett, and Beth Fraher, **Measuring the Stokes polarization parameters**, Department of Physics, Georgian Court University, 900 Lakewood Avenue, Lakewood, New Jersey 08701-2697, (2006).
- [9]. Daniel A. Steck, **Classical and Modern Optics**, Department of Physics, University of Oregon, 2006.
- [10]. Daniel A. Steck, **Classical and Modern Optics**, available online at <http://steck.us/teaching>. (revision 1.8.3, 25 July 2021).
- [11].William. T. Silfvast, **Laser Fundamentals**, SECOND EDITION, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2004.
- [12].Matthew Jones, **Waves & Oscillations, Lecture 28 – Polarization of Light**, Department of Physics, PURDUE UNIVERSITY, 2013.
- [13].F. F. Carvalho, C. Augusto, G. C. Marques and K. Martins, C. Damasceno, **Angular Light, Polarization and Stokes Parameters Information in a Hybrid Image Sensor with Division of Focal Plane**, Manaus 69055-035, Brazil, 2020.

- [14].R. A. Chipman, W.-S. T. Lam, and G. Young, *Polarized Light and Optical Systems* (CRC Press, 2019).
- [15].S.-Y. Lu and R. A. Chipman, “**Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition,**” J. Opt. Soc. Am. A **13**, 1106-1113(1996).
- [16].Frantz Stabo-Eeg, **Development of instrumentation for Mueller matrix ellipsometry**, Norwegian University of Science and Technology, 2009.
- [17].E. Kamula, **Quantum chemical calculations of nuclear spin-induced optical rotation in small organic molecules**, Faculty of science, University of Oulu, April 2021.
- [18].A. Das, E. V. Kundelev, **Revealing the nature of optical activity in carbon dots produced from different chiral precursor molecules**, April 2022, <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00778-9> .