

**PRINCIPES PHYSIQUES
DE LA MESURE DES
CHAMPS MAGNETIQUES SOLAIRES**

EFFET ZEEMAN

POLARISATION DE LA LUMIERE

ANALYSE POLARIMETRIQUE

ILLUSTRATIONS

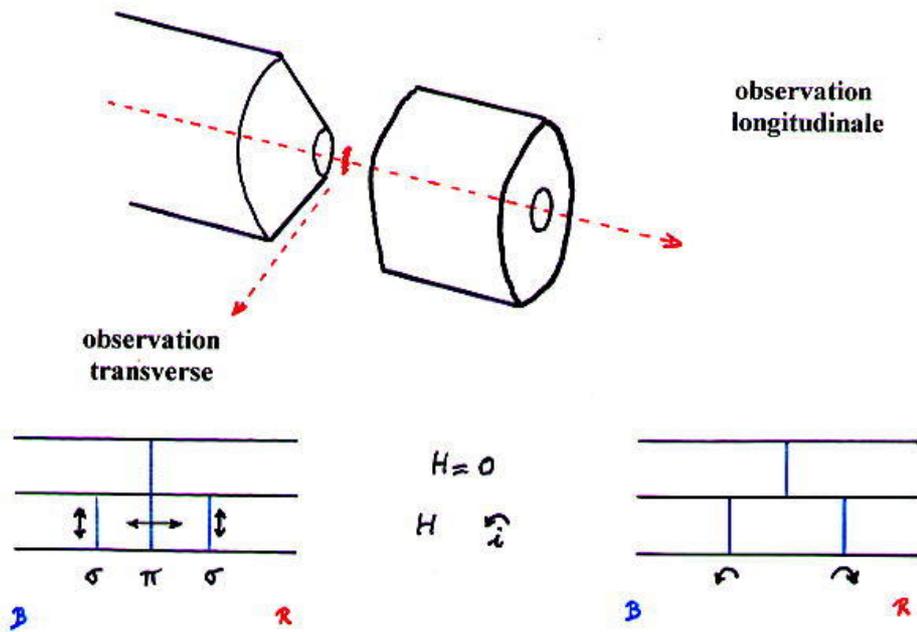
EFFET ZEEMAN

(1)

Phénomène prévu par Faraday vers 1860

1^{ère} Observation par Zeeman en 1896

Observation du triplet normal des raies simples :



Exemple: raie Ca I 422.7 nm

MODELE VECTORIEL DE L' ATOME

CHAQUE ELECTRON DANS L' ATOME EST CARACTERISE PAR

4 NOMBRES QUANTIQUES

1°) Le nombre quantique principal : n

nb entier > 0 : 1, 2, 3, ...

il caractérise une couche électronique (K, L, M, ...)

2°) Le nombre quantique azimuthal : l

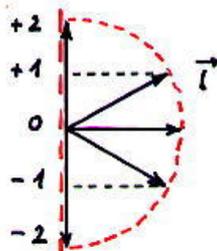
nb entier positif : $0 \leq l < n$

il définit des types d' électrons (s, p, d , f, ...)

3°) Le nombre quantique magnétique : m_l

nb entier positif ou négatif : $-l \leq m_l \leq l$

il caractérise l' orientation dans l' espace du moment angulaire orbital \vec{l} qui est quantifiée :



orientations permises

de \vec{l} pour $l=2$

4°) Le nombre quantique de spin : $s = \pm \frac{1}{2}$

il caractérise les ppts du moment angulaire de spin de l'électron

EFFET ZEEMAN NORMAL

LA RAIE A 422.7 nm DU Ca I

état fondamental: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$

$$l_1 = l_2 = 0 \Rightarrow L = 0$$

$$s_1 = s_2 = \frac{1}{2} \Rightarrow S = 0 \quad \text{donc } J = L + S = 0 \quad \text{niveau } ^1S_0$$

1^{er} état excité: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s 4p$

$$l_1 = 0 \text{ et } l_2 = 1 \Rightarrow L = 1$$

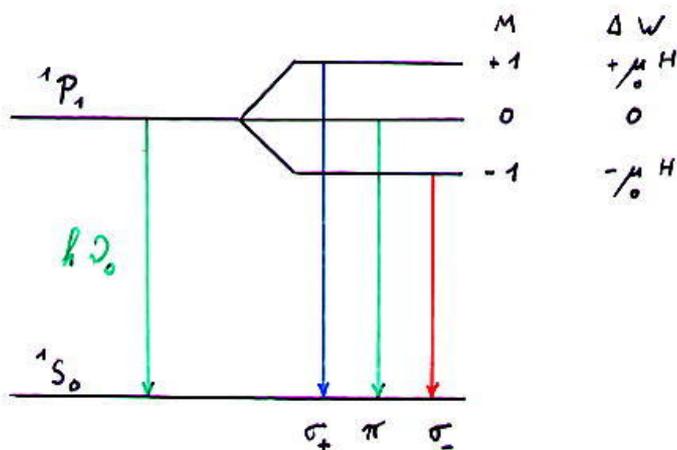
$$S = 1 \text{ ou } 0$$

$$L = 1 \text{ et } S = 0 \Rightarrow J = 1 : \text{niveau } ^1P_1$$

avec 3 sous-niveaux $M = 1, 0, -1$

$$L = 1 \text{ et } S = 1 \Rightarrow J = 2, 1, 0 : \text{terme triplet } ^3P_J$$

TRANSITION $^1P_1 \rightarrow ^1S_0$ à 422.7 nm :



μ_B est le magnéton de Bohr : $0.9271 \cdot 10^{-23} \text{ J.T}^{-1}$

$$\Rightarrow \Delta\lambda \cong 0.17 \text{ Angström par Tesla à } 6000 \text{ \AA}$$

* L'EFFET ZEEMAN NORMAL N' EXISTE QUE POUR LES TRANSITIONS ENTRE NIVEAUX SIMPLES ($S = 0$)

* DANS LE CAS GENERAL, L' ECART ENTRE LES SOUS - NIVEAUX EST DONNE PAR :

$$\Delta W = \mu_0 M g H$$

où g est le facteur de Landé :

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

* LES REGLES DE TRANSITION SONT :

$$\Delta J = 0, \pm 1 \text{ sauf } J = 0 \rightarrow J = 0$$

$$\Delta M = 0, \pm 1 \text{ sauf } M = 0 \rightarrow M = 0 \text{ quand } \Delta J = 0$$

$$\Delta S = 0$$

$$\Delta L = 0, \pm 1$$

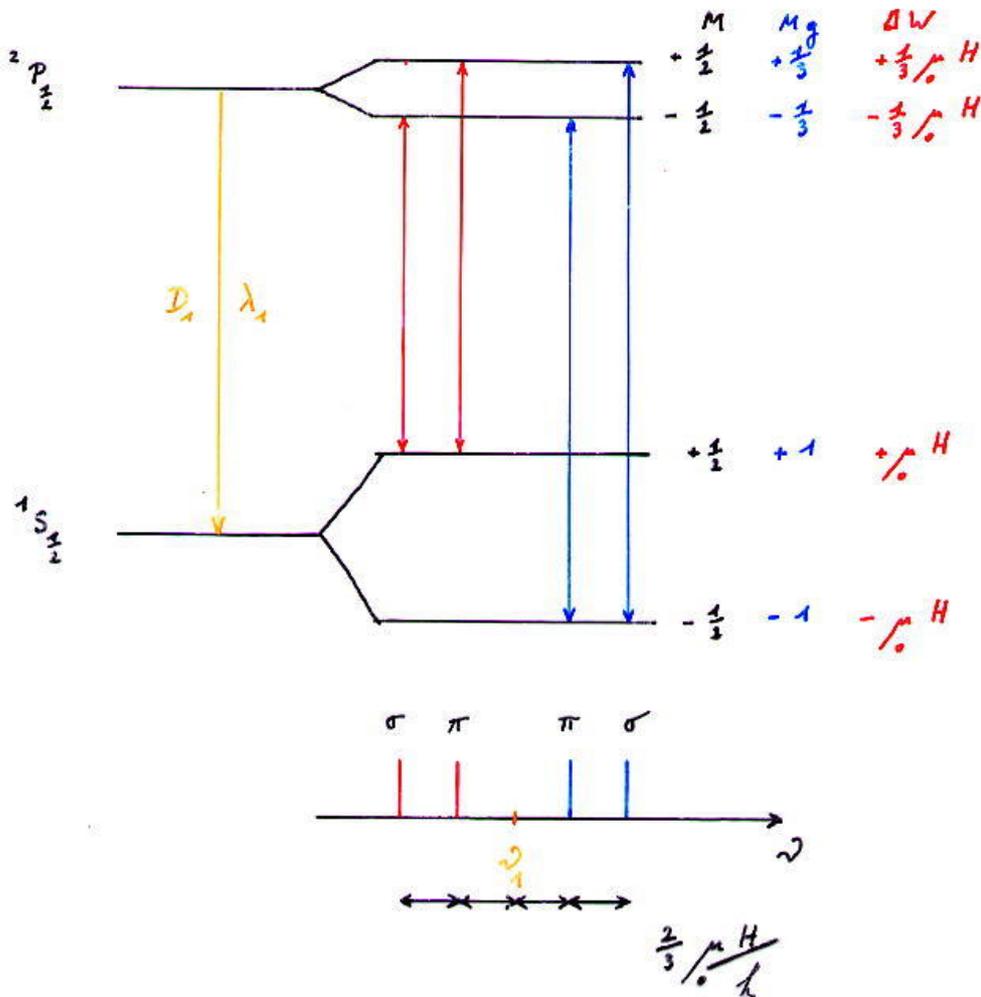
$$\Delta I = \pm 1 \text{ pour l'électron « optique »}$$

EFFET ZEEMAN
doublet D du Na

raie D₁ : 5895,9 Å $^2P_{\frac{1}{2}} \rightarrow ^1S_{\frac{1}{2}}$

$^1S_{\frac{1}{2}}$: $L=0$; $S=\frac{1}{2}$ (mais terme simple) : $g=2$

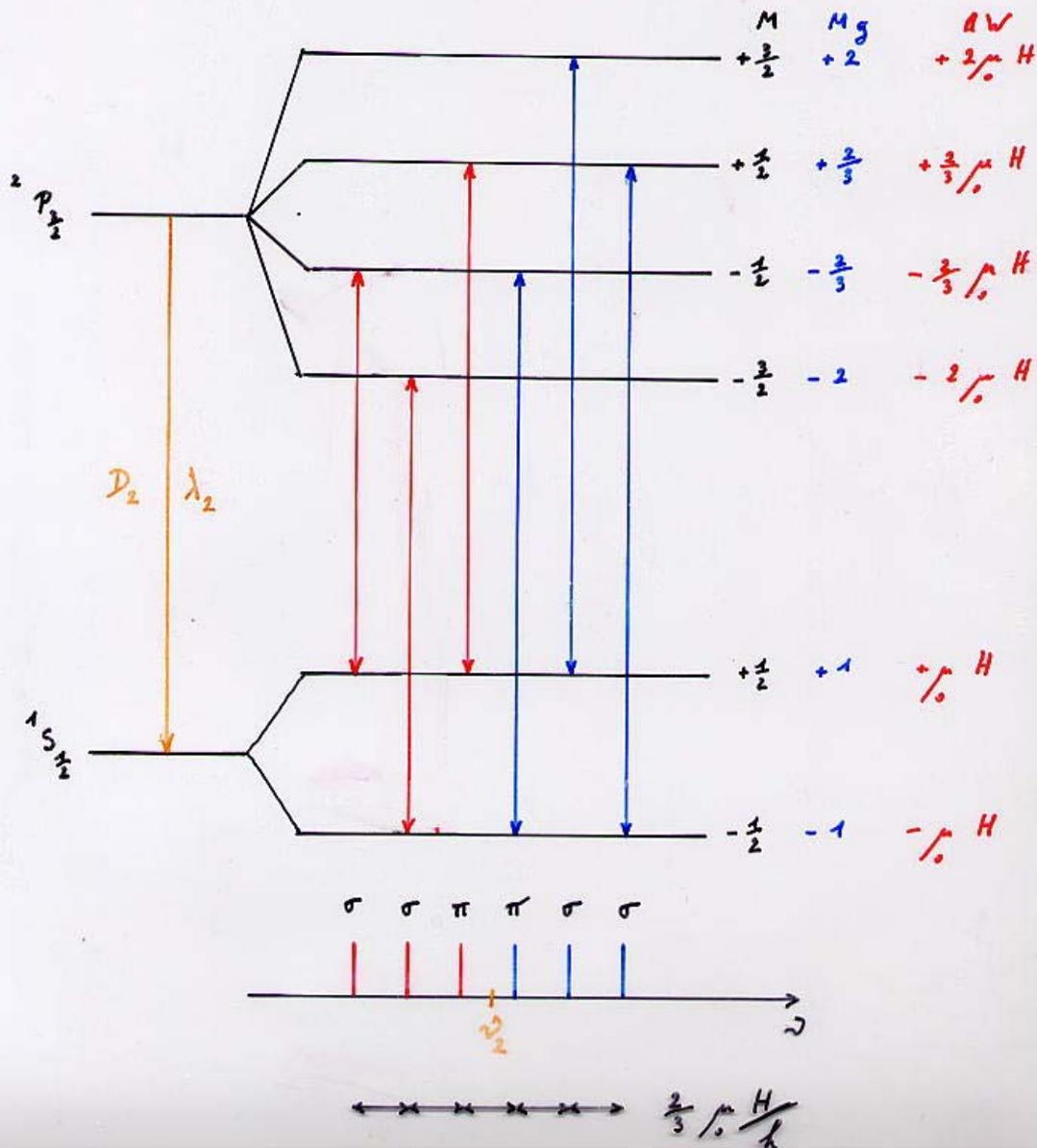
$^2P_{\frac{1}{2}}$: $L=1$; $S=\frac{1}{2}$; $J=\frac{1}{2}$: $g=\frac{2}{3}$



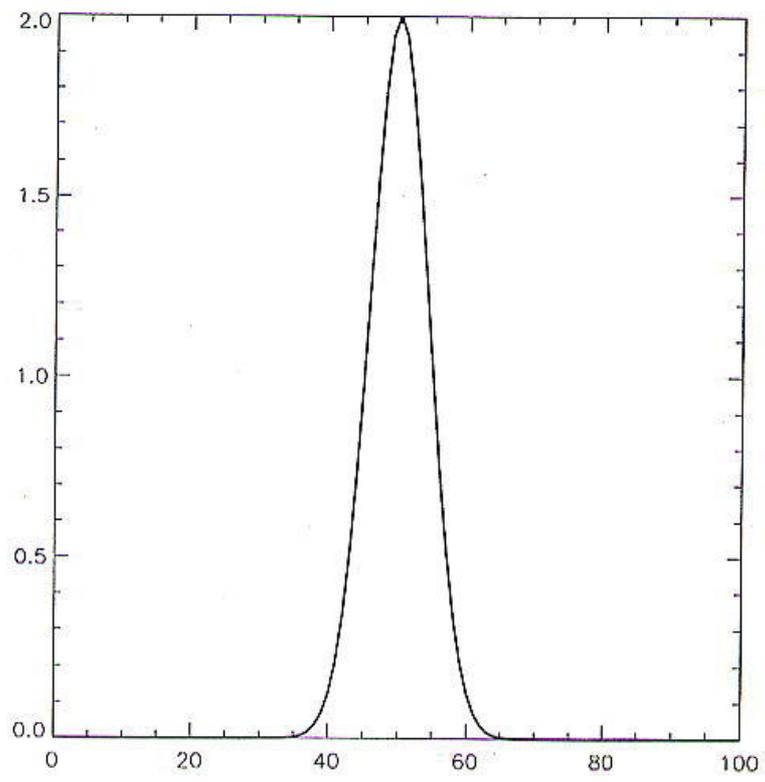
EFFET ZEEMAN
doublet D du Na

raie D₂ : 5889,9 Å : $^2P_{\frac{3}{2}} \rightarrow ^1S_{\frac{1}{2}}$

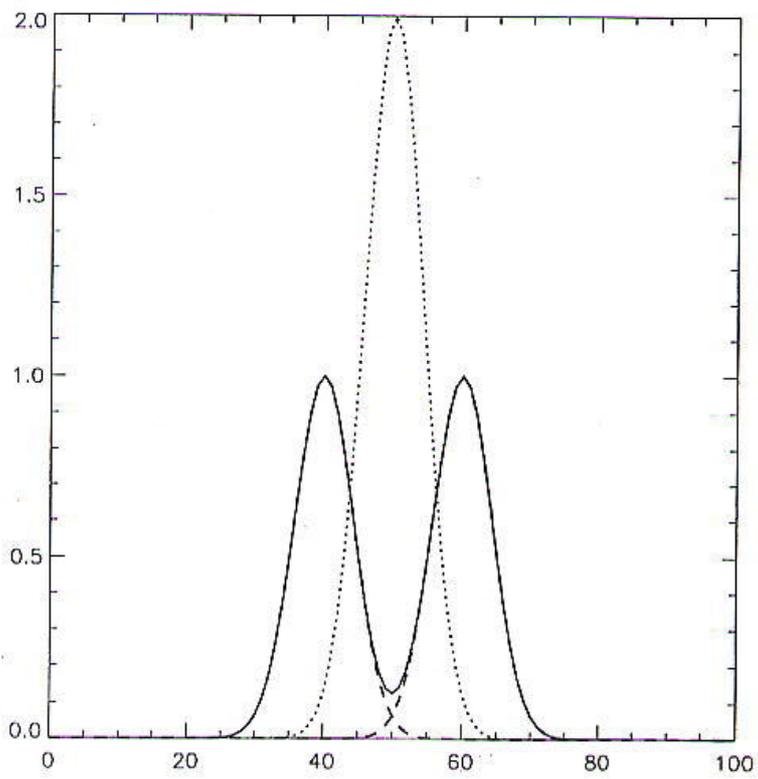
$^2P_{\frac{3}{2}}$: $L=1$; $S=\frac{1}{2}$; $J=\frac{3}{2}$: $g = \frac{4}{3}$



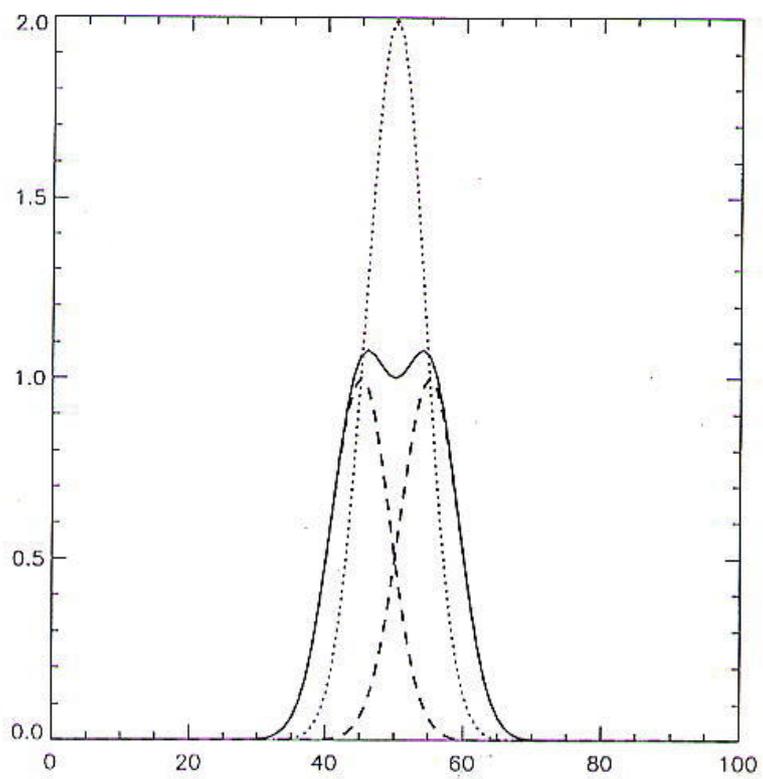
$$H = 0$$



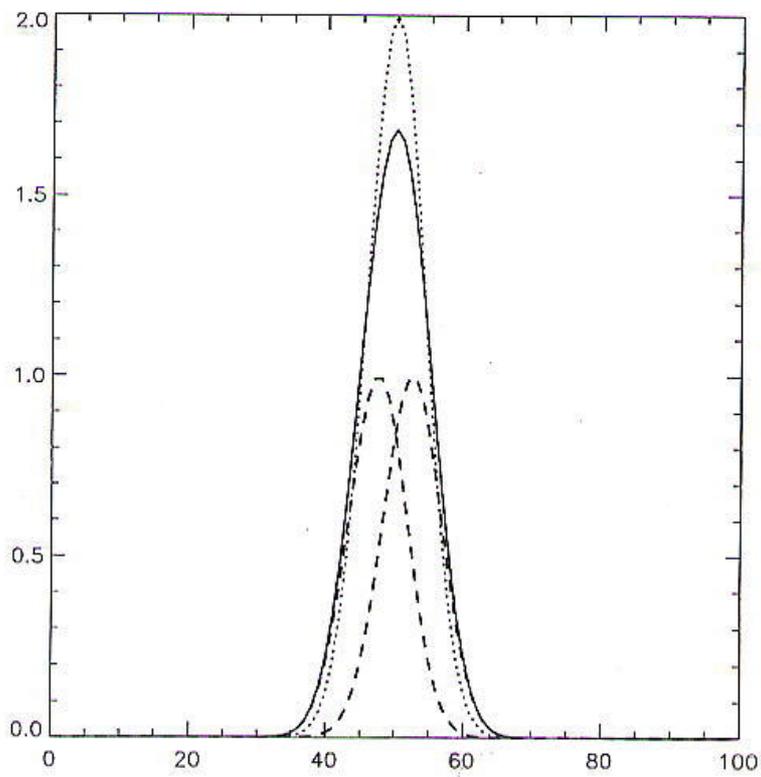
$$H = 1 \text{ T} = 10\,000 \text{ gauss}$$



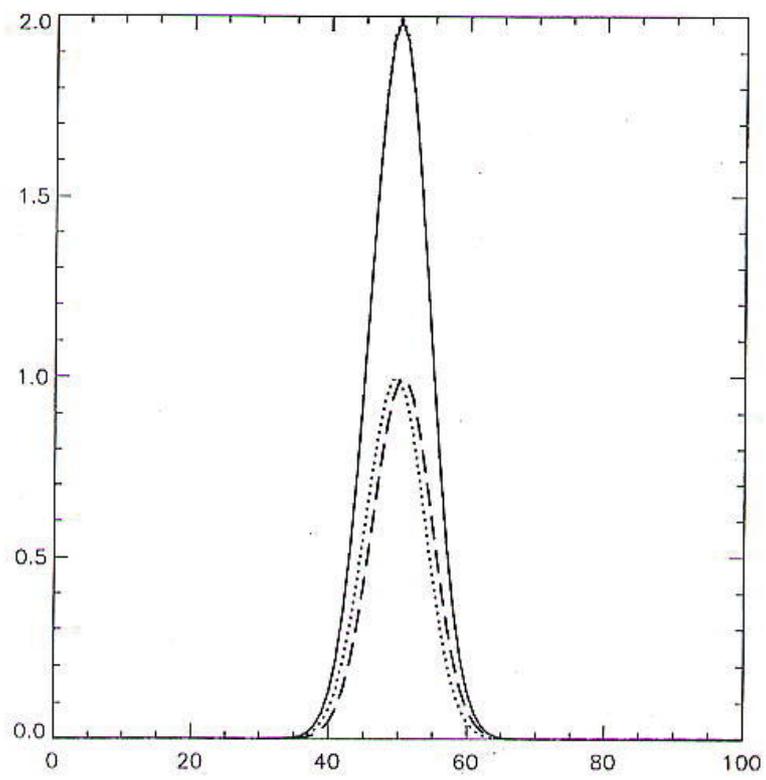
$H = 5000$ gauss

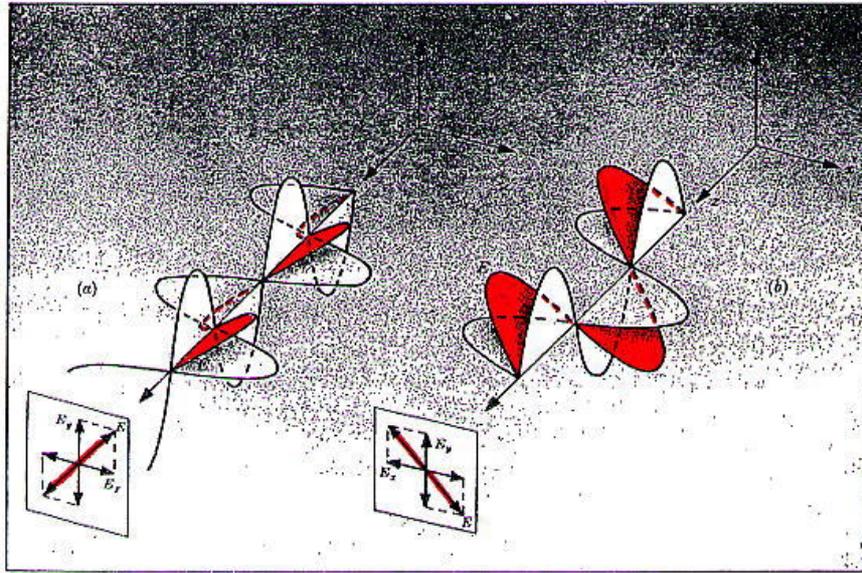


$H = 2500$ gauss

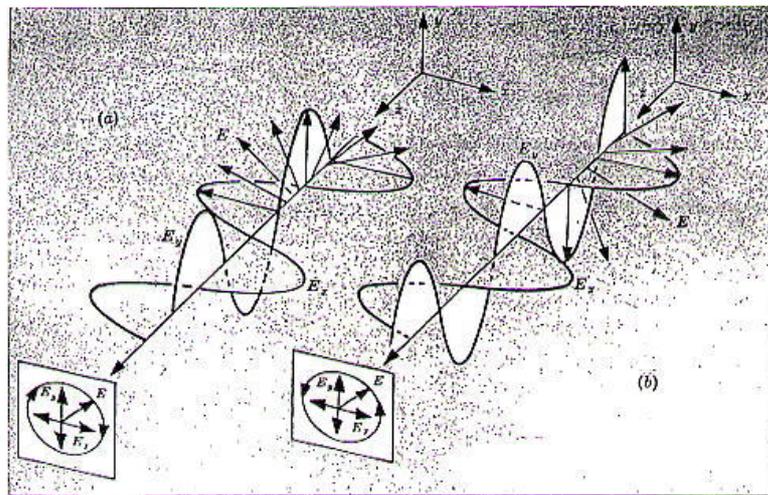


$H = 500$ gauss





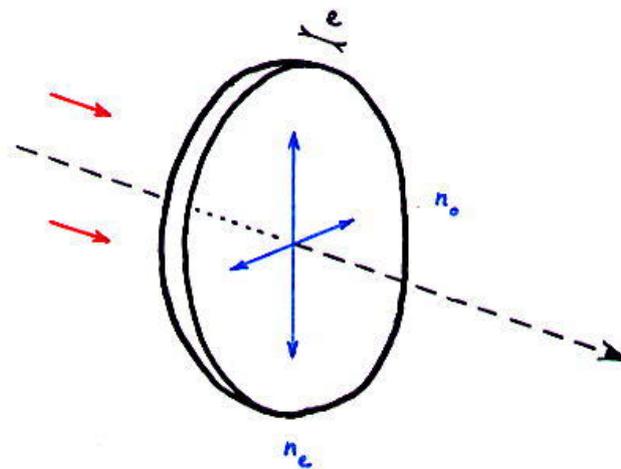
Polarisation linéaire



Polarisation circulaire

LAMES CRISTALLINES

BIREFRINGENTES



$$\text{différence de marche} = |n_e e - n_o e|$$

$$\delta = |n_e - n_o| e$$

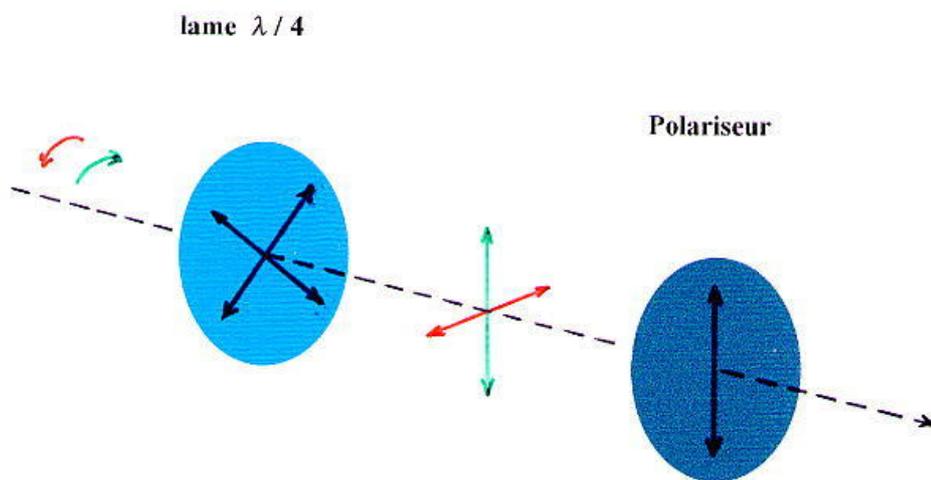
$\delta = \lambda / 4$: lame quart - d' onde

$\delta = \lambda / 2$: lame demi - onde

ANALYSE D'UNE POLARISATION

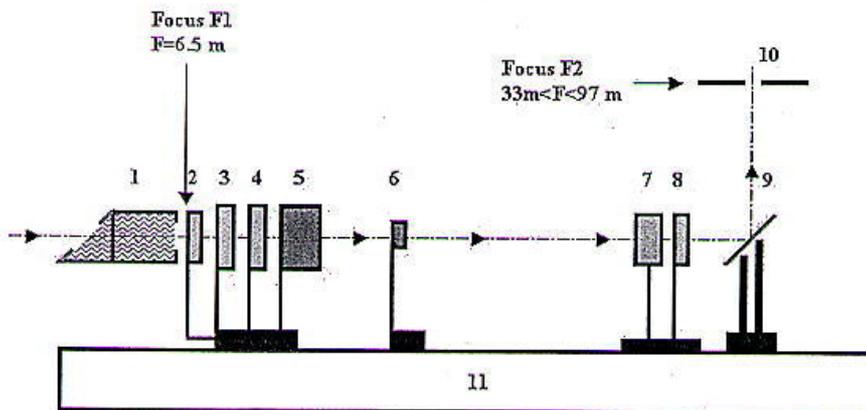
CIRCULAIRE

A L'AIDE D'UNE LAME QUART - D'ONDE



UNE POLARISATION QUELCONQUE (ELLIPTIQUE) PEUT
ÊTRE ANALYSÉE A L'AIDE D'UNE COMBINAISON DE
LAMES QUART - D'ONDE ET DEMI - ONDE SUIVIES D'UN
POLARISEUR

**LE MONTAGE DE
SPECTRO - POLARIMETRIE
AU PIC DU MIDI**



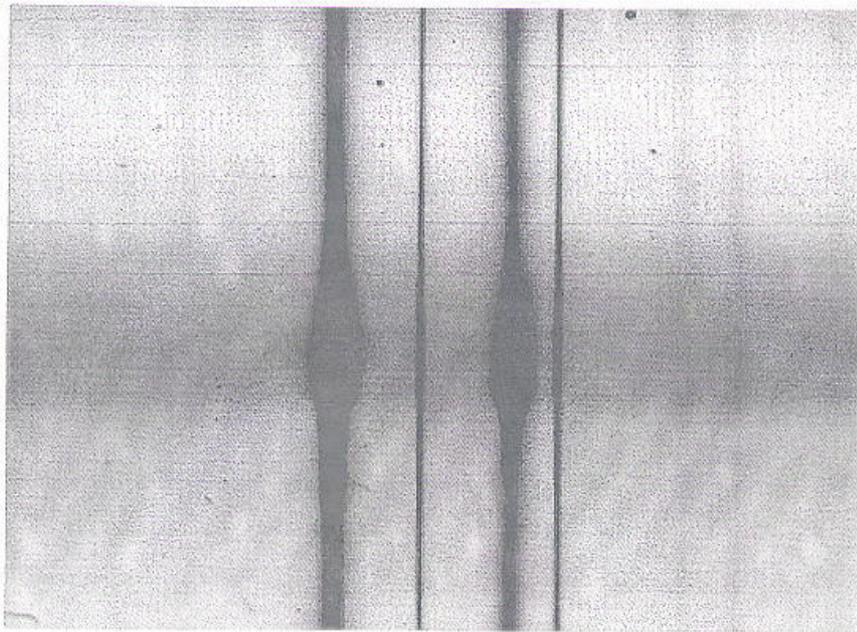
- | | |
|---|--|
| 1: water cooling device (field stop) | 7: interference filter |
| 2: UV/IR filter 390-700 nm | 8: precision dichroic linear polarizer |
| 3: variable retarder 1 | 9: flat mirror |
| 4: variable retarder 2 | 10: spectrograph entrance slit |
| 5: magnification lens (f=40/60/95 mm) | 11: optical rail |
| 6: beam shifter and flat field lenses (MSDP only) | |

Dans ce schéma :

Le retardateur 2 porte le numéro de série 407 et est utilisé seul en version monolame.

Le retardateur 1 porte le numéro de série 408 et est utilisé en version bilame seulement.

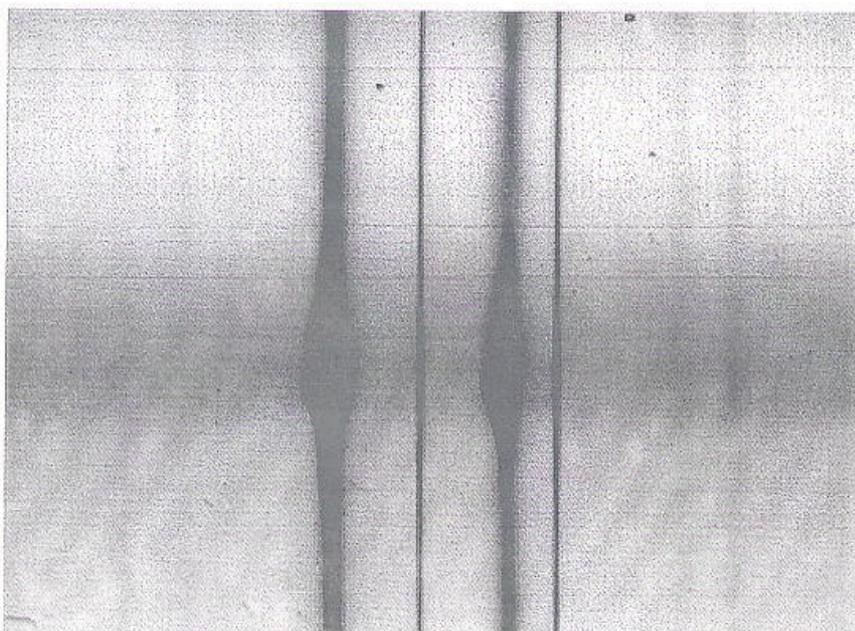
Fe I



6301.5 Å

6302.5 Å

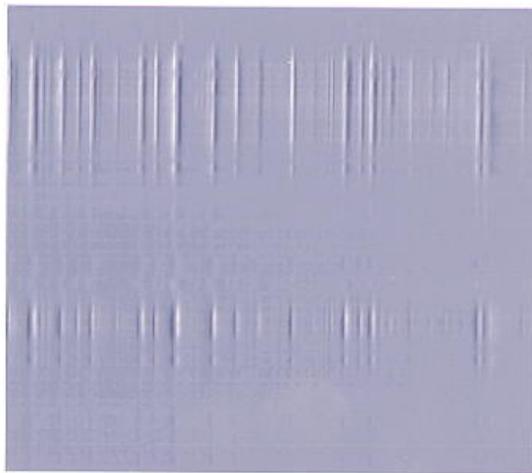
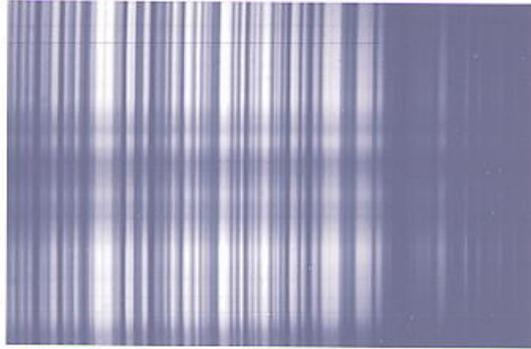
Fe I



6301.5 Å

6302.5 Å

Bande G



PRINCIPES PHYSIQUES DE LA MESURE DES CHAMPS MAGNETIQUES SOLAIRES

Page 1: Plan de l'exposé

Page 2: Introduction: l'effet Zeeman

C'est la démultiplication de certaines raies spectrales lorsque la source lumineuse est plongée dans un champ magnétique.

L'effet peut être observé en plaçant la source dans l'entrefer d'un puissant électro-aimant.

Le cas classique est celui du « *triplet normal des raies simples* »:

- observation longitudinale: deux composantes polarisées circulairement en sens contraires, symétriques par rapport à la raie d'origine.
- observation transverse : les deux composantes précédentes sont maintenant polarisées linéairement, perpendiculairement à la direction du champ magnétique (composantes σ), et une composante est apparue à l'emplacement de la raie d'origine (composante π), polarisée linéairement dans la direction parallèle au champ magnétique.

L'écart en fréquence ($\Delta \nu$) entre ces composantes est proportionnel à l'intensité du champ magnétique et il est le même pour toutes les raies simples de tous les éléments.

Page 3: Les 4 nombres quantiques d'un électron

Principe d'exclusion de Pauli: deux électrons d'un atome ne peuvent pas avoir leurs 4 nb. identiques.

Exemples:

- couche K: $n = 1 \rightarrow l = 0 \rightarrow m_l = 0$ et $s = \pm \frac{1}{2}$ donc 2 électrons sur cette couche.
- couche L : $n = 2 \rightarrow l = 0 \rightarrow m_l = 0$ et $s = \pm \frac{1}{2} \rightarrow 2$ électrons
ou $l = 1 \rightarrow m_l = -1, 0$ ou 1 et $s = \pm \frac{1}{2}$ dans chaque cas $\rightarrow 6$ électrons
au total 8 électrons possibles sur la couche L.
- couche M: $n = 3 \rightarrow l = 0 \rightarrow m_l = 0$ et $s = \pm \frac{1}{2} \rightarrow 2$ électrons
ou $l = 1 \rightarrow m_l = -1, 0$ ou 1 et $s = \pm \frac{1}{2}$ dans chaque cas $\rightarrow 6$ électrons
ou $l = 2 \rightarrow m_l = -2, -1, 0, 1$ ou 2 et $s = \pm \frac{1}{2}$ dans chaque cas $\rightarrow 10$ électrons
au total 18 électrons possibles sur la couche M.

etc...

Ainsi est construit le tableau périodique des éléments, de Mendeleïev.

Page 4: Effet Zeeman normal de la raie du Calcium à 422.7 nm

Il s'agit d'une raie simple puisque $S = 0$ pour les deux termes 1P_1 (supérieur) et 1S_0 (inférieur).

Page 5: Cas général: effet Zeeman « anormal »

Le facteur de Landé ne peut être égal à 1 que si $S = 0$ puisqu'alors $J = L$ ($J = L+S$)

Dans le cas général, $S \neq 0$; et la décomposition des termes atomiques en présence d'un champ magnétique est plus complexe, avec des écarts entre les sous-niveaux qui dépendent de la valeur du facteur de Landé.

Pages 6 et 7 : Exemple des raies D_1 et D_2 du Sodium (doublet jaune)

Pages 8 à 12 : Illustration de la séparation observée entre 2 composantes σ , pour différentes valeurs

du champ magnétique, dans le cas de l'effet « normal ».

On constate que pour des valeurs de champ usuelles (entre 500 et 1000 gauss) la séparation entre les composantes est si faible que le profil-somme observé ressemble à un profil avec champ nul. Pour résoudre ce problème il faut exploiter les propriétés de polarisation des composantes-Zeeman.

Page 13 : Les états de polarisation de la lumière

- polarisation linéaire: les composantes E_x et E_y du champ électrique de la lumière vibrent en phase ou en opposition de phase.
- polarisation circulaire: les composantes vibrent en quadrature de phase.

Page 14 : La biréfringence d'une lame cristalline

Les deux composantes E_x et E_y du champ électrique de la lumière se propagent dans la lame cristalline avec des vitesses différentes. Il y a donc une différence de marche entre elles à la sortie de la lame, ce qui modifie l'état de polarisation de la lumière.

Page 15 : Analyse d'une polarisation circulaire.

Une lame cristalline quart-d'onde transforme une polarisation circulaire en une polarisation rectiligne à 45° de ses axes. Un polariseur convenablement orienté placé après permet de sélectionner l'une ou l'autre de ces polarisations et donc de l'isoler afin de l'étudier.

Page 16 : Exemple d'un montage d'analyse spectro-polarimétrique.

Il se compose essentiellement de deux lames biréfringentes modulables (3) et (4) suivies d'un polariseur (8) qui permettent d'analyser n'importe quel état de polarisation de la lumière. La lumière entre ensuite dans un spectrographe qui sélectionne la raie dont on veut étudier l'effet Zeeman.

Pages 17 et 18 : Effet Zeeman sur le doublet du Fer à 630.2 nm

On voit bien l'élargissement des raies au niveau d'une tache solaire où règne un champ magnétique souvent supérieur à 1000 gauss (parfois jusqu'à 3000 gauss). Sur chacune des figures, l'analyse polarimétrique préalable favorise certaines composantes Zeeman plutôt que d'autres.

Page 19 : Analyse de polarisation circulaire sur des taches solaires

- figure du haut: on peut deviner l'élargissement de certaines raies au niveau des taches solaires.
- figure du bas: en combinant informatiquement les analyses de polarisation circulaires droite et gauche, on obtient ce type d'image qui fait apparaître que les deux taches solaires possèdent des champs magnétiques de sens opposés (inversion des raies noires et blanches entre les groupes du haut et du bas).