

# Description statistique des structures Zeeman dans les plasmas chauds

J.-C. PAIN - F. GILLERON / CEA-DAM Île-de-France

Quantifier l'influence d'un champ magnétique sur les profils de raies spectrales est important en astrophysique, en fusion par confinement inertiel ou encore pour les expériences sur des installations Z-pinch. Les structures Zeeman peuvent être décrites de manière statistique, en utilisant une distribution de Gram-Charlier (Gaussienne multipliée par une combinaison linéaire de polynômes de Hermite) paramétrée par les quatre premiers moments représentant force, énergie, asymétrie et aplatissement. Cette méthode permet d'estimer rapidement et avec une bonne précision l'effet d'un champ magnétique intense sur un spectre.

L'existence de champs magnétiques intenses ( $10^2 - 10^5$  T) dans les naines blanches a été confirmée par l'éclatement des raies spectrales dans les domaines visible et UV. Les pulsars et les étoiles à neutrons, découvertes par leur émission dans les domaines des radiofréquences et des rayons X, ont un champ encore plus intense. P. Zeeman (prix Nobel de physique en 1902) observa en 1896 un phénomène dont l'interprétation ne peut se faire complètement que dans le cadre de la physique quantique. Il découvrit qu'en présence d'un champ magnétique, une raie spectrale se décompose en trois groupes de transitions (appelés composantes  $\sigma$ ,  $\sigma$  et  $\pi$ ) décalés en fréquence et polarisés. L'espacement régulier entre deux composantes successives est proportionnel à l'intensité du champ magnétique. Grâce à l'effet Zeeman, les champs magnétiques peuvent être détectés à de grandes distances par la mesure du rayonnement émis. Ceci a permis à G.E. Hale de

découvrir en 1908 que les taches solaires sont de puissantes sources de champ magnétique pouvant atteindre 0,3 T, soit près de dix mille fois la valeur du champ terrestre (**figure 1**).

En fusion par confinement inertiel, les champs magnétiques auto-générés peuvent atteindre plusieurs centaines de teslas. L'existence d'un fort champ magnétique dans la capsule avant la compression est plutôt bénéfique car cela permet de réduire les pertes par conduction électronique.

Ce travail concerne la prise en compte des champs magnétiques intenses dans les calculs d'opacité et d'émissivité. Du fait du grand nombre de raies dans les plasmas chauds, le calcul exact est quasiment impossible et même inutile du fait de la coalescence des raies provoquée par les autres élargissements physiques (Doppler, Stark,...). Il est possible de calculer analytiquement les moments de la distribution des énergies des composantes Zeeman pondérées par leurs forces. La connais-

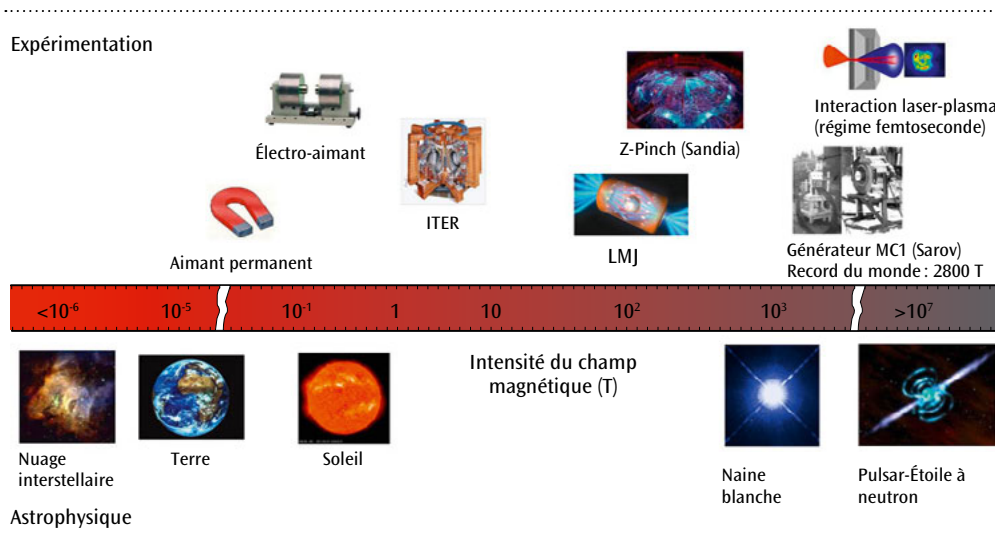
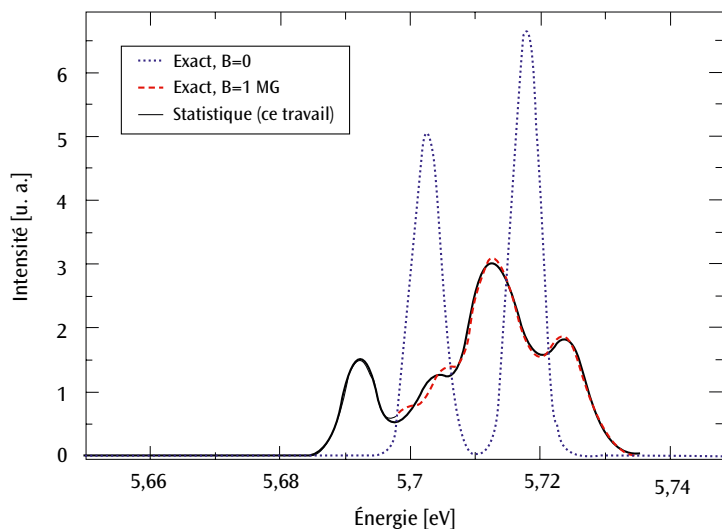


Figure 1. Ordre de grandeur du champ magnétique en teslas (T) pour différents «objets» astrophysiques et instruments scientifiques.



**Figure 2.** Effet d'un champ magnétique de 100 T sur la transition « triplet » :  $(1s2s) \ ^3S \rightarrow (1s2p) \ ^3P$  de  $C^{++}$  avec une largeur de convolution de 0,005 eV. L'angle d'observation  $\theta$  est tel que  $\cos^2(\theta)=1/3$ .

### Modélisation statistique

L'intensité d'une composante peut se calculer par un développement en série de Taylor autour de l'énergie de la raie en l'absence de champ. Dans l'hypothèse où le profil de raie est une Gaussienne, on obtient une somme de polynômes de Hermite (formule de Rodrigues) [1] multipliée par une Gaussienne. À l'ordre 2, cette méthode nous a fourni une expression analytique de la largeur de raie permettant d'estimer la valeur du champ magnétique à partir d'une mesure [4,5]. Cependant, ce développement n'est valide que pour des champs relativement faibles ( $\mu_B B$  inférieur aux autres largeurs physiques). Nous avons proposé une approche plus générale, consistant à modéliser l'effet du champ magnétique sur une composante Zeeman par un développement de Gram-Charlier à l'ordre 4. Le profil global associé à une composante particulière résulte alors de la convolution d'une fonction gaussienne multipliée par une combinaison linéaire de polynômes de Hermite avec les profils associés aux autres processus d'élargissements physiques.

Cette approche statistique [4] permet de prendre en compte de manière rapide l'effet Zeeman sur les spectres atomiques détaillés avec une bonne précision, comme le montre la comparaison avec un calcul exact sur la **figure 2**.

sance de ces moments permet, en utilisant une distribution statistique, de modéliser l'effet du champ magnétique sur les spectres atomiques, sans avoir à effectuer la diagonalisation de la matrice hamiltonienne décrivant l'effet Zeeman.

### Intensité et calcul des moments

Dans ce travail, l'effet Hanle (réduction de la polarisation de la lumière lorsque les atomes émetteurs sont soumis à un champ magnétique, et quand ils ont eux-mêmes été excités par une lumière polarisée) et l'effet Faraday (rotation du plan de polarisation proportionnelle à la composante du champ magnétique sur la direction de propagation de la lumière) ne sont pas pris en compte. En présence d'un champ magnétique, un niveau  $J$  d'énergie  $E$  se scinde en  $2J+1$  états  $M$  ( $|M| \leq J$ ) d'énergie  $E + \mu_B B g M$ , où  $B$  est l'intensité du champ magnétique,  $\mu_B$  le magnéton de Bohr et  $g$  le facteur de Landé du niveau. Les transitions entre états quantiques de deux niveaux différents se regroupent en trois composantes associées aux règles de sélection  $\Delta M = q$ , où la polarisation  $q$  est égale à 0 pour une composante  $\pi$  (polarisation parallèle au champ magnétique) et à  $\pm 1$  pour une composante  $\sigma_{\pm}$  (polarisation perpendiculaire au champ magnétique).

L'intensité d'une raie détectée avec un angle d'observation  $\theta$  par rapport à la direction du champ magnétique est généralement une combinaison des intensités de ces polarisations. L'intensité d'une composante particulière peut être caractérisée par les moments de la distribution des énergies pondérées par les forces, moments qui peuvent être calculés analytiquement grâce à l'algèbre de Racah [1-4] ou au moyen de polynômes de Bernoulli [1]. En général, on obtient une bonne représentation statistique en se limitant aux quatre premiers moments caractérisant la position, la largeur, l'asymétrie et l'aplatissement.

### Références

- [1] G. MATHYS, J.O. STENFLO, "Anomalous Zeeman effect and its influence on the line absorption and dispersion coefficients", *Astron. Astrophys.*, **171**, p. 368-377 (1987).
- [2] J. BAUCHE, J. OREG, "Quick interpretation of unresolved hyperfine and/or Zeeman structures in stellar spectra", *J. Phys. Coll. C1*, **49**, p. 263-265 (1988).
- [3] P. DALLOT, "Influence of an intense magnetic field on transition arrays", *Phys. Rev. A*, **53**, p. 4007-4013 (1996).
- [4] J.-C. PAIN, F. GILLERON, "Characterization of anomalous Zeeman patterns in complex spectra", *Phys. Rev. A*, **85**, 033409 (2012).
- [5] J.-C. PAIN, F. GILLERON, "Description of anomalous Zeeman patterns in stellar astrophysics", *EAS Publications Series*, **58**, p. 43-50 (2012).