

# Automodulation de phase et conservation de l'énergie

Pierre Béjot<sup>1</sup> & Jérôme Kasparian<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> 1. Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS/Université Bourgogne Franche-Comté, 21078 Dijon, France

<sup>2</sup> 2. Groupe de physique appliquée, Université de Genève, Chemin de Pinchat 22, 1211 Genève 4, Suisse

<sup>3</sup> 3. Institut des sciences de l'environnement, for Environmental Sciences, Université de Genève, Bd Carl Vogt 66, 1211 Genève 4, Suisse

jerome.kasparian@unige.ch

La génération de supercontinuum est l'un des phénomènes les plus spectaculaires de l'optique non-linéaire. Elle a été observée dès 1970 par Alfano and Shapiro [1,2], qui l'ont identifiée comme un mélange à quatre ondes [1], ainsi que comme de l'automodulation de phase [2]. La mise au point de l'amplification à dérive de fréquence a permis un élargissement spectral encore plus spectaculaire, et son observation dans des gaz, y compris dans l'air à pression atmosphériques.

Le mélange à quatre ondes décrit l'élargissement spectral comme l'interaction d'ondes planes monochromatiques. Deux photons à des fréquences  $\omega_1$  et  $\omega_2$  interagissent à travers la susceptibilité non-linéaire  $\chi^{(3)}$  pour générer deux photons à  $\omega_3$  et  $\omega_4$ . La conservation de l'énergie impose alors  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$ , de sorte que le spectre devrait s'élargir symétriquement. De plus, le mélange à quatre ondes impose la conservation du nombre de photons dans chaque tranche temporelle.

Le même élargissement spectral est aussi décrit en termes d'automodulation de phase, comme une déformation de la porteuse l'impulsion. Après propagation sur une distance  $z$ , son décalage spectral s'écrit

$$\Delta\omega(t) = -k_0 z n_2 I'(t) z, \quad (1)$$

où le prime représente la dérivation temporelle,  $k_0 = n_0 \omega / c$ ,  $n_0$  et  $n_2 = 3\chi^{(3)} / 4n_0 \epsilon_0 c$  sont respectivement les indices de réfraction linéaire et non-linéaire,  $\omega$  la pulsation de l'impulsion incidente,  $I$  son intensité et  $c$  la vitesse de la lumière. Ce décalage spectral est temporellement asymétrique : dans la plupart des milieux usuels, tels que l'air ou le verre,  $n_2 > 0$ , de telle sorte que l'avant de l'impulsion est décalé vers le rouge, tandis que l'arrière est décalé vers le bleu. Un tel décalage spectral est incompatible avec la conservation simultanée de l'énergie et du nombre de photons dans chaque tranche temporelle, qui sont pourtant imposés par le formalisme du mélange à quatre ondes.

Le but de cette communication est de résoudre ce paradoxe. En prenant en compte le décalage induit par l'automodulation de phase entre l'impulsion et la polarisation du milieu de propagation, nous montrons que ce dernier emmagasine transitoirement de l'énergie au début de l'impulsion, pour la "rendre" à l'arrière de l'impulsion. Expliciter ce transfert d'énergie de l'avant vers l'arrière de l'impulsion permet de restaurer la conservation de l'énergie. À l'inverse, prendre en compte dans le mélange à quatre ondes la rapide variation d'intensité restaure le décalage spectral prévu par l'automodulation de phase [3]. Nous discuterons également l'implication de ces résultats sur le signe de  $n_2$ .

## Références

1. R.R. Alfano and S.L. Shapiro, Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass. *Physical Review Letters*. **24**, 584(1970)
2. R.R. Alfano and S.L. Shapiro, Observation of Self-Phase Modulation and Small-Scale Filaments in Crystals and Glasses. *Physical Review Letters*. **24**, 592 (1970)
3. P. Béjot and J. Kasparian, Energy conservation in self-phase modulation, *Physical Review A* **97**, 63835 (2018).