

スーパーコンティニュームプラズマ波生成 Generation of Langmuir Wave Supercontinuum

河森 栄一郎
Eiichirou Kawamori

台湾國立成功大學
Institute of Space and Plasma Sciences,
National Cheng Kung University, Taiwan

スーパーコンティニューム(SC)光とは、光ファイバー等の光伝搬媒質とシード光（ポンプ光とよばれる）の非線形相互作用により生成される、スペクトル幅が劇的に拡大されたコヒーレントな光である。スペクトル幅はポンプ光のそれと比較して著しく拡大される。SC光は、光コヒーレンストモグラフィ等の分光計測への応用、通信分野への応用、光パルス圧縮やチューナブルフェムト秒レーザー光等の光源としての応用等、その応用範囲は幅広い。SCは、Photonic crystal fiber (PCF)等の非線形光学媒質だけでなく、ボーズアインシュタイン凝縮物質、流体そしてプラズマ等、非線形物質全般で観測される。SC光生成メカニズムとなる非線形相互作用には、四波混合 (four-wave mixing (FWM))、ラマン散乱、自己（相互）位相変調、ソリトン分裂及び、それらの相互作用などがあり、光伝搬媒質の種類や実験の構成などに依存する。

今回、初めてプラズマを光伝搬媒質として、ラングミュア波(LW)SC生成を空間1次元のPICシミュレーションにおいて実証したので報告する。LWSCは、空間的に一様に分布したMaxwell速度分布をもつ電子とイオンに、一定時間しきい値以上のパワーを持つ正弦波である外部電場（ポンプ光）を印加することで生成し、FWMを検出するTricoherence解析および、以下の式(1)で定義されるfirst-order coherence $g^{(1)}$ による波動電場の時間的コヒーレンスの評価から同定された。

$$|g^{(1)}(\omega, t_2 - t_1)| = \left| \frac{\langle E_x^*(\omega, t_1) E_x(\omega, t_2) \rangle}{\sqrt{\langle |E_x(\omega, t_1)|^2 \rangle} \sqrt{\langle |E_x(\omega, t_2)|^2 \rangle}} \right|. \quad (1)$$

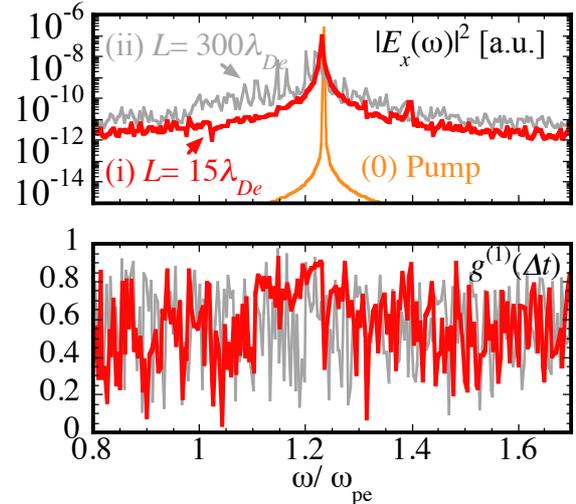


Fig. 1 (top) Power spectra of the longitudinal electric field, $|E_x(\omega)|^2$ of (0) pump wave and (i) Langmuir wave supercontinuum (LWSC). Also that of (ii) a turbulent state is shown together as a reference. (bottom) The first order coherence of $g^{(1)}(\Delta t)$ of (i) the LWSC and (ii) the turbulent state.

$\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表す。Figure 1 (top)は(0)ポンプ光及び(i)生成されたLWSCのパワースペクトルである。比較として、(ii)乱流状態のパワースペクトルも併せて示している。Figure 1 (bottom)に示す $g^{(1)}$ から、このLWSCが高いコヒーレンスを示すこともみてとれる。これらの解析により、プラズマ波SC生成の実証に加えて以下に示す興味深い事実が明らかになった： 1) LWSCは、プラズモン（プラズマ波のコンティニューム、もしくはCase-Van Kampenモード）の、FWMによる熱平衡化により形成される。FWMのプラズモン粒子数、運動量及びエネルギー保存の性質より、この熱平衡化したプラズモンは、二体弾性衝突をする多体粒子系とほぼ等価な系として考えることがで

きる。2) プラズモンのエネルギー分布は、二体衝突にscale-free相関を取り入れた運動論により導出された最大エントロピー状態である、一般化ローレンツ分布で説明される。3) LWSCはプラズマ物理の用語でいうと、電子ホール構造をもつBGK波である。

今回のLWSC生成の実証は、プラズマを用いたマイクロ波SC光源、自由電子レーザーへの応用等への可能性に加えて、派生的な以下の2つの示唆が含まれている：1) Case-Van Kampenモードの存在の同定可能性。Case-Van Kampenモードはreal modeではないと考えられているが、今回の結果からはその存在、もしくは類似のコンティニューウムモードの存在が強く示唆される。2) Case-Van Kampenモード-BGKモードの関係とドリフト波-ゾーナルフローの関係の対応。コヒーレントな非線形波の、準粒子の平衡統計力学による定式化という文脈でいうと、本研究で明らかにされたCase-Van KampenモードとBGKモードの関係は、ドリフト波とゾーナルフローの関係に対応すると考えることができる。

In a one-dimensional particle-in-cell (PIC) plasma simulation, we observe a Langmuir wave supercontinuum (LWSC) generated by a novel type of wave thermalization of plasmons (continuous eigenmodes of plasma waves/Case-Van Kampen modes) that, unlike the random phase picture employed in conventional wave turbulence theory, preserves the plasmons' phase information. Thermal equilibration is verified through the use of tricoherence analysis to identify spectrally continuous and bounded plasmon four-wave mixings. Instead of an energy equipartition Rayleigh-Jeans distribution, the wave-action-density distribution of the thermally equilibrated

plasmons can be described by a generalized Lorentzian distribution function delineating an equilibrium distribution of the Boltzmann equation incorporating scale-invariant correlations in collisions at the lowest order. The absence of the random phase picture and scale invariance can be attributed to presence of a nonlocal and nonlinear term incorporating wave-particle interactions in the modified form of the nonlinear Schrödinger equation derived from the Vlasov-Poisson equations. In the terminology of plasma physics, the LWSC corresponds to the so-called Bernstein-Green-Kruskal mode with electron phase-space holes.