

有限密度における plasmaron と plasmino の比較

根本幸雄 (聖マリアンナ医大)

plasmaron と plasmino はともに有限温度や有限密度の媒質中で出現するフェルミオン型励起モードである。理論的には plasmaron は零温度における電子気体において、電子とプラズモンとの相互作用の結果、電子の空孔スペクトル中に初めて見いだされた [1]。一方 plasmino は有限温度の相対論的場の量子論に基づき、フェルミオンとゲージボソンとの相互作用によって生ずることが最初に指摘されたが [2]、その後有限密度においても plasmino が現れることが明らかになった。ゲージ理論における plasmino は (QED でも QCD でも) 高温極限ないし高密度極限ではゲージ不変にその存在が証明できるが、それ以外の温度密度では未解明である。しかし、ゲージ理論以外のシステムにおいても、一般的に媒質中でフェルミオンがボソンと結合すれば、ある条件のもとで plasmino が出現することが知られている。plasmaron と plasmino はともにボソンとの相互作用の結果現れる励起モードであることから、その類似性が指摘されていたが [3]、具体的に両者の共通点、相違点を追究したものはこれまでになかった。

一方、最近 n -ドープしたグラフェンの電子スペクトルに plasmaron と同定できるようなモードが角度分解光電子分光の実験により発見され、史上初めて plasmaron が直接観測された可能性があり注目を集めている [4]。ドープしていないグラフェン中の π 軌道の電子スペクトルは低エネルギー部で零質量ディラック粒子型の分散関係を持つ。それが有限化学ポテンシャル中で plasmaron といえる励起が現れたということは、理論的にはむしろ相対論的場の量子論で議論されている plasmino と同定できるものではないだろうかと考えられる。そこで、本研究ではこれまで別々の分野で議論されてきた plasmaron と plasmino に注目し、両者の出現機構を調べて共通点と相違点を明らかにし、グラフェンで発見された励起モードが果たしてどちらと考えるのがより適切なのかを議論したい。以下ではすべて温度ゼロの場合の評価をおこなっている。

plasmaron はもともと電子と RPA 誘電関数との 1 ループ型相互作用の解析から発見されたが [1]、plasmaron 出現の本質は電子とプラズモンとの相互作用である。RPA において 1 粒子-1 空孔励起を無視したプラズモン極近似を用いて電子のスペクトル関数を求めると図 1 左のようになる。図から明らかなように、フェルミ運動量以下で明瞭な 2 ピーク構造が見られる。ひとつのピークはフェルミ運動量以上でも続く準粒子としての電子スペクトルであり、他方のピークはフェルミ運動量以上で急速に減少する plasmaron のスペクトルである。このような 2 ピーク構造は電子の自己エネルギー虚部に注目すると理解しやすい。今の場合、自己エネルギー虚部は電子とプラズモンとの結合状態密度に対応する量である。図 1 右より、虚部は $\omega/E_F = -3$ 付近で大きな絶対値 (正確には発散) をもつことがわかる。運動学的な考察から、これは空孔状態とプラズモンが強く結合して実空孔状態が形成される過程をあらわしている。すなわち空孔とプラズモンとが共鳴状態のような状況になっており、それによって特徴的な 2 ピークのスペクトル構造になっている。結合状態密度の発散は van Hove 特異点と呼ばれ、結合する 2 状態の分散関係の傾きが等しいときに起こることが知られている。今の場合運動量ゼロで電子もプラズモンも分散関係の傾きが 0 になっており、第一種 van Hove 特異点の形成の原因になっているが、さらに相互作用頂点がクーロン型であることも重要である。3 次元では運動量積分の測度から運動量の 2 次の因子が出るため、エネルギー分母が 0 になっても状態密度自体の発散は抑えられ

る可能性があるのだが、この模型ではクーロン相互作用の赤外特異性によって積分測度の因子が相殺され、結果として状態密度の発散を引き起こしている。

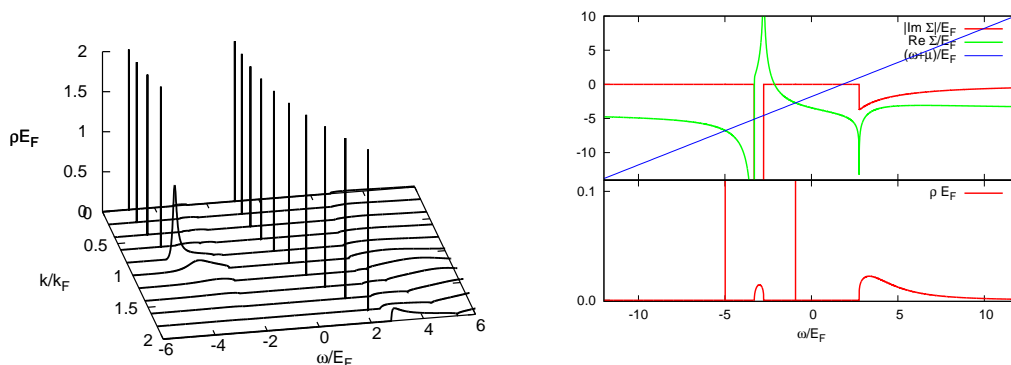


Figure 1: プラズモン極近似における電子気体の電子スペクトル関数 (左図) と、ゼロ運動量における電子自己エネルギー (右図上段) および対応するスペクトル関数 (右図下段)。いずれも密度パラメータ $r_s = 6$ の場合。

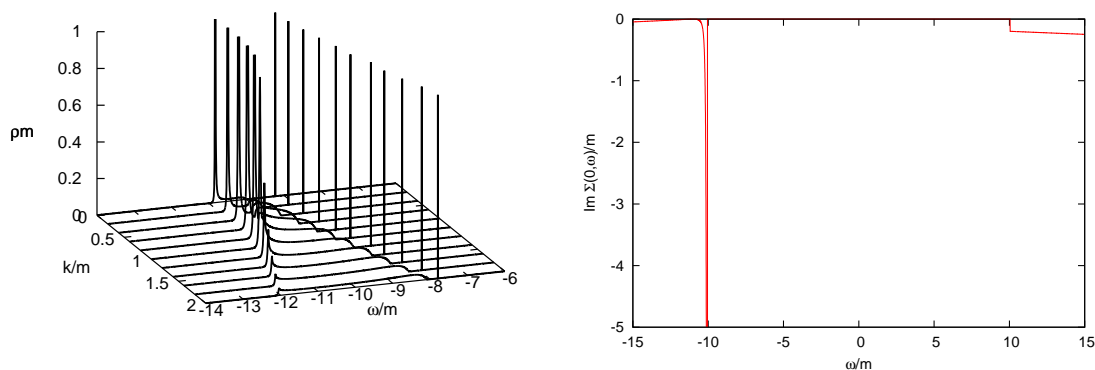


Figure 2: 湯川模型におけるフェルミオンスペクトル関数 (左図) と対応する運動量ゼロにおける自己エネルギー虚部 (右図)。湯川結合定数 $g = 1$ および $\mu/m_{\text{boson}} = 10$ の場合。

次に plasmino の出現機構をみる。ゼロ質量フェルミオンと有限質量ボソンとが湯川型相互作用する模型を用いて、1ループレベルでフェルミオン自己エネルギーを評価し、スペクトル関数を求めたものが図 2 左である。plasmino のピークは plasmaron のピークと同様に、フェルミ運動量以下で現れる。このスペクトル関数に対応するフェルミオン自己エネルギーの虚部 (図 2 右) から、plasmaron の場合と同様に自己エネルギー虚部が大きい値をもつところがあるが、ゼロ質量フェルミオンと有限質量ボソンとでは分散関係の傾きが同じなる点は (運動量無限大を除いて) 存在しないため、発散はしていない。虚部の

ピークは運動量が大きくなって徐々に傾きが一致していく途上にあるなかで形成されたものである。取り得る運動量の上限は化学ポテンシャルの値によって決まっている。この模型と上記電子気体との違いは相対論的であるか否かであることと、相互作用頂点がクーロン型か湯川型かである。前者は反粒子の自由度とフェルミオンの分散関係が大きな違いとなってくるが、粒子側のスペクトルを比較する限り反粒子の影響は無視できる。その一方でフェルミオン分散関係の違いは重要で、上記の通りゼロ運動量ではボソンと傾きが一致しなくなる。相互作用頂点の違いは赤外領域では大きいですが、今の場合ゼロ運動量でエネルギー分母は0ではなく、むしろ紫外領域でエネルギー分母が小さくなるため、plasminoの形成には重要ではない。すなわち、空孔とボソンとの結合によって plasmino が形成されるという点では plasmaron と同じであるが、plasmaron にみられるような van Hove 特異点の形成はなされていない、ということになる。化学ポテンシャルを大きくしていくと、フェルミオンの取り得る運動量が大きくなり、次第に分散関係の傾きが等しくなっていくため、虚部のピークが大きくなってゆく。高密度極限では運動量が無限大まで取り得るため傾きが完全に一致し、結合状態密度の発散(第二種 van Hove 特異点)が起こる。これが hard dense loop 近似で得られるふるまいである。

以上より、plasmaron と plasmino はどちらも媒質中で空孔とボソン型励起との結合状態密度が大きくなることで生ずる励起モードであるという点では一致した性質をもつ。そして恐らくこれが plasmaron と plasmino の性質の本質であり、その意味で両者は同じタイプの励起を表していると考えてよさそうである。3次元電子気体と湯川模型との比較では、状態密度が大きくなる領域が赤外か紫外かの違いがあるが、これはフェルミオンの分散関係の違いに起因している。もし湯川模型においても有限質量フェルミオンを採用すれば、湯川模型でもゼロ運動量でフェルミオンとボソンの分散関係の傾きが一致することになるが、電子気体模型と異なり、運動量積分の測度から生ずる因子が残るためにゼロ運動量で結合状態密度の発散は起こらない。こうした違いは plasmaron と plasmino の違いというよりは、採用した模型の性質の違いとみるべきであろう。実際、同じ模型でもグラフェンの有効模型のような空間2次元の場合には、プラズモンの分散関係が3次元の場合と大きく異なるため、結合状態密度の大きくなる運動量領域が3次元の場合と変わってくる。それでもやはり plasmaron と呼ばれる [4]。

従って、グラフェンにおける plasmaron と思われるスペクトル [4] は、もしそれが本当に plasmaron であるならば、同時に plasmino の観測と捉えることができ、高エネルギー物理学の分野にもインパクトを与える発見であるといえる。

References

- [1] B. I. Lundqvist, Phys. Kondens. Mat. **6**, 193 (1967); **6**, 206 (1967); **7**, 117 (1968); **9**, 236 (1969)
- [2] V. V. Klimov, Sov. J. Nucl. Phys. **33**, 934 (1981)
- [3] J. -P. Blaizot and J. -Y. Ollitrault, Phys. Rev. D **48**, 1390 (1993)
- [4] A. Bostwick *et al.*, Science **328**, 999 (2010)