

Title	10年目の電子正孔液滴
Author(s)	大塚, 穎三
Citation	大阪大学低温センターだより. 1978, 24, p. 1-3
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/10329
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

10年目の電子・正孔液滴

教養部 大塚 頴三 (豊中2743)

半導体(とくにゲルマニウム)に、液体ヘリウム温度で光を照射すると、電子・正孔液滴(electron-hole drop, 略してEHD)と呼ばれる一種のプラズマ相が発生する。このことがわかってから、はや10年の月日が経過した。一見はかない露の玉でありながら、この間よく風雪に耐え、霧消せずに今日まで来たものである。感慨はさておき、この液滴、10年目に見せる横顔のいくつかを拾って簡単に綴ってみよう。他人様の仕事、自分たちの仕事が不分明で、多少(?)のヨタも入るが、この際お許し願いたい。また話はゲルマニウムに限ることとする。

1. 安定な“物質・反物質”プラズマ

電子と陽電子とが出会えばポジトロニウムをつくり、およそ 10^{-10} sで消滅する。半導体中の正孔は、いわば陽電子にあたるわけだが、ポジトロニウムに対応して、電子・正孔の対がつくるエクシトンの寿命は、ゲルマニウムのような間接遷移型の物質中ではきわめて長く、マイクロ秒の程度である。多数のエクシトンが空間的に凝縮して、電子・正孔液滴をつくってしまうと、電子・正孔対の再結合時定数は数10マイクロ秒に達する。物質・反物質の共存するプラズマでも、再結合消滅の速さを緩やかにする機構の存在は十分考えられるとして、Alfvén は比喩的にこれをLeidenfrost layer*と呼んだ。間接遷移型半導体の電子・正孔液滴中では、フォノンの介在がこれに当ると考えてよいであろう。液滴は消滅後に何も残りかすがないという意味で、大変純粋な光子気体とも見直される。表面温度の高い恒星と、いわば同等であって、包含する光子の密度はほぼ 10^{17} cm⁻³、直径が1ミクロン程度の天体が、暗黒のゲルマニウム真空中のあちこちで発光しているミニ宇宙像を思い浮かべていただきたい。

* 過熱したフライパンの上に水滴を落したとき、水滴とフライパンとの間に生じる水蒸気層のこと。

2. おどる液滴 走る液滴

電子・正孔液滴は、しばしば原子核と対比される。それというのも、原子核にはもともと液滴モデルというのがあったからである。球状の液滴が、ひとつの軸に沿って、密度を変えないで伸縮する、いわゆるキャピラリー・モード型振動の固有値が、原子核の励起エネルギーに相当するというモデルは、不成功な古典的近似として、今日では忘れられかけている。しかし、電子・正孔液滴の場合、性質がいっそう本物の液滴に近いので、発光を時間分解法で追跡すると、実際にかかる振動を反映した振舞いが見られる。生きもののおどりながら、時間が経ては消滅するのであるが、振動が発光に反映される時の様子は、恒星とのアナロジーでいえば、一種の変光星の振舞いである。

結晶中に生成された液滴は、静止している場合もあるが、もし結晶空間が何等かの歪みを持てば、その勾配に沿って疾走する。液滴の運動をさまたげるものは、主としてフォノンとの衝突である。液滴の速度が大きくなるにつれて、フォノンの抵抗も増加するので、液滴の疾走速度はたちまち終速度に達す

る。その大きさはほぼ音速の程度である。

3. 液滴の表面張力

液滴が生じるからには、当然その表面張力が問題になる。とはいうものの、固体の内部でしか存在し得ないものなので、金魚すくいの輪で受けて張力を測定するなどというわけにも行かない。しかし、生成・消滅の過程で見られる一種のヒステリシスを解析して、その値を見つめることが可能である。現在知られている値は、ほぼ 10^{-4} dyn·cm の程度で、水滴より6桁、4.2 Kの液体ヘリウムより3桁ほど小さい。この値は、液滴が存在し得る臨界半径を与える基礎となる。こちらの方は、およそ1000 Åと出た。

4. 巨大液滴

これまで漫然と記述してきたのは、何も外部から細工をしない結晶中に生じる“通常液滴”に関する属性であった。ところが、試料の一部に不均一な歪みをもたらし、その部分に巨視的サイズの液滴を作れる場合がある。前述のごとく、歪みの勾配に沿って通常液滴が走り、一個所に集って合併する結果、巨大となるのだが、ここでは歪みの影響も手伝って、でき上がった巨大液滴の属性は、通常液滴のそれとは、とんと異なる部分が多い。したがって、おなじ液滴といえども、一概には論じられない。電子・正孔対の密度、平均寿命、緩和時間等すべて異なってくるが、一番顕著なのは液滴の寿命の伸びで、4.2 Kで1.5 msにも達する。将来学問が分化して行った場合、医学に於ける内科、小児科等の分科に似て、通常液滴学、巨大液滴学などということにならぬとも限らない。それほど、おのおのについて話題が豊富なのである。

5. 変形する液滴

球対称の波動関数を持つ水素原子の電子雲は、強磁場のもとでは収縮するとともに、長形楕円体に変形することが知られている。では球対称の液滴に対する磁場の影響はどうであろうか。前掲の巨大液滴は、半径が300ミクロン程度にも及ぶので、適当な撮像管を用いて、視覚に訴えながら磁場の効果を見ることができる。結論として、液滴は磁場の軸方向に沿って縮む。古典電磁気学の範囲で説明を試みれば、液滴の表面に近い部分から中心に向かって、再結合電流が流れ、これに磁場がかかると、液滴をおしつぶすようなローレンツ力がはたらくということが考えられるが、はたして正しい説明になっているかどうか。

6. 共鳴する液滴

液滴はその内部で、電子・正孔対の密度が一杯なので、電磁波に対して一種の共鳴箱たり得る要素を持っている。とくに面白いのは巨大液滴の場合で、マイクロ波によるアルヘン波の共鳴吸収が観測される。アルヘン波というのは、電子、正孔の密度が等しい場合に、磁場のもとで生じるプラズマ波で、これが液滴球中に定在波をつくるのである。液滴の大きさが変化することは、共鳴次数の変化に対応するので、時間経過をたどれば幾つかの共鳴ピークが現われる。磁場を掃引しても共鳴次数に応じたピークを追跡できる。先に述べた巨大液滴の寿命は、この共鳴が存続する時間を測定してしらべることでもできる。

7. フェルミ流体としての液滴

巨大液滴を含むゲルマニウム試料に超音波をかけてみよう。超音波は液滴の内部へ侵入し、フェルミ

準位近傍にある電子は、フォノンのエネルギーを吸って状態を変えることがある。ここで磁場の掃引を行うと、磁場の方向と音波の進行方向とが平行な場合、磁場の変化に応じて、超音波の振動的な吸収が観測される。この振動は、電子のランダウ準位がフェルミ準位と交さる際に生じるものである。似たような振動は、通常液滴に遠赤外光をあてた場合にも観測される。これらの振動の間隔から、電子・正孔対の密度を精密に求めることができる。値としては、通常液滴で $2.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，巨大液滴で $6.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ である。

8. 汗ばむ液滴

液滴の寿命をきめるのは、内部における電子・正孔対の再結合と、表面からのエクシトンの蒸発である。通常液滴の場合、蒸発したエクシトンは、はるか彼方へ散ってしまい、液滴はどんどんやせ細る。ところが巨大液滴だと、エクシトンが折角蒸発しても、前述の歪みポテンシャルのために、たちまち液滴表面へ引き戻される。このため、巨大液滴の周囲には、逃げようとして逃げられないエクシトンがべったりと付着し、準定常的な層を形成する。この層の厚みはほぼ1ミクロンで、通常液滴の径と同程度である。エクシトンが液滴から蒸発するに要するエネルギー、すなわち仕事関数は、通常液滴で15 Kの程度であるが、巨大液滴では蒸発してもすぐ引き戻されるので、エクシトンが液滴と欠別するための実質の仕事関数は、別に定義しなおす必要がある。現実には、34 K以上のエネルギーが、欠別のために要求される。(表紙図参照)

9. 液滴の誕生をめぐって

大海の水も一滴より。一滴の水は一分子よりで、電子・正孔液滴ができるまでに、エクシトン分子の生成過程があり、多分子状態を経て液滴にまで成長したのか、それとも何か不純物のような核があって、そのまわりに電子・正孔の対が多く集まったのか、あるいはその双方の過程があったのかという疑問に、現在までの研究はあいまいな返事しかできない。しかし、決着をつけるための研究手段は存在する。ひとつの命題を解決するごとに、新たに開ける展望を前にして、研究者の興味はつきない。