

ローレンツ対称性の破れとドレスト光子

坂野 齋

山梨大学工学部 *

(Dated: August 28, 2020)

前に「化学反応とドレスト光子」というタイトルで書いた記事 [1] は、「超伝導体の応答である反磁性電流は、一般的な物質に遍く内在している」という趣旨のフリッツ ロンドンの指摘を動機としたものでした。具体例として、生体内で大切な化学反応を担うヘムにおいて、中心の鉄イオンの高スピン状態への応答として反磁性電流が存在するであろうこと、それが電流密度-電流密度相互作用とみなせること、その相互作用は局在するベクトルポテンシャルに介在されるものであること、ヘムの関わる化学反応=共有結合の開裂には物質に内在するオフシェル-ベクトルポテンシャルが関わっているであろうことを述べました¹。

さらに、一般的な話として、物質内にある電流密度-電流密度相互作用を担うベクトルポテンシャルは、ちょうど、電荷密度-電荷密度相互作用を担うスカラーポテンシャルに対応する役割をしているのに同じ資格で扱われないこと、このように物質に内在して相互作用を担うスカラーポテンシャル、ベクトルポテンシャルは輻射場=オンシェル電磁場と異質のオフシェル電磁場であり、この文脈においてオフシェル電磁場の量子化=ドレスト光子の量子場としての理解は未解決の問題であることを述べました²。

この記事では、物質に内在するオフシェル-ベクトルポテンシャルの源泉としての電流密度、及び、電流密度-電流密度相互作用について他の例を探索し、それらと非相対論性=ローレンツ対称性の破れが関わっていることを述べたいと思います。簡単にいえば、電流密度やベクトルポテンシャルという3元ベクトル場を電荷密度場やスカラーポテンシャルというスカラー場と別の自由度として認知する前提には、非相対論系として原子核の平均位置が静止してみえる座標系を採用している、ということがあるのです。

*Electronic address: banno@yamanashi.ac.jp

¹ 非相対論系である物質系での電磁ポテンシャルのゲージとして、クーロンゲージを採用します。そうすると、ベクトルポテンシャルは横成分だけになり、横電流密度-横電流密度の相互作用を担い、スカラーポテンシャルは電荷密度-電荷密度相互作用を担います。役割が明確に分けられわかりやすくなります。

² 「化学反応とドレスト光子」の最後の文章：「ロンドンの先見的な考えは、オフシェル電磁場の量子化という根本的な問題と関係しています。」はいささか、藪から棒でしたので、この場をお借りして補足させていただきます。

思いつくまま、物質内の電流密度とその間の相互作用を列挙してみます：

✓ 電子や原子核がもつスピンは磁気双極子モーメントを伴い、これはさらに局所的な磁化電流に焼き直せます。従ってスピン-スピン相互作用は電流密度-電流密度相互作用と見なすことができます。

✓ スピン-軌道相互作用は、電子の内部自由度であるスピンの伴う磁気双極子モーメント＝磁化電流密度と外部自由度である運動量に伴う電流密度の相互作用とみなせます。

✓ 原子核（または、電荷をもったイオン殻）の運動は電流密度と内在する電磁場をもたらします。特に、TO フォノン（横光学フォノン）は、フォノンの進行方向に垂直な方向の電流密度＝横電流密度を伴い、オフシェル-ベクトルポテンシャルの源泉となり、電子の運動量と相互作用をすることができます。これも電流密度-電流密度相互作用といえます。

このように、固体物理学や化学に登場する相互作用を、根本的な電磁相互作用という観点から整理することが、内在電磁場＝ドレスト光子の理解につながると考えていますが事態はそれほど簡単ではありません。上記の項目について、順に考えていきましょう。

直接のスピン-スピン相互作用はディラック方程式の非相対論的極限として導出されるパウリ方程式中のスピンと磁場結合の項から得られます；この磁場の源泉としてスピンを考えたときのものがベクトルポテンシャルを介するスピン-スピン相互作用となります。この相互作用は、小さいものとして通常は無視されますが、局所スピンの原子スケール近傍でのオフシェル-ベクトルポテンシャルは化学反応に有意に寄与できる大きさであることは前の記事でも触れました。

直接のスピン-スピン相互作用ではないですが、いわゆる交換相互作用はスカラーポテンシャルが担う電荷密度-電荷密度相互作用（電子間クーロン相互作用）に電子の場の反交換関係を考慮することで現れます。ベクトルポテンシャルを介する相互作用ではありませんが、非相対論系であることを前提として導出される物質に内在して相互作用を担うスカラーポテンシャルと量子場のインタープレイにより現れます。それは、多様な物質の有り様の原因となっています。たとえば、交換相互作用は、原子中の電子がなるべくスピンをそろえるように働き、フントのルールの原因です。一方、原子から分子ができるときには近隣に他の原子核があることで電子の行き来できる範囲がひろがることにより零点エネルギーの得が交換相互作用の得にまさり、高スピン状態が消えて共有結合ができると考えることもできます。交換相互作用を電流密度-電流密度として見ることで、何がわかるのかは今不明ですが、少なくとも、スピンを磁化電流密度とみると、ベクトルポテンシャルを伴っていることは確

かです。この内在するオフシェル-ベクトルポテンシャルを含めた物質系の自己無撞着な議論はまだありません。

スピン-軌道相互作用は、ディラック方程式を非相対論系へ還元するときパウリ方程式導出の次の段階の近似で現れる相対論的效果の一つです。スピン-軌道相互作用は、出発点とするディラック方程式でベクトルポテンシャルがなくともスカラーポテンシャルがあれば導出されます。スピン-軌道相互作用についても、スピンを磁化電流密度とみるとベクトルポテンシャルを伴うので、交換相互作用のときと同様に物質系がこのオフシェル-ベクトルポテンシャルを含めてどのように自己無撞着に決まっているのか、という未解決な問題があります。

つぎに、フォノンですが、この低波数成分は系全体のエネルギーを変えずに平行移動、回転移動をもたらすものですので、ローレンツ対称性の破れにより生じる南部-ゴールドストーンボソンといえます。このような大域的なモード、とくに大域的な光学フォノンにともなうオフシェル-ベクトルポテンシャルと電子の結合は議論されていないのが現状です。

さて、物質に内在するベクトルポテンシャルを探索するために、スピンや光学フォノンにともなう電流密度とそれが関わる相互作用に注目して考察をしてきました。その電流密度は内在するベクトルポテンシャルの源泉である一方、それが参加する相互作用は、スカラーポテンシャル、量子場の効果も関わり複雑です。しかし、電流密度に関わる現象に共通のこととして、非相対論的極限で現れる、または、認知されることがあります。物質に内在する相互作用の担い手として内在するオフシェル電磁場＝ドレスト光子を考えるとときには、非相対論系であること＝ローレンツ対称性の破れを前提とし、相対論的效果や南部-ゴールドストーンボソンを必要に応じて取り入れていくことが鍵とされます。

[1] 坂野 齋. 化学反応とドレスト光子, 2019. http://rodrep.or.jp/wp-content/uploads/2019/12/Bannno_20191225.pdf.