

神経細胞の軸索伝導の量子論モデル (ポラリトンの役割)

Quantum Theory of Neuro-Conduction on Axion, and Polaritons

松浦弘幸*¹
HIROYUKI Matsuura

和崎克己*²
KATSUMI Wasaki

*¹ 国立長寿医療研究センター
National Center for Geriatrics and Gerontology

*² 信州大学工学部
Shinshu University

We proposed the positive hypotheses of neuro-interferences, ephapse as engineering models.. The neuro-interferences and synaptic ones as ephapse are propagated by polaritons which are a kind of quasi particles, i.e. quantized polarization waves. Polaritons, which has spin 1, are massive vector particles and massive photon. polaritons are connecting between many ionic current, Na⁺, K⁺, Cl⁻ etc when neurons, fibers (axons) are conducting their excitations. The Na⁺ currents, into insides of membranes of axons, cause the K⁺ currents to outside of axons through charged or non-charged quantized polarization wave, i.e. polaritons. Various interferences, ephapse, synaptic etc., are intermediated by polaritons. Those quantum interferences are commonly adjusting our neural and brain's conditions by interacting with each neurone. One of my purposes is to study effect of quantum neuro-interferences, and proposed new concepts of neural network accompanied with quantum interferences.

1. はじめに

多くの神経軸索間やシナプス間のもれ電流による干渉は、通常の神経モデルでは無視されてきた。しかし、脳に電磁場が発生し、個々の神経細胞の活動がその電磁場の中で行われる事を考えると、相互干渉を考えた神経モデルを考える事は妥当と言える。Arvanitaki が並べられた 2 本の神経軸索の間で、一方の興奮が他方の神経軸索に伝導するというエファプス(Ephapse)を発見した。これは、一種の人工シナプスの創造と見なされたが、今日、エファプスは脱髄や神経損傷をした病的な軸索に観察される現象であり、一般にはこの様な干渉効果は非常に小さく灼熱痛(causalgia)や神経痛(neuralgia)等の負の評価しか与えられていない。しかし、我々は、神経のギャップジャンクションは、このエファプスの積極的応用例だと考えている。この微弱なエファプスが正常な神経軸索でも常時存在し、神経細胞の微妙な調整や状態に影響を及ぼし、時にはマクロな心理現象として、発想、飛躍、錯誤、幻覚等を引き起こしていると考えている。マクロ的にも脳の電磁気学的特性を脳磁図計で観測すれば、磁場の変動が観察される。物理学的には、空間的な磁場の変動は電場を生み出す。電場の変動は、誘導起電力や、再度、磁場を発生させる。このような脳の中で発生する電磁場が、場の発生源でありかつ、その電磁場の中に存在する神経細胞の活動電位や静止電位などに影響を及ぼさないはずはない。つまり、少しミクロな立場で考えれば、お互いに神経細胞が電磁場を通して干渉し、互いに、協調、離反等の活動に使用されている可能性を想定している。先のエファプスもその1つである。神経活動が物質反応やイオン等のミクロな活動で維持されている以上、先人達の偉大な業績がマクロな力学や電磁気学に基礎を置く以上、我々は、ミクロな物質の相互作用の解明を期待するためには、ミクロな力学である量子力学にその神経論的基礎を置くのは当然といえる。この論文では、先人達が光を当てなかった量子力学に基づいた活動電流・興奮伝導のモデルを提案する。

連絡先: 松浦弘幸, 国立長寿医療センター研究所, 愛知県大府市森岡町源吾 35, hmatsu@ncgg.go.jp

それは、一連の伝導過程に伴う分極、脱分極、そして、再分極過程を量子化することで準粒子・ポラリトンの概念を導入し、そのポラリトンの伝播として軸索伝導を記述した後、ポラリトンが従う方程式を導出する。

その結果、ポラリトンは偏極して質量を伴う光子であることを示した。さらに、現在の神経伝導モデルでは、神経活動電流に先立ち局所電流(コンデンサーの充電をモデルにした容量電流)が流れるとされている。さらに、ランビエ絞輪では、Na⁺やK⁺の膜の内外への流入・流出が生じて、その間に電流が形成されると言われている。

我々は、上記の“電流”に対して、“分極波”の伝播に修正することを提案する。つまり、細胞膜や髄鞘は誘電体であり電流は流れない。そのために、誘電体の分極の状態が伝搬する、つまり、分極が波となって伝わって行く。さらに、量子化された分極波は準粒子・ポラリトンとしてトンネル効果を起こして、特定のエネルギー・運動量を持つ領域では、共鳴現象を生じて。瞬時に多くの髄鞘を100%透過し、理論的には伝導速度は光速近くまで可能である。これらが、ポラリトンモデルは、従来の“電流”を“ポラリトン”に修正することで、情報理論や量子電子回路に新たな利点を持ちこむ。

2. 準粒子としてのポラリトン

神経軸索では、分極、脱分極、そして、再分極のという一連のプロセスが、ナトリウムイオンとカリウムイオンの出入を通して行われる。膜内外の活動電位の時間変化を分極ベクトル(負から正に向かう)の大きさや方向の変化を模式化した(図1)。

紙面に垂直な方向から見て人には、興奮伝達に伴う分極ベクトルの大きさは、図 A のように見える。しかし、軸索の軸方向から分極ベクトルを眺めると(図 A の太い矢印)、図 B の活動電位の変化に伴い分極ベクトルの回転として観察される(図 C)。図 A と図 C の観察結果より、分極ベクトルは軸索上を回転しながら、軸方向(シナプス方向)に向かって進む事になる。結局、分極ベクトルの動きは、軸索方向・Z 軸方向に沿う螺旋運動としてモデル化が可能である(図 D)。

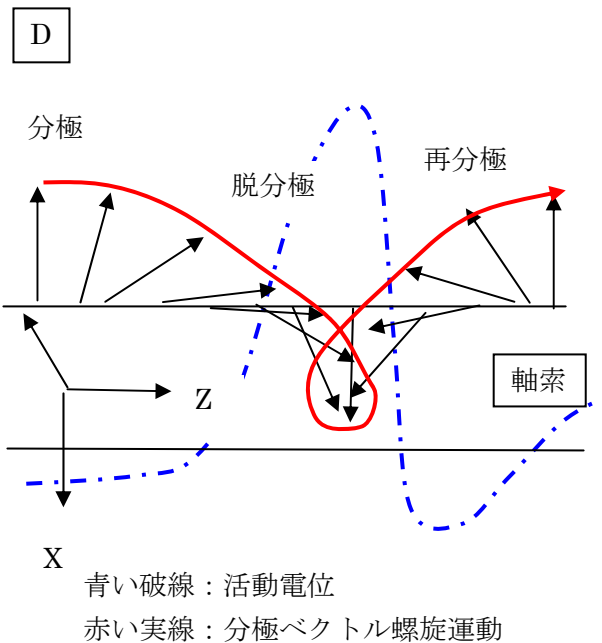
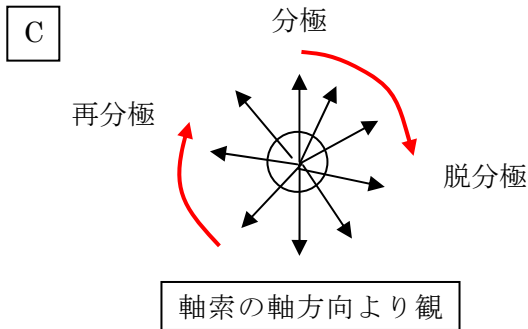
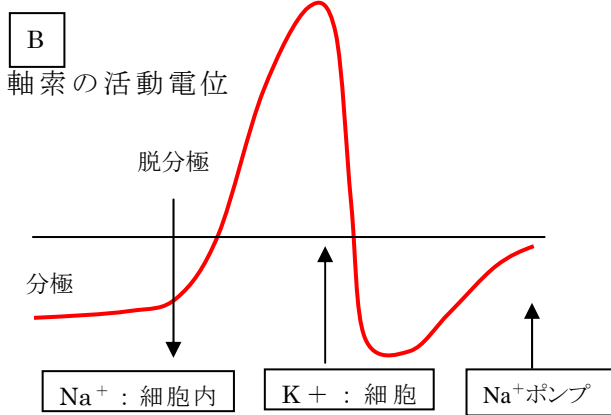
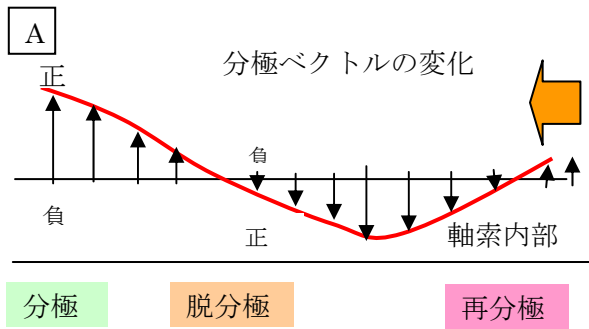


Fig. 1 分極ベクトルの軸索上での変化

軸索を構成する膜はリン脂質が中心であるかので、強誘電体となる．そこでは分極ベクトルが容易に形成され、その回転運動は分極ベクトル振動となり伝搬する．この分極子の振動がポラリトンであり、分極ベクトルの回転の伝播がポラリトンの運動である．これは、実在の粒子ではなく、分極した局所に引き寄せられた水やイオン等から準粒子である．

3. ポラリトンの性質

ポラリトンは分極ベクトル（マクロ的には分極波）が量子化された準粒子である．この準粒子が軸索上を伝導して、興奮・活動電位の伝播が行われる．すなわち、ポラリトンの伝導速度は、分極波が空間や軸索を伝わる速度に対応する．真空中の分極波は、電磁場の伝搬速度に相当して光速だが、軸索上の分極波は有髄神経の伝導速度に相当すると仮定する．さらに、量子化された分極波ポラリトンの存在する範囲は、ランビエの絞輪の幅 $1 \mu\text{m}$ とすると、これは、ポラリトンの基底状態の波動関数に相当する（図2）．

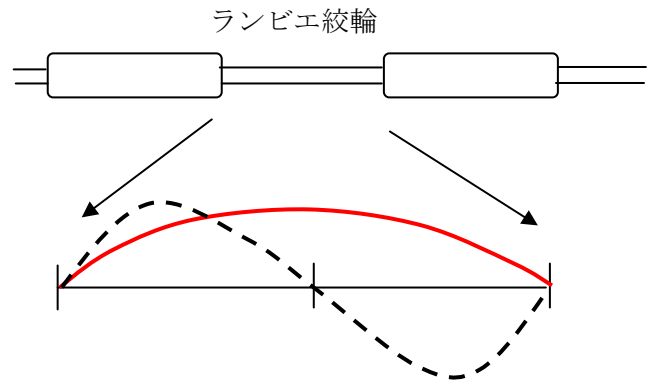


Fig. 2 ランビエ絞輪に存在するポラリトン

図2には、ランビエ絞輪に存在するポラリトンの波動関数の状態図を描いた．実線が基底状態、破線が第1励起状態である．基底状態に相当する．基底状態でのポラリトンの質量を見積もる．簡単な関係式

$$p = \frac{\hbar}{\lambda} = mv \tag{1}$$

に興奮の伝導速度 $v = 100\text{m/s}$ 、分極子・ポラリトンの波長 $\lambda = 10^{-6}\text{m}$ 、プランク定数とすると、ポラリトンの質量は約 $6.7 \times 10^{-30}\text{kg}$ 程度となり、電子質量の約 10 倍を持つことになる．自由なポラリトンの運動エネルギーは、

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 = 2.0 \times 10^{-7} \text{ (eV)} \tag{2}$$

程度となり、水素結合エネルギーより 10^{-6} 倍、電子の運動エネルギーの 10 倍ほどである．結局、質量を持つ光子としてのポラリトンは、質量は約 $6.7 \times 10^{-30}\text{kg}$ のスピン 1 の準粒子と見做される．

次に常温での熱エネルギーがポラリトンに与える影響を検討する．温度 $T = 300\text{K}$ での熱が持つエネルギー量はボルツマン定数を用いて、

$$k_B T = 4.2 \times 10^{-21} \text{ (J)} \tag{3}$$

であるが、裸のポラリトン運動エネルギーは、式(2)と(3)より、熱エネルギーより、 10^{-5} 倍ほど小さい．このために

裸のポラリトンは、熱運動の擾乱を受け熱ノイズにより正常の運動や情報を担う事が出来ない。しかし、運動エネルギーは質量に比例するから、ポラリトンの質量が、逆に 10^5 倍ほど重くなる事が可能であれば熱ノイズと同程度のエネルギーとなり、熱擾乱に対抗できる。1個の水分子の質量 m_w は 3.1×10^{-26} Kg, そして、熱エネルギーと等価な質量を m_T とすると、

$$m_T \approx \frac{k_B T}{v^2} = 4.2 \times 10^{-25} \text{ (Kg)} \quad (4)$$

である。水分子の質量との質量比は

$$\frac{m_T}{m_w} \approx 12 \quad (5)$$

である。これは、裸のポラリトンが高々数個の水分子を引き付けて準粒子を形成できるならば、熱ノイズと同程度のエネルギーを獲得できる。水分子同士の分子間隔は、約 2 \AA とすると、ランビエ絞輪の長さが $1 \mu\text{m}$ であるから、その絞輪の所に、水分子は約 5000 個ほど整列できる計算となる。先の式(5)を考慮すれば、裸のポラリトンが水分子を引き付けて準粒子を形成するの十分な広さである。

裸のポラリトンが準粒子を形成する可能性を統計的なゆらぎから考察する。統計力学によれば“ N 個の粒子数が存在する場合、この時の粒子数のゆらぎは、 $N^{0.5}$ 、誤差率は、 $N^{-0.5}$ である”と言われている。統計力学によれば“ N 個の粒子が存在する時、粒子数のゆらぎは、 $N^{0.5}$ 、誤差率は、 $N^{-0.5}$ となる。”ヒトの軸索の長さを 1m 、水分子間距離を $2.0 \times 10^{-10} \text{ \AA}$ とすると、軸索 1m の中に水分子は 5.0×10^9 個も存在するので、粒子的ゆらぎは、 7.0×10^4 個である。この粒子数を長さに変換すれば、約 10^{-5}m となる。このゆらぎの幅は、ランビエ絞輪の高々 10 倍以下であり、オーダー的にも裸のポラリトンの波動関数が存在する範囲と一致している。

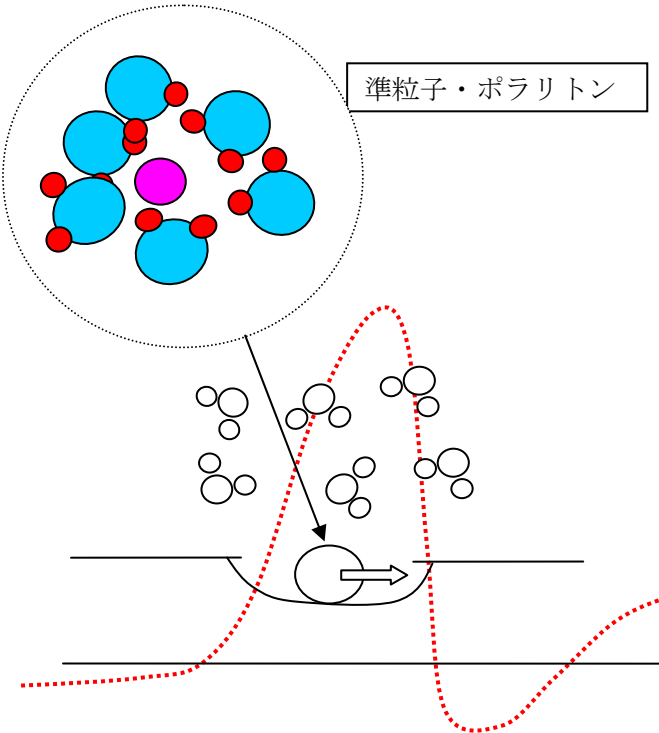


Fig. 3 軸索上を伝導する準粒子・ポラリトン

図3は、裸の分極子（裸のポラリトン）を中心に水分子が配位する。これより準粒子のポラリトンが形成される。我々が実際に計測できるのは、準粒子としてのポラリトンであり、裸のポラリトン、裸の電子が計測されないのと同様に通常は、観測にかからない。下の図は、準粒子・ポラリトンは軸索上を運動して、興奮の伝導やトンネル効果によりエファプス、量子干渉に関与する。この量子的な準粒子・ポラリトンの従う方程式を次節で導出する。

4. 量子分極波・準粒子のポラリトンの式

ポラリトンは電磁相互作用を担う質量を獲得した光子であるから、スピン1のベクターフォトンと考えられる。ポラリトンの進行方向を Z 方向に取り、 R 偏光（右偏光）した電場ベクトルを x, y 偏光状態で表現すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(z, t) &= \\ E_0 \boldsymbol{\varepsilon}_x \exp i(kz - \omega t) + E_0 \boldsymbol{\varepsilon}_y i(kz - \omega t + \pi/2) \\ &= E_0 \boldsymbol{\varepsilon}_x \exp i(kz - \omega t) + iE_0 \boldsymbol{\varepsilon}_y \exp i(kz - \omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は偏光ベクトルとする。

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}(z, t)\rangle &= |\pi_x\rangle \exp i(kz - \omega t) + i|\pi_y\rangle \exp i(kz - \omega t) \quad (7) \\ |\pi_x\rangle &= E_0 \boldsymbol{\varepsilon}_x, \quad |\pi_y\rangle = E_0 \boldsymbol{\varepsilon}_y \end{aligned}$$

これを規格化すると、最終的に右偏光ポラリトンの表示は、

$$\begin{aligned} |\mathbf{E}(z, t)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|\pi_x\rangle + i|\pi_y\rangle) \exp i(kz - \omega t) \end{aligned} \quad (8)$$

を得る。また、ポラリトンの表示式(7)を z で偏微分、

$$\frac{\partial^2 |\mathbf{E}(z, t)\rangle}{\partial z^2} = -k^2 |\mathbf{E}(z, t)\rangle \quad (9)$$

両辺に $-\hbar^2/2m$ を掛けて、 $-V |\mathbf{E}(z, t)\rangle$ を加える。

$$\frac{\partial |\mathbf{E}(z, t)\rangle}{\partial t} = \hbar\omega |\mathbf{E}(z, t)\rangle \quad (10)$$

上記のように時間微分して、さらに、

$$E = \hbar\omega = (\hbar k)^2 + V \quad (11)$$

に留意すると、時間を含むシュレディンガー方程式

$$i\hbar \frac{\partial |\mathbf{E}(z, t)\rangle}{\partial t} = \left[\frac{-\hbar^2}{2m} + \hat{V}(z, t) \right] |\mathbf{E}(z, t)\rangle \quad (12)$$

が導かれる。同様に式(8)を時間と座標で微分して、エネルギー・運動量保存則と外部場のポテンシャル V を加えると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\omega^2/k^2)} \frac{\partial |\mathbf{E}(z, t)\rangle}{\partial t} &= \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + m^2 \frac{\omega^2}{k^2} + \frac{\hat{V}(z, t)}{(\omega^2/k^2)} \right] |\mathbf{E}(z, t)\rangle \end{aligned} \quad (13)$$

$$v = \omega^2/k^2 \Rightarrow c^2$$

となり、クライン・ゴールドン方程式を得る。

5. まとめと考察

「ポラリトンモデルの提案と媒介粒子仮説」

神経軸索で興奮伝導や量子干渉を起こす媒体として、準粒子・ポラリトンの存在を考えた。ポラリトンは神経軸索膜で活動電位に伴って発生する分極が量子的波動として、軸索上や軸索間に伝搬して行く現象を、分極ベクトルの回転として量子モデル化したものである。量子的分極波がエファプスやシナプス干渉、興奮の伝導の媒介等、ミクロな視点からの神経電気現象を担い、この分極ベクトルの変動の伝播・ポラリトンが神経的電磁気現象を伝える情報担体である。準粒子としてのポラリトン質量は約 10^{-25}Kg 、スピン1の質量を持つ光子として表現される。電荷は、正負、そして、ゼロの3種類が可能であり、裸のポラリトンの質量は、電子質量の $1\sim 10$ 倍程度 ($6.7\times 10^{-30}\text{Kg}$) である。通常は、熱ノイズの擾乱に耐えるために、水和した状態で存在する。高々、10 個程度の水分子が、裸のポラリトンに引き寄せられて水和・準粒子を形成する事が要求され、我々が観測するのも水和して準粒子化したポラリトンである。これは、“分子機械は、熱ゆらぎ程度のエネルギーで効率よく動作する”という事実に対する1つの説明を与える。神経伝導のポラリトンが持つ基底状態の波長は $1\mu\text{m}$ を中心に $10\mu\sim 0.6\mu\text{m}$ に存在する。さらに、ポラリトンは、シュレディンガー方程式やクライン・ゴールドン方程式に従う。厳密には、3 種の電荷(正負、ゼロ)とスピン1、そして、質量を持つことから電荷と質量を持つベクター粒子の式であるプロカ場で記述することが妥当である。Na⁺や K⁺の膜の内外への流入・流出が伝導原因のカレントを形成し、その効果を軸索方向や軸索外に伝搬するのが、伝導粒子としてのポラリトンの役割である。これは、物質世界における基本粒子が電子や陽子であり、その相互作用を媒介するのが光子やグルーオンに相当するゲージ粒子という関係に似ている。

これが、神経回路網では常に存在して、回路網の調整や逸脱に関与している、

さらに、隣接する軸索や神経細胞とは、イオン流以外にもポラリトンによる量子効果が期待できて、通常的に水面下での情報交換も期待できる。

参考文献

- [Matsuura H], Matsuura H, Wasaki K: Expression of Quantum Bay's Form and Its Calculations, ICIC Express Letters, An International Journal of Research and Surveys, ICIC International,6(6),1653-1657, 2012
- [Matsuura H], Matsuura H: Quantum Neural Net, Polariton, and Classical Neural Networks, ICIC Express Letters, An International Journal of Research and Surveys, ICIC International,6(6),1665-1669, 2012
- [Matsuura H], Matsuura H: Quantum Theory of Polariton on Neuro-Conduction and Ephapse (Quantum Current and Role of Polariton on Axon), ICIC Express Letters, An International Journal of Research and Surveys, ICIC International,6(6), 1671-1675, 2012
- [Matsuura H] Nakano M : Quantum Circuit, Lots, Interference and Basis of Neuro-Computation, Int. Jr. of Innovative computing, information and control, IEEE computer Society , 3(1), 7-14, 2009

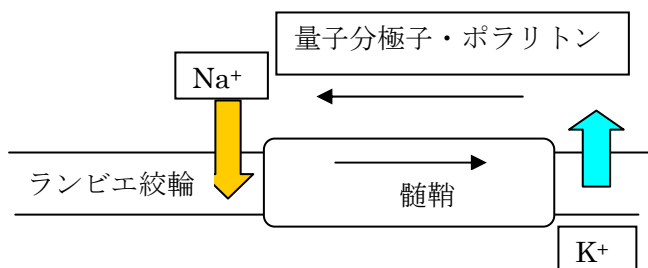


Fig. 4 Na⁺, K⁺のカレントと媒介粒子ポラリトン

通常、Na⁺の流れで、K⁺の流出が開始されるが、この両者の陽イオン流の間で電気的情報伝播を司るのが、量子化された分極波・準粒子・ポラリトンである。ポラリトンは、イオン流の情報を隣接する場所や空間に運ぶが、電子や陰イオン、陽イオン等の実体の移動と異なり、マクロ的には隣接する場所に“分極現象”を引き起こすのみであり、高速な情報伝搬が可能である。また、軸索内部では、ポラリトンがトンネル効果を生じてトンネル電流となり、一層の高速な情報伝搬が可能である。さらに、つまり電荷を持った実体的なイオンは、軸索の膜の外と内を出入りするだけであり、波を発生させる源である。その出入りするときに生じる膜の誘電体の分極振動が、量子化され水和した準粒子・ポラリトンとして隣のランビエ絞輪や軸索の隣接部、そして、他の神経細胞に伝播など、量子効果を引き起こす。