# 「速い光」と「遅い光」に現れる因果律を満たした情報速度

冨田誠

静岡大学創造科学技術大学院

# Causal information velocity in slow and fast light

Makoto Tomita

Department of Physics, Faculty of Science, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

Microspheres trap light in orbits near the surface in the so-called whispering gallery (WG) modes. These modes strongly modify the phase of the interacting light and realize both slow and fast light. Specifically, in a coupled resonator system, we observed exotic spectral structure and the relevant slow light propagation as a classical analogy of extremely slow light obtained with electromagnetically induced transparency. We examined the propagation of non-analytical points encoded on temporally smooth slow and fast optical pulses as information, and showed that information velocity is equal to the light velocity in vacuum or the background medium, independent of the group velocity.

# 1.「速い光」と「遅い光」

光の伝播速度は物理にとって基本的な問題 であり、その制御は応用的に重要な課題であ ろう。「遅い光」は、物質と光の相互作用を増 強し、著しく遅い光の伝播状態[1-3]、さらに は、光の凍結[4,5]を作り出そうとするもので ある。遅い光は、光情報処理におけるパルス 遅延、メモリー、また、非線形光学など応用 的な関心を集めている。光を光のまま取り扱 うことは量子情報を処理する際には大きなア ドバンテージであろう。遅い光は、フォトニ ック結晶など構造を制御した系[1-3,6,7]、電 磁誘起透明化現象(Electro magnetically Induced Transparency =EIT)[8]、コヒーレ ントポピュレーション振動[9]、などコヒーレ ンスを制御した原子系、誘導ブリリュアン散 乱の利用などによって観測されている。

一方「速い光」は古い歴史を持っている。 これは、真空中の光速度 cよりも速い、ある いは負の光の伝播速度を意味している [10-12]。負の伝播速度では、光パルスのピー クが媒質に入射するよりも速く、媒質から出 射してくるという一見奇妙な現象を引き起こ す。光の伝播速度は、位相速度、群速度、ピ ーク速度、重心速度、エネルギー輸送速度、 情報速度、先端速度、などが定義されている が、このうち、少なくとも初めの4つは光速 度 cを超えることが可能である。速い光は、 励起子吸収、2重ラマン利得構造[13]、フォ トントンネリング等で観測されている[14]。

本講演では、単一もしくは、結合したリン グ共振器構造で現れる速い光、遅い光の観測 と、その中での因果律を満たした情報速度を 中心に、分散媒質中での光パルスの伝播現象 を議論したい。

## 2. 微小球による光の伝播制御

真球度の極めて高い微小球、円形ディスク、 リング導波路には、Whispering Gallery(WG)モードと称される表面近傍を周回するモ ードが存在する。このモードは光を強く閉じ 込め、微小球などは優れた共振器として働く。 実験的には $Q = 10^9$ が実現され、理論的には  $10^{20}$ という非常に大きな値が議論されている。 WGモードは球表面で全反射によって光を閉 じ込めているが、境界は曲率を持っており、 不完全な反射によりWGモードは本質的に損 失を伴ったものである。共振器 QED 現象、マ イクロレーザー、共振器による波長変換、な どさまざまな研究が進められている[15-17]。



図1.結合した微小球共振器による光の伝播速度制 御の実験の概念図。S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>は第一、第2の微小球。



図2単一微小球共振器で観測した速い光(under coupling 条件)と遅い光(over coupling 条件)。[文献 19]

結合した微小球共振器の例を図1に示す。 直列に連結された第1球(S<sub>1</sub>)と第2球(S<sub>2</sub>) がファイバーに接続されている。光の伝播制 御に微小球を利用するためには、外部光を微 小球内の特定の1つのモードに選択的にほぼ 100%の効率で結合させることが不可欠である。 この結合はテーパーファイバーによって近接 場光を介しておこなわれる。微小球-ファイ バー系の入出力特性は方向性結合理論 [18, 19]によって記述できる。

**2-1.単一微小球に現れる速い光と遅い光** 初めに、S<sub>2</sub>を取り除いて、単一の微小球の みによる光学応答を考えよう。微小球とファ イバーの距離が近づき、結合が強くなるに従って透過スペクトルにディップ(=吸収)が 現れる。このディップは入射光の周波数が特 定のWGモードに共鳴したときファイバーか ら球へ光が落ち込むことによって現れる。結 合が強くなるにしたがって、ディップが深く なる。球内部の損失に比べて結合が弱い under coupling 条件 ( $x_1 < y_1$ )下では、透過位相 シフト $\theta(v)$ は周波数の増加に伴って減少し、 共鳴周波数近傍で異常分散が現れ、いわゆる 速い光が観測される。一方、Over coupling 条件( $x_1 > y_1$ )では、正常分散が現れ遅い光



図3.結合微小球共振器共による EIT 型の(a)透過ス ペクトル、(b)分散関係。黒丸は実験、実線は理論。 (c) B:誘導透過窓で観測された遅い光、C:窓の長波 長側の吸収領域での速い光、A:非共鳴状態での透過 パルスの時間波形。[文献 18]

が出現する。すなわち、1つの微小球で遅い 光も、速い光も作り出すことができる。  $x_1 = y_1$ は、臨界結合と称され、入射光エネル ギーはすべて微小球内部で散逸され、定常状 態での透過率はゼロになる。図2は、単一微 小球-ファイバー系で遅い光と、速い光を観 測した実験例である[19]。単一の微小球は、 非常に薄い原子の層に対応し大きな時間遅延 を作り出せないが、導波路に多数の微小球を 配列した系では、それにともなった大きな時 間遅延を作り出すことができる。

### 2-2. 結合微小球に現れる遅い光

2つあるいはそれ以上の高Q値共振器を連 結した系は共振モード間の干渉効果の点から 興味深い。ここでは、原子系で観測される EIT =Electro-magnetically Induced Transparen -cy)と類似した現象を、結合した共振器の干 渉効果によって実現し、それに伴った遅い光 の観測した実験を紹介する。この現象は結合 共振器誘起透明化(CRIT=Coupled Resonator Induced Transparency)と称される。歴史的に は、「遅い光」はそもそも冷却原子の EIT にお いて議論された。この透明窓のバンド幅は、 結合光の強度を変えることで制御可能で、非



図4左列は速い光、右列は遅い光を観測した実験条件。(a)と(b)ガウス波形、(c)と(d) 不連続点を立ち上がりに encode したもの、(e)と(f)立ち上がりに encode したもの。[文献 22]

常に狭いスペクトル構造を作り出すことがで きる。それに伴った急峻な分散構造を利用し て、原理的にまったく吸収のない状態で17m /sという非常に遅い光が実現された[8]。

図3(a)は、実験的に観測した結合微小球系 における CRIT 型の透過スペクトルである。実 線は計算結果である。S2をS1に近づけていく と、S<sub>1</sub>によって作られるディップの中に透過 率の増加する領域が現れる。EIT と同様な見 方をするならば、この透明窓は S<sub>1</sub>と S<sub>2</sub>の両 球を通過する光路と、S<sub>2</sub>をバイパスして S<sub>1</sub>の みを通過する光路が、消滅的な干渉をするこ とによって作られる。結合を強くするにした がって透過ピークは増大していく。図3(c) には、透過パルスの時間プロファイルが示さ れている。A は非共鳴周波数、B は CRIT のピ ーク、C はピークのすぐ長波長側の透過ディ ップである。C では S<sub>1</sub>の under coupling 条件 での速い光が現れ、B では CRIT 領域での遅い 光が現れている。特に、透明化した窓では、 入射波形がほとんど減衰することもなく、波 形を変えることなく 8.5nsec 遅延している。 これは、原子系での EIT に現れる遅い光を、 全光学系で実現したものといえる[18]。原子 系では利用可能な周波数は原子の固有遷移に 制限されるが、微小球系では球径の調整で自 由に設定できる。



図5.不規則パルスの高次の分散媒質中の伝播の様 子。パルス幅は広がり、変形しながら伝播するため 従来の群速度の概念は破綻する。しかし、重心は net delay によって正確に記述できる。[文献 25]

#### 3、情報速度とは、

光速度を超えるパルス伝播はと一見すると 相対論に反し、長い議論を引き起こしてきた。 Sommerfeld と Brillouin は Lorentz 媒質中のす るパルス伝播を saddle point 法を用いた漸近的 な手法で解析した。主信号の到達前には、2 つの precusor (前駆信号) が現れる。もとも重 要な結果は、precusor の先端はいつでも光速度 c で伝播し、従って相対論的な意味での因果 律は必ず保持されることになる。Brillouin は、 さらに信号速度を主信号の到達時刻で定義し た。この定義では、正常分散中では信号速度 はおおよそ群速度に一致し、また、異常分散 中では c になる。ところが、最近になって、 真の情報はパルスの中に encode された non-analytical point に含まれるという議論がな された[20,21]。実際、ガウスパルスなど解析 的(analytical) 関数で表現される波形では、 例えばピークの到達時刻はそれ以前に到達し たパルスの Tailor 展開によって予言可能であ り、従って、ピークは新しい情報を何も有し ていないことになる。

図4は、リング共振器を under coupling 条件(左列)、over coupling 条件(右列)にし、 速い光、遅い光を実現したものである。(a) と (b)に示すガウス型のパルスではパルスのピー

クは、おのおの異常分散と正常分散を反映し て時間推進もしくは遅延を示している。(c)と (d)はパルスの立ち上がり、(e)と(f)は立ち下が りに送信者の情報として non-analytical point を encode したものである。パルスのピークは 依然として推進もしくは遅延を示しているが、 non-analytical point は入射と同時に現れ、情報 は光速度で伝播していることと矛盾しない結 果が得られている[22]。特に、遅い光における 情報速度は Brillouin の定義した信号速度(~群 速度)とは対比的である。立ち上がり、立ち下 がり(2.5ns)は、共鳴スペクトル幅(3.6MHz)に 対して広いスペクトル幅を有しているため共 鳴系は、立ち上がり、立ち下がりに応答する ことはできずに過渡応答を示す。この応答は、 最近、原子系で議論されている共鳴光学 precusor の共振器系におけるアナログ現象と して理解することも可能である[23,24]。

#### 4. 光パルス伝播における高次の分散項

ところで、複雑な分散構造を場合には、高 次の分散項によってパスル幅の広がり、変形 がおこる。応用的には高次項を抑制した構造 設計が重要であろうが、一方、物理的には、 高次項まで含めたパルス伝播の記述が可能か どうか、興味深い。このような従来の群速度 の概念が破綻する領域での波束の伝播は、鞍 点法を用いてパルスのピークの伝播を記述で きるほか[11]、重心を用いる記述することも できる[25]。すなわち、パルスの位置を時間 重心で定義し、伝播時間を、パルスの出発点 と到達点の時間重心の到達時刻の差で定義す る。この伝播時間は net delay と称される式 で表される。Net delay は高次の分散項が無視 できる場合には、従来の群速度に一致しする が、従来の群速度の定義が破綻する強い分散 媒質でも良い意味を持ち、より広い適用範囲 を持った群速度の定義となっている。屈折率 の虚部が無視できない場合には、Reshaping delay と称される付加的な項が現れる。

#### 5. まとめ

単一、もしくは結合したリング共振器にあ らわれる速い光、遅い光について議論した。 特に、情報速度は群速度とは無関係に、真空 中もしくは媒質中の光速度で伝播し、因果律 は破綻しない。講演では、利得を持った微小 球による分散制御、画像の伝播などについて

#### も触れたい。

#### **References**

- 1. Focus issue; "Slow light," Nature Photon.2, 447-509 (2008).
- 2. Feature issue; "Slow Light and Its Applications," J. Opt. Soc. Am. B, 25, C39–C115 (2008).
- 3. J. B. Khurgin and R. S. Tucker(eds.)"Slow Light: Science and Applications" CRC Press (2008).
- C. Liu, et al. Nature, 409, 490 (2001); D. F. Phillips,
  A. Fleischhauer, et al., Phys. Rev. Lett. 86, 783 (2001).
- M. F. Yanik, et al. Phys. Rev. Lett. 93, 233903 (2004).; M. F. Yanik, and S. Fan, Phys. Rev. Lett. 92, 083901(2004).
- Q. Xu, P. Ding, and M. Lipson, Nature Phys. 3, 406 (2007).
- 7. T. Tanabe, et al. Phys. Rev. Lett. 102, 043907 (2009)
- 8. L. V. Hau, et al., Nature, 397, 594, (1999).
- Matthew S. Bigelow, Nick N. Lepeshkin, and Robert W. Boyd, Phys. Rev. Lett. 90, 113903 (2003)
- 10. A. M. スタインバーグ 著 冨田誠 訳 パリティ vol 16,57-61 (2001).
- A. I. Talukder, Y. Amagishi, and M. Tomita, Phys. Rev. Lett. 86, 3546 (2001), and references there in.
- 12. G. M. Gehring, et al. Science 312 895 (2006).
- L. J.Wang, A. Kuzmich, and A. Dogariu, Nature (London), 406, 277 (2000).
- A. M. Steinberg, P. G. Kwiat, and R.Y. Chiao, Phys. Rev.Lett. 71, 708 (1993).
- 15. K. J. Vahala, , Nature, 424, 839 (2003).
- R. K. Chang, A. J. Campillo(ed.), "Optical processes in microcavities", World Scientific, London (1996).
- 17. S. F. Preble, Q. Xu, and M. Lipson, Nature Photon. 1, 293, (2007).
- K. Totsuka, N. Kobayashi, and M. Tomita, Phys. Rev. Lett., 98, 213904, (2007).
- K. Totsuka and M. Tomita, J. Opt. Soc. Am. B, 23, 2194 (2006).
- R.Y. Chiao and A.M. Steinberg, in *Progress in Optics XXXVII*, edited by E. Wolf (Elsevier, Amsterdam, 1997), p. 345.
- M.D. Stenner, D.J. Gauthier, and M.A. Neifeld, Nature (London) 425, 695 (2003).
- M. Tomita, H. Uesugi, P. Sultana and T. Oishi, Phys. Rev. A 84, 043843 (2011).
- H. Jeong, A.M.C. Dawes, and D.J. Gauthier, Phys. Rev. Lett. 96, 143901 (2006).
- D. Wei, J.F. Chen, M.M.T. Loy, G.K.L. Wong, and S. Du, Phys. Rev. Lett. 103, 093602 (2009).
- A. I. Talukdar, T. Haruta, and M. Tomita, Phys. Rev. Lett. 94, 223901(2005).