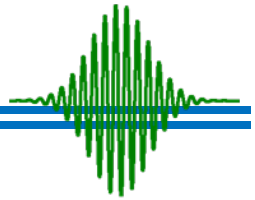


「速い光」と「遅い光」

静岡大学理学部物理教室
（創造科学技術大学院）
冨田誠

概要
光のパルスを、真空中での光の速さよりも速く、あるいは逆に、歩くほどゆっくりと伝播させることが可能です。光よりも速く進むもの、進まないもの、特殊相対性理論との関係などを紹介します。

概要

1.「速い光」と「遅い光」

- 光の速さ
- パルスの伝播の制御（群速度）
- 「速い光」を研究する意義
- 「遅い光」を研究する意義

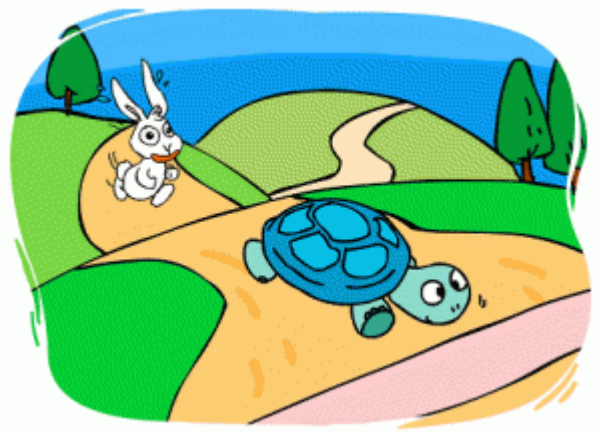
2. 微小球共振器を利用した光の速さの制御

- 囁きの回廊モード
- 単一の微小球
- 結合した微小球

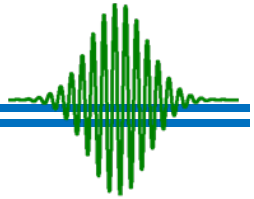
3. 情報速度

- 特殊相対性理論と因果律
- 情報とは何か、
- 情報の伝わる速さ

まとめ



光の速さ（真空中）



真空中の光の速さ

$c = 299\ 792\ 458$ m / s

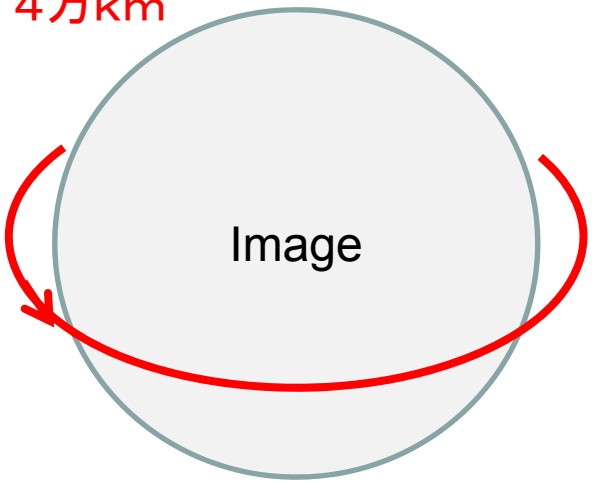
1m

1秒間に地球を7周半
- 光の種類によらない

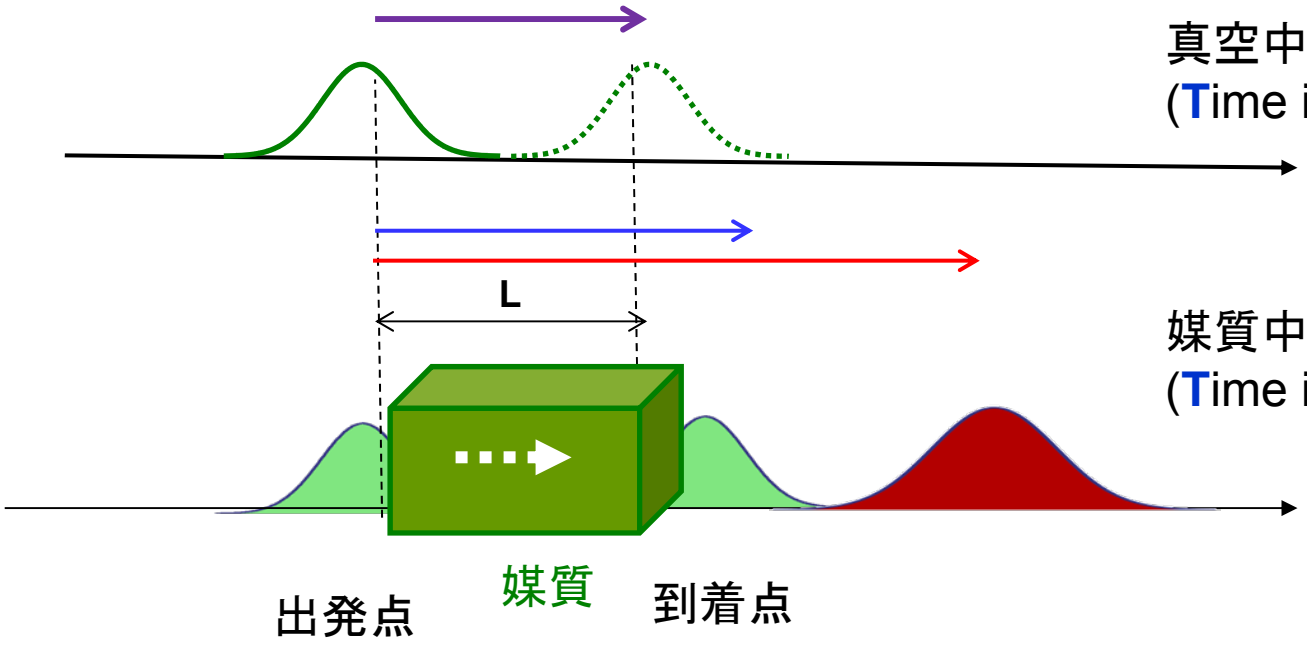
- この世の中でもっとも速い速度
- 時間と空間の換算レート

ラジオ波
マイクロ波
赤外線
可視光
紫外線
X線
Γ線

4万km



概要



真空中における伝播時間, T_V
(Time in Vacuum)

媒質中における伝播時間, T_M
(Time in Mdeium)

距離

	Propagation
$T_M = \infty$	光の凍結
$T_M > T_V$	通常速度　Subluminal
$T_M < T_V$	超光速度　Superluminal
$T_M < 0$	負の速度

負の速度
　パルスのピークが媒質に入る以前に、パルスのピークが媒質から現れる、一見、不思議な現象

超光速パルス伝播の初期の実験

Ref: S. Chu Phys. Rev. Lett. 48, 738 (1982)

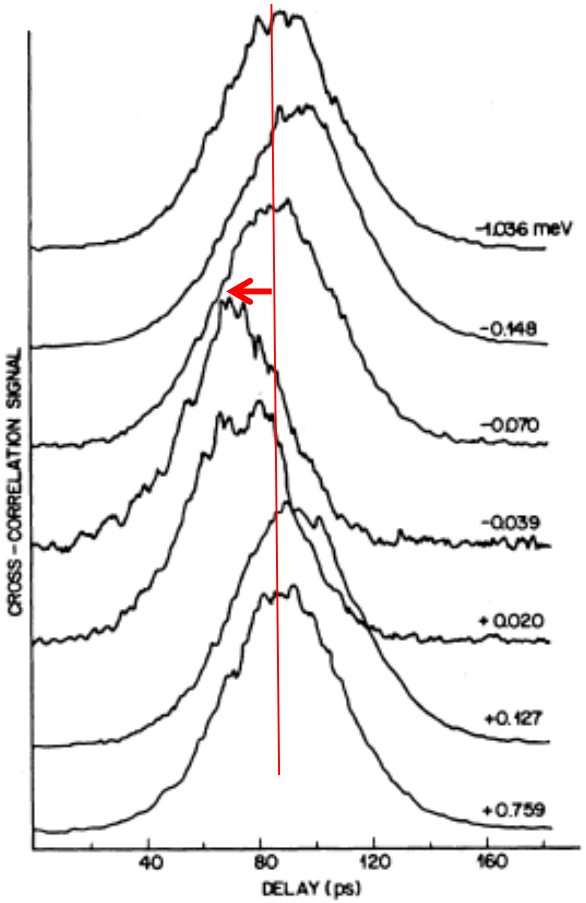
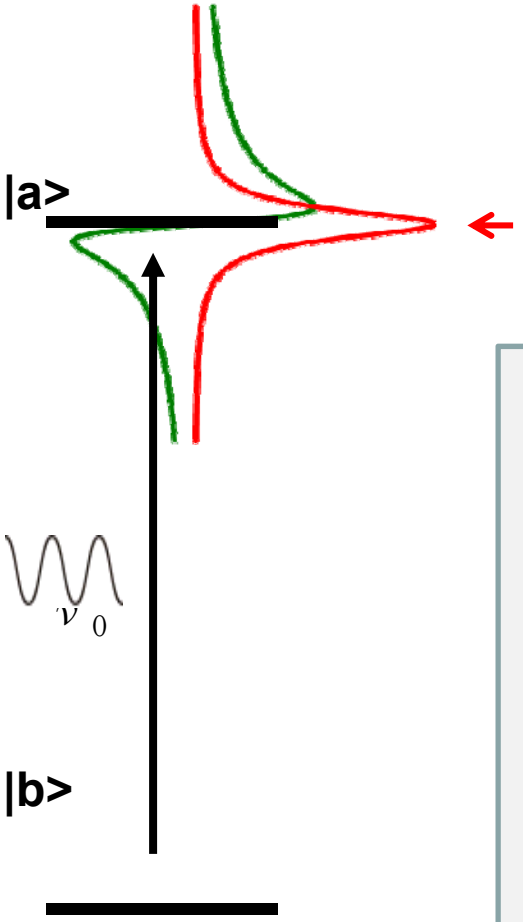


FIG. 2. A sample of the cross-correlation data as the laser is tuned through the exciton line of the [N] = 1.5×10^{17} cm^{-3} sample.

Steven Chu



半導体励起子吸収
GaP:N

吸収

Image
S.Chu

群速度

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n + \omega \dfrac{\partial n}{\partial \omega}}$$

n ＝屈折率の実部
c ＝真空中での光速度
ω_c＝周波数

正常分散:

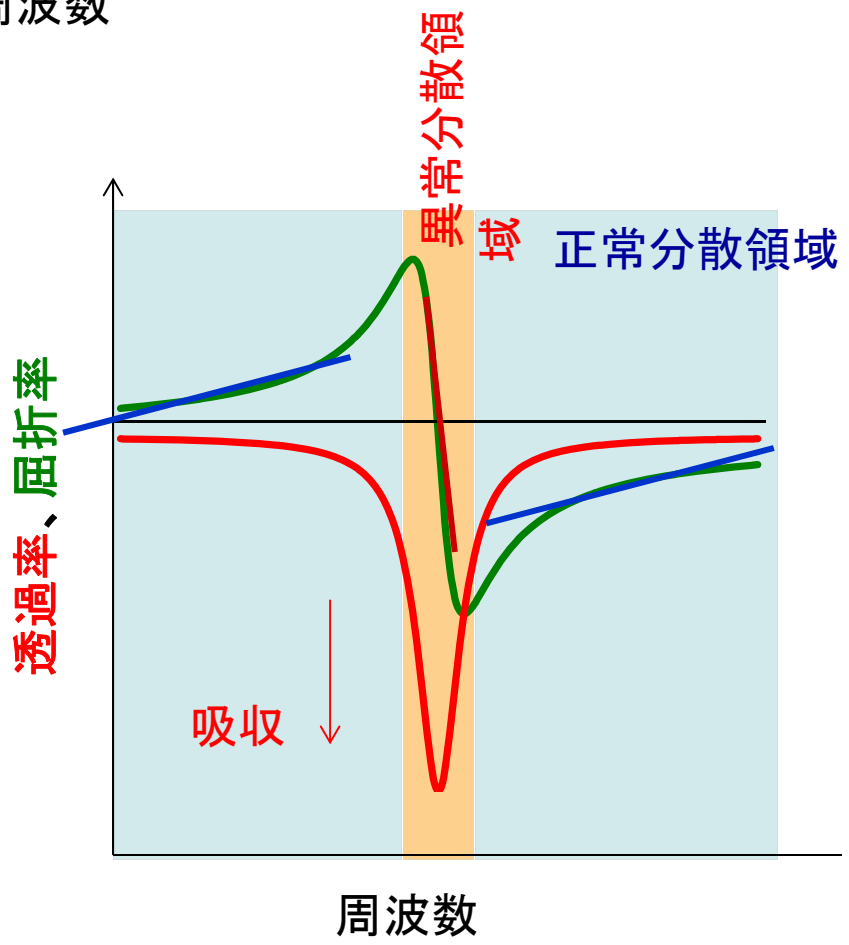
周波数の増加に伴って屈折率が大きくなる

$$\frac{\partial n}{\partial \omega} > 0 \qquad \therefore v_g < c$$

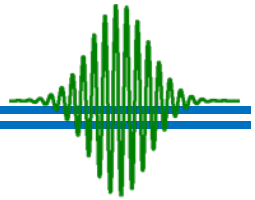
異常分散:

周波数の増加に伴って屈折率が小さくなる

$$\frac{\partial n}{\partial \omega} < 0 \qquad \therefore v_g > c$$



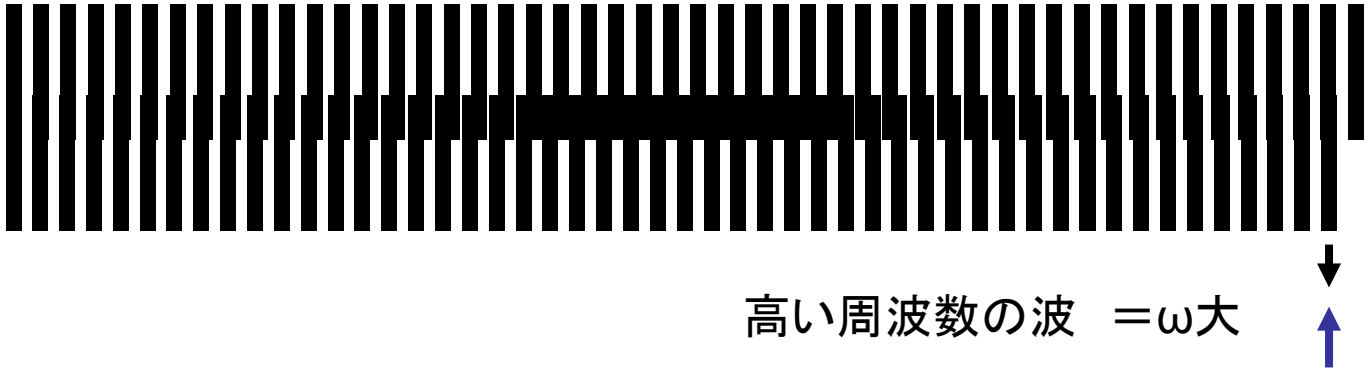
群速度の説明1



・**超光速度**　の速度

低い周波数の波　＝ω小

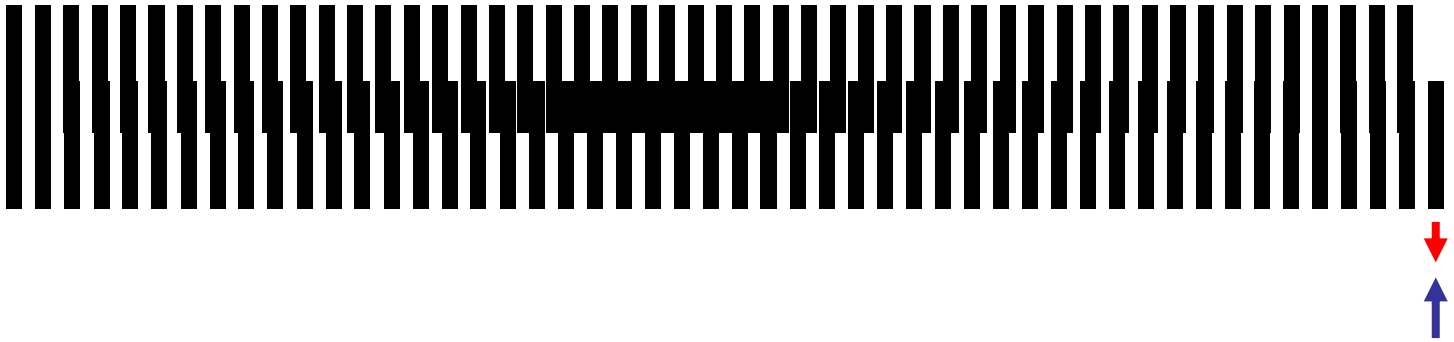
$$\frac{\partial n}{\partial \omega} < 0$$



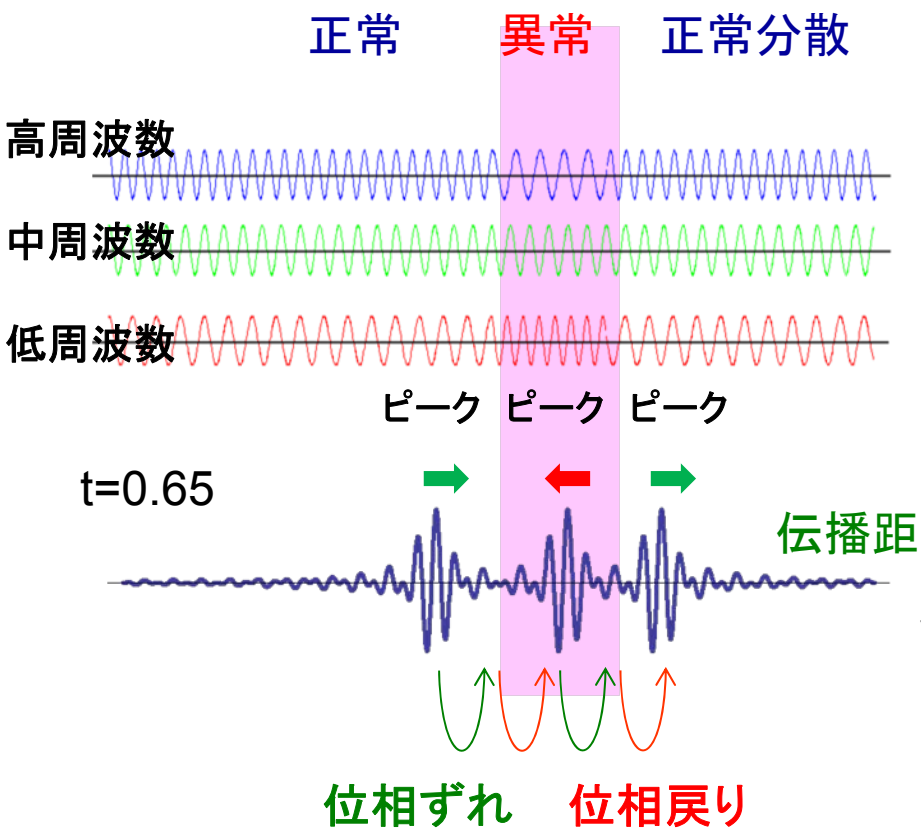
高い周波数の波　＝ω大

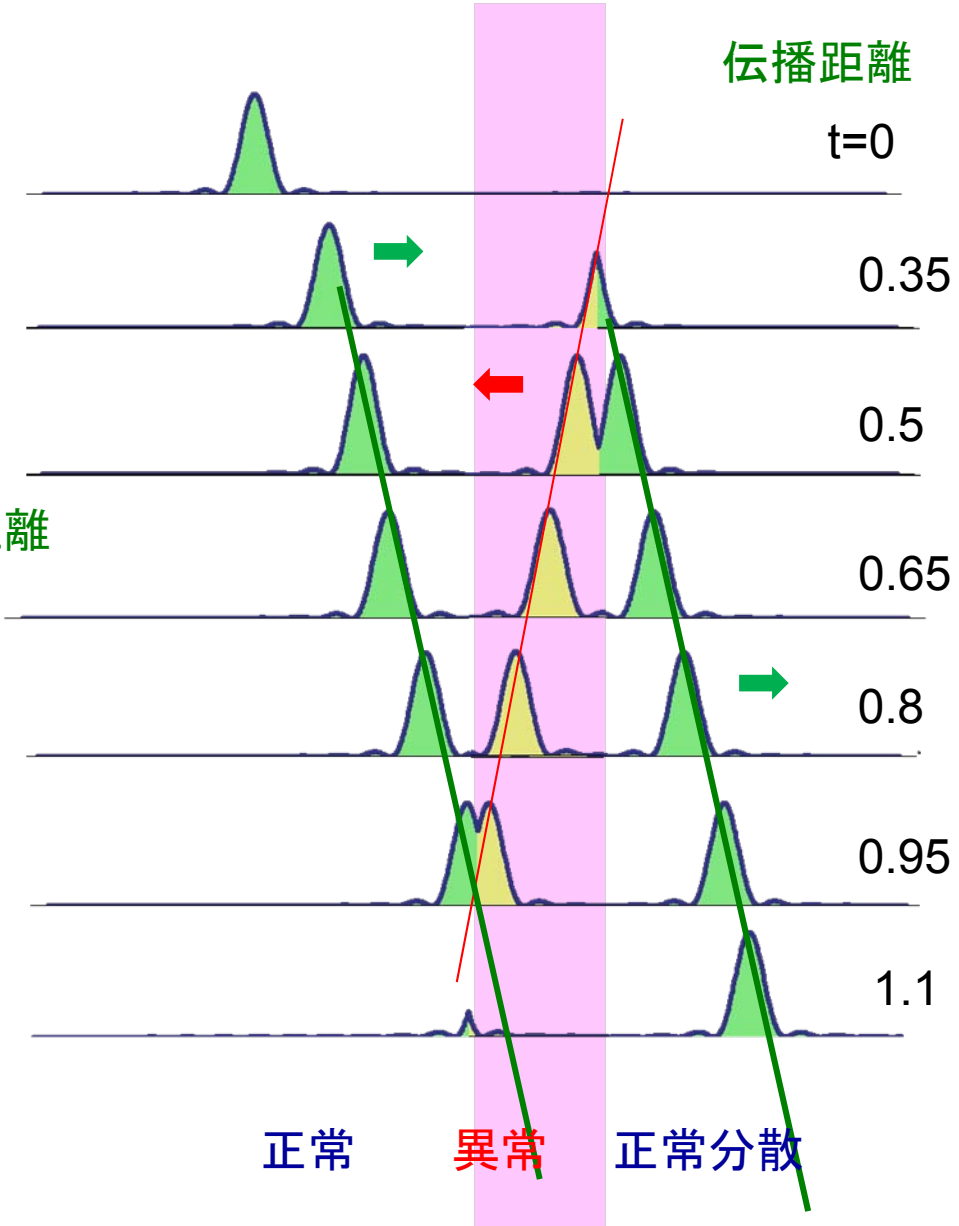
伝播距離

・**遅い光**



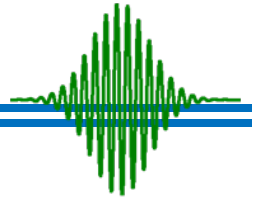
負の速度の機構





パルスのピークは、
パルスのピークが媒質に入るよりも早く
出射してくる

「遅い光」って、何？



超光速度伝播では、パルスのピークが光よりも速く伝播する

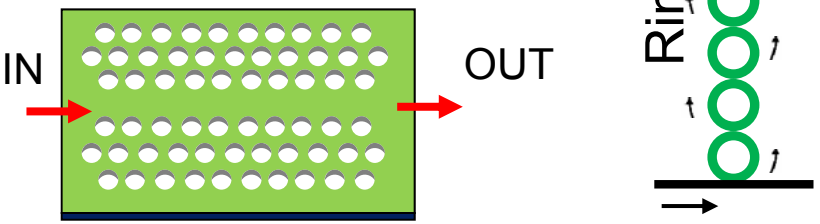
ところで、「遅い光」の方は？

電磁誘起透過現象

EIT （Eletctro magnetically Induced Transparency）

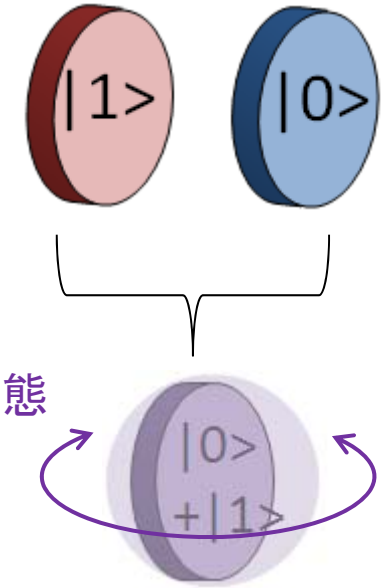
遅い光がもっともよく研究されている系

量子的なコヒーレンス（可干渉性）の制御

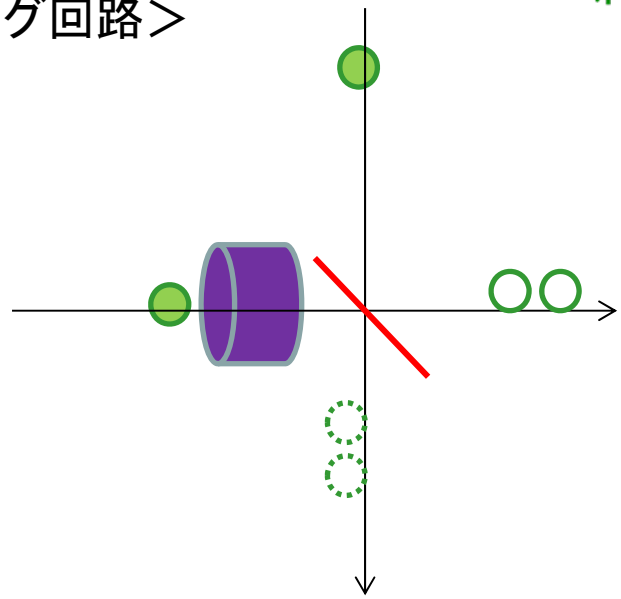


フォトニック結晶　　結合共振器

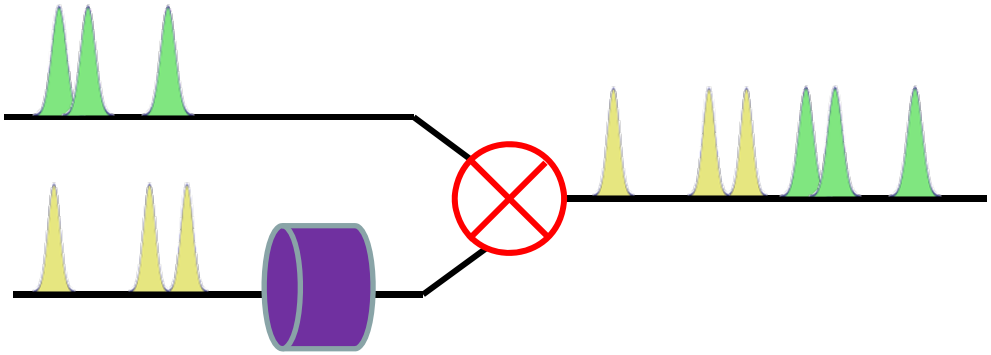
どのような応用につながるか



＜タイミング回路＞



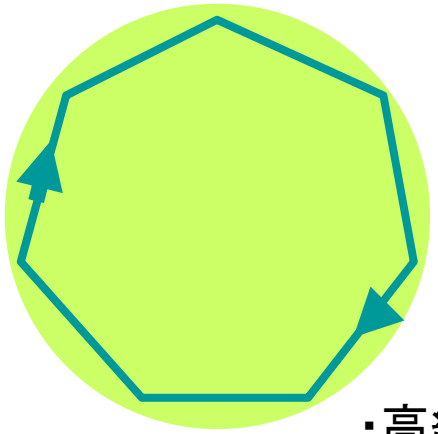
＜一時保存＞



多彩なお応用が模索されている

- 量子コンピュター
- 量子暗号
- 量子テレポーテーション
- 画像伝播
- 非線形光学現象

Chapter 2
微小球共振器による「速い光」と「遅い光」



微小球

・高純度ガラス　など.
・直径
　　数μm ~100 μm
・全反射

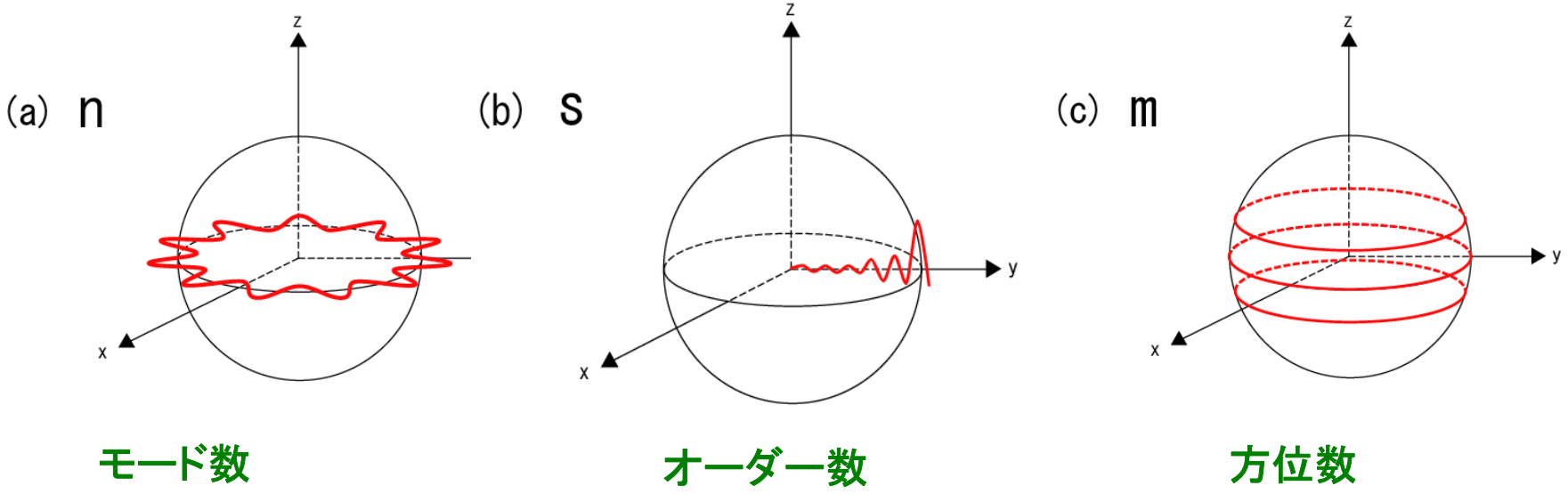
フォトニック原子
光のモードパターン

電子のまねをする光

水素原子
電子の波のモードパターン

ささやきの回廊
Whispering Gallery Mode

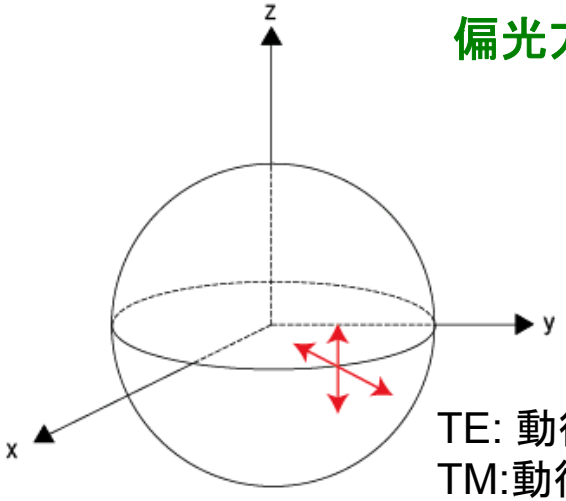
モード同定



モード数　　オーダー数　　方位数

超高Q値モード
S=1 (表面)
n=m (赤道上)

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{Theory}} + \frac{1}{Q_{Coupling}} + \frac{1}{Q_{Ext}} + \frac{1}{Q_{Surface}}$$

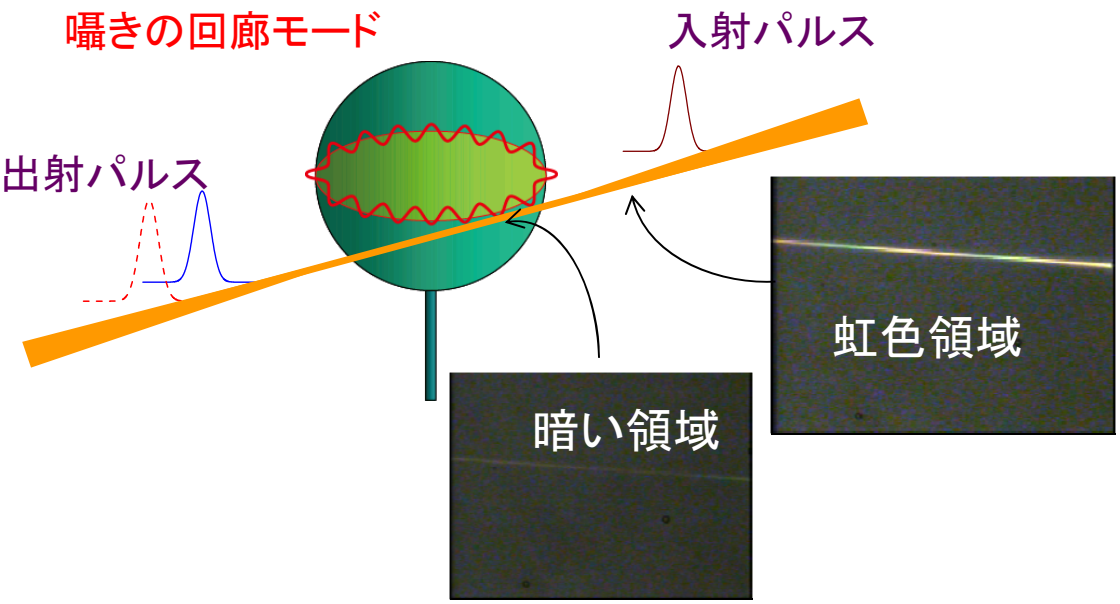


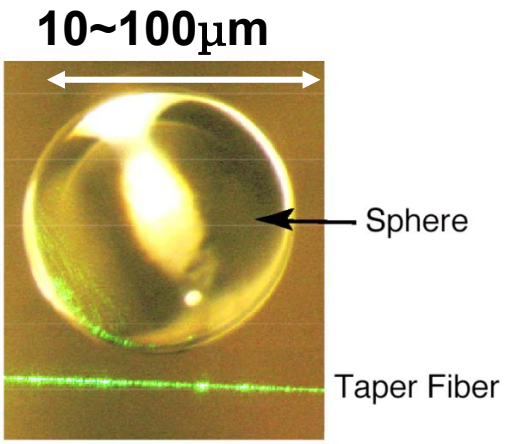
偏光方向

TE　TM

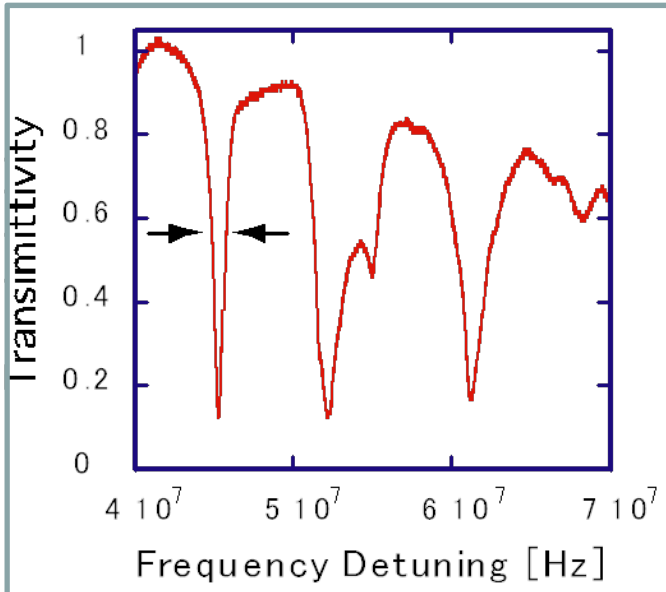
TE: 動径方向に電場成分なし
TM:動径方向に磁場成分なし

実験の様子





・特定の球のモードに
・100%結合する



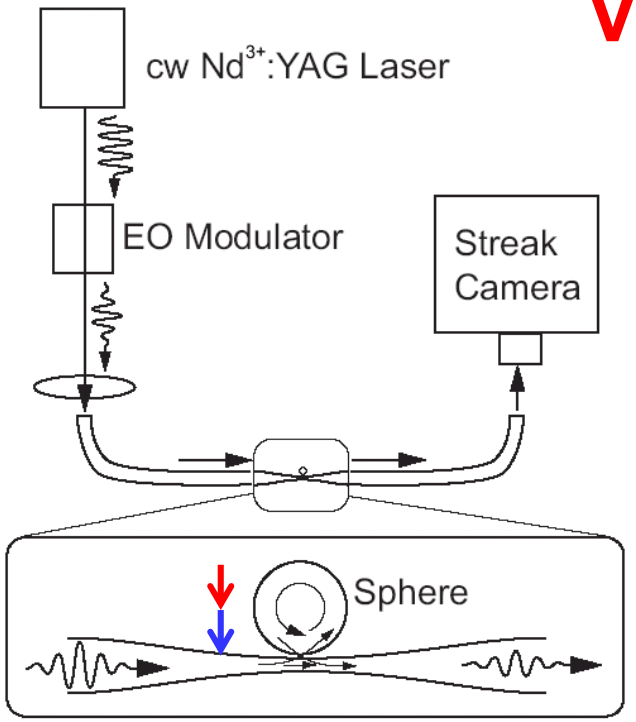
周回回数

$$N = \frac{c\delta\nu^{-1}}{2\pi r}$$

$=10^6 \sim 10^7$ 周回

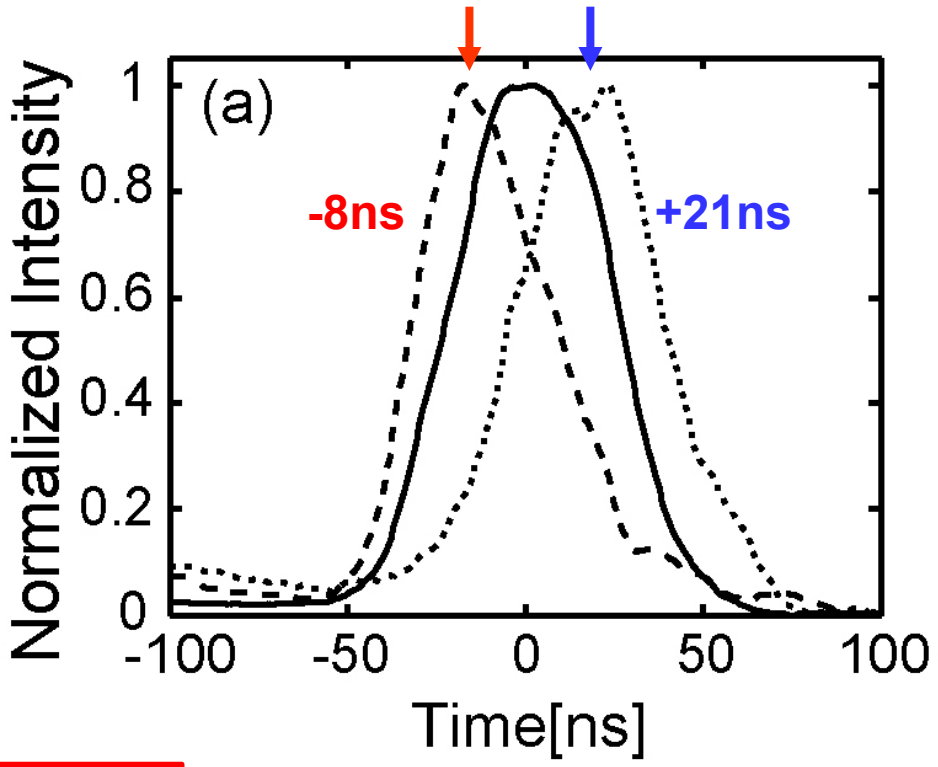
アイディアリティ
Ideality =1

単一の微小球による速い光と遅い光



$$V_g = -\frac{c}{38{,}00{,}000}$$

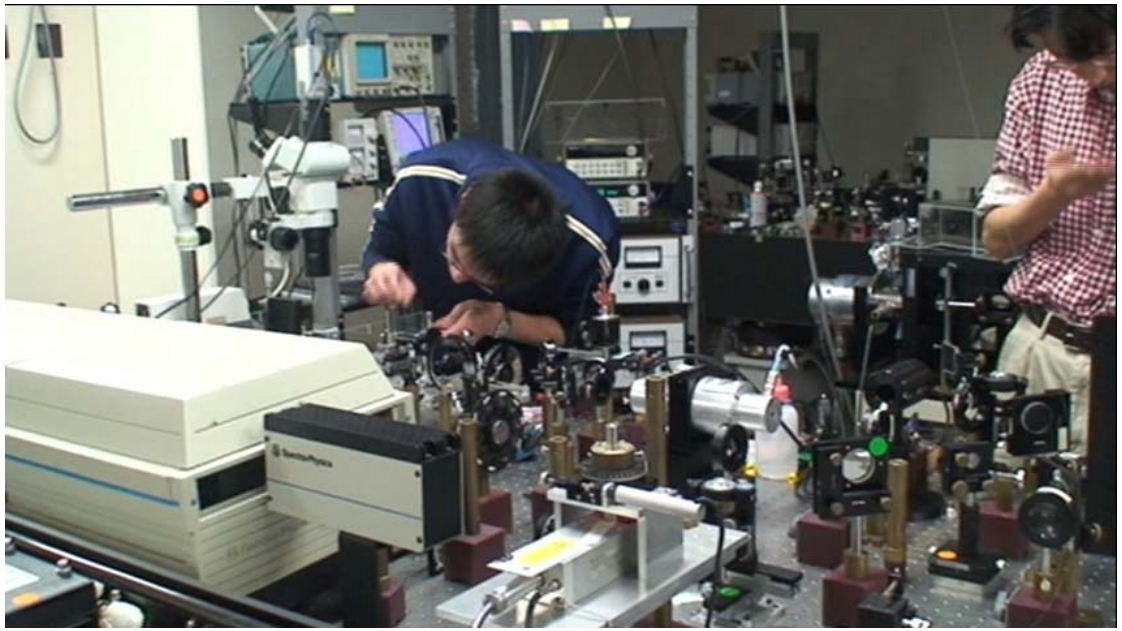
$$V_g = \frac{c}{10{,}000{,}000}$$



単一の微小球によって、結合条件を変えることによって速い光、遅い光を実現できた

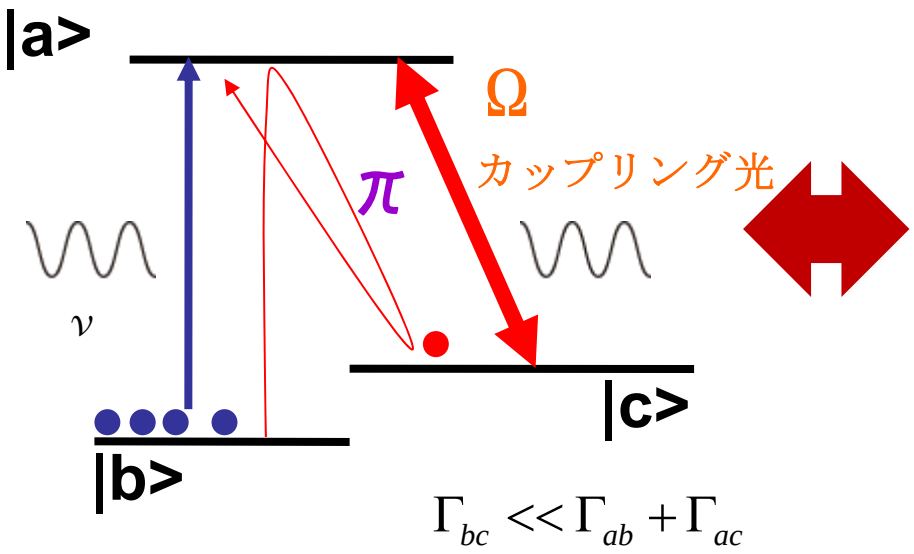
実験風景

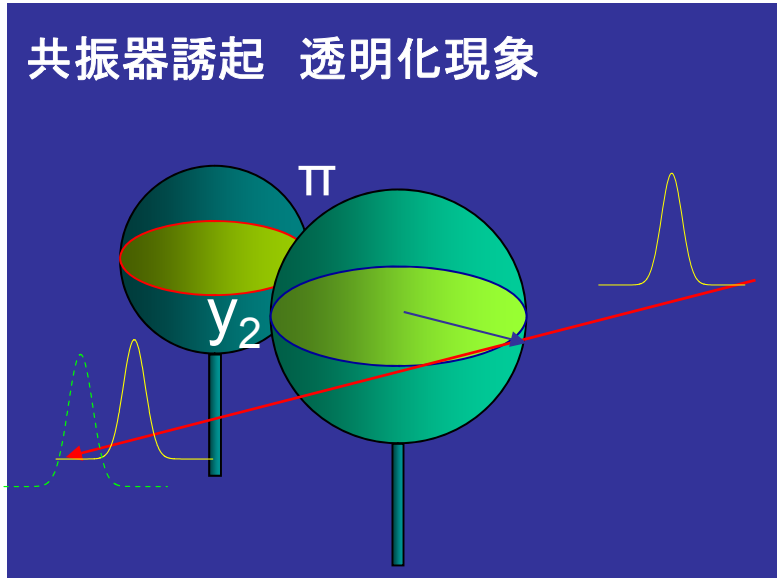
実験室はクリーンルーム



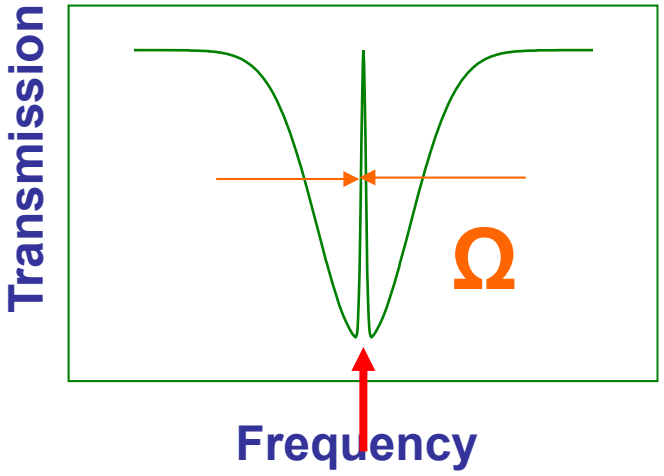
実験風景

2つの微小球



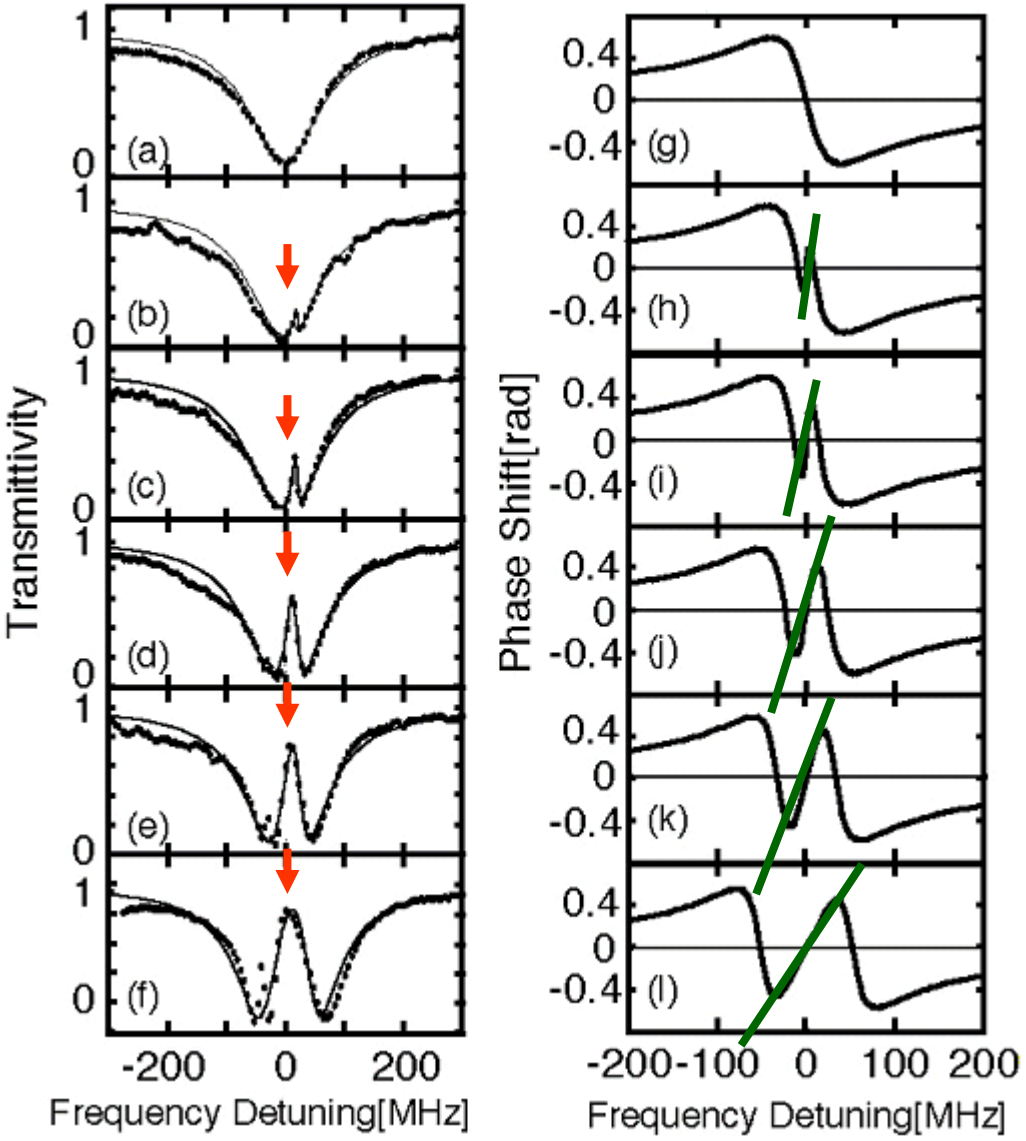


EIT（原子）		CRIT（共振器）
原子遷移	⇔	囁きの回廊モード
緩和時間	⇔	Q 値
（共鳴の鋭さ）		
カップリング光	⇔	第2球（近接場結合）

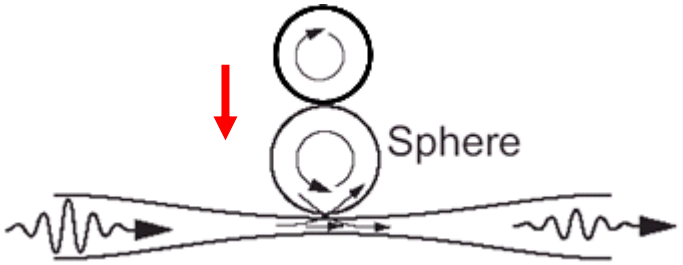


共振器誘起と透明化現象の実験

Phys. Rev. Lett.
98, 213904 (2007)



S_2 73 μm
S_1 39 μm

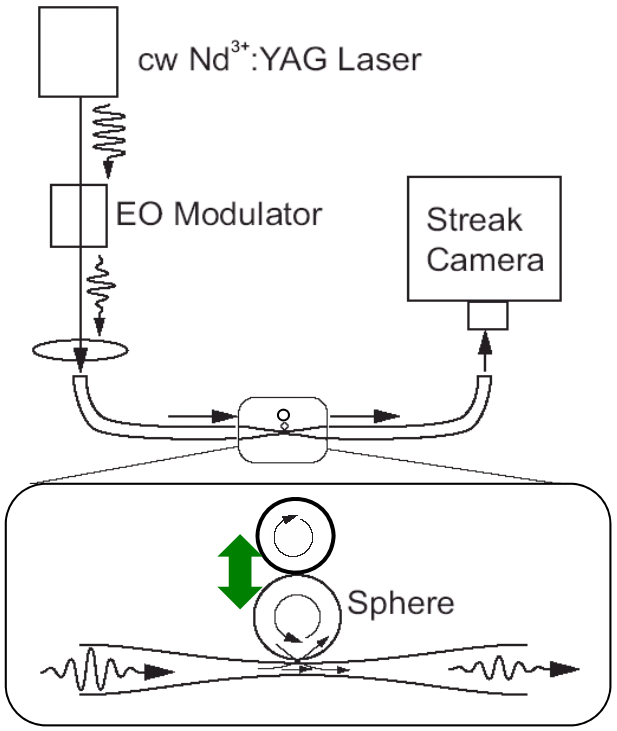


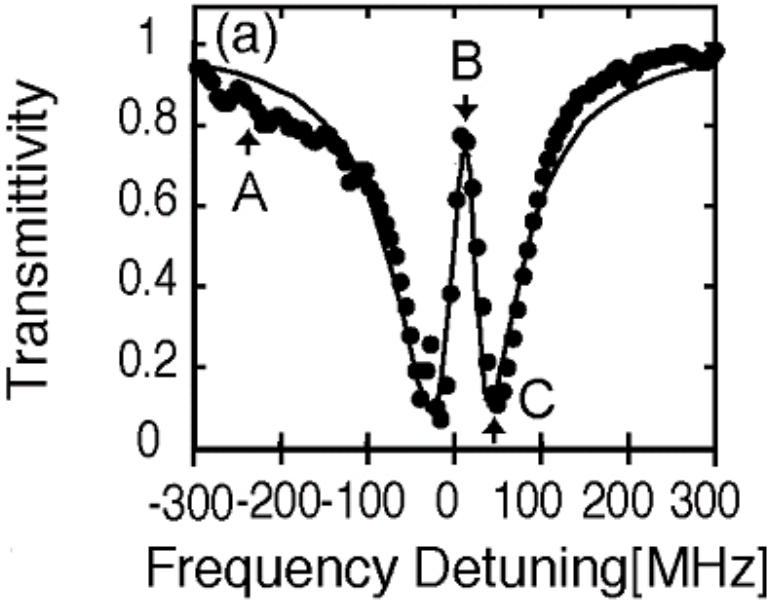
第二の球を第一の球に近ずけると透明化した窓が現れる

この窓に付随して急峻な分散が作り出されて、遅い光が期待される

遅い光の実験（CRIT）

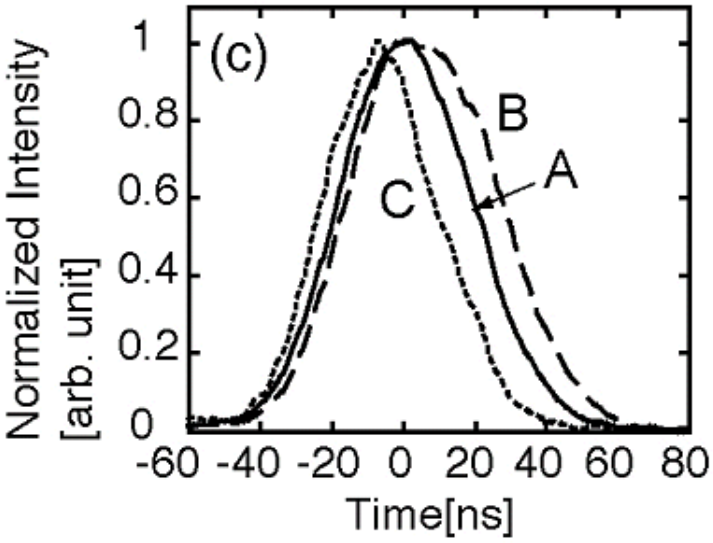
Phys. Rev. Lett.
98, 213904 (2007)





ガウス型の光パルスは透明化窓では、減衰することも、増幅することも、変形することもなく、大きな遅延をもって伝播する.

このことは、EIT現象を全光学系で実現したことになる



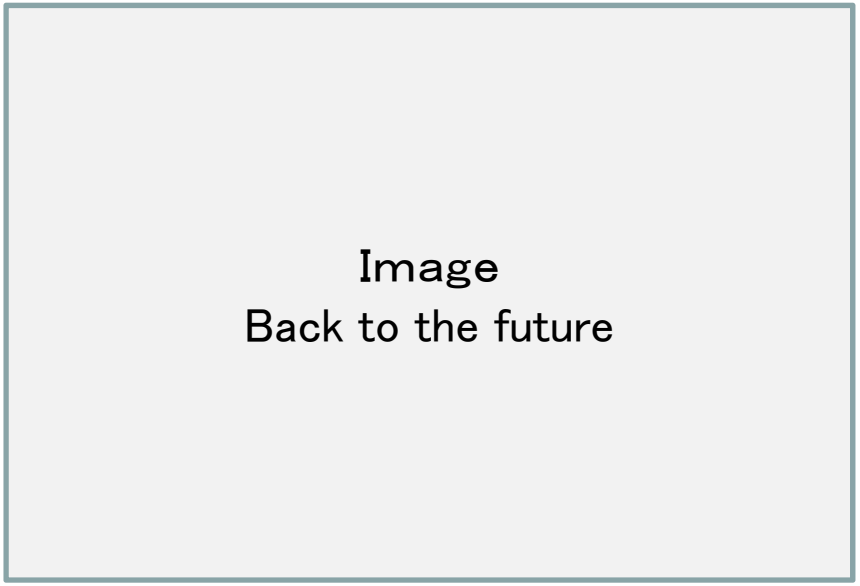
Chapter3
因果律

「速い光」と「遅い光」を作り出すことができる

しかし。

もしも、仮に情報が光の速さよりも速く伝わると過去に情報を伝達することができてしまう。これは、大きなパラドクスである。

・情報とは何か
・因果律はどのようにして保たれるのか



「2002Univeral Studios」より引用

特殊相対性理論 （同時性）

ローレンツ変換

$$t' = \gamma(t - \frac{vx}{c^2})$$

$$x' = \gamma(x - vt)$$

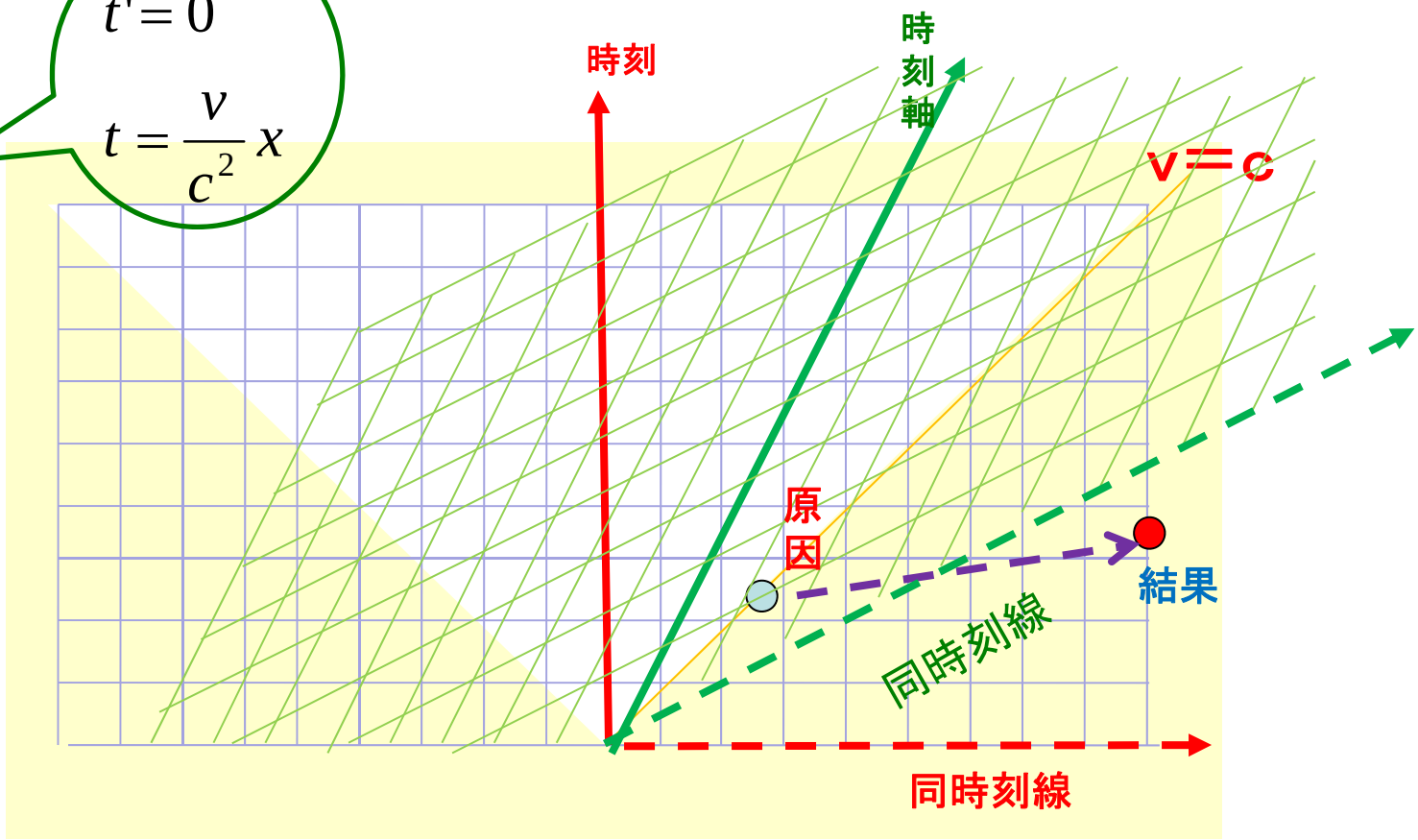
$$x' = y$$

$$x' = z$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$t' = 0$

$t = \frac{v}{c^2} x$



情報が超光速度であると、因果律が破綻する

例3

関数

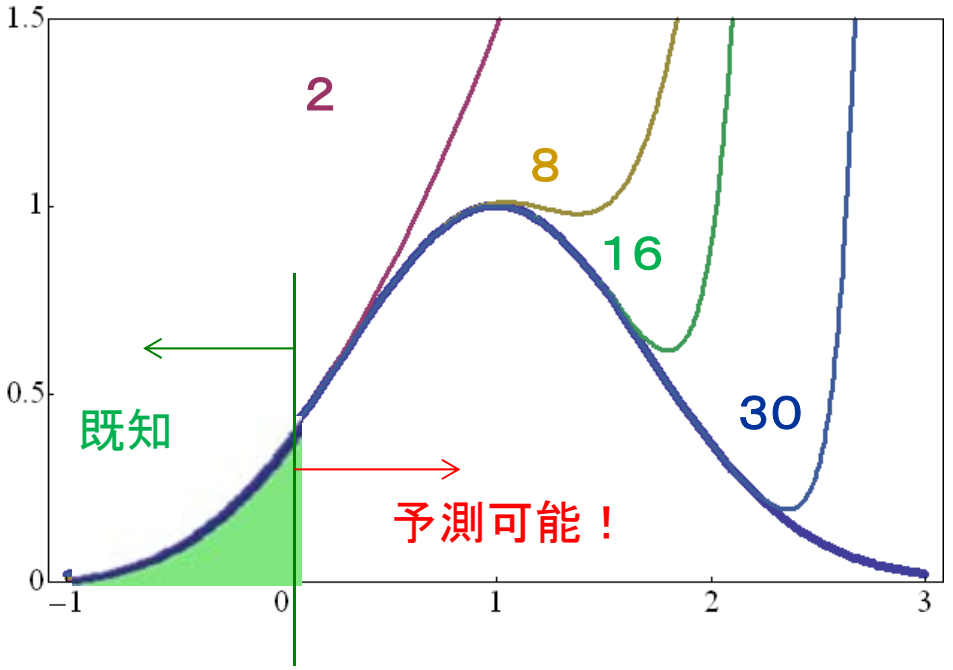
関数も予言できる。

ある場所での“傾き”から、次の値を予言できる。

ある場所での“‘傾き”の傾き“から、次の“傾き”を予言できる。

・・・・・・・・・

すべて予言できる！
（解析関数）



関数のテイラー展開

$$f(t) = f(0) + \frac{f'}{1}t + \frac{f''}{1\cdot 2}t^2 + \frac{f'''}{1\cdot 2\cdot 3}t^3 + \cdots\cdots$$

0.367879+0.735759 x+0.367879 x^2-0.245253 x^3-0.306566 x^4-0.0245253 x^5+0.0940136 x^6+0.0338683 x^7-0.0150363 x^8-0.0108677 x^9+0.00083373 x^{10}+0.00212753 x^{11}+0.000215633 x^{12}-0.000294138 x^{13}-0.0000728245 x^{14}+0.0000295085 x^{15}+0.0000127916 x^{16}-1.96669ラ10^{-6} x^{17}-1.63981ラ10^{-6} x^{18}+3.4408ラ10^{-8} x^{19}+1.67422ラ10^{-7} x^{20}+1.2668ラ10^{-8} x^{21}-1.40685ラ10^{-8} x^{22}-2.32492ラ10^{-9} x^{23}+9.78636ラ10^{-10} x^{24}+2.64284ラ10^{-10} x^{25}-5.49501ラ10^{-11} x^{26}-2.3647ラ10^{-11} x^{27}+2.23594ラ10^{-12} x^{28}+1.78503ラ10^{-12} x^{29}-3.00606ラ10^{-14} x^{30}-1.17103ラ10^{-13} x^{31}-5.44013ラ10^{-15} x^{32}+6.76742ラ10^{-15} x^{33}+7.18091ラ10^{-16} x^{34}-3.45676ラ10^{-16} x^{35}

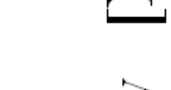
cos

不連続点を持ったパルス

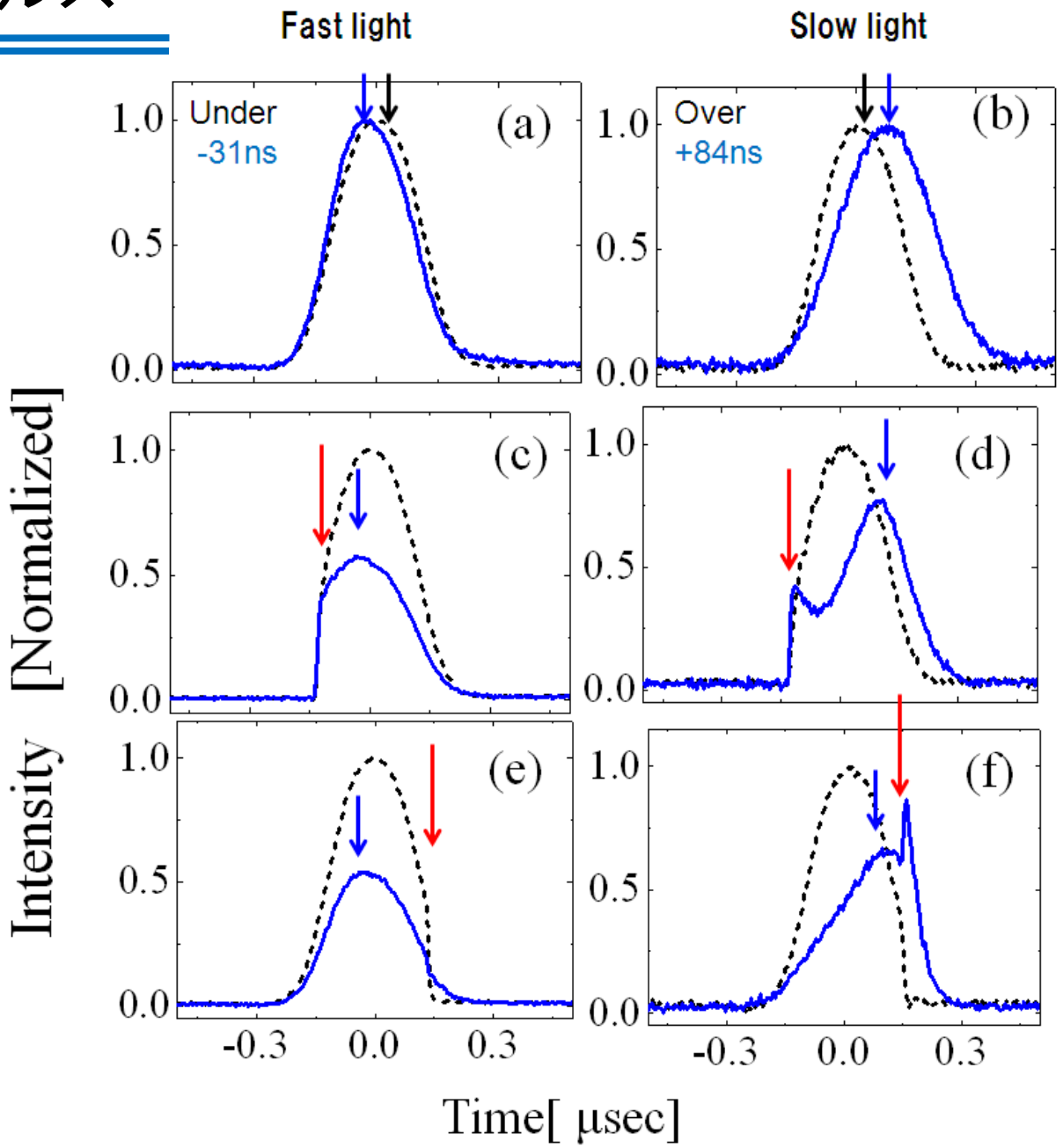
Experiments

パルスのピークは
進む、もしくは
遅延する。

不連続点は、入射と
同時に現れる

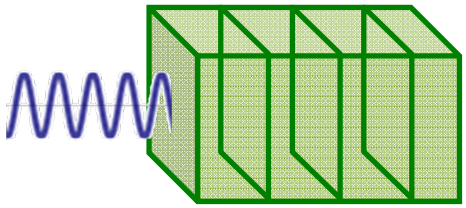


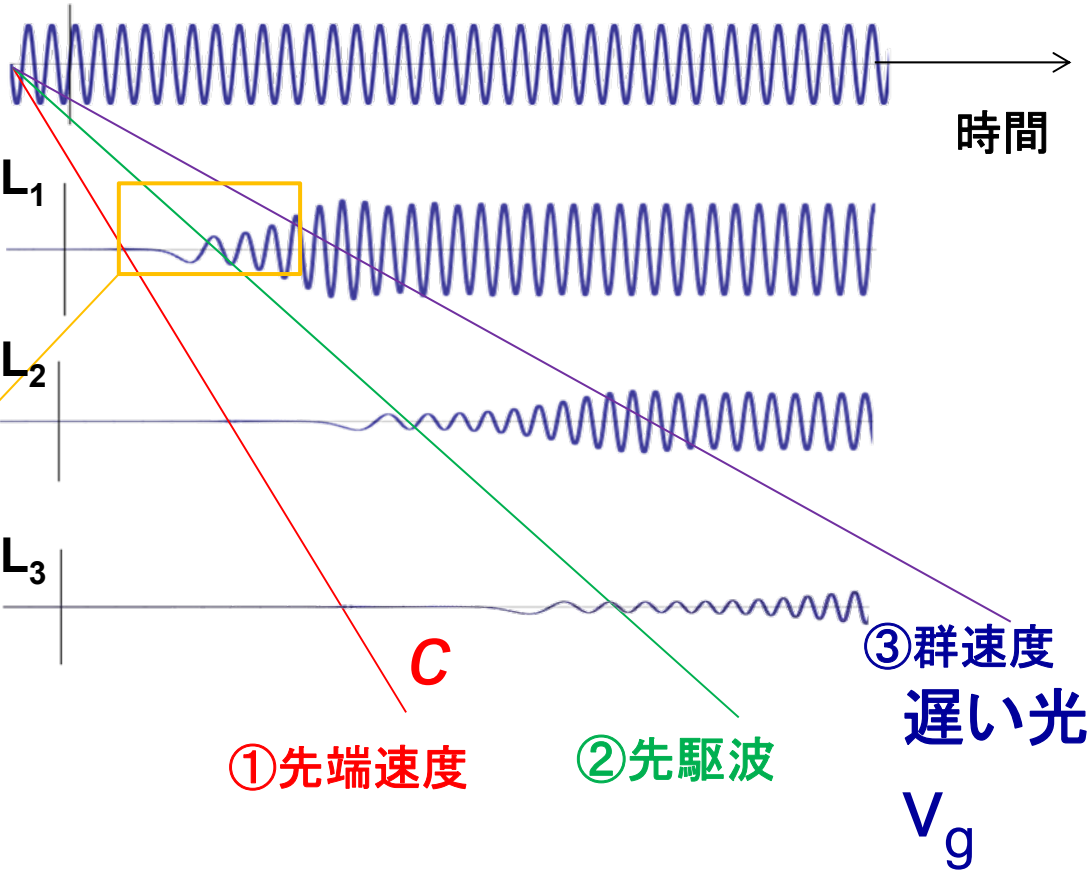
不連続点は情報と考
えられ、「速い光」に置
いても因果律に矛盾
しない



Phys.Rev. A
84, 043843 (2011)

「遅い光」の先駆波

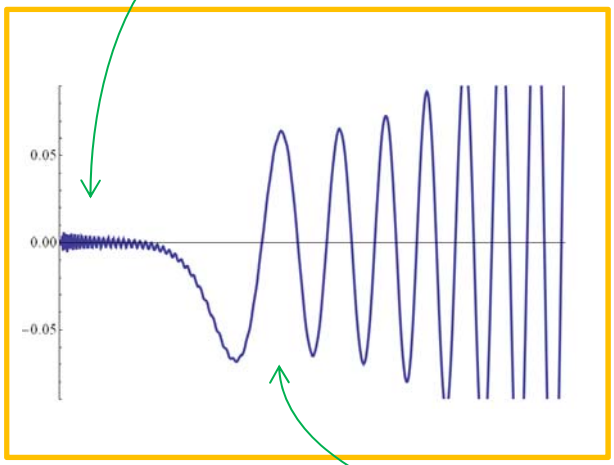




ゾンマーフェルドの先駆波

特長

- 振動数が非常に高い
- 大きさが非常に小さい



波の最先端は、
小さくなるが、恒に*c*で伝播する。

ブリリュアンの先駆波

特長

- 振動数が低い
- （条件によっては）観測可能

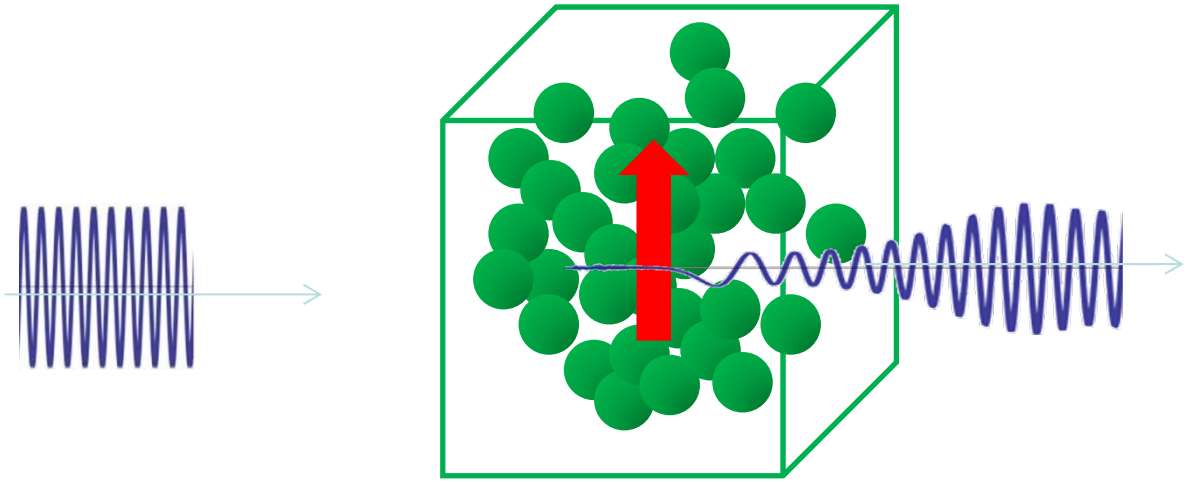
電磁波（光）

先端

微視的な電気双極子

巨視的な電気双極子

2次的な電磁波（光）の放出



物質は、光に応答するのに有限な時間がかかる

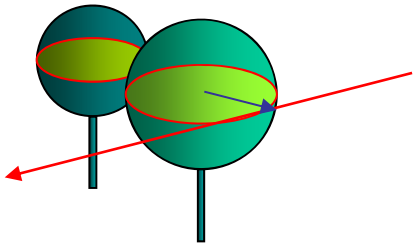
まとめ

（1）**真空中**の光の速さは恒に一定であり、われわれの住む世界で最も速い速度である。

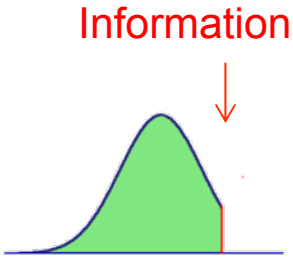
（2）**物質の中**では、いくつかの速度が定義できる。特に、パルスの伝播する速さを表す群速度は、

cを超える
負になる
非常に遅くなる

ことができる。



（3）パルスのピークなどは情報を運んでいない。本当の情報は非解析点に含まれており、この非解析点は、恒にCで伝播する。因果律は破綻しない



（4）遅い光は、特に量子的な光の制御、凍結など、夢のある応用が考えられる。