

気体媒質中の光速度の測定

1. 気体媒質中の光速度の測定

特殊相対性理論によれば速度の加法の実例としてフィゾーによる水流中の光速度の実験を挙げている。この速度の加法は時空の性質としてローレンツ変換を受け固体・液体・気体の区別なくこれらの媒質の如何に係らずフィゾーの実験式が成立することとなる。

気体として地表（実験室）の空気（屈折率 1.0003）の流れによる光速度の変化を検討し、かつ測定する。

[測定方法と予測される測定可能条件]

速度の検出方法として干渉計を用いるとして 1 波長以上の干渉縞の移動が観測される測定装置にしなければならない。光源として波長 $0.65 \times 10^{-6} \text{m}$ の赤色レーザーダイオードを使用し光路長 $L \text{ m}$ として、屈折率 1.0003 の空気の媒体の場合の 1 波長分の干渉縞の移動を起す流体速度をフィゾーの実験式より試算してみる。 $c = 3 \times 10^8 \text{m/sec}$ 、屈折率 n として

$$\text{流体中の光速度 (c')} \text{ は } c' = \frac{c}{n} + V \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdots (1.1)$$

$$c' = \frac{3 \times 10^8}{1.0003} + V \left(1 - \frac{1}{1.0003^2}\right) = 3 \times 10^8 + 0.0006 V \cdots (1.2)$$

光の速度として上式の第 2 項は無視し第 1 項のみで近似すれば $L \text{ m}$ の光路を通過する時間を t とすれば

$$t = L / 3 \times 10^8 = 0.33 L \times 10^{-8} \quad [\text{sec}]$$

この時間で (3) 式の右辺第 2 項の媒質の速度が寄与する距離は

$$0.0006 V \times t = 0.0006 V \times 0.33 L \times 10^{-8} = 0.2 \times 10^{-11} VL$$

従ってこの距離が 1 波長 ($0.65 \times 10^{-6} \text{m}$) と等しくなるとすると

$$0.2 \times 10^{-11} VL = 0.65 \times 10^{-6}$$

$$\therefore V = 325000/L \quad [\text{m/sec}]$$

媒体が空気の場合には、干渉縞 1 波長変化させるには $L = 1000 \text{m}$ としても $V = 325 \text{m/sec}$ の速度が必要とされる。このような規模の測定装置が必要となり、測定不能に近いことになる。このことは光の速度は通常は通常の空気の動きからはほとんど影響されないと云える。しかしながら他の干渉縞の実験中に空気の乱れで干渉縞が変化するのが確認された。確認のためフィゾーの実験規模で光速度の空気媒体の速度の影響の実験を計画した。

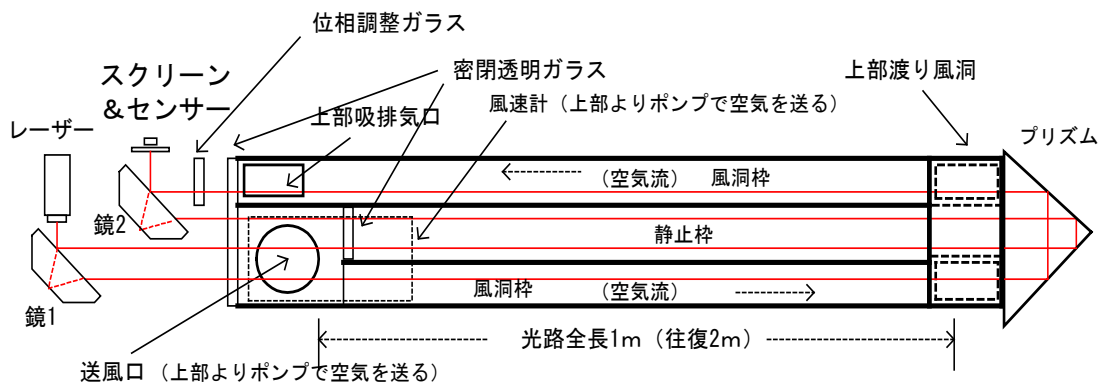
[実験]

エアポンプの停止状態で、位相調整ガラスの傾きを変え（光路長を微小に変える。）縞を移動させて位相の進む方向を確認する。風速をあげて干渉縞の移動方向を確認し干渉縞が 1 つ移動した時（センサー値が極大値になる時）の風速を読む。

[実験装置の構成]

図 1.1 に示す実験装置で赤色レーザー ダイオードを光源としたマッハチェンダー干渉計で、2つに分岐させた光の一方は静止空气中を通し、もう一方はエアープンプで風を送ることの出来る風洞中を通過させた後に干渉させ風速に対する干渉縞のずれを観測する。

実験装置平面図



側面図

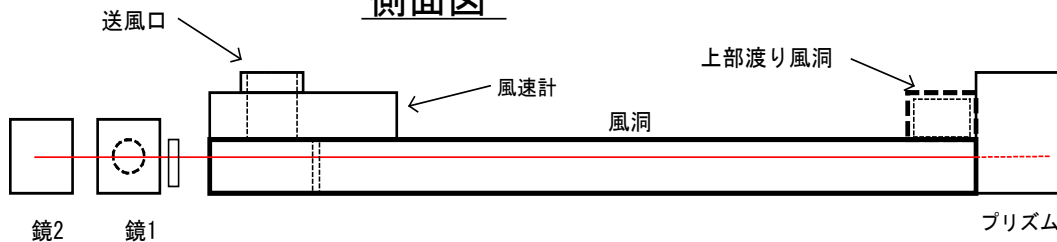


図 1.1 波長 $0.65 \times 10^{-6} \text{m}$ のレーザー光を鏡 1 で分岐し、一方を両端を透明ガラスで密閉した静止枠に通す、もう一方は位相調整ガラスを通した後に全長 1 m (往復 2m) の中空アルミ角柱 (風洞枠) に通す。風洞の両端は密閉透明ガラスで塞ぎ風の影響が他の部分に及ばないようにする。風速計は風洞口上部に配置させる。風洞を通過した光は鏡 2 にて合成しスクリーンに干渉縞を投影させる。

位相調整透明ガラス側面図

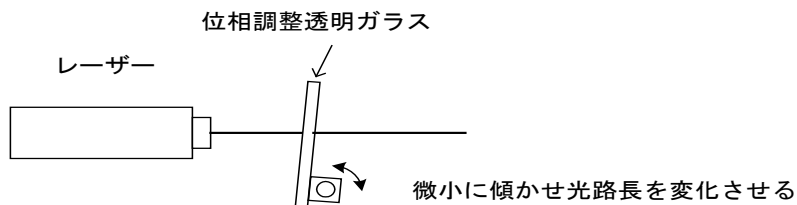


図 1.2 位相調整ガラスは干渉縞の移動方向を確認するためにも用いる。始めにレーザー光に垂直に設置し傾けることにより風洞を通過させる光側に入れて、位相調整ガラス通過する光路を微小に増加させ位相が遅れる干渉縞の移動方向を確認する。

表 1.1 レーザー光と空気流が順方向の場合

風速 (m/sec)	4	12	20	28
空気移動距離 ($\times 10^{-6}\text{m}$)	0.027	0.08	0.13	0.19
縞移動方向(位相)	後退 後退 後退			
縞移動数		-1	-2	-3
位相移動距離 ($\times 10^{-6}\text{m}$)		-0.65	-1.3	-1.95

表 1.2 レーザー光と空気流が逆方向の場合

風速 (m/sec)	6	18	27	34
空気移動距離 ($\times 10^{-6}\text{m}$)	0	-0.08	-0.13	-0.17
縞移動方向(位相)	後退 後退 後退			
縞移動数	0	-1	-2	-3
位相移動距離 ($\times 10^{-6}\text{m}$)	0	-0.65	-1.3	-1.95

空気移動距離は風洞中 (距離 2 m) を光が通過する時間 $t = 2 / (3 \times 10^8) \text{ sec}$ で空気が動く距離をしめす。

表 1. はレーザー光と空気流が順方向、表 2. はレーザー光と空気流が逆方向の結果である。風速をあげるに従い位相は後退方向に動いた。空気の流れの方向に関係なく光の速度が遅くなっている。この光速度の減少の割合は、例えば風速 34 m/sec の時、風洞を 2m 進んで $1.95 \times 10^{-6}\text{m}$ 後退しているので $1.95/2 \times 10^{-6} = 0.00000098$ (約 100 万分の一) だけ光の速度は遅くなっている。フィゾーの実験の様な随伴が生じている訳ではなく **全く異なる作用で起きる** 現象である。何かが影響して光伝播の媒体が変化して光の速度が変わったと考えられる。

速度の遅くなる原因を調べる。

以上の結果を見直すと風速には関係なく他の原因でこの現象が起きていると考えられる。そこで条件を変えてこの原因を調べた。

熱を与える

1) 室温 15°C の時風洞に 20°C 高い温度の空気を流し込んだところ干渉縞が 5 つ程速度の前進方向に位相が移動した。(速度が速くなる) 流し込んだ流れを止めても干渉縞は移動した位置に停止したままになった。次に室温の空気を流したところ干渉縞は後退し元の位置に戻った。結果として高い温度の空気中では光速度は速くなる。

2) 風洞の出口を塞いで空気を送り圧力を与える。

圧力 (空気圧) を高くしたところ干渉縞は速度の後退方向 (遅くなる) に大きく移動した。

以上 1)、2) の結果から密度が変化すると媒体中の光の速度が変化することになる。風洞実験では風の速度が関係する訳ではなく、風の速度をあげ圧力が高くなり密度が高くな

って光速度が遅くなっていたことになる。空気ポンプを吸い込み形に変えて空気を流したところ（圧力を下げる）、干渉縞は前進方向に移動し(光の速度が速くなる)確認することができた。

気体媒質中の光速度（ c' ）は気体の屈折率（ n ）によって

$$c' = c/n \dots (1.3)$$

で決定され、光速度と屈折率の関係は（1.3）式で表されるが、光の速度の変化の根本原因を屈折率の変化で説明することは説明にはならない。物質密度の変化が屈折率を変えることは知られているが、屈折率の変化によって、結果として光の速度が変わる事になるが、あいだに屈折率を介していて密度と光速度の直接関係を表していない。次にこの直接の関係を調べる。

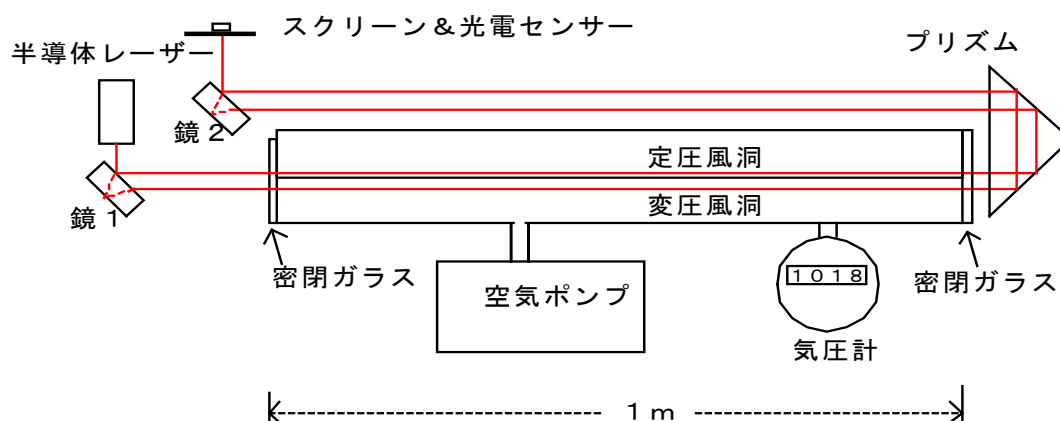
空気中の密度変化による光速度の測定

気体は圧力を変えることで密度が変化する、この密度変化で光速度も変化することになるが、この密度変化による媒質中の光の速度の変化を直接に測定する。

測定

図 1.3 の実験装置で空気ポンプを調整し変圧風洞中の気圧を変化させ干渉縞の移動3つ毎に気圧計を読む。はじめにポンプで増圧させて縞の移動数を3、6と前進させ気圧計を読む。次に減圧し-3、-6、-9、-11と縞の移動数を後退させて気圧計を読んだ。

図 1.3 実験装置



波長 $0.65 \times 10^{-6} \text{m}$ の半導体レーザー(赤色)を出た光線は鏡1の表面で反射するものと、屈折入射し鏡底部で反射されるものとに分離される。それぞれの光線の一方は一定圧の風洞を通過しもう一方の光線は風洞内の圧力を空気ポンプで増減し圧力を変えられる風洞内を通過するようにする。それぞれ風洞を出た光線はプリズムで方向を変え鏡2で合成しスクリーンに干渉縞を結実させる。風洞の長さは1mとした。プリズムで反射させて干渉縞の結実先を2mとして干渉縞を識別し易くした。スクリーン裏に照度センサーを設けて明暗の繰り返しをカウントすることで干渉縞の移動数を数え測定する。

結果は以下の表 1.3 に示す。

表 1.3

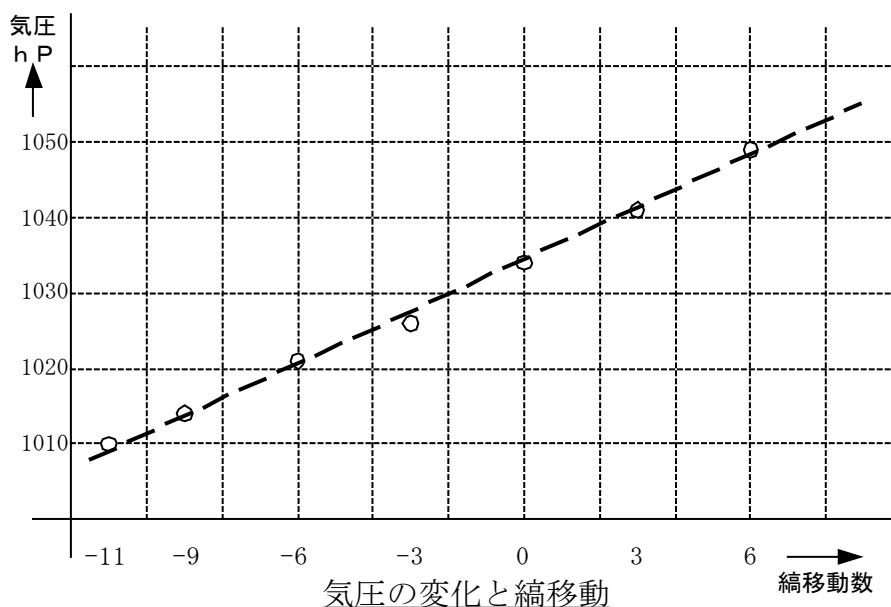
縞移動数	+6	+3	0	-3	-6	-9	-11
気圧 (hP)	1049	1041	1034	1027	1021	1014	1010

これを図 1.4 にグラフに示す。

この結果から気圧（密度）と干渉縞の移動（光速）が比例しているのが判定出来る。気圧差（ $1049 - 1010 = 39$ ）hP で $\{6 - (-11) = 17\}$ 干渉縞の移動が起きている。気圧を 0 まで減圧すれば比例関係であるから $17 \times 1049 / 39 = 452.9$ の縞が移動して真空に至る。よってこの波数（452.9）全数の距離は、波長（ $0.65 \times 10^{-6} \text{ m}$ ）より

$$0.65 \times 10^{-6} \times 452.9 = 2.94 \times 10^{-4} \text{ [m]} \dots (1.4)$$

図 1.4：気圧の変化による縞の移動



室温 10°C 、気圧 1034hP 、レーザー波長 $0.65 \times 10^{-6}\text{m}$

風洞 1m の空気中を通過するのに、真空中と比べ $2.94 \times 10^{-4} \text{ [m]}$ 距離だけ遅れ

$$1 - 2.94 \times 10^{-4} = 0.999706 \text{ [m]} \dots (1.5)$$

(1.5) の距離を進むことになる。よって空気中の光速と真空中の光速の比は

$$0.999706$$

となり。よってこの逆数は、

$$1 / 0.999706 = 1.000294 \dots (1.6)$$

となってこの実験から空気の屈折率 1.000294 (10°C 、 1034hP) が求められたことになる。 0°C 、 1013hP の空気の屈折率は 1.000297 (理科年表より) とほとんど同じ値になっている。

この方法で気体媒質中の光速度の正確な測定が可能である。ここでは5%程度の減圧で測定したが、かなり正確な測定になっている。空気中の光速度は大気密度に比例して遅くなることが証明された。

気体中の光の速度の実態の考察

一気圧、0°C、1 m³の空気中の分子数を求めると、アボガドロ定数 (6.022×10²³) より (1000/22.4) × 6.022 × 10²³ = 2.69 × 10²⁵ 個になる。気体分子の大きさは 10⁻¹⁰mほどで体積を立方体で近似してみると 10⁻³⁰m³となるので上記個数の全体積は

$$10^{-30} \times (2.69 \times 10^{25}) = 2.69 \times 10^{-5} [\text{m}^3]$$

となる。この値は1m³の1/40000ほどである。この1m³空間は隙間だらけのすかすかな空間ということになる。この中を光が進むことになるので大部分は真空中を進むことになる。

気体分子に当たって速度が遅くなると考えると、光の速度は出会う分子の数に比例して遅くなることになる。密度は立方体中の分子の総量であるから長さ方向の分子数は密度の立方根に比例しなければならない。すなわち光の速度は密度の立方根に比例して遅くなるはずである。しかし事実はこれに反して密度に比例して遅くなっているので、光の速度についてこのモデルは事実と合致しない。

この矛盾を解決するには真空空間自体が密度に比例して空間が一様に変化し光の速度が遅くなるを考えるしかない。これはすなわち媒体（エーテル）の存在を意味する。波動である以上伝達する媒体があるとするのが妥当である。

いろいろな物質の密度と光の速度の関係

空気媒体中の光速度が密度に比例して遅くなることが実験で証明されたが、他の透明な物質の密度と屈折率は測定され知られているので、これらの物質媒体についても光速度の遅くなる率を検討してみる。

表(1.4)の媒体の屈折率は理科年表から抜粋である。物質媒質中の光速度は屈折率より ($c' = c/n$) と表される。表 1.4 の 3 列は (1/n の値) で媒質の真空中との光速度の比を示す。屈折率は 1 より必ず大きくなるから当然物質媒質中の光速度は真空中の光速度より遅くなる。この両者の差をとると

$$c - c/n = c (1 - 1/n) \dots (1.7)$$

上式の右辺の括弧内の値は真空中の光速度と比して物質媒質中の光速度の遅くなる度合いを示している。この値を速度低減率として表 1.4 の 3 列目に各物質別に示す。4 列目にそれぞれの媒質の密度を示してある。各媒質別の速度低減率の対密度比を速度低減係数と呼び 5 列に示す。値を比較検討するとおよそ密度に比例しているのが読み取れる。しかし水素の速度低減係数が 1 桁程大きくなっているが水素は陽子のみの元素で中性子がなく密度は他の中性子付きの元素の 2³ = 8 倍である。他の元素についても対陽子密度に変えるには、陽

子率 {陽子数/(陽子数+中性子数)}³の3乗で割れば得られる。対陽子密度の速度低減係数を7列目に示す。

表 1.4 光の速度と物質密度の関係

表式	屈折率 n	速度 低減率 1-1/n	密度 (Kg/m ³) ρ	速度低減係 数(対密度) (1-1/n)/ρ	陽子密 度率	速度低減係数 (対陽子密度)
水素	1.000132	0.000131	0.0899	0.00146	1	0.00146
水	1.333	0.2498	1000	0.000249	0.171	0.00146
酸素	1.000272	0.000272	1.429	0.00019	0.125	0.00152
ヘリウム	1.000035	0.000034	0.1785	0.000194	0.125	0.00160
二酸化炭素	1.00045	0.0004498	1.977	0.000227	0.125	0.00180
地球の大気	1.000292	0.000292	1.29	0.000226	0.125	0.00181
水蒸気	1.000252	0.000252	0.589	0.000427	0.234	0.00182
窒素	1.000297	0.000296	1.25	0.000237	0.125	0.00189
石英ガラス	1.45	0.3103	2220	0.00014		

屈折率：出典は屈折率一覧表 (セイシン企業-ネット検索)、密度：出典は平成15年理科年表 ただし気体密度は0°C、1気圧の値であるが、水蒸気は100°Cの値となっている。

(水蒸気の密度は100°Cの場合の値で大きくなる)、物質により多少異なる値となる多少の違いはあるが値は凡そ0.0015~0.0019の同じような値となっている。特に密度10000倍の液体の水や・固体のガラスの場合にも速度減衰係数は同様に“0.002”以下の数値となっていて陽子密度と比例関係が成立しているのは驚異的である。よって気体に限らず液体・固体の物質中の光速度の低減率は媒体の陽子密度に比例する。この関係は異なる物質媒体の異なる陽子密度に比例して光速度が低減していることである。従って媒体中の光速度(c')は物質の陽子密度(ρ)、速度減衰係数を(s)として

$$c' = c(1 - \rho s) \dots (1.8)$$

と表される。このとき屈折率(n)は二次的に決定され当然 $n = 1/(1 - \rho s)$ となる。

光や電磁波の速度についてはマックスウルの電磁方程式からも求められ、誘電率(ε)と透磁率(μ)から

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

と表される。ここで水の場合 $\epsilon = 81\epsilon_0$ 、 $\mu = 0.999\mu_0$ から光速度の c/9 の速さとなる。一方屈折率から求められる速さは c/1.33 であり実際も c/1.33 である。物質中のマックスウルの電磁方程式からの光速度は成立しないことになる。

以上、媒質の如何に関わらず媒質中の光速度が媒質の陽子密度に比例して遅くなることが見つけられた。このことは実験室(地表)の媒体と一緒に光が進んでいることになる。

即ちエーテルは実験室と一体となっていることになる。このことは地表でも同じことになり、**マイケソン・モーレーの干渉実験では従って干渉縞の変動は生ぜず**エーテルの対地速度は測定出来ない。

2. 媒質の速度による密度変化で生じるフィゾーの水流中の光速速度

図 2. に示すフィゾーの水流中の光速速度を幾何学的に算出してみる。

水流速度 v の時、密度 ρ の変化は v/c に比例すると考えられ

$$\rho' = \rho (1 - v/c) \dots (2.1)$$

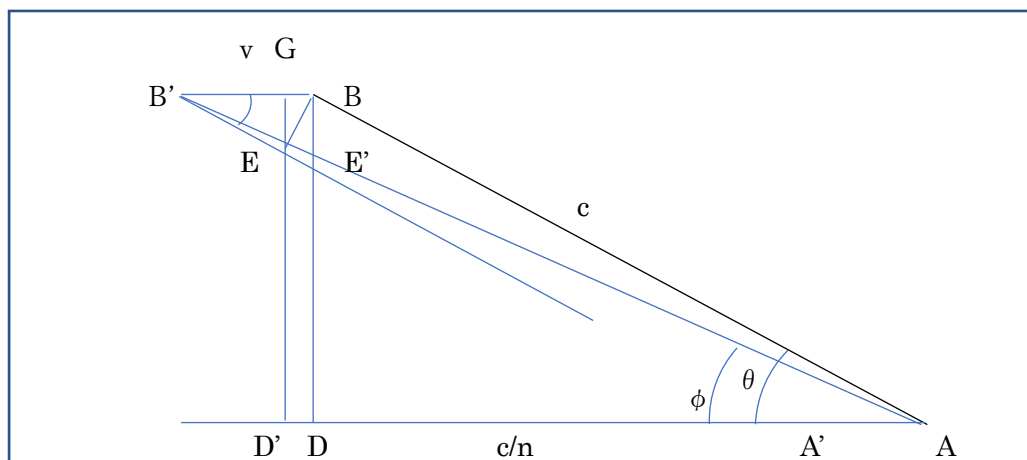
(2.1)式が成立する。よってこの時の光速速度 c' は (1.8) 式より

$$c' = c (1 - \rho' s)$$

上式に(2.1)式を代入して

$$\begin{aligned} c' &= c \{1 - \rho (1 - v/c) s\} \\ &= c \{1 - \rho s + \rho s (v/c)\} \\ &= c \{(1 - \rho s) + (1 - 1/n)(v/c)\} \quad \because (1 - \rho s) = 1/n \\ &= c/n + (1 - 1/n) v \quad \dots (2.2) \end{aligned}$$

図 2. (媒質の運動による幾何学的屈折率の変化)



光の進行方向 (AD 方向) に媒質の速度 v で運動し物質の移動がない場合の B 点から媒質の運動で B' 点に到達する。B 点から AB' に垂線を下ろしこの点を E とする。また B 点から AD' に垂線を下しこの点を D、E 点から AD' に垂線を下しこの点 D' とする。屈折角は θ から ϕ に変化し結果として光の速度は $c \cos \phi$ の大きさに変化すると考える。

三角形 ABD に於いて $AB=c$ (光速)、 $\angle BDA = \perp$ 、 $\angle BAD = \angle BB'F = \theta$ 、進行方向 (AD 方向) に媒質の速度 v で運動し $BB'=v$ 、 $AD=c \cos \theta$ 、 BB' 上に $B'G=v \cos \theta$ 、G 点から AD に垂線を下し D' 点、点 A から $AE=c$ となる GD' 上にとる。

$$GB = BB' - B'G = v - v \cos \theta = v(1 - \cos \theta)$$

$$DD' = AD' - AD = AB \cos \theta - AE \cos \phi = c(\cos \theta - \cos \phi)$$

GB = DD' より

$$c(\cos \theta - \cos \phi) = v(1 - \cos \theta)$$

$$\therefore c \cos \phi = c \cos \theta - v(1 - \cos \theta)$$

$$= c/n - v(1 - 1/n) = c'$$

これは式(2.2)そのものであり、式(2.2)を幾何学的に証明するものである。