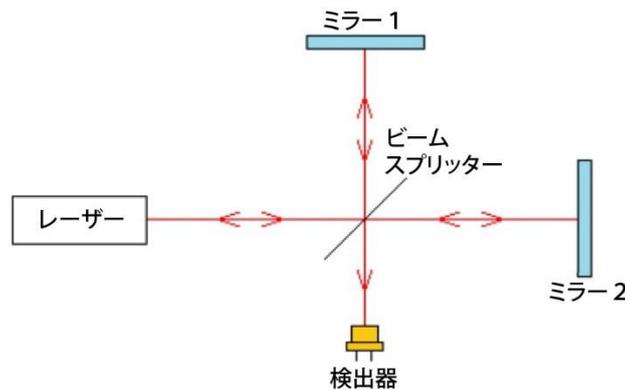
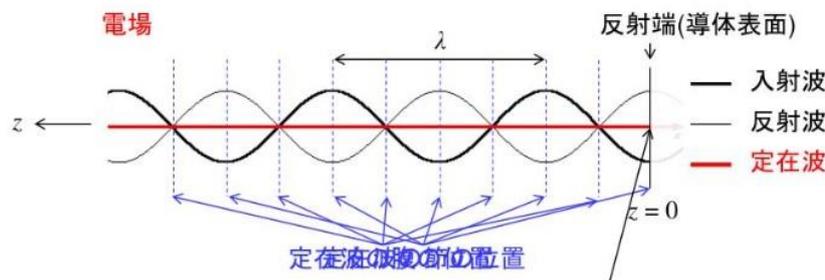


## ② エネルギーはどこへ行くの？

完全にコリメートされた（平面波源）と、（各ミラーごとに）光軸に完全に垂直になるように調整された完全な平面ミラーを備えたマイケルソン干渉計（「干渉計と干渉計の基本」の節を参照）があって、ビームスプリッターも完璧な構造で、向きも完璧であるとして。この場合、複数の縞は存在せず、強度が2つのビーム間の経路長差によって決定される広い領域だけが存在します。これがちょうど  $1/2$  波長（180度）である場合、結果はまったく何もなく、画面は完全に暗くなります。それで、すべてのエネルギーはどこに行くのでしょうか？いいえ、それは単に薄い空気やエーテル、真空、地元のゴミ捨て場、または他の場所に消えるだけではありません。☺ [Sam's Laser FAQ - Items of Interest \(repairfaq.org\)](http://www.repairfaq.org)



基本的なマイケルソン干渉計の概念図



定在波がゼロの状態の概念図

[PPT - 電磁気学 II PowerPoint Presentation, free download - ID:6656176 \(slideserve.com\)](#)より引用

あなたの最初の反応は次のようになります。「理想的なシステムなどありませんし、ビームは実際には完全に平面ではないので、おそらくエネルギーがエッジの周りに現れるか、この状況は単純に存在し得ないでしょう。」申し訳ありませんが、これは不正確です。この動作は、完全な光学系を備えた完全な非発散平面波ビームの理想的な場合にも当てはまります。

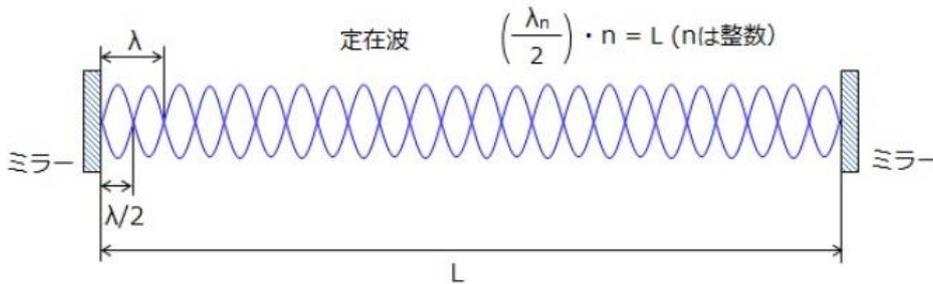
おそらく、これを RF、マイクロ波、音響、またはその他の発生源の観点から考えると簡単でしょう。

- 連続波信号が2つの部分に分割され、位相が180度ずれて再結合された場合はどうなるでしょうか。それとも、水晶発振器からの正弦波信号が、一對の伝送線路（同軸など）上で2つの等しい部分に分割され、位相が180度ずれて再結合されたのでしょうか？それほど神秘的ではありませんか？

- エネルギーが実際には消えないと仮定すると(消えない)、それらが結合する点でヌルを説明するには他に何が起きているはずですか？それぞれの信号は何を認識しているのでしょうか？どのように影響を受けますか？
- オルガンパイプ内の単なる音響共鳴や、弦上のローテクな定在波の場合はどうなるでしょうか？ おっと、共鳴と定在波って言いましたか？ 😊

ヒント: 2つの信号のどちらかの観点から見ると、これは伝送路上にノード(固定点)を課すことと(もしあれば)どう違うのでしょうか？それとも干渉計の画面上ででしょうか？結局のところ、節点は信号の強度が0でなければならないという強制的な場所にすぎませんが、ここではすでに正確に0になっています。オルガンパイプの場合、そのような節点は閉じた端です。弦には、アイフックか2本の指だけでOKです！

OK、現時点では期待に応えられないことはわかっています。答えは、光が反射して光源(レーザー)に戻り、干渉計の光路全体がエネルギーが定在波として蓄積される高Q共振器のように機能するという事です。光エネルギーは共振器に送り込まれており、行き場がありません。実際には、システム全体の避けられない欠陥は別として、戻り光によってレーザーが不安定になり、場合によってはレーザー自体が損傷する可能性もあります。したがって、そのような実験が発煙につながる可能性は少なくともあります。



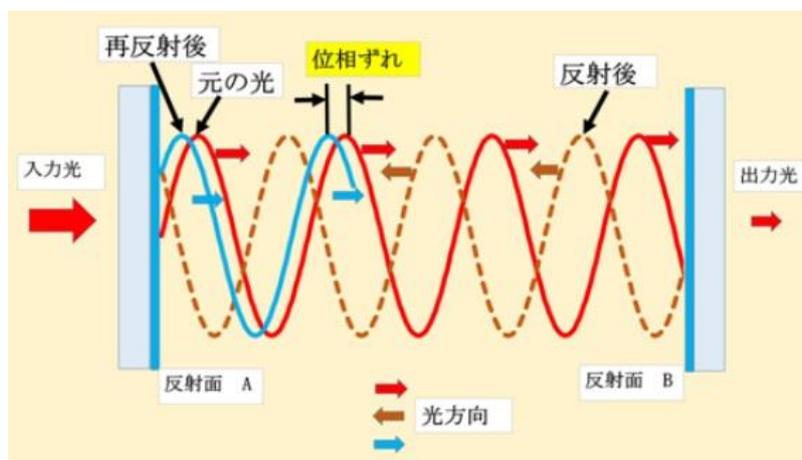
共振器内の定在波の概念図

(引用元: Art Kotz (alkotz@mmm.com).)

マイケルソン干渉計のどこですべてのエネルギーが散逸するかを理解するのに、それほど難しく考える必要はありません。また、不完全なコンポーネントを参照する必要もありません。完全な非吸収性コンポーネントの思考実験でも、物理的に正しい解決策が得られます。

前の(正しい)記述を要約すると、平らな表面を持つマイケルソン干渉計では、均一で暗い透過性の出射ビームが得られます。電力は熱として放散されません。光がたどることのできる代替経路があり、この場合、光は入ってきた道から出ていきます(反射されて光源に戻ります)。

実際、優れた平面ファブリペロー干渉計を使用すると、これを実際に観察できます(ミラー間隔をスキャンすると、干渉計からの透過と反射が交互に起こります)。



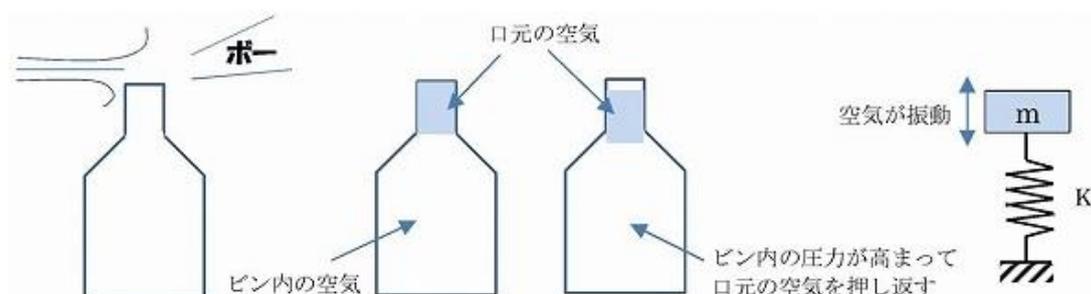
ファブリーペロー干渉計の概念図

[ファブリーペロー干渉計](#) | [用語集](#) | [光学ソリューションサイト](#) : [サイバネット \(cybernet.co.jp\)](#)より引用

電気の場合では、アンテナのサイズが不適切で、エネルギーのほとんどが放射されない送信機を想像してください。それは送信機の出力段に反射されて戻ります。送信機がそのすべてのエネルギーの消散に対応できない場合、送信機は煙となって消えてしまいます。アマチュア無線家なら誰でもこのことをよく知っているはずです。

(引用元: Don Stauffer (stauffer@htc.honeywell.com).)

言及されたデバイスの多くは、少なくとも部分的に光共振器でした。オルガンパイプやヘルムホルツ共鳴器のような音響共鳴器内で何が起きているかを観察すると有益かもしれません。



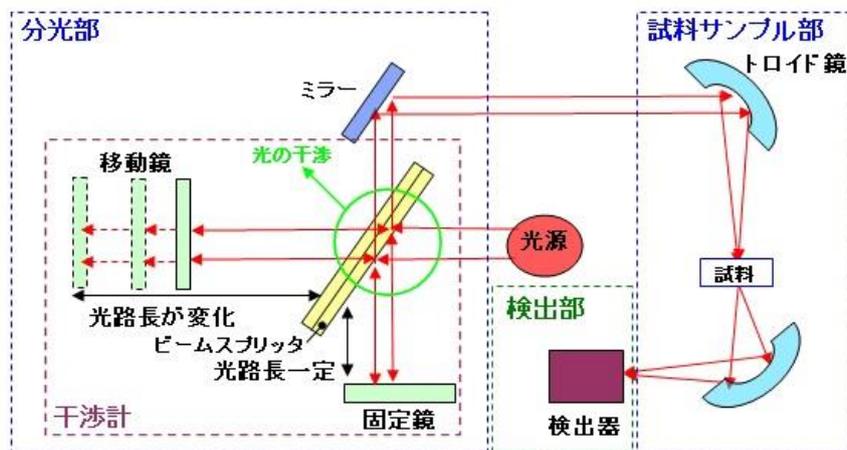
ヘルムホルツ共鳴の概念図

[ヘルムホルツ共鳴 \(Helmholtz Resonant\)](#) - [株式会社クレアテック \(createc-jp.com\)](#)より引用

完璧な無限 Q 共振器内の音源から始めましょう。エネルギー密度は時間に正比例する値で増加し始めます。したがって、理論的には、共振器内に無限の音響エネルギーを蓄えることができます。

もちろん、無限の Q 共振器を構築することは不可能ですが、もう少し我慢してください。共振器の Q を損なうことなく、共振器内でオーディオ音源を得るのは困難です。それでは、音響エネルギーをビームで注入できるように、共振器に小さな穴を開けてみましょう。理論的に見ても、この穴が共振器の完全性を妨げているものは何かと考えてください。共鳴するでしょう。

完璧な光共振器は存在しません。自然界には完全に反射する面がないのと同じように（FTIR は私たちが知ることが出来る最も近いものです）。電磁波が実際の表面に衝突するたびに、エネルギーが熱に失われます。どのような光源がどのような表面に照射されても、光は熱に変わります。実際、エネルギーの大部分はすぐに熱に変わります。熱力学の法則によれば、たとえそれが瞬時に熱に変換されず、別の形のエネルギーに変化したとしても、最終的には熱として現れます。今支払っても、後で支払っても、常にエントロピー税を支払うことになります。



FTIRの基本構造図

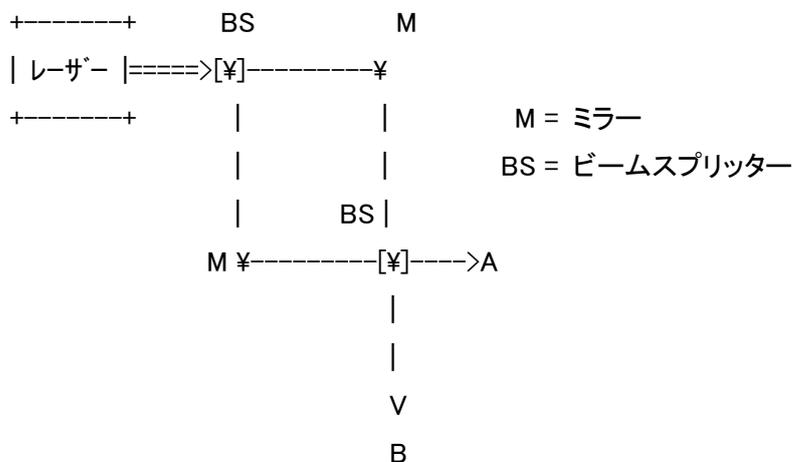
[FTIR と化合物の官能基の吸収波数範囲 | 株式会社 NEAT \(neat21.co.jp\)](http://neat21.co.jp)より引用

(引用元: Bill Vareka (billy@srsys.com).)

そして、他にも考慮すべきことがあります。

ビームスプリッターで光を組み合わせる場合、一方のポートから出る光ともう一方のポートから出る光の間に避けられない位相関係が生じます。

したがって、次のような完全なマツハツエンダー干渉計があるとします。

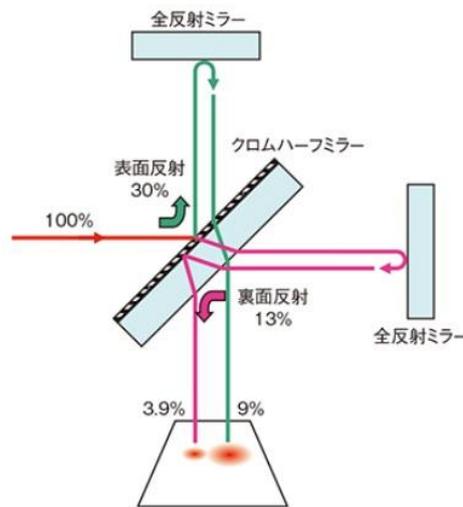


たとえばポート A から完全にキャンセルされるように設定すると、ポート B には建設的な干渉が発生し、ポート B から出力される強度は、最後のビームスプリッターの 2 つの入力ポートから入力される合計強度と等しくなります。これは、ビー

ムスプリッターで反射される光間の位相関係によるものです。反射されてポート A から出力される信号は、反射されてポート B から出力される信号と 180 度位相が異なります。ポート A とポート B の送信部分は同じです。したがって、2 つの出力ポートからの光の間には厳密な位相関係が存在します。これは、光の伝播の時間反転対称性により避けられない結果です。

(引用元: A. Nowatzky (agn@acm.org).)

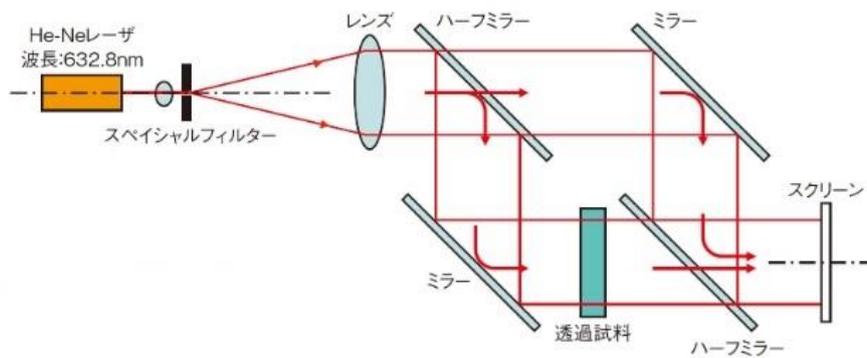
ビームスプリッター (ハーフシルバースペキュルムなど) は基本的に 4 ポートのデバイスです。理想的な透明度 50% のミラーに 45 度の角度でレーザーを照射するとします。光の半分は直進し、残りは 90 度の角度で反射されます。ただし、反対側、つまりここではもう一方の入力ポートから光を照射した場合も同じことが起こります。光の方向を反転すると (線形光学の範囲内に留まる限り、光の方向はいつでも反転できます)、どちらかの出力経路に入った光が 2 つの入力ポートに 50/50 で出力されることがわかります。光ビームスプリッターは、RF またはマイクロ波の領域における方向性結合器と同じです。よく観察すると、ビームスプリッターの 2 つのビームが実際には 90 度であることがわかります。1:1 指向性 RF カプラーと同様に、位相がずれています。



### ハーフミラー仕様のビームスプリッターの基本概念

光学素子 ビームスプリッターのアプリケーションノート・シグマ光機株式会社 ([optosigma.com](http://optosigma.com))より引用

1 つのスプリッターでレーザービームを 2 つに分割し、その 2 つのビームを別のスプリッターで結合する実験では、位相に応じて、すべての光が 2 番目のスプリッターの 2 つのポートのいずれかから出力されます。マッハツェンダー干渉計と呼ばれます。



### マッハツェンダー干渉計の基本概念

[マッハツェンダー干渉計 / IFS2-MZ-25 \(optosigma.com\)](http://www.optosigma.com)より引用

理想的なビーム スプリッターはエネルギーを吸収せず、入った光は 2 つの出力ポートの 1 つから出てきます。