

LASER INTERFEROMETER FOR PRECISE ALIGNMENT OF LINEAR ACCELERATOR

Y. Ogawa, T. Suzuki, K. Furukawa, I. Sato and A. Asami

KEK, National Laboratory for High Energy Physics
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

ABSTRACT

In a future linear collider, the alignment accuracies of nanometers may be required, because a beam spot size will reach nanometers at a final focusing region. A technique of laser interferometers allows such a precise measurement for displacements of accelerator components. The quantity to be measured, however, is transverse with respect to a laser direction which defines a reference line. In order to realize it, one of the possibilities using phase conjugate mirrors with a laser interferometer was investigated.

レーザー干渉計を用いた線形加速器の精密アライメント

1. 序

将来のTeV領域リニアコライダーにおいては、衝突のルミノシティを上げるためにビームサイズをナノメートルまで絞り込む必要があるとされている。そのために最終集束系の四重極電磁石等のアライメントおよび振動を同程度もしくはそれ以下で制御しなければならない。これは、従来の加速器におけるアライメント精度に比較して飛躍的な向上が必要であることを示している。近年ナノメートルテクノロジーが精密機械その他の分野で発展しているが、線形加速器などのような長距離にわたって精密な変位測定や振動制御を必要とする例はないであろう。本報告では、近年、重力波実験などの分野で進展の著しいレーザー干渉計技術を用いて光の波長の100分の1以下の振動変位を読み取る技術の原理と感度及び予備実験の結果について報告する。また、線形加速器特有の問題である、レーザービームの進行方向と直角の方向の精密測定法（線形加速器では、長距離にわたって三角測量的なことを行なうことは、物理的に非常に難しい）についても検討する。

2. レーザー干渉計

[干渉計の原理]

ここで用いる干渉計は、図1に示すようなマイケルソン型の干渉計で、安定なコヒーレント光源（レーザー）とビームスプリッターおよび高反射鏡からなる二本の直角な腕によって構成される。ビームスプリッターで分けられた二つのレーザービームのうちの一つは、測定すべき加速器機器の架台等に取り付けられた高反射鏡で反射され、再びビームスプリッターに入射される。もう一方のビームは、比較基準となる片方の腕を進み反射鏡で反射されビームスプリッターに戻ってくる。この両者の光の干渉縞を観測し位相差（光路差）を測定することによって、基準の腕の長さに対する加速器機器の振動変位を知ることができる。この方法によれば、長距離離れた二点間の相対変位を精密に測ることが可能となる。通常は、干渉縞の数を数えるなどの方法によって光の波長を単位とした測距が行なわれているが、ここではナノメートル以下の測定精度のために、近年重力波実験の分野で開発された干渉縞暗部ロック法を用い、暗部からの微小なズレを負帰還

の誤差信号として検出し光の波長以下の超精密な変位測定を目指す。

[干渉計の感度]

原理的な感度限界は鏡の位置の量子的揺らぎに基づく不確定性原理によって決まるが、これが実現されるのは、測定する光子数の統計的な揺らぎと、それによって鏡に与えられる変位による揺らぎが同じとなるような最適なレーザー強度のときである。実際には、そのような強度は非現実的な大きさになるので、現実的な原理的な感度限界は、前者（光子数計数雑音）となる。10 mW程度の可視光レーザーを用いた場合、この値は約 10^{14} m（バンド幅100Hz）程度の小さな値になるので、加速器の精密アライメントの場合は実際上問題とならない。実際に感度を定めるものとしては、(1)光源の雑音、(2)地震性の雑音、(3)熱雑音、(4)光路上の残留ガスなどいくつかある。

(1)光源の雑音

光源の雑音としては、光の周波数雑音と強度雑音がある。周波数雑音の場合、光源の安定度 ($\delta f/f$) に干渉計の二つの腕の長さの差をかけると測定感度が得られる。例えば、市販の安定化 He-Ne レーザーは、周波数安定度が 10^{10} 程度であり、線形加速器の場合のような片腕の極端に長い干渉計の場合は、二つの腕の長さの差は100-1000 mに及ぶので、測定感度としては10-100 nmになってしまう。これの解決方法としては、外部のファブリペローキャビティに周波数をロックするなどして光源自身の周波数安定度を上げること、基準となる腕において光ビームの折り返しやファブリペローキャビティの利用によって二つの腕の光路差を小さくすることが考えられる。ここでは、両方の方法をそれぞれ検討する。強度雑音の方は、光源の安定度に干渉縞暗部からのズレ（干渉縞暗部ロック法における動作点からのズレ）をかけたものが感度を定める。また、強度雑音は低周波領域で極めて大きいので干渉縞暗部ロック法において用いる光変調周波数を十分高くすることによって信号のアップコンバートを行ない所望の雑音レベルまでもっていく。He-Neの例では、安定度が 10^4 程度なのでナノメータ計測には動作点からのズレを 10^5 m以下にする必要がある。実際は、光源自身の強度安定化を行ない動作点からのズレに対する制限をゆるめることになる。

(2)地震性の雑音

加速器のアライメントでは対象となる周波数領域が低いので、特に問題となるのは地震性の雑音の影響であろう。地面振動の典型的なスペクトルは、 $10^7/f^2$ m \sqrt Hzであり、1 Hz付近でみると 10^7 m \sqrt Hzの大きさになり何らかの方法による加速器機器の除振が不可欠である。除振の方法としては、ゴムや空気ばねによる方法とアクティブフィードバックによる方法がある。

(3)熱雑音

加速機器、鏡、光学素子等はすべて機械的な共振モードをもち、それに伴う熱雑音が存在する。これは、共振周波数で大きく、共振より高い周波数ではゼロに近づき、低い周波数では、ある一定値をとる。熱雑音を下げるには、温度を下げる、各素子の有効質量を増やす、共振周波数をうまく選ぶ、及び機械的なQ値を高くするなどの方法がある。アライメントの場合は計算上は問題ないが、地震性の雑音を避けるための除振系との関係性を考えると、共振のピークをどこにもっていけばよいかなどフィードバックとの関連で現実的に即して検討する必要がある。

(4)光路上の残留ガス

光路上に残留ガスがあると屈折率の揺らぎなどで光路差が変化し干渉計の感度を制限する。したがって、光路の真空化は必須の条件である。

3. 長基線干渉計予備実験

図1に示すような配置で簡単な干渉実験（大気中）を行なった。長さは約80mで、光源は、0.7mW周波数安定化He-Neレーザーを用い、ビームエキスパンダーによって約15mmφのビームサイズにした。反射鏡としては、コーナキューブを用い行きと帰りで光路を平行にずらしレーザーへの戻り光を避けた。戻り光はレーザーの安定化機構に影響を与えるので、このような方法をとった。今後、光路を真空化し干渉縞暗部ロック法を試みる予定である。さらに、上述の雑音を抑える工夫をしたい。

4. 横方向アライメント

通常の方法ではレーザービームと直角方向の変位を測るのは難しい。そこで、ここでは、非線形光学素子である位相共役鏡²を用いた実験を行なった。原理を図2に示すが、反射光が常に入射光と同じ方向にもどる位相共役鏡の性質を利用したアイデアであった。実験的にはレーザーの安定度等の問題で精密に確認できていないが、現在、原理的に困難があると考え検討を進めている。

参考文献

- [1]D. Shoemaker et al., Phys. Rev. D38, 423 (1988).
- [2]本多徳行, 計量研究所報告, 第37巻第3号, 265(1988).

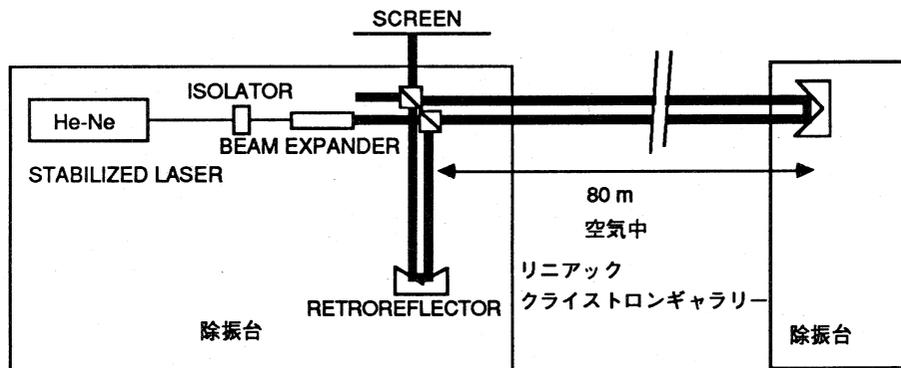


図1 長基線レーザー干渉計の予備実験(80m干渉計)

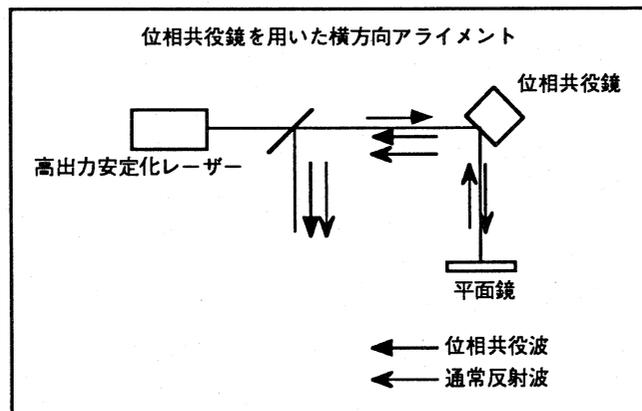


図2 新アライメント方式の検討(位相共役鏡の例)