

ERL におけるビーム計測

概要と光による計測技術のトピックス

KEK・PF 三橋 利行

はじめに

ERL 加速器におけるビームダイナミクスの研究、エネルギー回収のためのビーム制御のために、的確で、正確なビームの診断が必要である。ERL には、従来の加速器には存在していない加速器としての新たな、特有の構成があるので、そのためのビーム診断技術の開発研究もあわせて行っていく必要がある。最近、電氣的な計測技術に基づくビーム計測技術が主流であったこの分野に、光学的な計測技術が応用され始め、さらには電氣的な技術と光学的な技術を融合した技術も使われ始めている。従来の電氣的な計測技術も、デジタル技術の導入により、大きく発展しつつある。ビーム計測の分野では、将来の先端加速器開発を視野に入れて、日頃から色々なビーム計測のためのアイデアが考案され、研究開発が活発に行われており、これらの結果には ERL に応用できるものも少なくない。本稿では、まず、ERL におけるビーム計測について概要を述べた後、ERL における光学的ビーム計測の中から、トピックス的なものとして、Low- γ OTR、強度干渉計によるバンチ長の測定、コロナグラフによるビームハロー測定について紹介する。

§ 1 ERL におけるビームインストゥルメンテーション

ERL におけるビーム計測について主な

ポイントになる項目について、以下にあげてみる。

- * 入射部におけるハイパワービームのビーム位置、プロファイルなどの診断
- * 加速空洞直線部における加減速両ビームの同時診断、ビームタイミング計測
- * 加減速両ビーム強度の精密計測
- * ビームハローの診断
- * ビームサイズ、プロファイル診断
- * フェムト秒領域での縦方向プロファイルの診断
- * アンジュレーター直線部のための空洞型ビーム位置モニターによる精密ビーム位置診断
- * 高速時間応答ビーム位置診断

これらのポイントに沿って ERL のビーム計測システムのデザインが進められており、以下にその概要を述べる。

§ 1 - 1 ERL の全体構成

ERL は基本的に線形加速器に周回部を付加してビームを加速空洞に戻し、減速位相に乗せることでエネルギー回収する構造をしている。大まかに、入射部、加減速のための RF 空洞が入る直線部、アーク部、挿入光源のための直線部、ビームを捨てるためのダンプリングからなる。この教科書に、もう何度となく出てきている絵であろうが ERL の全体構成を見るために KEK

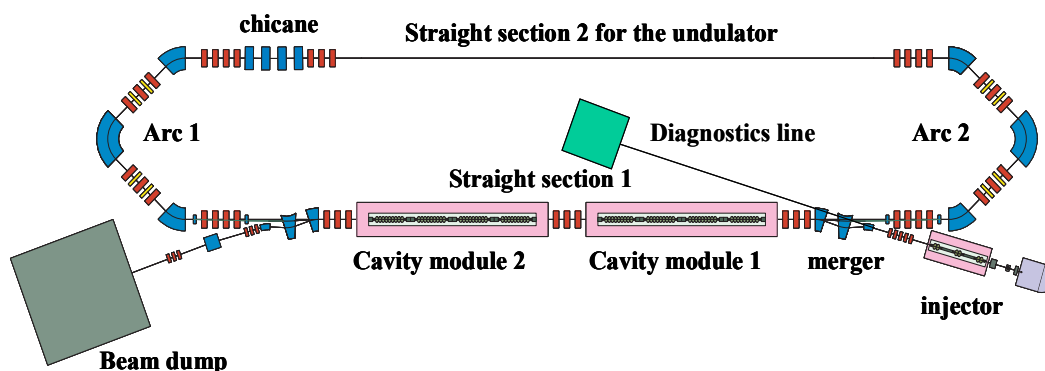


図 1 - 1 コンパクト ERL の全体構成

で現在設計が進められているコンパクト ERL の全体構成を図 1 - 1 に示す。以下に各セクションについて必要となるビーム計測システムについて概略を述べる。

§ 1 - 2 ERL の各部分に必要なビーム計測システム

入射部

入射部は 1.3GHz の繰り返しを持つ大強度の線形加速器であり、フルパワーで運転すると入射部のエンドで 1MW のビームパワーに達する。この部分のモニター配置概要を図 1 - 2 に示す。

Injector section

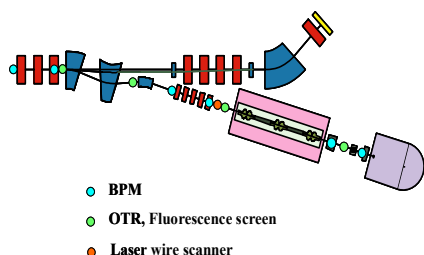


図 1 - 2 入射部モニター配置の概略

このような大強度ビームの下では、従来の線形加速器でよく用いられてきた蛍光板、ワイヤースキャナーのような破壊型のビーム計測器についてはフルパワーでは用いる

ことが困難である。ビームの繰り返しを下げるなどすれば使用することが出来るので、これらの計測器は依然として重要である。特に蛍光板はスリット、ピンホールアレイと併用することで空間分解能をあげることが可能であるので重要な計測器である。また従来の一般的なビーム位置モニター (BPM) も必要である。入射部は 10MeV とエネルギーが低いので、放射光モニターのような非破壊型のモニターは使用できない。遷移放射 OTR[1][2]は γ が非常に小さい電子銃から出たのビームでも発生するので、アクセプタンスの大きな光学系を設計すれば有望なプロファイル、パンチ長モニターとなる。このモニターについては § 2 で紹介する。OTR モニターは通常非破壊型のモニターに分類されているが、ビームエネルギーの低い部分では薄いターゲットを用いてもビームロスは無視できないから、入射部で用いるときはどちらかといえば破壊型であるので、フルパワーでは使用することは困難である。いずれにしてもフルパワー運転時はメガワット級の電子ビーム溶接機のようなものであるから電子ビームの空間分布を調べるのは破壊型のモニターではかなり難しいと言わざるをえない。ハイパワーでのビーム診断を行うには、図 1 - 1 に示す

ように、入射部の後段にビームをデフォーカスしてパワー密度を落とすような、診断ラインを設けることも必要である。入射部において、非破壊型のモニターで使用できそうなのはレーザワイヤー[3]、レーザ干渉計タイプ[4]の、ビームによるレーザ光の逆コンプトン散乱を利用したモニターである。この種のモニターは最近リニアコライダー関連で盛んに研究開発がなされており、特にレーザ干渉計型のモニターはレーザーの干渉縞の周波数を変えることにより、放射光干渉計のように電子ビームの空間分布についてフーリエ解析をすることが出来る。エネルギーの低い逆コンプトン散乱光を、どのように加速器の真空ダクトから取り出すかが問題ではあるが（同様の問題はワイヤースキャナーを用いるときにも同様に起こる）、この種のモニターはビームパワーが大きいほど感度がよくなるので、入射部のハイパワービーム用のビーム形状モニターとしては有望である。

加速空洞部

加速空洞が入る直線部は加速位相に乗るビームと減速位相に乗るビームの2つのビームが約 0.385nsec のインターバルで繰り返し通過するので、従来の加速器にはない ERL 独特のセクションである。加減速ビームの両者の同時の軌道測定、位相測定、電流差の測定など、従来とは異なるビーム計測技術の開発が色々と必要である。図 1 - 3 にモニター配置の概略を示す。このセクションでは加減速位相に乗る 2 つのビームの精密な独立な位相検出が必要である。これに関しては、高周波特性の良いガラス絶縁体による BPM[5]の開発が進んでいる。

Cavity section

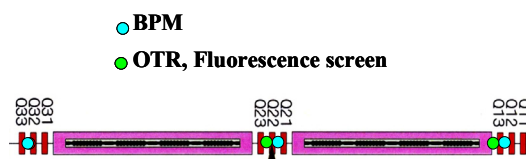


図 1 - 3 加速空洞部のモニター配置の概略

アーク部

アーク部は従来の電子蓄積リングと基本的には同じ構成であるので、従来から用いられてきた各種のモニターを配置することが出来る。図 1 - 4、5 にモニター配置の概略を示す。

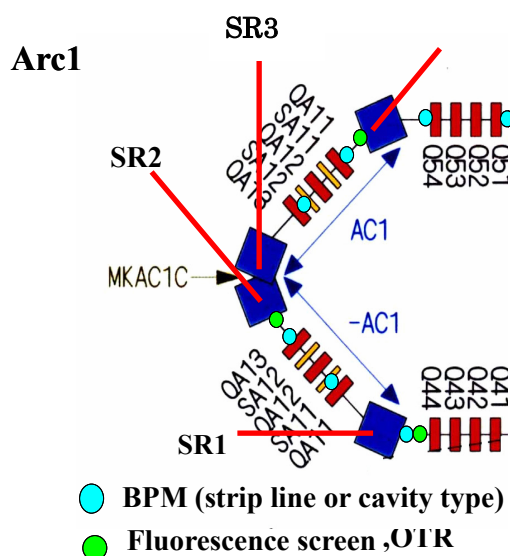


図 1 - 4 アーク部 1 のモニター配置の概略

アーク部を通るビームは、繰り返し 1.3GHz の加速後のビーム 1 種類であるので、通常の BPM システムがビーム位置検出に便利である。上で触れた開発が進んでいるガラスタイプ封止電極の BPM を用いればバン

チ毎の位置検出も可能になると思われる。
 アーク部においては、偏向電磁石からの放

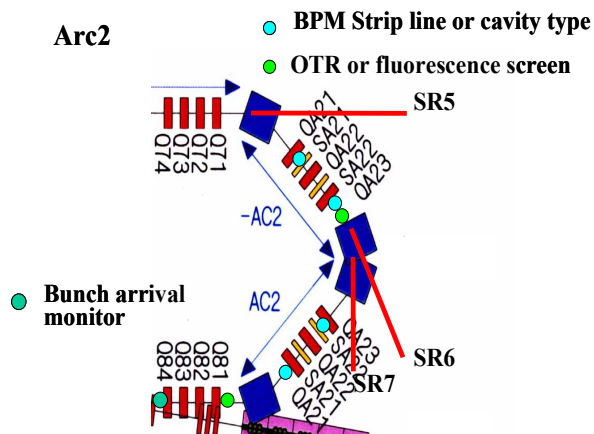


図 1 - 5 アーク部 2 のモニター配置の概略

射光が使えるので、可視放射光を用いた SR モニターのシステム[6]により、ビームプロファイル、ビームサイズ、ビームハロー、位相空間でのビーム位置検出、ストリークカメラ、強度干渉計による縦方向のビームプロファイルなどが観測できる。このうち、強度干渉計によるバンチ長測定については § 3 で紹介する。またビームハローの観測についても § 4 で紹介する。

挿入光源直線部

挿入光源直線部には挿入光源が設置される直線部であるので、他の場所よりも高精度にビーム位置を計測する必要がある。また、アンジュレーターにビームがくるタイミングも高精度に計測する必要がある。図 1 - 6 にモニター配置の概略を示す。通常のボタン電極型 BPM の分解能はシステムの特性インピーダンスにより制限されるので、その S/N 比は単位帯域幅あたり大まかに言って特性インピーダンスの平方根に比例する。そこで、S/N 比を良くして分解能

を上げるには実効的なインピーダンスを大きくできるものがピックアップとして有利である。このようなピックアップを実現するために、 TM_{110} キャビティーを用いた BPM[7] がリニアコライダーにおいて研究開発が進められている。既に非常に高い分解能が得られることが報告されており、ERL においても有望な位置モニターである。フェムト秒領域におけるシングルショットでのバンチ縦方向プロファイル測定では、ストリークカメラによる測定では定量性が良くないと共に時間分解能も不十分である。最近、光学技術と電気技術を組み合わせた Electro-optic sampling 方式によるシングルショットでの計測法[8]が精力的に研究されており、このタイプのモニターもこの直線部に設置する予定である。

Long straight section

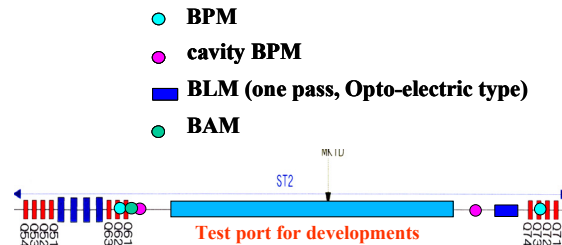


図 1 - 6 挿入光源直線部のモニター配置の概略

ダンブライン

ダンブラインにはビームを安全にダンブへと導くための BPM が必要であるが、ここは減速されたビームしか通らないことと、特に高速のビーム計測も必要ないであろうから、通常の BPM を配置すればよい。また、蛍光板のモニターも必要であろう。図

1 - 7にダンプラインのモニター配置の概略を示す

Dump section

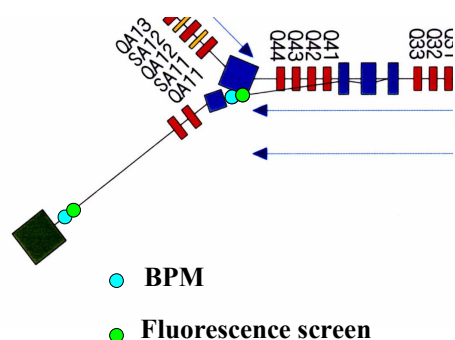


図 1 - 7 ダンプラインのモニター配置の概略

全体に共通のモニター

ビーム損失モニター

全体に共通のモニターとして重要なのが、ビーム損失モニターである。ERLは大強度線形加速器であるにもかかわらず、蓄積リング並みのビーム損失を要求されている。このために全セクションにおいて嚴重なビーム損失モニターを装備する必要がある。ビーム損失を高感度で検出できるモニターとして、PIN ダイオードによるフォトンカウンティング式のビーム損失モニターシステムが使用されており[9]、このシステムを用いれば感度的には十分であるが、フォトンカウンティング式であるので、多少大きめのビーム損失があると、すぐに飽和してしまう。もちろん定常的な運転ではこのようなビーム損失は論外であるが、コミッション時における調整運転では大きなビーム損失も起こりうるであろうから、フォトダイオードの出力をアナログ的に処理するようなシステム[9]も併設するのが良い。

差分型、および通常型の DC 電流モニター

ビームの DC 電流の観測[9]については、蓄積リングのような周回ビームを観測するのではないので、高精度 DCCT を数箇所に分散配置するのが便利である。現在の DCCT[9]の精度は 200mA のフルスケールレンジにて長期ドリフト 20-50 μ A、分解能はほぼ 20 μ A 程度であるので DC 電流の測定にはこれで十分である。ERL に特化したモニターとして、入射したビーム電流とダンプに捨てた電流の差を測るための差分型 DCCT がある。両電流の差を 2 台の DCCT を使って測定すると、上記の分解能であると 10^{-4} のレンジで電流の差が検出できると考えられるので、このままでもビーム回収率の測定には十分な精度があるように思われる。

以上 ERL におけるビーム計測について概要を述べたが、これらのモニターを一覧表にまとめたものを本稿の最後につけておいたので参考にされたい。

これより先のセクションでは光学的ビーム計測技術から、ERL に特化して開発された光学的計測器のトピックについて解説する。一般的な SR モニターに関してはいくつかの解説[10][11][12]があるので、そちらを参照していただきたい。本稿では ERL に特化した多少なじみのない特殊な光学的計測法について以下の順に紹介をする。小さな γ における OTR について § 2 に、強度干渉計による fs 領域でのバンチ長測定法について § 3 に、コロナグラフによるビームハローの測定について § 4 に、それぞれ紹介する。電気的なモニターに関しては飛山氏の解説が別にあるので、そちらをご覧いただきたい。

§ 2 Low- γ OTR

電子加速器のみならず陽子加速器でよく使うモニターとして遷移放射 (Optical transition radiation, OTR) を光源として用いた光学式のモニターがある。遷移放射は荷電粒子が金属箔などのターゲットを通過する際に真空と物質の境界面で放射される電磁波[1][2]で図 2 - 1 に示すようにターゲットに対して電子ビームが直入射する場合は、ビームの軸方向に放射が起こり、光の方向はビームが真空からターゲットに入射する場合はビームの進行方向と逆の方向に、ビームがターゲットから真空に出るときにはビームの進行方向にそれぞれ放射される。放射強度の最大方向はほぼ $1/\gamma$ である。

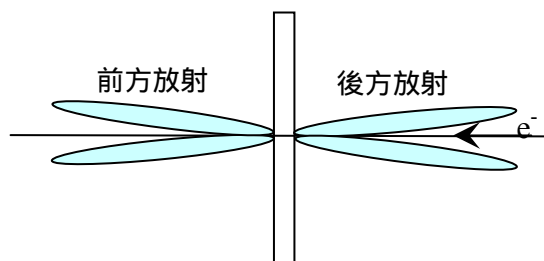


図 2 - 1 ビームがターゲットに直入射する場合の OTR。

比較的低い γ でも放射が起こるので陽子加速器でも、この OTR を使って比較的手軽にビームのプロファイルを光学的に観測することが出来る。電子加速器においては γ が大きくなると OTR を発生するための金属箔ターゲットによるビームロスが微々たる物になるので、線形加速器、ビーム輸送路などにおいて、ほぼ非破壊のモニターとして便利に使用されている。ERL においては蛍

光板によるビームプロファイルモニターと相補的に用いることが考えられており、特に入射部において電子銃から出たてのビームプロファイルを光学的に見る事が出来るので、有望なモニターの一つである。OTR を結像するための光学システムはそのまま蛍光板を見るための光学系になるので、この点も便利である。

§ 2 - 1 小さい γ で OTR

OTR のスペクトルは $\gamma\omega_p$ (ω_p はターゲット物質強度のプラズマ振動数) から低周波数側へ伸びているが、モニターとして使用するには可視光の部分を使うのが便利である。スペクトルの周波数 ω_1 、 ω_2 の間に電子 1 個から放射される OTR の光子数 N は、

$$N(\gamma) = \frac{2\alpha}{\pi} \left| \ln(2\gamma) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \right|$$

で与えられる[13]。ここで α は微細構造定数である。この式を用いて、ERL で計画されている 77pc のバンチによりアルミニウムターゲットから放射される OTR の波長領域 400nm 800nm の範囲について積分した OTR 強度の γ 依存性を γ が 2 から 100 までの範囲について計算した結果を図 2 - 1 に示す。

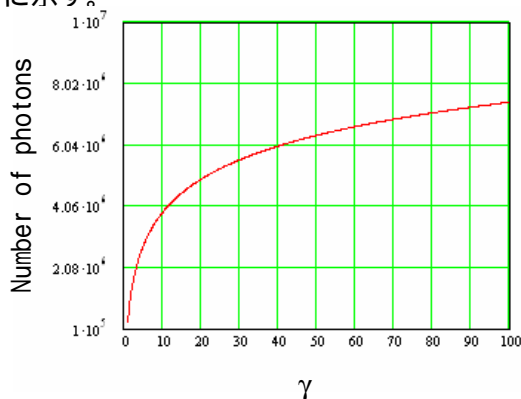


図 2 - 2 OTR の γ 依存性

この図からわかるように、 γ が2から100まで変化しても OTR の強度は8 倍ほどしか変化しない。逆に言えば電子銃の出たてにおいても OTR により光学的にビームプロファイルを観測することが可能である。OTR の強度については γ が2 でも観測可能であるが、ここで問題となるのはこのように小さい γ における OTR の放射の角度分布である。OTR の放射角は大まかには $1/\gamma$ 程度であり、 γ が100程度では10mrad 程度であるが、 γ が小さくなると放射角が大きくなる。OTR の放射の角度広がりとは、

$$I(\theta) = \frac{\left| \frac{-\sin(\theta)}{1 - \beta \cdot \cos(\theta)} \right|^2}{\gamma^2}$$

で与えられる[14]。図2 - 2 に γ が2と10と20の場合について OTR の放射角を計算したものを示す。 $\gamma = 2$ では OTR の放射角は $\pm 40^\circ$ にも達することがこの図から判る。

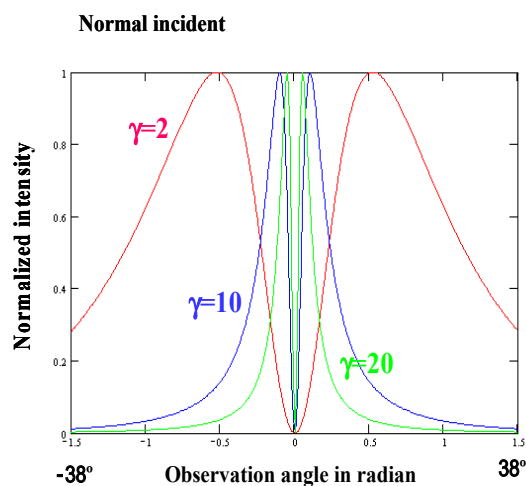


図2 - 2 OTR 放射広がり γ の依存性。

したがって、小さな γ の領域で OTR を用いてビームプロファイルなどを光学的に観測するにはこの広い放射角にどう対応するかがポイントとなる。

§ 2 - 2 OTR の真空外への取り出し

$\pm 40^\circ$ に及ぶ開口角を持つ光を真空ダクトから取り出すのはかなり厄介である。実用的には多少強度を犠牲にしても取り出す光の範囲を狭めざるを得ない。まず、OTR のターゲットの配置についてであるが、電子ビームがターゲットに直入射する配置を取らないと(たとえば 45° の配置を取ると)被写界深度が深くなり、後の光学系の設計が非常に困難になるばかりではなく、光路長差(OPD)によりパンチ長の測定にもエラーが入る可能性もあり、ターゲットは電子ビームに対して直入射の配置にするのが良い。直入射配置からの OTR は上にも述べたように、ビームの進行方向かその反対方向に出てくるので、真空ダクトの外に導くにはターゲットのすぐそばに図2 - 3 に示すように穴あきダイアゴナル(45° の鏡)を置いて OTR を反射する必要がある。

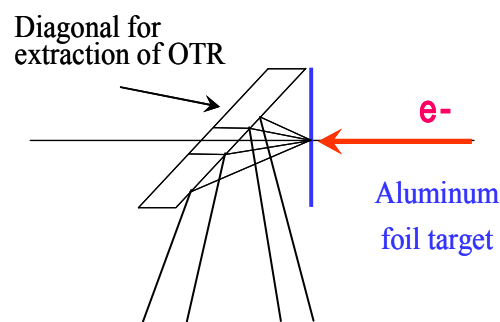


図2 - 3 直入射ターゲットとダイアゴナルによる OTR の取り出し。

このような OTR の取り出し配置では、OTR の中心部部は取り出せないが、OTR は中心部分近傍には放射されないので、好都合である。またひっくり返せば、OTR のターゲット

ットよりの前方放射と後方放射のどちらにも使えて便利である。

§ 2 - 4 大きい開口を持つ結像光学系

OTR の開口角の $\pm 15^\circ$ 取り出したとしても光学系の working distance を 300mm とするとレンズの開口は 300mm にもなってしまう。このような大口径の結像光学系を設計するのは不可能ではないが、現実問題としてはこのような大きな光学系を置くスペースは入射部にはないであろうから、もう少しコンパクトに設計する必要がある。ここでは光学系の入射瞳を 200mm 程度として話を進める。このような大口径の結像光学系についてはレンズ系で設計するのは不経済なので、反射光学系を基本として多少の補正レンズを加えるのが経済的である。特に強度が弱い場合にはスペクトル幅を制限して色収差を減じるわけにはいかないので、色収差がない反射系を採用するのが有利である。また、OTR は光軸上の近傍には放射されないので、前のセクションで述べたような取り出し方をすると、光軸上に副鏡を置く反射光学系を用いても穴あきダイアゴナルの穴径をスケールした穴径と同じ径の副鏡に設計すれば、強度の損失はない。真空外に OTR を取り出した直後に反射光学系による結像光学系を置くとして、単純な深い(曲率半径の短い)穴あき凹面鏡と凸面鏡からなるシステムを考える。光軸上だけの収差であれば、2 枚の凹面鏡は球面を用いたとしてもアプラナート(球面収差とコマ収差を取り除いたシステム)にすることは可能であるが、大きいほうの凹面鏡を非球面とした方が 2 枚の鏡を組み合わせた

ときの軸外の収差を小さくするのに有利ではある。電子銃の直後ではビームは比較的太く、視野として 20mm ぐらいいいので、軸外の収差をよく補正するには、凸面鏡の後段に補正用のレンズを挿入してカタディオプトリックにすると設計がもっと楽である。このような考え方に基づいてデザインした結像系の概略を図 2 - 4 に示す。

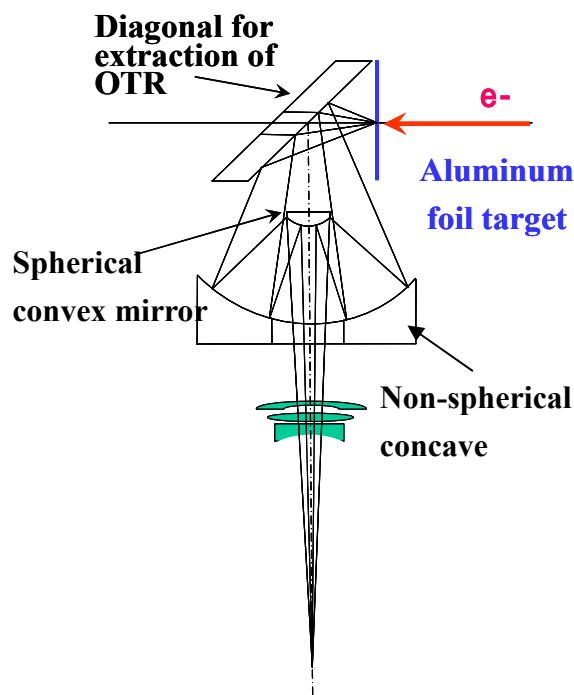


図 2 - 4 OTR 用大口径カタディオプトリック結像系の概略。

この図では単純な 3 枚組みの補正レンズを入れる設計である。このような大口径な結像系では回折限界のシャープな像を得ることは困難であるが、電子銃を出たての場所では空間分解能として 100 μm もあればよいので、実用的には問題はないであろう。このようなシステムでは、光線追跡による設計に出来るだけ実物を近づけるためにマウンティングの設計が非常に重要である。

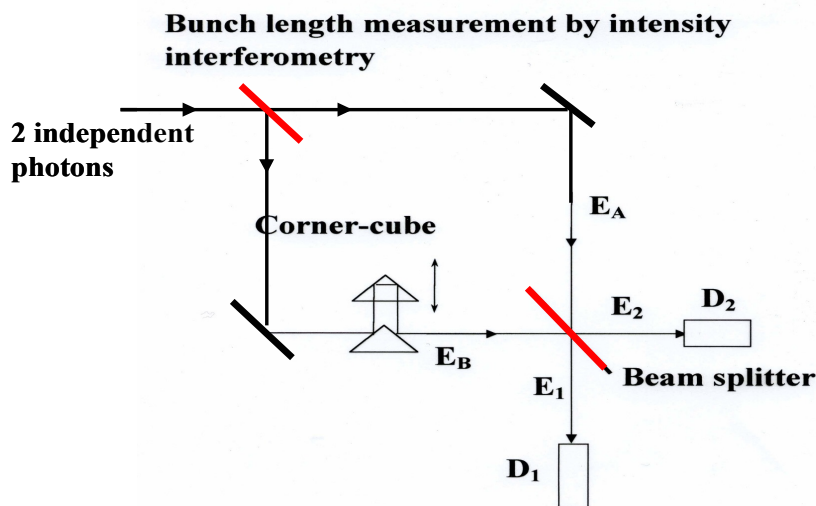
§ 3、強度干渉計によるバンチ長の測定

電子加速器においてバンチ長などの時間構造を調べるには、放射光、遷移放射 (Optical transition radiation, OTR)などを光源にしてストリークカメラを用いるのが比較的便利である。特にシングルショットで測定できる方法は他にはあまりないので、ストリークカメラによる測定法が広く使われている。ストリークカメラの時間分解能はストリークチューブ内の空間電荷効果などにより制限を受けるが、現在では最速のもので公称 200fs 分解能というのがある。しかしながらこの分解能のカメラは取り扱いが難しく、容易なことでは真価を發揮することは望めない。また 100fs 程度までバンチ圧縮することを目指す ERL では分解能が追いつかない。フェムト秒領域の光パルスの長さを計る方法として、レーザーパ

ルスの測定では非線形結晶により second harmonics (SH) を発生させて自己相関を取る相関計(correlatometer)が標準的な測定法として使われているが[15]、光の発生時に増幅機構のない通常の放射光、または OTR では光子多重度が低すぎるので(低いというよりは波束 1 つにつき励起されている光子は 1 個以上であることはまれである)SH 光の発生効率が実用的ではない。そこで、一次インコヒーレントな光の 2 次の干渉性を利用した強度干渉計[16]によりパルス長を測定するのが次なる方法であろう。

§ 3 - 1 強度干渉計

強度干渉計によって光パルスの長さを計るには、先ず半透明鏡によって光パルスを 2 つの光束に分けることから始める。図 3 - 1 に強度干渉計によって光パルスの長さを計るためのセットアップを示す。



Input fields for a beam splitter in intensity interferometry.

図 3 - 1 強度干渉計による光パルス長測定のセットアップ

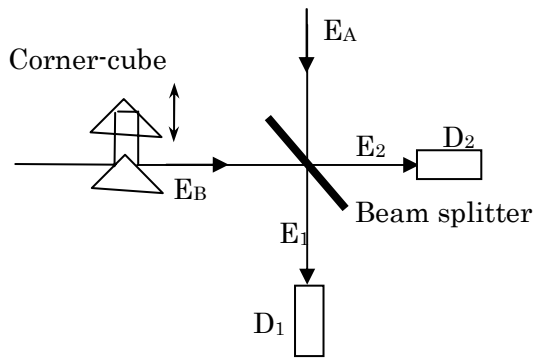


図3 - 2 マイケルソントイプ強度干渉計

図3 - 1 に示した全体のセットアップの中からマイケルソントイプの強度干渉計の部分だけを抜き出したものを図3 - 2 に示す。ここで detector D1 と detector D2 に入る光のフィールド E_1 、 E_2 は光子 A のフィールドを E_A 、光子 B のフィールドを E_B とすると次の式で与えられる。

$$E_1(t) = \sqrt{T} \cdot E_A(t) + i\sqrt{R} \cdot E_B(t + \delta\tau)$$

$$E_2(t) = \sqrt{T} \cdot E_B(t + \delta\tau) + i\sqrt{R} \cdot E_A(t)$$

この式で T は半透明鏡の透過率、R は反射率である。また、 $c\delta\tau/2$ は光路のスキャンをするためのコーナーキューブのストロークである。detector D1 と detector D2 の同時計数 $\text{Count}_{12}(\delta\tau)$ は E_1, E_2 を用いて

$$\text{Count}_{12}(\delta\tau) = K \int_{-\frac{T_m}{2}}^{\frac{T_m}{2}} dt \int_{-\frac{T_r}{2}}^{\frac{T_r}{2}} d\tau \langle E_1^*(t) E_2^*(t + \tau) \times E_2(t + \tau) E_1(t) \rangle$$

で与えられる。ここで K は規格化ファクター、 T_r は detector の rise time であり、 T_m は計測時間である。さて、入力光のフィールド E_A, E_B を次のように現す。

$$E_A(t) = C_A(t) A_A(t)$$

$$E_B(t) = C_B(t) A_B(t)$$

ここで、 $C(t)$ は σ_p のパルス幅(バンチ長)を持つパルスエンヴェロープを与え、 $A(t)$ は τ_c のコヒーレント長をもつ stationary random variable(平たく言うと波束)である(図3 - 3)。

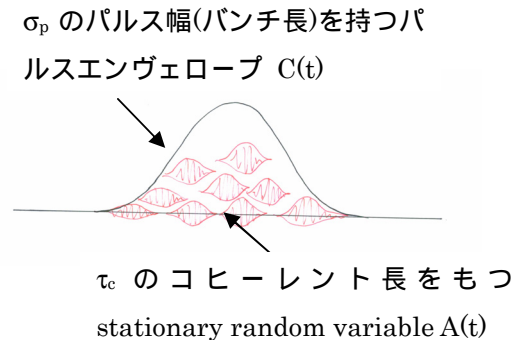


図3 - 3 σ_p のパルス幅(バンチ長)を持つパルスエンヴェロープ $C(t)$ と、 τ_c のコヒーレント長をもつ stationary random variable $A(t)$ からなるオプティカルパルス。

ここで簡単のために $C(t), A(t)$ の両方が Gauss 型であるとし、入力光子のフィールド E_A, E_B は一次時間コヒーレントであると仮定すると、detector D1, D2 の同時計測 Count_{12} は次のようになる。

$$\text{count}_{12}(\delta\tau) = K \sigma_p^2 \times \left[1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\delta\tau^2}{4\tau_c^2}\right) + \frac{\tau_c^*}{\sigma_p} \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\delta\tau^2}{4\sigma_p^2}\right) \right) \right]$$

$$\frac{1}{\tau_c^{*2}} = \frac{1}{\sigma_p^2} + \frac{1}{\tau_c^2}$$

右辺大カッコの中の第2項は波束の相関項で E_A, E_B が一次時間コヒーレントであることに由来する。第3項はパルスエンベロー

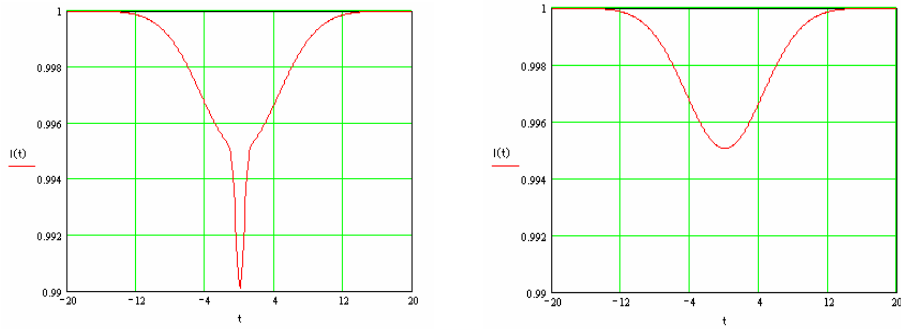


図3 - 4 ガウス型の $C(t), A(t)$ による同時計数波形。 $\sigma_p \geq \sigma_\tau$ であるので、波束の相関波形は左側の図のように中心にディップとして出る。右側の図は E_A, E_B が一次時間インコヒーレントな場合。

プの相関項を含む項である。 E_A, E_B が一次時間インコヒーレントな場合には波束の相関項が消えて、同時計数は

$$\text{Count}_{12}(\delta\tau) = K\sigma_p^2 \left[1 + \frac{\tau^*}{\sigma_p} \left[1 - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\delta\tau^2}{4\sigma_p^2}\right) \right] \right],$$

で与えられる。

E_A, E_B が一次時間インコヒーレントであっても同時計数はコーナーキューブによる時間スキャン $\delta\tau$ がゼロになるところを中心としたパルスエンヴェロープの自己相関の形に減少する。したがって、入力光が一次インコヒーレントな場合でも強度干渉計による同時計数から光パルスの自己相関を得ることができる。同時計数の波形をシミュレーション

した図を図3 - 4 に示す。

§ 3 - 2 入力光学系と実用的な強度干渉計のデザイン

上記の理論は一次時間コヒーレンスがなくてもパルスエンヴェロープの自己相関が測定できるという話であるが、入力光子は空間的にはコヒーレントであることが暗黙に仮定されているので、実際に強度干渉計でパルス長を測定するには図3 - 1のセットアップの前に一次空間コヒーレンス度を高くするために、ピンホールによる空間フィルタを置く必要がある。また、パルスエンヴェロープの相関項の前に $\tau^*/\sigma_p \approx \tau_c/\sigma_p$

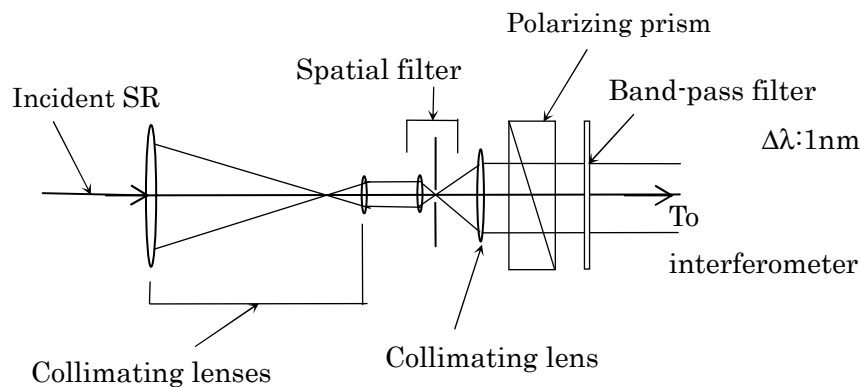


図3 - 5 強度干渉計のための入力光学系

($\sigma_p \gg \tau_c$)なる項が掛かっているため、パルス長に対して波束の長さが極端に短くならないように、狭帯域のバンドパスフィルターなどを用いて単色化する必要がある。このための入力光学系のセットアップを図3-5に示す。図3-1の光学配置にある2つのビームスプリッターは実際のセットアップでは1個のビームスプリッターに光路を複数通すことで済ませることが出来る。実用的な強度干渉計のセットアップを図3-6に示す。

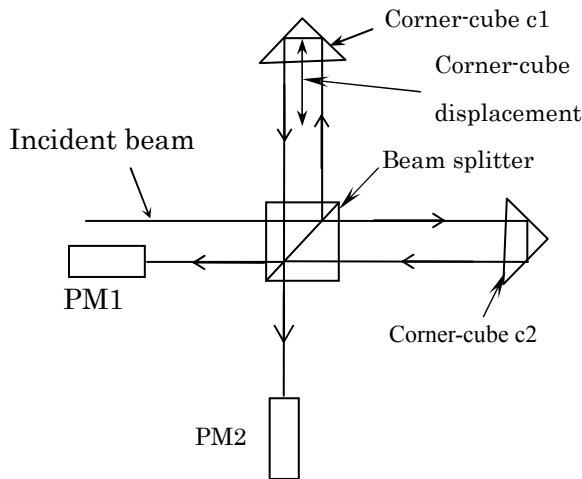


図3-6 実用的な強度干渉計によるバンチ長測定のセットアップ。

§3-3 PFにおける強度干渉計を用いたバンチ長測定

このシステムを用いてPFでバンチ長を実際に測定した結果[17]を図3-7に示す。この図では平均強度を1に規格化してプロットしてある。図中に実線で示したのは上述の同時計数の式を最小二乗法でフィットしたものである。これよりバンチ長として $16.8 \pm 0.6\text{mm}$ の結果を得た。このとき同時

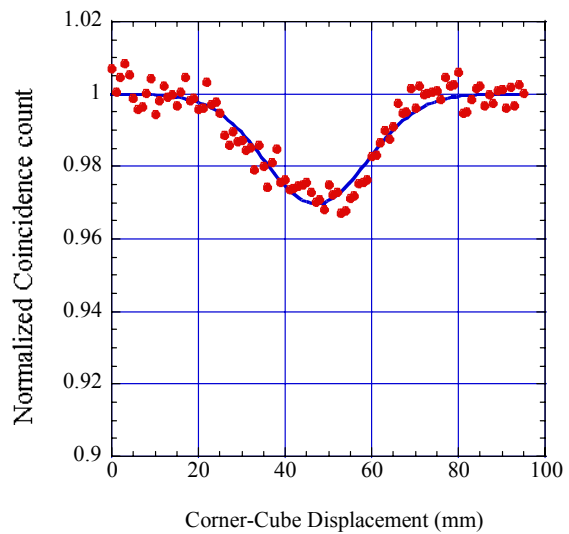


図3-7 強度干渉計によりPFでパルス相関波形を観測した結果。

にストリークカメラを用いた測定では16.5mmの結果を得ているので、両者の結果はよく一致している。

§3-4 強度干渉計の時間分解能

強度干渉計による短パルスの測定限界は、波束の長さで決まる。この方法では波束の長さを超えて短い長さを測ることはできない。しかしながら光パルスは図3-3にもイラストレーションで示したようにパルスエンヴェローブは、常に必ず波束の長さよりも長い極限的には同じか(フーリエリミットパルス)であるから、この方法によれば、いつもパルスエンヴェローブの長さよりも高いか同じ分解での測定が出来ることになる。ごく短いパルス長を計る場合は、実用的には光学部品のガラスによる分散の効果により波束がチャープされて、元のパルスよりも長さが伸びてしまう可能性があることに注意する必要がある。

§ 4、コロナグラフによる ビームハローの観測

ERL における大きな問題点の一つとして、ビームロスをいかにして蓄積リング並みのレベルに抑えるかということがある。通常の電子蓄積リングでは電子ビームのプロファイルは大まかには Gauss 的であり、残留ガスによる non-Gaussian tail を考慮に入れたとしても、ビームの周囲に広がるハローは通常十分に弱い。しかしながら線形加速器である ERL においてはこういうわけには行かず、いかにしてビームハローをコントロールしてビームロスを蓄積リング並みに小さく出来るかが実用化における成否の鍵の一つである。このために ERL ではビームハローの分布を高精度で測定することが強く求められている。現在までの検討結果ではビーム分布の中心強度に対して 10^{-7} の強度をもつビームハローを測定することが求められており、これを実現するた

めに検討が続けられてきた。現在、提案されているのは、主にワイヤースキャナーによる電気的な測定法によるものであるが、 γ 線を測定する方法、二次電子放出を測定する方法も共に、 10^{-5} のダイナミックレンジを達成するのがやっとといった程度である。これに対し、KEK では PF でコロナグラフによる光学的測定法を用いてビームハローを測定する手段が開発され、 2×10^{-6} の微弱なビームハローを観測することに成功している。本節ではコロナグラフの原理を解説し、PF における測定結果についても紹介する。

§ 4-1、通常の望遠鏡でビームハローを観測できるか？

通常のケプラー式の望遠鏡により対物レンズの焦点面に不透明な遮蔽板を挿入して、中心ビームの周りに広がるビームハローを観測できるかどうか検討してみる。図4-1にケプラー式望遠鏡の光学系のセットアップを示す。

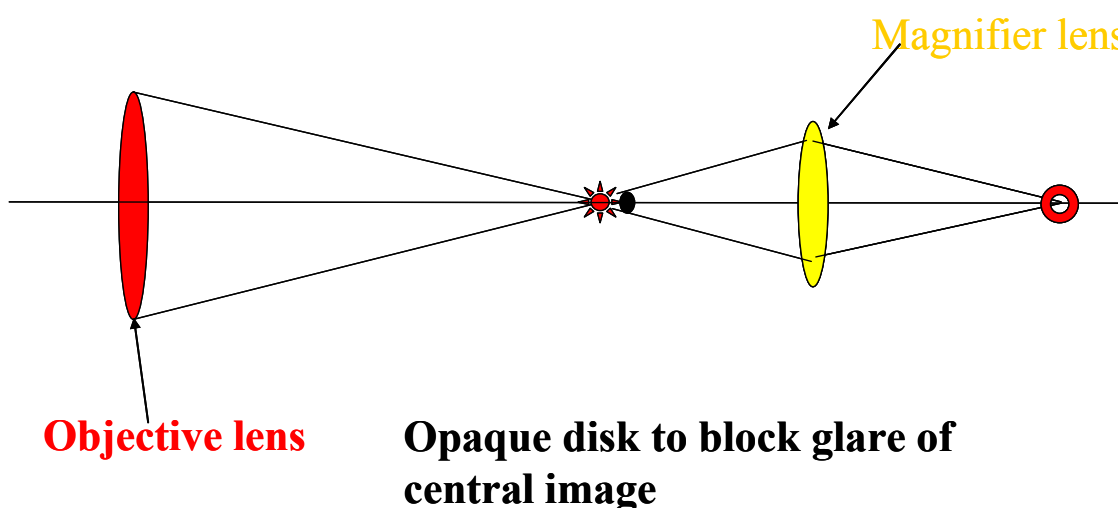


図 4 - 1 通常のケプラー式の望遠鏡の焦点面に Opaque disk(不透明な遮蔽板)を挿入して中心ビームを隠すシステム。

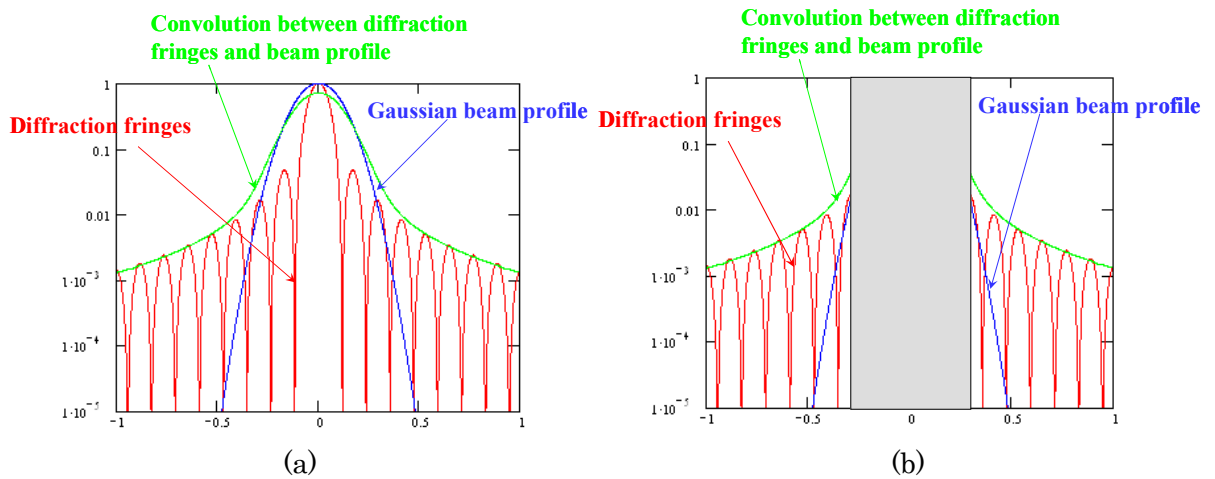


図4 - 2 (a) ケプラー式の望遠鏡における対物レンズの回折光 (b)ビーム中心の輝きを遮蔽しても微弱なハローは回折光に埋もれて観測できない。

このような望遠鏡でビーム中心の輝きを遮蔽しても中心像の周りには図4 - 2 (a)に示すように対物レンズによる 10^{-2} 程度の強度を持つ回折光が存在しているので、ビーム中心の輝きを隠したとしても、図4 - 2 (b)に示すように、回折光よりも弱いビームハローは埋もれてしまうので観測することはできない。

§ 4 - 2 Lyot のコロナグラフ

そこでフランスの B.F. Lyot は太陽の光球強度に対して 10^{-6} 程度の微弱な太陽コロナを日食を待たずして観測するために再回折光学系を組み込んで対物レンズによる回折光を取り除く特殊な望遠鏡を発明した[18]。図4 - 3に Lyot により発明されたコロナグラフの光学系の配置を示す。

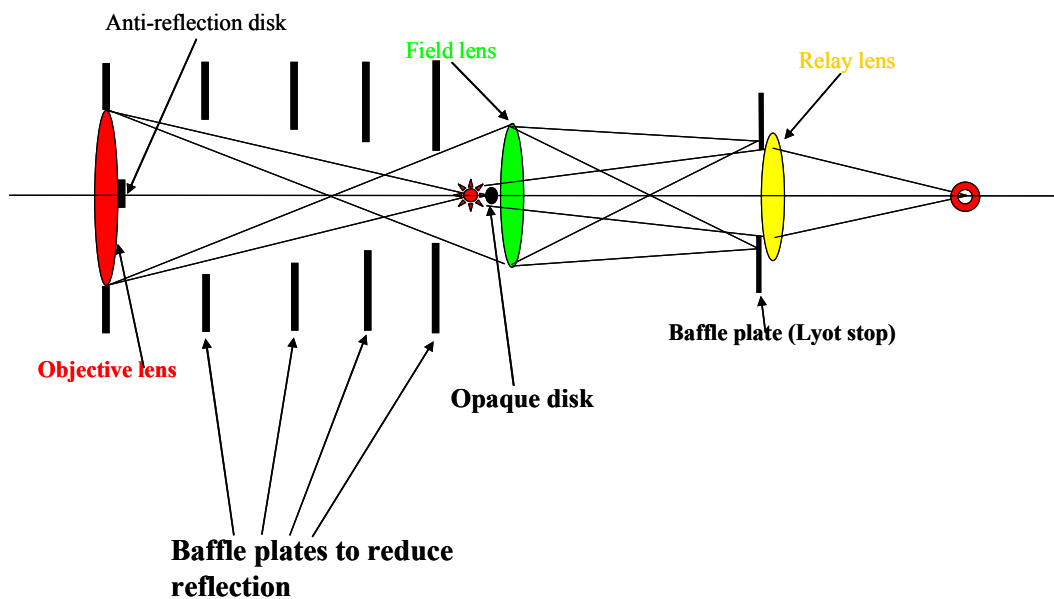


図4 - 3 Lyot により発明されたコロナグラフの光学系の配置。対物レンズの焦点面に形成される回折光はフィールドレンズによりもう一度回折されて Lyot stop で取り除かれる。

Lyotのコロナグラフでは対物レンズでオブジェクト(我々の場合はビーム)の像を作って、不透明な遮蔽板で隠すところまでは通常のケプラー式の望遠鏡と同じであるが、コロナグラフでは図4-3に示すように、遮蔽板の直後にフィールドレンズを置くところが味噌である。この部分について通常のケプラー式の望遠鏡と多少異なる点は、望遠鏡の鏡筒内の散乱を少なくするためにバツフルプレート(絞り板)が多数挿入されている点である。フィールドレンズの幾何光学的な役割は、後方(Lyot stopの場所に)に対物レンズの実像を作ることであるが、波動光学的にはフィールドレンズに入射する光が、その入射瞳により回折を受けることが重要である。全体の構成としては、対物レンズの入射瞳に入射した光が回折を受けその後、フィールドレンズの入射瞳に入射するわけであるが、このフィールドレンズの入射瞳により再び光が回折されるので、フィールドレンズの部分を波動光学的に再回折光学系と呼んでいる。このように2回の回折を受けた光がフィールドレンズの焦点面にどのような強度分布を作るかを考えるには、対物レンズによる回折光を入射光とするフィールドレンズの入射瞳による回折を考える必要がある。フィールドレンズの中心には遮蔽板による影の部分があるので、フィールドレンズの入射瞳は図4-5に示すようなドーナツ状の瞳となる。そこで、このフィールドレンズの入射瞳に入射される光のdisturbanceを $F(\xi)$ とすると、フィールドレンズの焦点面の強度分布 u は

$$u(x) = \frac{1}{i \cdot \lambda \cdot f} \int_{\xi_1}^{\xi_2} F(\xi) \exp\left\{-\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot x \cdot \xi}{\lambda \cdot f}\right\} d\xi$$

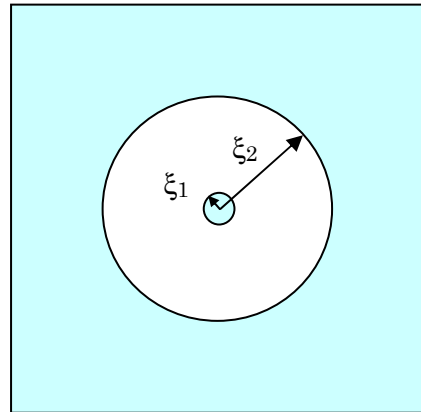


図4-5 フィールドレンズの入射瞳

で与えられる。 $F(r)$ に対物レンズの回折光のDisturbanceを代入してフィールドレンズの焦点面の強度分布をシミュレーションした一例を図4-6に示す。

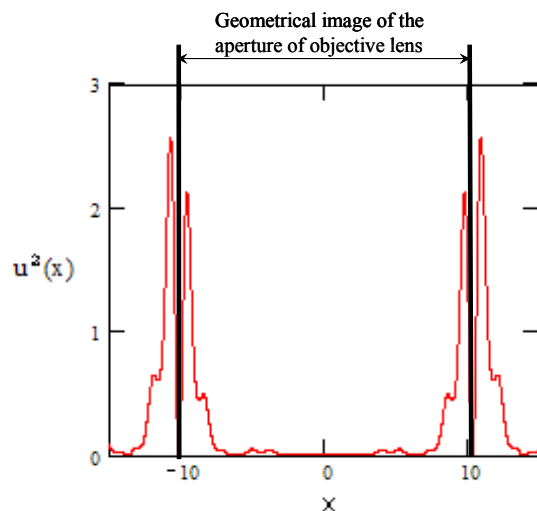


図4-6 フィールドレンズの焦点面に出来る対物レンズの再回折像。

図4-6から判るようにフィールドレンズにより再回折を受けた光はフィールドレンズにより形成された対物レンズの実像、すなわち対物レンズの外周の幾何光学像の回りにフリンジを形成する。このようなフリンジが出ることは対物レンズの回折像の中

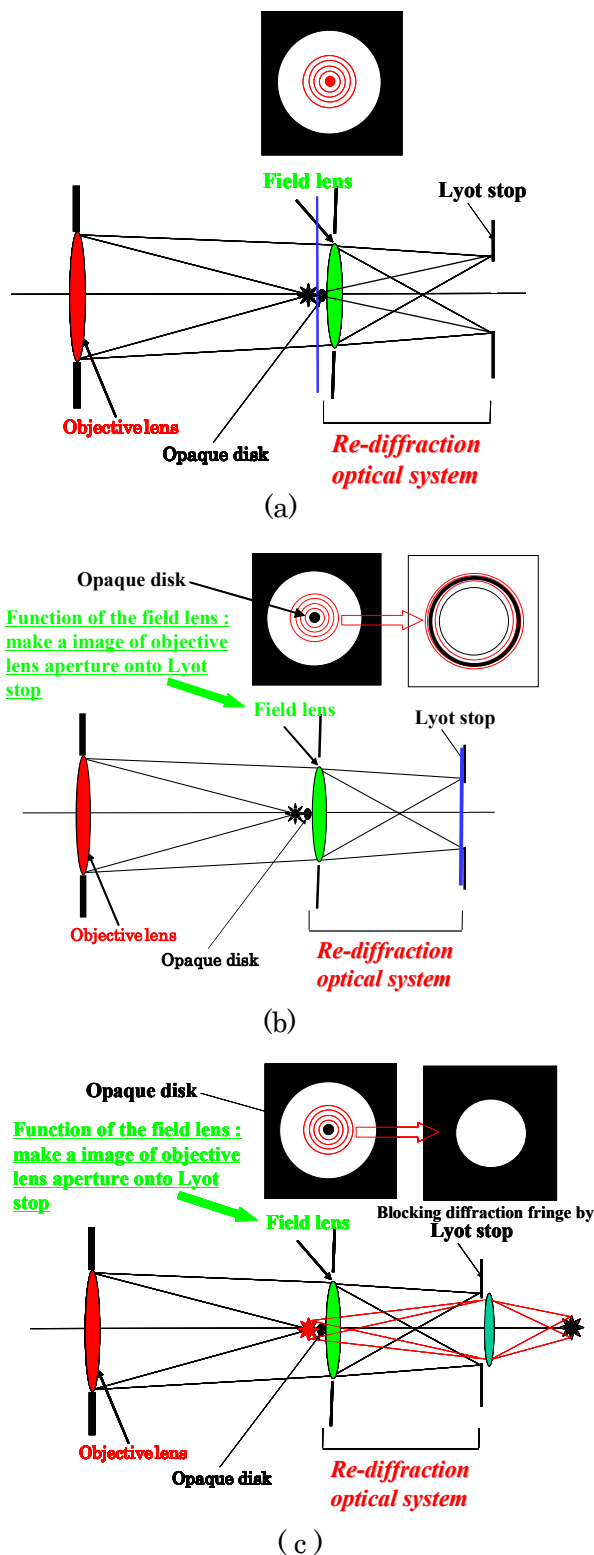
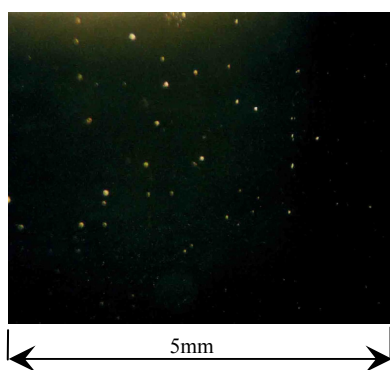


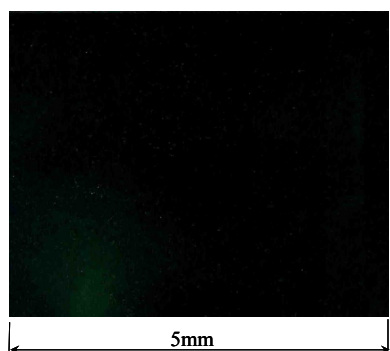
図 4 - 7 再回折光学系の役割

心部(0 次の回折像)を遮蔽板でさえぎったときの特有の現象である。このような回折像の一部を故意にさえぎって空間周波数のスペクトルを変える入射光の位相の変化を明暗として検出することが出来るの(この場合対物レンズの外周)で、このような方法を一般的にシュリーレン法と呼び、対物レンズの実像の外周の輝いたフリンジをシュリーレン像とよぶ。このシュリーレン法はレンズなどの焦点面をナイフエッジで遮って、レンズ、凹面鏡などの球面からの位相のエラー(たとえば非球面度の測定)の測定法として広く用いられている。コロナグラフの中ではでは図 4 - 7 に示すように、このシュリーレン法を巧みに利用して、対物レンズの焦点面に出来る回折像(a)の中心部(0 次)の部分をも不透明な遮蔽板(Opaq)によりさえぎってフィールドレンズに入射し、対物レンズのシュリーレン像を作る(b)。このシュリーレン像を絞り板により遮ることにより対物レンズによる回折光を取り除く(b),(c)。その後、リレーレンズをおいて対物レンズによる実像を最終段に転送すると(c)コロナグラフの出来上がりであり、対物レンズの回折フリンジに覆い隠されたハローがあたかも日食のときのコロナのように観測できるわけである。対物レンズのシュリーレン像を取り除くための絞り板は Lyot の名前を冠して Lyot stop と呼ばれている。このようなコロナグラフでどこまで暗い周辺のハローが観測できるかは、原理的には対物レンズのシュリーレン像をどこまで遮るかによるが、 10^{-7} の感度をえることは可能である。原理的にはこのような高い感度を得ることが出来るが、実用的には対物レンズの研磨過程で出来るキズ、砂穴

などによる散乱光が同様のシュリーレン像として視野に入ってくるので、これを取り除くことは出来ない。そこで、いかに散乱の少ない対物レンズを作れるかがコロナグラフの出来、不出来を大きく左右することになる[19]。とはいえ、このための特殊な研磨法が特にあるわけでもないで、ひたすら良く研磨して、キズ、砂穴を極力少なくすることが大切である。図4-8(a)にありふれた光学研磨S&D(スクラッチとディグ)60/40のガラス表面を暗視野照明法により撮影したものを示す。表面に多数残っている砂穴により照明した光が散乱されている様子が見て取れる。同様の方法でコロナグラフ用に研磨した対物レンズの表面を検査した結果を(b)に示す。



(a)



(b)

図4-8 通常のS&D60/40の研磨面(a)とコロナグラフ用の研磨面(b)。

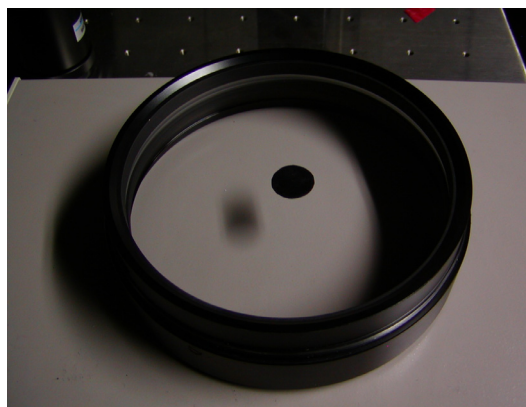


図4-10 対物レンズ

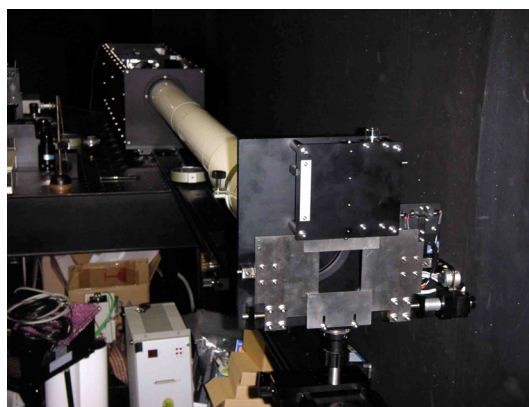


図4-11 コロナグラフの外観

図4-10に対物レンズの写真を図4-11にコロナグラフの外観をそれぞれ示す。対物レンズは平凸の単レンズで焦点距離は2000mmである。対物レンズの中心部の黒い丸は、遮蔽板からの反射光のレンズ裏面による反射を防ぐための反射防止板が貼ってあるものである。最終段でハローを観測するには高速ゲートIIカメラを用いている。高速ゲートにより、連続から3nsecまでの高速シャッターを切ることができる。

§4-3 PFにおけるビームハローの観測

このコロナグラフによってPFリングで観測したビームハローを図4-12に示す[19][20]。光源点はPFのBL27の偏向電磁

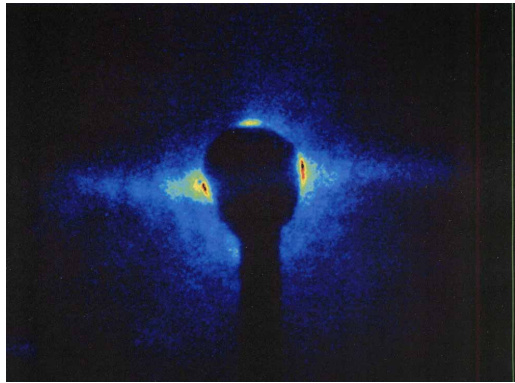


図4 - 12 コロナグラフによって PF で観測したビームハローの画像

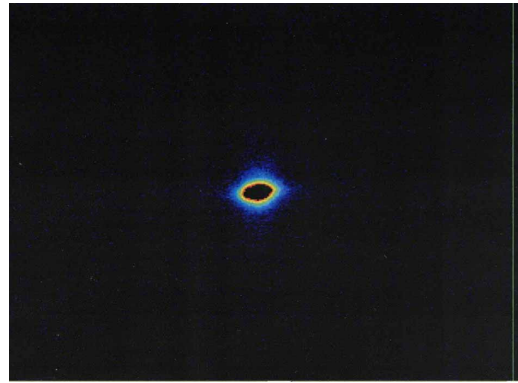
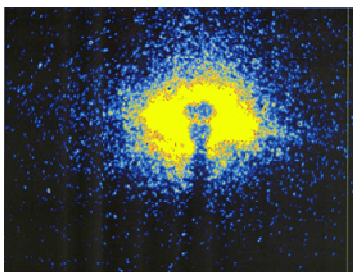


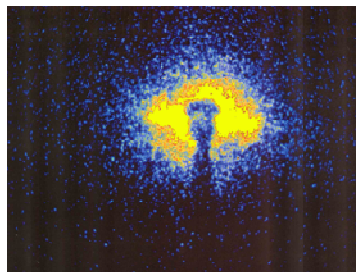
図4 - 13 遮蔽板を除いてビーム中心の像を観測したもの。

石である。中心に遮蔽板が黒い円盤として写っており（下方に延びる棒状の影はサポート）その周辺に水平方向に広がるビームハローが観測されている。また図4 - 13に遮蔽板を除いて中心のビームの像を撮影したものを示す。これは通常の望遠鏡で観測されるビームプロファイルと同じものであ

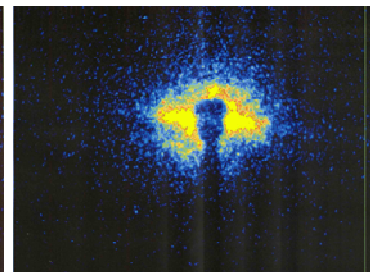
る。図4 - 12と13において横方向の倍率は同じにとつてあるが、強度方向のスケールは4 - 12 図の方が4 - 13 図よりも 10^4 倍拡大してある。言い換えればビームハローの画像の強度はビーム中心のピーク強度に対して1万分の1程度である。図4 - 13にPFのシングルバンチ運転時に観測し



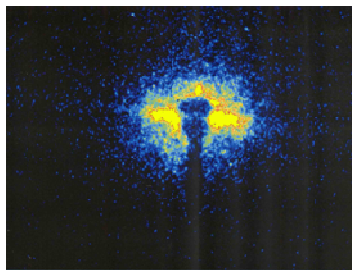
65.8mA



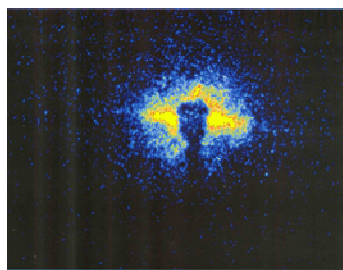
61.4mA



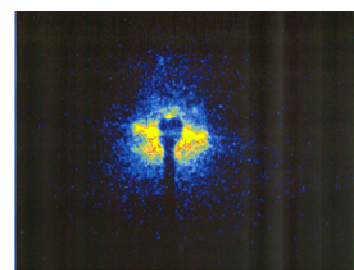
54.3mA



45.5mA



35.5mA



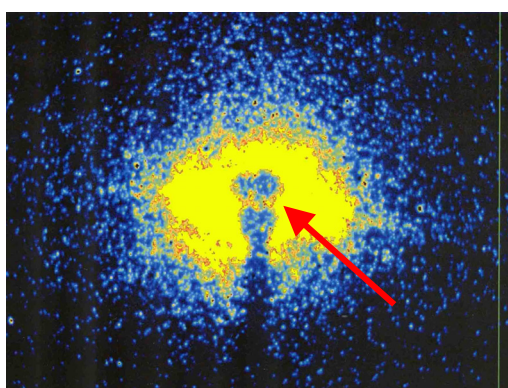
396.8mA
Multi-bunch
bunch current 1.42mA

図4 - 13 ビームハローのリング電流依存性

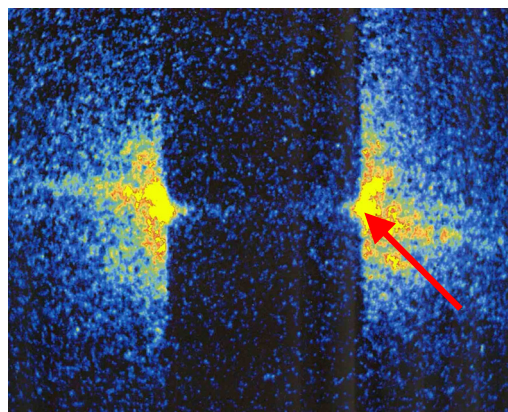
たビームハローの電流依存性の結果を示す。この図を見ると、ビームハローはリング電流の増大と共に強くなるのみならず、二次元的な分布も変化しているのがわかる。

§ 4 - 4 コロナグラフでどこまで弱いビームハローが観測できるか。

コロナグラフによりどこまで弱いビームハローが観測可能かを調べるために図 4 -



(a) 68.5 mA 矢印の先の場所での強度はビーム中心強度に対して 2×10^{-4} である。露出時間は 3msec。



(b) ビーム近傍の強いハローをさらに隠したもの。露出時間は 100msec。矢印の先の強度はビーム中心に対して 2×10^{-6} である。また、バックグラウンドのレベルは 6×10^{-7} であった。

図 4 - 14 外延部に広がるハローの観測

13の 65.8mA の場合に、中心ビームの遮蔽板をさらに大きくして、ビームの中心近傍の強いハローを隠し、II カメラの露出時間を増やして、さらに外側に広がる微弱なハローの観測を試みた。結果を図 4 - 14 に示す。ビーム外延部に広がる中心強度に対して 2×10^{-6} 程度の微弱なハローが観測されており、このときのバックグラウンドレベルは 6×10^{-7} であった。このバックグラウンドレベルは使用した BL27 に可視光の放射光を取り出すために挿入されているベリリウム製のミラーからの散乱光が主で、コロナグラフそのもののバックグラウンドはもう少し低いようである。これらの結果より、コロナグラフを用いてビーム分布の中心強度に対して 10^{-7} の強度をもつビームハローを測定するという要求には答えられそうである。

§ 4 - 5 最近のコロナグラフにおける新たな展開

Lyot の天才的な発明になる古典的なコロナグラフは発明以来太陽コロナの研究に大活躍しているが、最近太陽系外惑星の研究で、新たな展開が巻き起こっている。クラシックコロナグラフの概念を拡張して、恒星の回りに存在しているかもしれない惑星系を探查しようというのがその動きである。自ら発光しない惑星系の検出には恒星の強度に対して 10^{-10} のコントラストの達成が必要といわれており、これに向けて新たなアイデアからなるコロナグラフの開発が進んでいる。Null-interferometric coronagraph といわれているシステムがそれで、日本ではナル干渉型コロナグラフと呼んでいる。いくつかのスタイルのものが

研究されているが、基本的にはほぼ完全な空間コヒーレントな恒星の光を2分割して干渉させて消してしまおうというものである[21]。恒星の周りに広がって存在するであろう惑星系は空間コヒーレントな光源ではないから、消えないで残るという寸法である。ERLで可視光の波長領域で、ほぼ完全な空間コヒーレントな光源が実現されれば、このような新しい原理のコロナグラフも役に立つようになるかもしれない。

終わりに

ERLにおけるビーム計測ということで、概要と光学的計測法からトピックスを三つ紹介した。KEKではコンパクトERLを現在、開発研究中有るので、ビーム計測の概要についてのまとめを心がけたが、いかんせん開発研究中のものであるので、中途半端なものになってしまったことを最後にお詫びしたい。電気的なモニターに関しては概要の最後のところで触れたように、飛山真氏の稿が別に本教科書の中に書かれているので、そちらをご覧ください。光学的モニターに関してはERLに特化したものということで、OTR以外の2つのトピックスに関しては加速器の分野から見ると全然なじみのないものであろう。著者がビーム計測を始めた頃は光学的なモニターといえば、精々加速器のなかを、望遠鏡で覗いてみる程度のモニターしかなかったが、現在ではこの項で紹介したように、光学分野でも比較的珍しい測定器までもが加速器のビーム計測に持ち込まれている。強度干渉計やコロナグラフなどというものは光学の教科書をひっくり返してもほとんど載っていないような機器である。光学の応用と

という意味ではレーザーも加速器技術になくしてはならないものとなりつつある。最近では光学的手法と電気的手法を組み合わせたOpto-electric samplingの手法も応用されている。ERLをはじめとする先端的加速器の開発のなかで光学技術の果たす役割はますます増えつつあり、今後の発展が大いに楽しみである。10年後にOHOの加速器セミナーが続いているとすると(そのように祈っているが)、そのときビーム計測について書く人はどんな内容を書くのであろうか？

参考文献

- [1] I. Frank and V. Ginzburg, J. Phys. USSR 9, 353 (1945).
- [2] L.C.L. Yuan, C. L. Wang, and H. Uto, Phys. Rev. Lett. 25, 1513, (1970).
- [3] M.C. Ross et al., Proc. 18th Int. Linac Conf. (1996).
- [4] T. Shintake, NIM, A311, 453 (1992).
- [5] M. Tobiyama, et al. Proc. BIW08 (2008).
- [6] T. Mitsuhashi, Proceedings of BIW04 (2004).
- [7] T. Shintake, Proc. HEAC98, 133 (1998).
- [8] I. Wilke, et al., Phys. Rev. Lett., 88, 124801 (2002).
- [9] 平松成範、「加速器のビームモニター」 KEK internal 2004-4 (2004).
- [10] Mitsuhashi, "Beam profile and size measurement by SR interferometer" in "Beam measurement" ed. by S-i. Kurokawa et al., World Scientific, p.399-427 (1999).

- [11] 三橋利行、「放射光の空間干渉性とその微小ビームサイズ測定への応用」高エネルギーニュース、Vol.18, No.6, p.167 (2000).
- [12] 池田ひとみ Oho'04 加速器セミナー教科書
- [13] J. Bossler, J. Mann, G. Ferioli, and L. Wartski, NIM, A238, p45 (1985).
- [14] L. Wartski, S. Roland, J. Lasalle, M. Bolore, and G. Filippi, J. Appl. Phys. Vol46, No.8, p3644 (1975).
- [15] C. Rulliere (Ed.), "Femtosecond Laser Pulses", p185, (1998), Springer.
- [16]] Y. Miyamoto, T. Kuga, M. Baba, and M. Matsuoka, Opt. Lett., 18,900 (1993).
- [17] T. Mitsuhashi and M. Tadano, Proc. EPAC02, p.1936 (2002).
- [18] B.F.Lyot Month. Notice Roy. Ast. Soc, p580, 99 (1939).
- [19] T. Mitsuhashi, Proc. EPAC04, p.2655 (2004).
- [20] T. Mitsuhashi, Proc. DIPAC05, p.7 (2005).
- [21] 次期赤外線天文衛星ワーキンググループ、SPICA ミッション提案書第2版 5章3節「ステラコロナグラフ観測装置」(2007).

補遺 ERLにおけるモニターの一覧

Injector	Location	Monitor type	resolution	
	After Gun	Low- γ OTR	50 μ m	profile
	After buncher	Fluorescence Screen	50 μ m	profile
		BPM strip line	100 μ m	position
	After cavity	OTR	20 μ m	profile
		Fluorescence Screen	50 μ m	profile
		Slit scanner	Width 20 μ m	profile
		Wire scanner	Diameter 20 μ m	profile
		Laser wire	Diameter 20-100 μ m	profile
		BPM glass insulator	100 μ m/5 μ m	position

Merger	Location	Monitor type	resolution	
		OTR or Fluorescence screen	20 μ m	profile
		BPM	100 μ m./5 μ m	position

Diagnostics Beam line		Monitor type	resolution	
		Fluorescence screen	20 μ m	profile
		BPM glass insulator		Bunch by bunch position
		BPM cavity type	0.1 μ m	Precise position
		Slit scanner, pepper pod		Profile, emittance
		Laser wire		profile

straight 1	Location	Monitor type	resolution	
Cryomodule	Both end of cavity	BPM glass insulator	100 μ m	Bunch by bunch position
	Q-magnet	BPM strip line	3 μ m	position
	Entrance of section	Bunch arrival monitor	100fs	timing
	End of section	Bunch arrival monitor	100fs	timing

Arc1	location	Monitor type	resolution	
	Q-magnet	BPM strip line or glass insulator	20 μ m 0.3 μ m	Position Low- β section
		OTR/Fluorescence screen	20 μ m	profile
	Bending magnet	SR monitor SR interferometry	0.6 μ m	Beam size
		Streak camera	3ps/600fs/200fs	Longitudinal profile
		Intensity interferometry	10fs	Bunch length
		Coronagraph	100 μ m	Beam Halo
		BPMSR	50 μ m/10 μ rad	Phase space position

Arc2	location	Monitor type	resolution	
	Q-magnet	BPM strip line cavity	3 μ m 0.3 μ m	Position Low- β section
		OTR/Fluorescence screen	20 μ m	profile
	Bending magnet	SR monitor SR interferometry	0.6 μ m	Beam size
		Streak camera	3ps/600fs/200fs	Longitudinal profile
		Intensity interferometry	10fs	Bunch length
		Coronagraph	100 μ m	Halo
		BPMSR	50 μ m/10 μ rad	Phase space position
	End of arc2	Bunch arrival monitor	100fs	timing

Straight2	location	Monitor type	resolution	
Undulator		OTR/Fluorescence screen	100 μ m	profile
		BPM glass insulator	100 μ m	Bunch by bunch position
	Both end of undulator	BPM cavity type	0.1 μ m	position
	Entrance of section	Bunch arrival monitor	100fs	timing
		Opto-electric bunch length monitor	20fs	Single pass bunch length

Dump line	location	Monitor type	resolution	
	Q-magnet	BPM strip line	100 μ m	position
		Fluorescence screen	100 μ m	Profile, position

Miscellaneous	location	Monitor type	resolution	
	Injector and dump line	Differential DCCT	<20 μ A	Current difference
	Straight section	DCCT	20 μ A	DC current
	Straight section	Wall current monitor	0.1mA Rise time 200ps	Bunch by bunch current