

名古屋大学

シンクロトロン光研究センター

田淵雅夫

放射光利用の基礎と実際

概要

- × 放射光施設「あいちSR」見学
- × 放射光とは？
- × 放射光の用途・事例
- × 放射光を使った測定 1 : XAFS測定
- × 放射光を使った測定 2 : CTR散乱測定

放射光って何？

放射光 : Synchrotron Radiation

→ 「光」である。

「光」の特徴を指した言葉ではない。

波長、偏光、干渉性、指向性... etc

「光」の発生方法で分類した言葉。

荷電粒子の運動方向が変わるときに発生する光。

英語では「Synchrotron」？

Synchrotron って何？

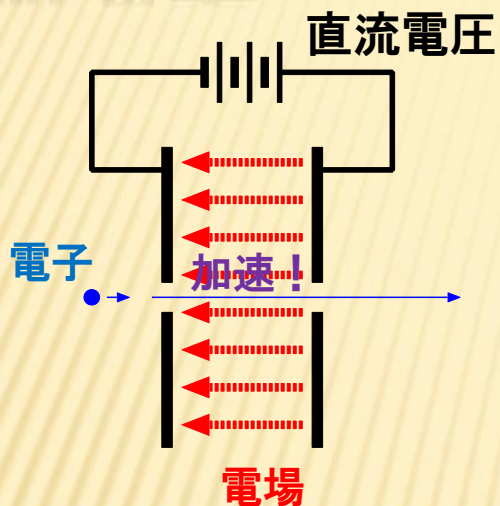
- × Synchrotron

➡ 加速器／粒子加速器の一種

- × 加速器？

電荷を持った粒子を静電気力(電場)で
加速し大きなエネルギーを与える装置

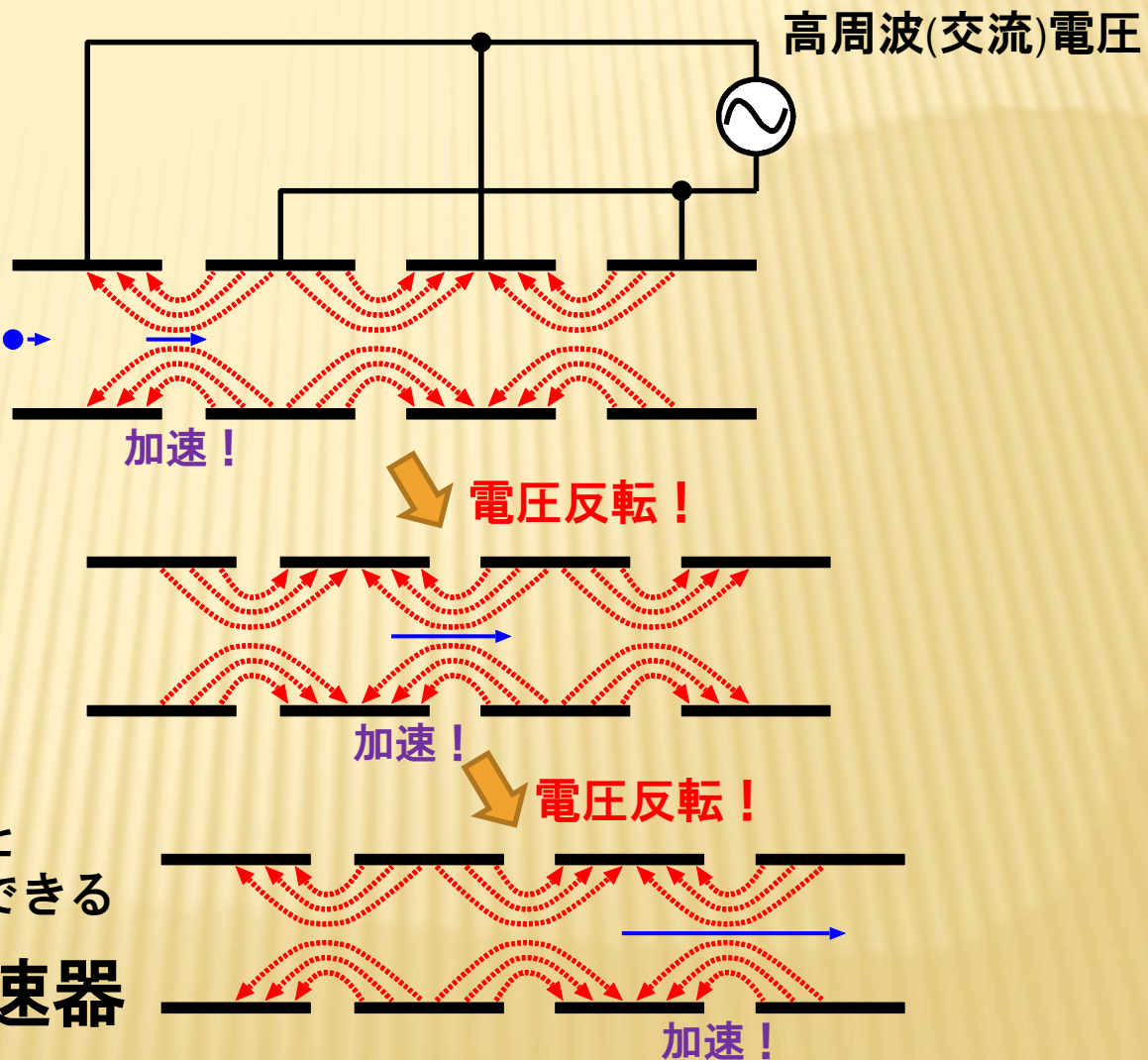
加速器



これだと加速は一回限り

もしこんな構成にできると一つの電源で何回も加速できる

線形加速器

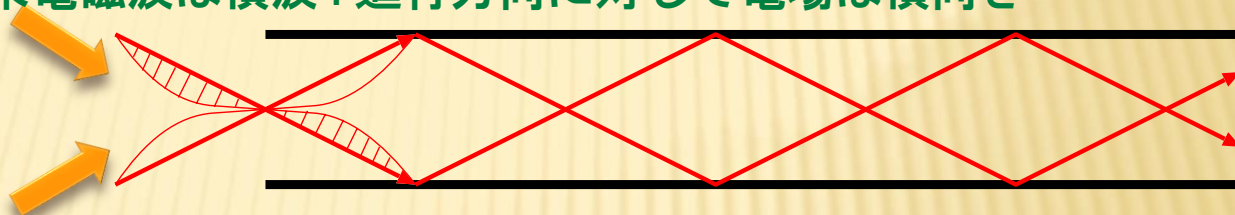


加速器

線形加速器(高周波加速空洞、導波管)

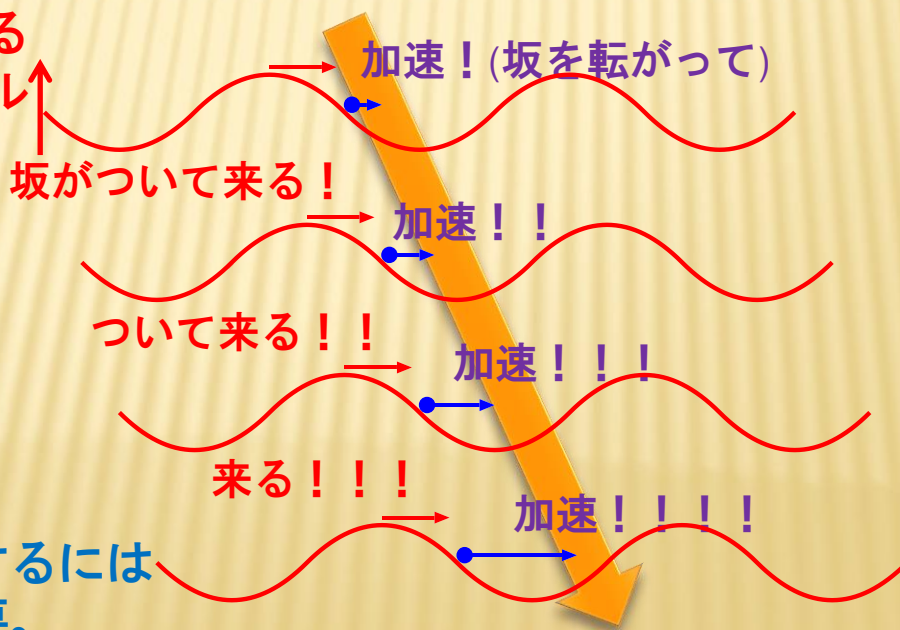
本来電磁波は横波：進行方向に対して電場は横向き

金属の筒(導波管)に
2方向から電波
(マイクロ波)を入射。



二つの波が合成されて管の中の電場は管に沿った方向になる

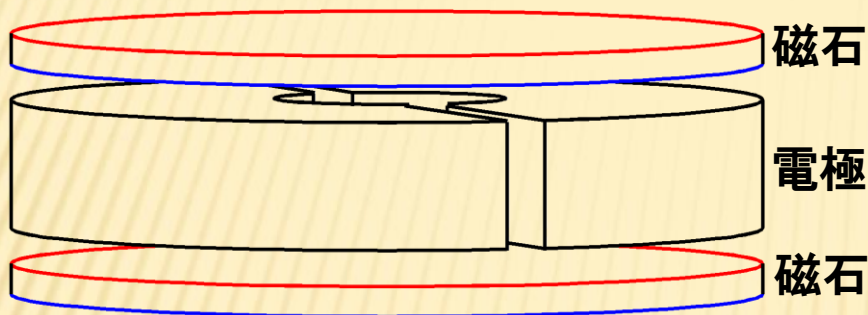
電子が感じる
ポテンシャル↑



高エネルギーに加速するには
なが〜い加速器が必要。

加速器

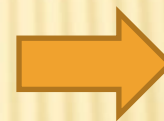
円形加速器：サイクロトロン



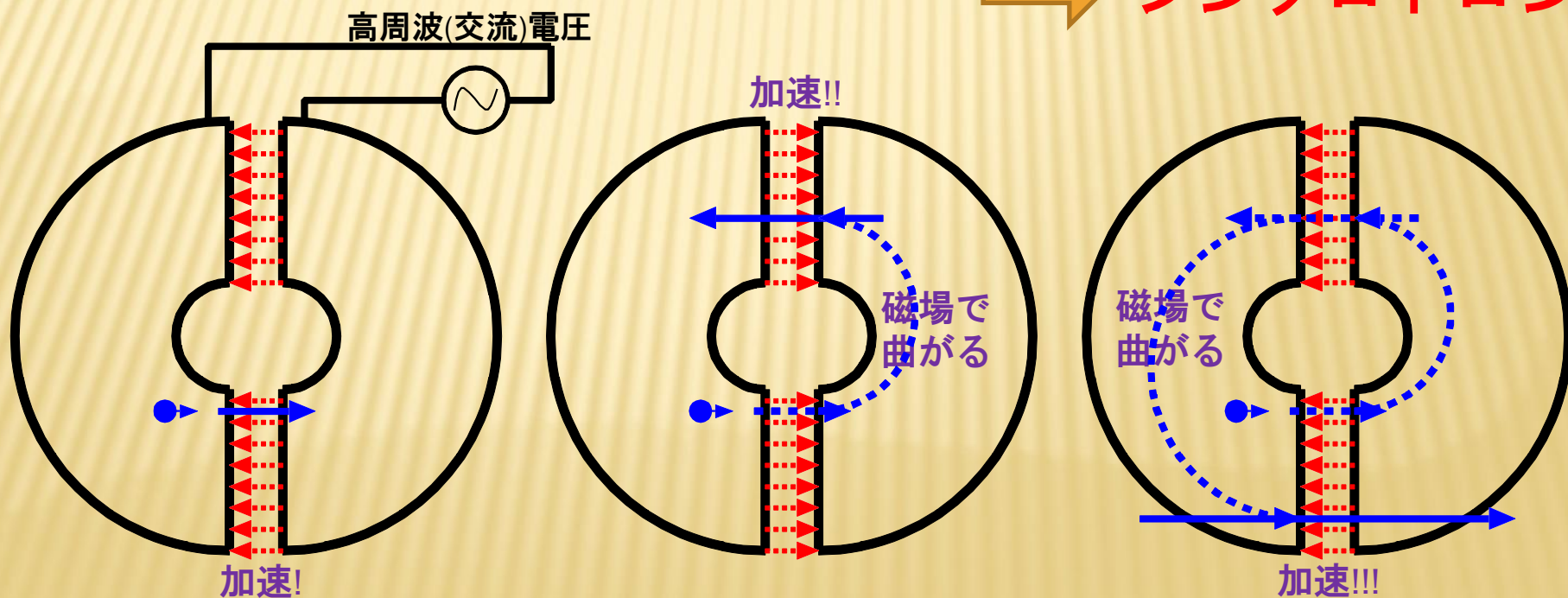
加速するに従って軌道が変わる。
(加速し続けられない)



加速に合わせて磁場の強度を上げる



シンクロトロン



磁場中を走る電子

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad \mathbf{B} = (0, 0, B), \quad \mathbf{v} = (v_x, v_y, 0) \\ &= q(v_x, v_y, 0) \times (0, 0, B) = q(v_y B, -v_x B, 0) \end{aligned}$$

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} : \quad m \frac{dv_x}{dt} = qv_y B, \quad m \frac{dv_y}{dt} = -qv_x B$$

$$v_y = \frac{m}{qB} \frac{dv_x}{dt} \quad \frac{d^2 v_x}{dt^2} = -\left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_x$$

$$v_x = A \sin \omega t \quad (x = A' \cos \omega t) \quad \omega = \frac{qB}{m}$$

振動(回転)の周期は、速度によらない。

実際のシンクロトロン(あいちSR)



直線加速器 : ~50MeV

ブースター
シンクロトロン : ~1.2GeV

蓄積リング : 1.2GeV

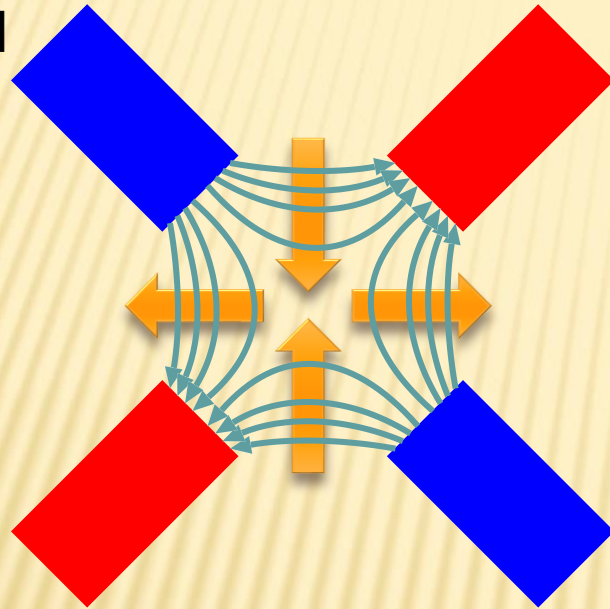
**沢山の加速器の
集まり!**

電子が走るのは超高真空の
細いパイプの中

四極電磁石 (収束/レンズ)

中心は磁場が無いので、中心を走る電子に影響は無い

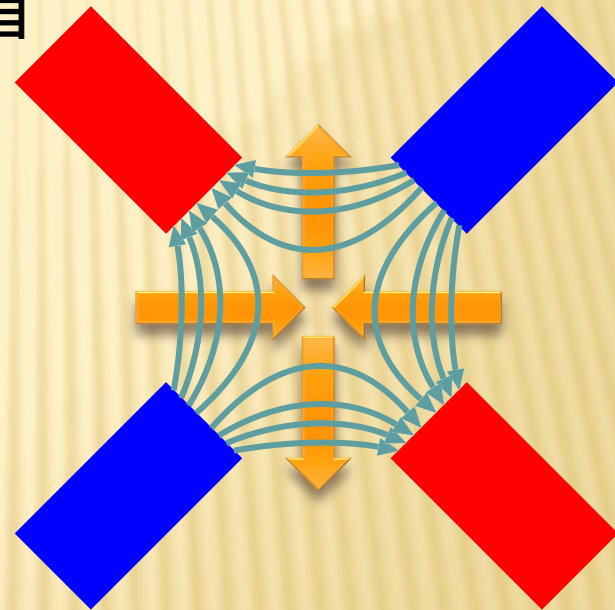
1組目



1組目

上下方向: 中心向けに偏向
左右方向: 外向けに偏向

2組目



2組目

外向けに偏向、ただし弱く
中心向けに偏向、より強く

放射光って何？(もう一度)



シンクロトロンを
粒子加速器として
使うとき、放射光は
「**エネルギーのロス**」

LHC (CERNの加速器)
など素粒子研究用の
加速器が大型化するの
は磁石を弱く(エネルギー
ロスを小さく)したいから。
(次の大型加速器計画は
線形加速器)

放射光って何？(もう一度)



一周する閉軌道を作るための電磁石



電子を曲げる



光が出る！

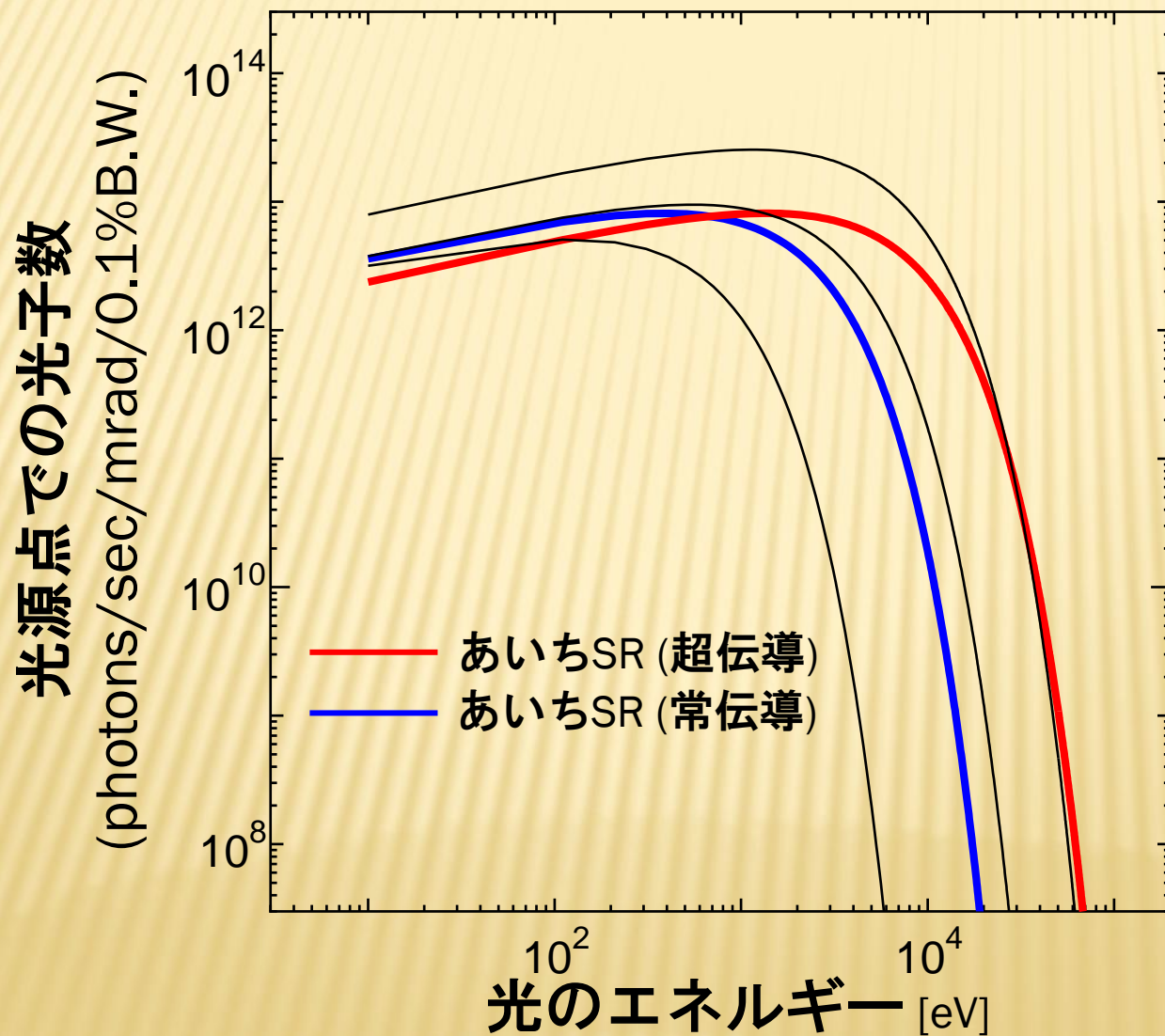
放射光に利用価値を見いだすと
シンクロトロンは
貴重な放射光源!!



放射光の特徴(特徴を指した言葉ではないけれど)

- 指向性の強い光
- 非常に強い光
- 非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- 強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)
- パルス光

放射光のスペクトル

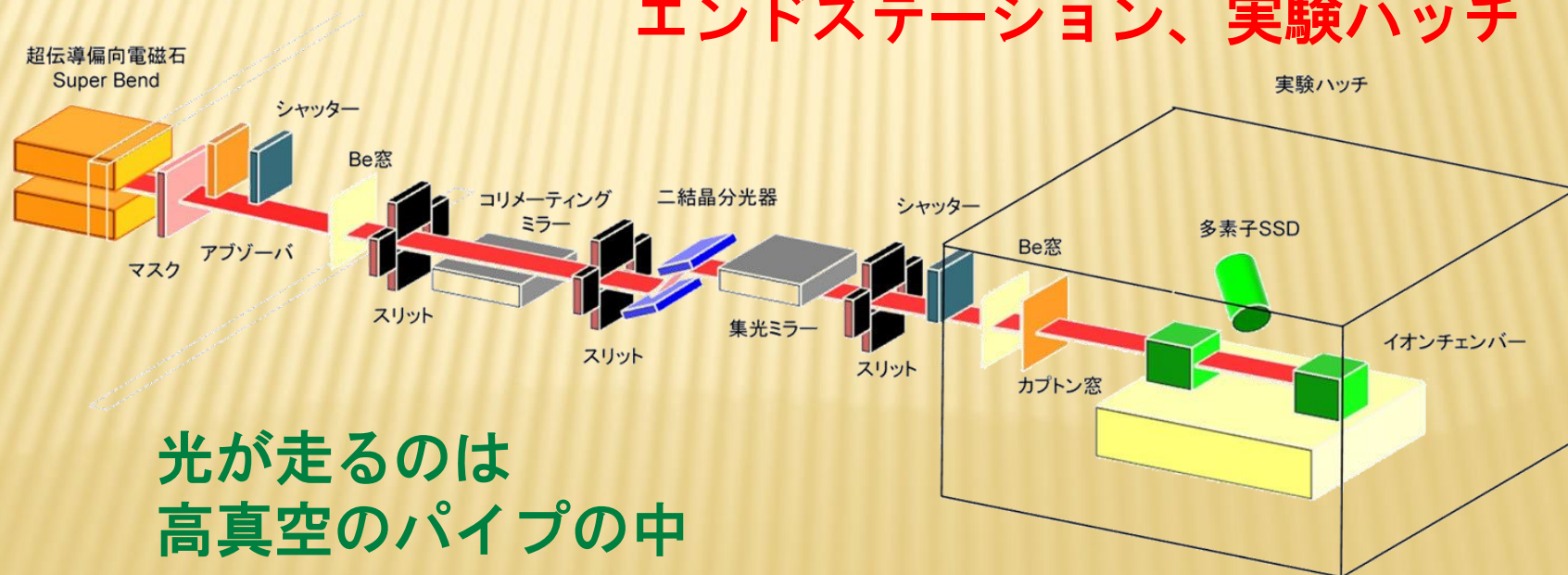


発生した放射光の使い方(1)

ビームライン

シンクロトロンから取り出された光は
ミラー、分光器、スリット
等の光学素子を通して、
最下流の光を利用する実験設備に導かれる

エンドステーション、実験ハッチ



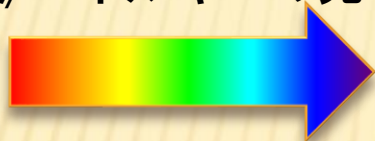
光が走るのは
高真空のパイプの中

発生した放射光の使い方(2)

どんな測定、実験ができるか

1. 分光測定

様々な色/波長/エネルギーの光



試料



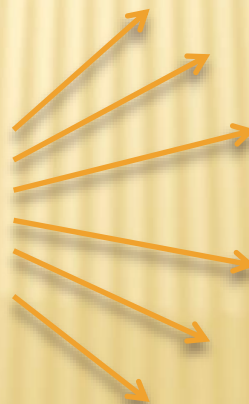
反応を見る
透過/吸収
蛍光
二時電子....

2. 回折、散乱測定

選択した波長の光



試料



どんな方向に
どんな強さで
回折・散乱されるか

3. イメージング

透過力が強い、波長が短い光を使った結像

科学技術戦略と シンクロトロン光施設

重点4分野・推進4分野
 ○ 当初ビームライン
 ○ 名大ビームライン

環境分野
エネルギー分野

情報通信分野
ナノテクノロジー・材料分野

ものづくり技術分野

原子・分子レベル制御
 ものづくりのシンクロトロン
 反復実験、多数実験

マイクロロボット
 ナノ・マイクロマシン
 バイオチップ

ナノエレクトロニクス
 新しいナノ半導体素子
 ナノバイオセンサー

原子・分子レベル制御
 表面・界面の構造

宇宙フロンティア
 人工衛星搭載用X線望遠鏡
 赤外線観測装置

フロンティア分野
次世代への挑戦

化学物質リスク
 環境下の極微量有害物質の検出
 植物による浄化

ユビキタスデバイス
 超微細描画・超小型センサー

ナノテク材料創成・評価
 新材料・新機能の開発
 半導体特性評価
 非破壊分析

エネルギー
 燃料電池
 Liイオン電池

排ガス浄化
 高機能触媒

大気循環
 浮遊粒子
 成層圏オゾン層の化学反応

食の安全
 土壌・食材の極微量有害物質の検出

健康長寿
 認知症メカニズム解明

ポストゲノム研究
 創薬ターゲット蛋白質と
 薬理活性物質の構造解析

初期ガンの検出
 0.1mmのガン
 3次元「解剖」

ライフサイエンス分野



シンクロトロン光施設



施設見学

放射光って何？(もう一度)



一周する閉軌道を作るための電磁石

電子を曲げる

光が出る！

放射光に利用価値を見いだすと
シンクロトロンは
貴重な放射光源!!

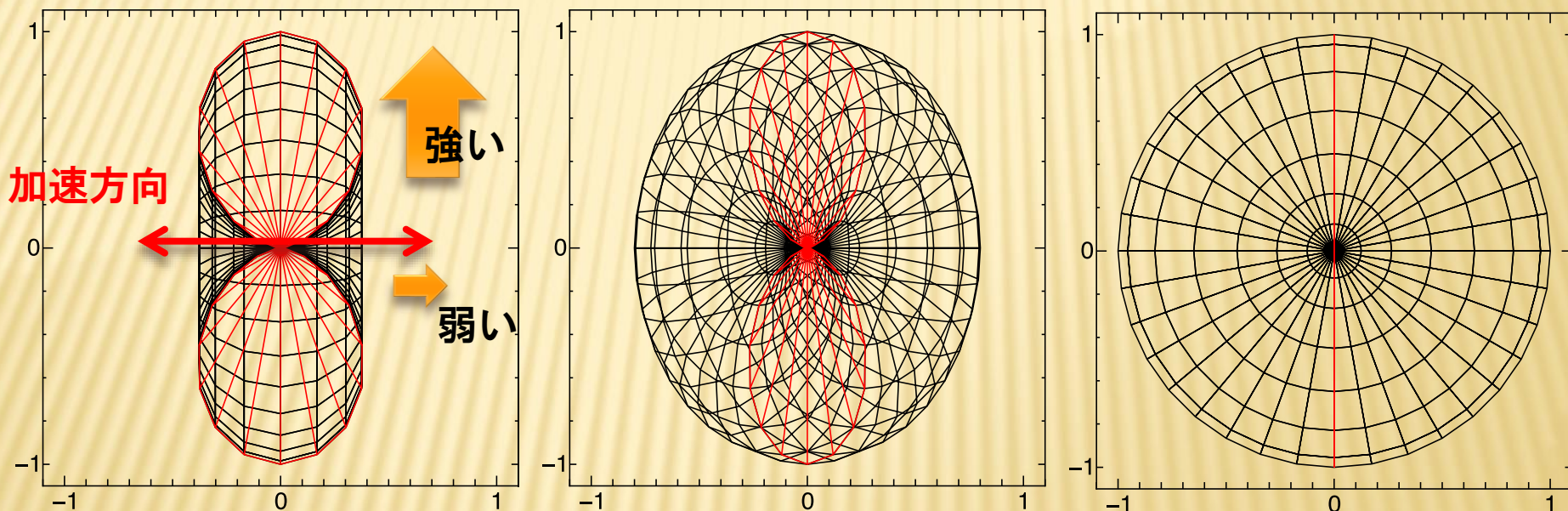
放射光の特徴(特徴を指した言葉ではないけれど)

- 指向性の強い光
- 非常に強い光
- 非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- 強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)
- パルス光

加速度を受けた電荷からの放射

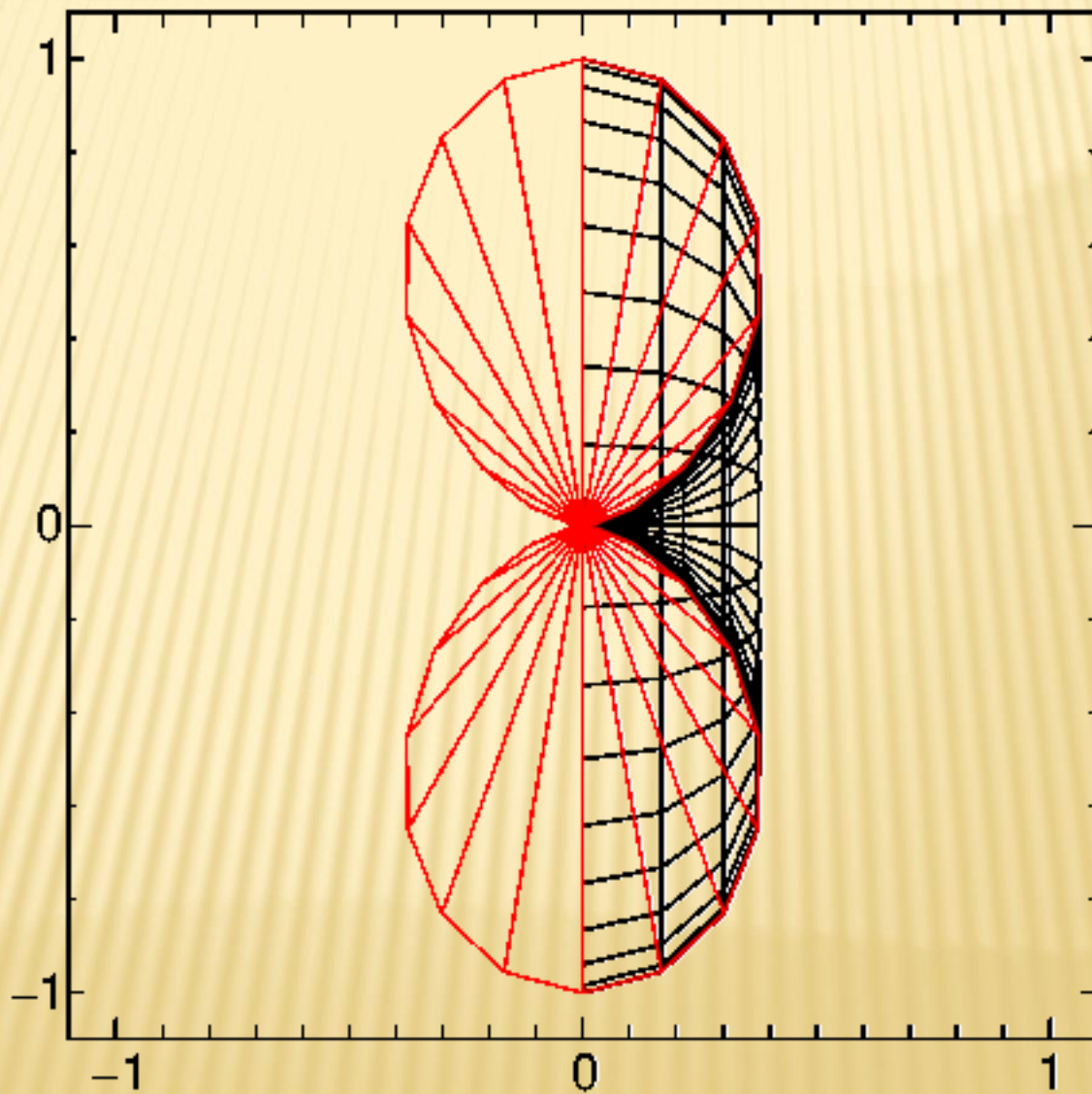
双極子輻射

$$dP = \sin^2 \theta d\Omega$$

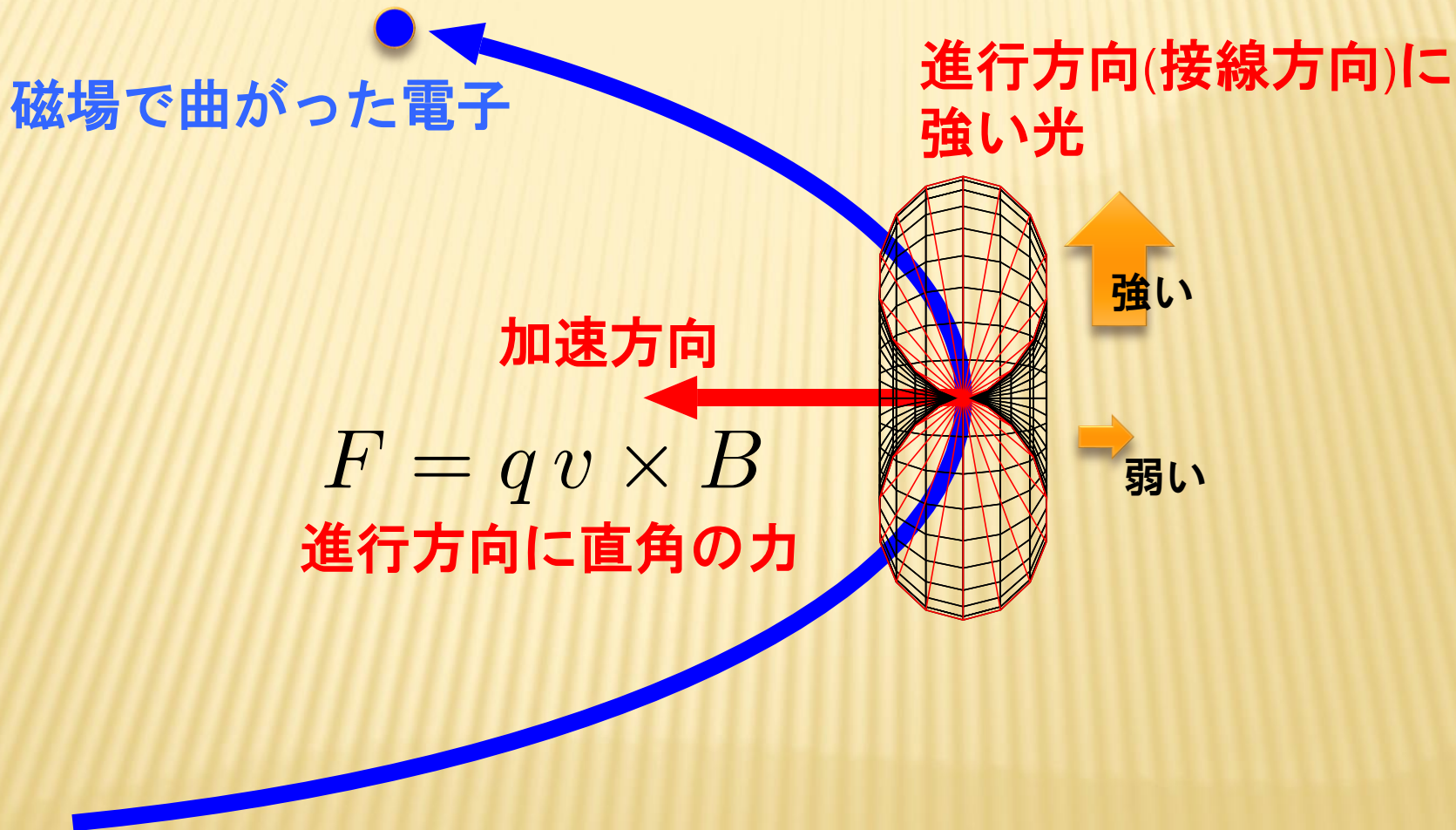


加速に沿った方向(赤矢印方向)には弱く、直角方向に強い。
加速の方向(矢印)の周りには回転対象

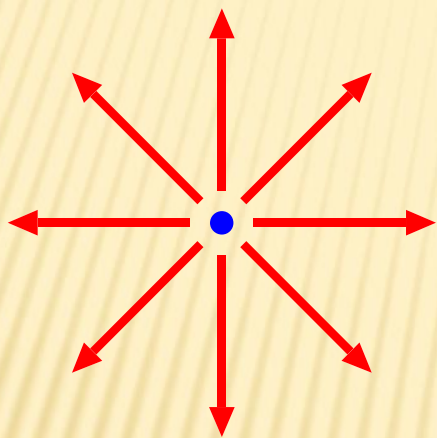
双極子放射



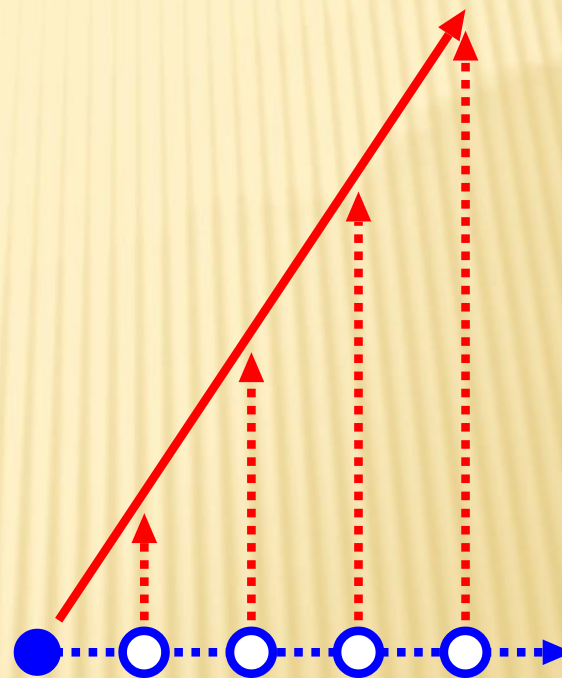
加速度を受けた電子からの放射



相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-

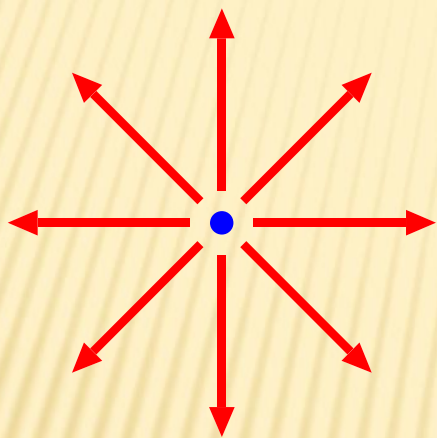


仮に、一個の電子が
等方に光を出すと....

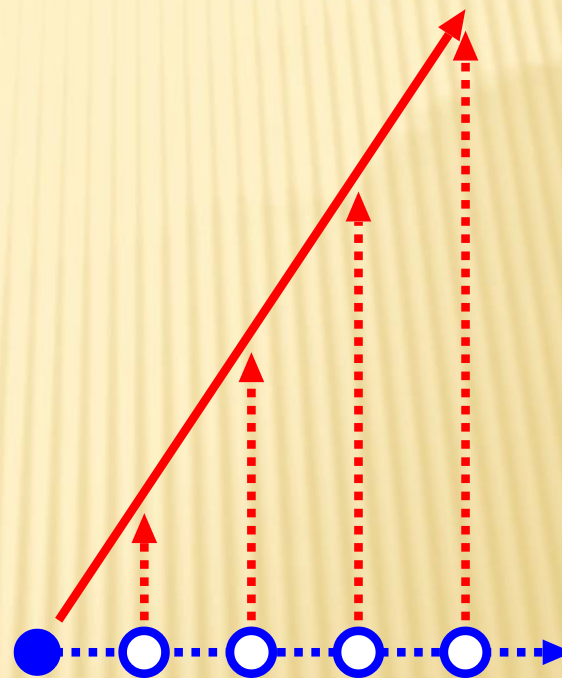


電子から真横に出た光は
止まっている人から見ると
前方に出たように見える。

相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-



仮に、一個の電子が
等方に光を出すと....

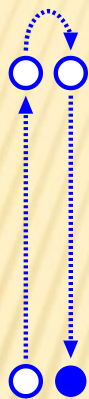


電子から真横に出た光は
止まっている人から見ると
前方に出たように見える。

本当か？

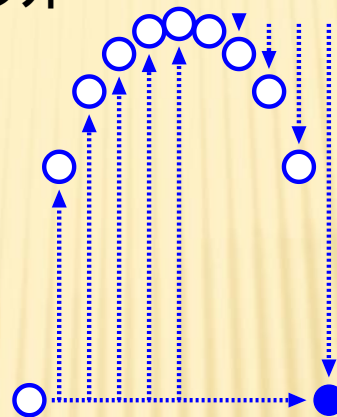
相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

電車の中



まっすぐ投げると
まっすぐ落ちる

電車の外



放物線を描くように
見える
... 電車と一緒に
横に動いていたから

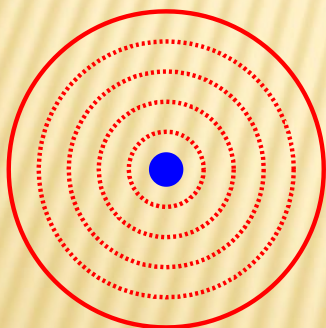
相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

電車の中

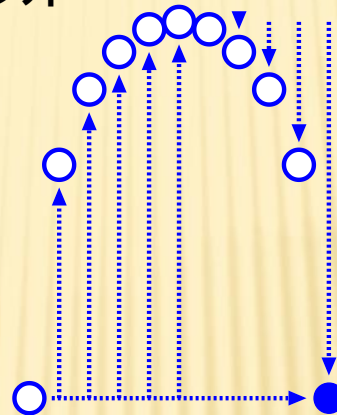


まっすぐ投げると
まっすぐ落ちる

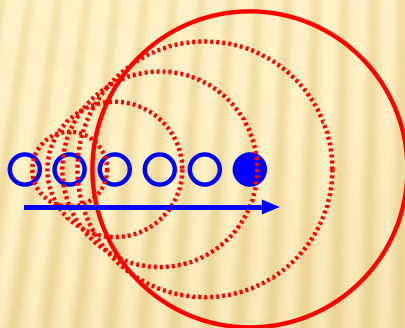
等方に広がる波



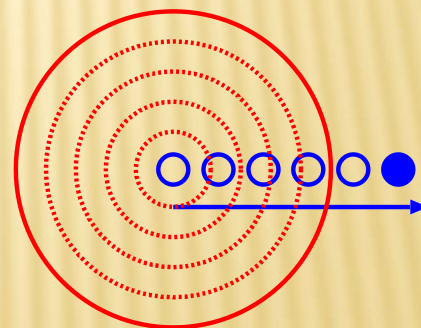
電車の外



放物線を描くように
見える
... 電車と一緒に
横に動いていたから



媒質と一緒に動くと

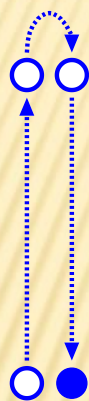


媒質が止まっていると...
(電車の中では後ろに流れる)

光はどっち？

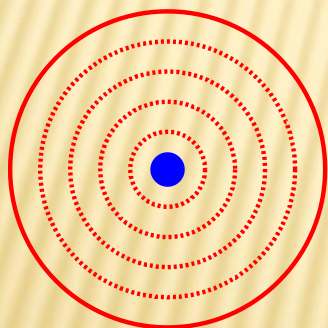
相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

電車の中

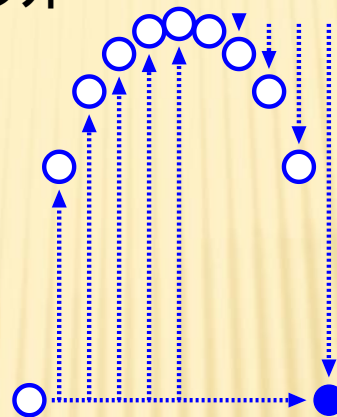


まっすぐ投げると
まっすぐ落ちる

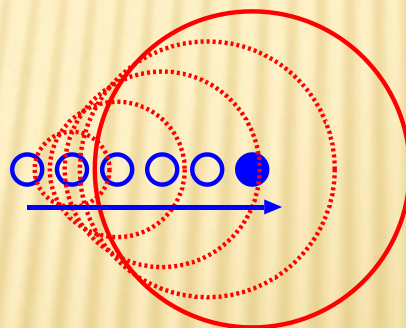
等方に広がる波



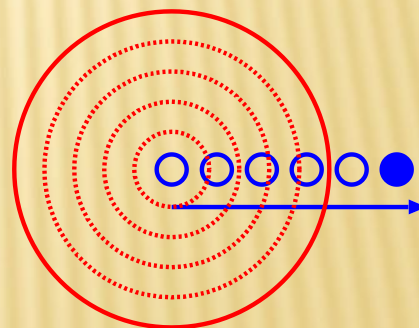
電車の外



放物線を描くように
見える
... 電車と一緒に
横に動いていたから



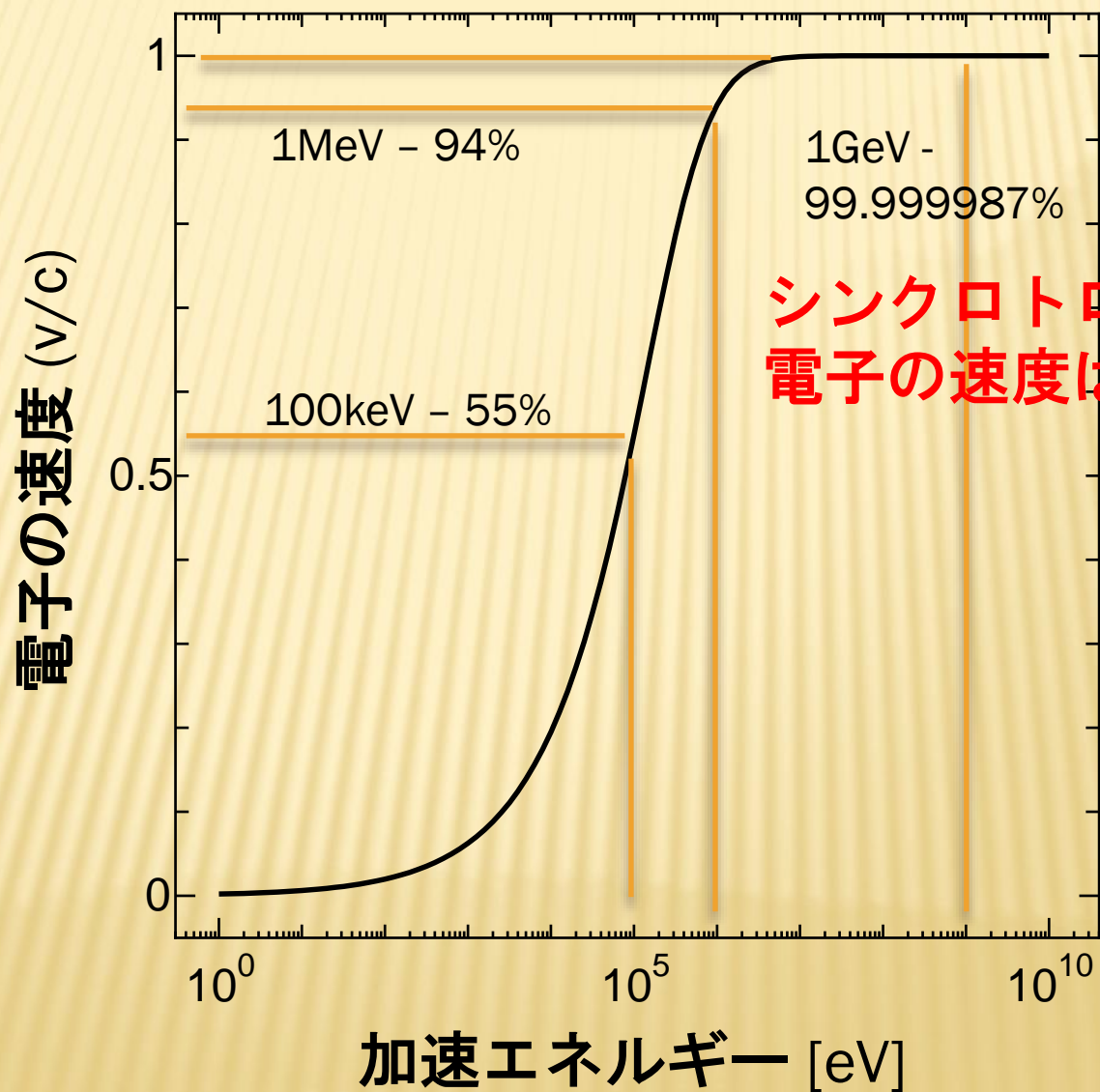
媒質と一緒に動く



媒質が止まっていると...
(電車の中では後ろに流れる)

光はどっち? → どっちでもない!

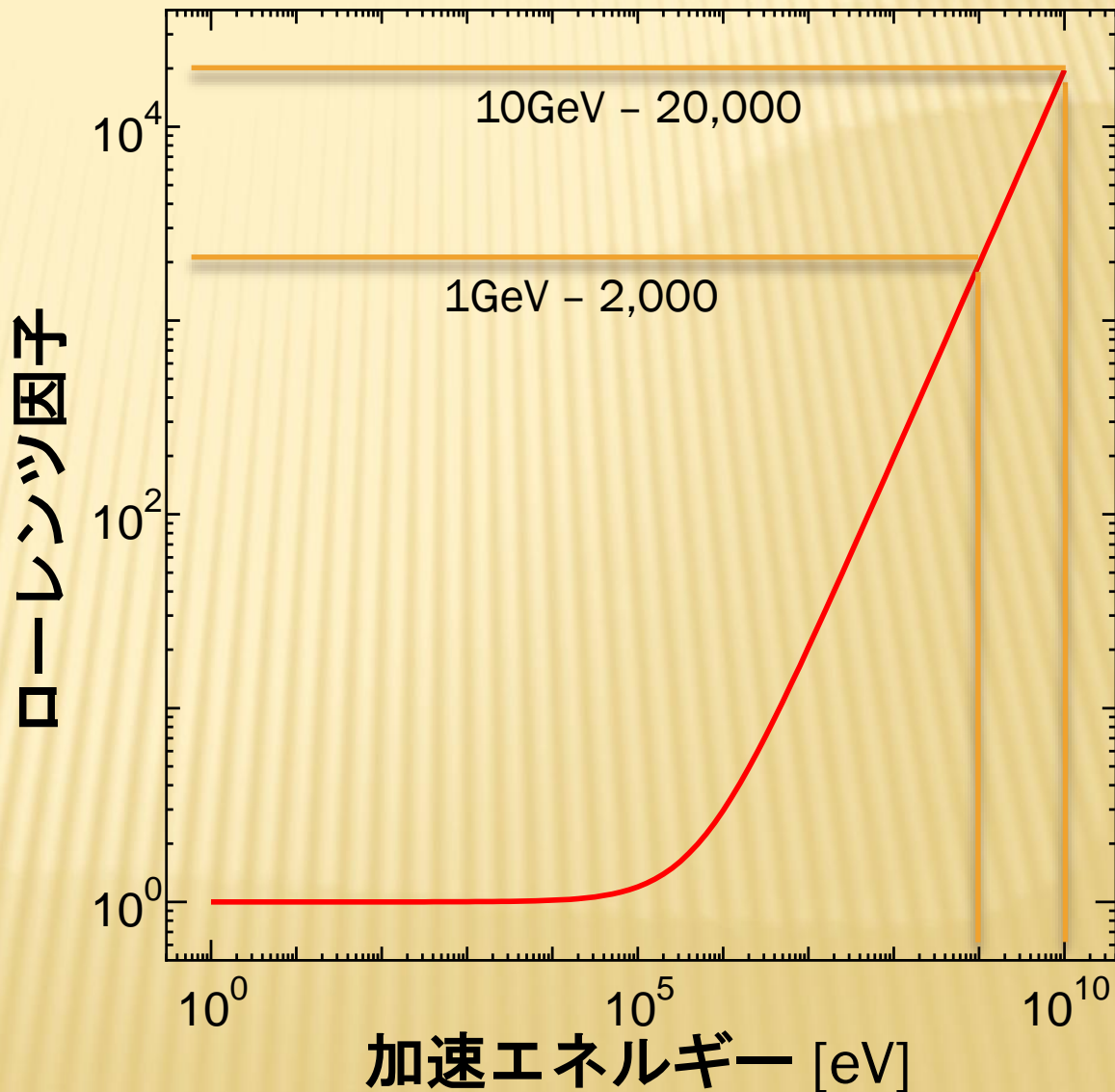
相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -



相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

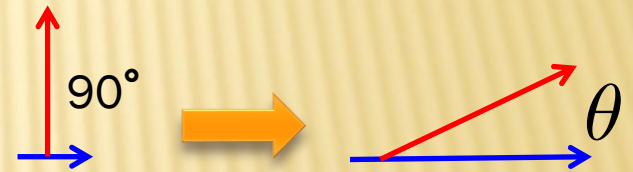
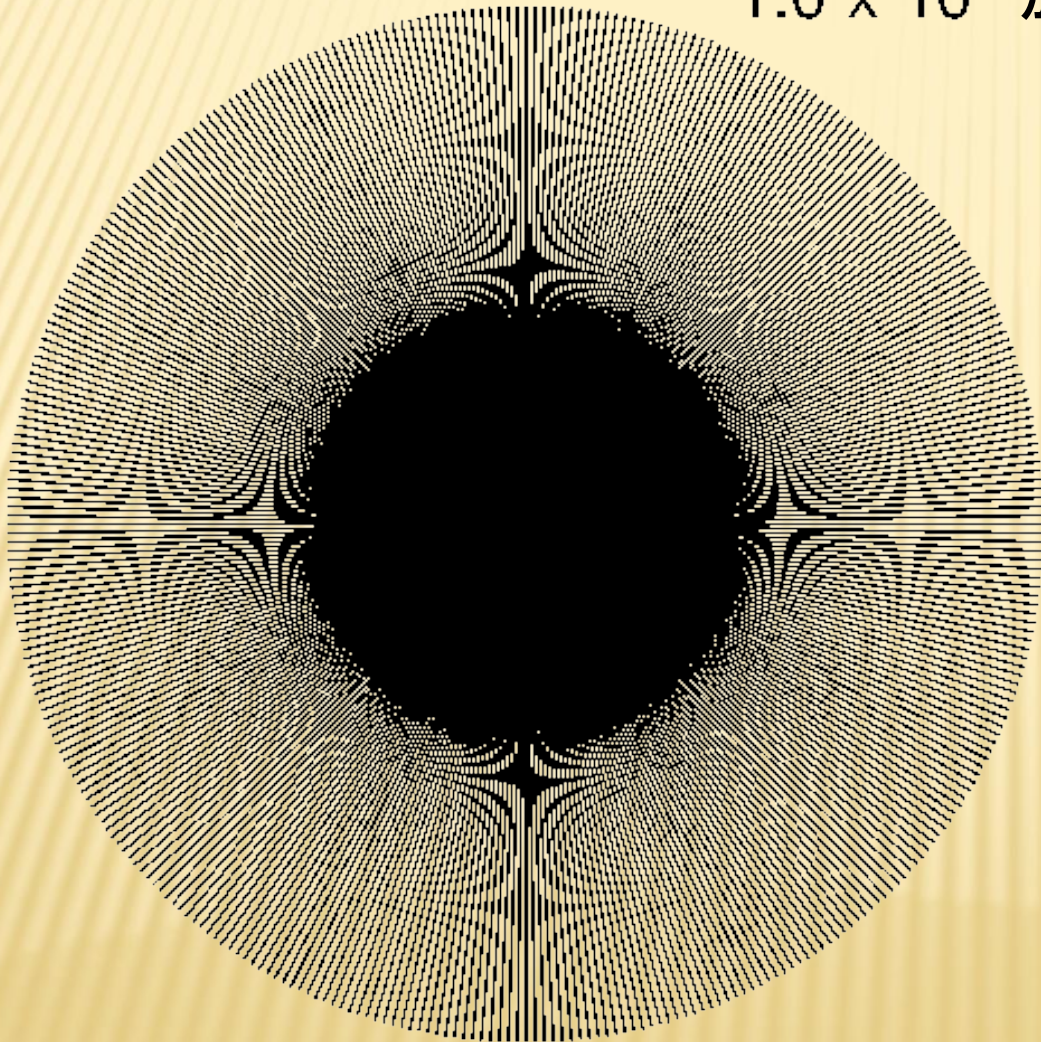
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ローレンツ因子
相対論効果が
現れる度合い



進行方向に集中する光

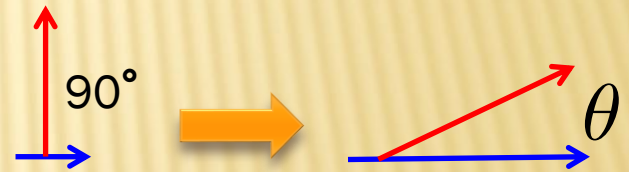
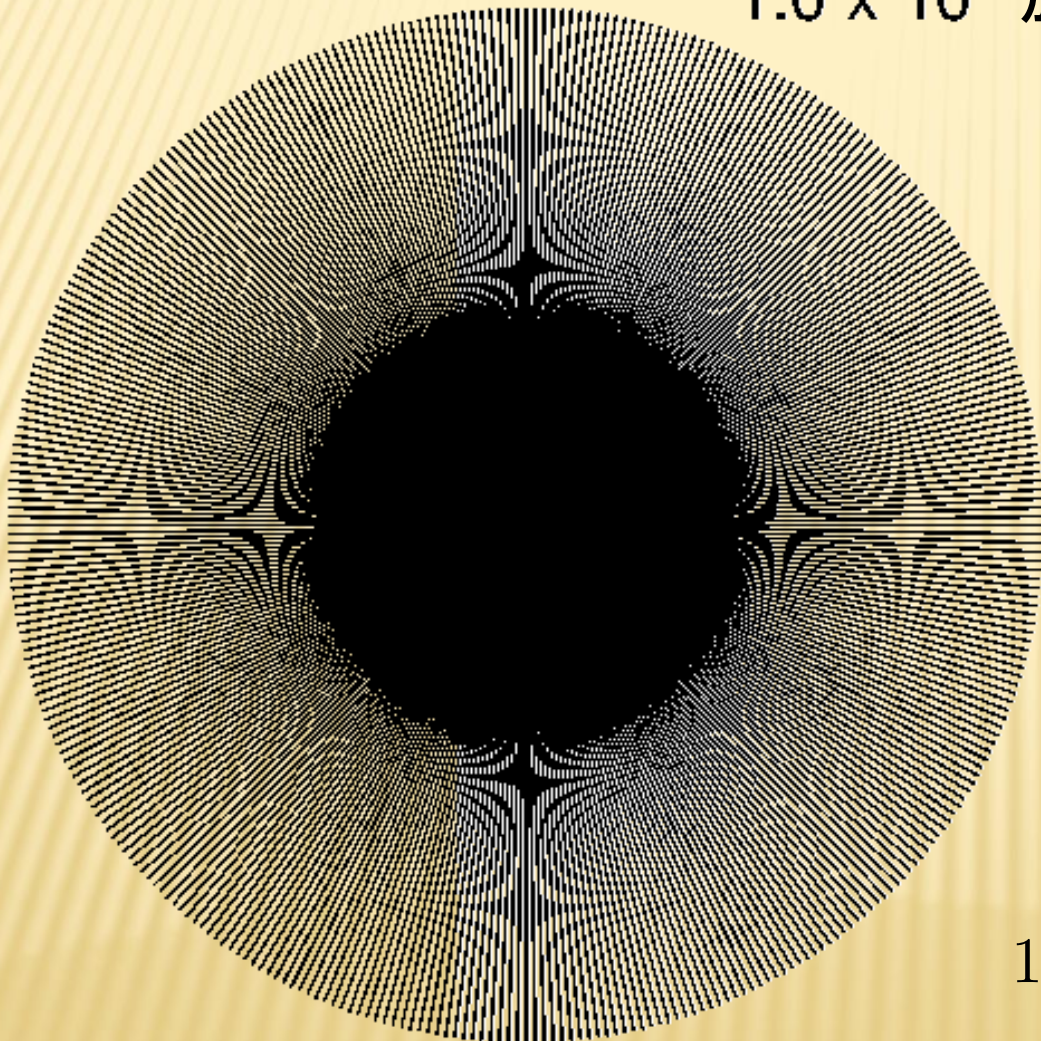
1.0×10^0 加速電圧[eV]



$$\theta \approx \frac{1}{\gamma}$$

進行方向に集中する光

1.0×10^{10} 加速電圧[eV]



$$\theta \simeq \frac{1}{\gamma}$$

	rad	deg
1GeV	5.0×10^{-4}	$\simeq 0.03$
10GeV	5.0×10^{-5}	$\simeq 0.003$

半分の光がこの範囲に入る

放射光の特徴

- 指向性の強い光
- 非常に強い光
- 非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- パルス光
- 強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)

光の強さ

- 加速電圧：光の前方集中の度合い
→ 前方で観察される光の量

- 1個の電子が発生する光パワー

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{R^2} \left(\frac{v}{c}\right)^4 \left(\frac{E}{mc^2}\right)^4$$

: 電子なら、
E=1GeV で 2000
(陽子だと 1.2)

E [GeV], I [A] の電子集団だと

$$P[\text{kW}] = 88.5 E^3 \frac{I}{R}$$

	E	I	R
あいちSR	1.2	0.3	0.8
SPring-8	8.0	0.1	40

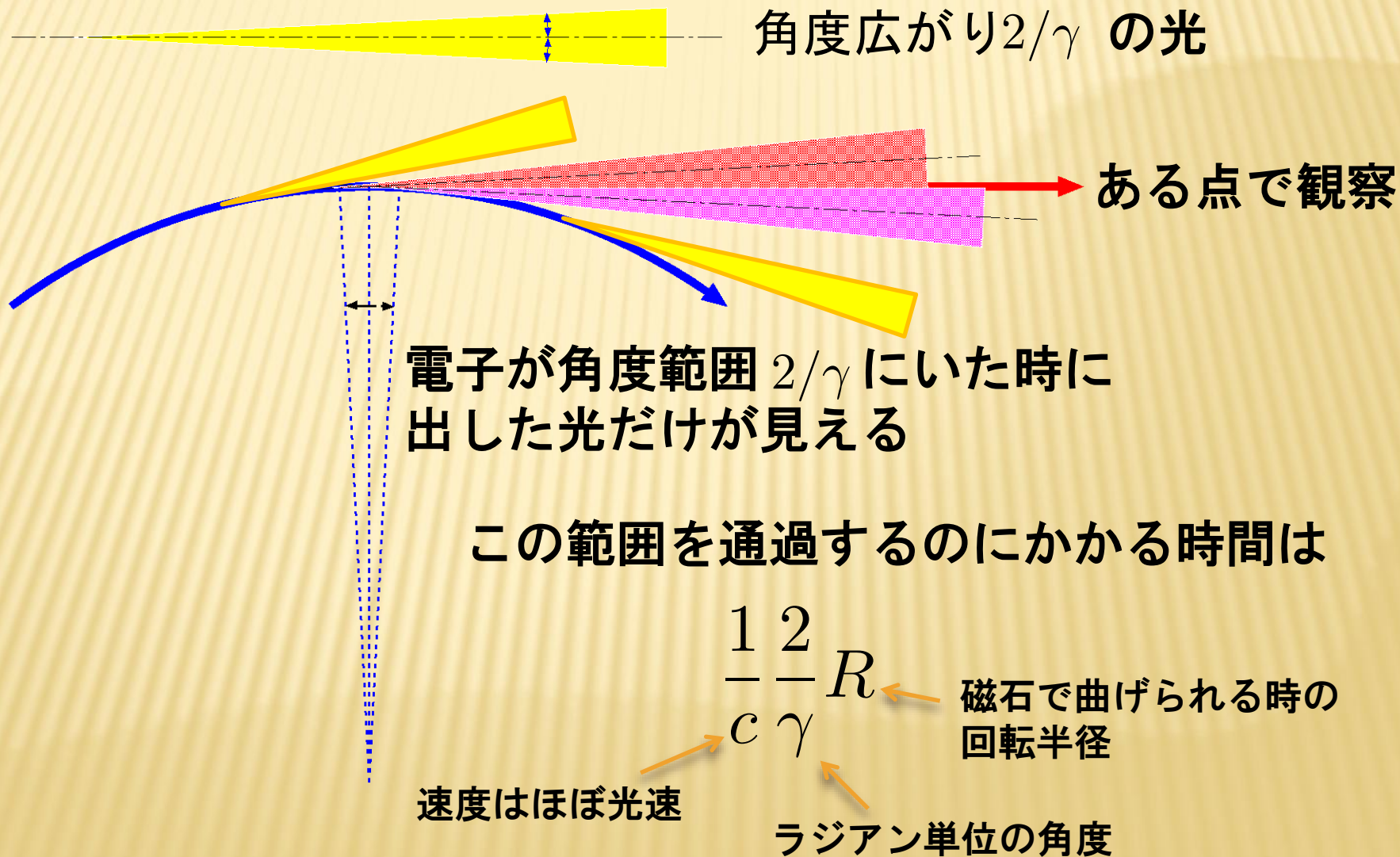
kW !!

P
57.3
113

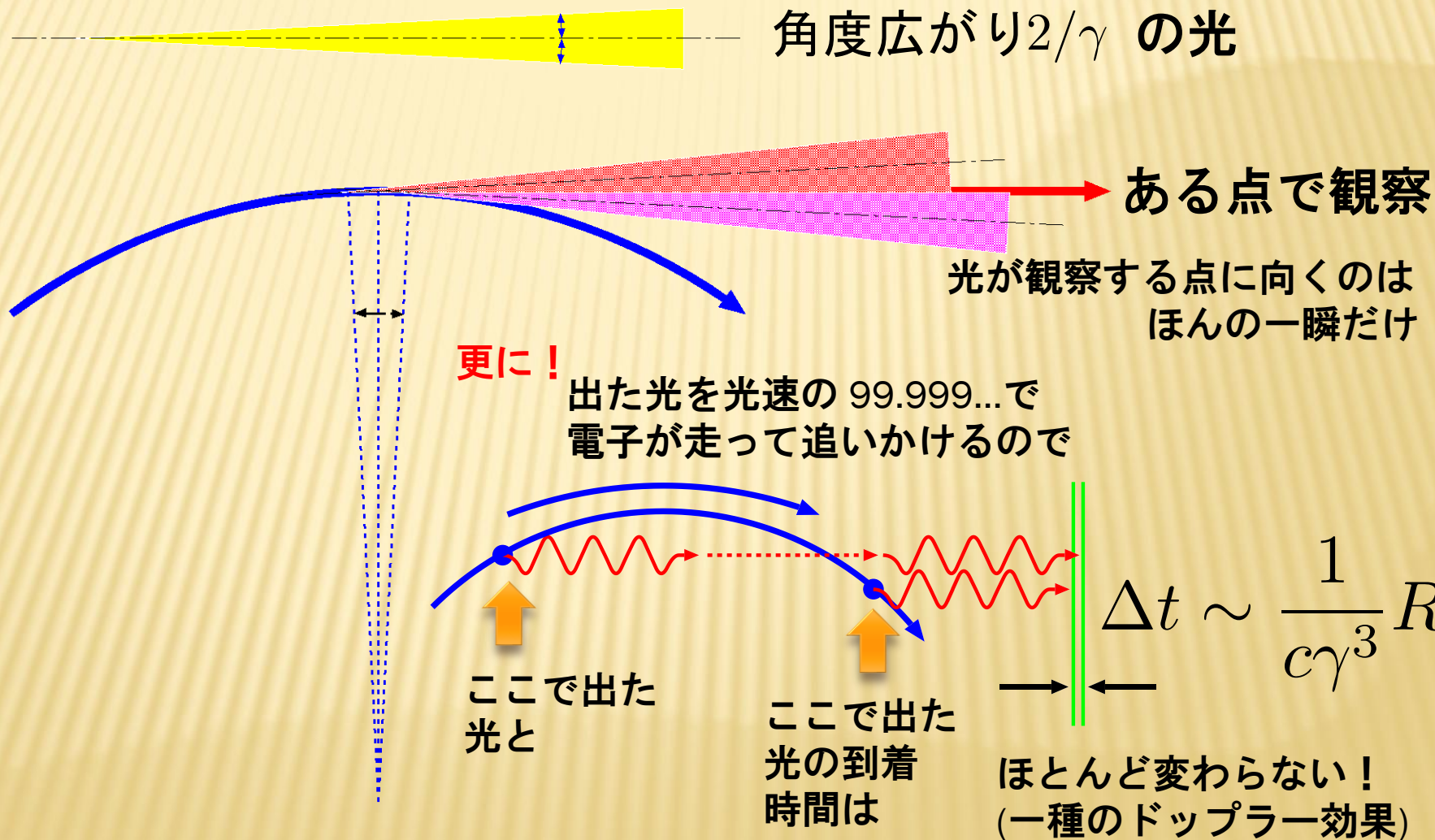
放射光の特徴

- 指向性の強い光
- 非常に強い光
- 非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- パルス光
- 強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)

放射光のスペクトル



放射光のスペクトル



放射光のスペクトル

$$\frac{1}{c\gamma^3} R$$

あいちSRの場合

γ : 約 2400

R : 0.8[m] or 2.9[m] (超伝導、常伝導電磁石)

$$\frac{1}{3.0 \times 10^8} \times \frac{1}{2400^3} \times 0.8 \text{ or } 2.9$$

$$= 1.9 \times 10^{-19} \text{ or } 7.0 \times 10^{-19} \text{ [秒]}$$

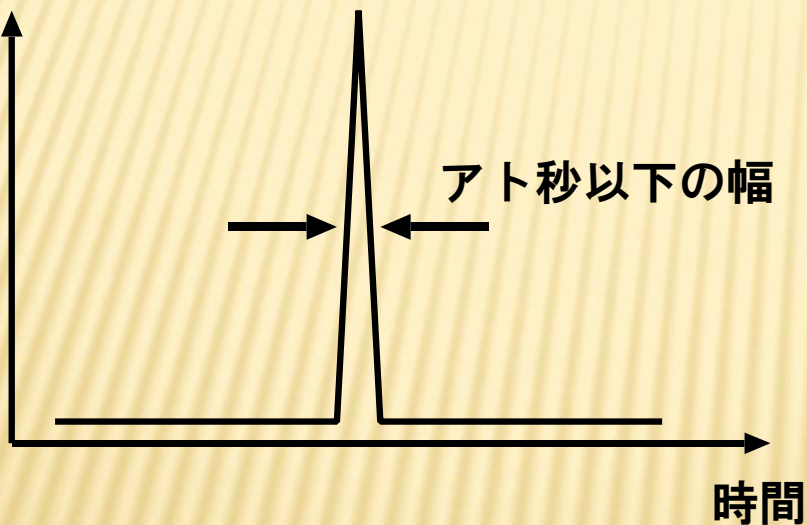
1個の電子が出す光は、極短い時間幅のパルスになる

ミリ秒、マイクロ秒、ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒、アト秒
 10^{-3} 10^{-6} 10^{-9} 10^{-12} 10^{-15} 10^{-18}

放射光のスペクトル

1個の電子が出す光は、極短い時間幅のパルスになる

観察される
電磁場の強度



↓

だけど光は、電磁「波」。

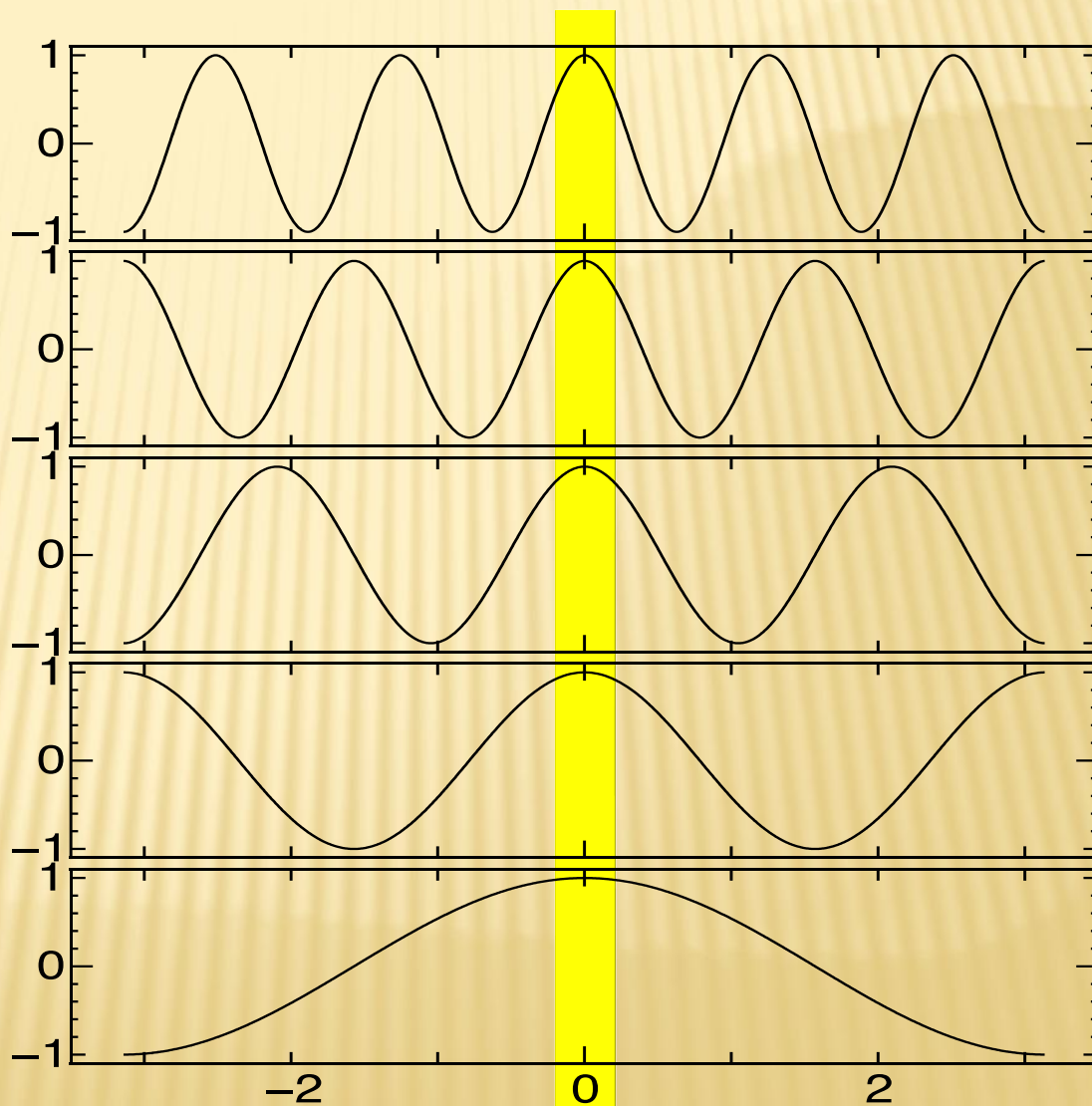
sin, cos

パルスを作るのは
沢山の波長が違う
正弦波の集まり！

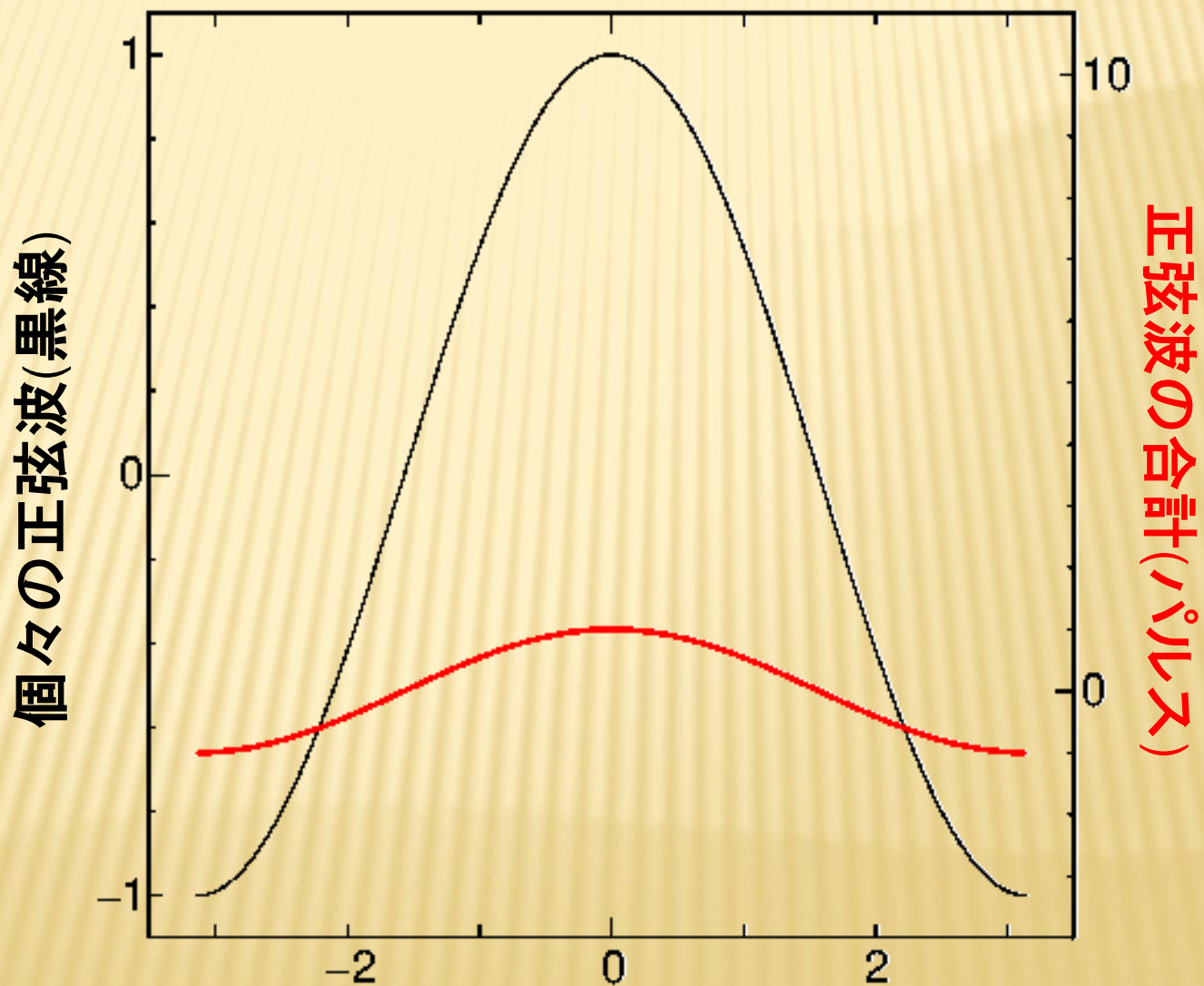
放射光のスペクトル

「パルス」を作る
一連の波の例

$x = 0$ の点では、
全ての波が 1。
その他の場所では
+/-バラバラの値をとる



放射光のスペクトル



放射光のスペクトル

$$\Delta t \sim \frac{1}{c\gamma^3} R$$

の幅のパルスを再現するには、
どのぐらい高い周波数の光が必要?

$$\omega \sim \frac{2\pi}{\Delta t} = 2\pi \frac{c\gamma^3}{R}$$

スペクトルの正しいピーク位置は $\omega = \frac{3}{2} \frac{c\gamma^3}{R}$

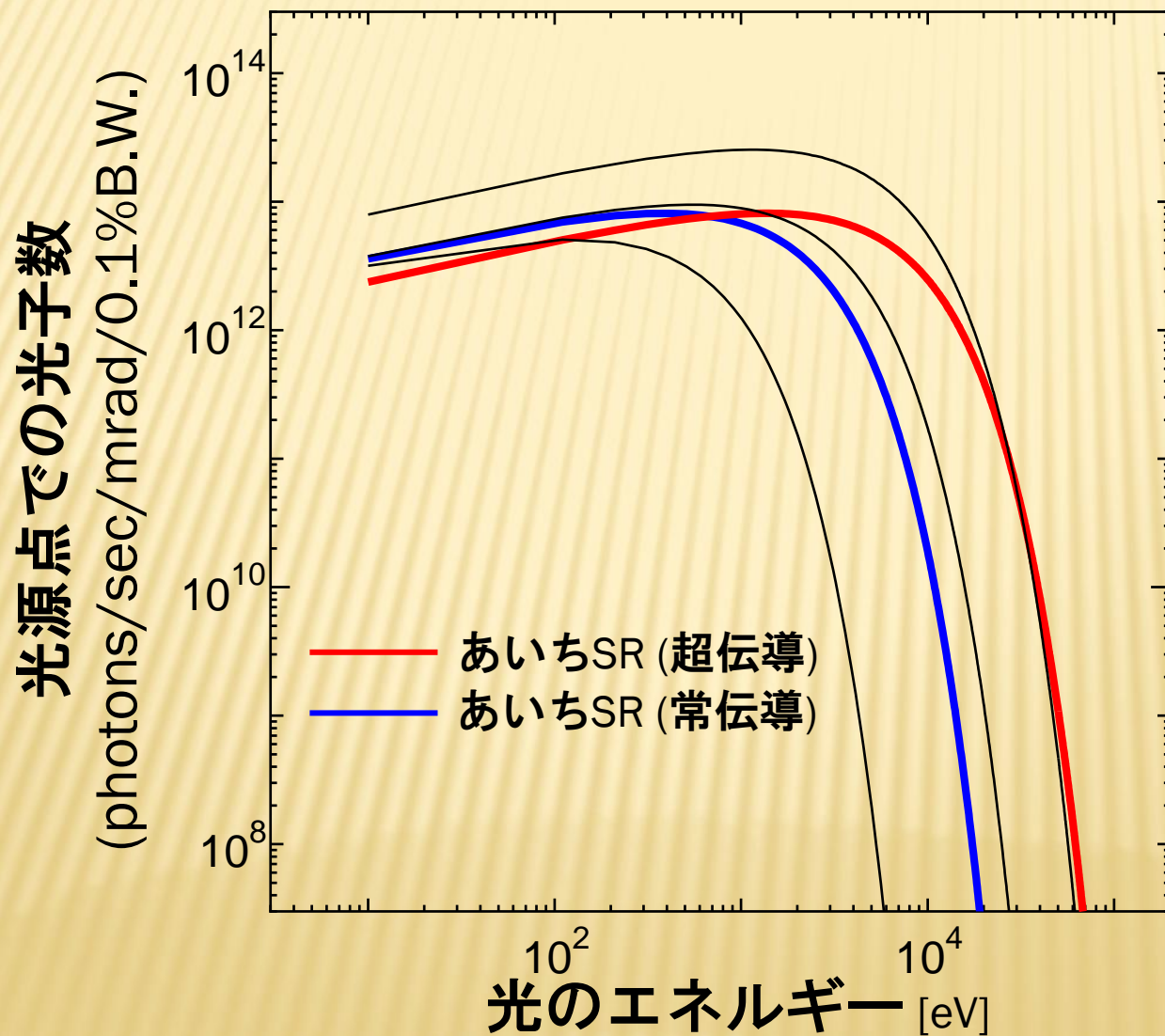
あいち SR の超伝導磁石: 7.7×10^{18} [1/s]

$$\varepsilon = \hbar\omega \sim 8.6 \times 10^{-16} [\text{J}] \sim 5 [\text{keV}]$$

このぐらいのオーダーまでの
エネルギーの光が出て来る

$$= 0.665 E^2 [\text{GeV}] B [\text{T}]$$

放射光のスペクトル



光の波長とエネルギーの関係

$$\varepsilon = h\nu$$

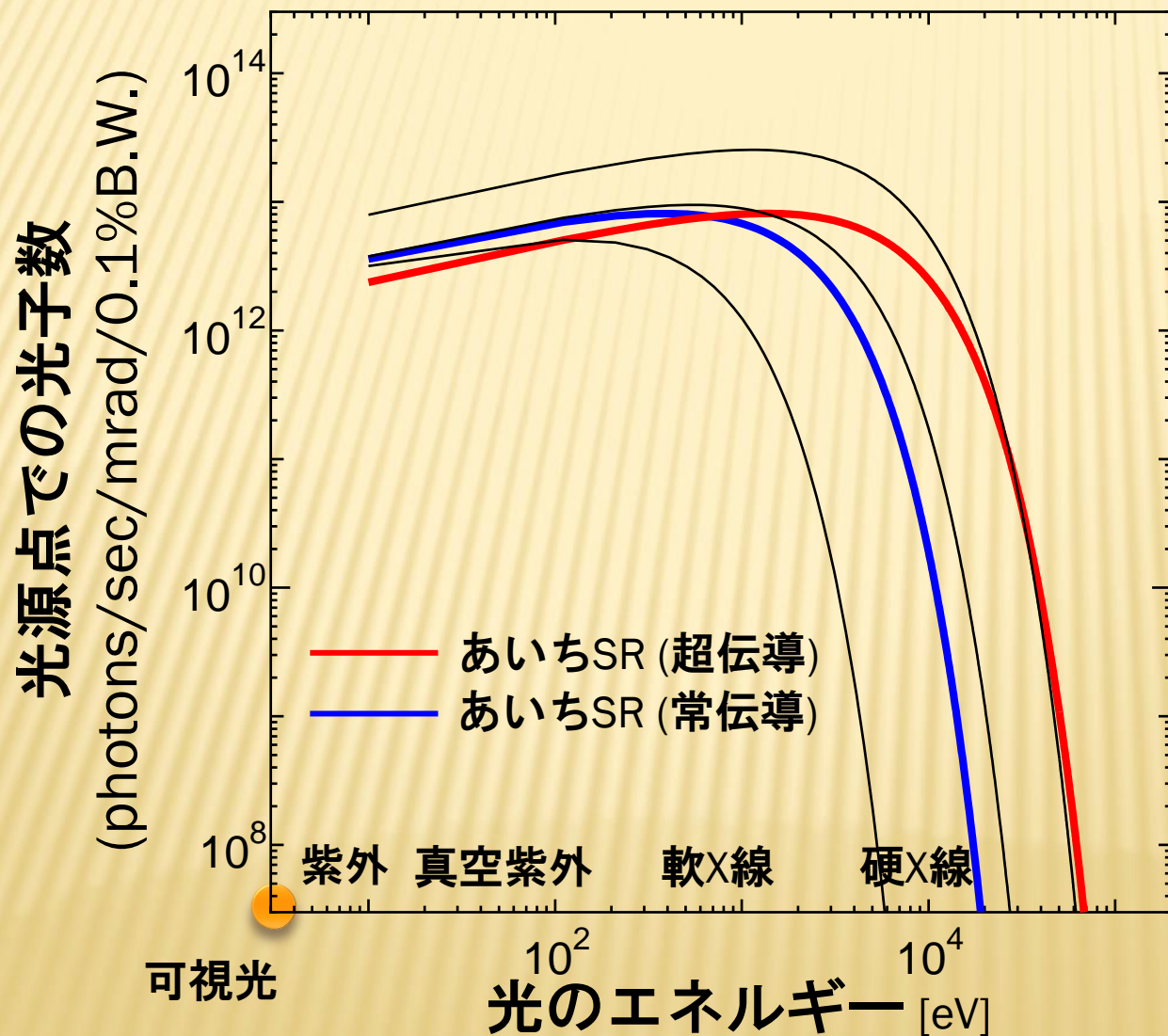
ε 光のエネルギー
 ν 光の周波数
 h プランク定数 : 6.6×10^{-34}

$$c = \nu\lambda$$

λ 光の波長
 c 光速 : 3.0×10^8

$$\varepsilon[\text{J}] = \frac{hc}{\lambda[\text{m}]} \quad \lambda[\text{m}] = \frac{hc}{\varepsilon[\text{J}]}$$

放射光のスペクトル



$$\lambda[\text{m}] = \frac{hc}{e} \frac{1}{\epsilon[\text{eV}]}$$

$$\frac{hc}{e} = 1.24 \times 10^{-6}$$

$$\lambda[\mu\text{m}] = \frac{1.24}{\epsilon[\text{eV}]}$$

可視光域で便利

$$\lambda[\text{nm}] = \frac{1.24}{\epsilon[\text{keV}]}$$

$$\lambda[\text{\AA}] = \frac{12.4}{\epsilon[\text{keV}]}$$

X線の領域で便利

放射光のスペクトル

光源点での光子数

(photons/sec/mrad/0.1%B.W.)

/sec : 時間あたり

/mrad : 角度あたり (偏向電磁石で曲げられた角度幅に光が出る)

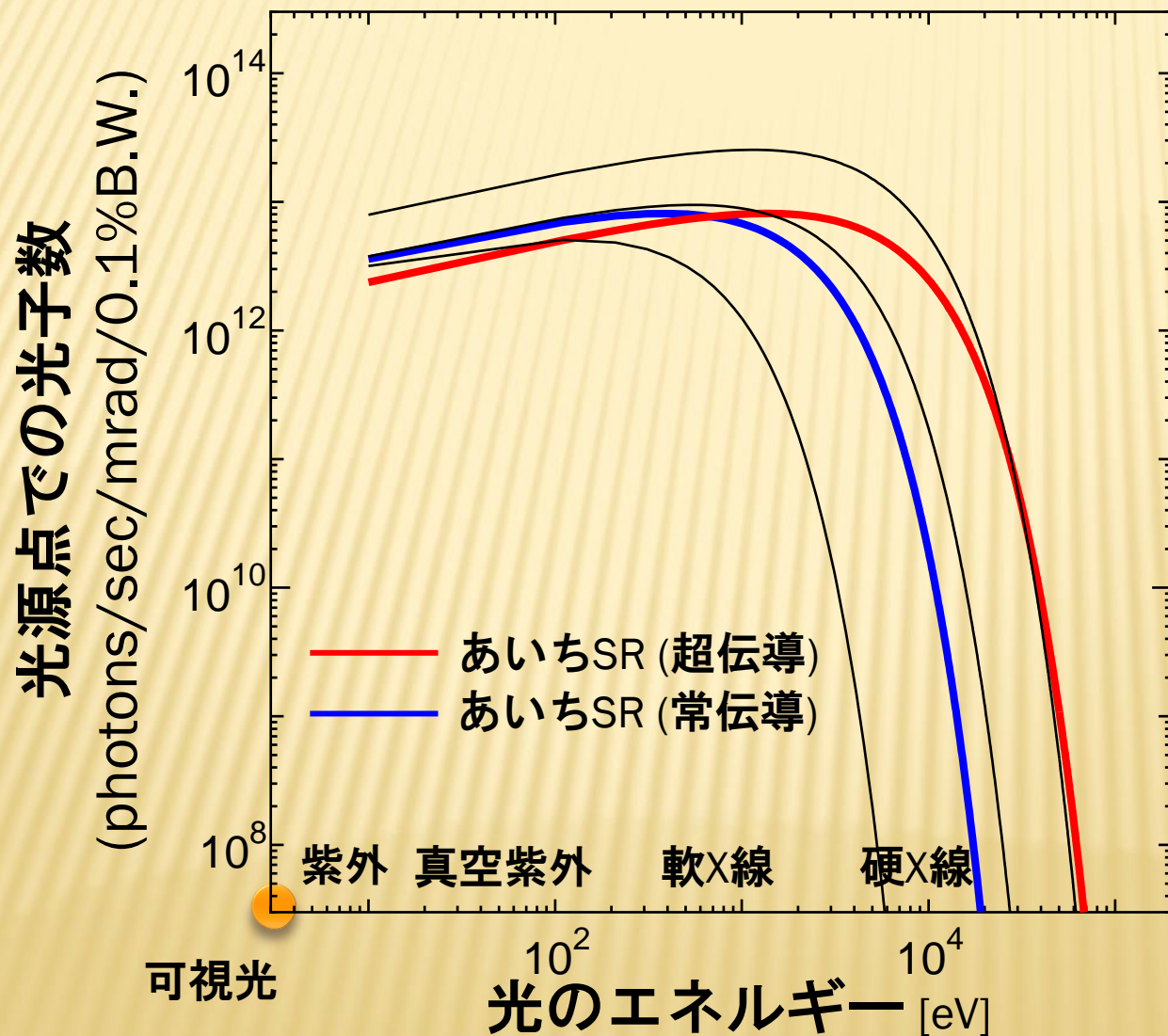
/0.1%B.W. : 0.1%バンド幅あたり

厳密にある一つのエネルギー

(例えば 10.000000000000000000keV)の光の強度は、ほぼ 0
考えているエネルギーの前後に少し幅を設けて考えて、
その幅にはいるエネルギーを持った光を数える。

10keV の光に対して、 $1 \times 0.1\% \text{B.W.}$ を考えるということは、
 $10\text{keV} / 1000 = 10\text{eV}$ の幅(10keV +/- 5eV)に入る光を考える。

放射光のスペクトル



あいちSR BL5S1の場合

光を集める幅 : 2mrad
バンド幅 $\Delta E/E$: 0.0001

ピークになる 4keV 程度で

$$8 \times 10^{12} \times 2 \times 0.1 \text{ p/s} \\ = 1.6 \times 10^{12} \text{ p/s}$$

(試料位置での実測は
 $5 \times 10^{10} \text{ p/s}$ 程度)

放射光の特徴

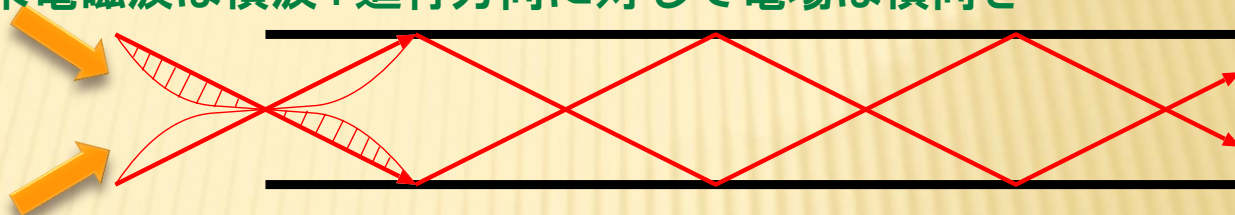
- 指向性の強い光
- 非常に強い光
- 非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- パルス光
- 強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)

加速器

線形加速器(高周波加速空洞、導波管)

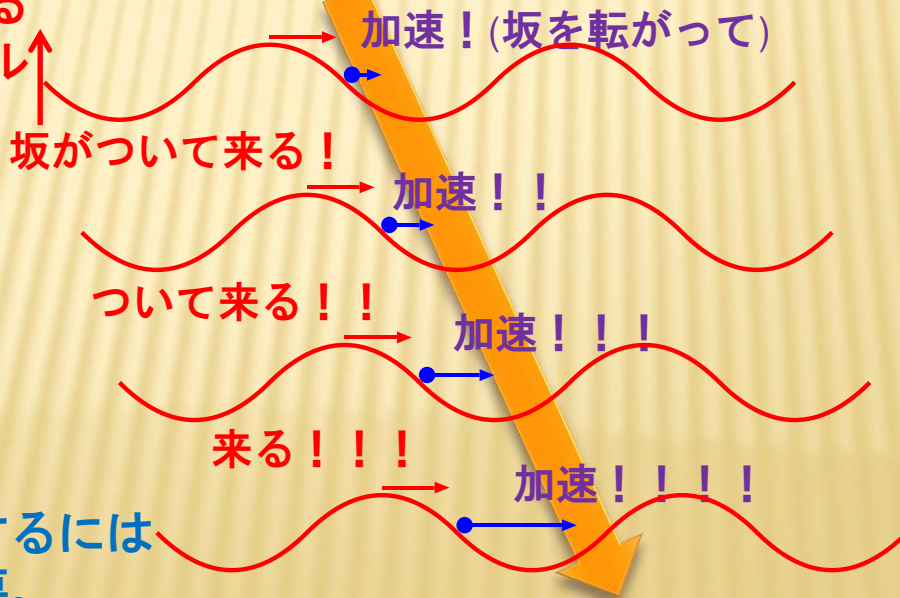
本来電磁波は横波：進行方向に対して電場は横向き

金属の筒(導波管)に
2方向から電波
(マイクロ波)を入射。



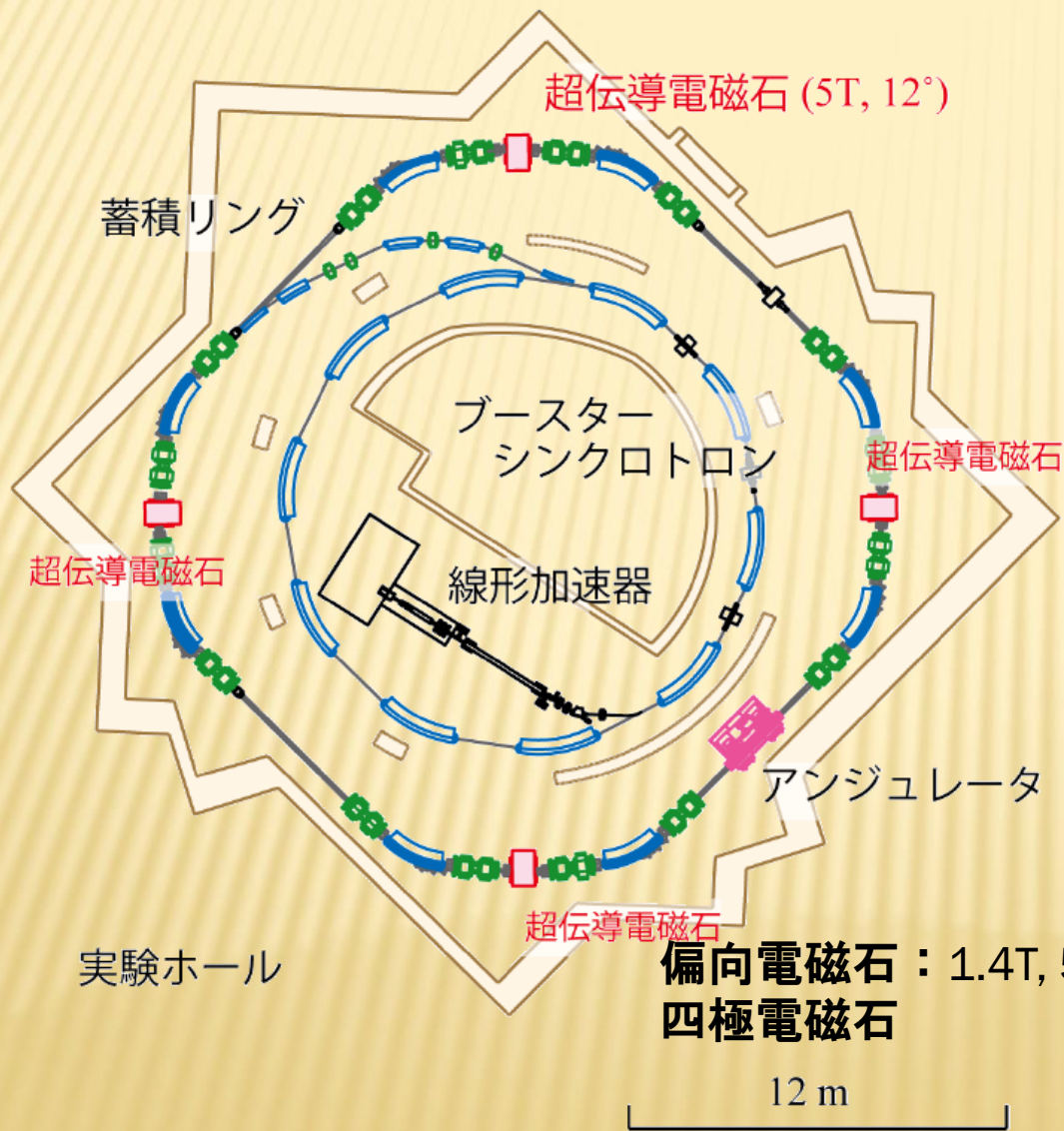
二つの波が合成されて管の中の電場は管に沿った方向になる

電子が感じる
ポテンシャル↑



高エネルギーに加速するには
なが～い加速器が必要。

実際のシンクロトロン(あいちSR)



直線加速器 : ~50MeV

ブースター
シンクロトロン : ~1.2GeV

蓄積リング : 1.2GeV

**沢山の加速器の
集まり！**

電子が走るのは超高真空の
細いパイプの中

放射光の特徴

- 指向性の強い光
- 非常に強い光
- 非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- パルス光
- 強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)

挿入光源

周回軌道を作るのに必要な磁石 (偏向電磁石) 以外の磁石を、光を発生させるためだけに入れる。



- **ウィグラー** (Wiggler)
発生する光の指向性の幅 $1/\gamma$ より大きく
電子/軌道を揺さぶる
- **アンジュレータ** (Undulator)
沢山の磁石で $1/\gamma$ より小さく電子/軌道を
揺さぶる

挿入光源(ウィングラ)

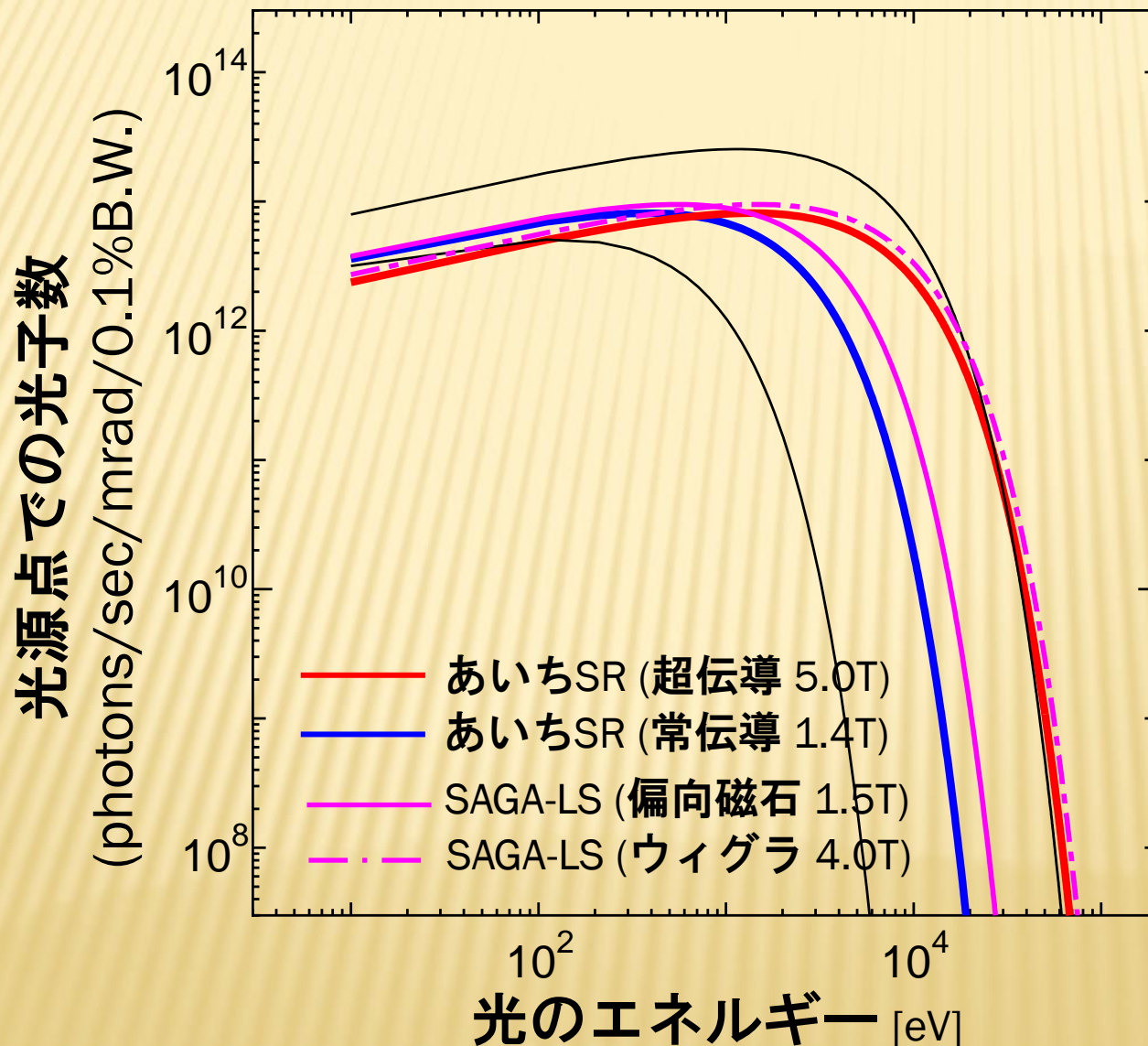


強い磁石で
大きく進路を変える

進路が曲がる角度 θ が、光の広がり幅 $1/\gamma$ より大きい
ので、出て来る光は重ならない。(干渉しない)

1. 単純に光の強度を上げる
2. 偏向電磁石とは違う磁場の磁石を使い、
エネルギーのピーク位置が違う光を得る
(ほとんどの場合、高エネルギー化に使用)

挿入光源(ウィングラ)



あいちSR (超伝導)
1.2 GeV, 5T

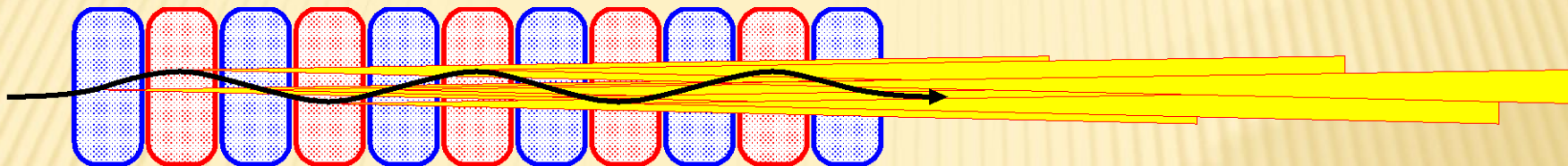
SAGA-LS (Wiggler)
1.4 GeV, 4T

$$\varepsilon[\text{keV}] = 0.665 E^2 [\text{GeV}] B [\text{T}]$$

を使ってみる。

あいちSR : 5.99keV
SAGA-LS : 5.21keV

挿入光源(アンジュレータ)



この図は θ が $1/\gamma$ より大きくなってる

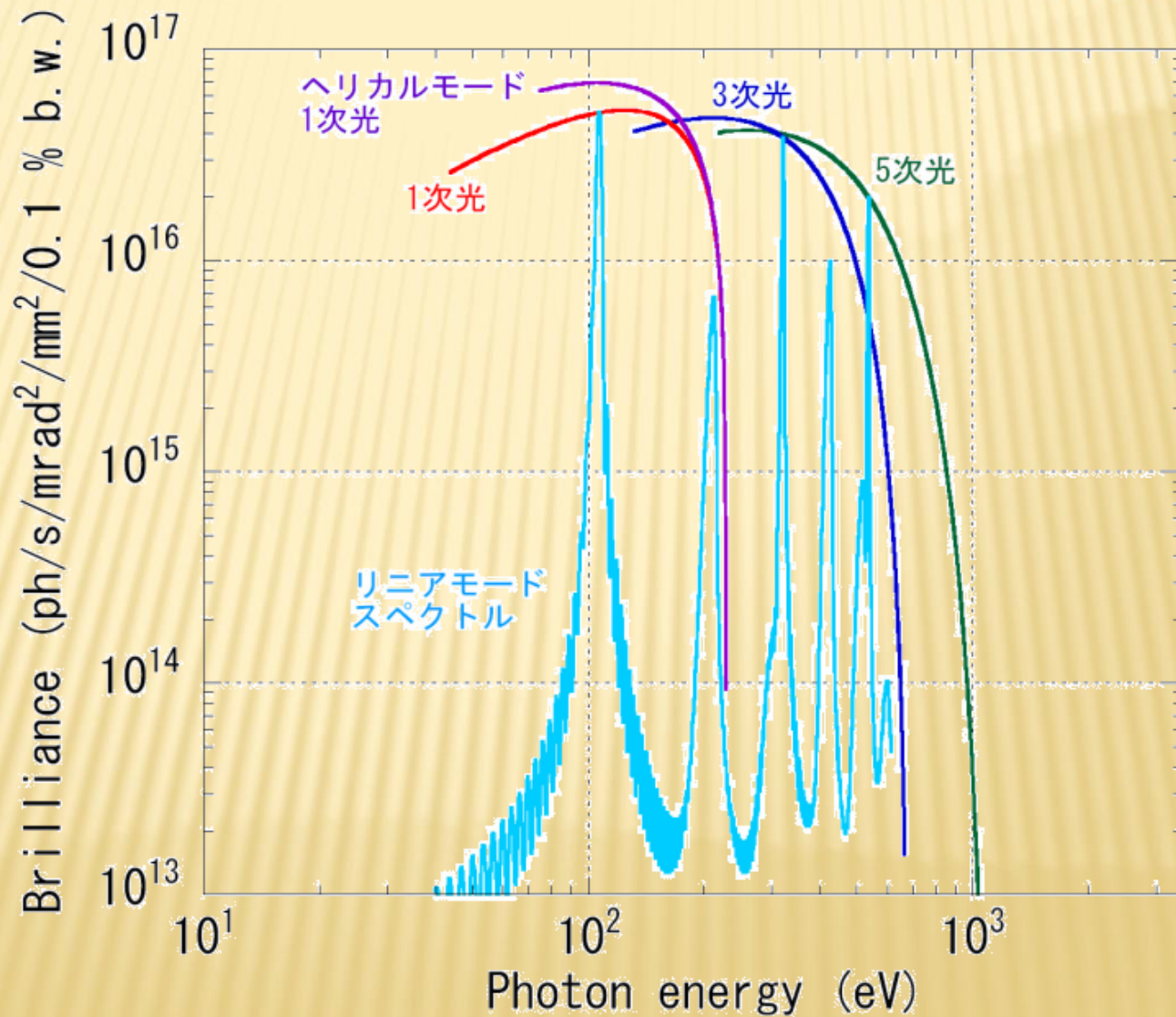
多数の弱い磁石で
何度も小さく進路を変える

進路が曲がる角度 θ が、光の広がり幅 $1/\gamma$ より小さい
ので、出て来る光が重なる。

(干渉して特定の波長にピークを持つ、指向性が強まる)

1. 偏向電磁石よりも高い輝度とフラックスの光が出る
2. 磁場が弱いので出て来る光のエネルギーは小さい
3. 特定の波長にピークを持つので、
連続スペクトルにはならない
4. ギャップ(電子が通る隙間)の幅でエネルギー制御可能

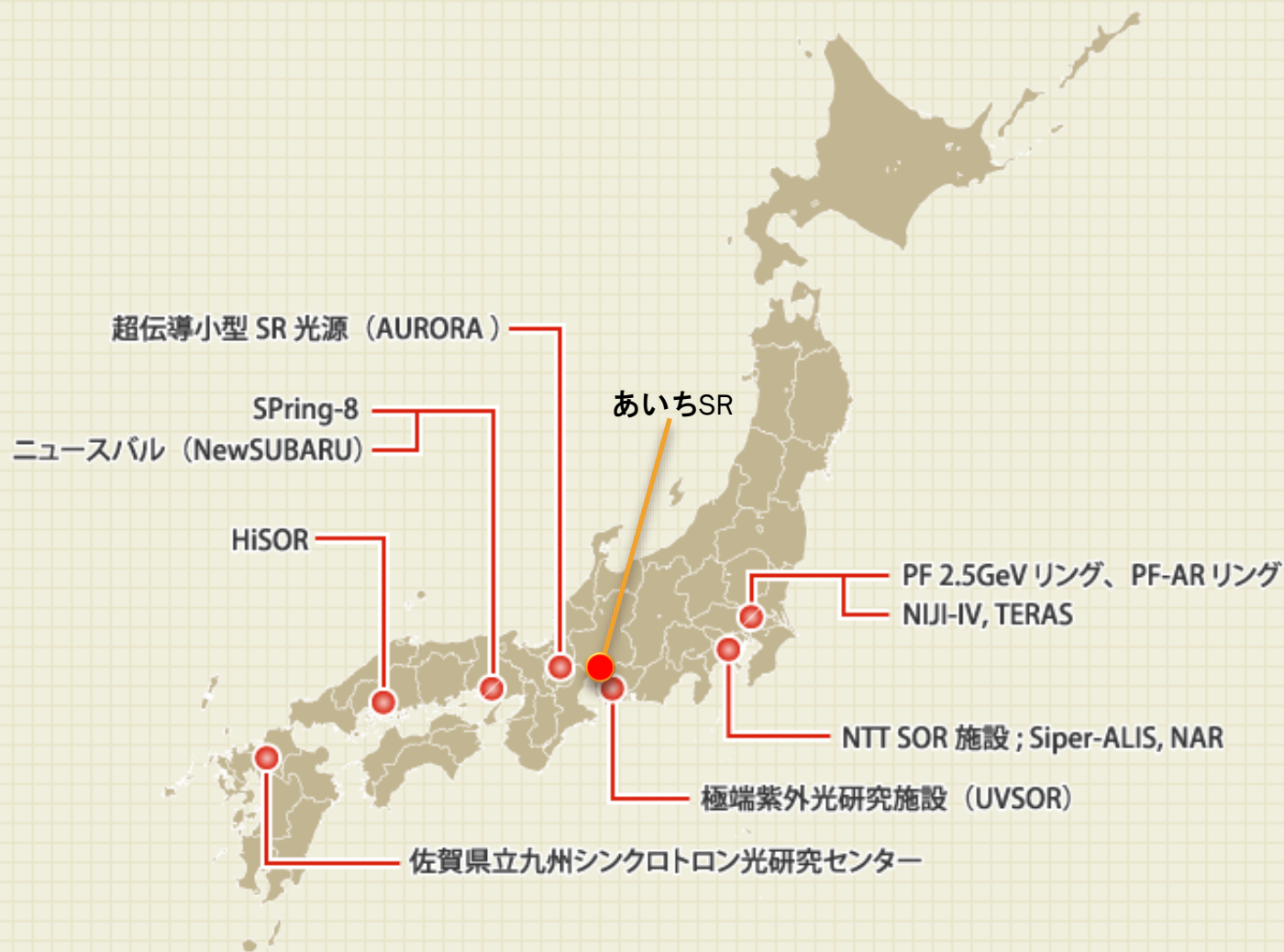
挿入光源(ウィングラ)



放射光の特徴

- 指向性の強い光
- 非常に強い光
- 非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- パルス光
- 強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)

日本の放射光利用施設

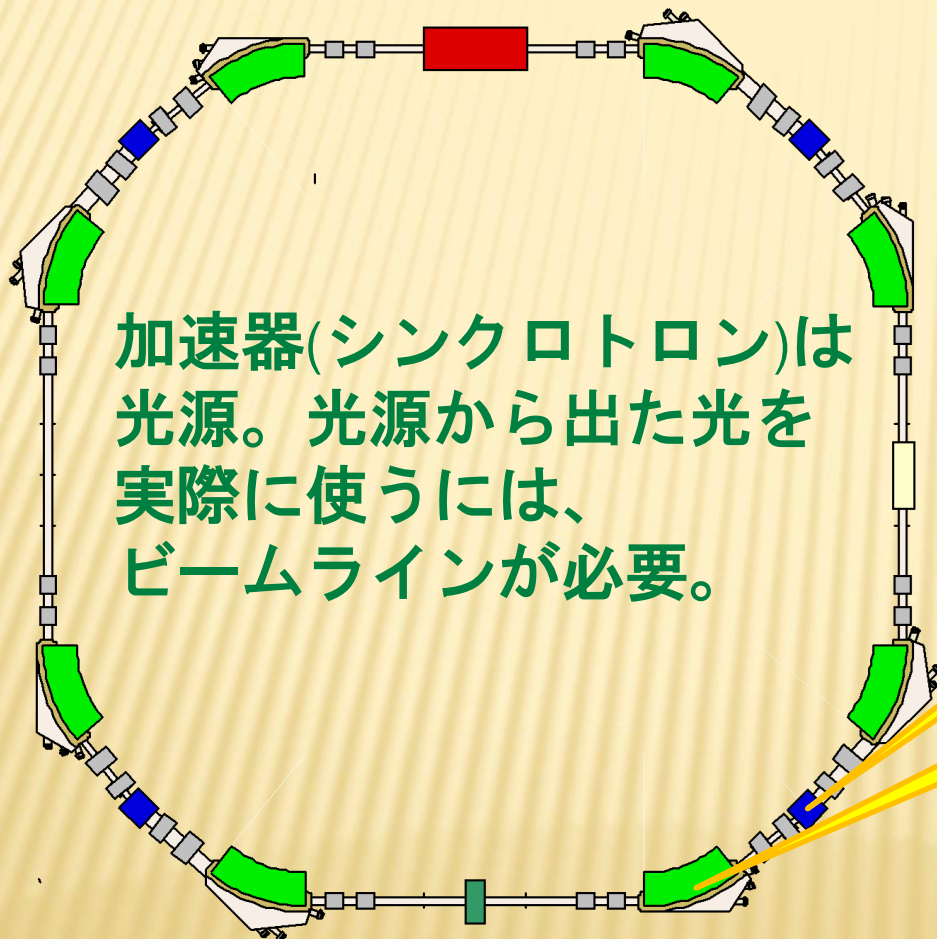


世界の放射光利用施設



<http://commune.spring8.or.jp/about/features.html> より

放射光の利用・応用

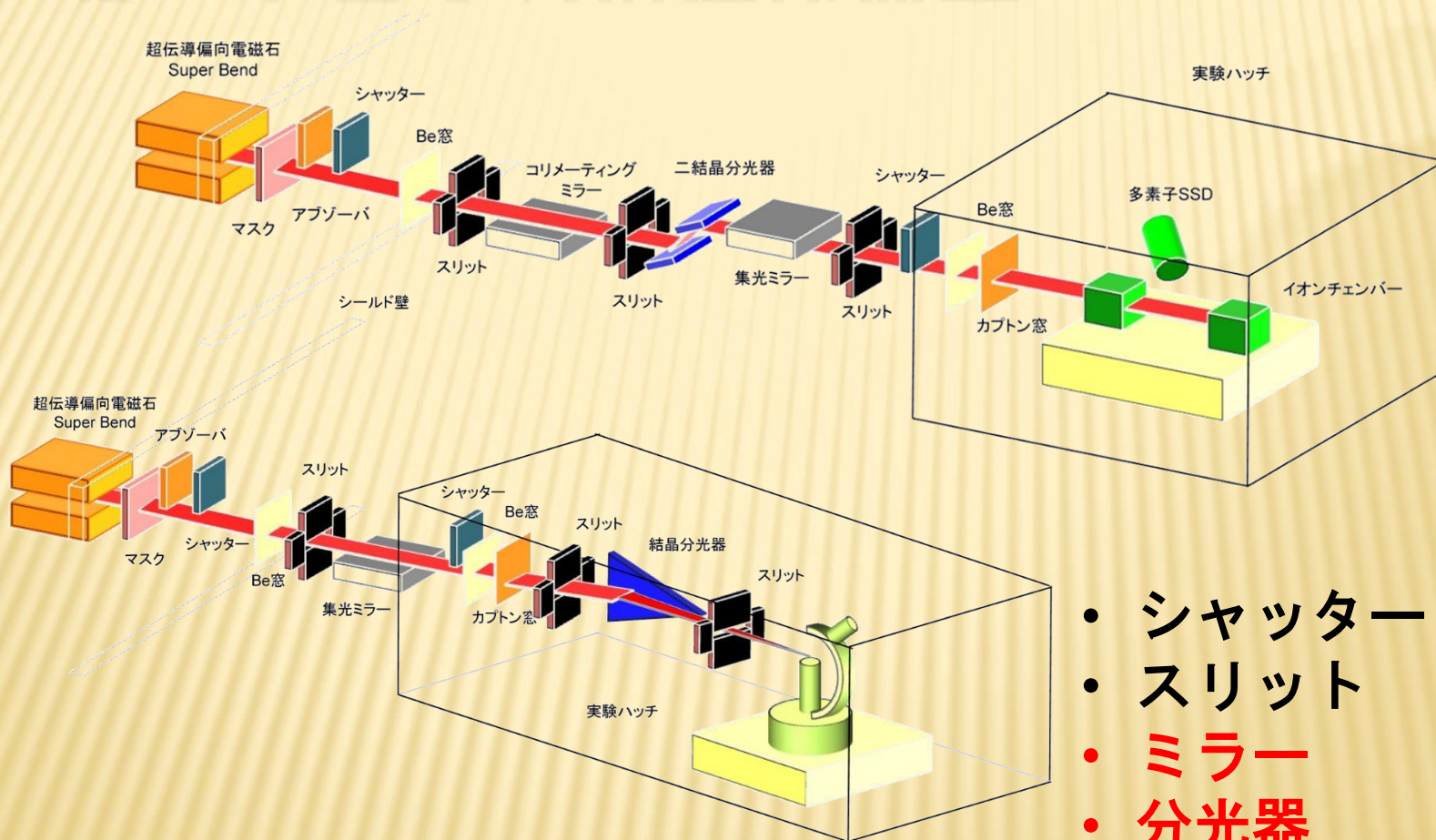


加速器(シンクロトロン)は光源。光源から出た光を実際に使うには、ビームラインが必要。

用途に応じて、この部分をどう作るか準備するかが重要



ビームラインの構成要素



- シャッター
- スリット
- ミラー
- 分光器
- エンドステーション
実験ハッチ内の諸要素

ビームラインの構成要素(分光器)

エネルギーの決まった(単色化された)
光を取り出す装置

- **結晶分光器**

結晶の格子定数定数程度の波長の光(X線)を
回折する。

0.1～1nm程度以下(1keV程度以上)

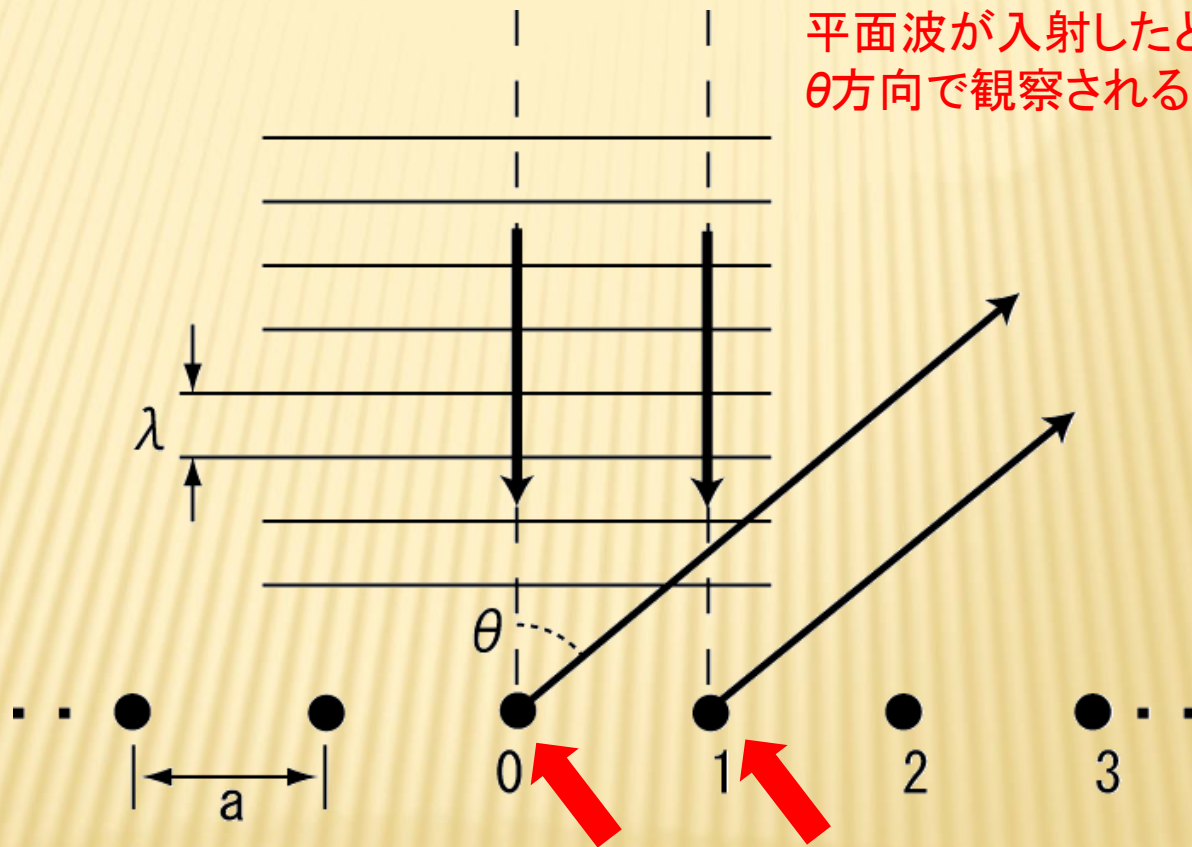
- **回折格子**

刻まれた格子間隔程度の光を回折する

1keV程度以下

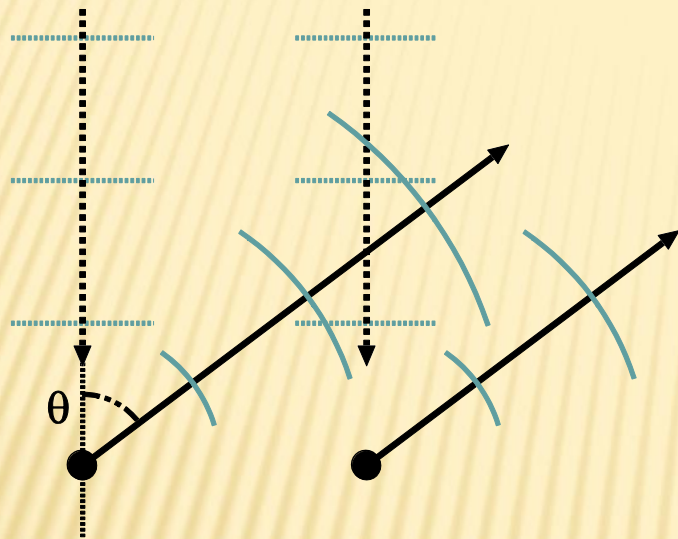
結晶による回折を単純化した例

一列に並んだ原子に、
平面波が入射したとき、
 θ 方向で観察される波の強度は？



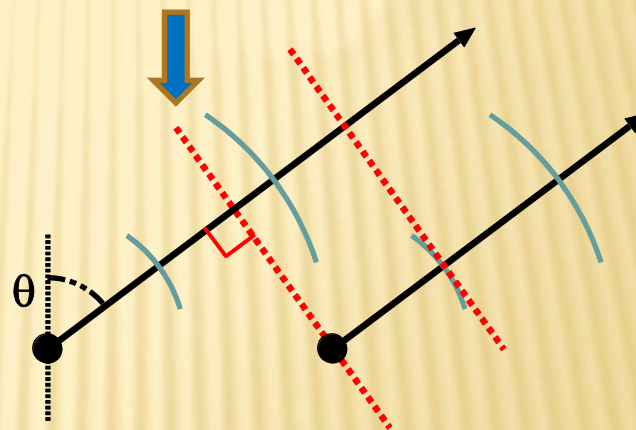
各原子位置で発生する球面波だけを考慮すれば良い

結晶による回折を単純化した例



各原子で発生した球面波が
 θ 方向に進む平面波の波面を
作れるかどうかを考える。

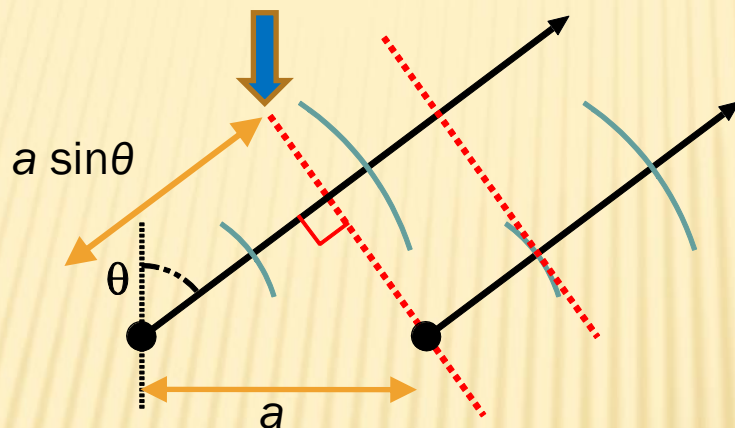
(仮想的な) 平面波の波面



θ 方向に進む平面波(があったとして)の
波面に、球面波の波面が揃うかどうかを
考える。

結晶による回折を単純化した例

(仮想的な) 平面波の波面



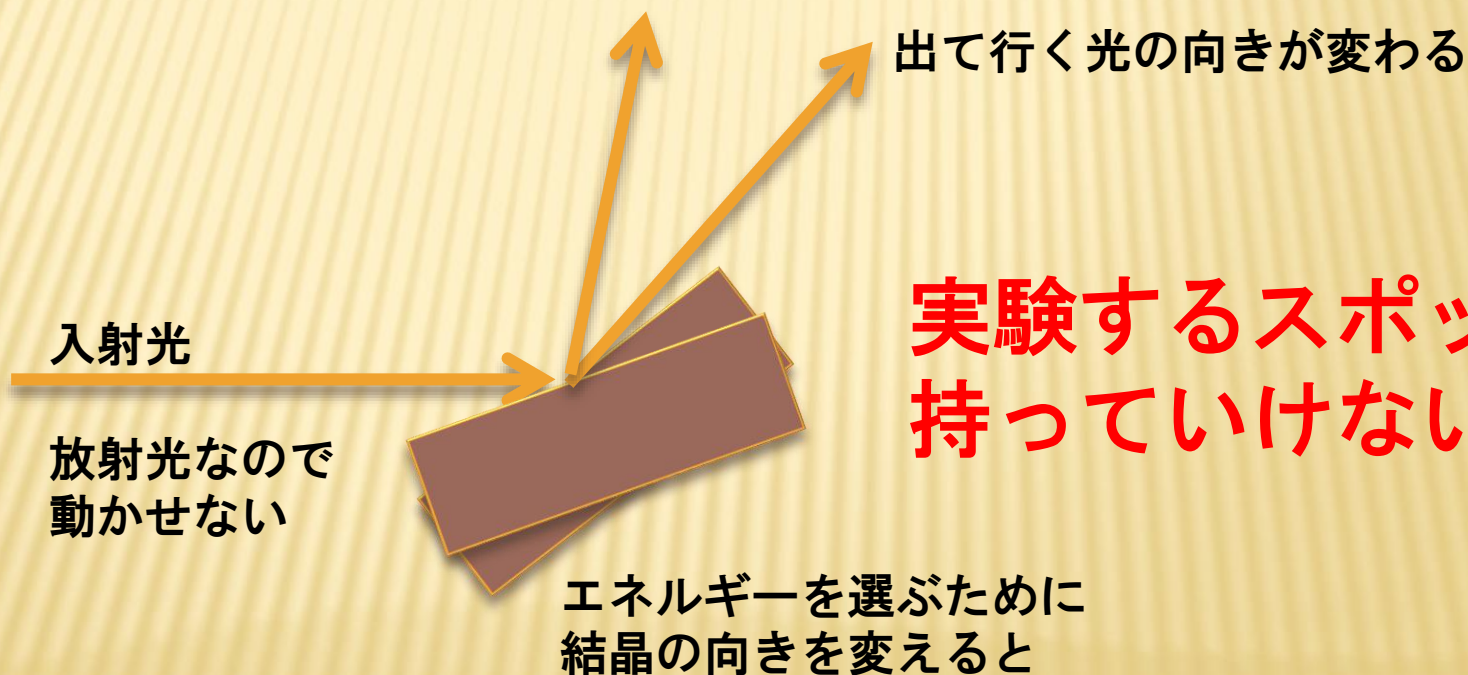
仮想的な平面波の波面の位置 (光路長: $a \sin \theta$) が、球面波の波面の間隔(λ)の整数倍に一致すれば良い。

$$a \sin \theta = n \lambda \quad (n \text{ は任意の整数})$$

光を入れる角度と取り出す角度で波長が決まる

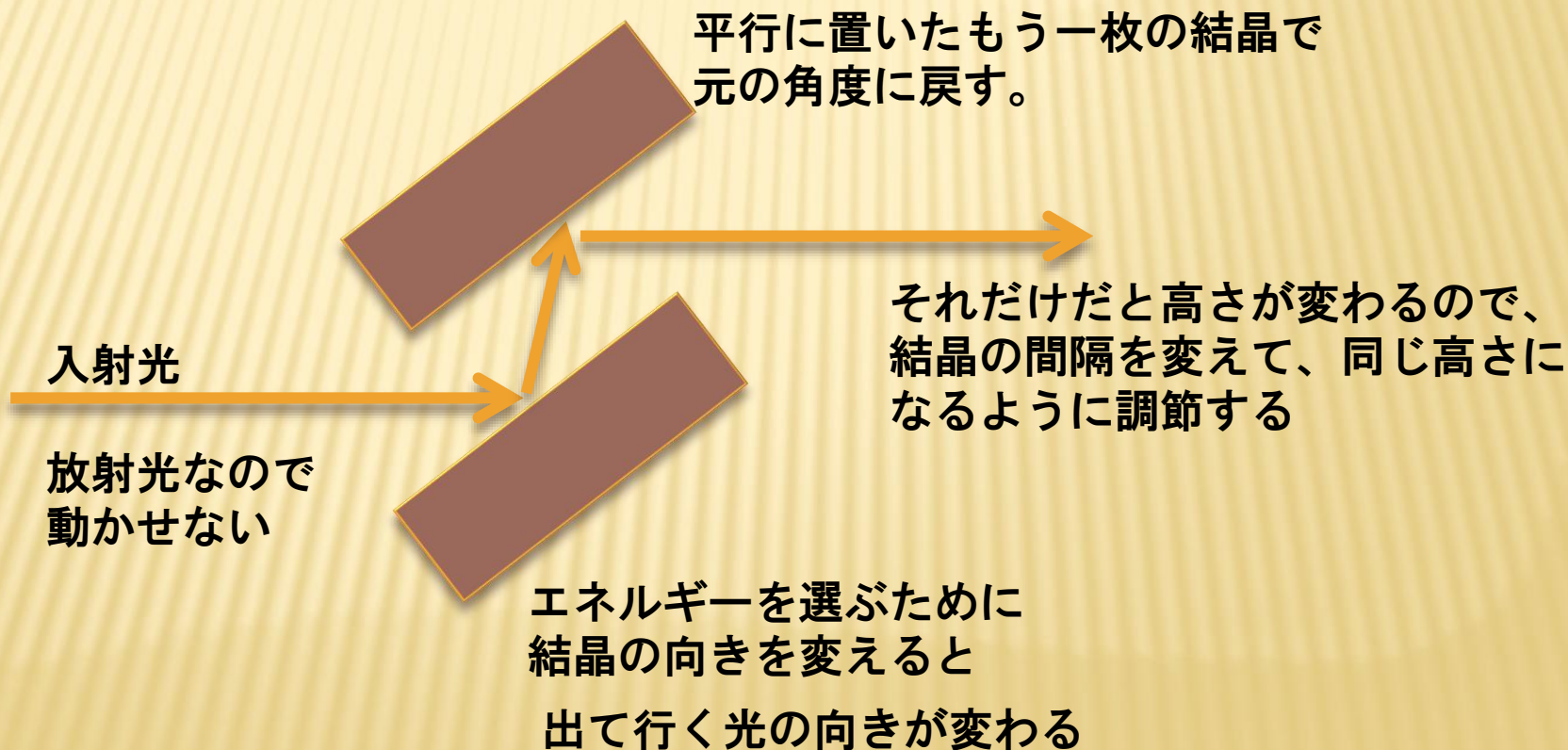
2結晶分光器

結晶が一つだけの分光器では
取り出す波長が変わると光が出て行く向きが変わる



2結晶分光器

結晶が一つだけの分光器では
取り出す波長が変わると光が出て行く向きが変わる



ビームラインの構成要素(ミラー)

放射光の集光や
高次光除去(フィルタ)を行う装置

放射光の集光

基本的に「レンズ」が使えない(吸収される)
可視光に使う様な普通の金属ミラーも使えない
(吸収される)

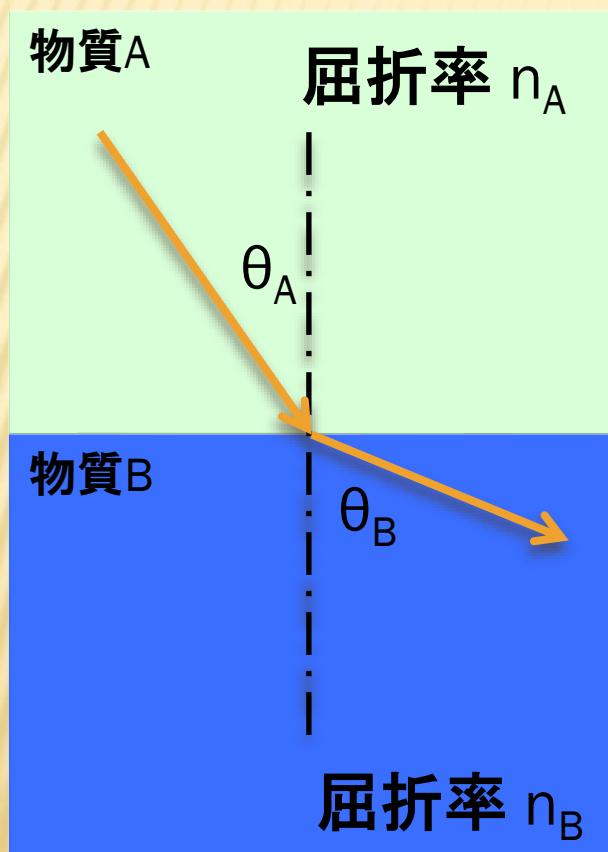
どうする？



全反射ミラーを使用する

ビームラインの構成要素(ミラー)

全反射



$$n_A \sin \theta_A = n_B \sin \theta_B$$

$n_A > n_B$ だと

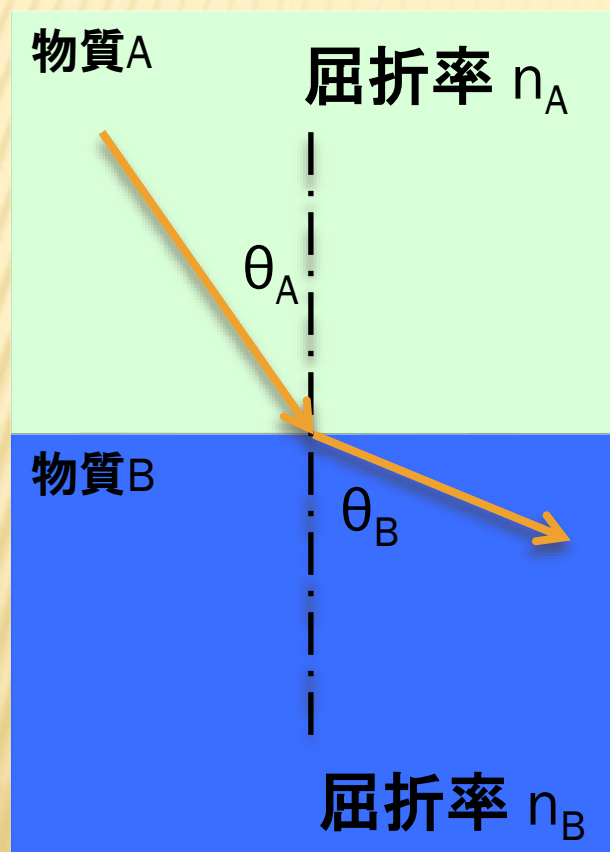
$$\sin \theta_B = \frac{n_A}{n_B} \sin \theta_A > 1$$

になるような角度範囲がある。

全反射！

ビームラインの構成要素(ミラー)

全反射



今考えているのは、
BがミラーでAは真空あるいは大気

$$n_A \simeq 1$$

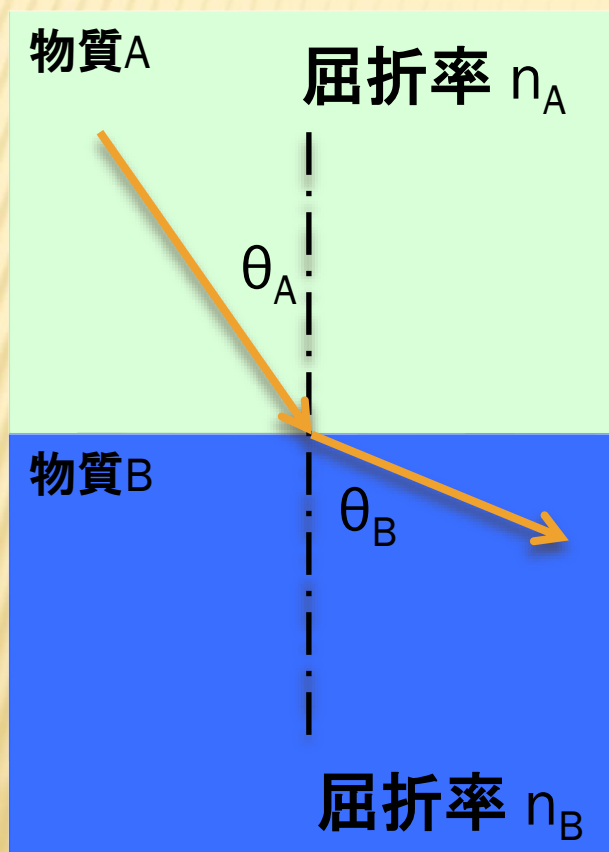
なので、 $n_A > n_B \Rightarrow n_B < 1$

幸いX線領域では $n_B < 1$

($n_A/n_B > 1$ なので、
物質中を走るX線の速さは
真空中の光速より速い！)

ビームラインの構成要素(ミラー)

全反射

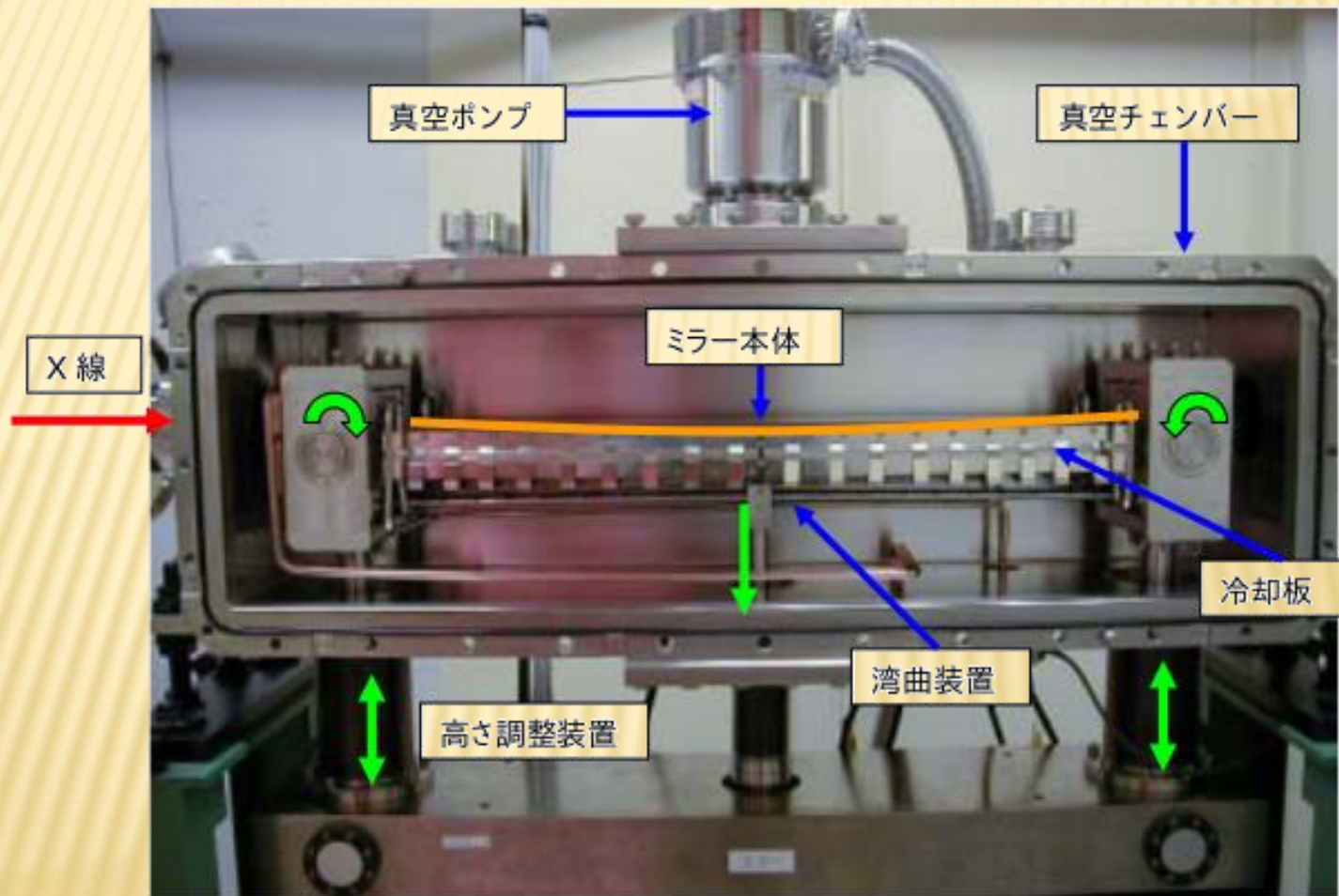


幸いX線領域では $n_B < 1$
ただしその差は $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$ 程度

➡ 表面すれすれに
光を入れないと全反射しない

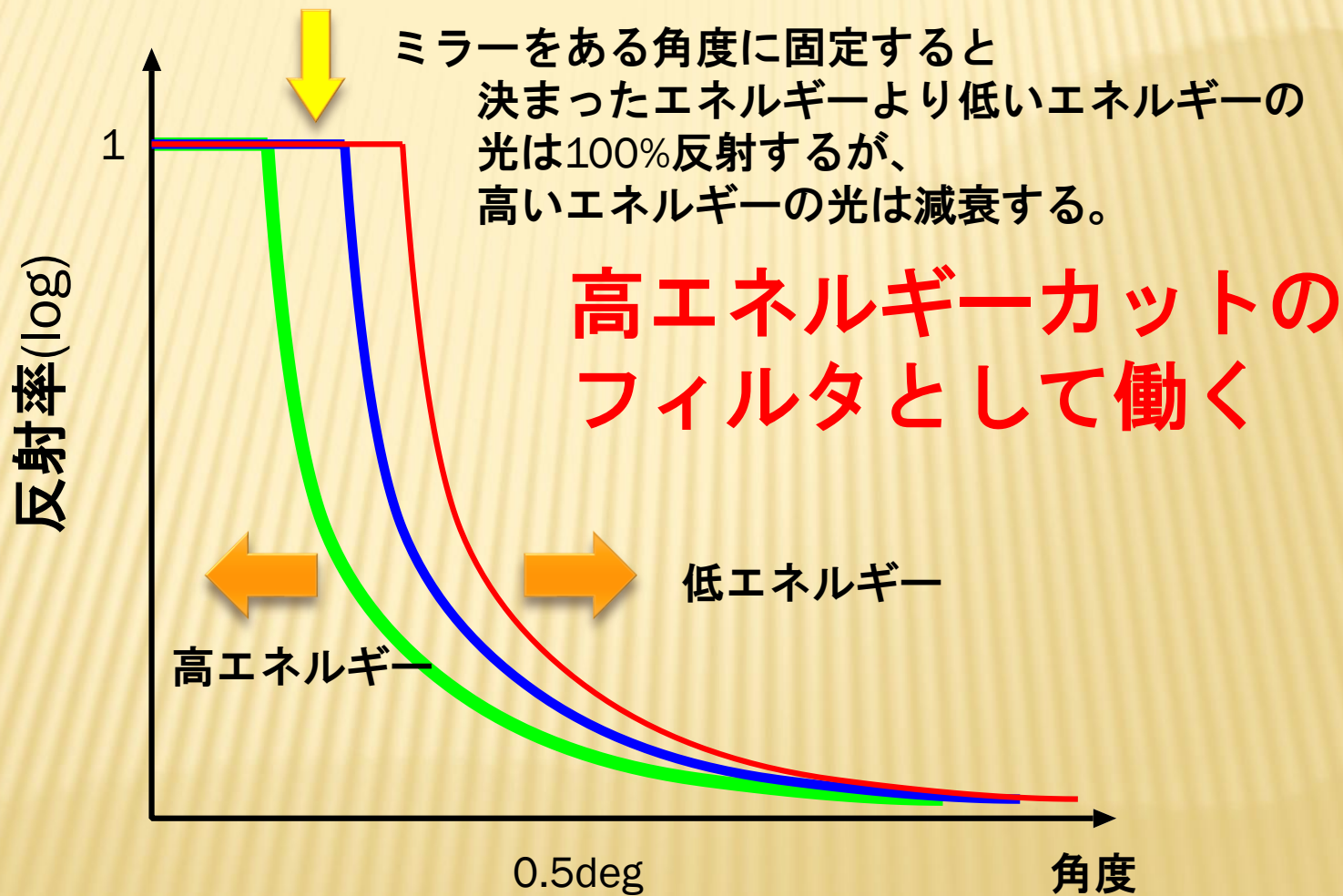
実際の入射角は数 mrad 程度
(1 mrad = 0.06 deg)

ビームラインの構成要素(ミラー)

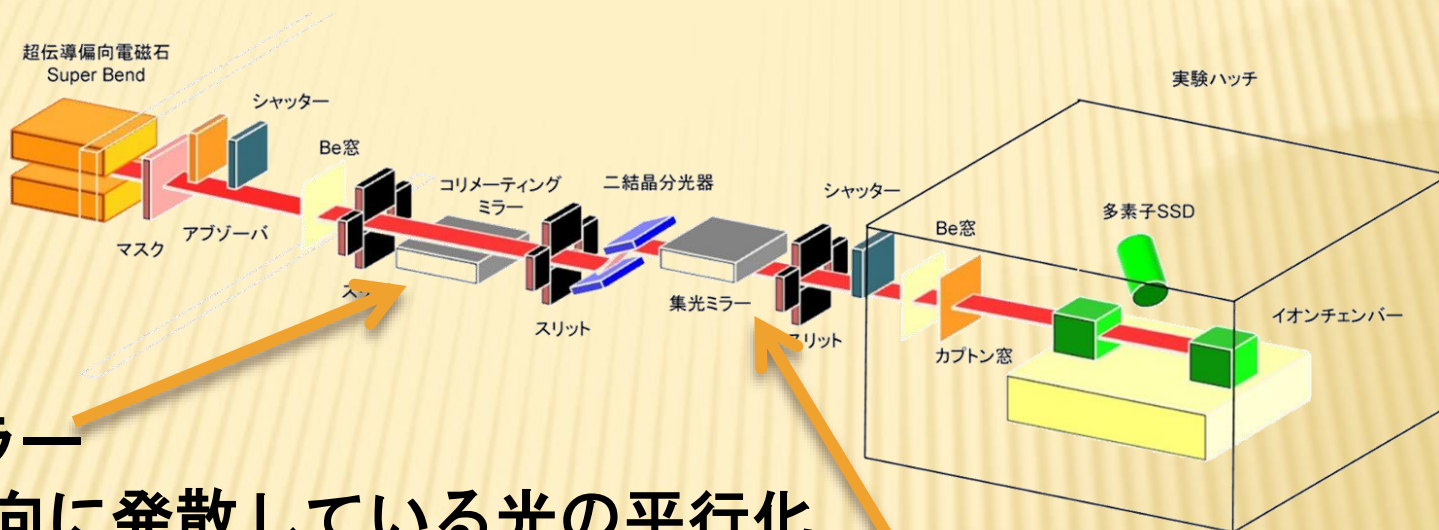


SPring-8 BL01B のミラー

ビームラインの構成要素(ミラー)



ビームラインの構成要素(ミラー)



第1ミラー

縦方向に発散している光の平行化
分光器に入射する光を平行に
高エネルギーのX線のカット
分光器が通す高次の光をカット

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$\lambda_1 = 2 \cdot \lambda_2 = 3 \cdot \lambda_3 = \dots$$

$$\lambda_2 = \lambda_1/2, \lambda_3 = \lambda_1/3, \dots$$

第2ミラー

試料位置への光の集光