

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？

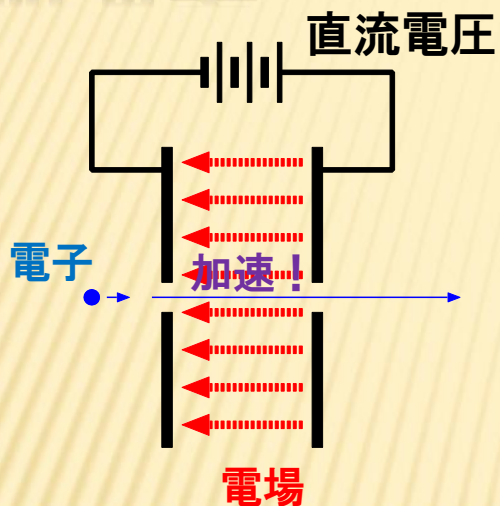
## × Synchrotron

➡ 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

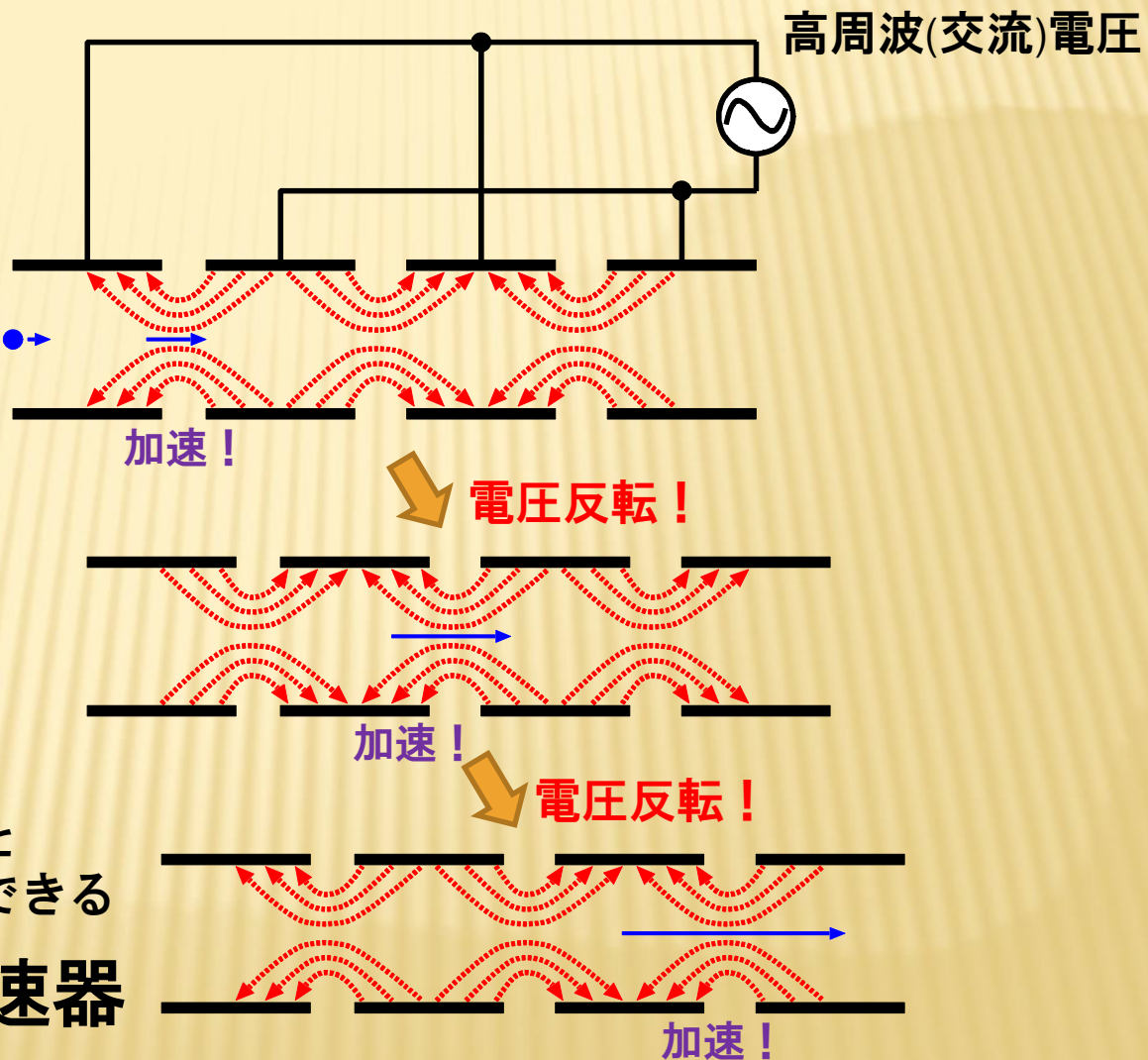
# 加速器



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

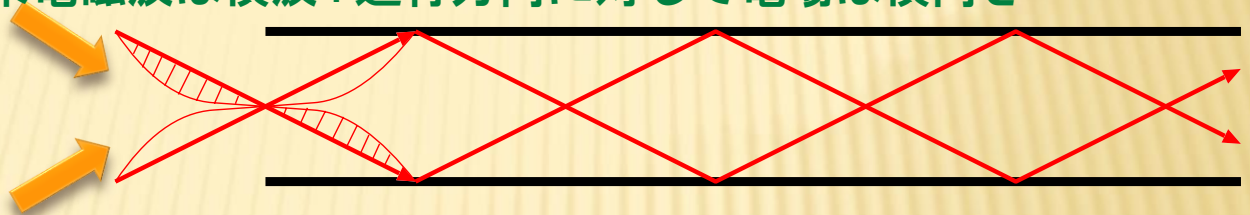


# 加速器

## 線形加速器(高周波加速空洞、導波管)

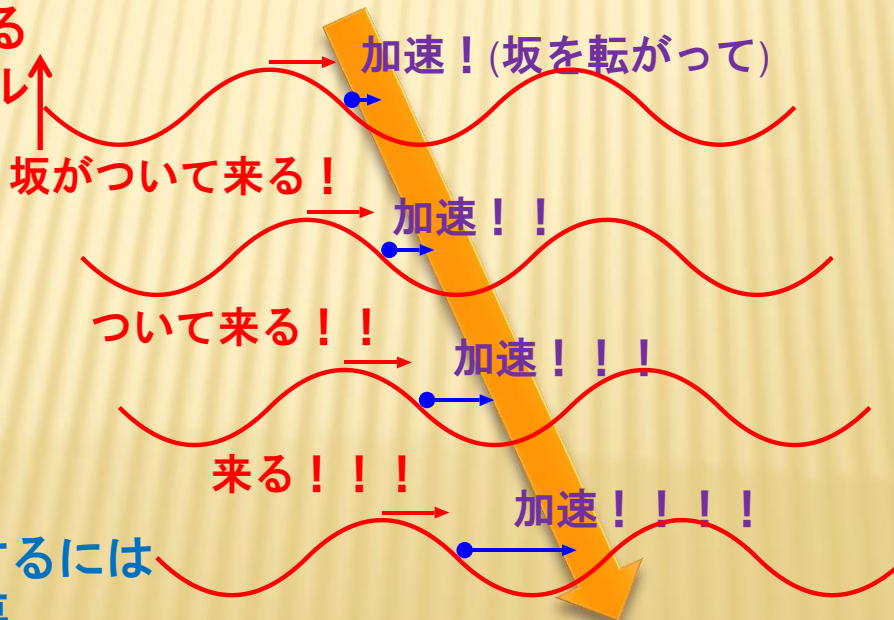
本来電磁波は横波：進行方向に対して電場は横向き

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

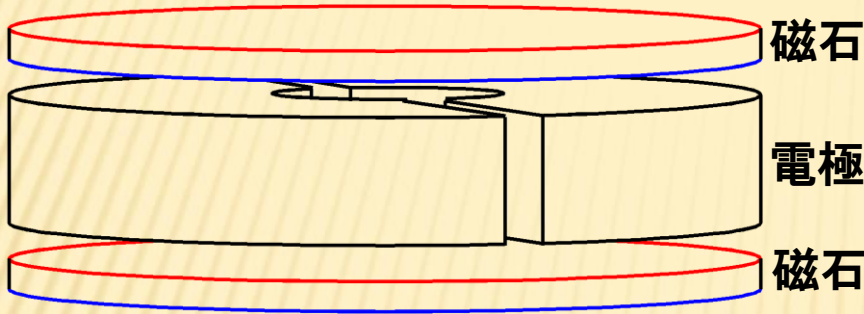
電子が感じる  
ポテンシャル↑



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

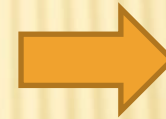
## 円形加速器：サイクロトロン



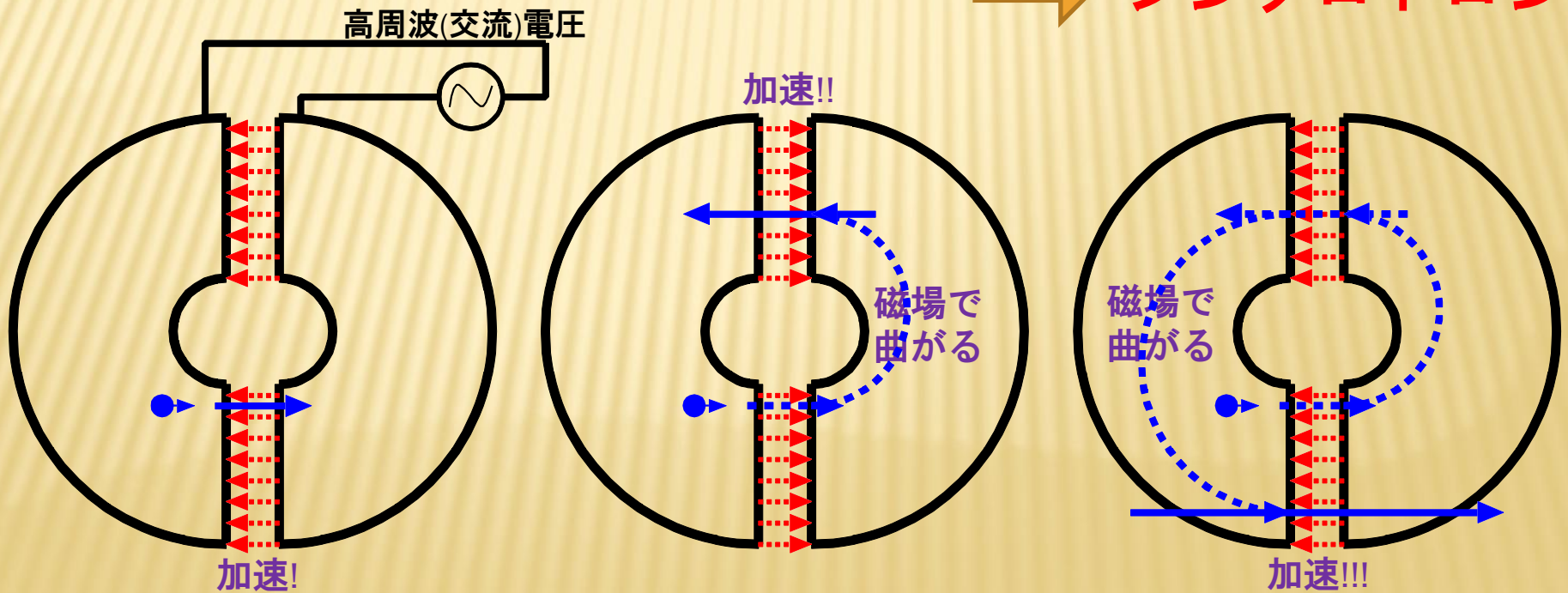
加速するに従って軌道が変わる。  
(加速し続けられない)



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

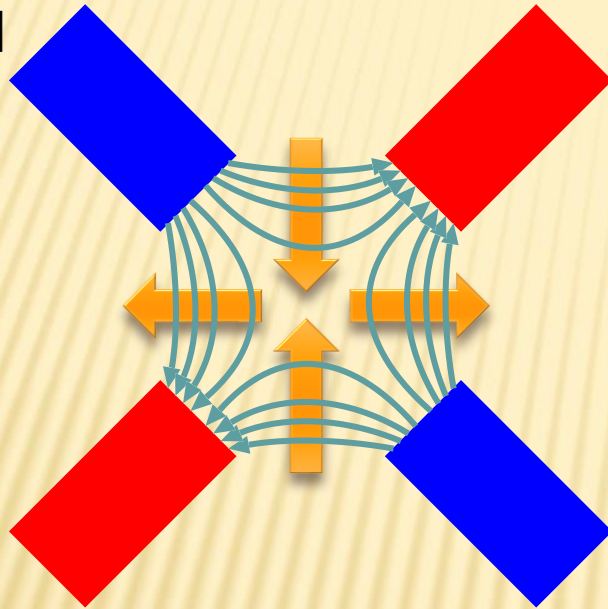
沢山の加速器の  
集まり！

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

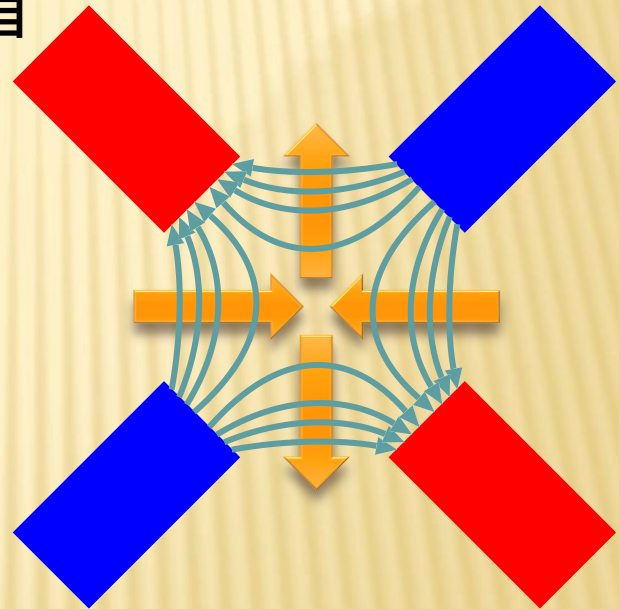
1組目



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

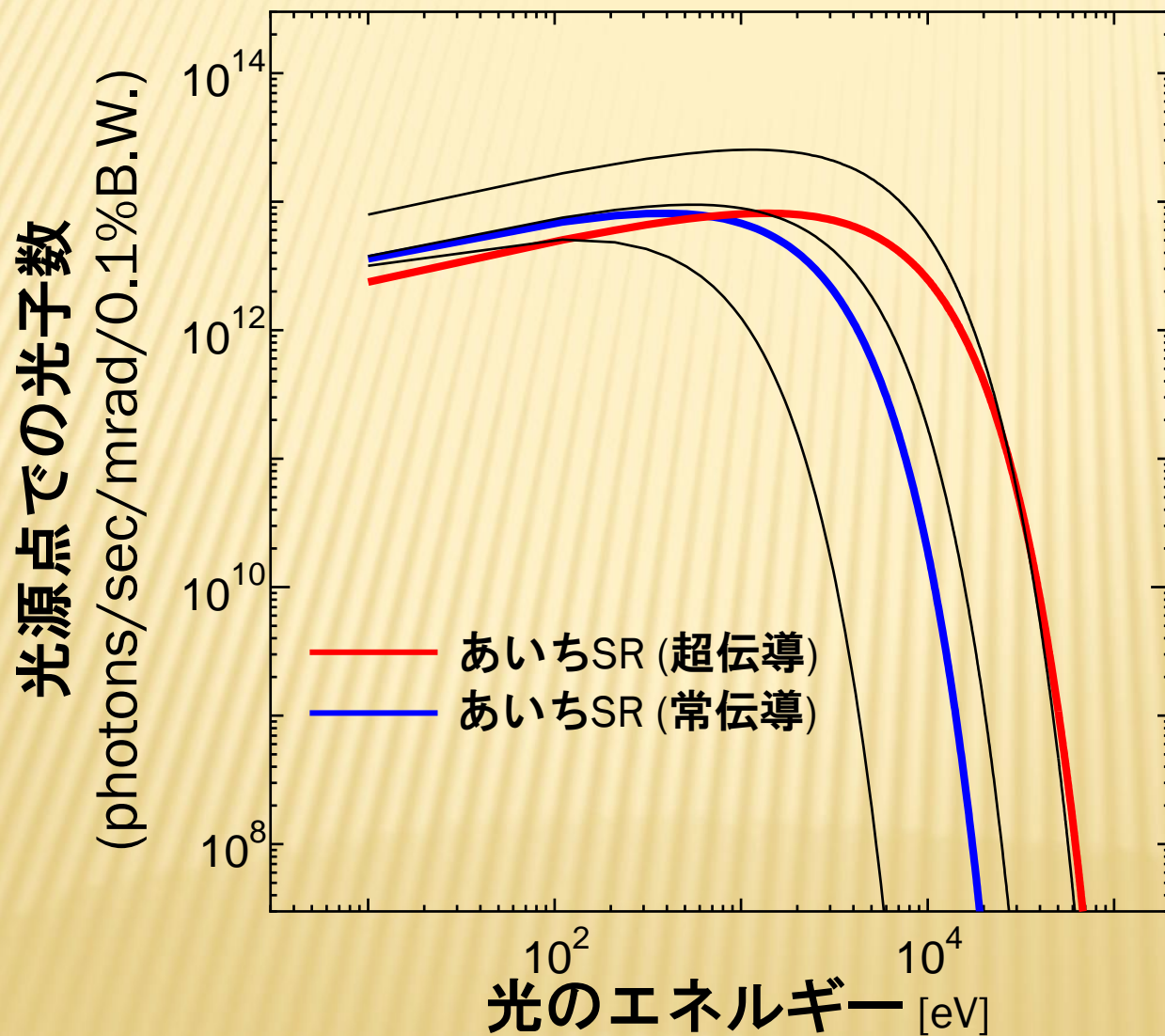
光が出る！

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

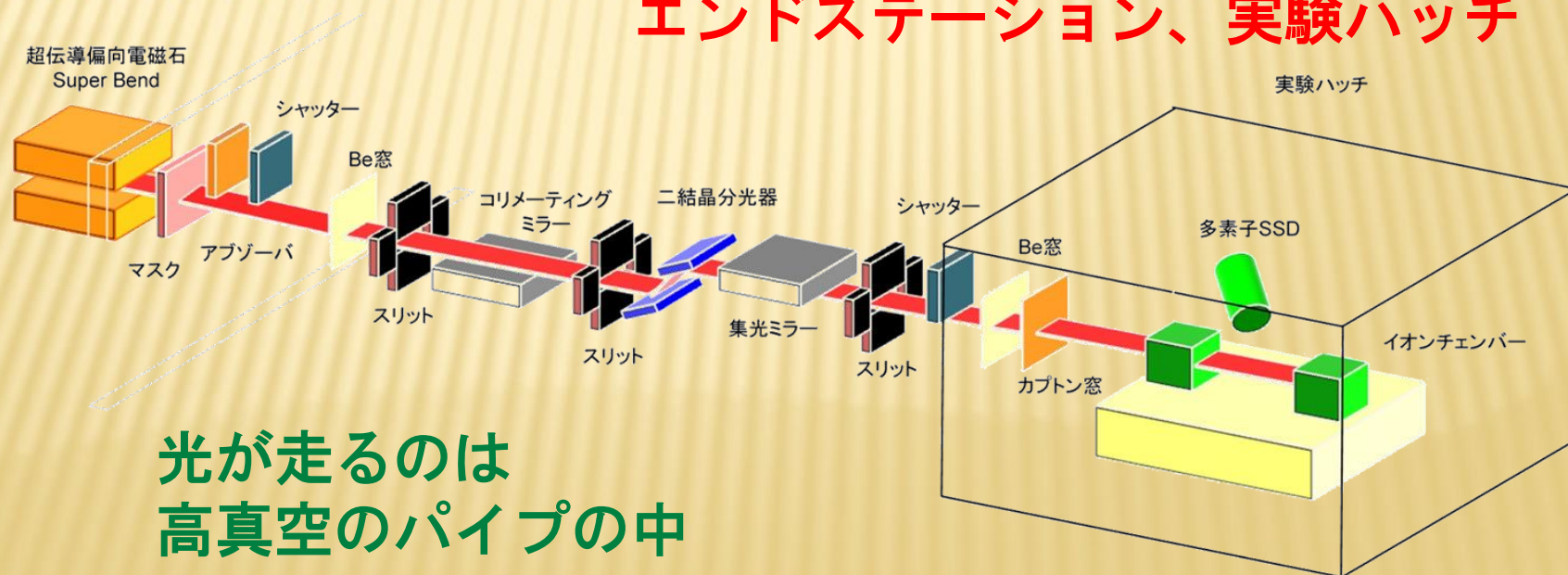


# 発生した放射光の使い方(1)

## 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**

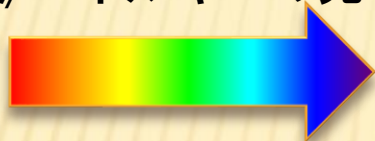


# 発生した放射光の使い方(2)

## 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



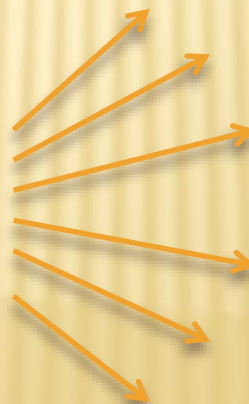
反応を見る  
透過/吸収  
蛍光  
二時電子....

### 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**

**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

**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**

**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

**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  
 結晶成長コントロール  
 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**



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!!**



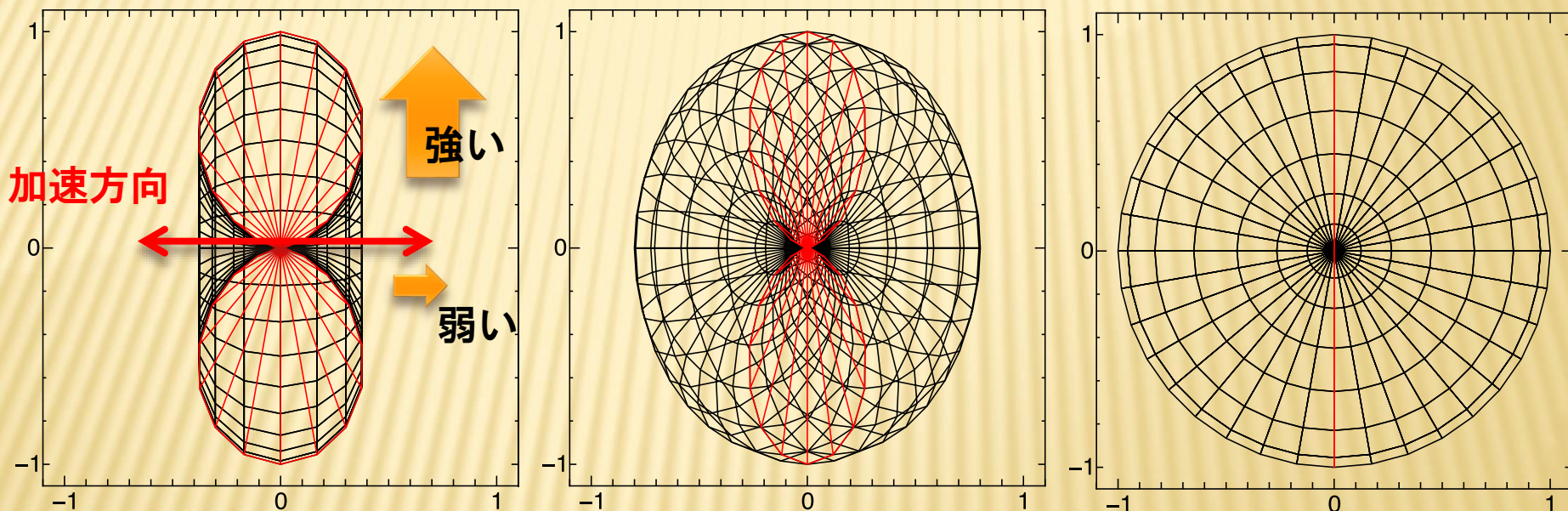
# 放射光の特徴(特徴を指した言葉ではないけれど)

- 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

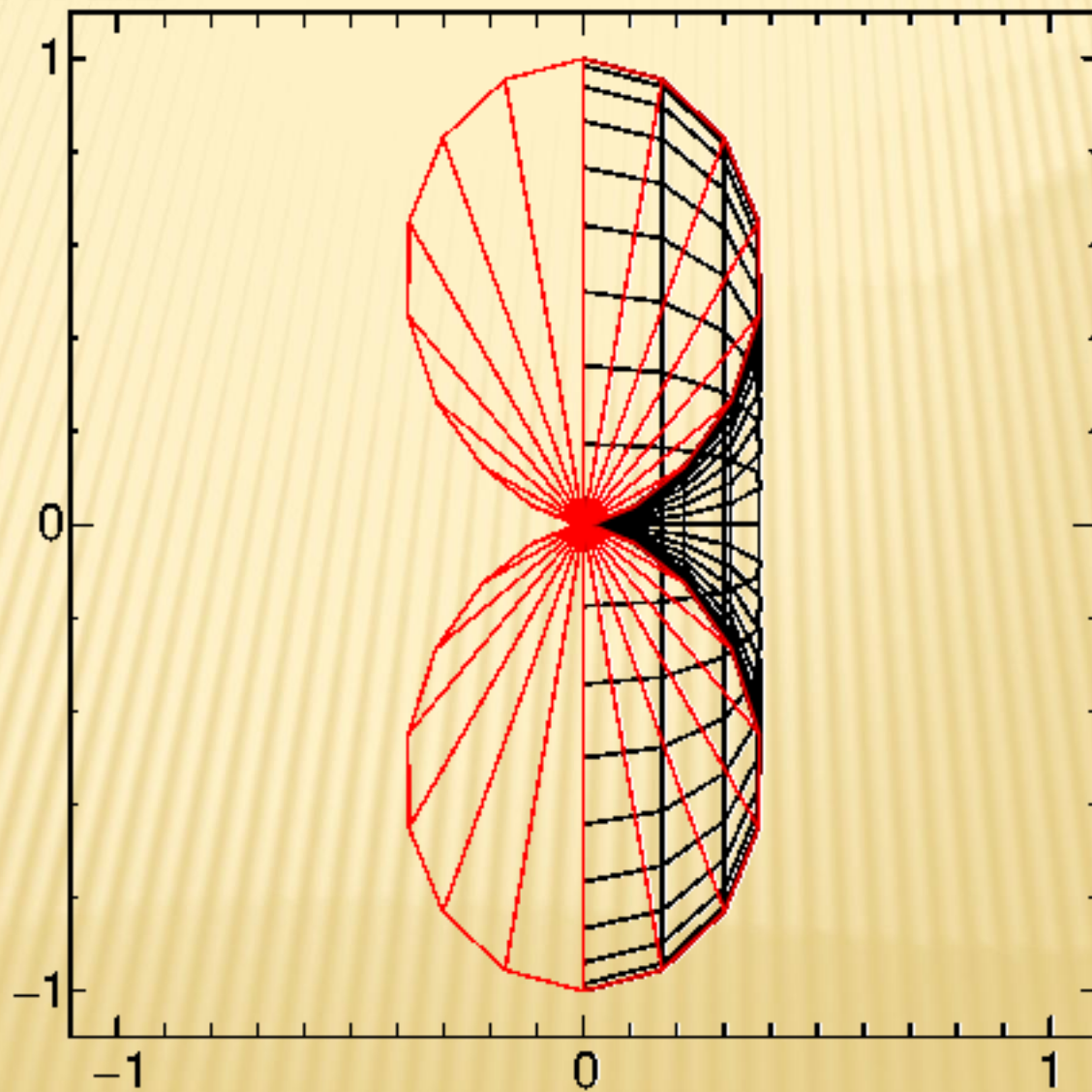
## 双極子輻射

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

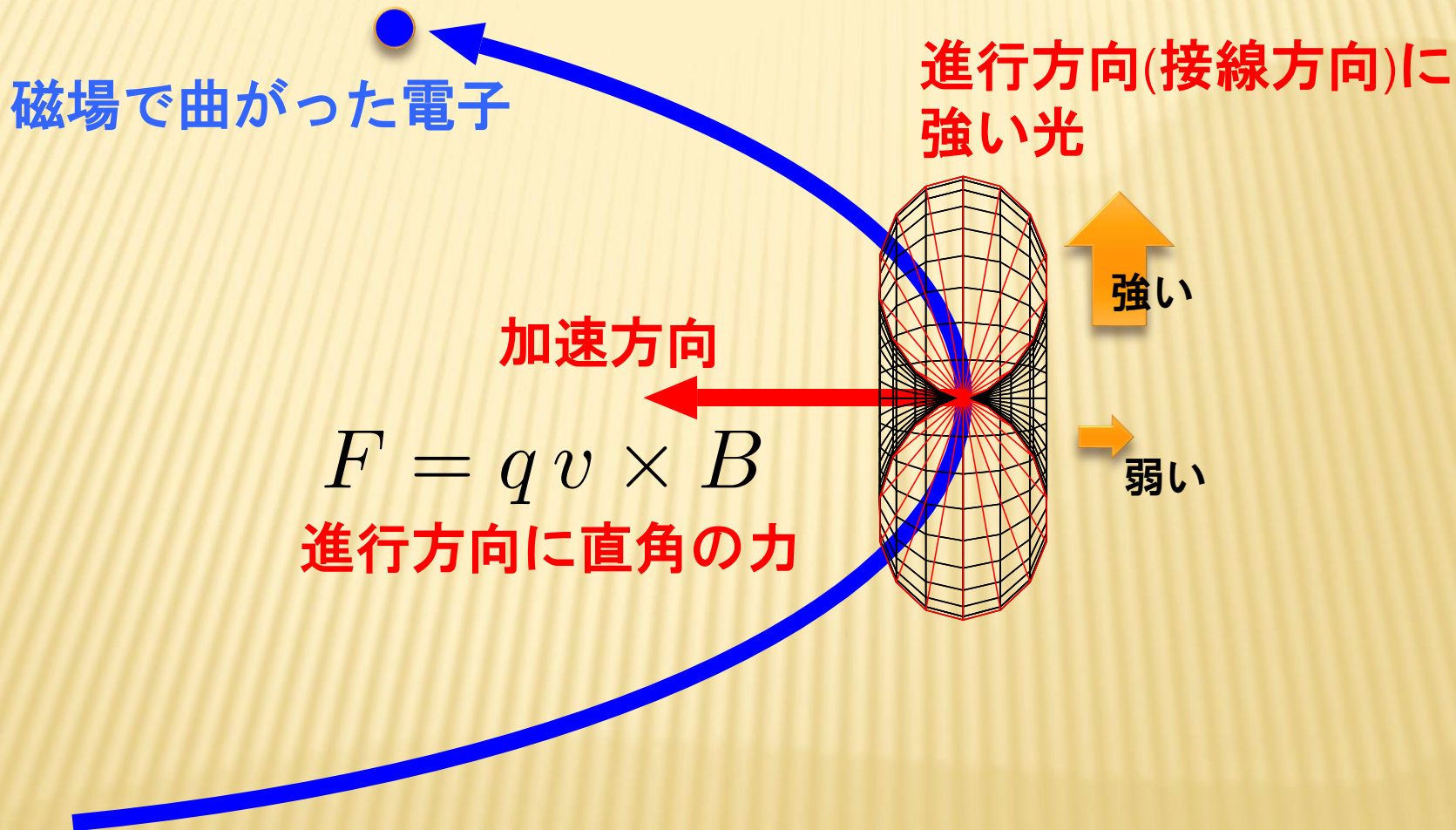


加速に沿った方向(赤矢印方向)には弱く、直角方向に強い。  
加速の方向(矢印)の周りには回転対象

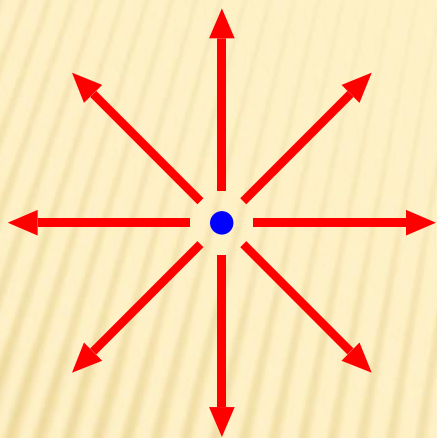
# 双極子放射



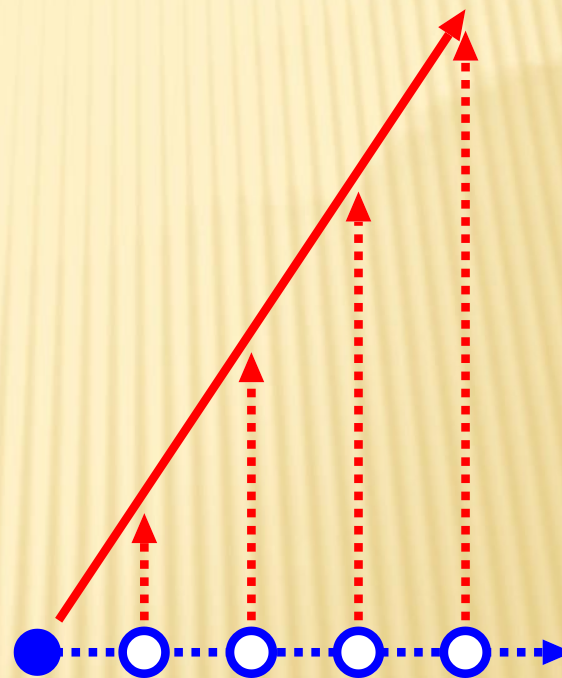
# 加速度を受けた電子からの放射



# 相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-



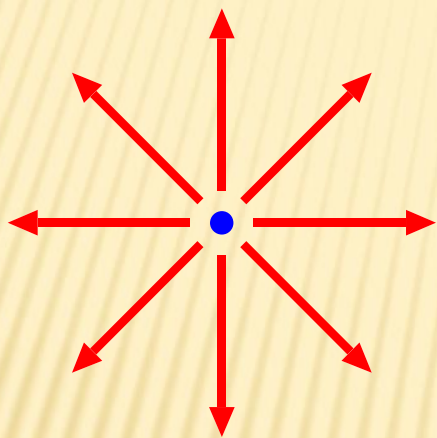
仮に、一個の電子が  
等方に光を出すと....



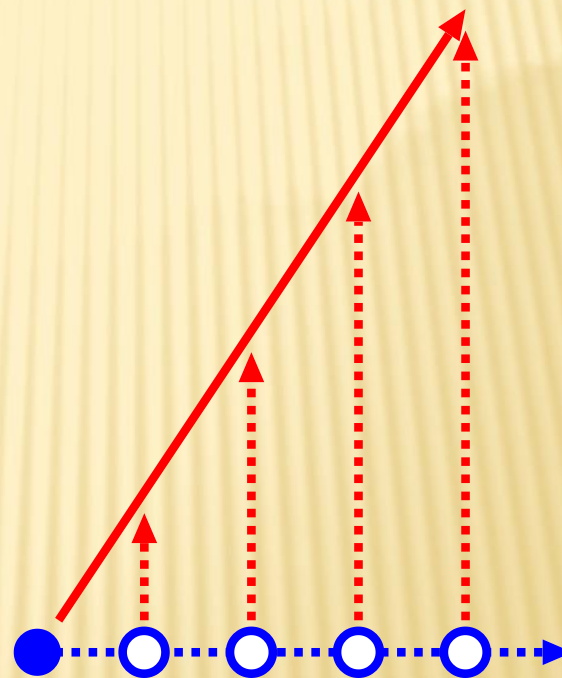
電子から真横に出た光は  
止まっている人から見ると  
前方に出たように見える。



# 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？**

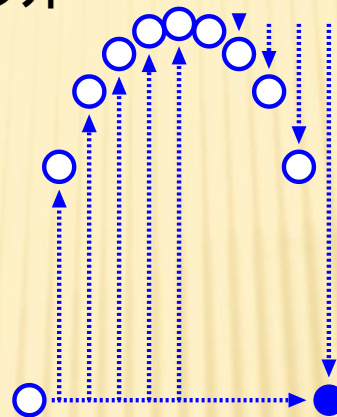
# 相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

電車の中



まっすぐ投げると  
まっすぐ落ちる

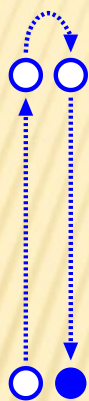
電車の外



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

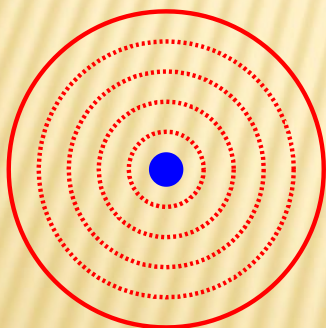
# 相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

電車の中

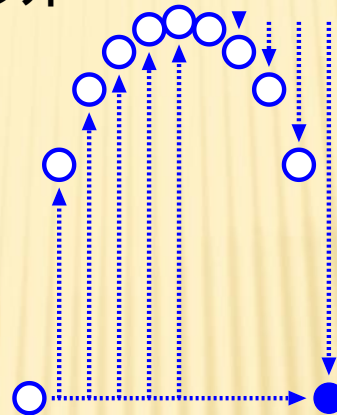


まっすぐ投げると  
まっすぐ落ちる

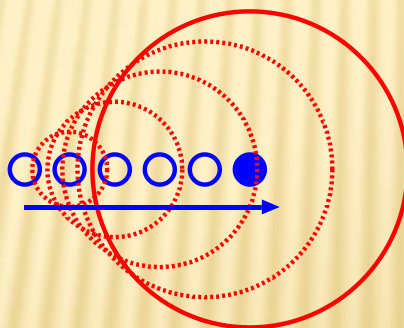
等方に広がる波



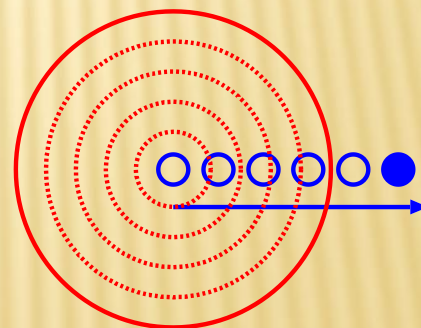
電車の外



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

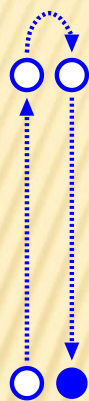


媒質が止まっていると...  
(電車の中では後ろに流れる)

光はどっち？

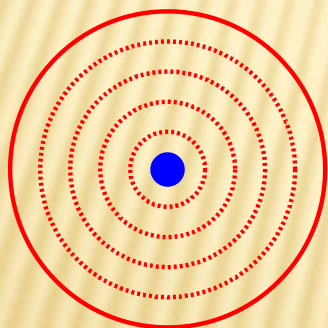
# 相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

電車の中

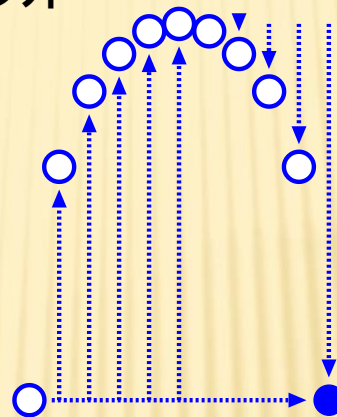


まっすぐ投げると  
まっすぐ落ちる

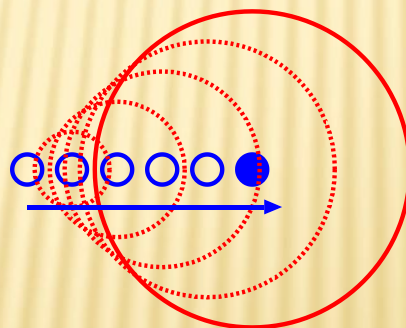
等方に広がる波



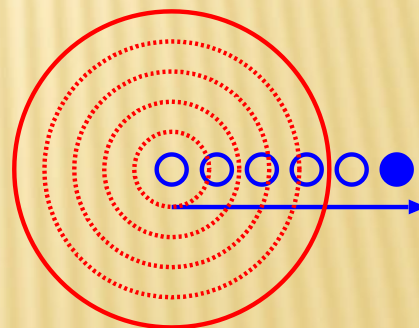
電車の外



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



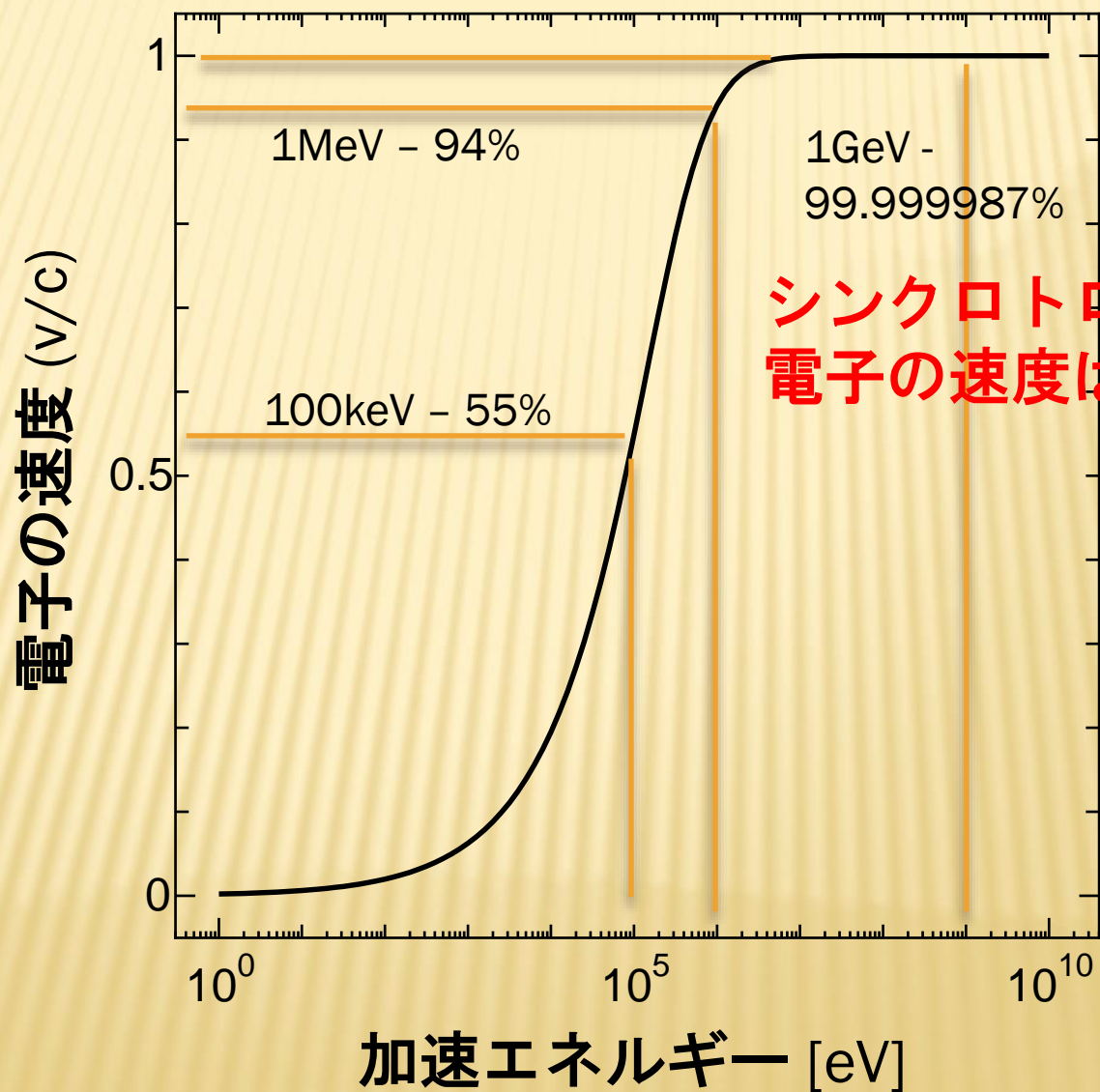
媒質と一緒に動く



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!

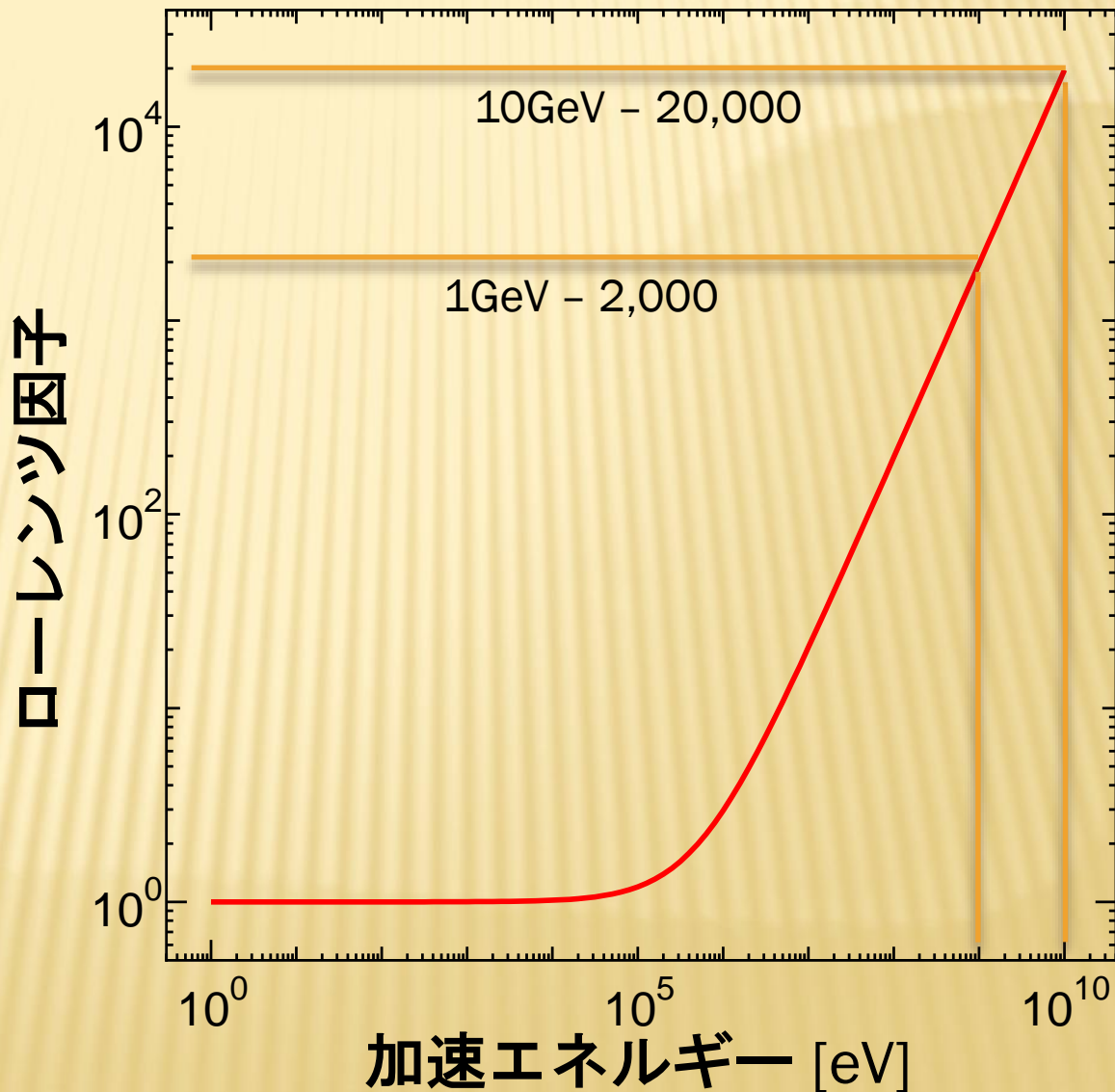
# 相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -



# 相対論効果 - 進行方向の光がさらに強まる -

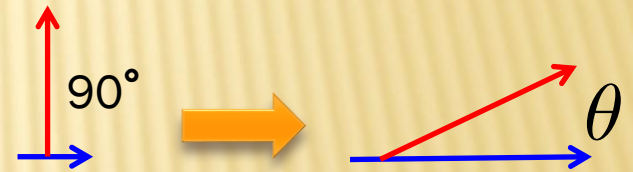
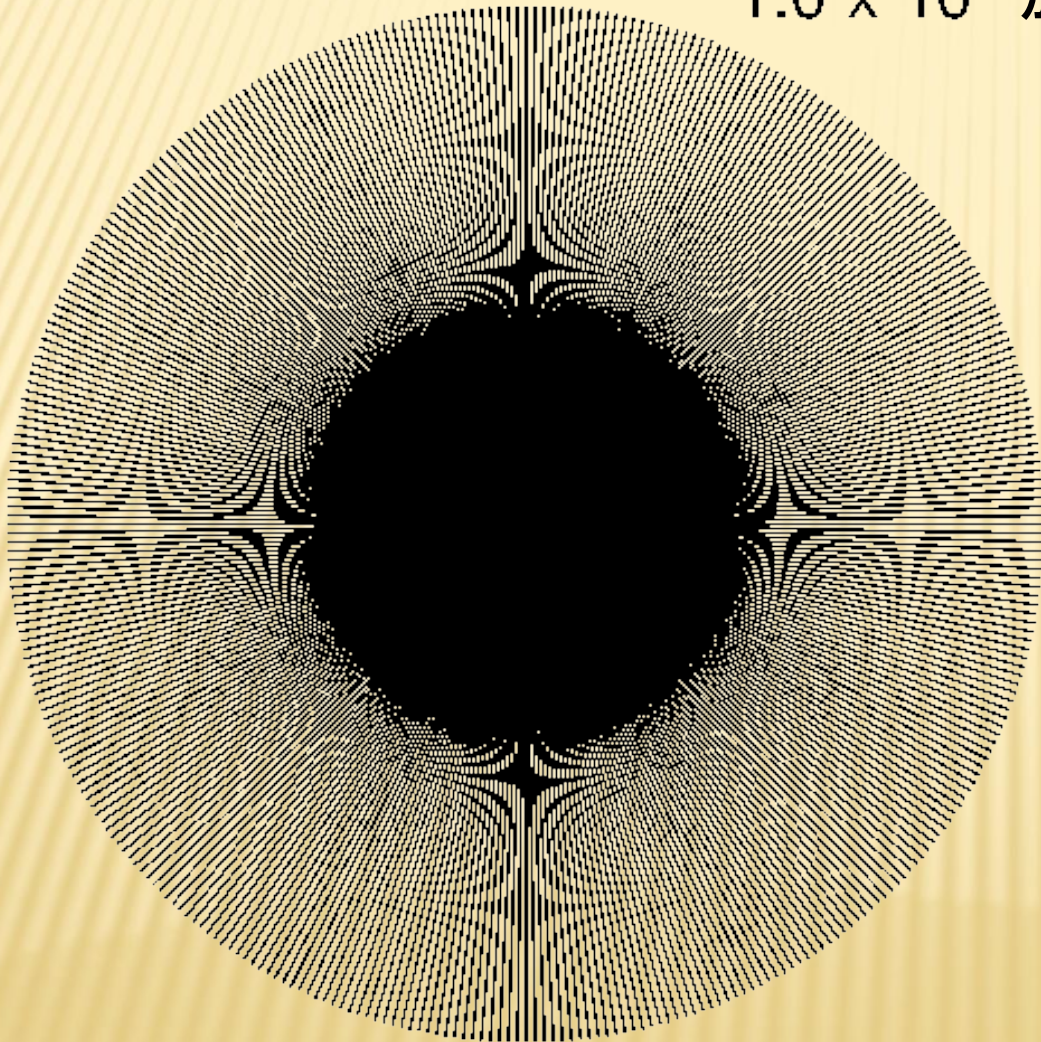
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

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

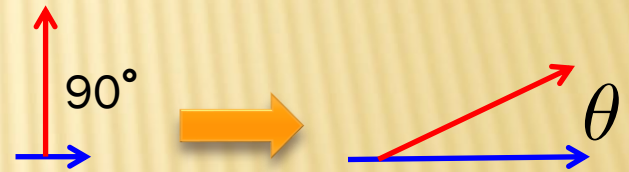
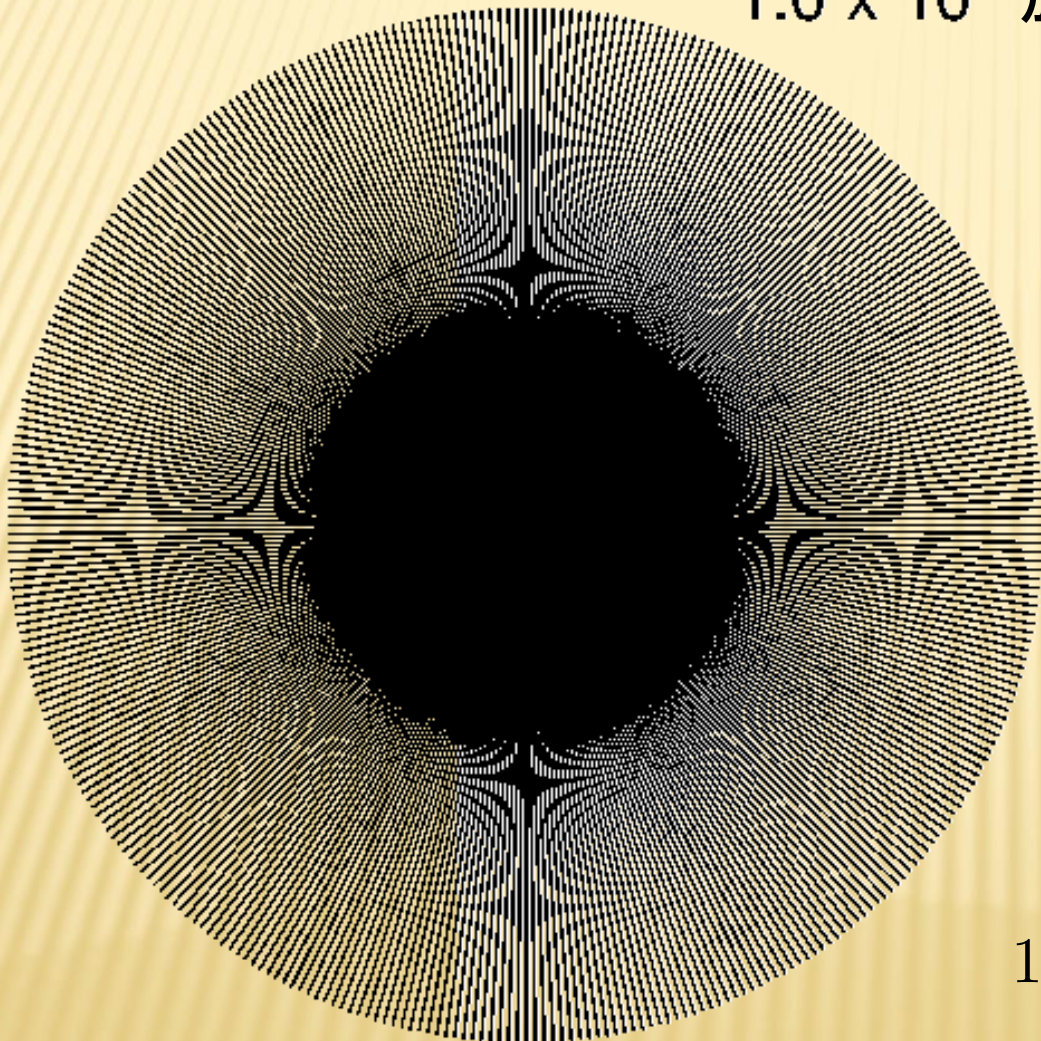
$1.0 \times 10^0$  加速電圧[eV]



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

# 進行方向に集中する光

$1.0 \times 10^{10}$  加速電圧[eV]



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

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

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)

$E[\text{GeV}], I[\text{A}]$  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 !!

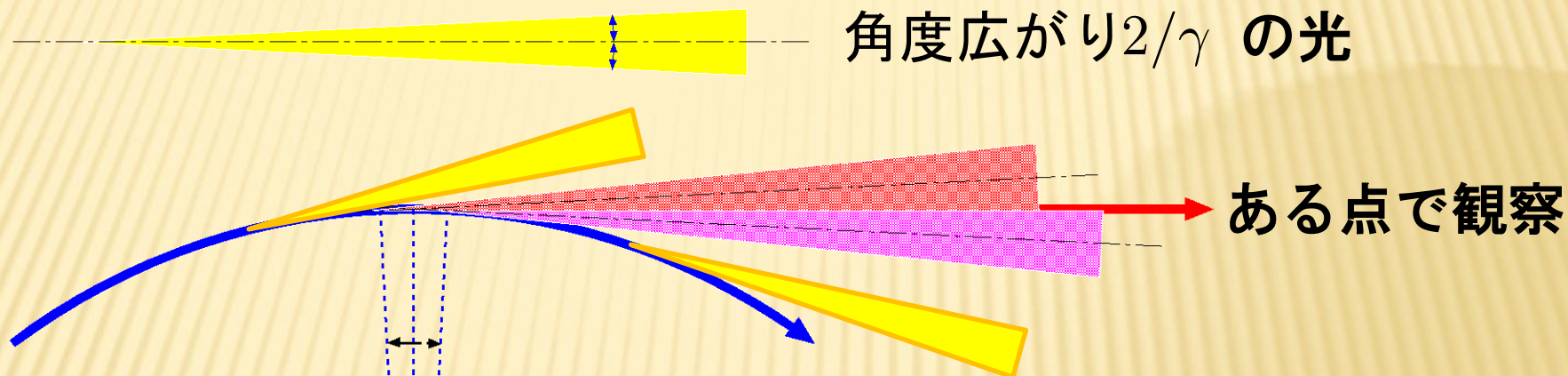
P  
57.3  
113

# 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



電子が角度範囲  $2/\gamma$  にいた時に  
出した光だけが見える

この範囲を通過するのにかかる時間は

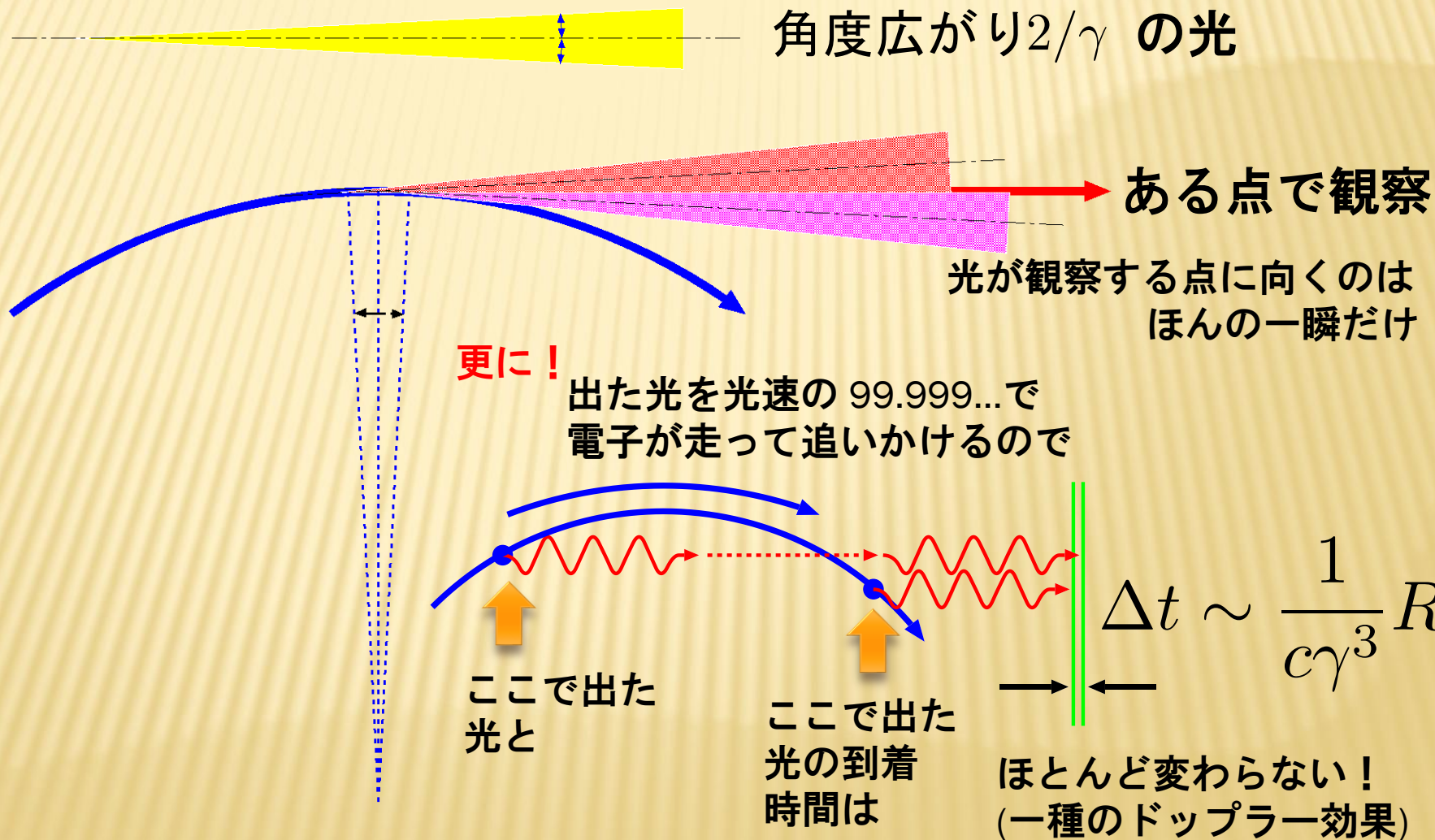
$$\frac{1}{c} \frac{2}{\gamma} R$$

磁石で曲げられる時の  
回転半径

速度はほぼ光速

ラジアン単位の角度

# 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

$\gamma$  : 約 2400

$R$  : 0.8[m] or 2.9[m] (超伝導、常伝導電磁石)

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

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

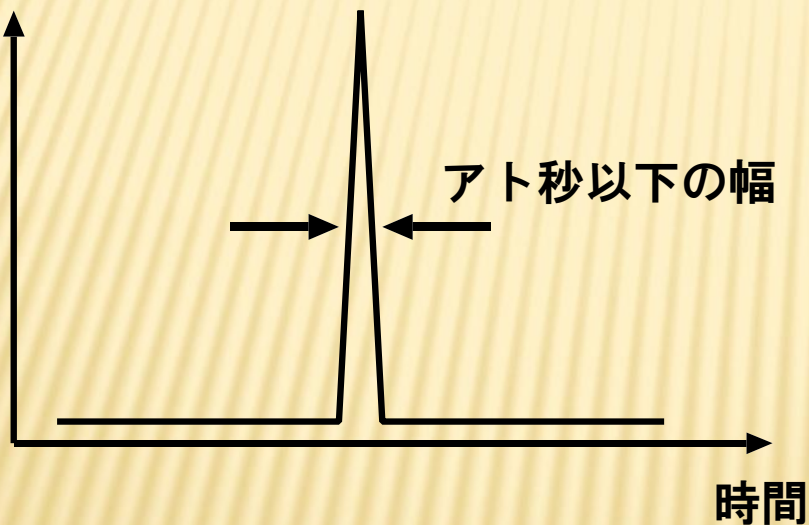
**1個の電子が出す光は、極短い時間幅のパルスになる**

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」。

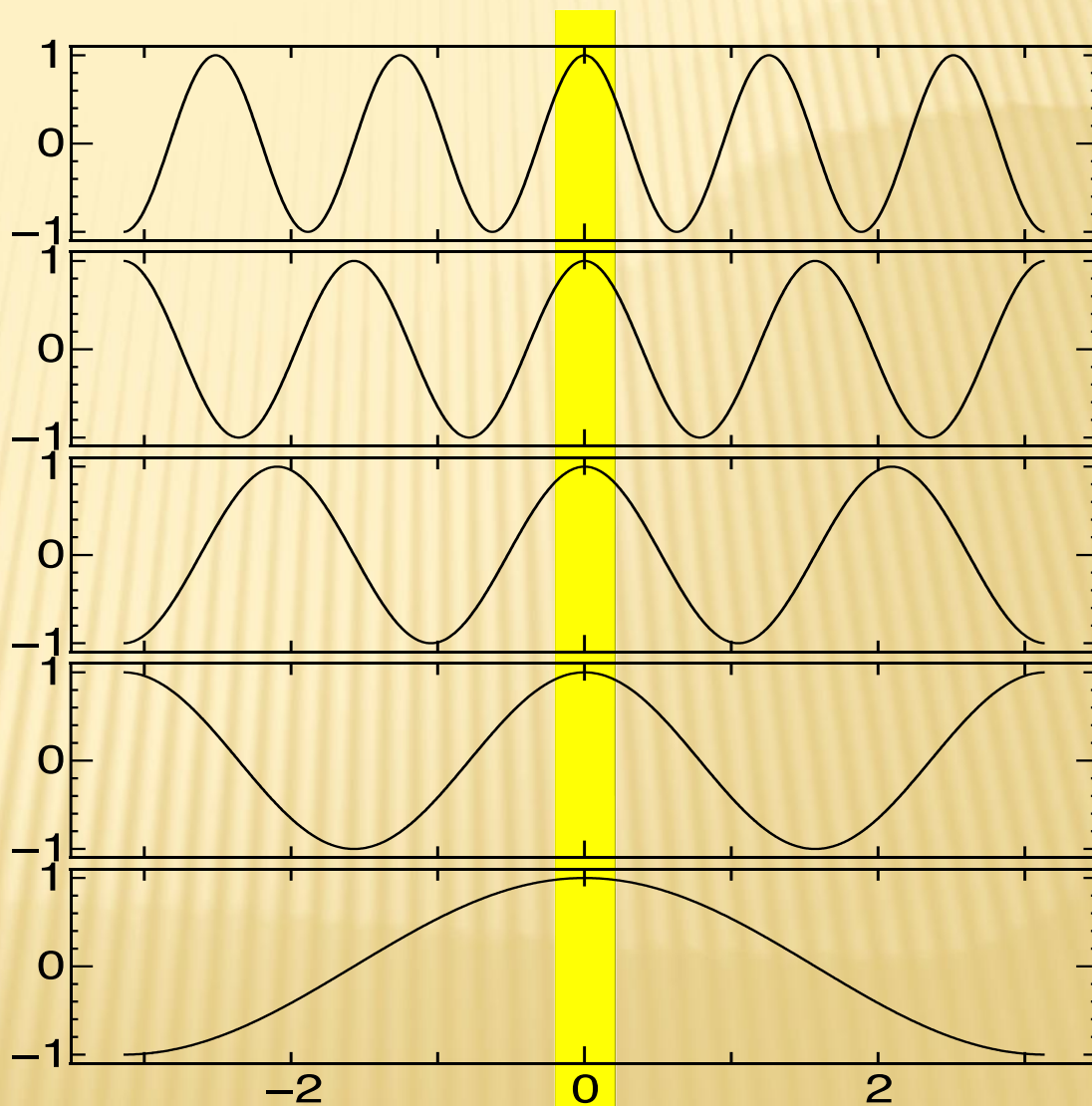
sin, cos

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

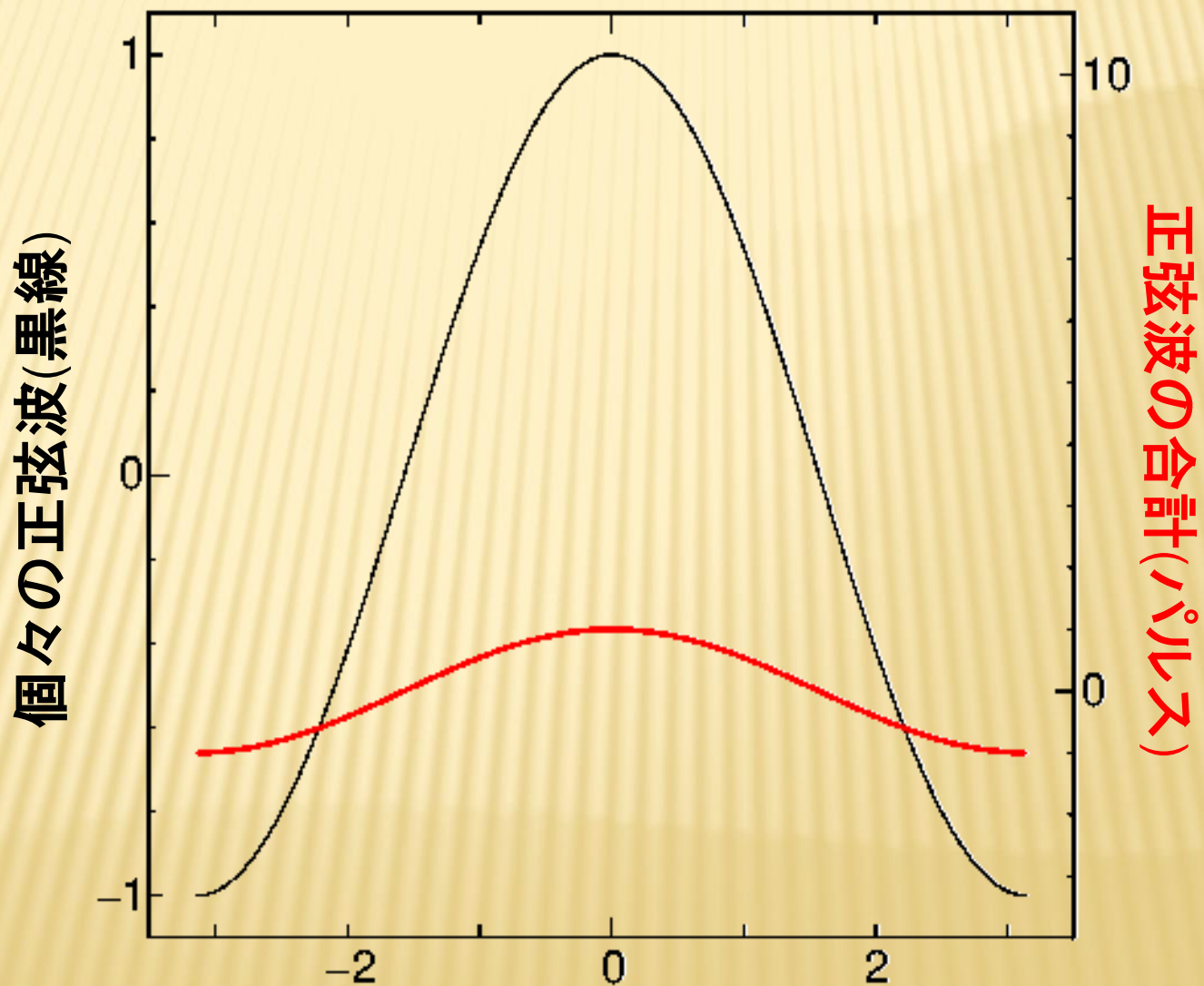
「パルス」を作る  
一連の波の例

$x = 0$  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  $\omega = \frac{3}{2} \frac{c\gamma^3}{R}$

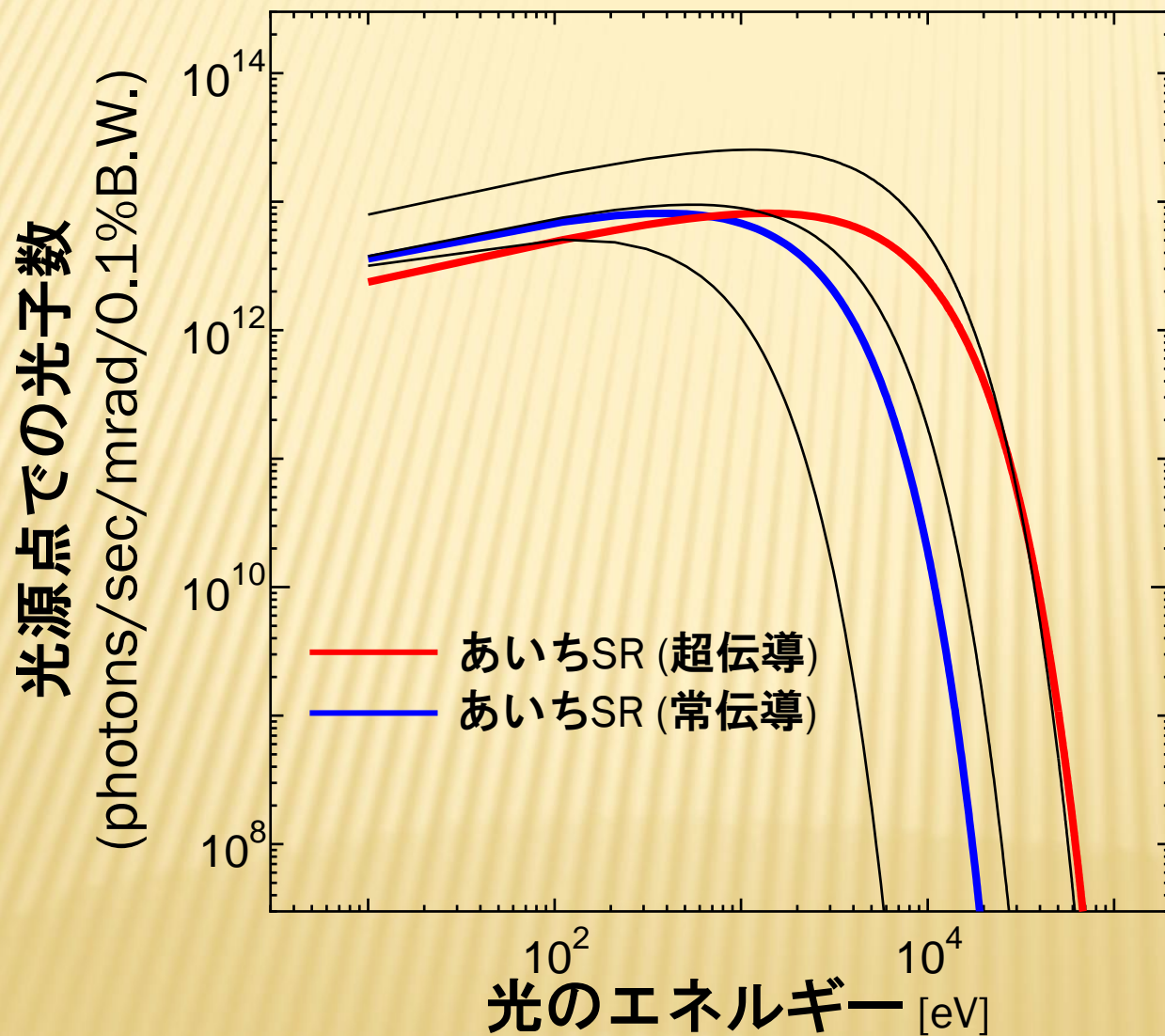
あいち SR の超伝導磁石:  $7.7 \times 10^{18}$  [1/s]

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

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

$$\varepsilon = h\nu$$

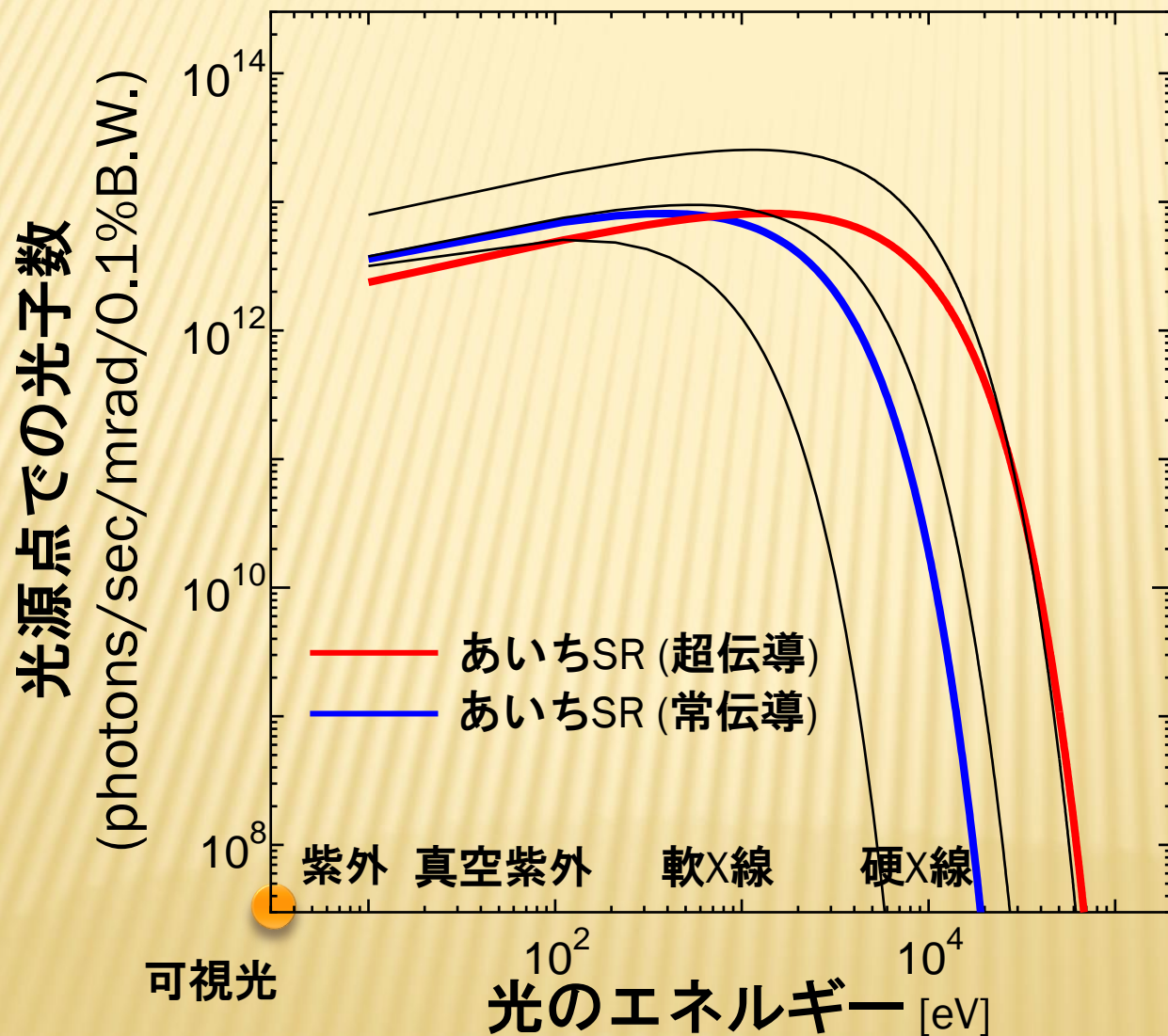
$\varepsilon$  光のエネルギー  
 $\nu$  光の周波数  
 $h$  プランク定数 :  $6.6 \times 10^{-34}$

$$c = \nu\lambda$$

$\lambda$  光の波長  
 $c$  光速 :  $3.0 \times 10^8$

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

# 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)

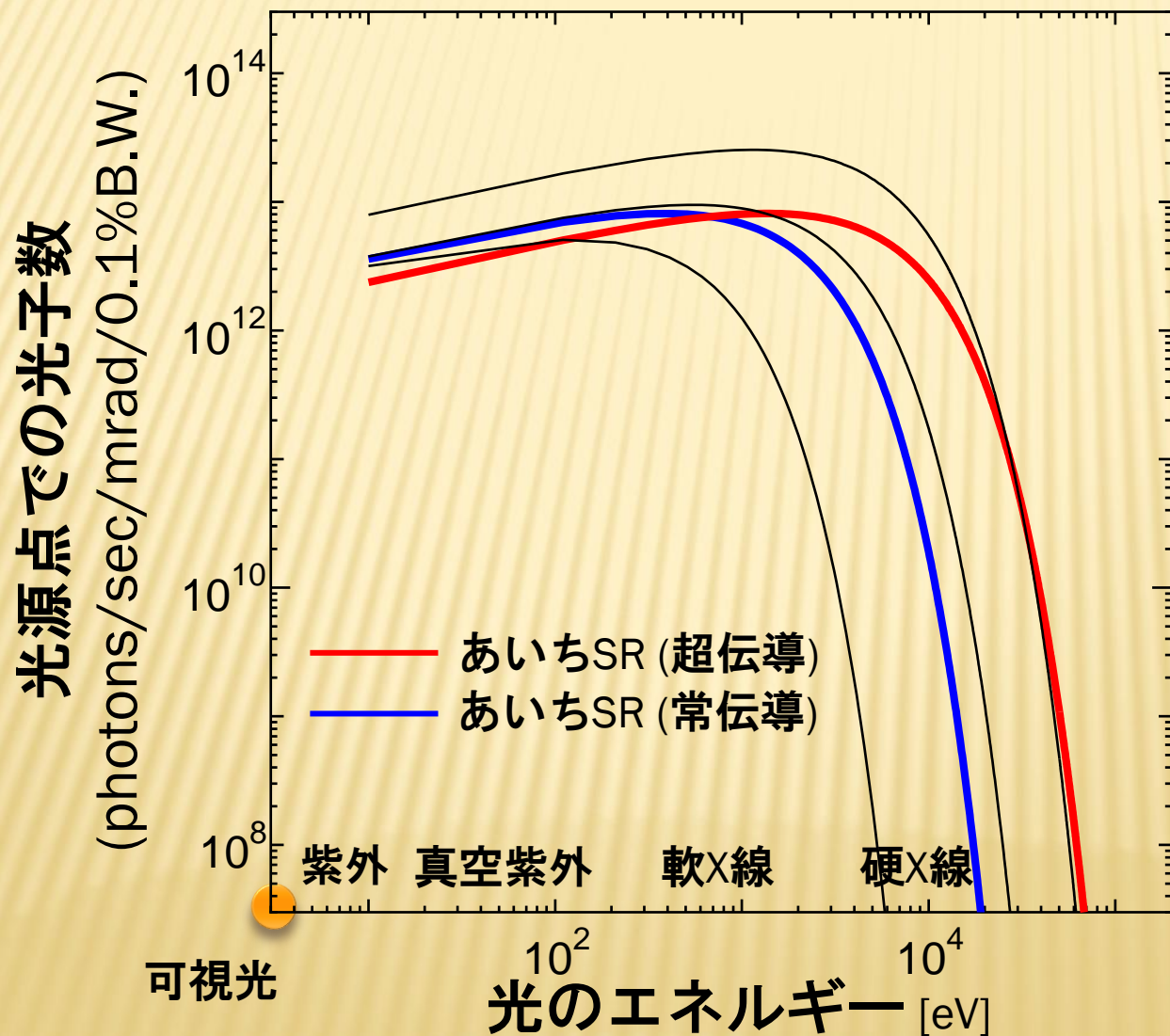
/0.1%B.W. : 0.1%バンド幅あたり

## 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)

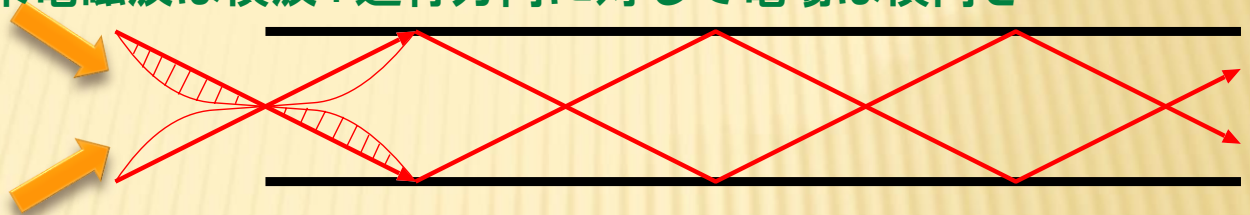


# 加速器

## 線形加速器(高周波加速空洞、導波管)

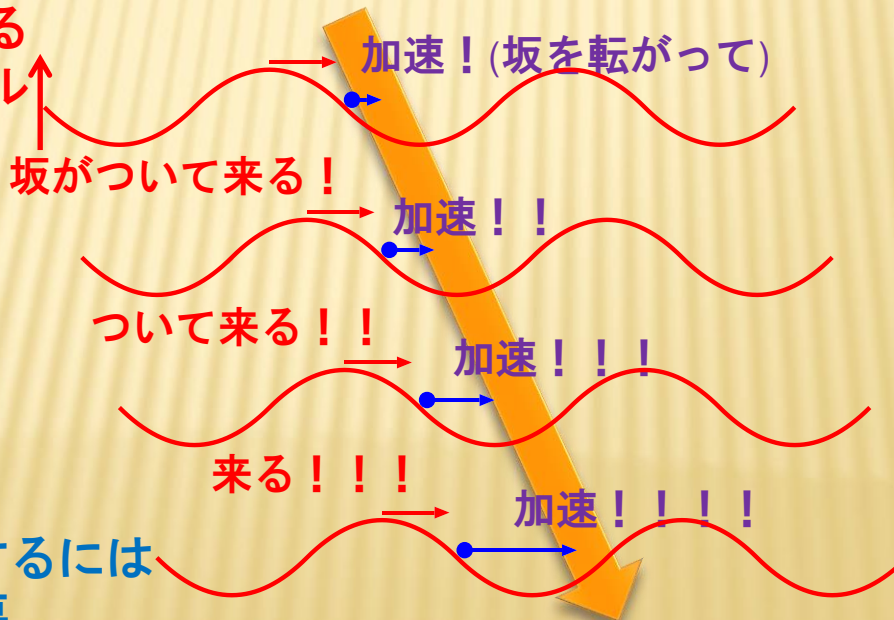
本来電磁波は横波：進行方向に対して電場は横向き

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。



# 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。

## 挿入光源

- **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)

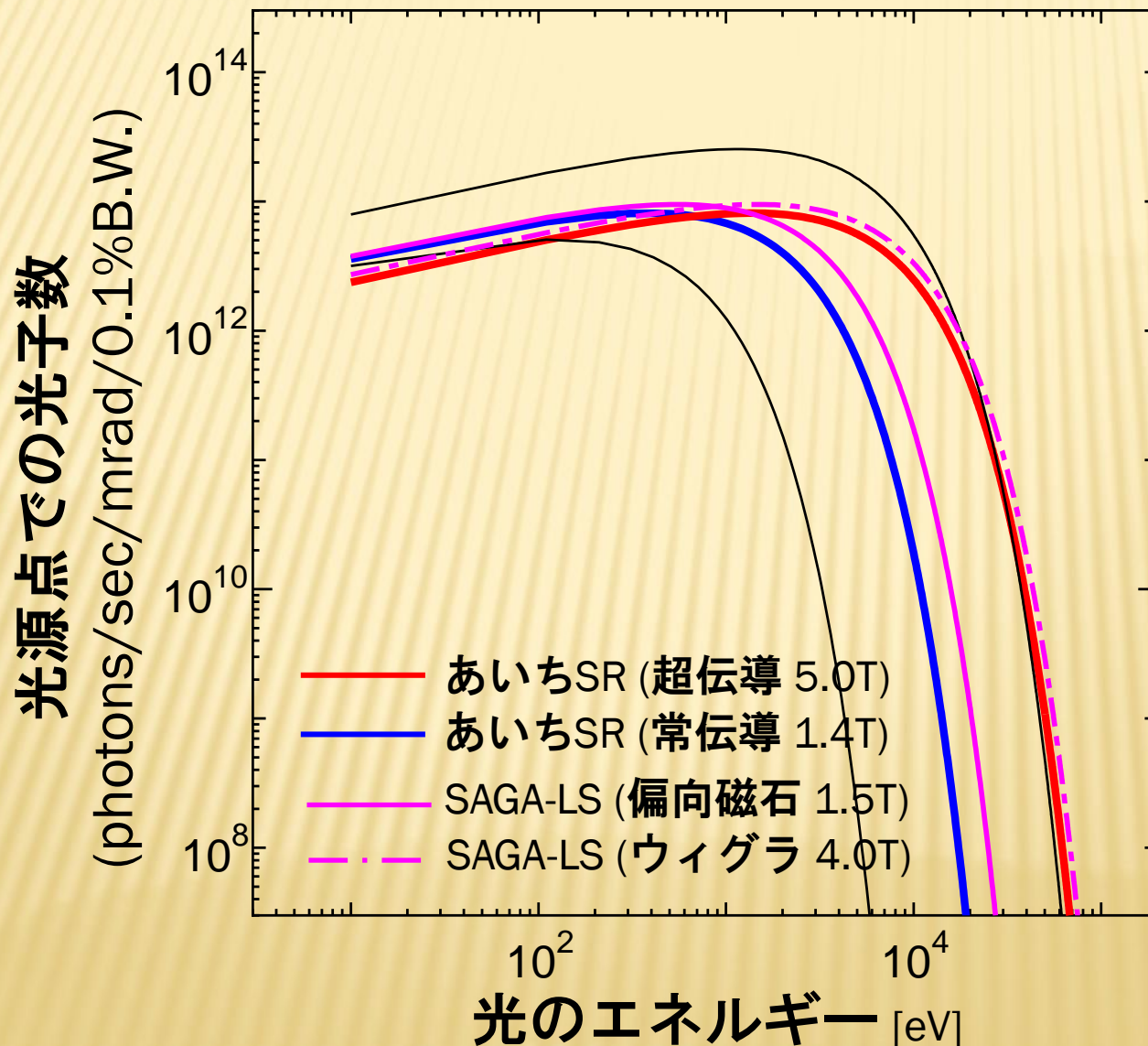


強い磁石で  
大きく進路を変える

進路が曲がる角度  $\theta$  が、光の広がり幅  $1/\lambda$  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

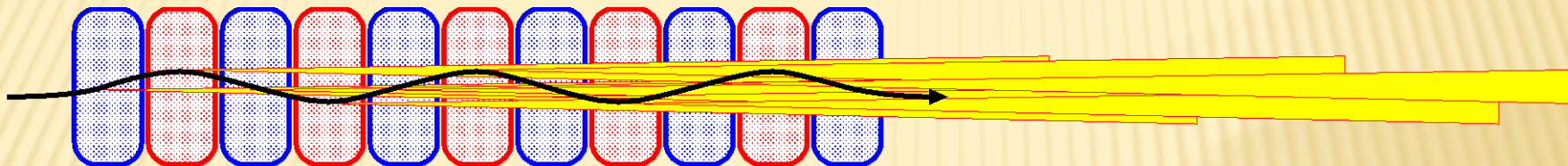
SAGA-LS (Wiggler)  
1.4 GeV, 4T

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

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)



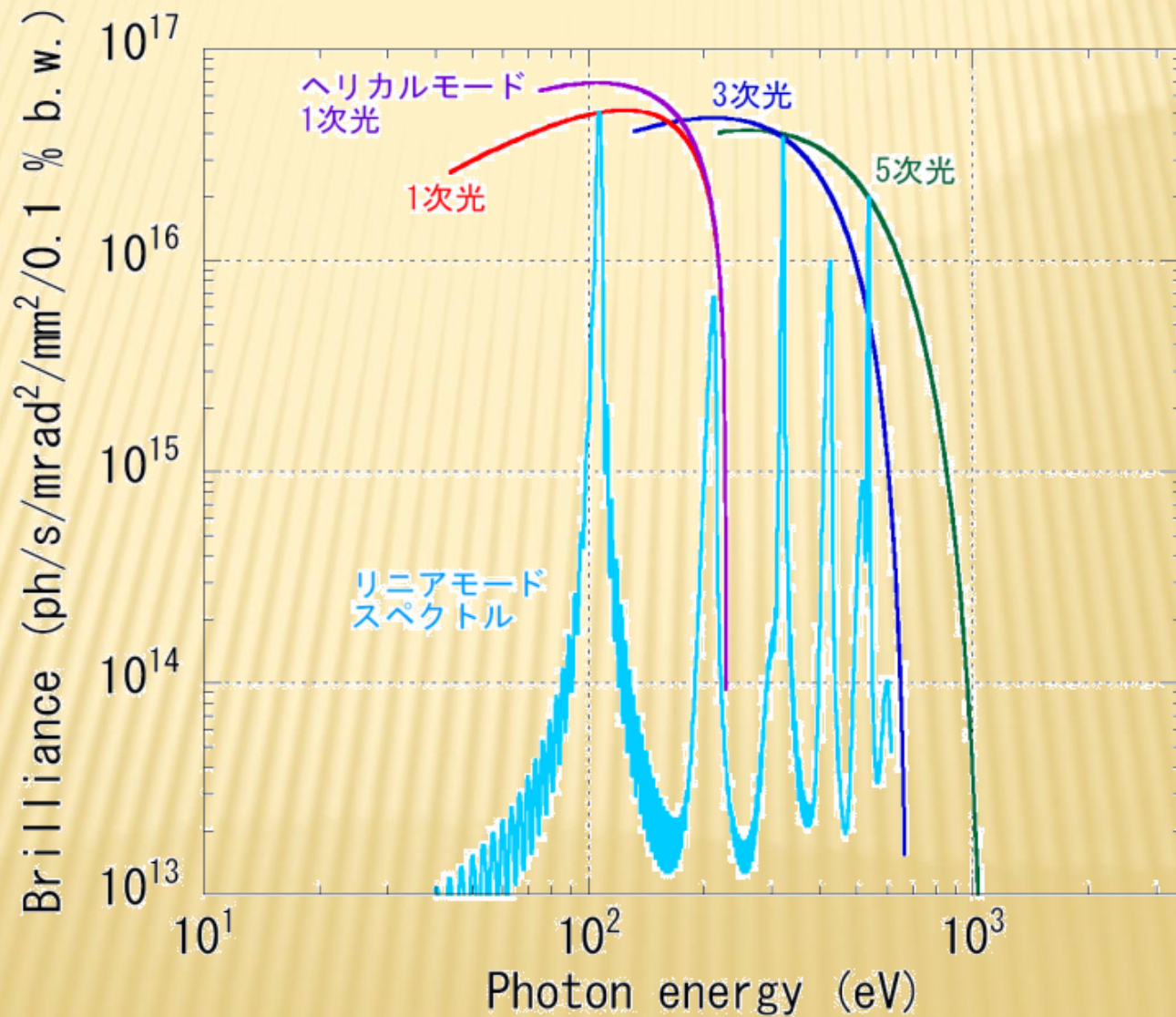
この図は $\theta$ が $1/\gamma$ より大きくなってる

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  $\theta$  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)



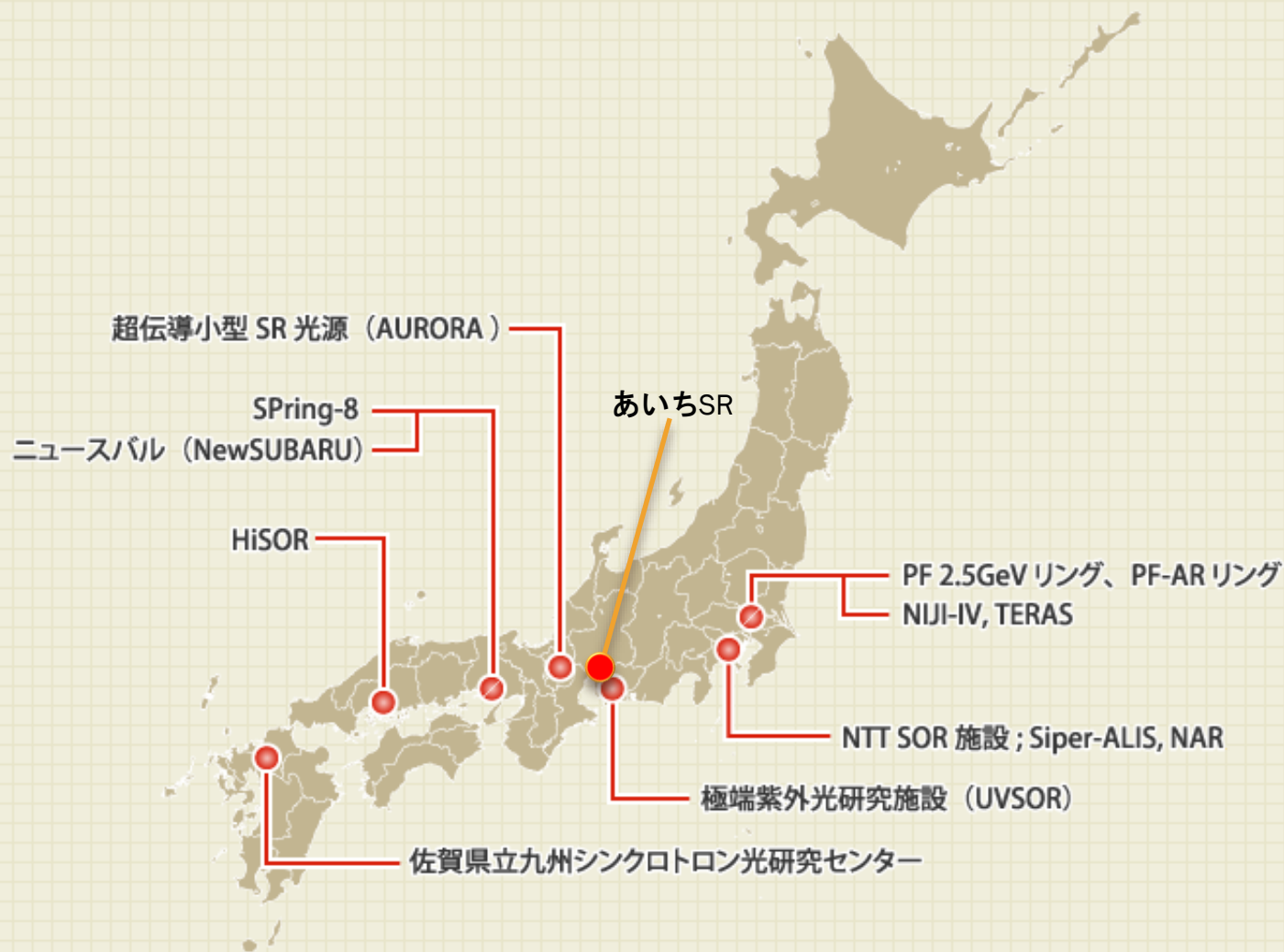


# 放射光の特徴

---

- 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

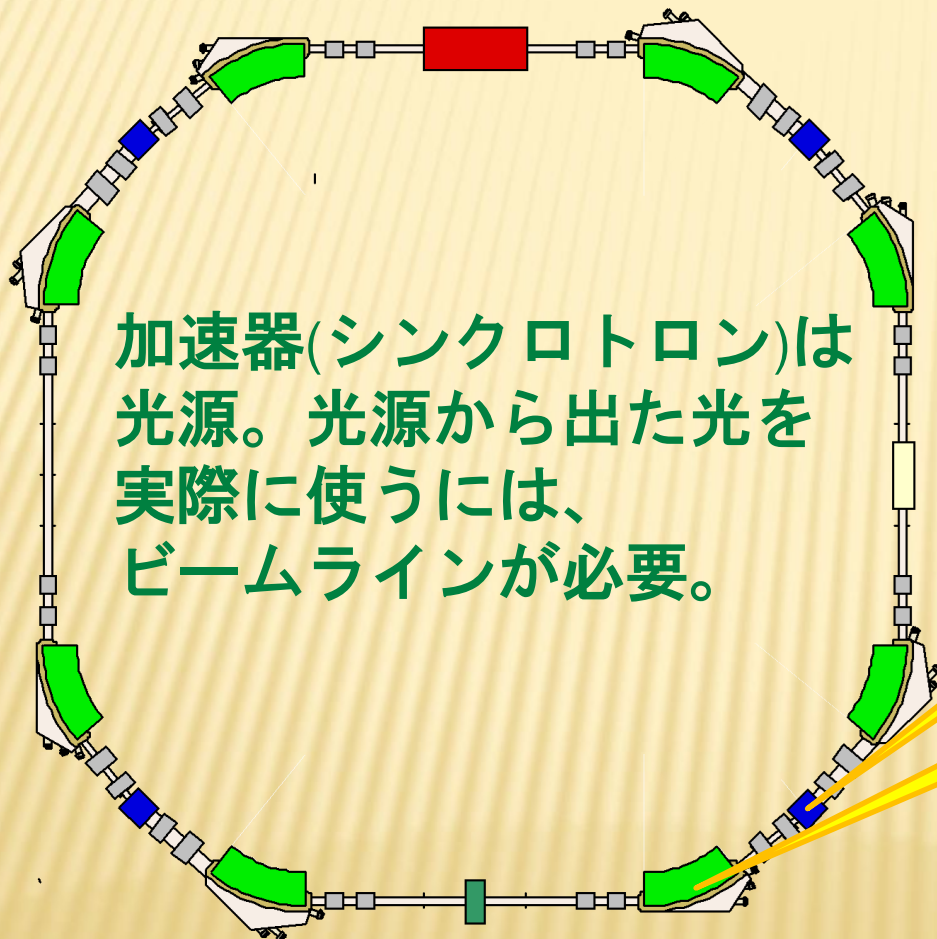


# 世界の放射光利用施設



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

# 放射光の利用・応用

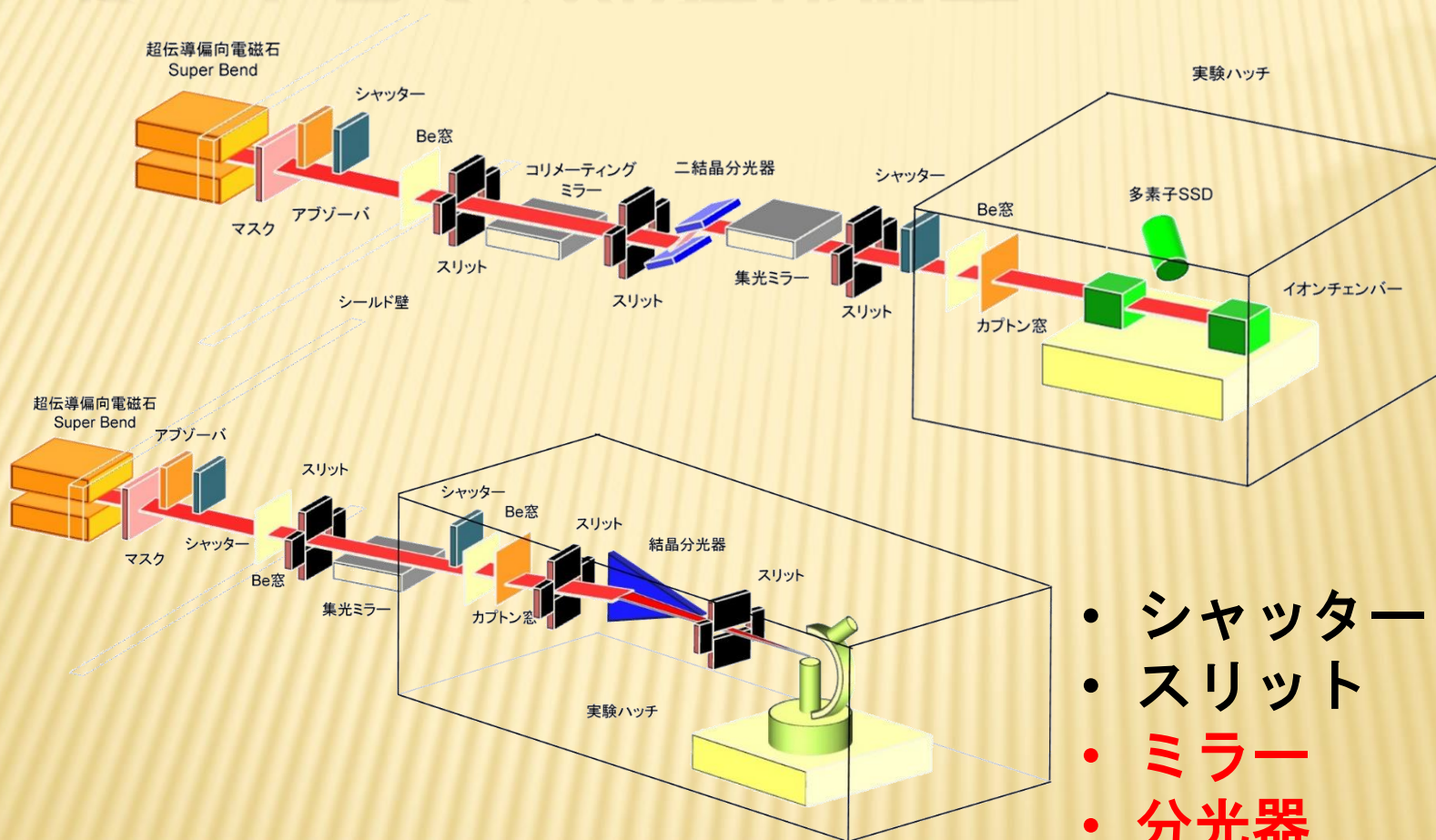


加速器(シンクロトロン)は光源。光源から出た光を実際に使うには、ビームラインが必要。

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)

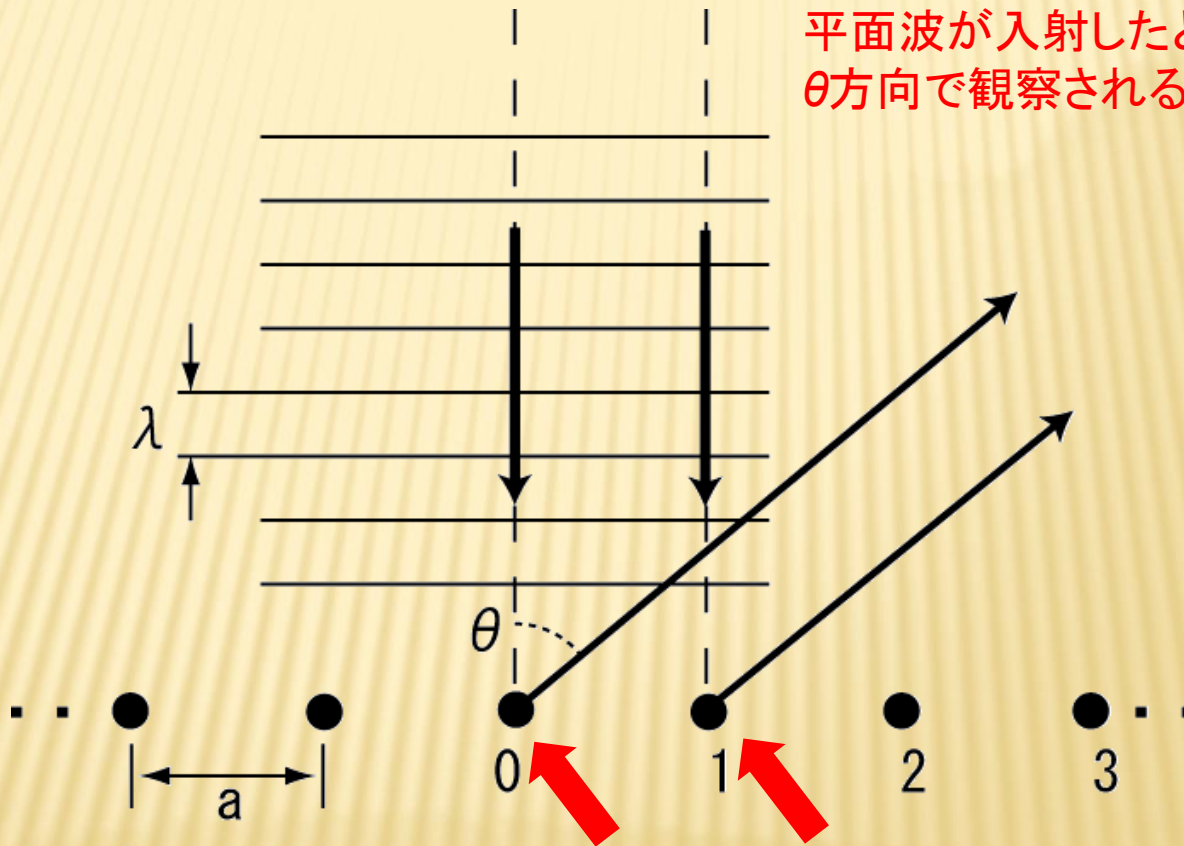
- **回折格子**

刻まれた格子間隔程度の光を回折する

1keV程度以下

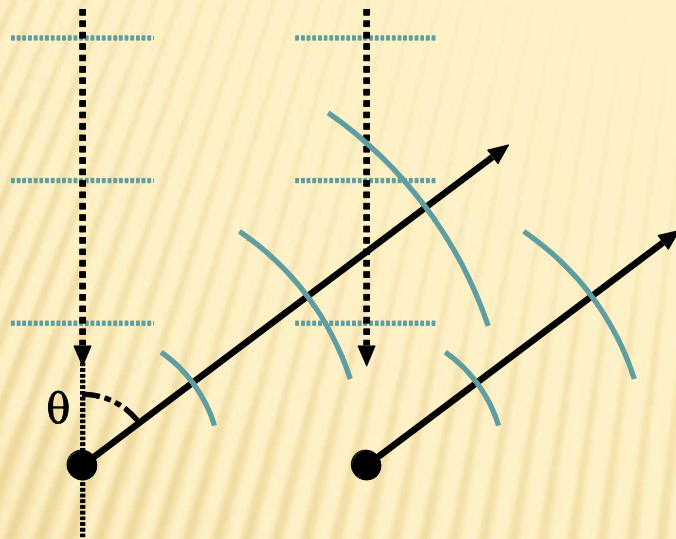
# 結晶による回折を単純化した例

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



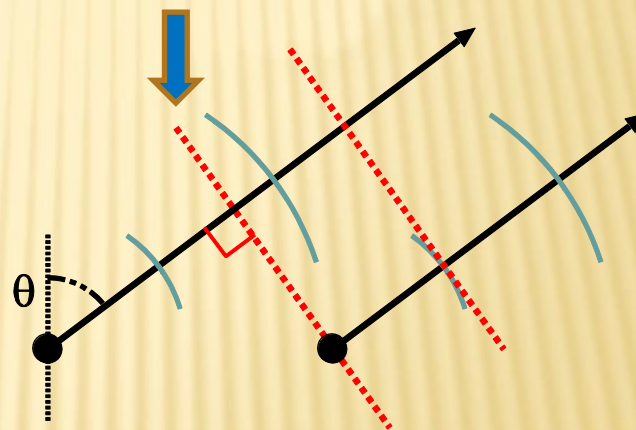
各原子位置で発生する球面波だけを考慮すれば良い

# 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  
 $\theta$ 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

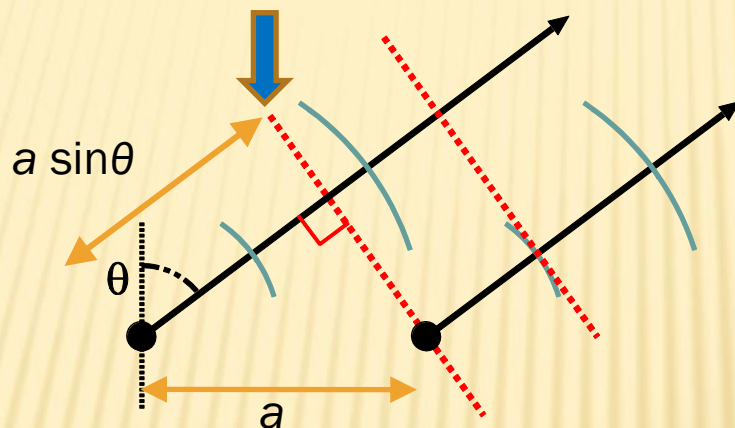


$\theta$ 方向に進む平面波(があったとして)の  
波面に、球面波の波面が揃うかどうかを  
考える。



# 結晶による回折を単純化した例

(仮想的な) 平面波の波面



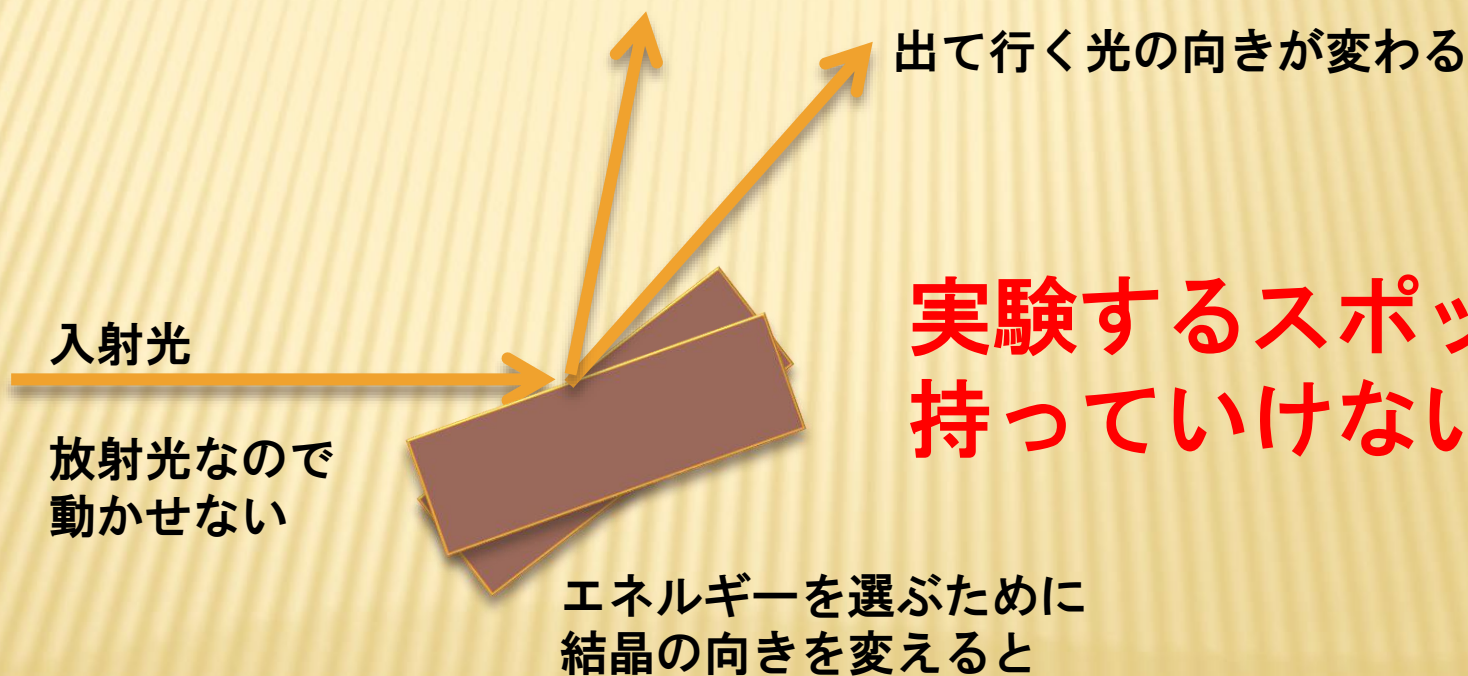
仮想的な平面波の波面の位置 (光路長:  $a \sin \theta$ ) が、球面波の波面の間隔( $\lambda$ )の整数倍に一致すれば良い。

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

光を入れる角度と取り出す角度で波長が決まる

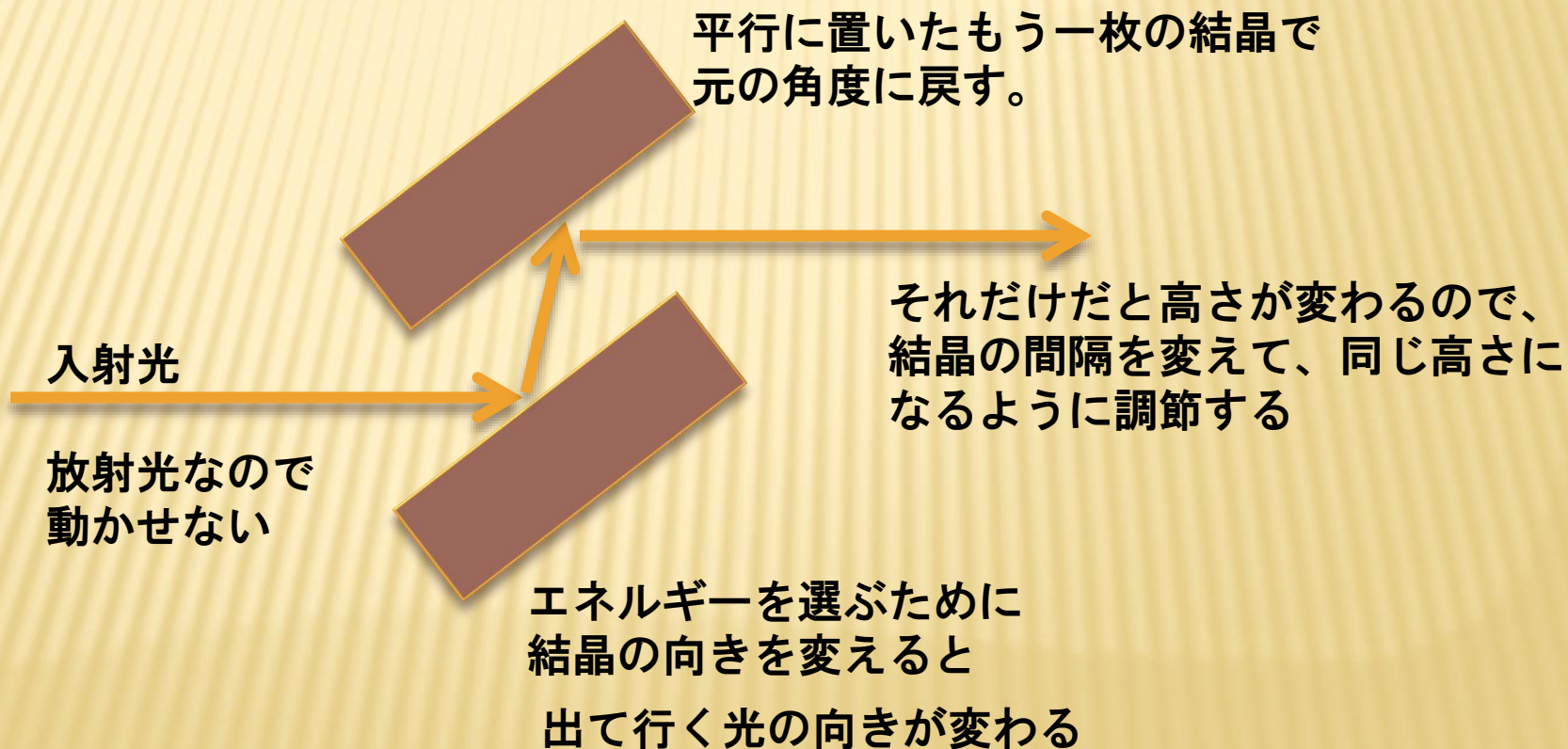
## 2結晶分光器

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)

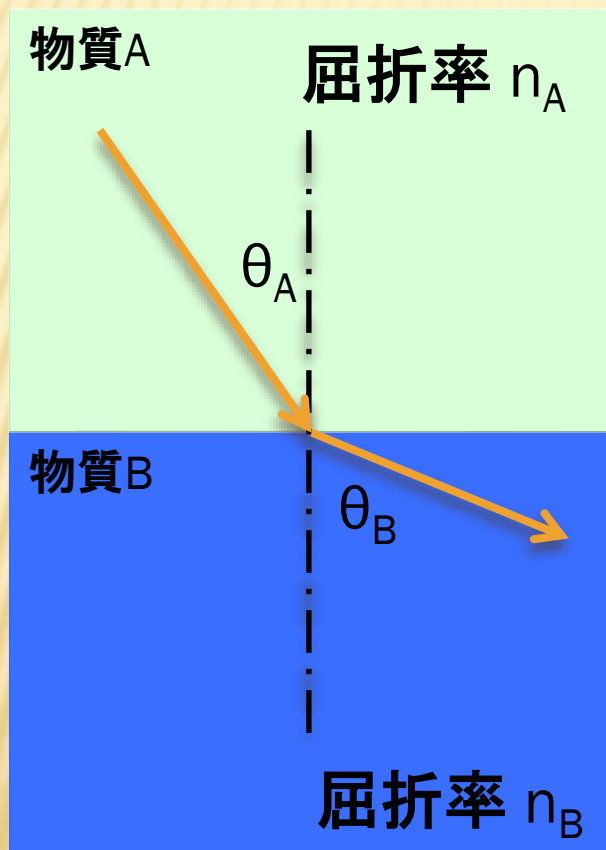
どうする？



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

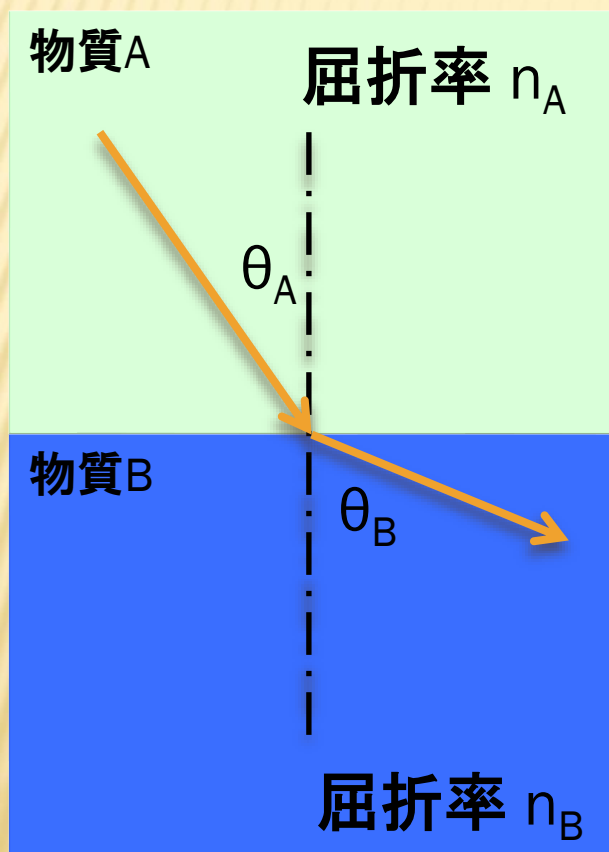
$$\sin \theta_B = \frac{n_A}{n_B} \sin \theta_A > 1$$

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

$$n_A \simeq 1$$

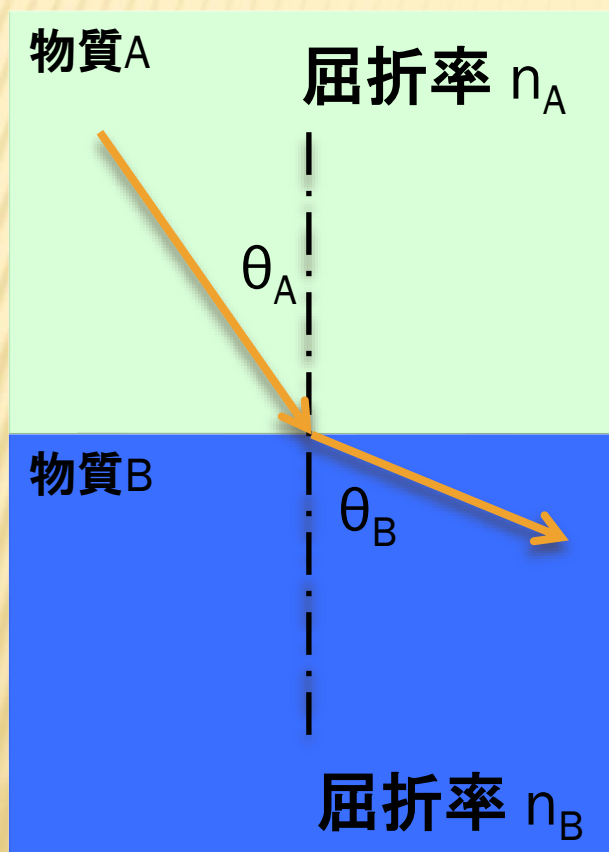
なので、 $n_A > n_B \Rightarrow n_B < 1$

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

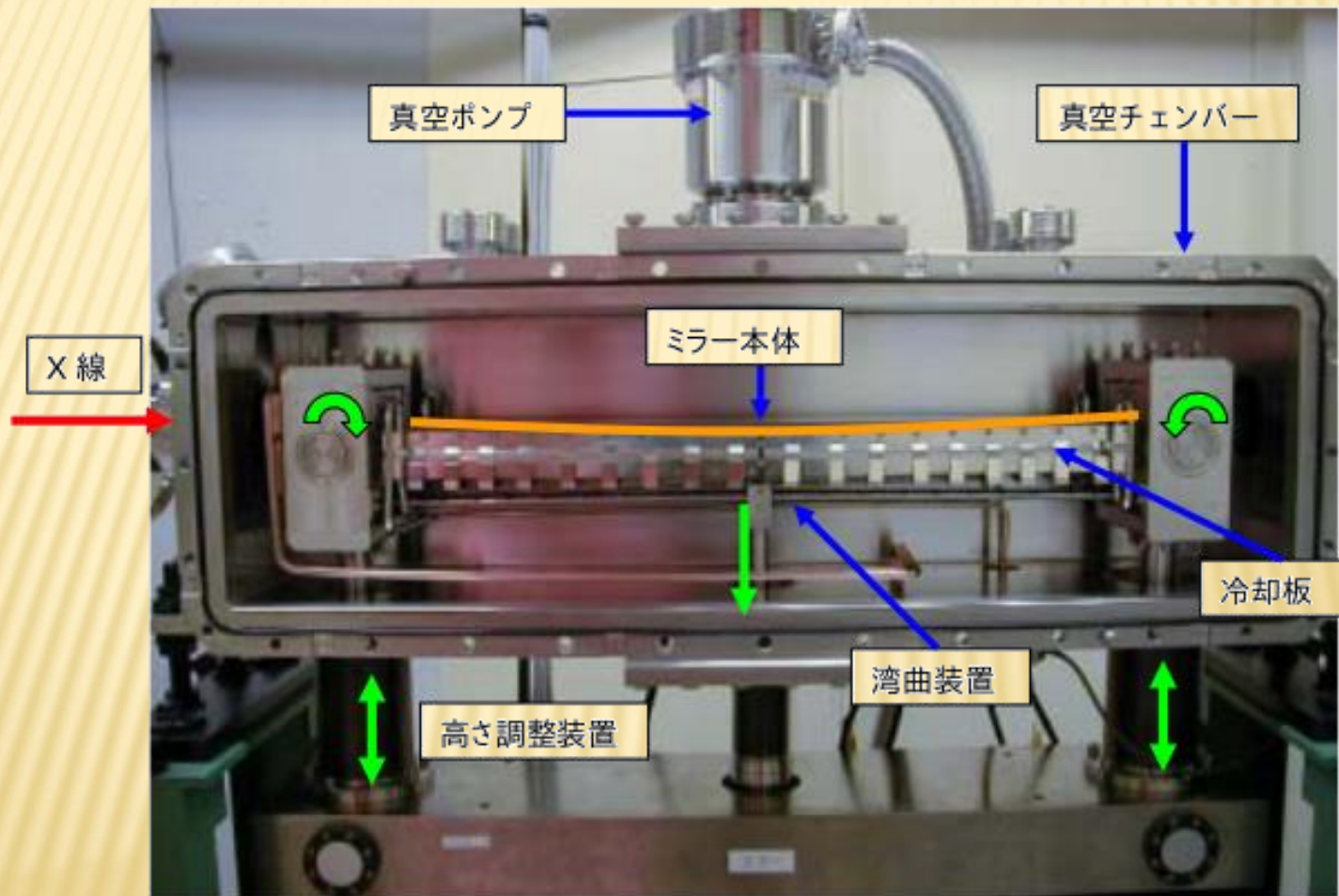


幸いX線領域では  $n_B < 1$   
ただしその差は  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$ 程度

➡ 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)

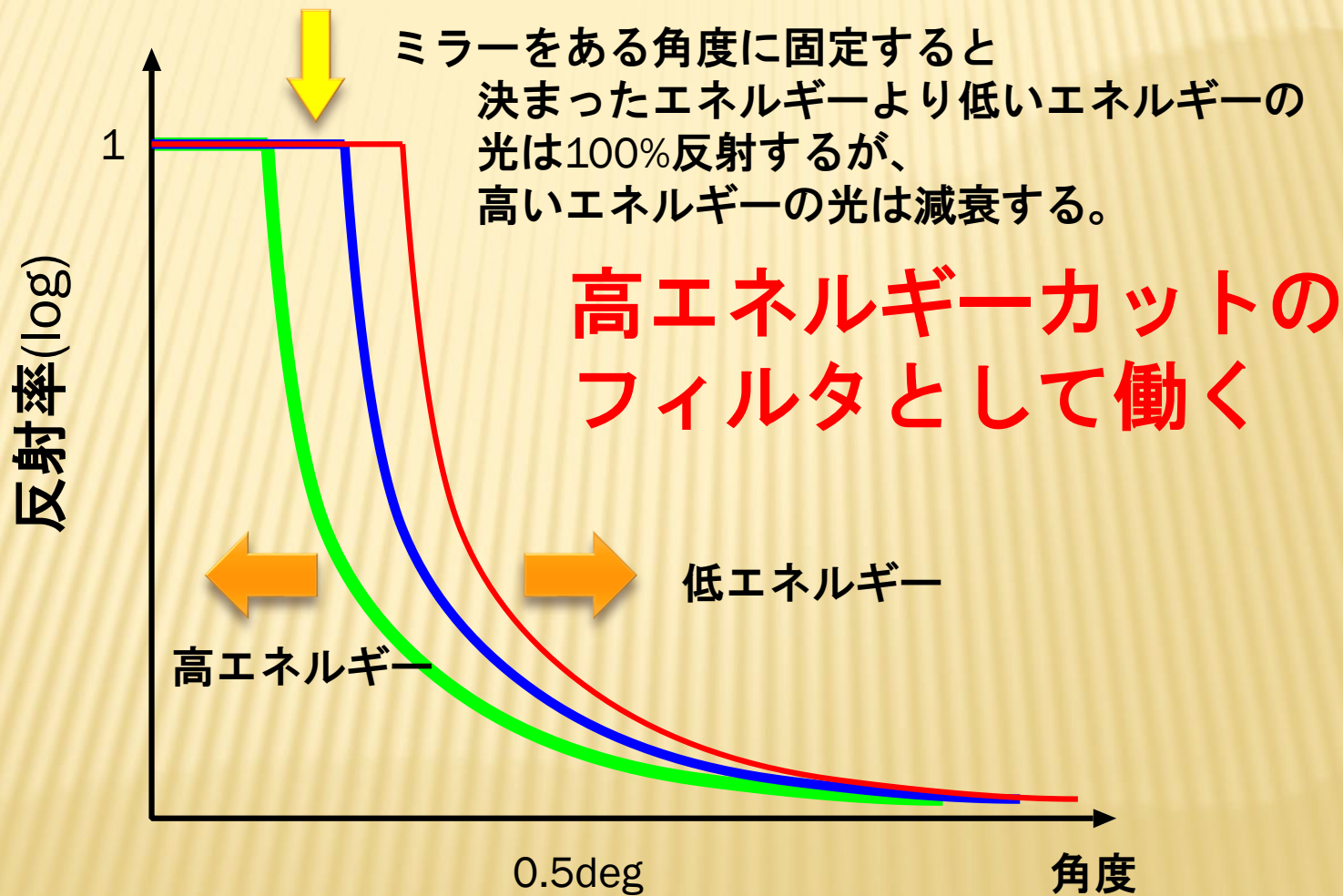
# ビームラインの構成要素(ミラー)



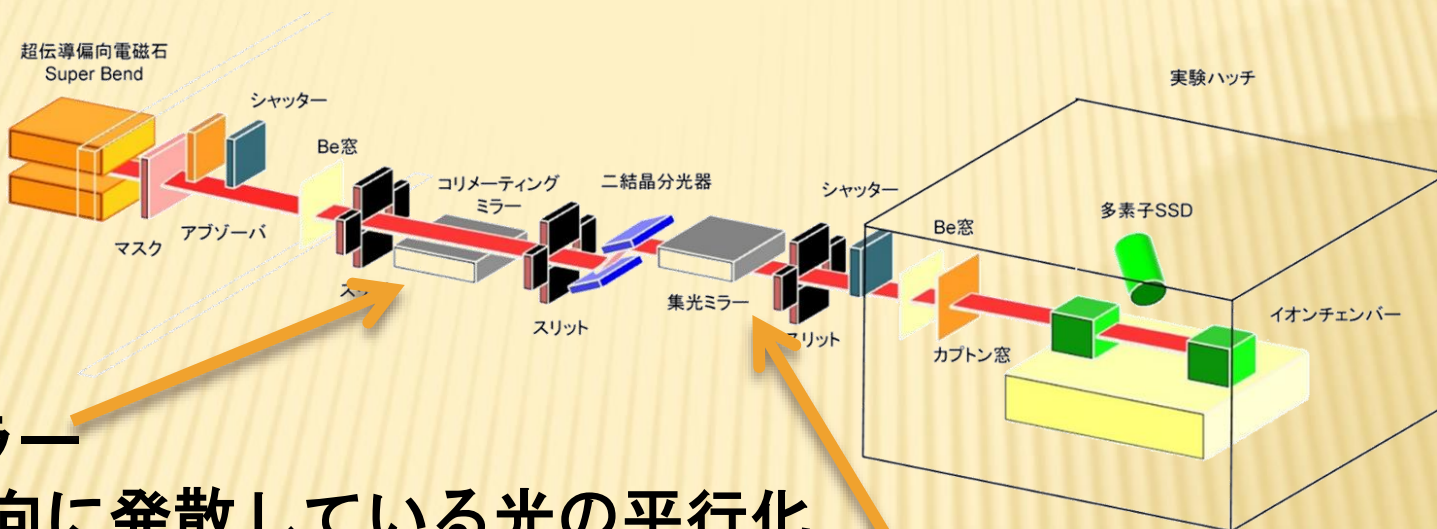
SPring-8 BL01B のミラー



# 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

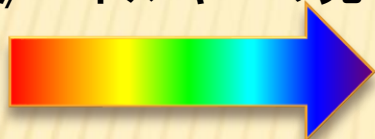
試料位置への光の集光

# 発生した放射光の使い方

## 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



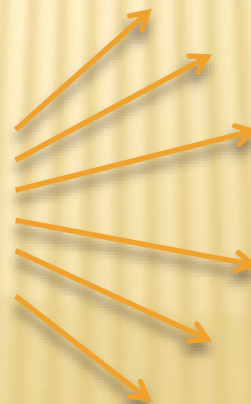
反応を見る  
透過/吸収  
蛍光  
二時電子....

### 2. 回折、散乱測定

選択した波長の光



試料



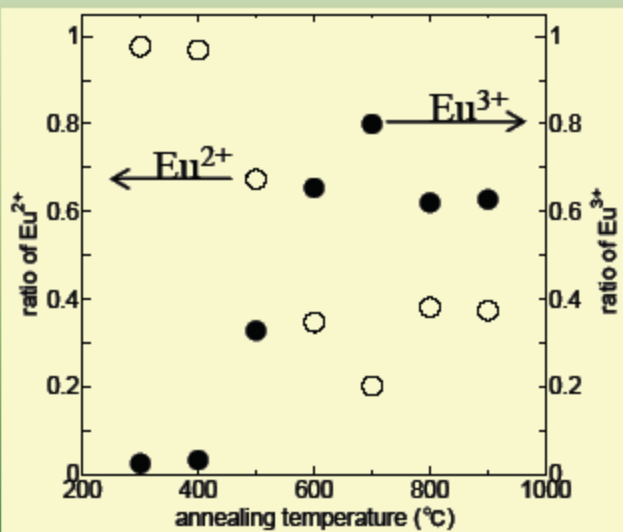
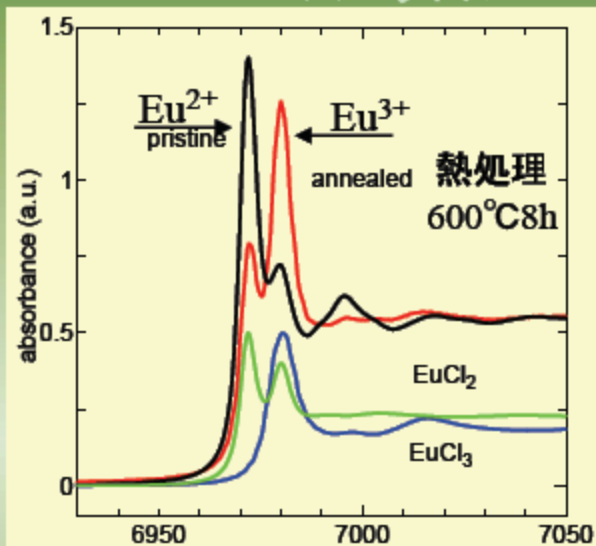
どんな方向に  
どんな強さで  
回折・散乱されるか

### 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

# 青色蛍光体 $\text{BaMgAlO}_{17}:\text{Eu}$ の劣化解析

XANESスペクトル



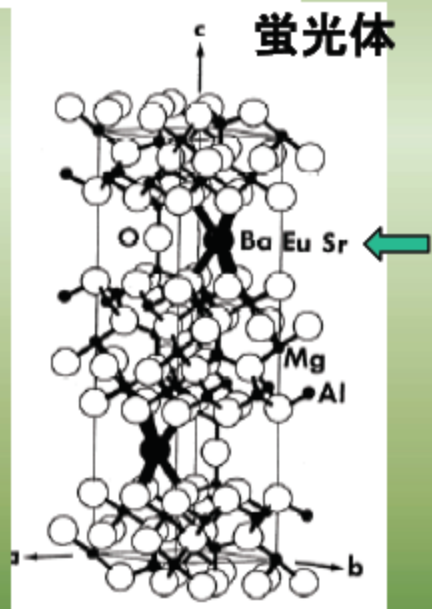
製造熱工程・点灯による輝度低下

加熱、X線照射

$\text{Eu}^{2+} \Rightarrow \text{Eu}^{3+}$

Euの酸化

蛍光体の輝度劣化原因究明

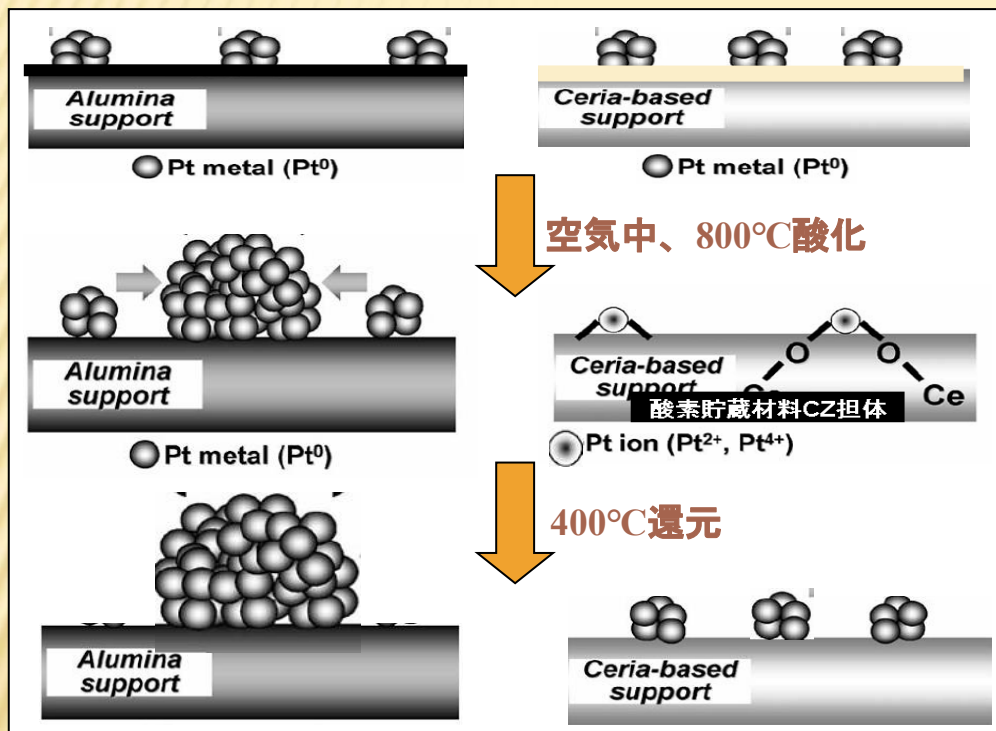


広沢一郎 JASRI、三菱化学、化成オプトニクス

# XAFS解析例(2)

## 高性能排気ガス触媒の開発

トヨタ自動車・豊田中央研究所・京都

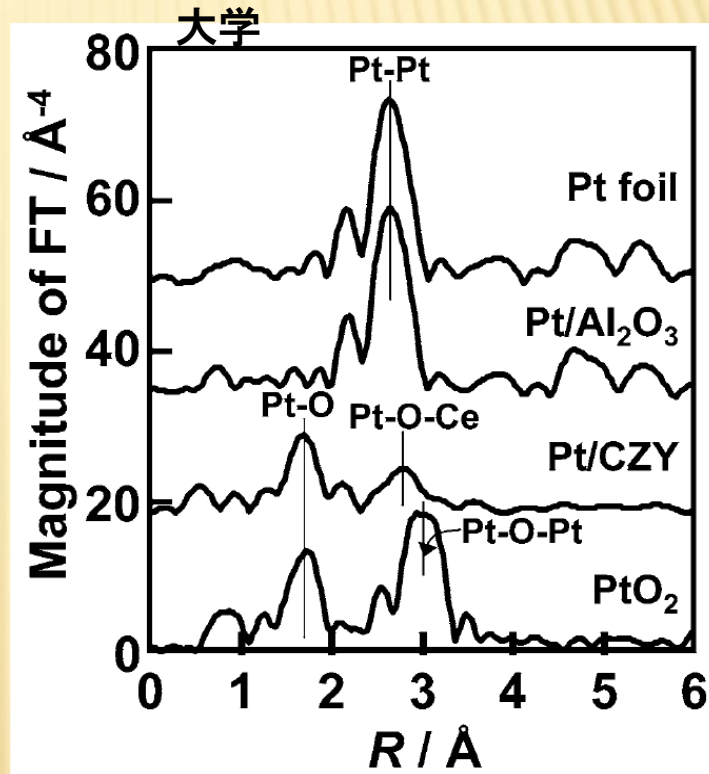


Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>担体

セリアシリコニア (CZ) 担体



白金/CZ触媒



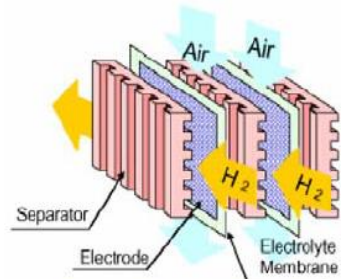
XAFS動径関数

- ▶ 性能実験、従来の評価技術で開発を進めていたが、現象説明は不十分であった。
- ▶ Pt-O-Ceのアンカー効果が酸化還元に伴うPt微粒子の増大化を抑制

Y.Nagai et. Al., J. Synchrotron Rad. 8(2001)616

# XAFS解析例(3)

キーワード：リチウムイオン電池、燃料電池、等



Polymer Electrolyte Fuel Cell

(株豊田中央研究所)

燃料電池：電極と電解質  
(SPring-8)



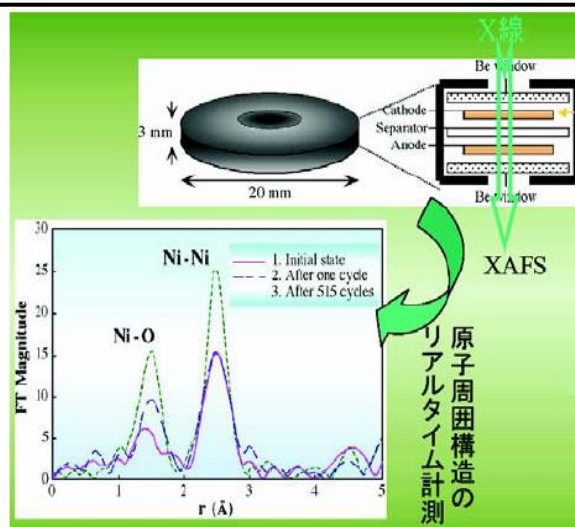
(トヨタ自動車株)

燃料電池バス

例：充放電に伴う電極の変化

X線回折、EXAFS 法

豊田中央研究所



(株豊田中央研究所)

ニッケルイオン電池のサイクル劣化機構  
(SPring-8)



(トヨタ自動車株)

ハイブリッド車

# 測定装置

光電子分光アナライザ

Mg/Al X線源

試料輸送機構

放射光

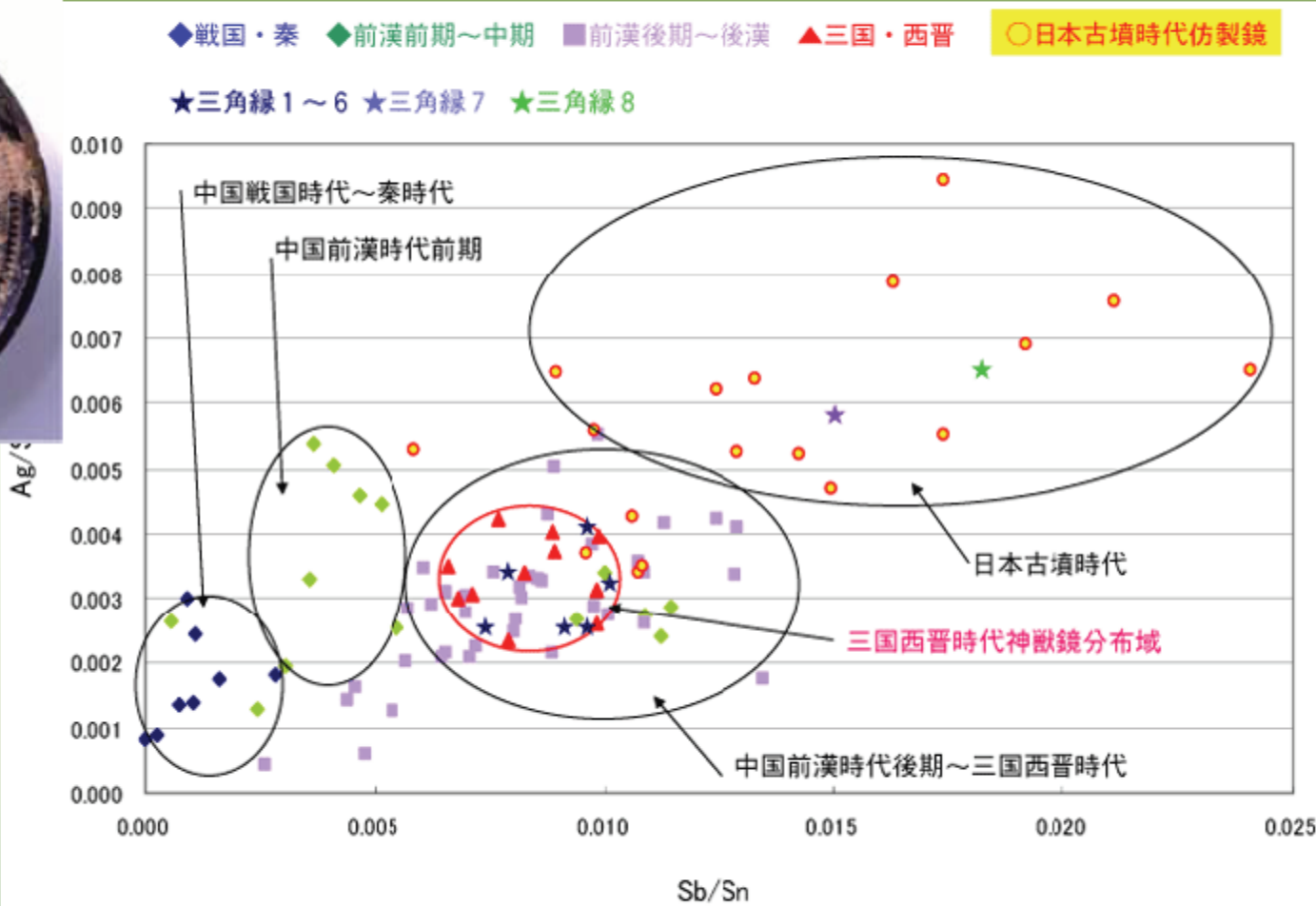
- × 軟X線分光 SXAFS
- × 真空紫外線分光
- × 光電子分光 XPS, UPS

超高真空PES装置  
+  
大気圧XAS装置

# 三角縁神獣鏡の蛍光X線分析



三角縁神獣鏡



微量元素分析から社会・文化貢献

外山潔 (財)泉屋博古館、JASRI

樋口隆康 泉屋博古館紀要第二十巻



# 回折・散乱測定

手法:

XRD、単結晶回折、粉末回折、表面回折、小角散乱

分かること:

電子密度のフーリエ変換 → 電子密度分布

結晶構造、単位構造の決定、外形因子

対象:

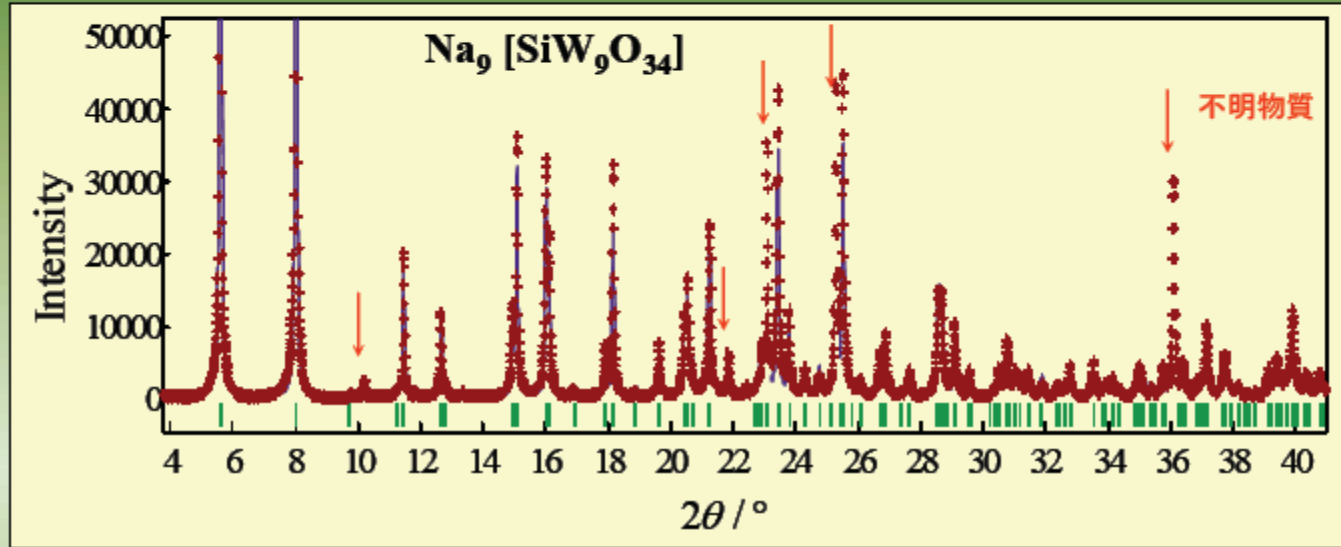
タンパク質、生体分子の構造解析、高圧回折、

中間スケールの構造、粒子、繊維、むら、分布

材料開発、セラミックス、無機材料

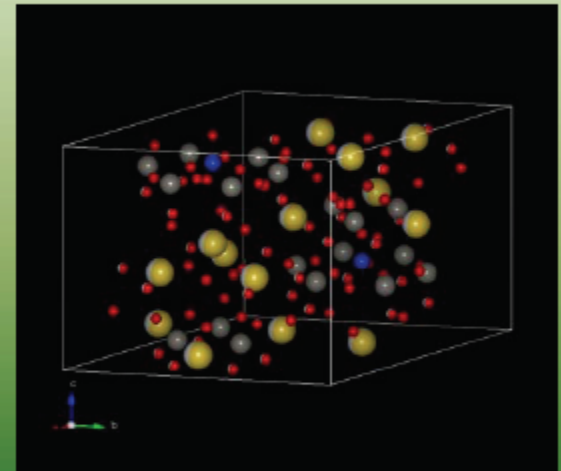
強相関系軌道秩序

# 金属錯体の精密構造解析



W1	12d	0.34143	0.42710	0.34691	1
W2	6c	0.25399	0.50798	0.60004	1
Si1	2d	0.33333	0.66667	0.366	1
Na1	2d	0.33333	0.66667	1.006	1
Na2	6c	0.487	0.513	0.592	0.5
Na3	12d	0.216	0.431	0.989	1
O1	6c	0.395	0.605	0.324	1
O2	6c	0.202	0.404	0.321	1
O3	2d	0.33333	0.66667	0.489	1
O4.....					

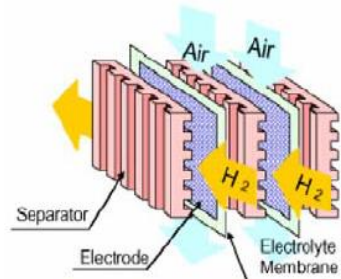
Space group: P 63 m c hexagonal  
 Lattice parameter (Å); a=14.4889 c=12.3405 γ=120.0



Na<sub>1.5</sub>(Vac.Na<sub>7.5</sub>) [SiW<sub>9</sub>O<sub>34</sub>]

# XAFS解析例(3)

キーワード：リチウムイオン電池、燃料電池、等



Polymer Electrolyte Fuel Cell

(株豊田中央研究所)

燃料電池：電極と電解質  
(SPring-8)



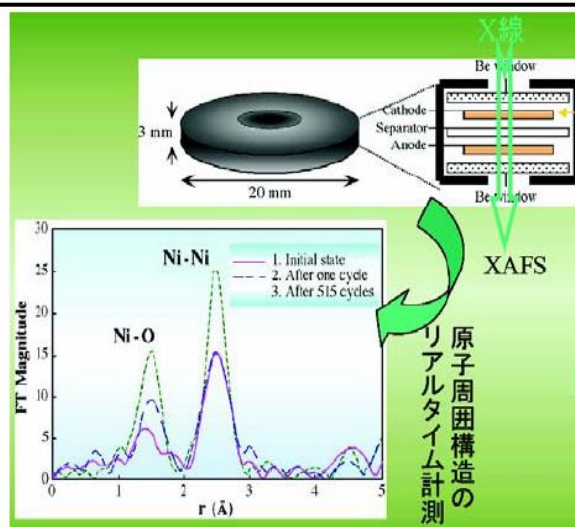
(トヨタ自動車株)

燃料電池バス

例：充放電に伴う電極の変化

X線回折、EXAFS 法

豊田中央研究所



(株豊田中央研究所)

ニッケルイオン電池のサイクル劣化機構  
(SPring-8)

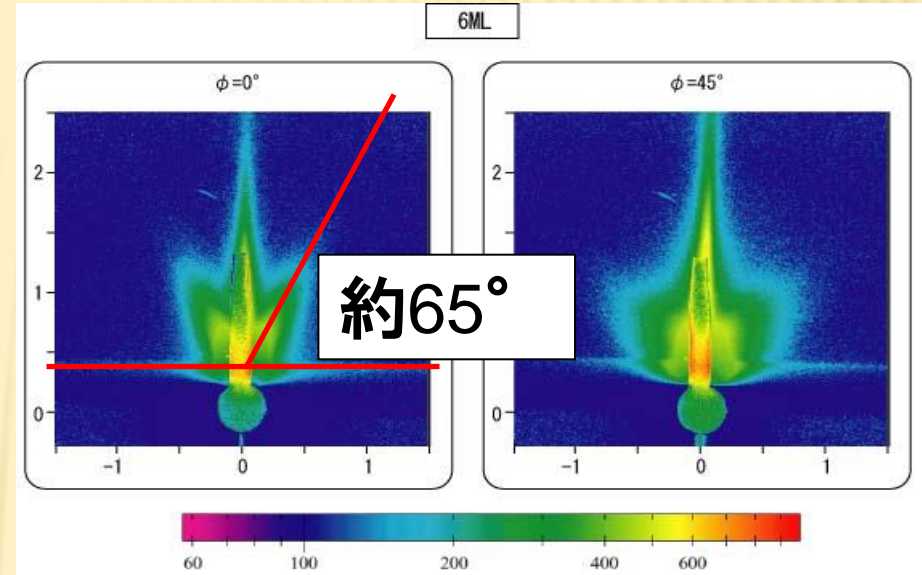
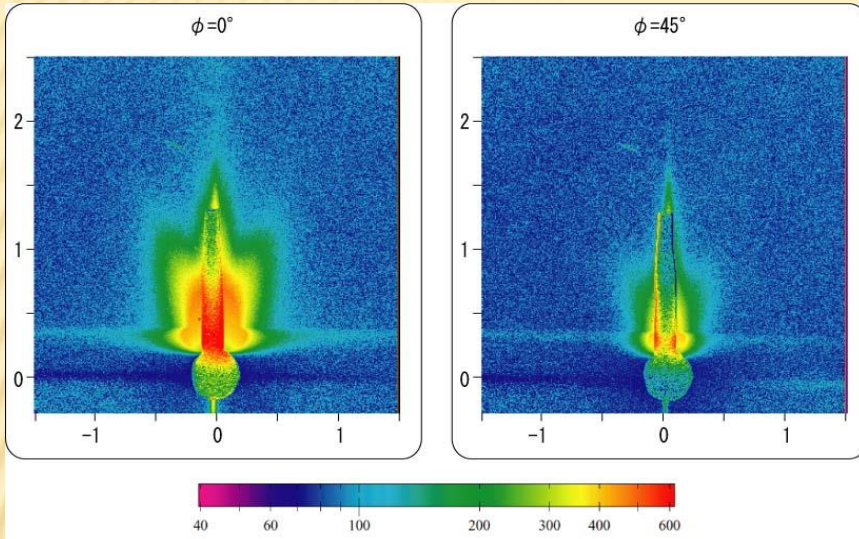


(トヨタ自動車株)

ハイブリッド車

# Amor.As/InAs dots / GaAsのG | S A X S

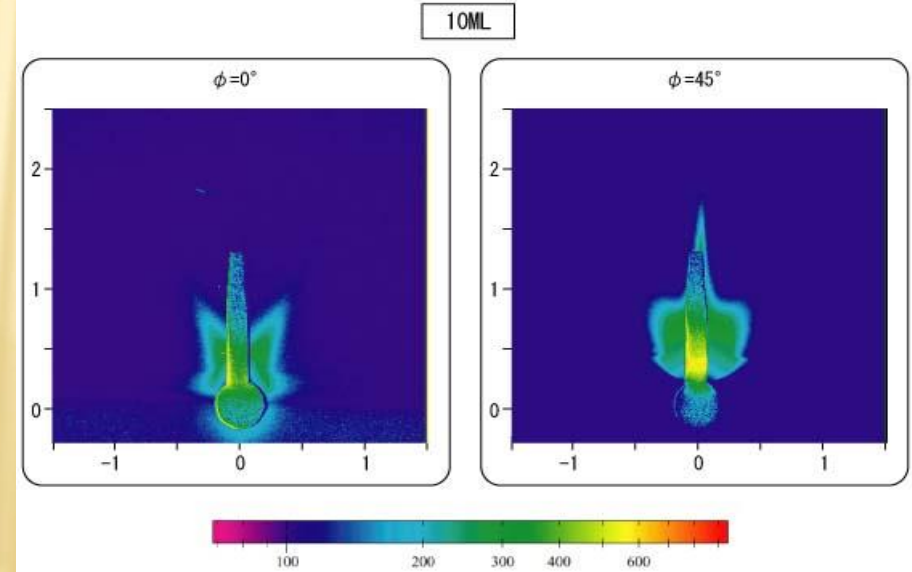
4 ML



ツノと基板のなす角が $65^\circ$

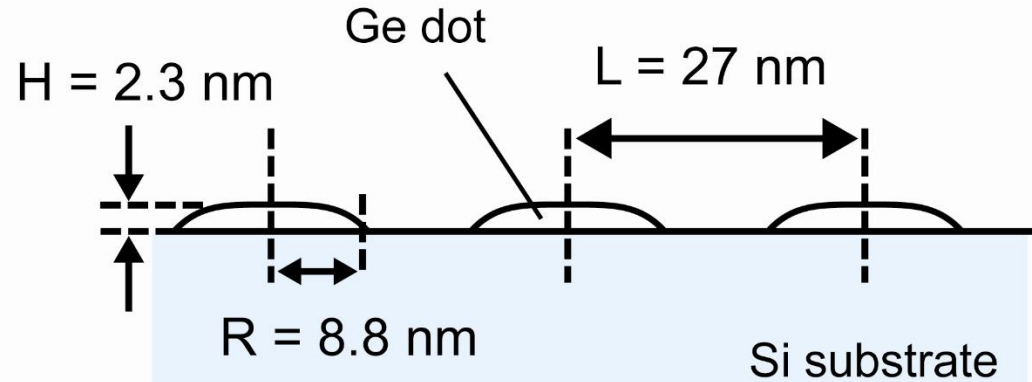
ファセットは(113)

面



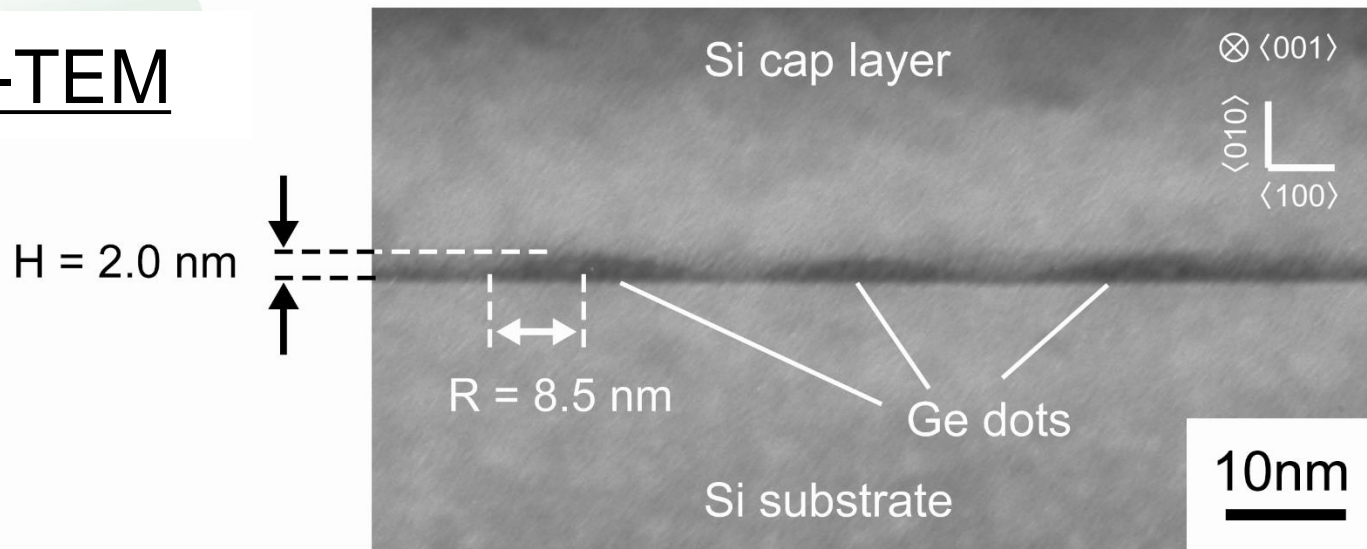
# GISAXSによるサイズ・形状解析の結果

GI-SAXS



Structure of Ge dots determined from GI-SAXS experiment.

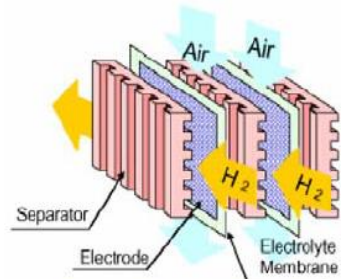
X-TEM



Cross-section TEM image of Si/Ge/Si nanodots (As-grown).

# XAFS解析例(3)

キーワード：リチウムイオン電池、燃料電池、等



Polymer Electrolyte Fuel Cell

(株豊田中央研究所)

燃料電池：電極と電解質  
(SPring-8)



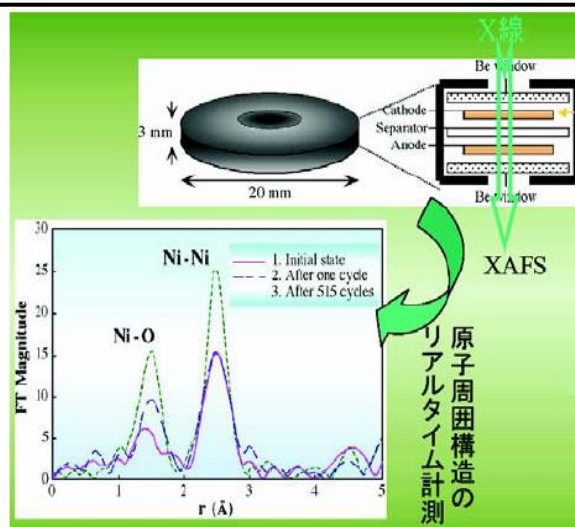
(トヨタ自動車株)

燃料電池バス

例：充放電に伴う電極の変化

X線回折、EXAFS法

豊田中央研究所



(株豊田中央研究所)

ニッケルイオン電池のサイクル劣化機構  
(SPring-8)

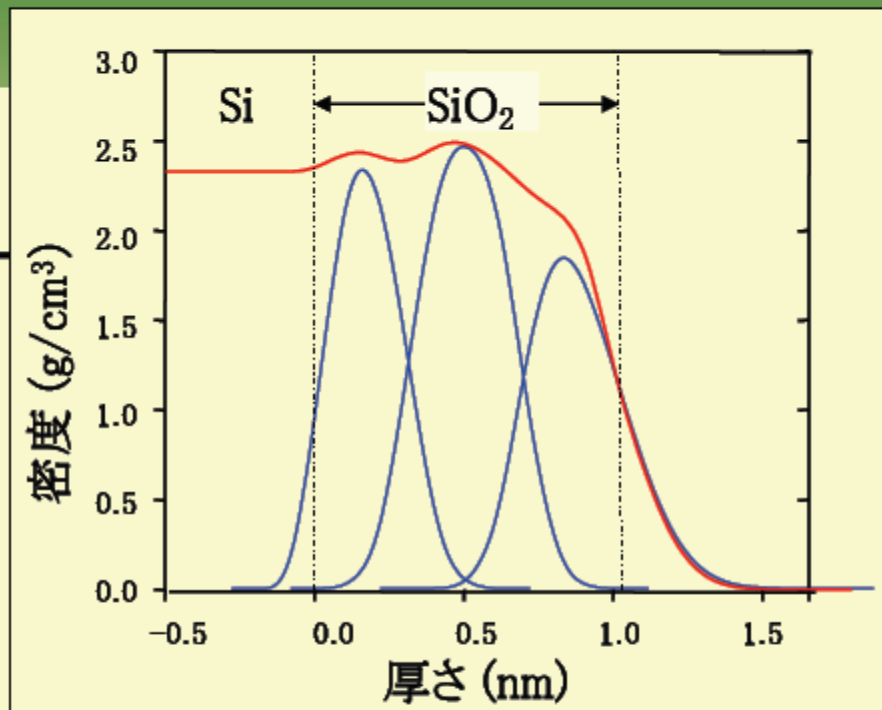
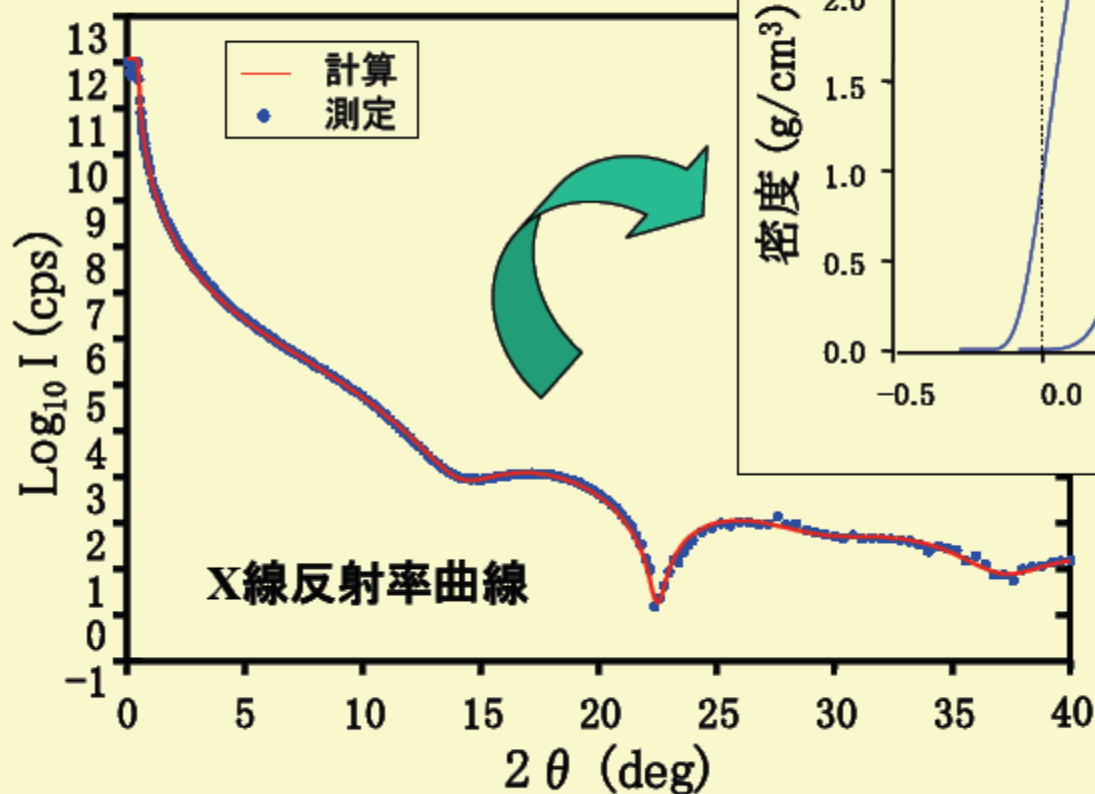


(トヨタ自動車株)

ハイブリッド車

# ナノ薄膜の積層構造解析

ゲート絶縁膜:  $\text{SiO}_2$  1.0 nm

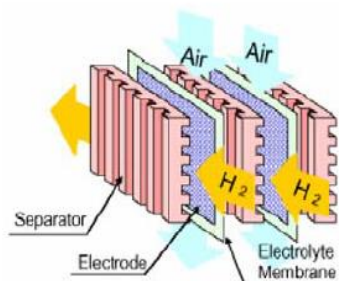


解析された密度分布

1nmの極薄膜積層構造の十分な定量

# XAFS解析例(3)

キーワード：リチウムイオン電池、燃料電池、等



Polymer Electrolyte Fuel Cell

(株豊田中央研究所)

燃料電池：電極と電解質  
(SPring-8)



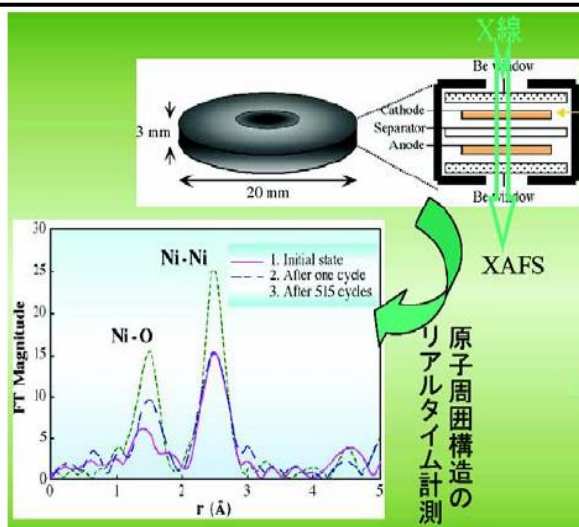
(トヨタ自動車株)

燃料電池バス

例：充放電に伴う電極の変化

X線回折、EXAFS 法

豊田中央研究所



(株豊田中央研究所)

ニッケルイオン電池のサイクル劣化機構  
(SPring-8)



(トヨタ自動車株)

ハイブリッド車



# 結像・イメージング

手法:

結像型のイメージング、スキャン型のイメージング  
分かること:

分光学的測定、回折・散乱測定でわかること全般  
位置の関数として求まる。

特徴:

結像型: 短波長=高分解能、透過力が高い  
吸収コントラスト、位相コントラスト、特性吸収  
位相回復

対象:

大域的な結晶のイメージ、イメージ転写  
医療応用、元素マッピング 環境、生物  
あらゆる測定の高度化

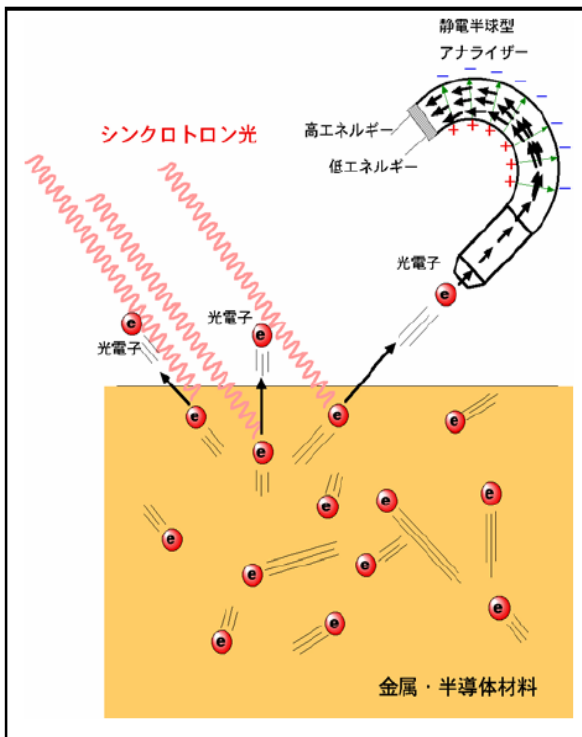
# 材料と機能

キーワード：金属材料、半導体材料、機能性電子材料、光電子分光

例：電子構造の解明

光電子分光

③



光電子分光実験の模式図



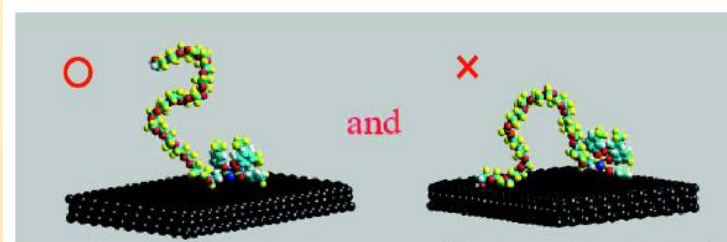
超伝導材料や各種電子材料の開発



超伝導体の応用例であるリニアモーターカー。愛地球博 JR超伝導リニア館。(ウキペディアフリー百科事典より抜粋)

その他の例

潤滑膜の吸着状態



洗浄可能

洗浄不可能

(SPring-8)