

名古屋大学  
シンクロトロン光研究センター  
田渕雅夫

# 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：XAES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？

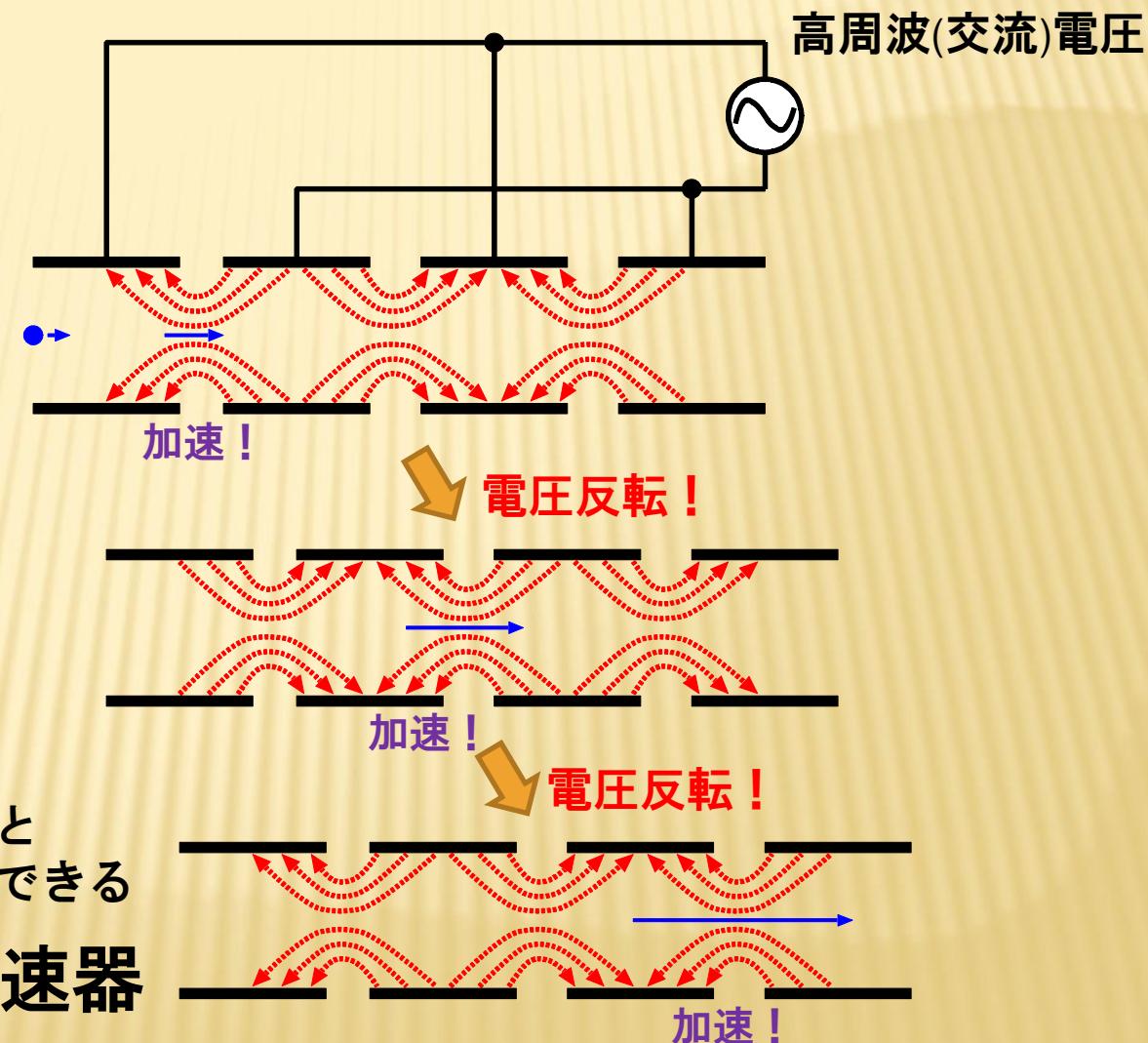
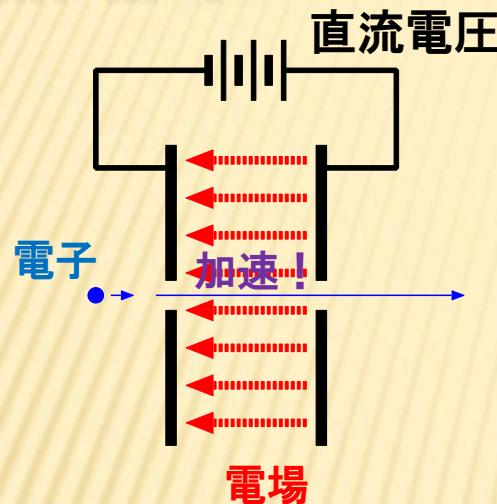
## ✗ Synchrotron

➡ 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

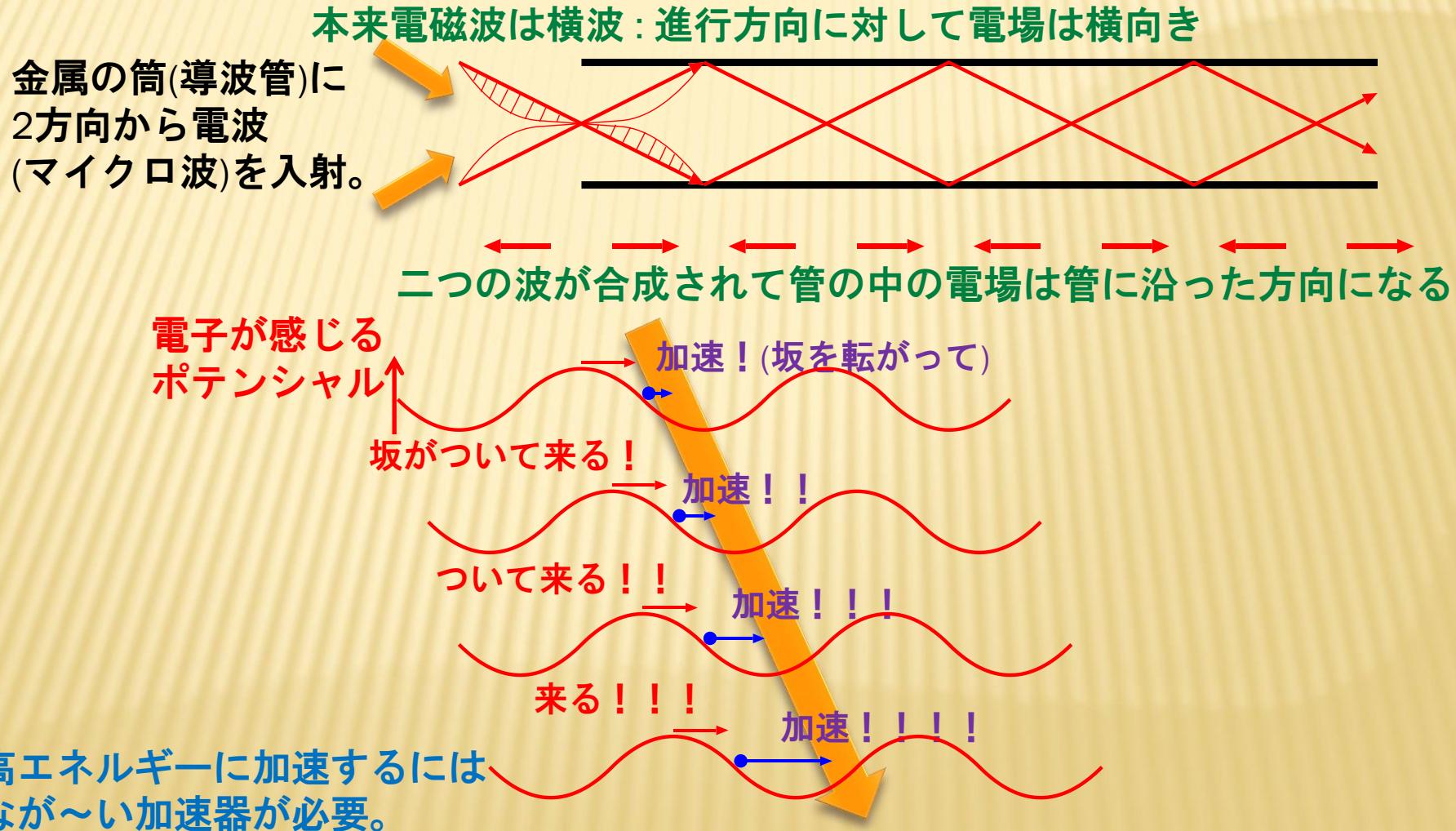


もしこんな構成にできると  
一つの電源で何回も加速できる

線形加速器

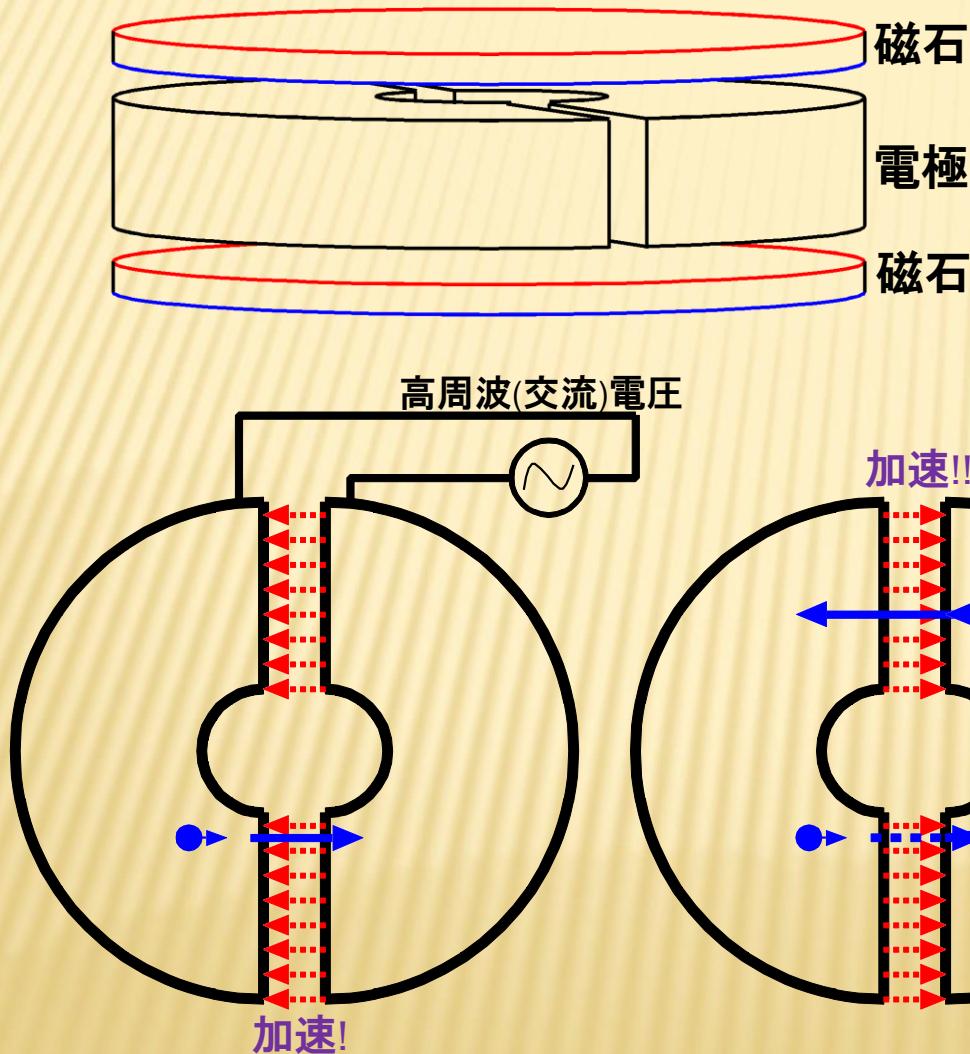
# 加速器

## 線形加速器(高周波加速空洞、導波管)



# 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

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

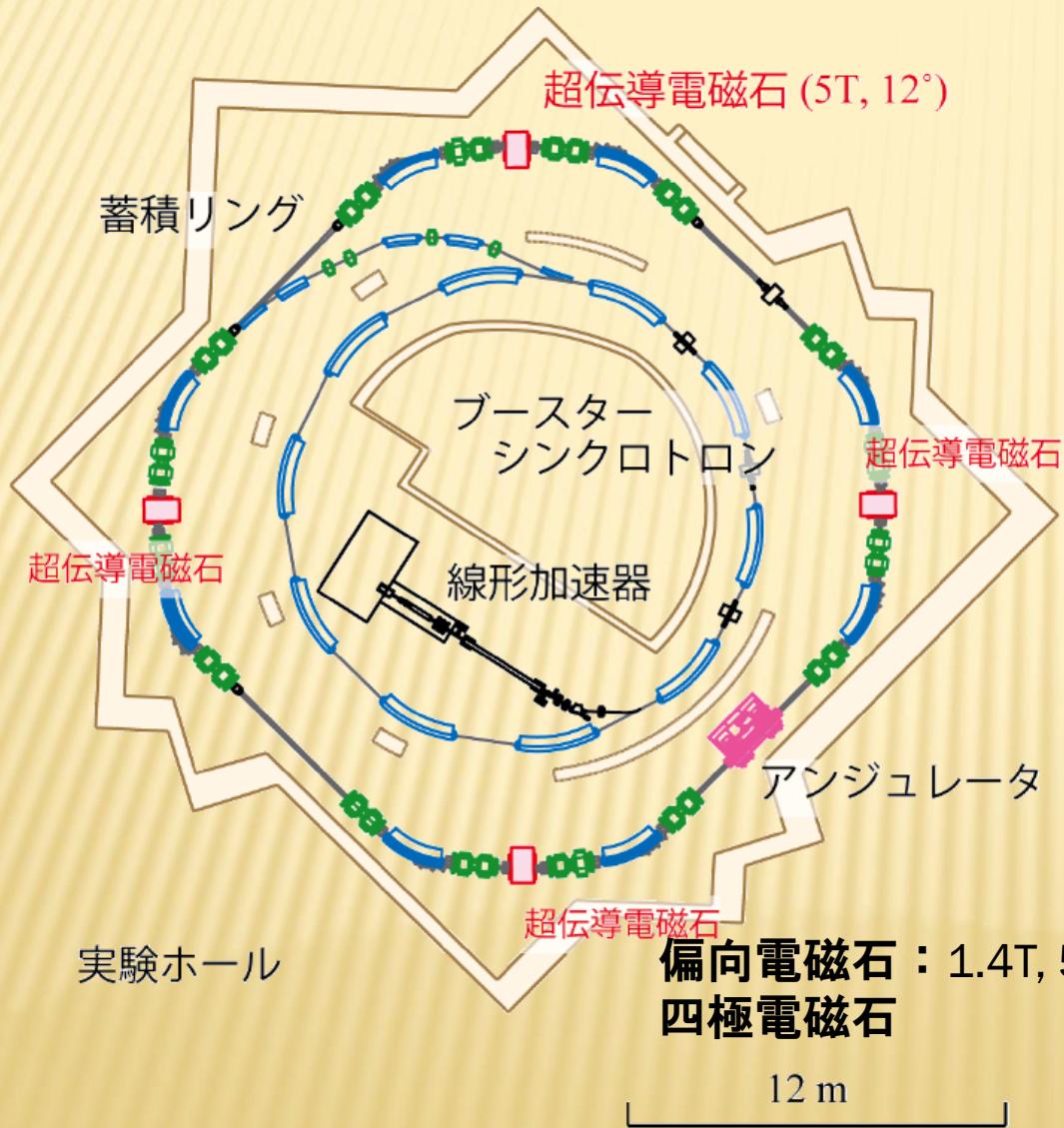
$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} : \quad m \frac{dv_x}{dt} = qv_y B, \quad m \frac{dv_y}{dt} = -qv_x B$$
$$v_y = \frac{m}{qB} \frac{dv_x}{dt} \quad \frac{d^2v_x}{dt^2} = -\left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_x$$

$$v_x = A \sin \omega t \quad (x = A' \cos \omega t)$$

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

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 :  $\sim 50\text{MeV}$

ブースター  
シンクロトロン :  $\sim 1.2\text{GeV}$

蓄積リング :  $1.2\text{GeV}$

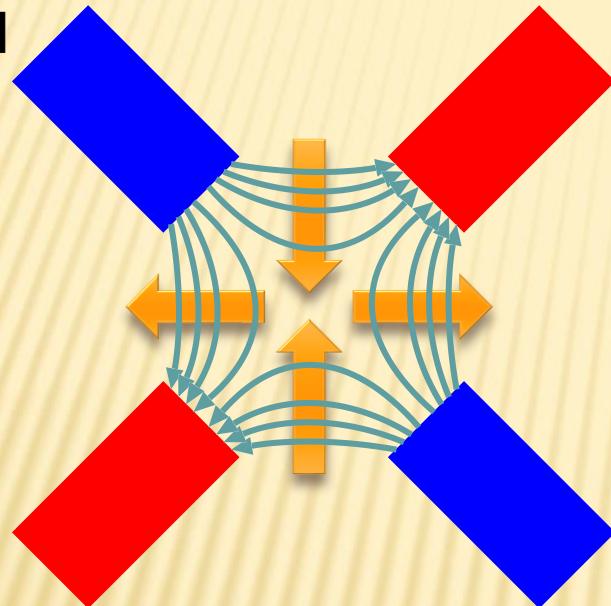
沢山の加速器の  
集まり！

電子が走るのは超高真空の  
細いパイプの中

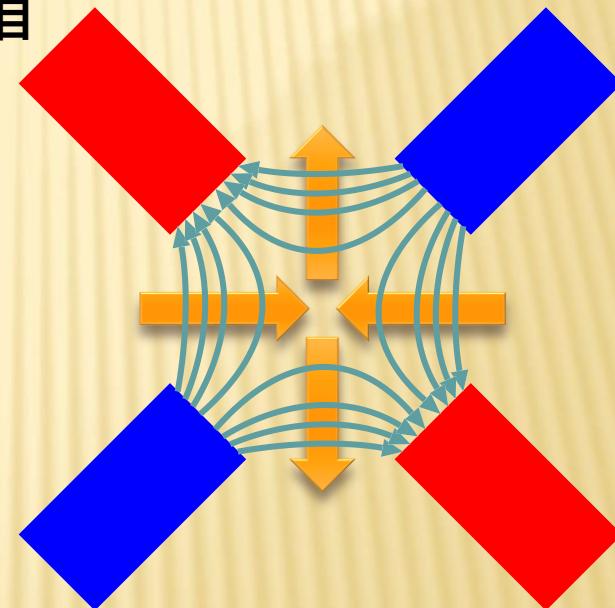
# 四極電磁石 (収束/レンズ)

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



2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

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)



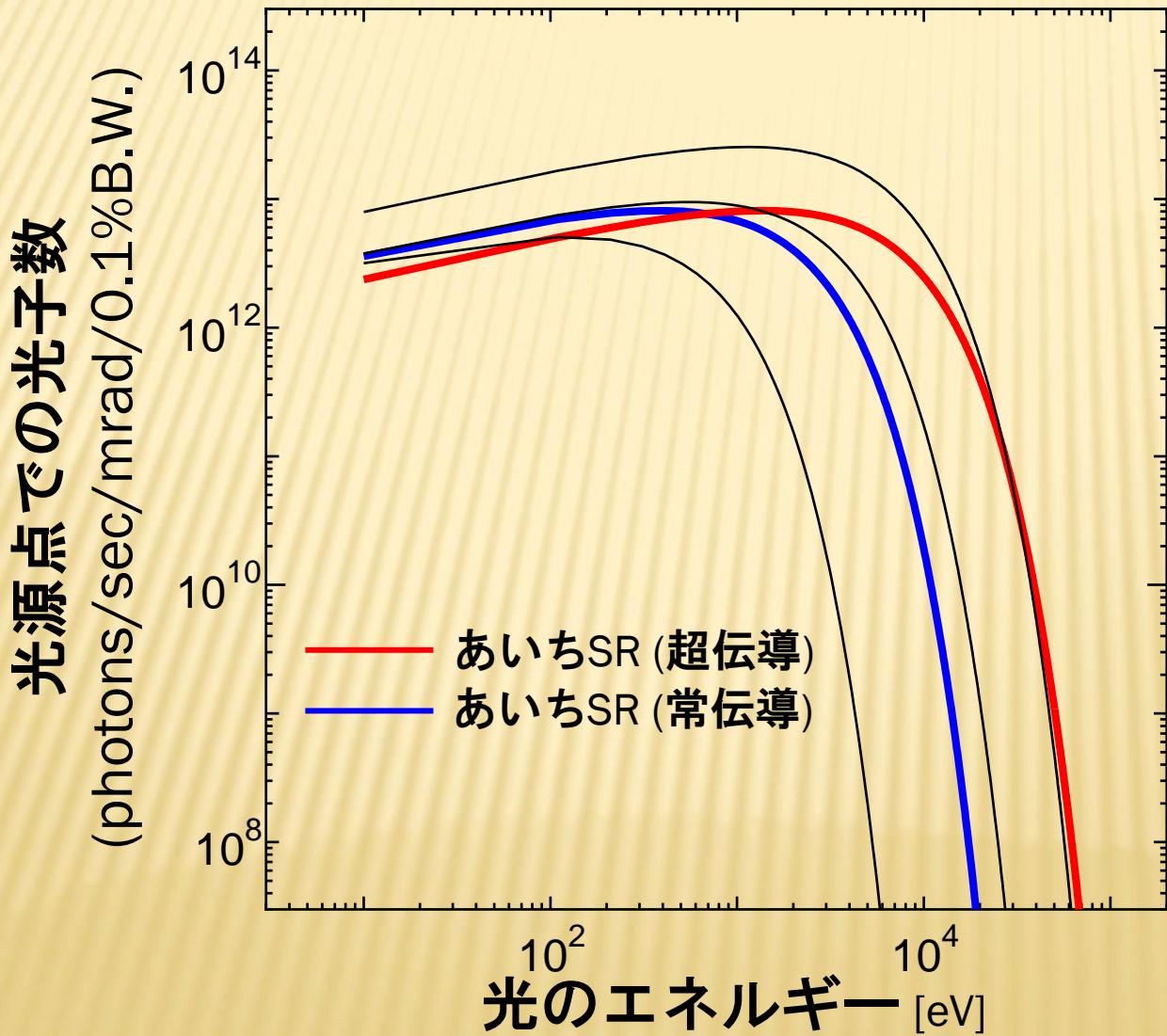
放射光に利用価値を見いだすと  
シンクロトロンは  
貴重な放射光源!!

# 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

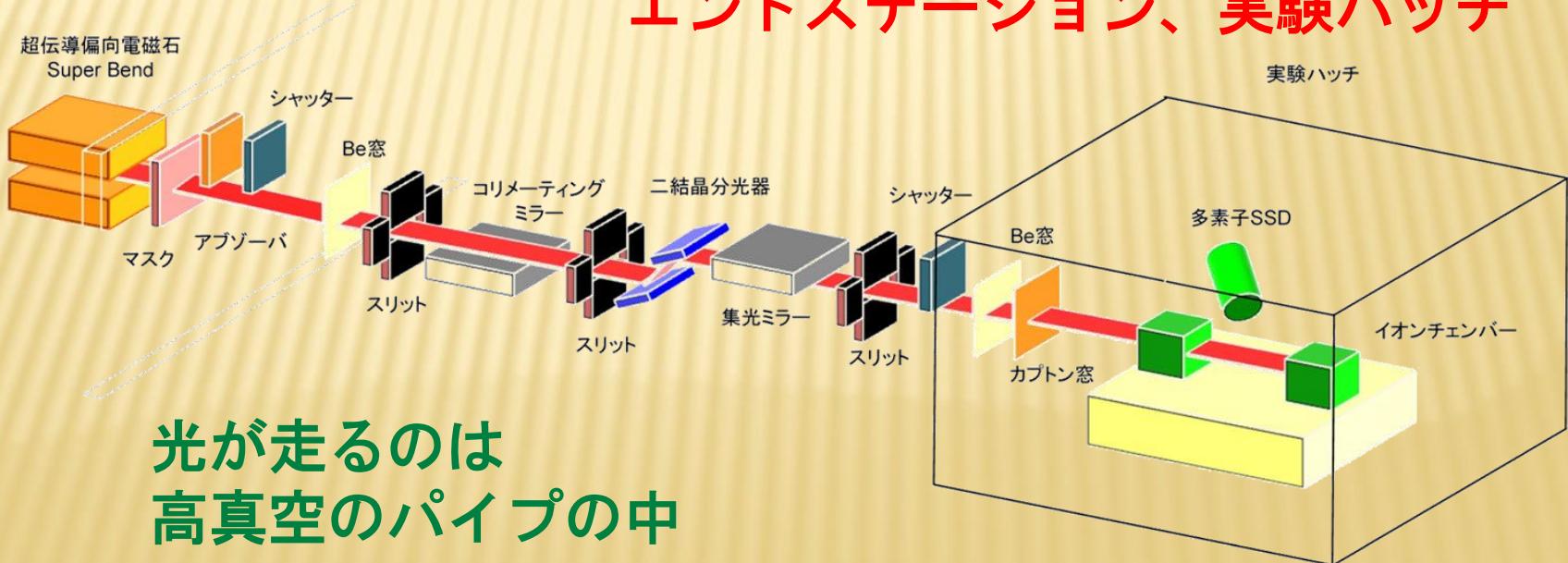


# 発生した放射光の使い方(1)

## 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

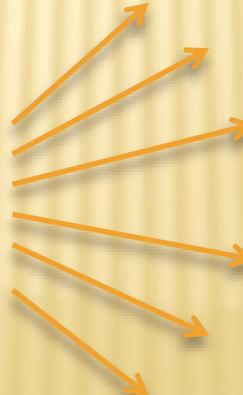
様々な色/波長/エネルギーの光



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



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

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

## ライフサイエンス分 野

初期ガンの検出  
0.1mmのガン  
3次元「解剖」

ユビキタスデバイス

超微細描画・超小型センサー

エネルギー  
燃料電池  
Liイオン電池

蛍光X線分析

XAFS

X線分光、光電子分光

紫外線

蛍光X線分析

創薬関連構造解析

イメージング

可視・赤外分光

イメージング

XAFS

超微細加工

X線反射率

## 情報通信分野 ナノテクノロジー・材料 分野

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

## ものづくり技術分 野

原子・分子レベル制御  
結晶成長コントロール  
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



# 施設見学

施設見学

# 放射光って何？(もう一度)



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

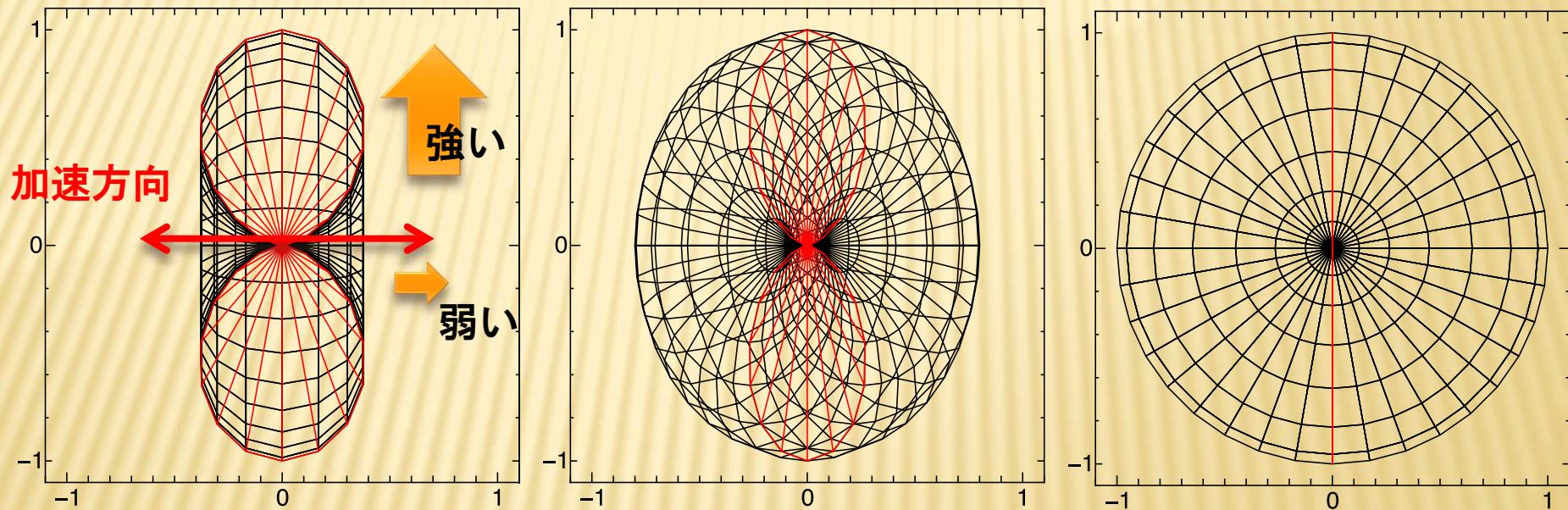
(特徴を指した言葉ではないけれど)

- ・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

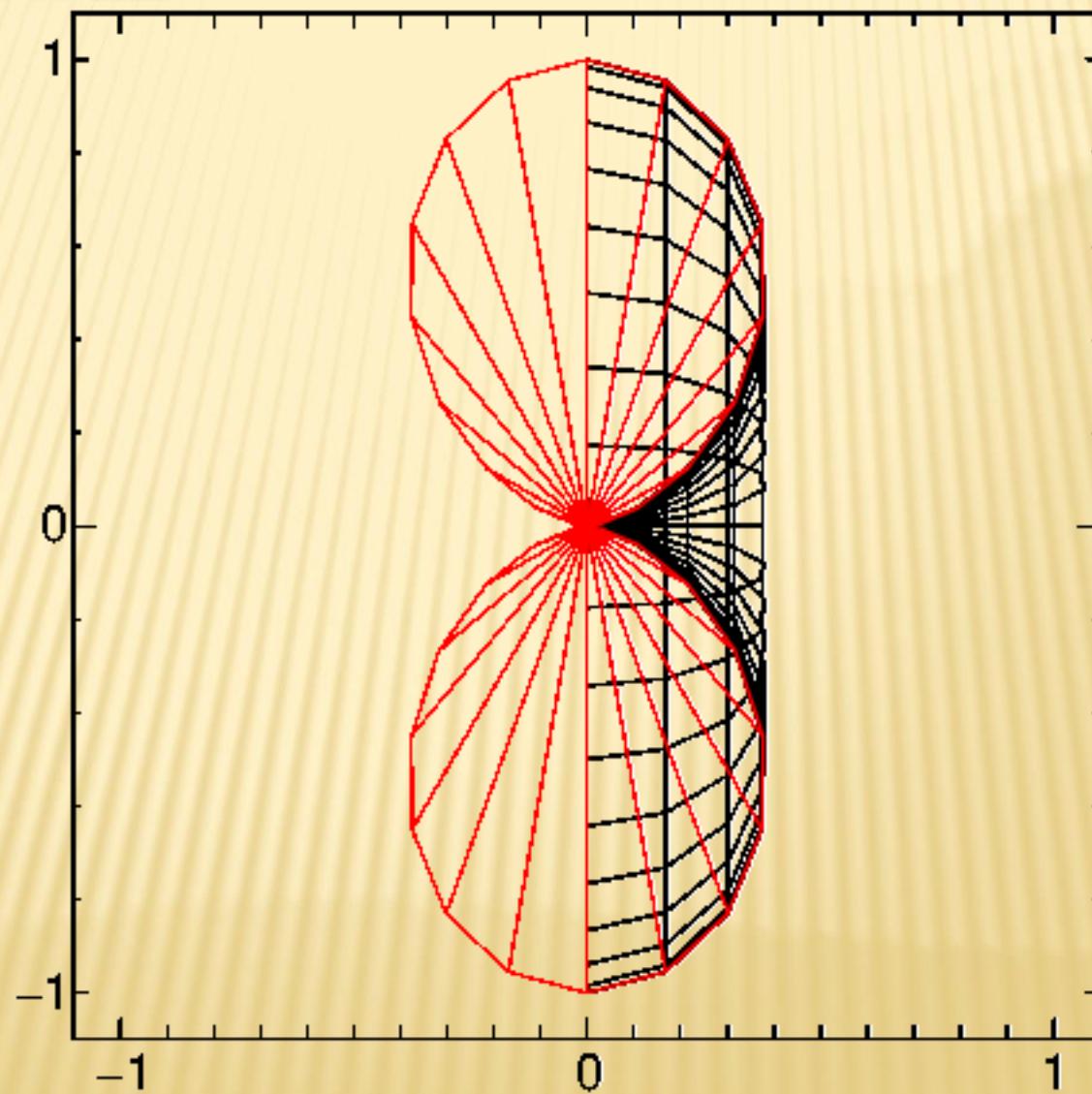
## 双極子輻射

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

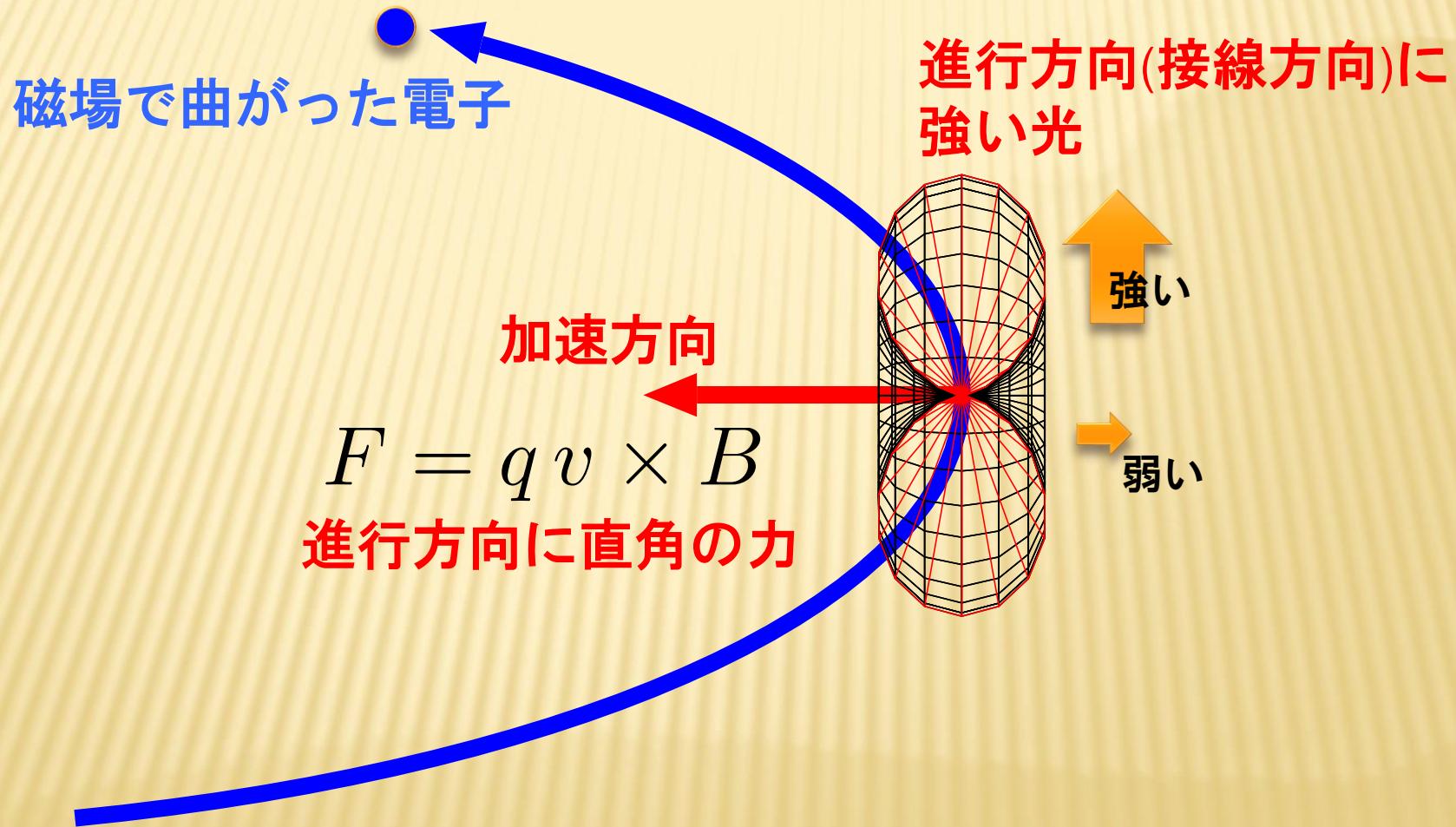


加速に沿った方向(赤矢印方向)には弱く、直角方向に強い。  
加速の方向(矢印)の周りには回転対象

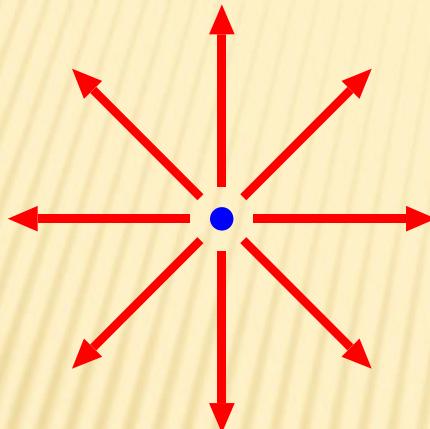
# 双极子放射



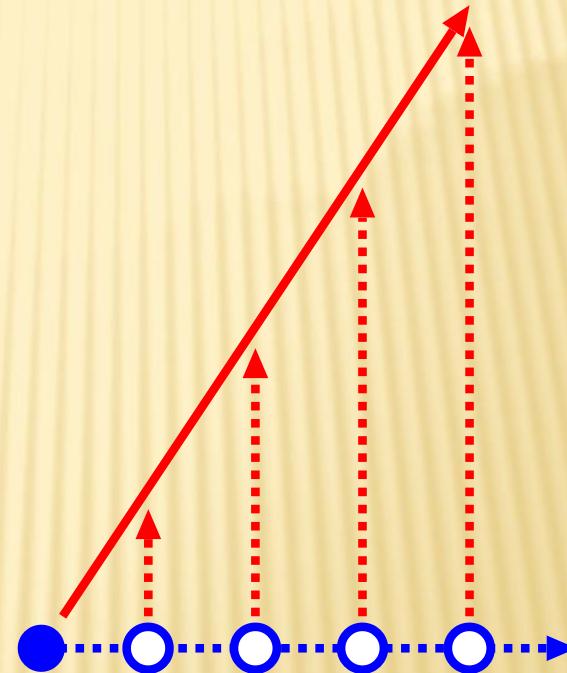
# 加速度を受けた電子からの放射



# 相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-

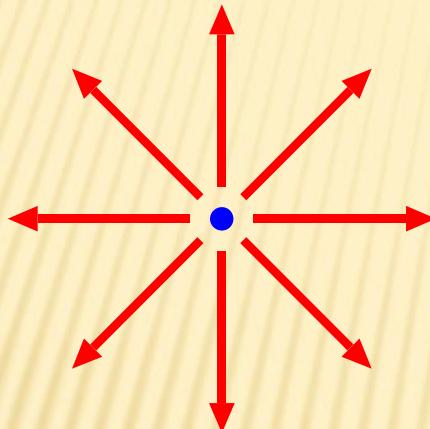


仮に、一個の電子が  
等方に光を出すと…

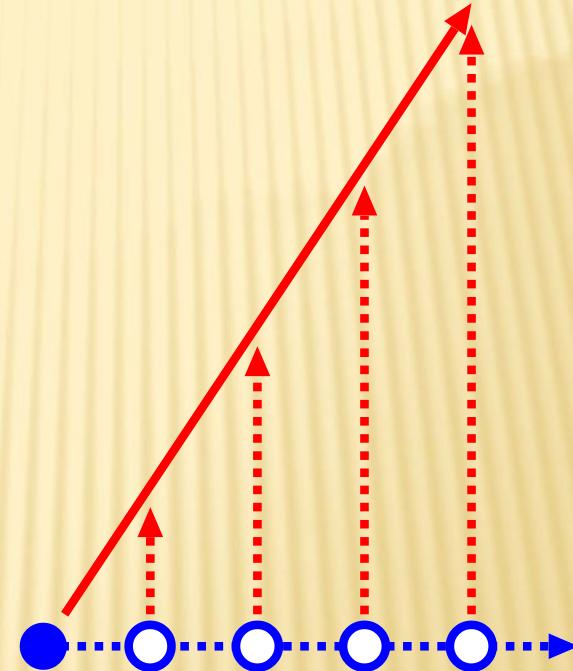


電子から真横に出た光は  
止まっている人から見ると  
前方に出たように見える。

# 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…

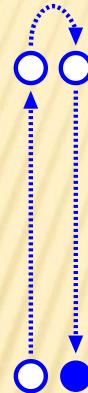


電子から真横に出た光は  
止まっている人から見ると  
前方に出たように見える。

本当か?

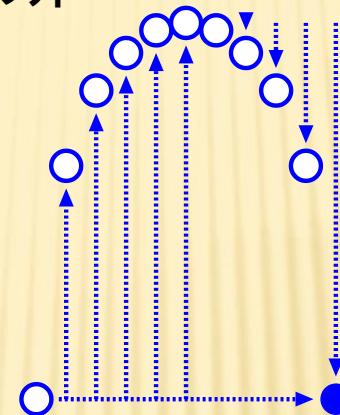
# 相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-

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

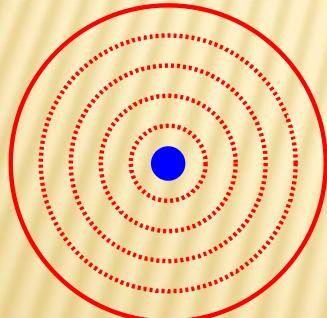
# 相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-

電車の中

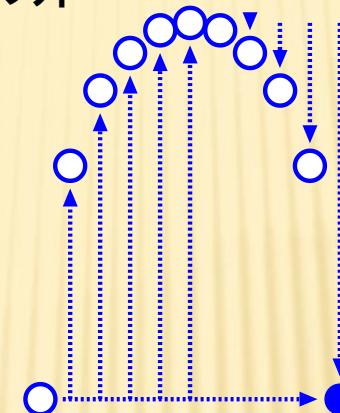


まっすぐ投げると  
まっすぐ落ちる

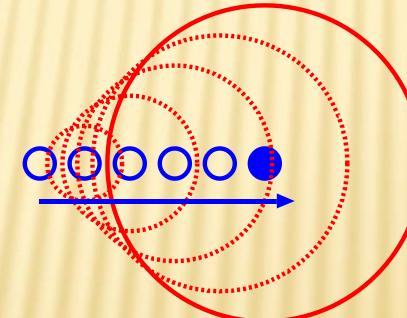
等方に広がる波



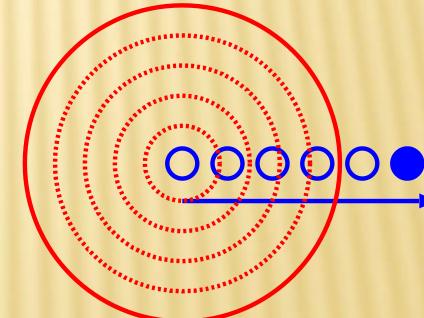
電車の外



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



媒質が一緒に動くと

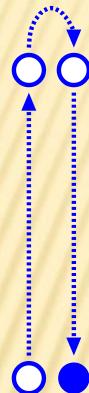


媒質が止まっていると...  
(電車の中では後ろに流れる)

光はどっち？

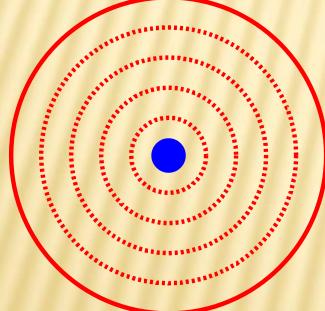
# 相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-

電車の中

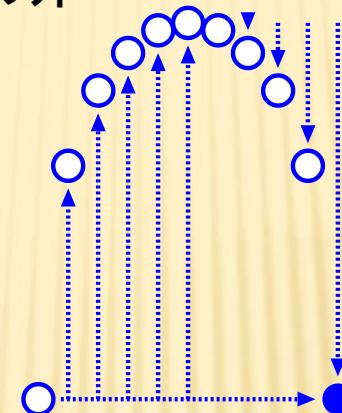


まっすぐ投げると  
まっすぐ落ちる

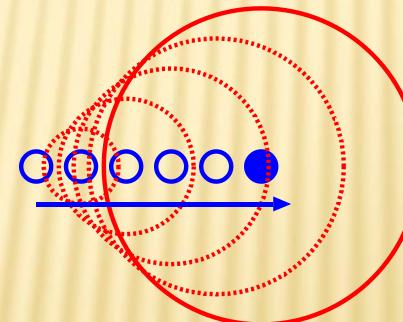
等方に広がる波



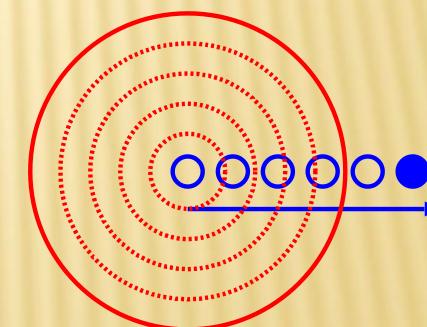
電車の外



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



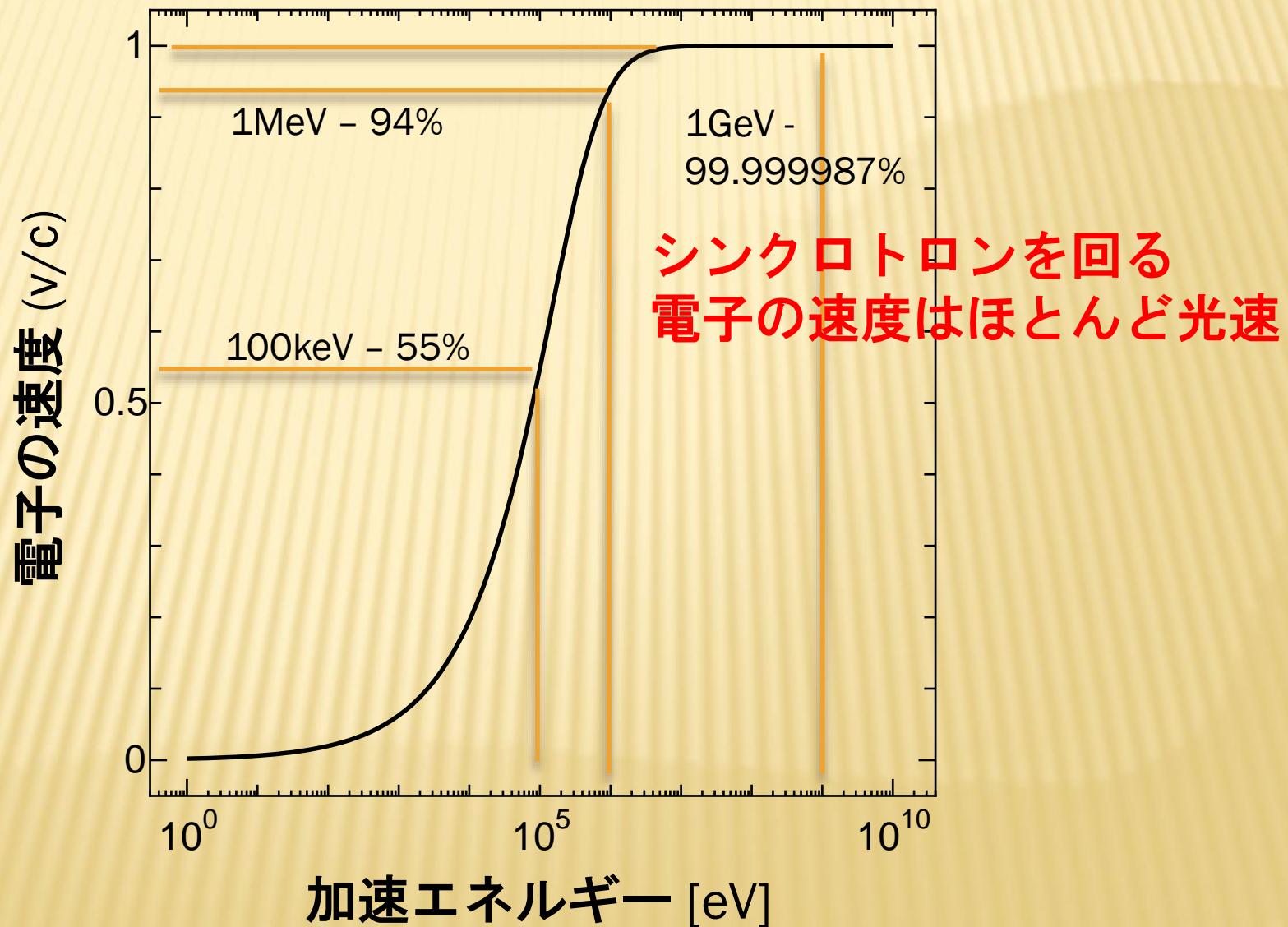
媒質が一緒に動く



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-

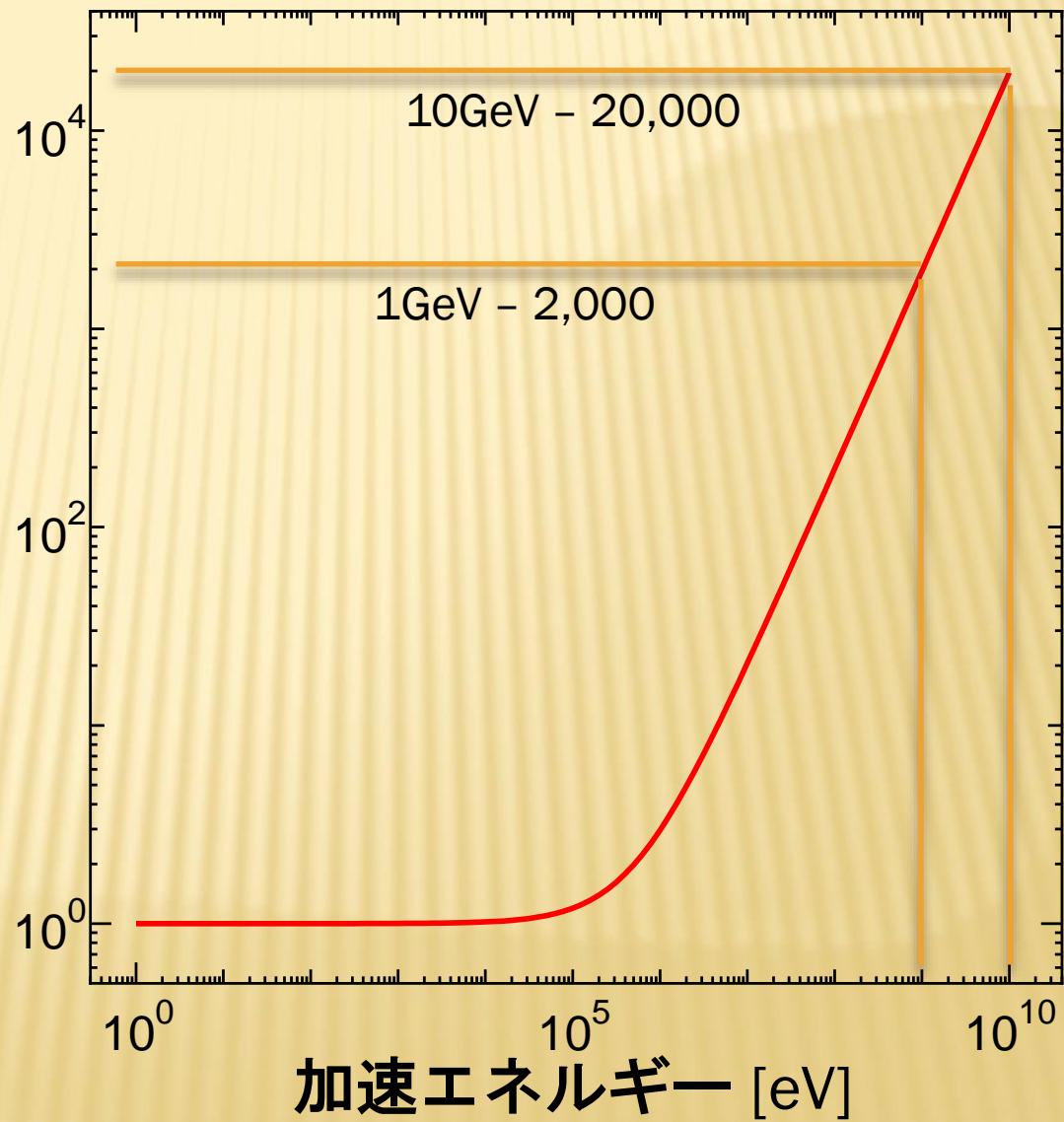


# 相対論効果 -進行方向の光がさらに強まる-

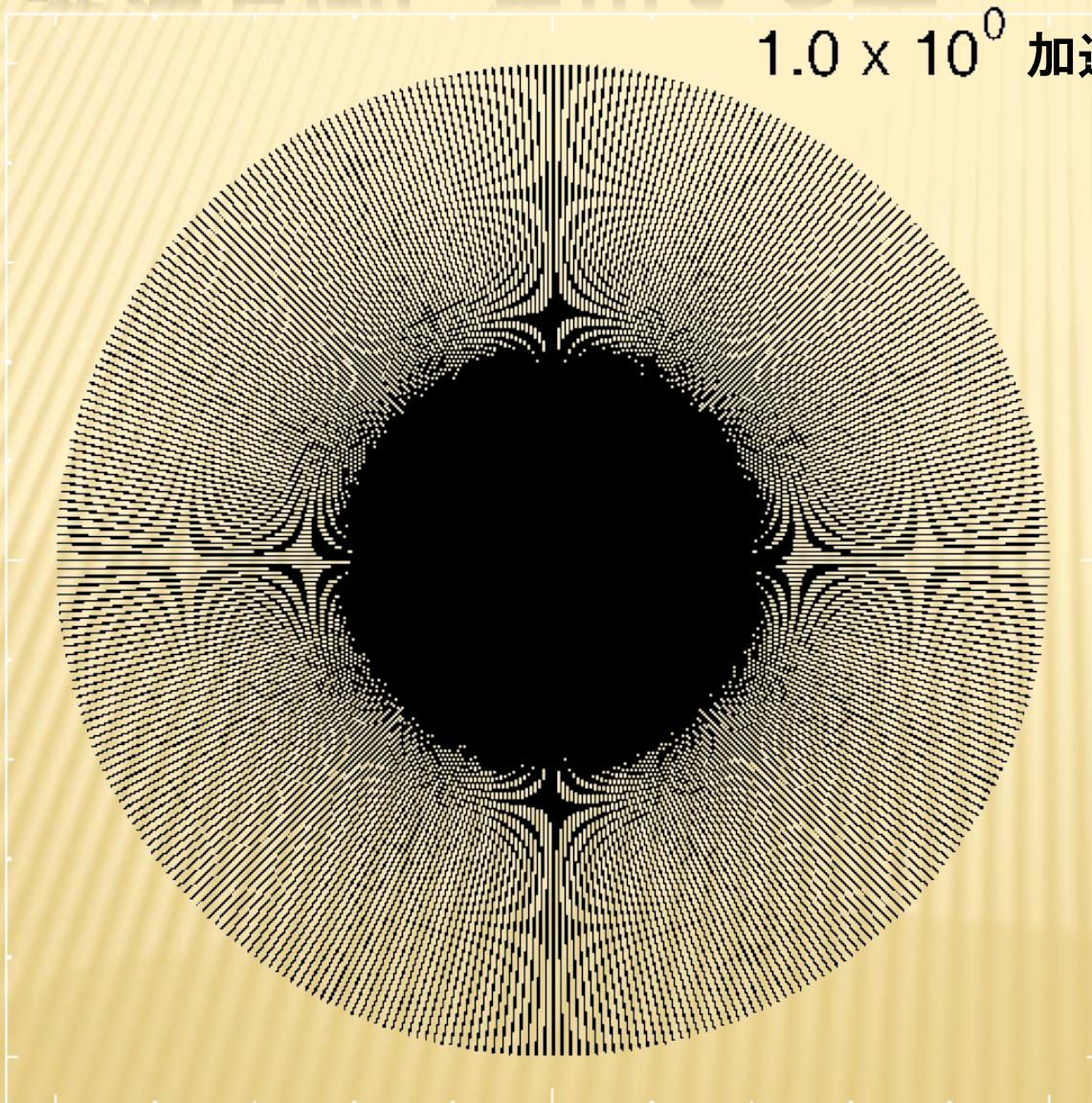
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ローレンツ因子  
相対論効果が  
現れる度合い

ローレンツ因子



# 進行方向に集中する光

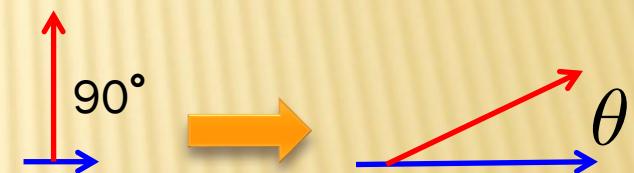
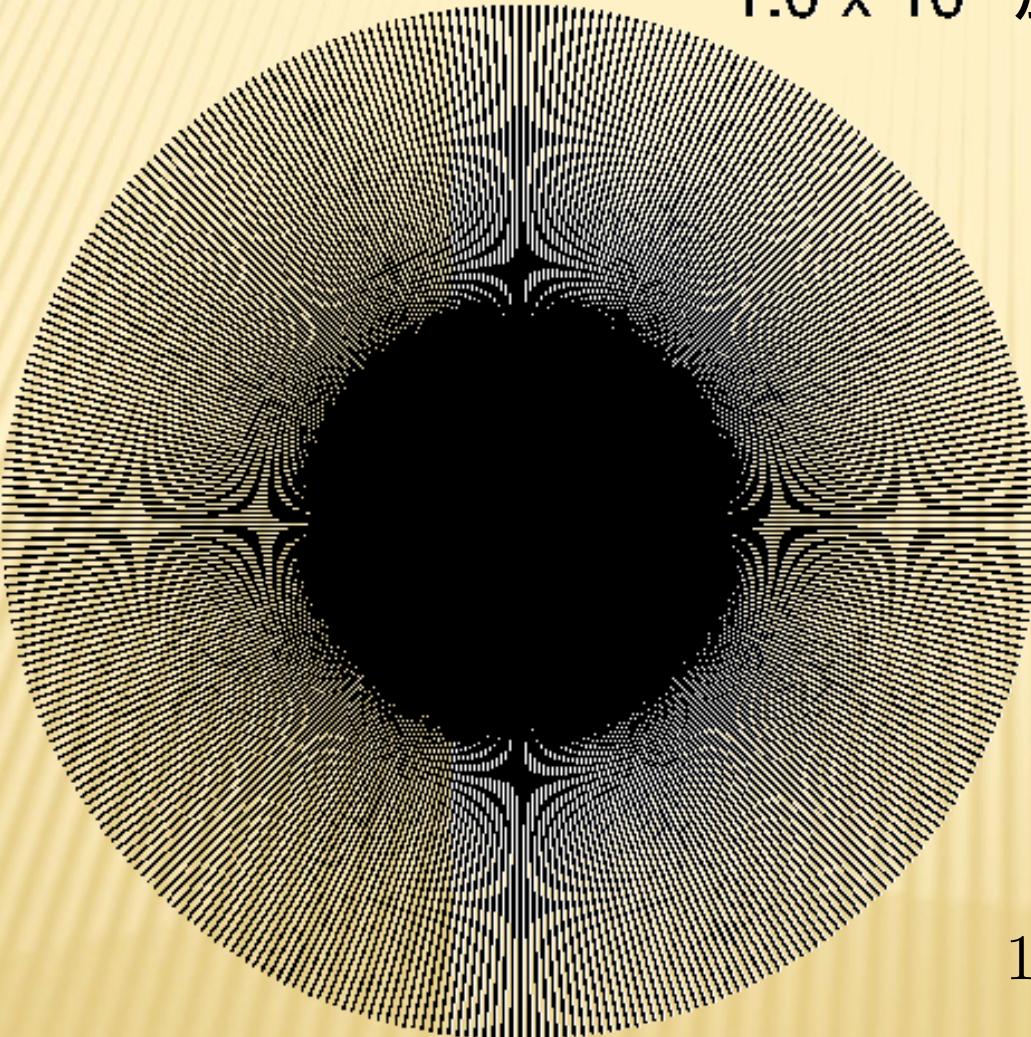


$$\theta \simeq \frac{1}{\gamma}$$

The diagram illustrates the relationship between the angle  $\theta$  and the Lorentz factor  $\gamma$ . It shows a coordinate system with a vertical red arrow and a horizontal blue arrow. A 90-degree angle is marked between them. An orange arrow points at an angle  $\theta$  from the horizontal blue axis. The equation  $\theta \simeq \frac{1}{\gamma}$  is shown below the diagram, indicating that the angle  $\theta$  is approximately equal to the reciprocal of the Lorentz factor  $\gamma$ .

# 進行方向に集中する光

$1.0 \times 10^0$  加速電圧[eV]



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

$$1\text{GeV} : 5.0 \times 10^{-4} \simeq 0.03 \text{ rad}$$

$$10\text{GeV} : 5.0 \times 10^{-5} \simeq 0.003 \text{ rad}$$

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

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

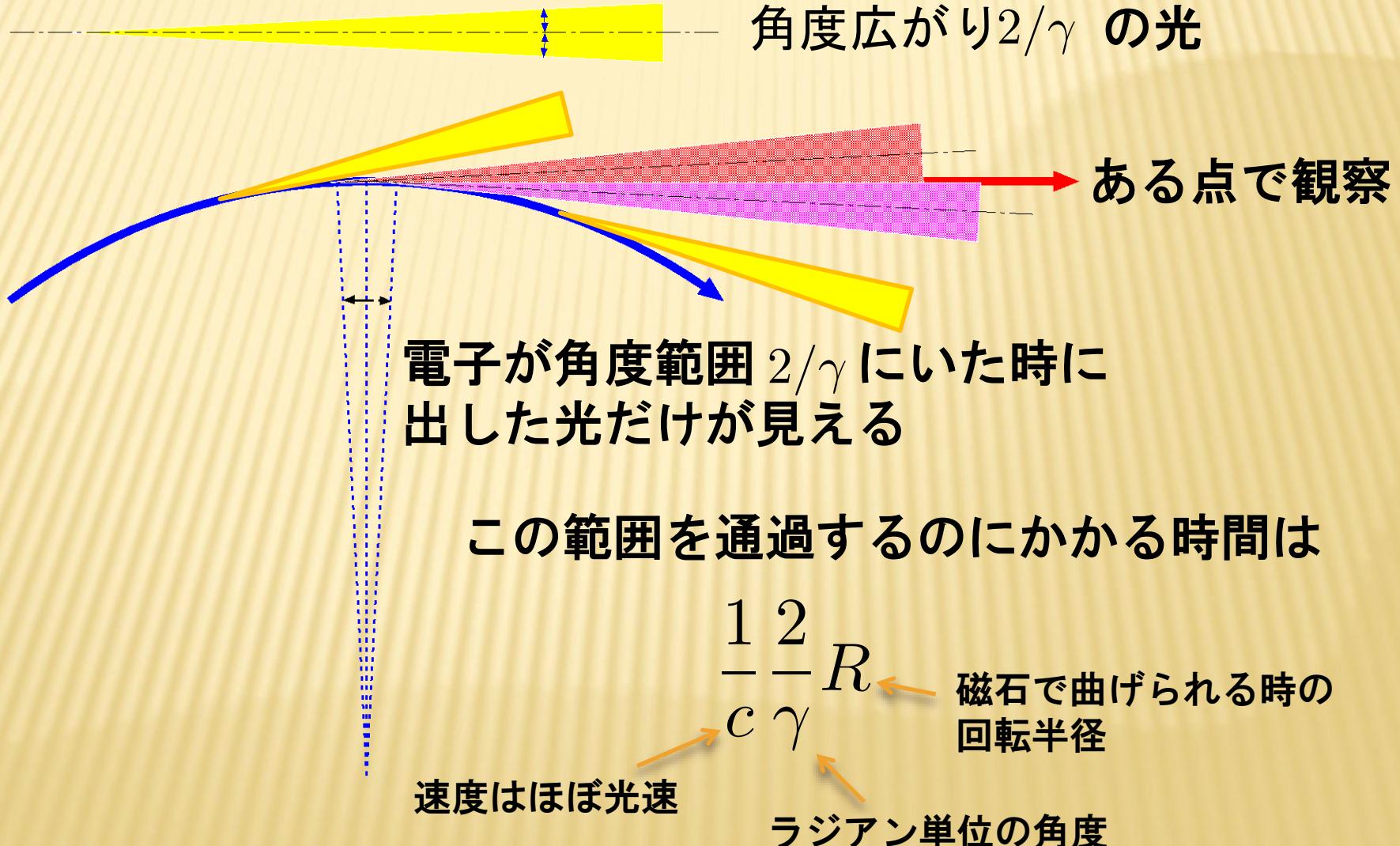
E I R  
あいちSR : 1.2, 0.3, 0.8,  
SPring-8 : 8.0, 0.1, 40,

kW !!  
P  
57.3  
113

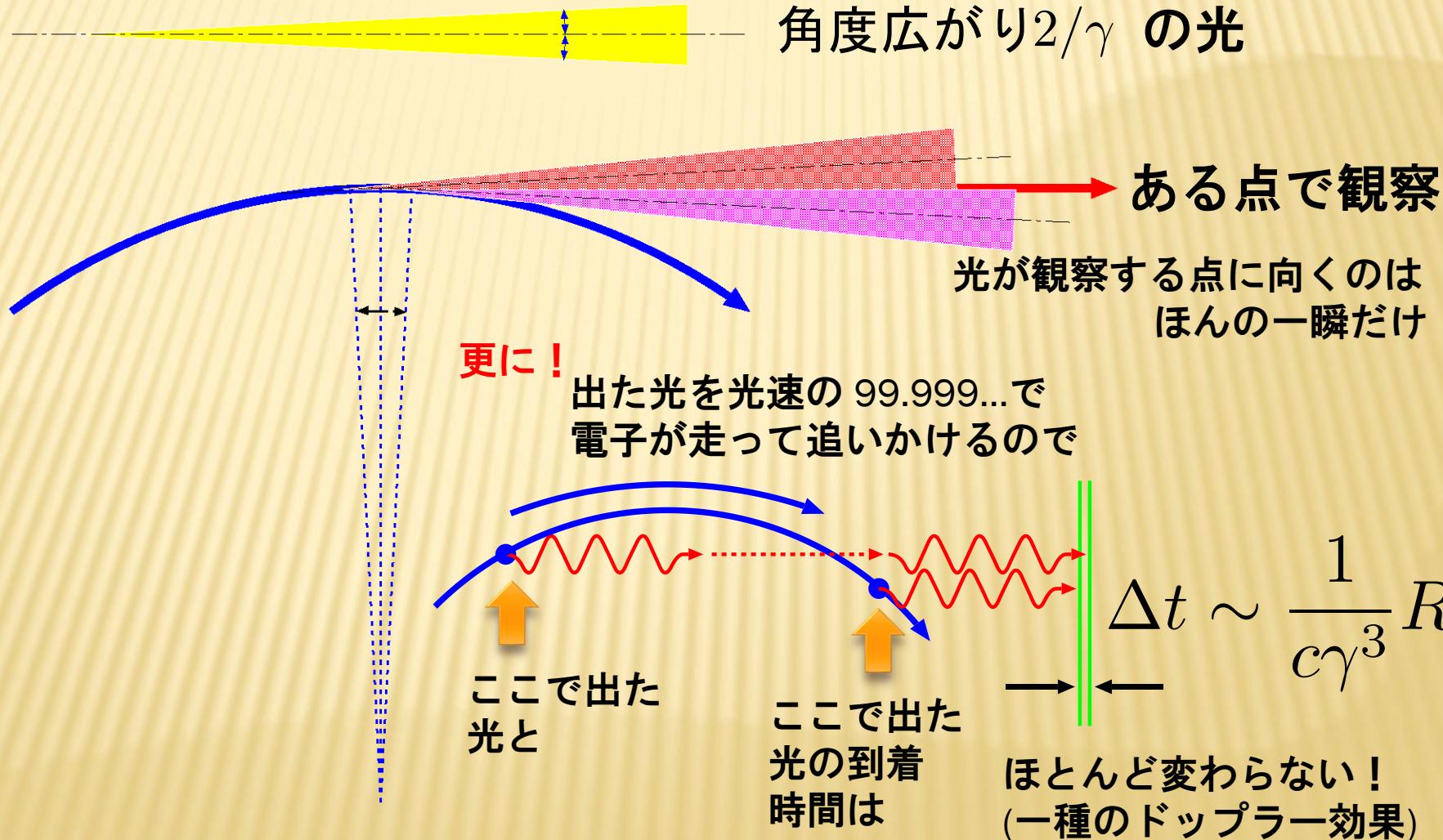
# 放射光の特徴

- ・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



# 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

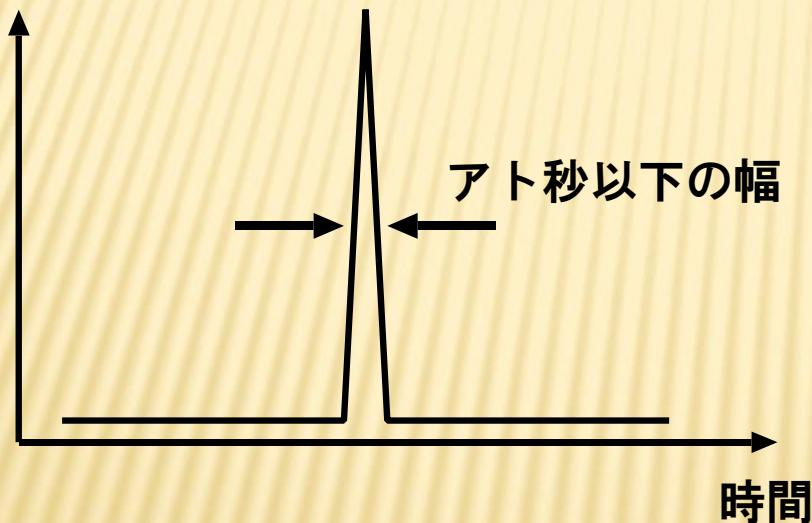
ミリ秒、マイクロ秒、ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒、アト秒

$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$	$10^{-18}$
-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------

# 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



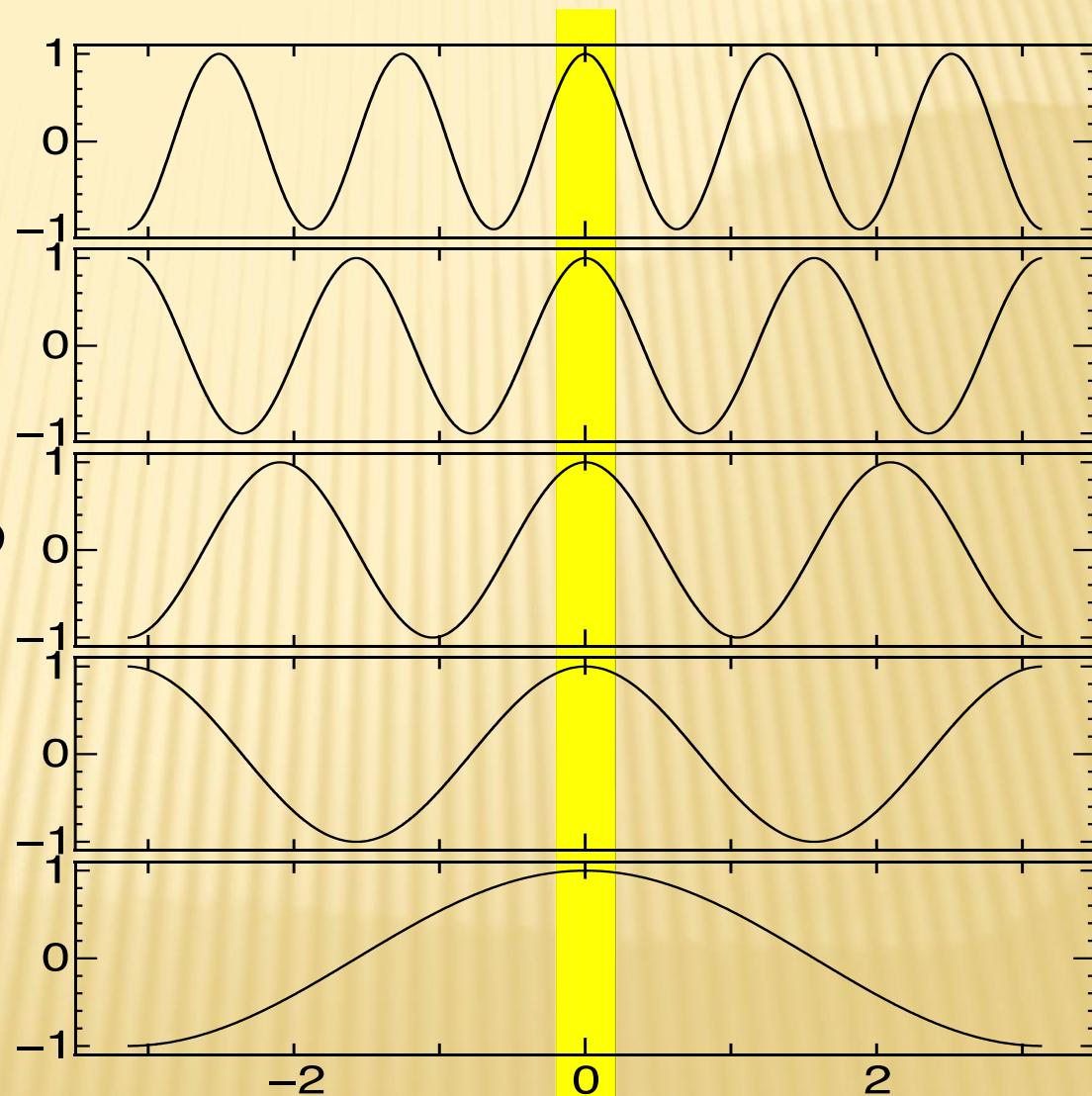
だけど光は、電磁「波」。  
 $\sin$ ,  $\cos$

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

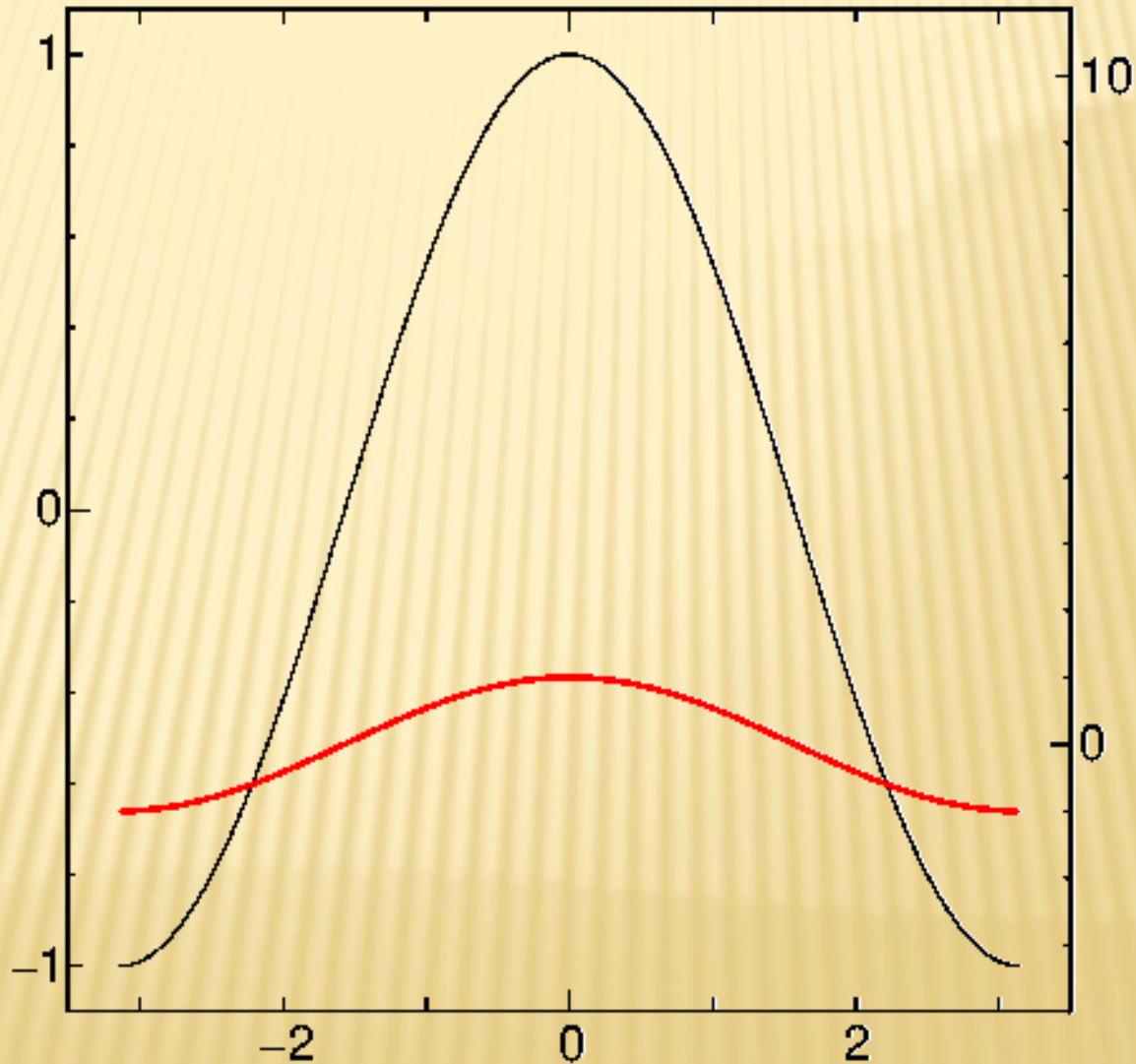
$x = 0$  の点では、  
全ての波が 1。  
その他の場所では  
 $+/$ -バラバラの値をとる



# 放射光のスペクトル

個々の正弦波(黒線)

正弦波の合計(パワースペクトル)



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

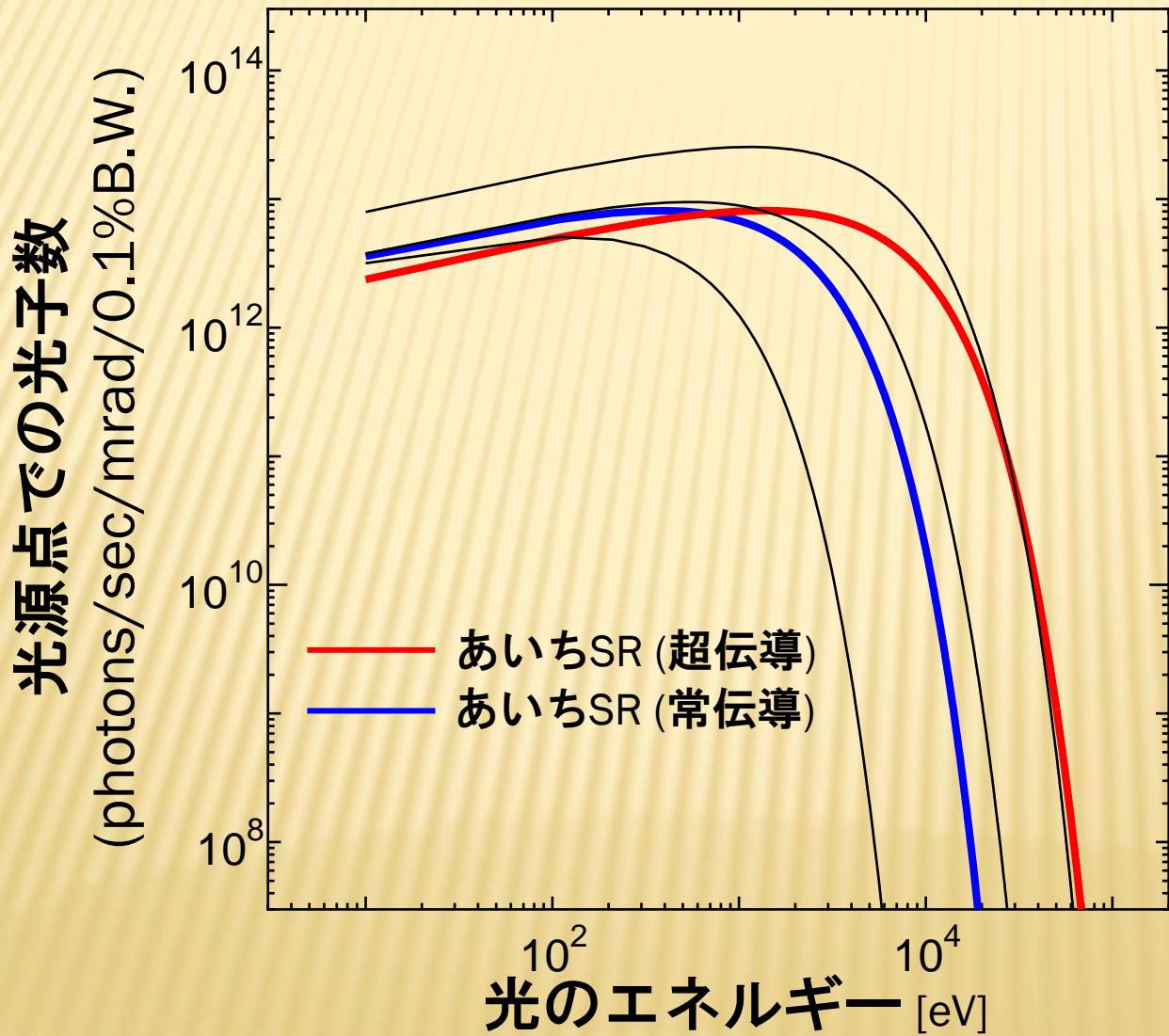
あいち SR の超伝導磁石:  $7.7 \times 10^{18} [1/s]$

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

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

$$= 0.665 E^2 [GeV] B [T]$$

# 放射光のスペクトル



# 光の波長とエネルギーの関係

$$\varepsilon = h\nu : \varepsilon \text{ 光のエネルギー}$$

$\nu$  光の周波数

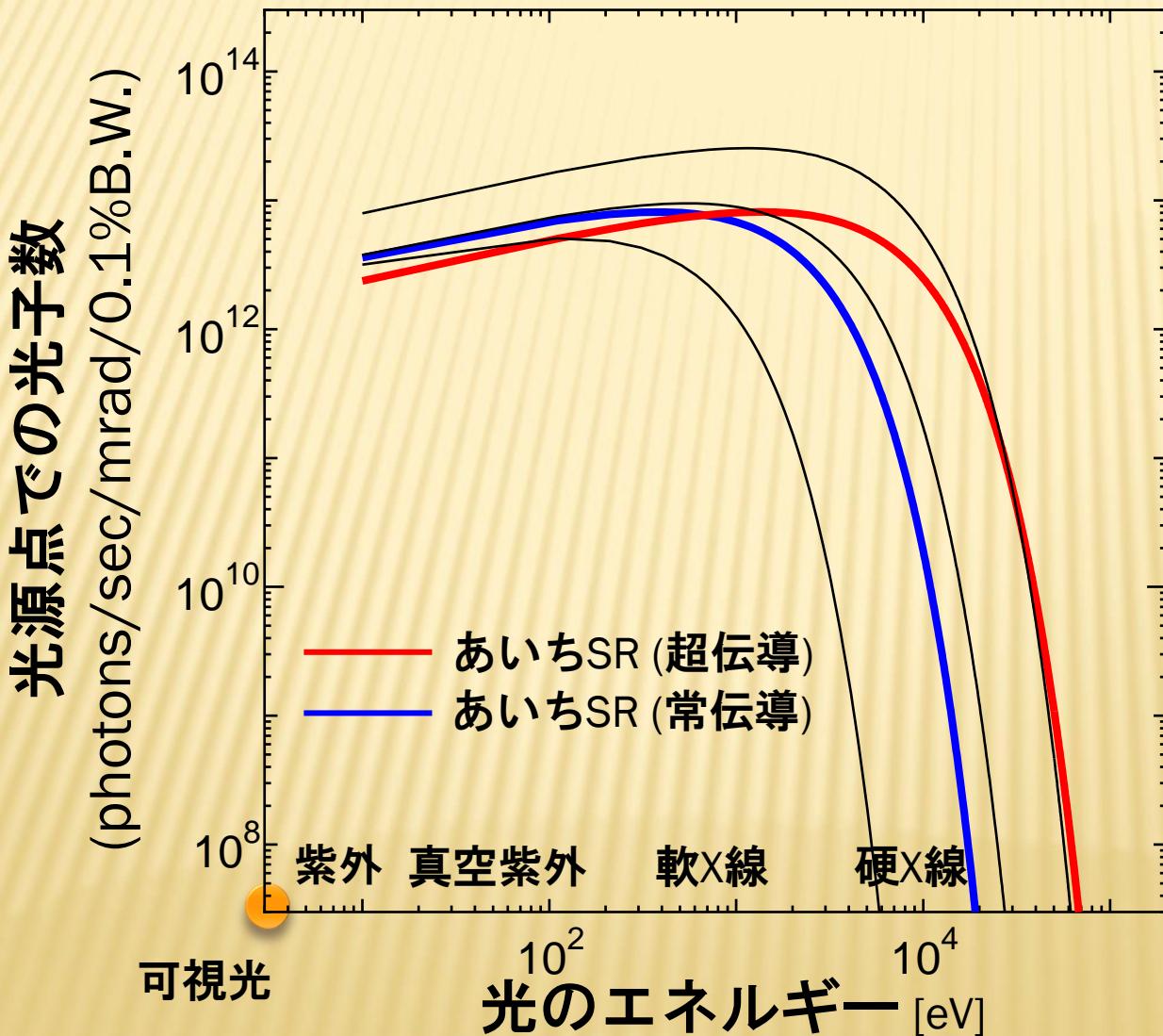
$h$  プランク定数 :  $6.6 \times 10^{-34}$

$$c = \nu\lambda : \lambda \text{ 光の波長}$$

$c$  光速 :  $3.0 \times 10^8$

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

# 放射光のスペクトル



$$\lambda[m] = \frac{hc}{e} \frac{1}{\epsilon[eV]}$$
$$\frac{hc}{e} = 1.24 \times 10^{-6}$$

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

可視光域で便利

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

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

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来る)

/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

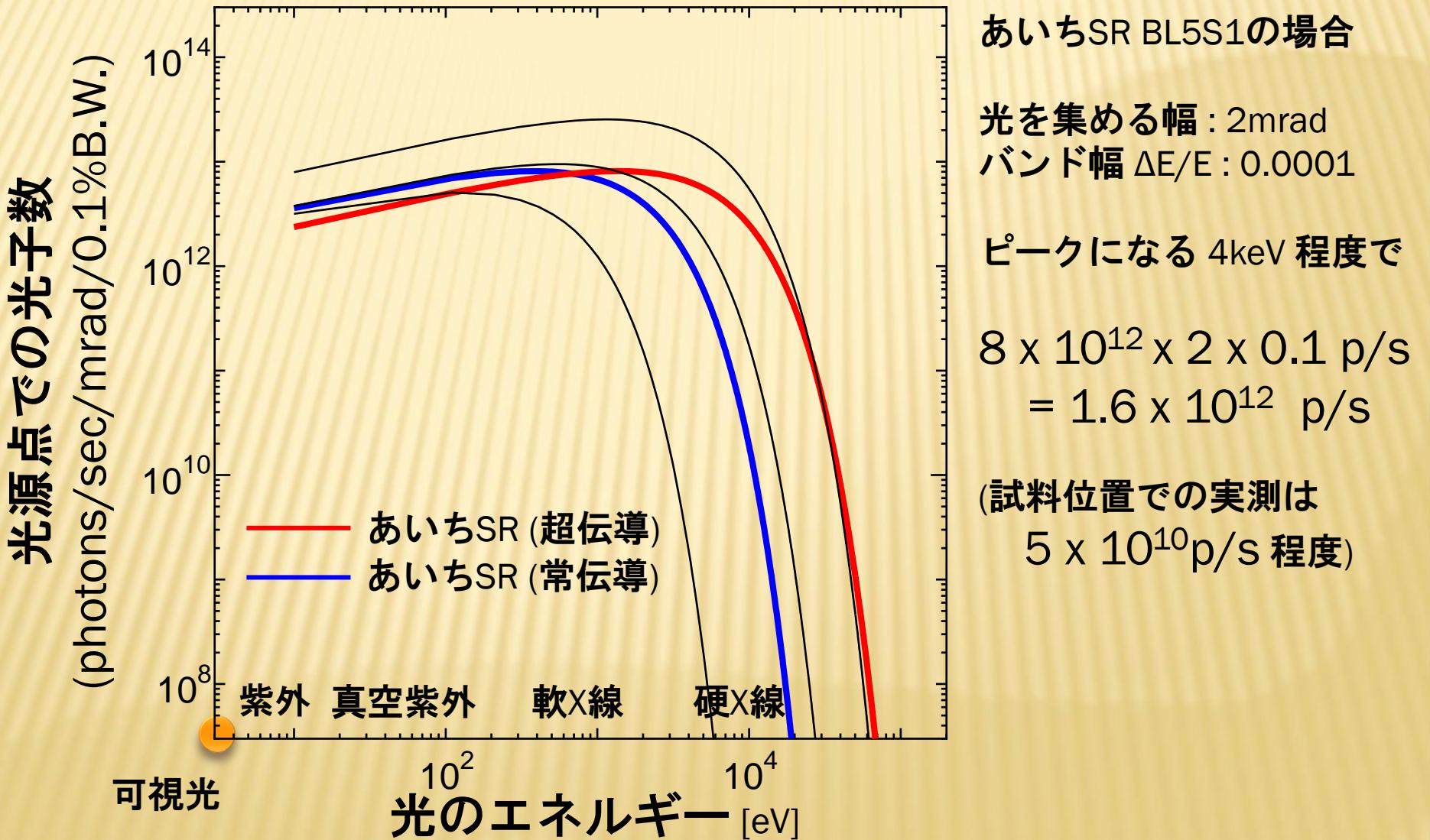
(例えば 10.00000000000000keV)の光の強度は、ほぼ 0

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、 $1 \times 0.1\%B.W.$  を考えることとは、

$10keV / 1000 = 10eV$  の幅( $10keV +/- 5eV$ )に入る光を考える。

# 放射光のスペクトル

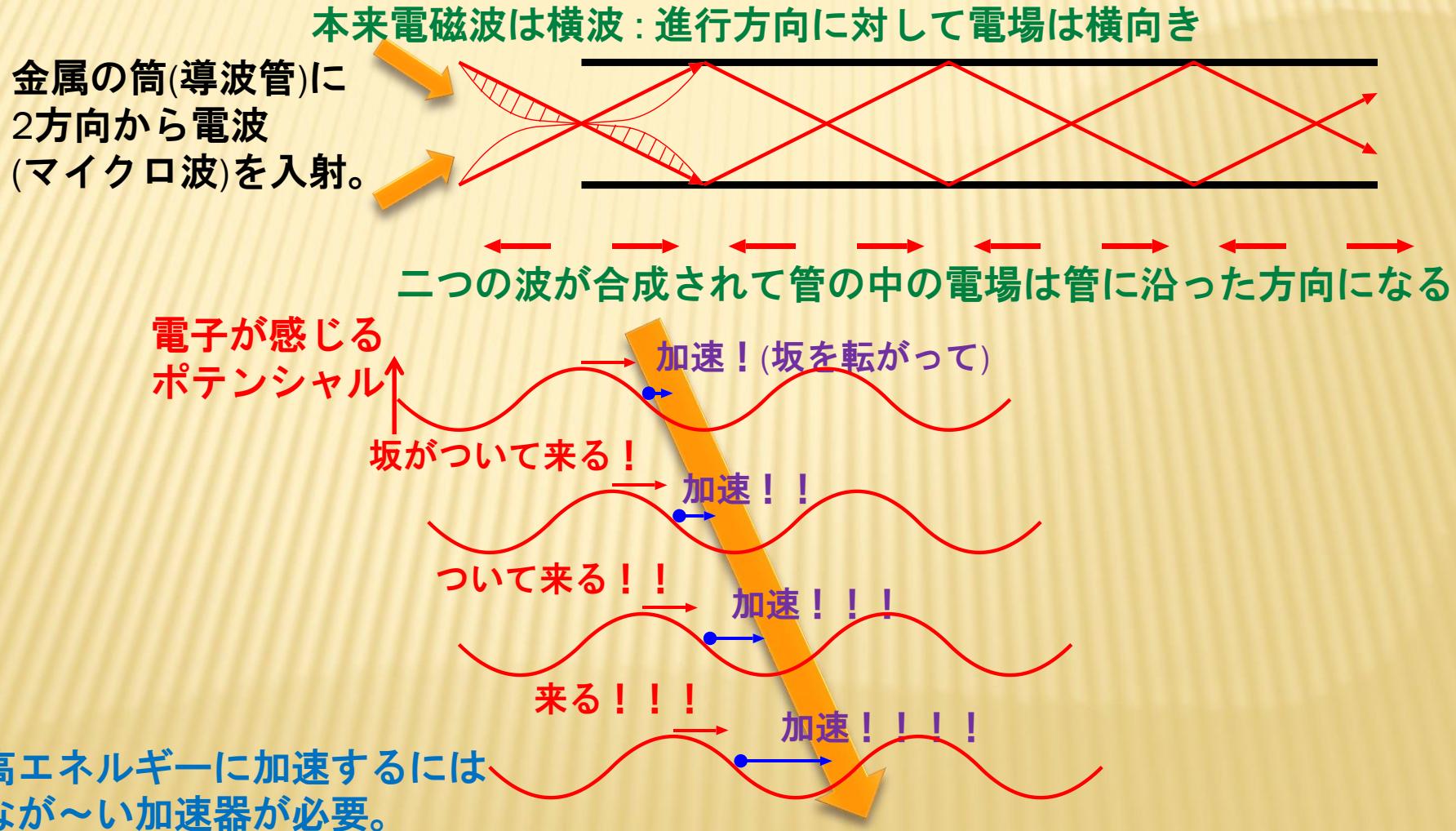


# 放射光の特徴

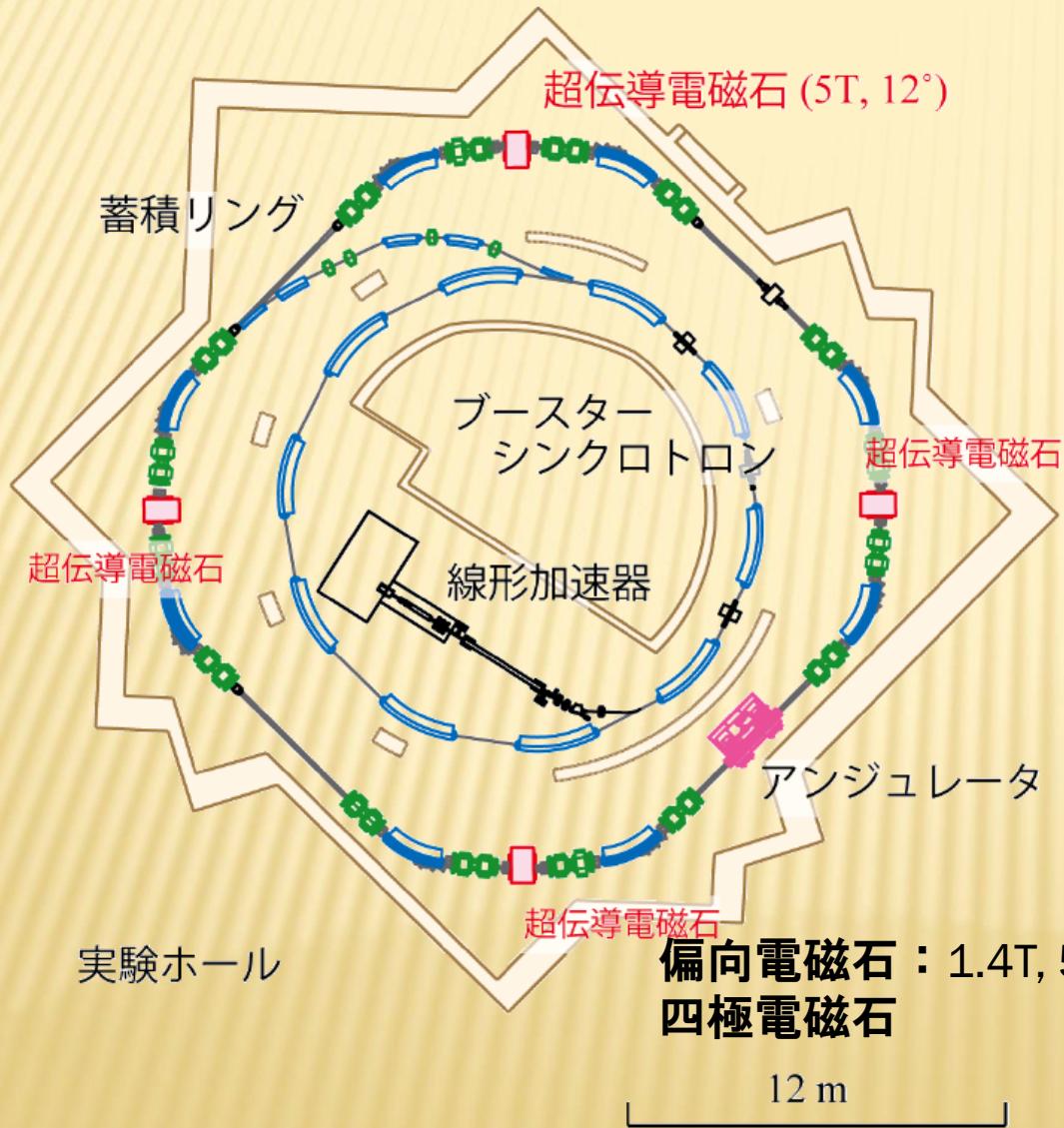
- ・指向性の強い光
- ・非常に強い光
- ・非常に広いエネルギー範囲に渡る光 (例外あり)
- ・パルス光
- ・強く偏光(直線偏光)した光 (例外あり)

# 加速器

## 線形加速器(高周波加速空洞、導波管)



# 実際のシンクロトロン(あいちSR)



直線加速器:  $\sim 50\text{MeV}$

ブースター  
シンクロトロン:  $\sim 1.2\text{GeV}$

蓄積リング:  $1.2\text{GeV}$

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)

# 插入光源

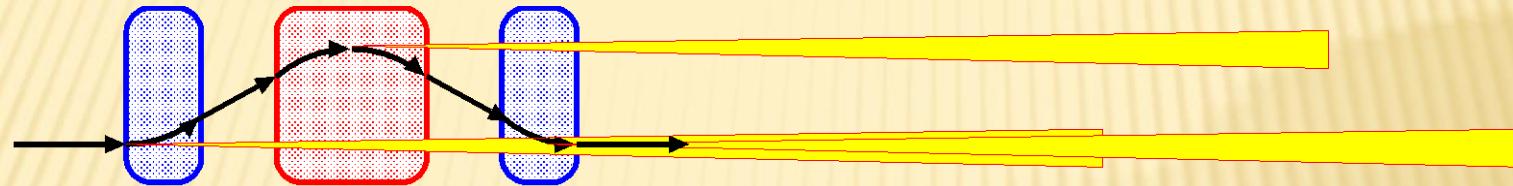
周回軌道を作るのに必要な磁石(偏向電磁石)  
以外の磁石を、光を発生させるためだけに入れる。



## 插入光源

- ・ ウィグラ (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)

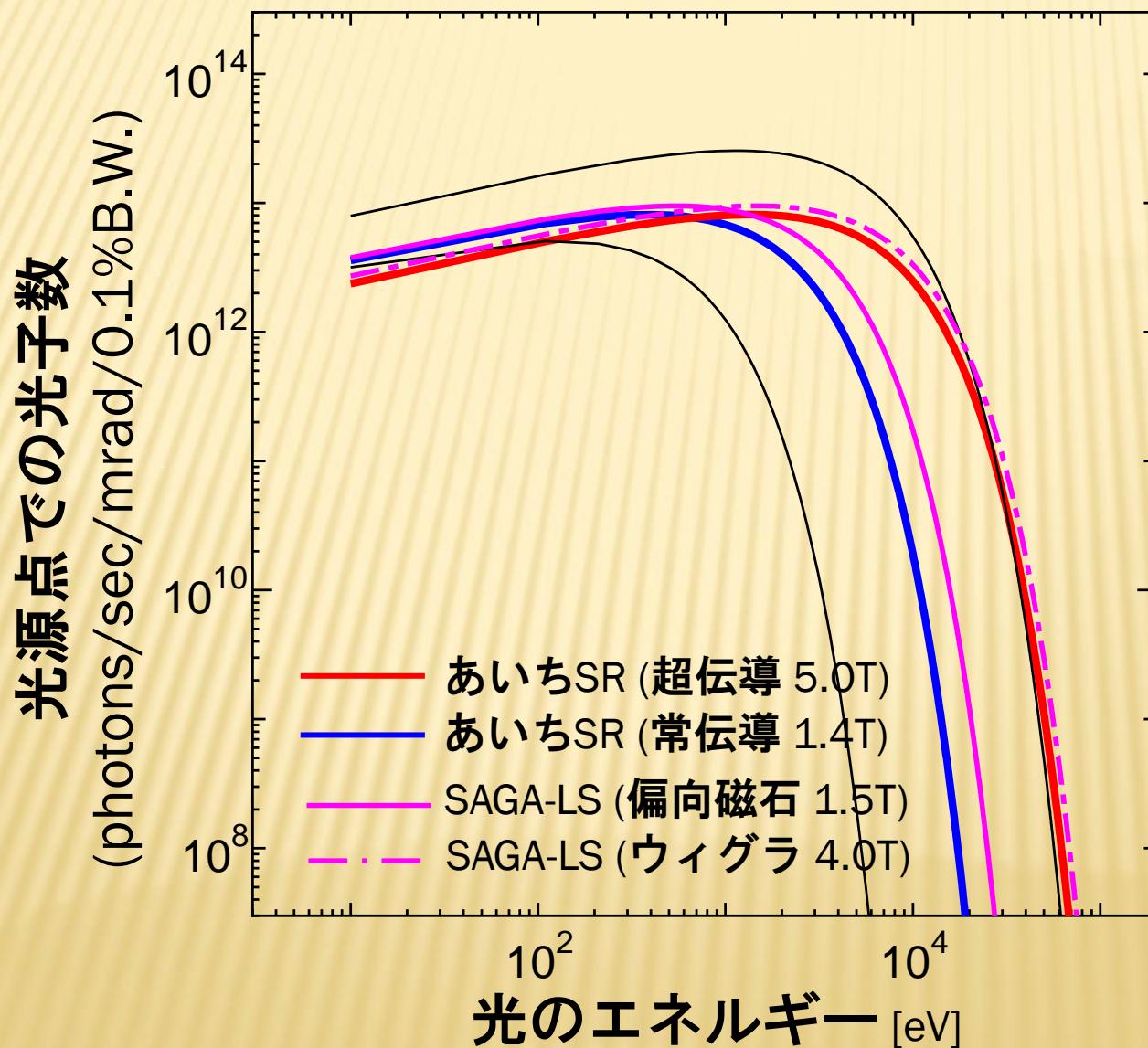


強い磁石で  
大きく進路を変える

進路が曲がる角度  $\theta$  が、光の広がり幅  $1/\gamma$  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(ウィグラー)



あいちSR (超伝導)  
1.2 GeV, 5T

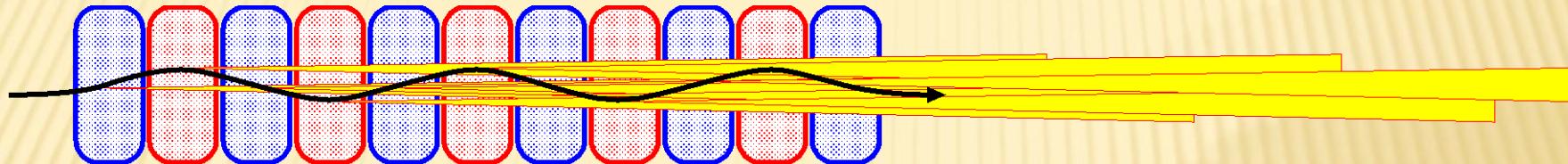
SAGA-LS (Wiggler)  
1.4 GeV, 4T

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

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)



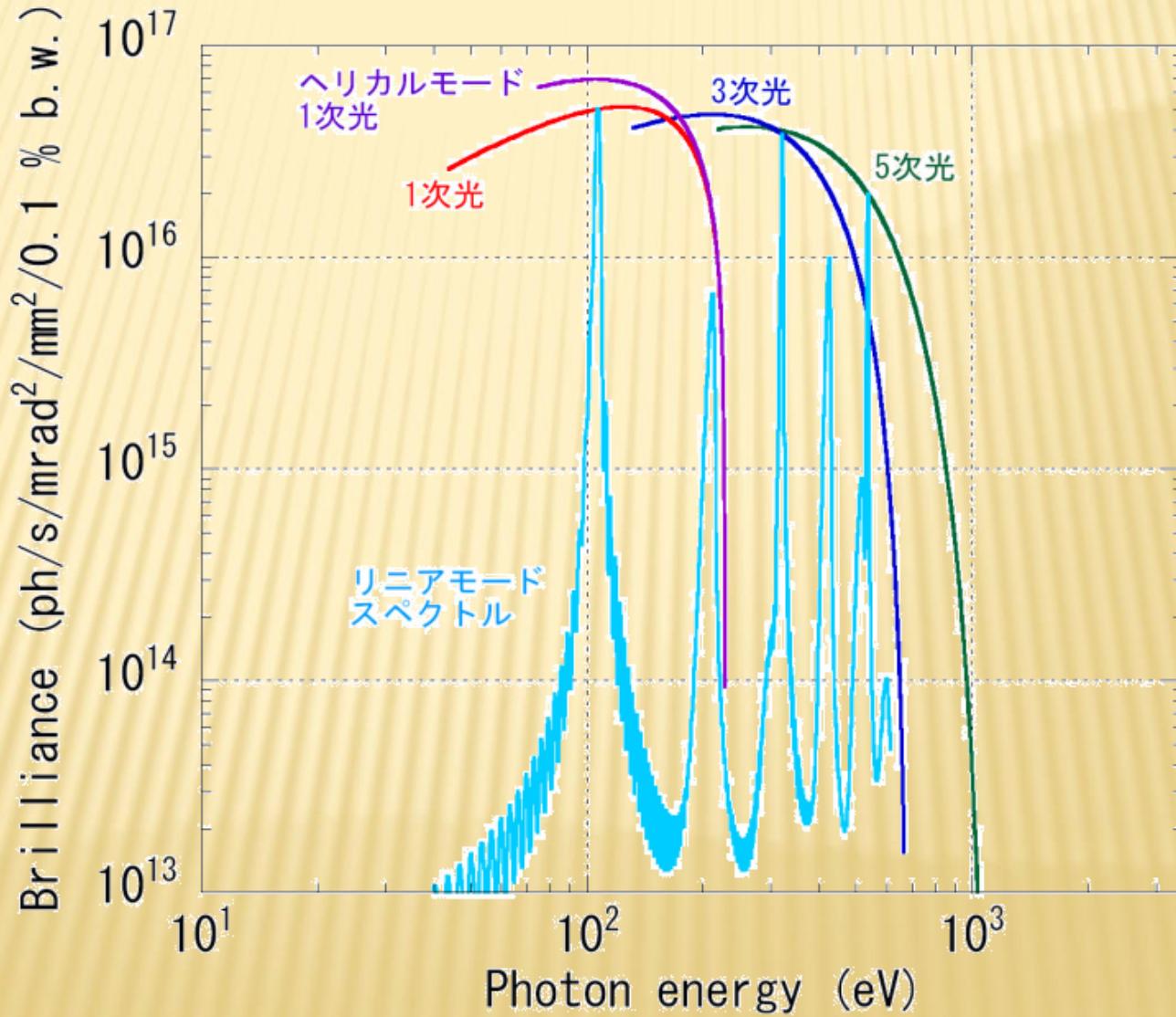
この図は $\theta$ が $1/\gamma$ より大きくなっている

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、  
連續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

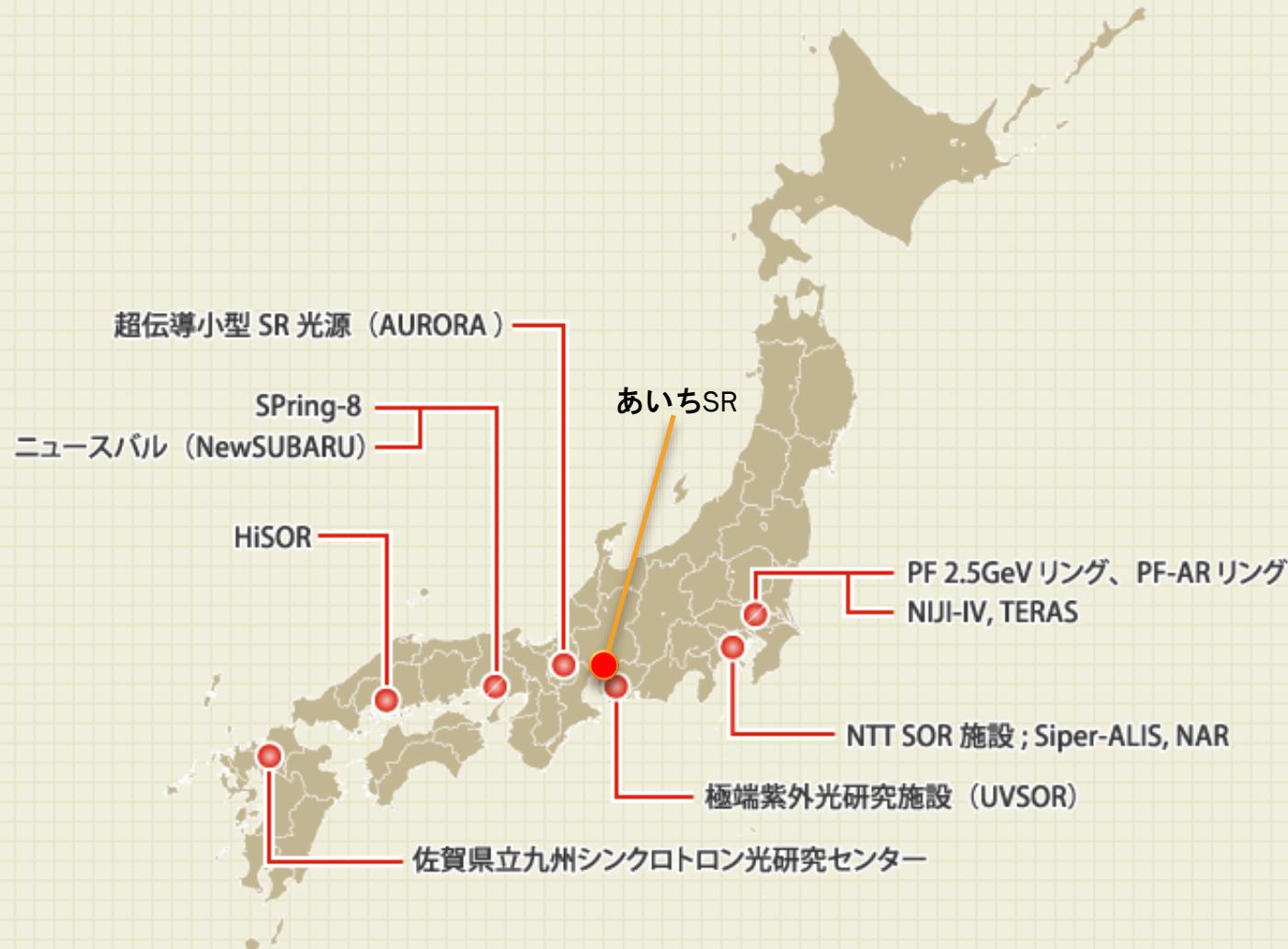
# 挿入光源(ウィグラ)



# 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



### 第3世代の大型放射光施設

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

# 放射光の利用・応用

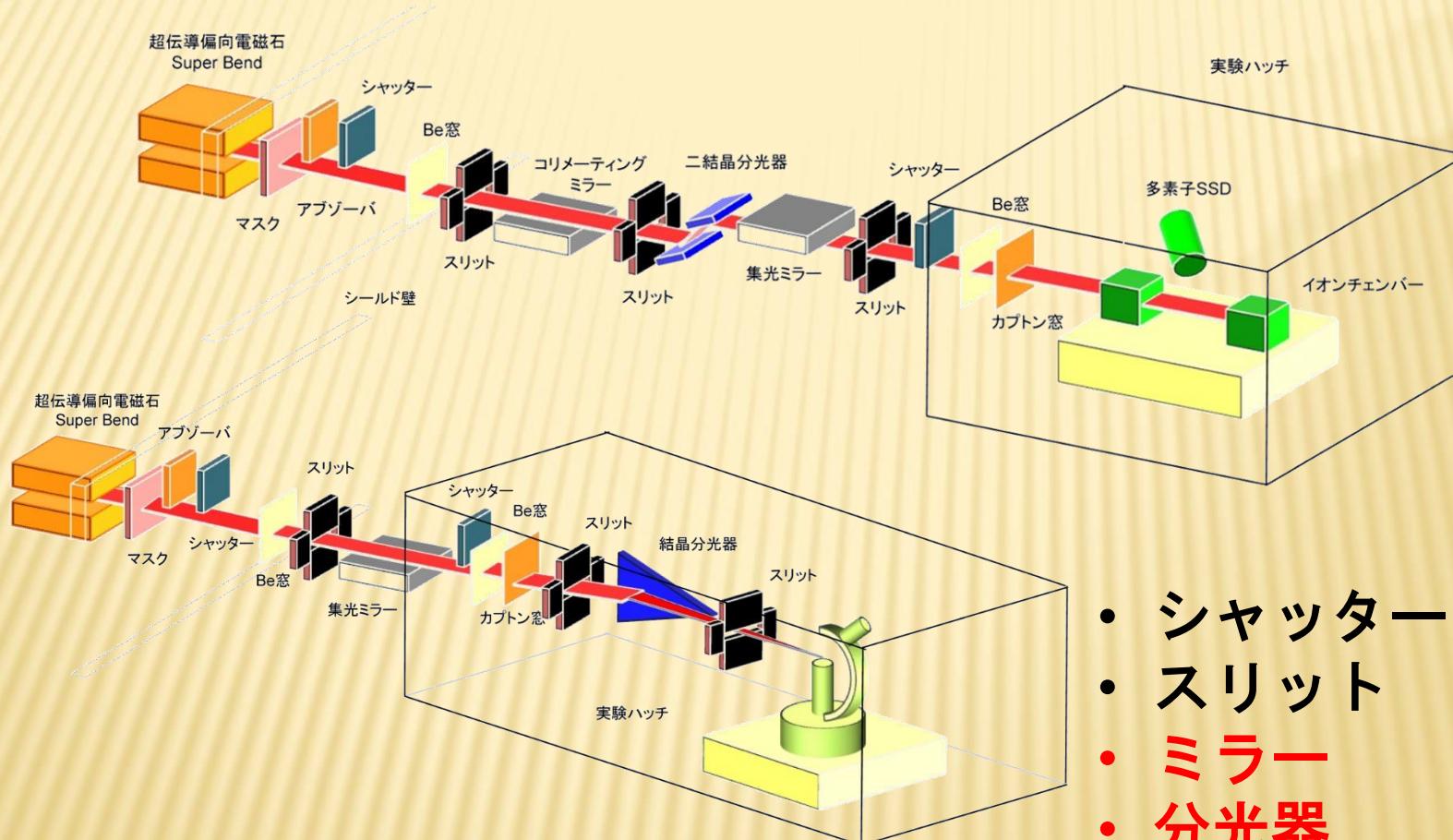


加速器(シンクロトロン)は  
光源。光源から出た光を  
実際に使うには、  
ビームラインが必要。

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。

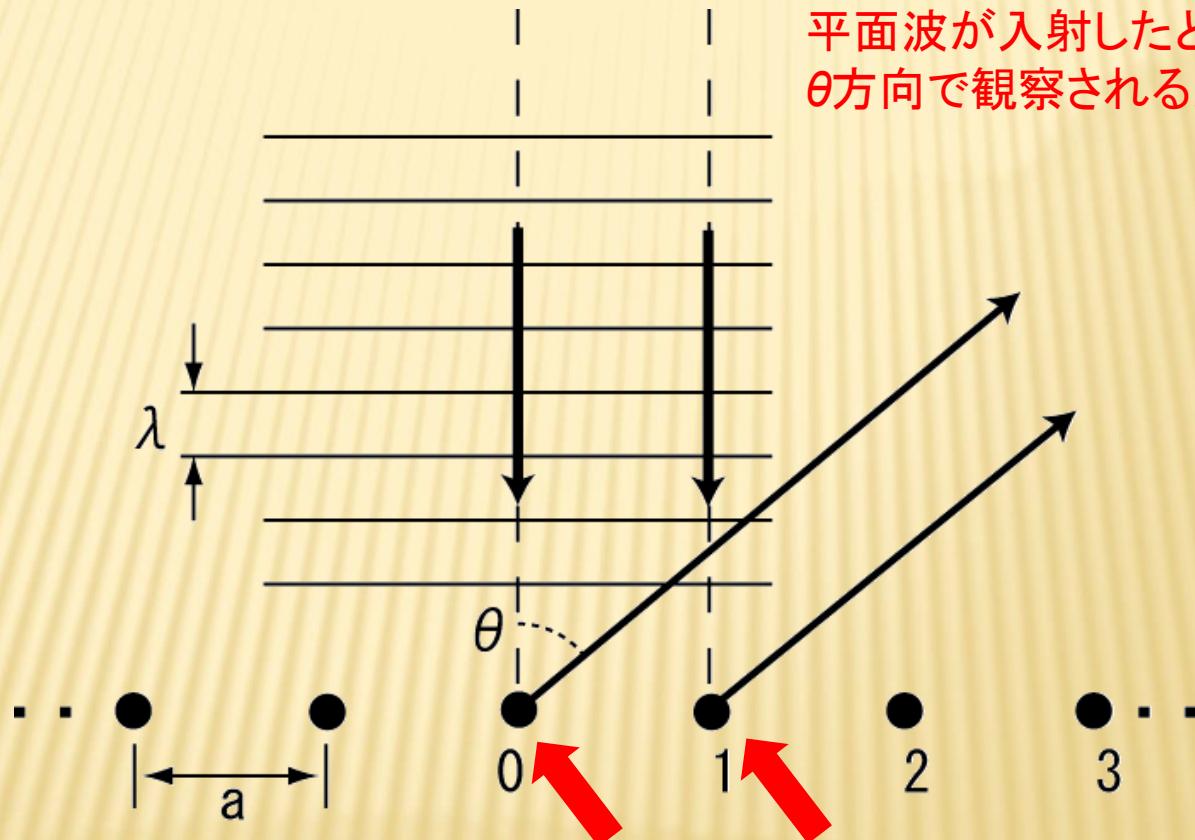
0.1~1nm程度以下(1keV程度以上)

- ・ **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

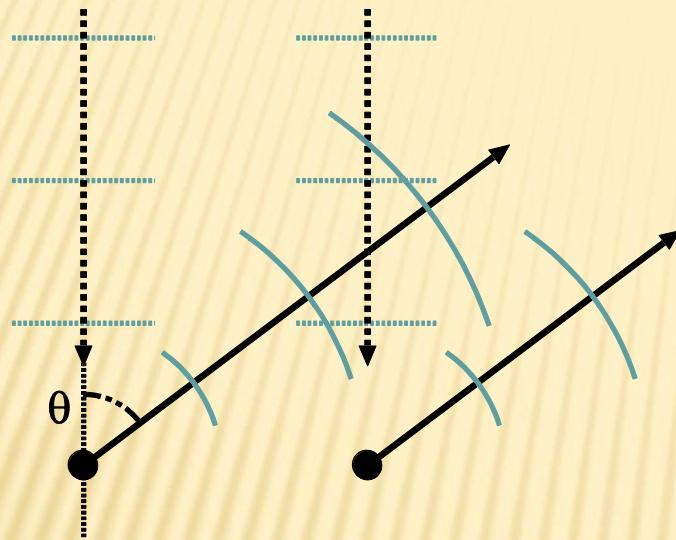
# 結晶による回折を単純化した例

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？



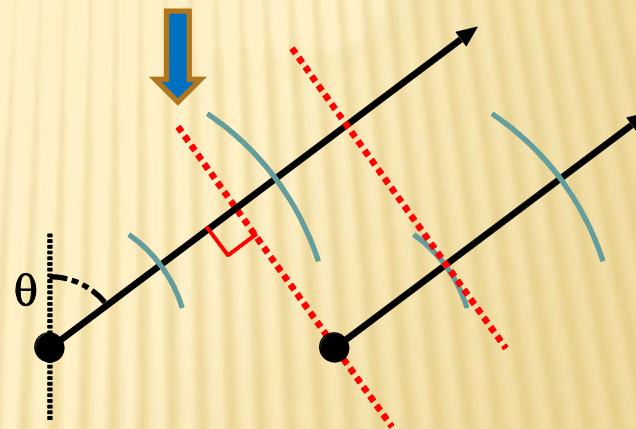
各原子位置で発生する球面波だけを考慮すれば良い

# 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。

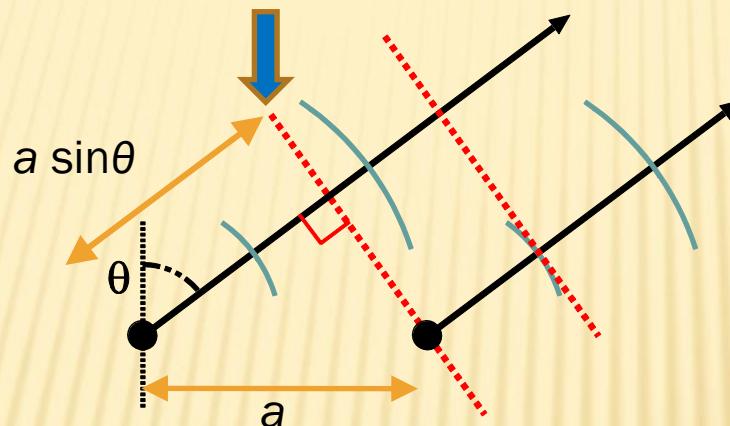
(仮想的な) 平面波の波面



$\theta$ 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



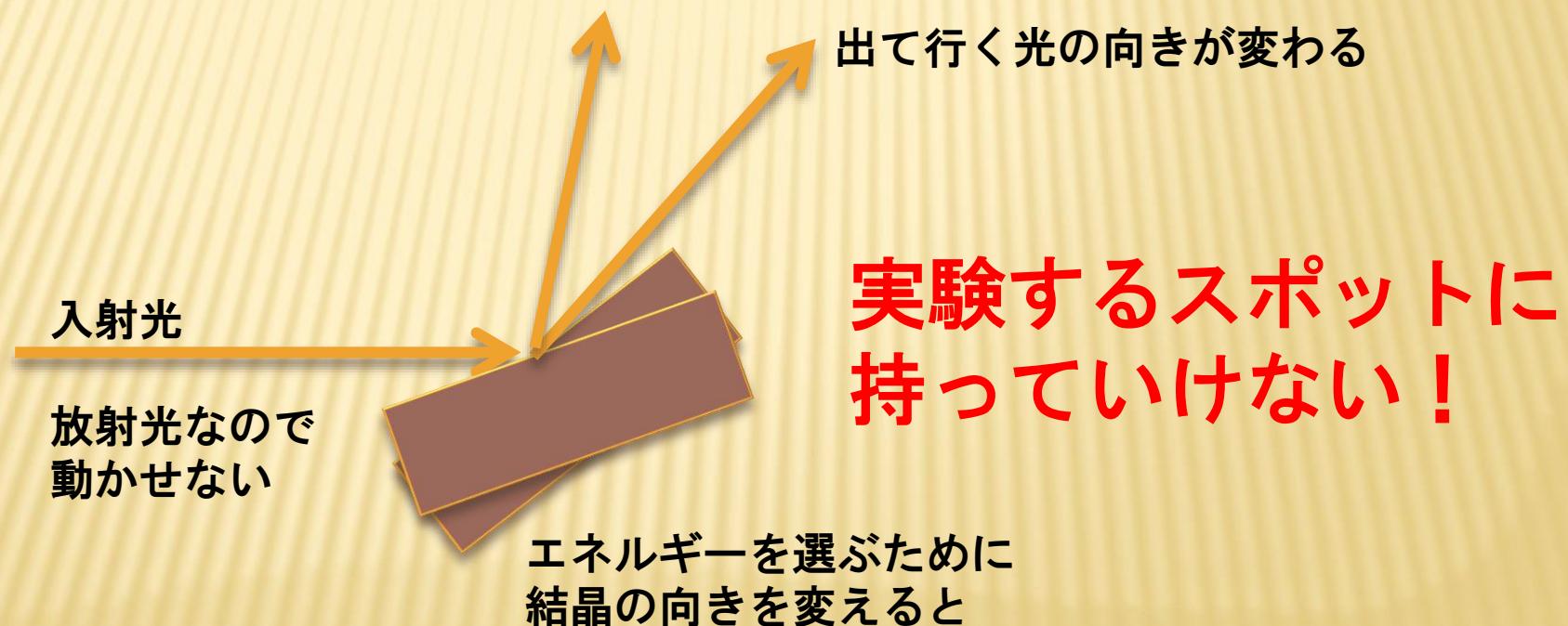
仮想的な平面波の波面の位置（光路長:  $a \sin\theta$ ）が、球面波の波面の間隔( $\lambda$ )の整数倍に一致すれば良い。

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

光を入れる角度と取り出す角度で波長が決まる

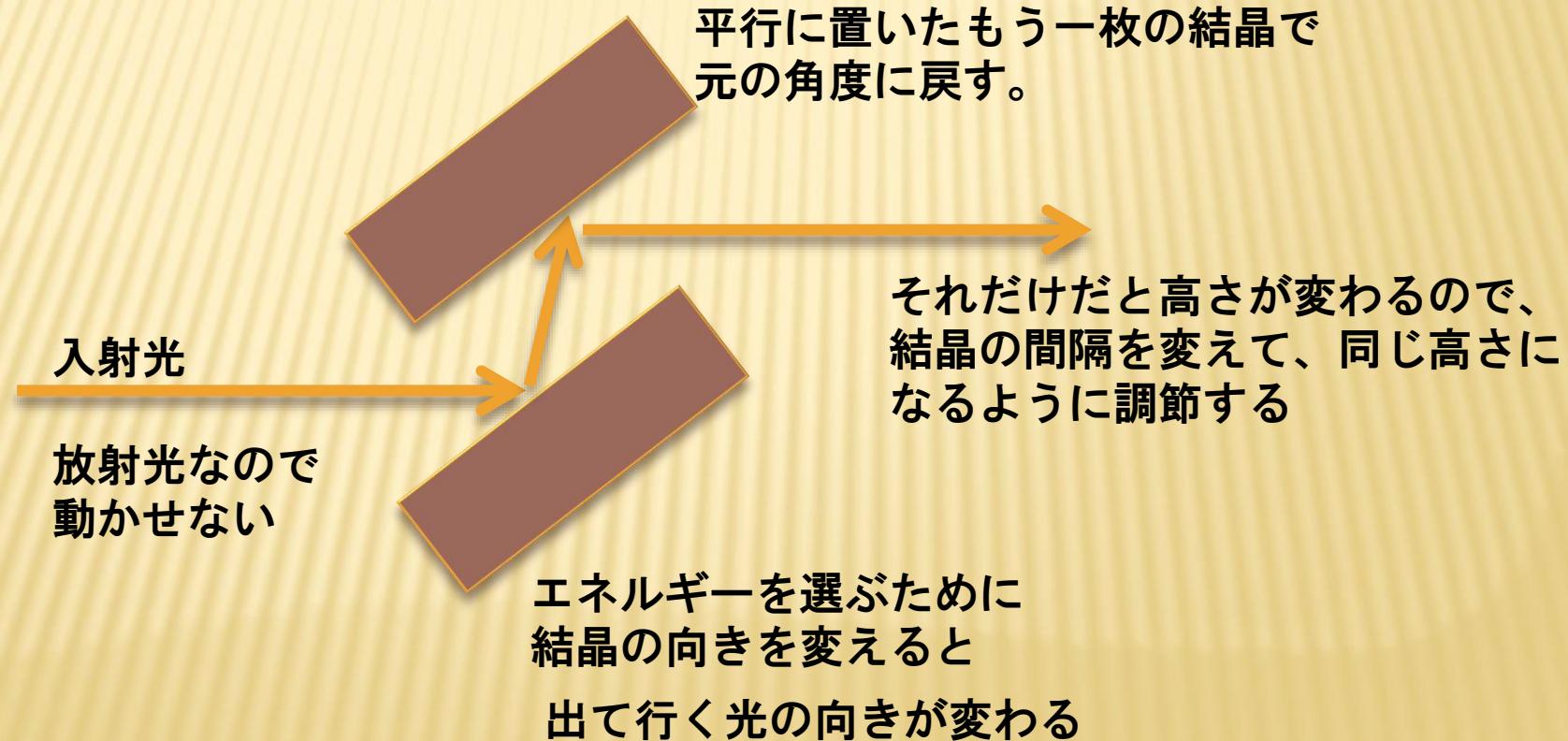
# 2結晶分光器

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

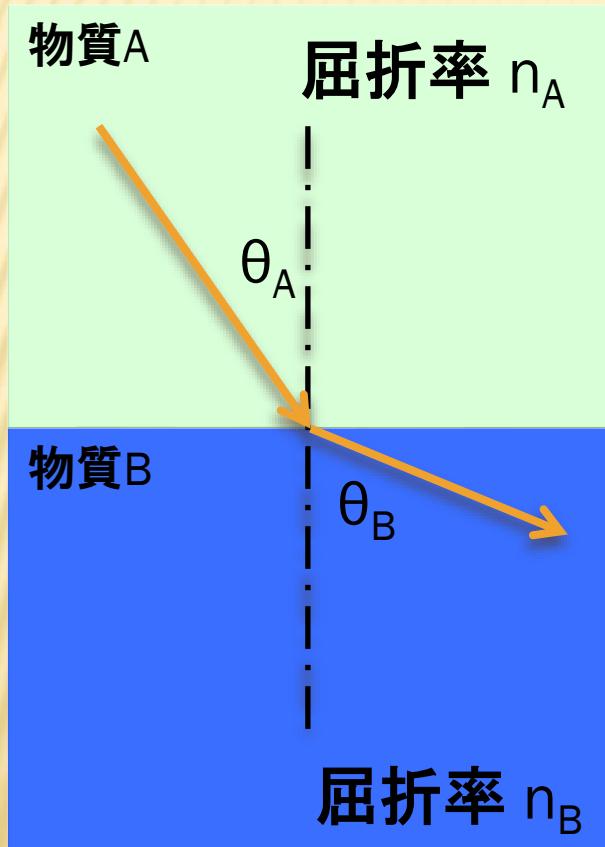
基本的に「レンズ」が使えない(吸収される)  
可視光に使う様な普通の金属ミラーも使えない  
(吸収される)

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

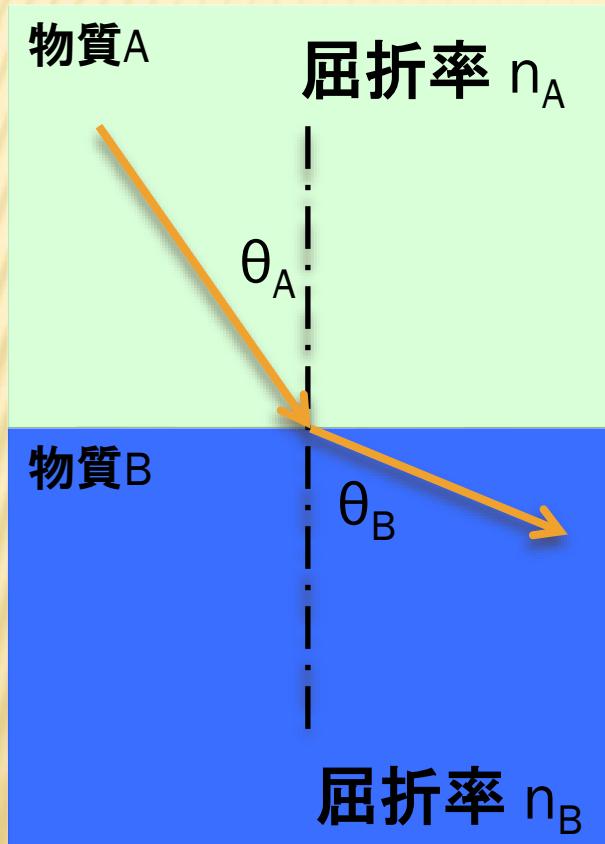
$$\sin \theta_B = \frac{n_A}{n_B} \sin \theta_A > 1$$

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

$$n_A \simeq 1$$

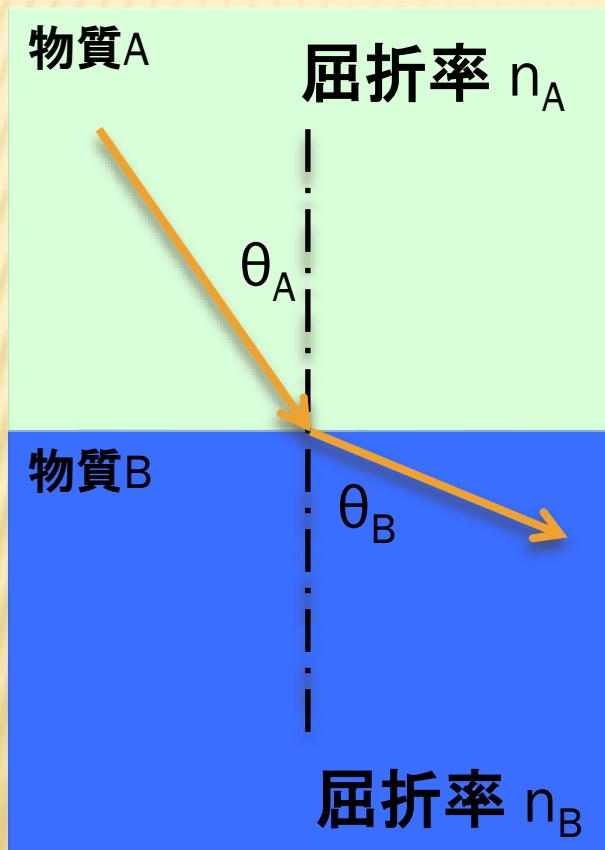
なので、 $n_A > n_B \Rightarrow n_B < 1$

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

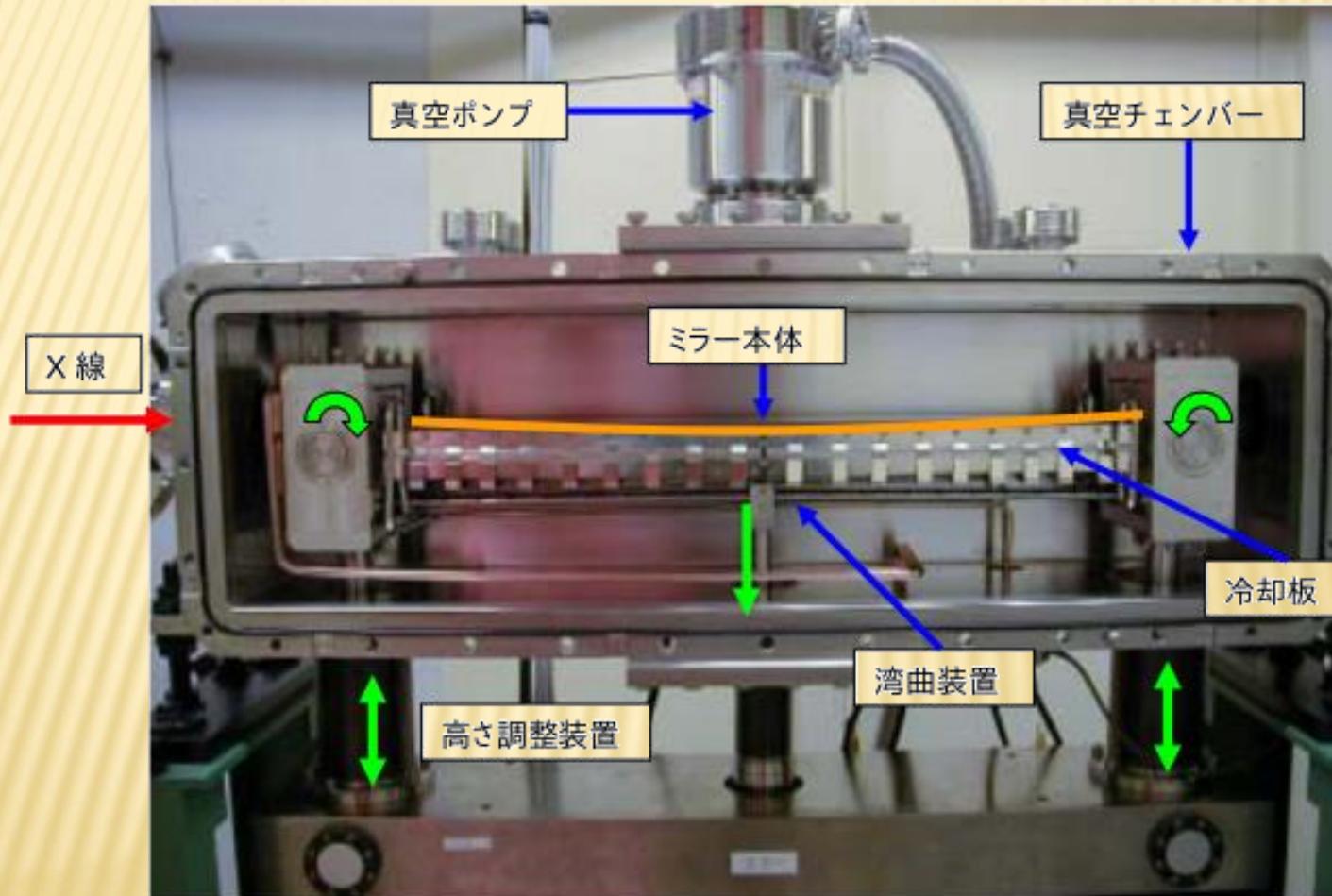


幸いX線領域では  $n_B < 1$   
ただしその差は  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$  程度

→ 表面すれすれに  
光を入れないと全反射しない

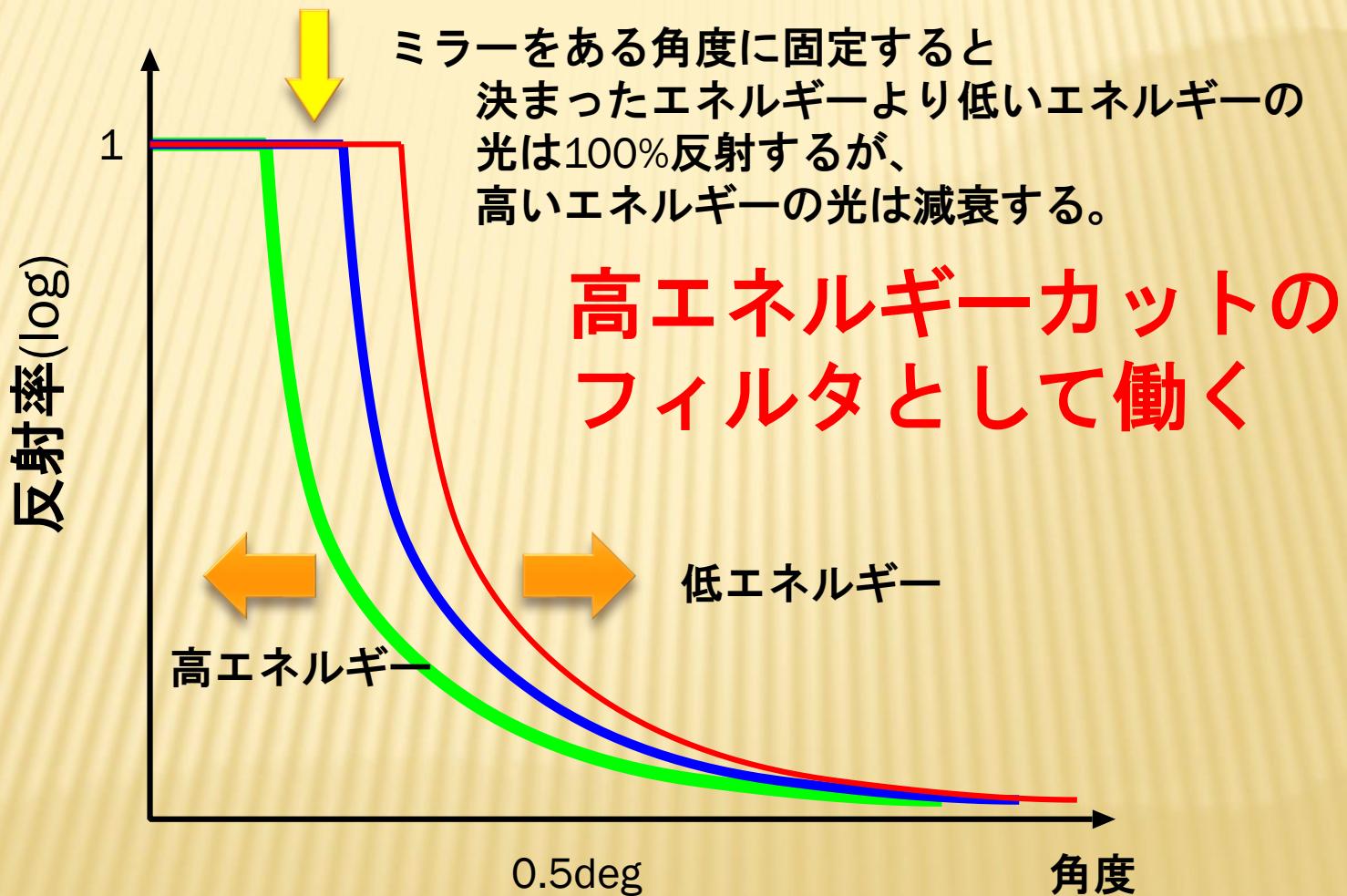
実際の入射角は数 mrad 程度  
(1 mrad = 0.06 deg)

# ビームラインの構成要素(ミラー)

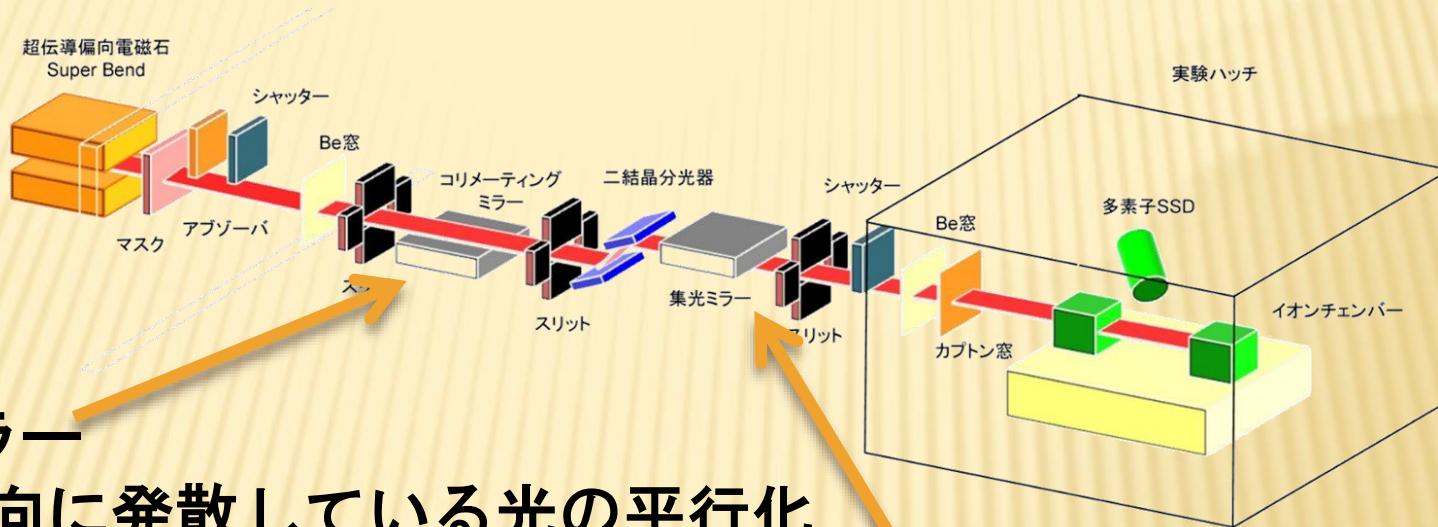


SPring-8 BL01B のミラー

# 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