

ビームライン

光源と実験ステーションを繋ぐもの

山崎 裕史

高輝度光科学研究センター

第1回 SPring-8 秋の学校
2017.9.18

1

講演の概略

X線とは何か？

物質との相互作用は？

それを知るのが **X線光学**

X線で何ができるのか？ 何が分かるのか？

⇒ 他の講義、実習で

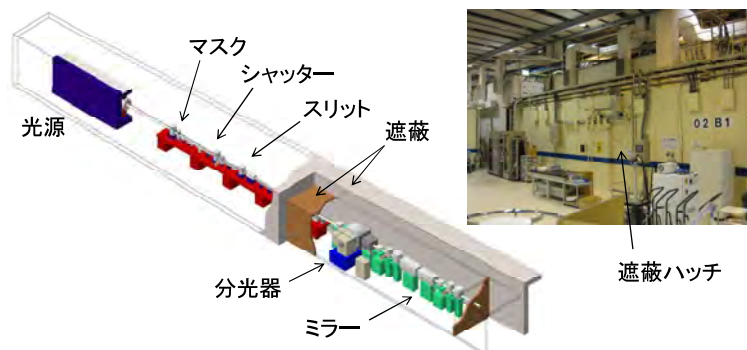
そのためには道具立てとして何が必要か？

3

ビームラインとは？

放射光の良い部分だけを抜き取ってユーザーに提供するために共通化された区画

典型的なX線ビームラインの構成



2

X線 + 光学

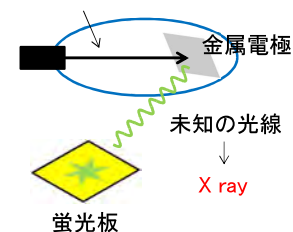
レントゲン: X線の発見

1895年11月 発見 → 1901 ノーベル物理学賞

From Nobelprize.org



陰極線 (= 電子ビーム)



X線の性質

- ≫ 本、金属箔を透過
- ≫ 鉛、骨には遮蔽される

X線撮影法
(Radiography)



1895年オーストラリアで5歳児の骨折検査に使用

4

X線とは？

レントゲンの予想： なにか電磁波のようなもの（磁石には反応しない）



1912年、結晶によるX線の回折の発見（1914 ノーベル物理学賞）

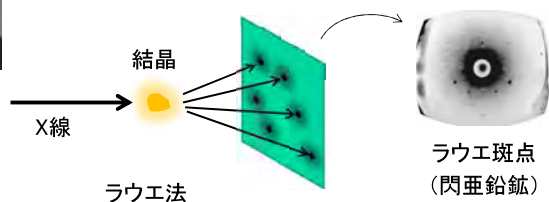
→ X線とは、結晶の原子間距離相当の波長をもつ波である



ラウエ（フリードリヒ & クニッピン）

（理論）

（実験）



5

X線 + 光学

光学（オプティクス）：

光の振る舞いと性質、光と物質の相互作用を研究する
特に、光の波動性に注目

- ・ 光学現象を理解する
- ・ 計測に応用する

cf) フォトニクス：光の粒子性に注目

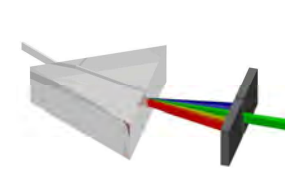
歴史的には応用が先



顕微鏡
（ヤンセン親子、1590頃）



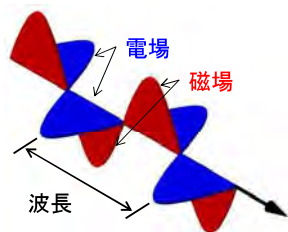
望遠鏡
（リッペルスハイ、1608）



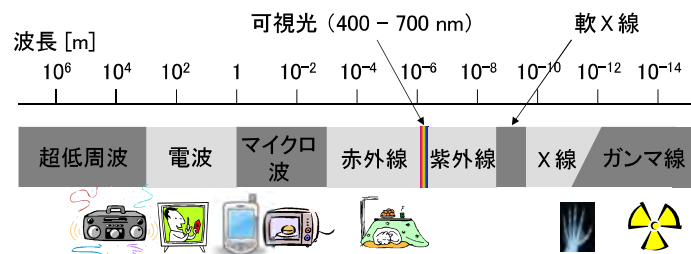
分光器（単色計）
（ニュートン、1666）

7

電磁波

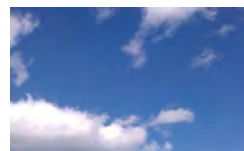


- ≫ 光の速さで伝播
- ≫ 振動する電場と磁場



6

光学現象



青い空、白い雲（散乱）



夕日、夕焼け（散乱）



池に映った木々（反射）



虹（屈折、分散）



翡翠の青い羽（回折、干渉）



虹色のシャボン玉（干渉）

8

X線 + 光学

X線の光学現象を理解して、計測に役立てよう

吸収 ⇒ マスク、シャッター、スリット、遮蔽

全反射 ⇒ ミラー（反射鏡）

回折 ⇒ 分光器

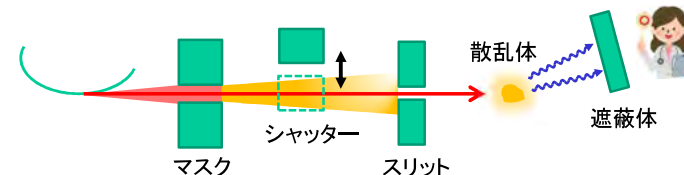
9

不要な光を遮る

不要な放射光とは？

健康被害や機器故障の原因となる放射線
軸外の長波長成分 ⇒ 実験には使えない
実験セットアップ中は放射光自体が要らない

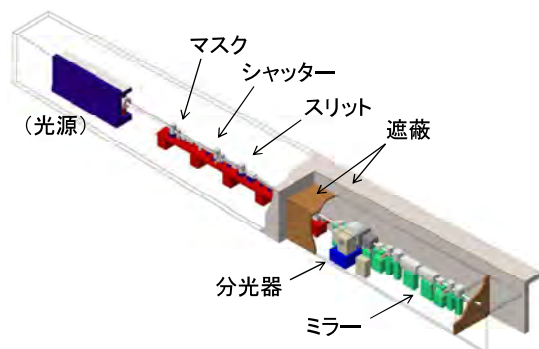
X線を遮る … 物質にX線を吸収させる



11

講演内容

1. 光学現象とビームライン機器紹介



2. ビームライン機器の技術的な問題(熱問題を中心に)

10

吸収率

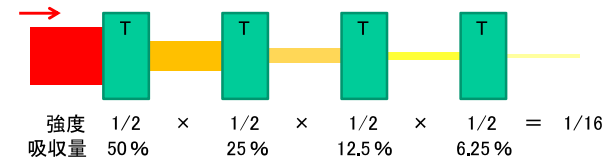
X線の吸収率：だいたい密度に比例、X線の波長にもよる

$\text{Be} \ll \text{Al} \ll \text{Fe} < \text{Cu} \ll \text{Pb}$

透過窓に使う

Q. X線の強度が2倍になったら、遮蔽体の厚さはどうなるか？

半減する厚さをTとする



⇒ A. 遮蔽体をTだけ増やせばよい

薄すぎるのは困る ⇒ 健康被害 … 合理的な計算が必要
厚すぎるのも無意味 ⇒ コスト大

吸収されたX線は最終的には熱になる ⇒ 冷却が必要な場合も(後述)

12

ミラー（反射鏡）

X線光学入門 その1

X線に対する物質の屈折率は1より小さい！

反射、屈折の法則、全反射

ミラーの材料

使用例

13

振動



ブランコを漕ぐ

振れ幅を大きくするためには？

⇒ リズムよく体を上下させる **どんなリズム？**

では、リズムが悪かったら？

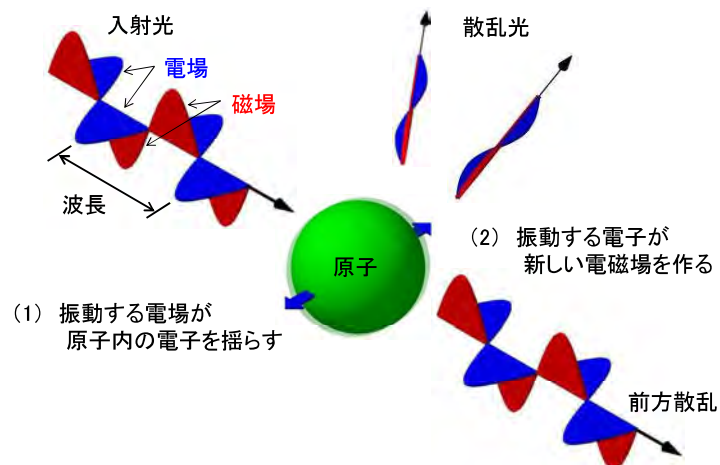
遅すぎる場合 ⇒ ブランコはリズムに合わせて前後する

早すぎる場合 ⇒ ブランコはリズムについてこれない
ブランコの揺れは遅れて起こる

どちらにしても、大きな揺れにはならない

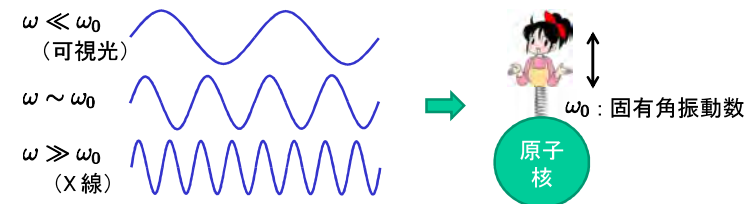
15

原子によるX線の散乱



14

電子の振動



$\omega \ll \omega_0$: 入射光の**位相に合わせて**電子が振動する

$\omega \sim \omega_0$: 共鳴が起こり、大きく揺すられる

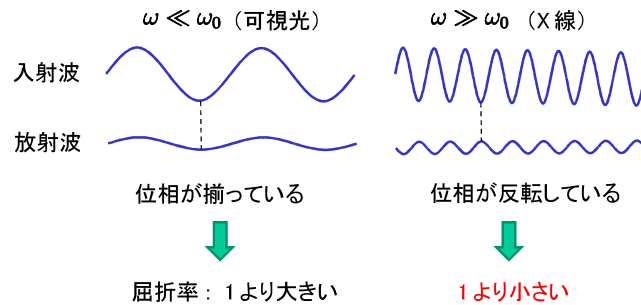
$\omega \gg \omega_0$: 電子の振動の位相が π ずれる、つまり、入射光に対して**反転する**

一部東京電力HPより 16

電子からの放射



電子が揺れると電磁波を放射する



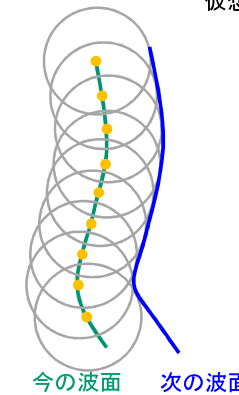
17

ホイヘンス(・フレネル)の原理

波の進み方を表す簡単な規則

波面の各点が2次波(素元波)を作り、その包絡線が新しい波面となる

仮想の球面波



波の直進、反射、回折を直観的に説明できる

後ろ向きに進まない理由は?
干渉性を考慮することで、フレネルにより解決

厳密な法則ではない
偶数次元では成り立たない

19

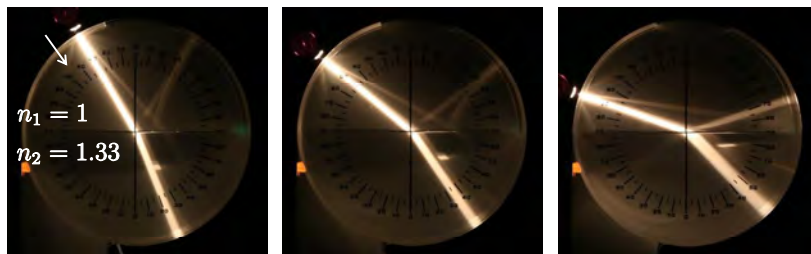
反射・屈折

可視光での実験 … 可視光を空気から水へ入射

入射角 30°

50°

70°

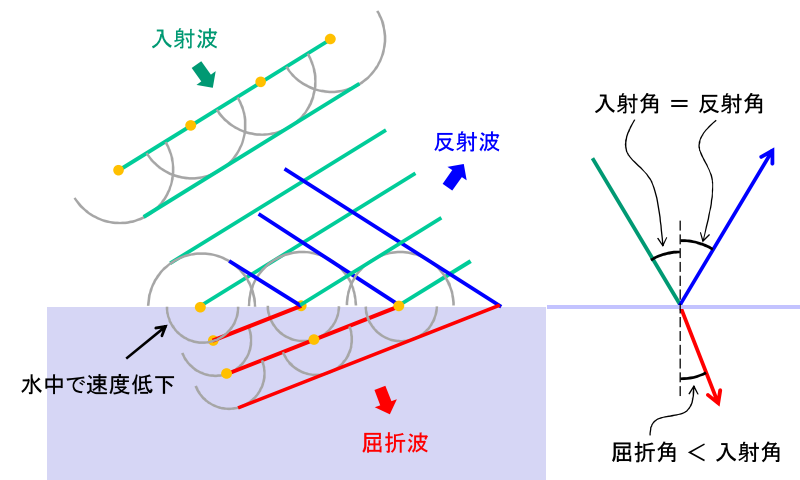


空気の屈折率: 1 … 光は光速で進む

水の屈折率: 1.33 … 光の速度は遅くなる

18

反射・屈折の説明



20

全反射

可視光での実験 … 可視光を水から空気へ入射

入射角 30°

50°

70°



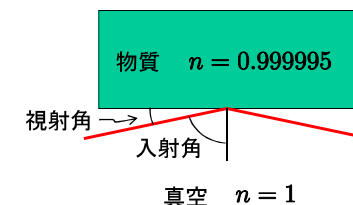
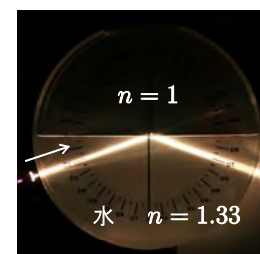
屈折波が消失

21

X線の全反射

可視光の全反射

X線



X線を物質に浅い角度で入射すると全反射する

$$\text{臨界角} : \sin^{-1} \frac{1}{1.33} = 48.8^\circ$$

$$\sin^{-1} \frac{0.999995}{1} = 89.8^\circ$$

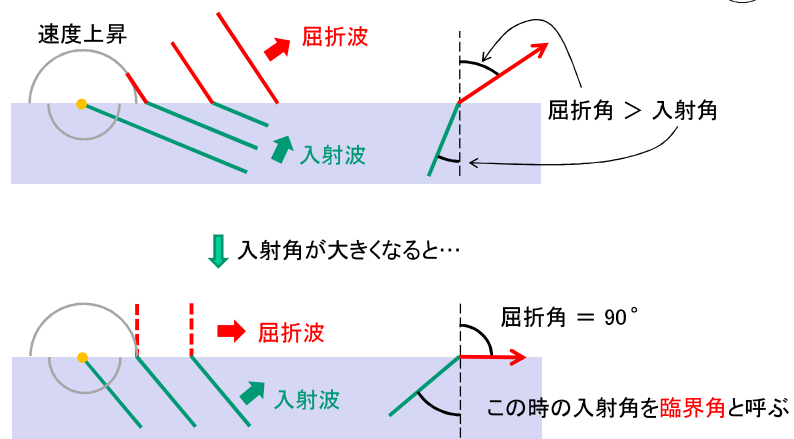
↓ 90° を基準にした方が分かりやすい

視射角 = 90° - 入射角

臨界角 : 0.2°

23

全反射の説明

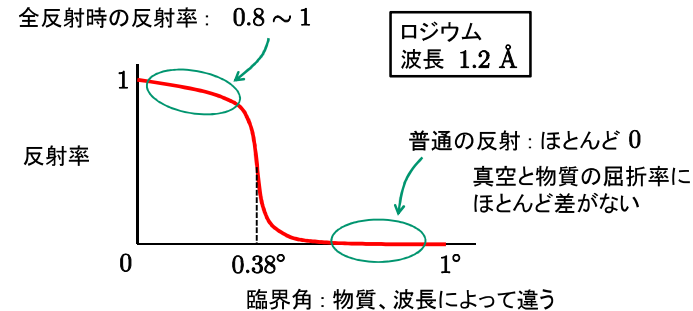


臨界角以上では屈折できない ⇒ 全て反射する (全反射)

22

反射率と臨界角

全反射時の反射率 : 0.8 ~ 1



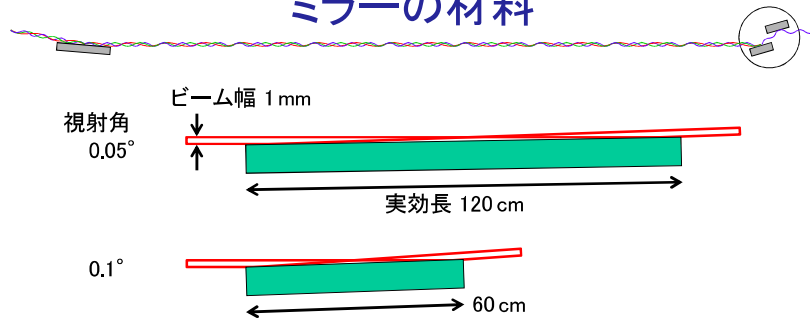
臨界角 \propto 波長 $\times \sqrt{\text{密度}}$

長波長の方が臨界角が大きい

重元素の方が臨界角が大きい

24

ミラーの材料



臨界角を大きくすればミラーを短くできる → 重元素を使う

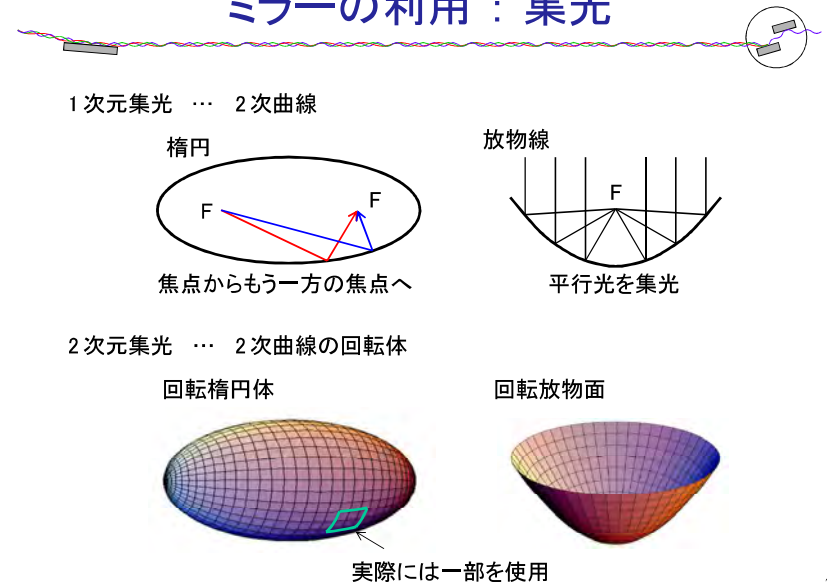
化学的・物理的安定性からロジウムやプラチナが適している

60 cm × 5 cm × 5 cm のミラーをロジウムで作ると、材料費 7 千万円
プラチナだと 1 億円越え

金属だけでは作れない別の理由が存在する

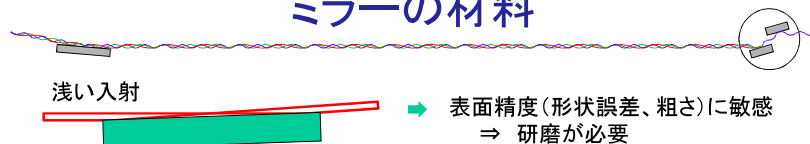
25

ミラーの利用：集光



27

ミラーの材料



金属研磨 … 研磨剤で細かい傷を無数につける



粒度 $3\ \mu\text{m}$
Rh、Pt に使えるかは
分かりませんが…

ダイヤモンドスラリー
粒度 $0.1\ \mu\text{m}$

→ 深さ、幅 400 nm 以下の傷は
可視光を散乱しない
X線(波長 0.1 nm)は散乱される

精密研磨に適した物質は？

シリコン … メカノケミカル研磨による無ひずみ平坦化処理が可能

シリカによる機械的作用と化学エッチングの複合研磨

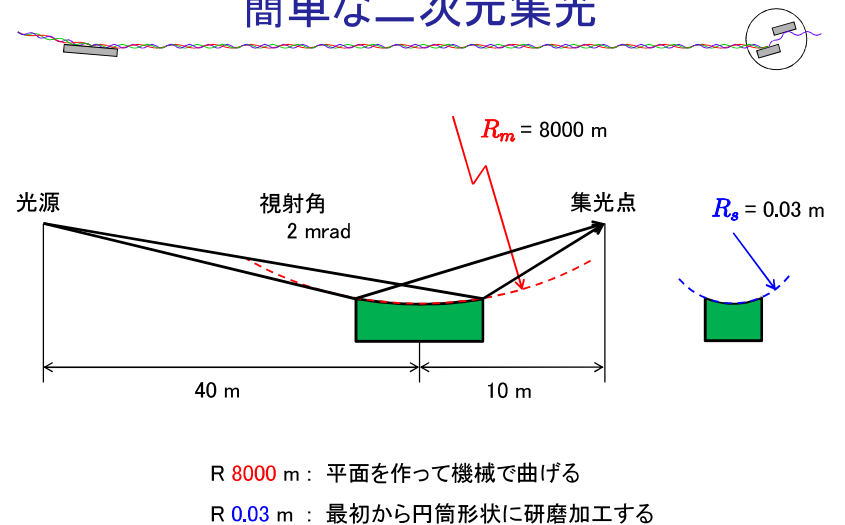
引っ掻く

溶かす

シリコンミラーも使用可能だが、
シリコンを母材にしてロジウムやプラチナをコーティングすることが一般的

26

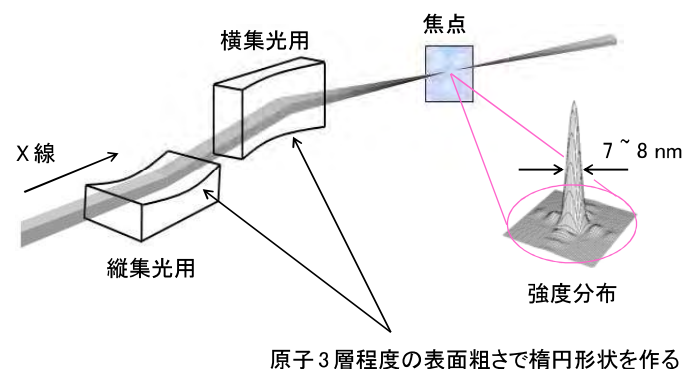
簡単な二次元集光



28

極限集光ミラー

カークパトリック・バエズ (KB) ミラーによるナノメートル集光



29

分光器

分光器の役割

放射光は非単色光、使いたい光は単色光

X線光学入門 その2

原子を3次的に並べて結晶にすると...

駆動装置

角度調整の分解能 0.01" 以下

分光結晶

分光に適した結晶とは？

31

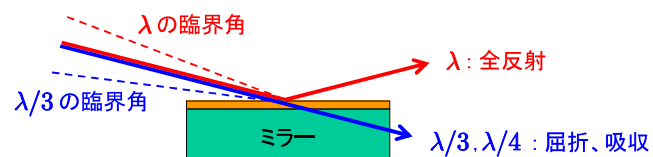
高次光除去ミラー

分光器(後述)で単色X線(波長 λ)を選んだつもりでも、

波長 $\lambda/3$, $\lambda/4$ のX線が混入する... 高次光と呼ばれる
(⇒ P54)

臨界角 \propto 波長 $\times \sqrt{\text{密度}}$

長波長の方が臨界角が大きい

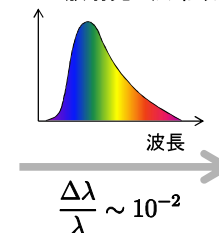


λ 成分だけ取り出せる

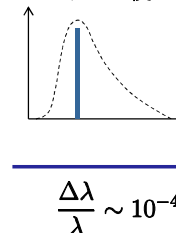
30

分光器の役割

生の放射光: 広帯域



多くのユーザーが使いたい光

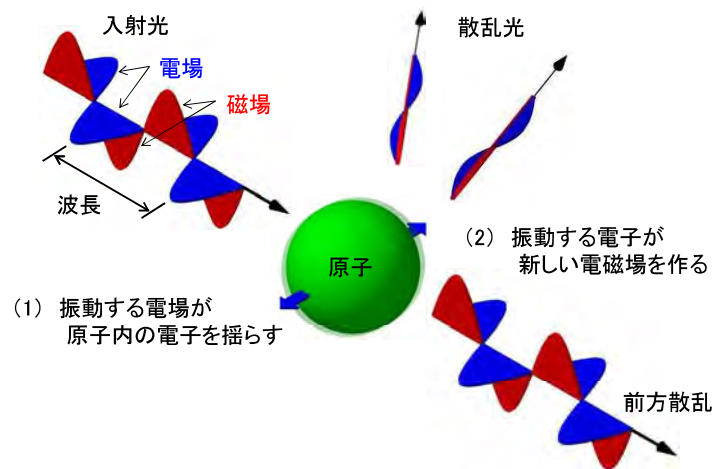


モノクロメータ (monochromator)
(単色の光を取り出せる分光器)

... X線領域では、分光器といえばモノクロメータを指すことが多い

32

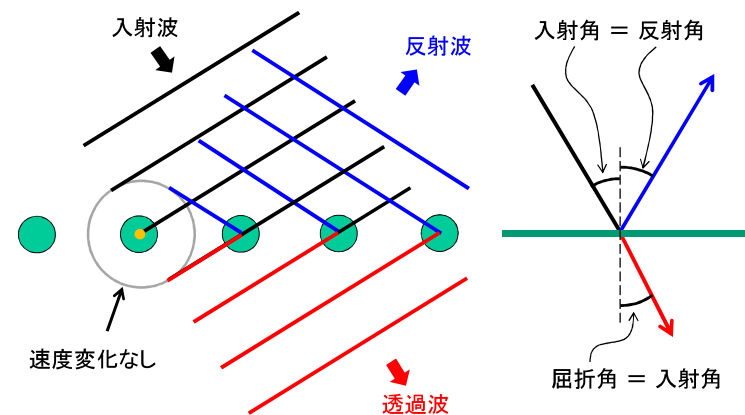
原子とX線の相互作用



33

原子面による散乱

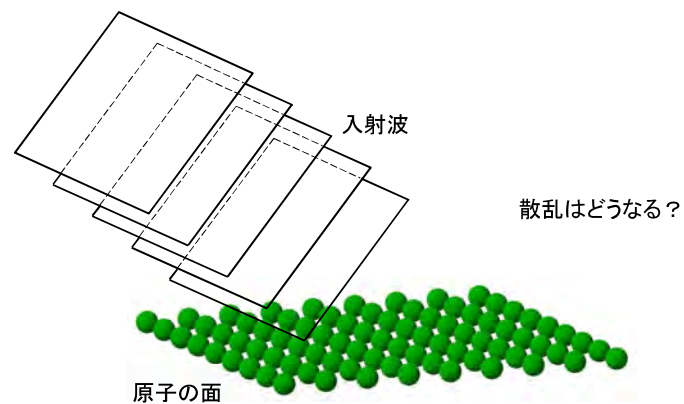
リアルな散乱波に対してホイヘンスの原理を適用すればいい
⇒ 反射、屈折の法則が成り立つ



35

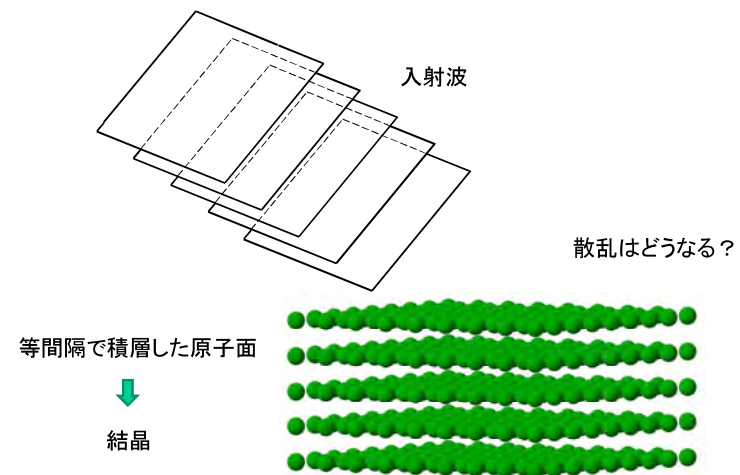
原子面による散乱

原子をたくさんに並べて面を作る、斜めにX線を当てる



34

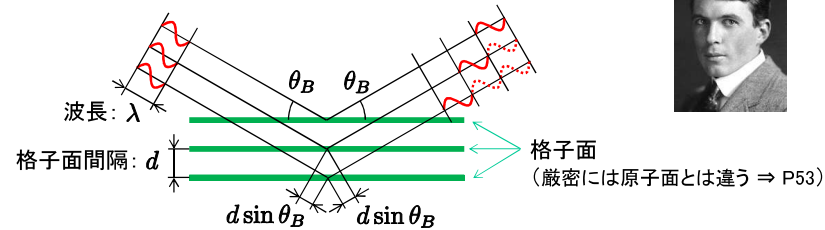
原子面を積み上げる



36

ブラッグの法則

厳密には法則ではなくて、ラウエの回折理論の解釈に近い



隣り合う格子面で反射したX線の光路差が波長に一致するとき

$$2d \sin \theta_B = \lambda$$

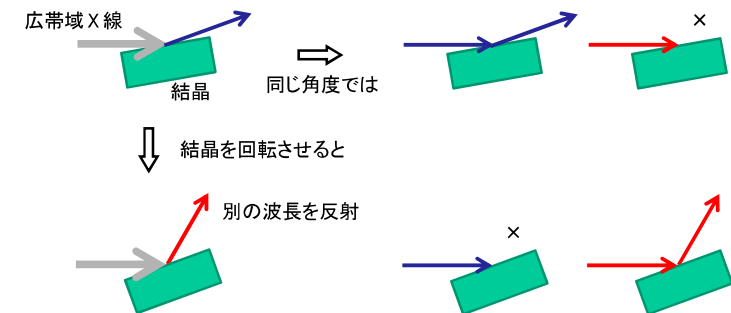
反射波の位相が揃う => 強い反射(回折)が起こる

37

分光

結晶によるX線回折を利用

結晶は置かれた角度に依存して特定の波長成分のX線のみ反射できる



39

分光 (単色化)

選択される波長

使用する結晶の格子面の間隔

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

結晶を置く角度

結晶と回転装置を準備すればX線を分光できる

38

二結晶分光器

単純な分光器

波長の変更

広帯域X線

二結晶分光器

広帯域X線

二結晶の平行度を $0.1''$ 以内に制御する調整ステージの精度は $0.01''$ 以下

40

0.01"



SPring-8 から 100 km

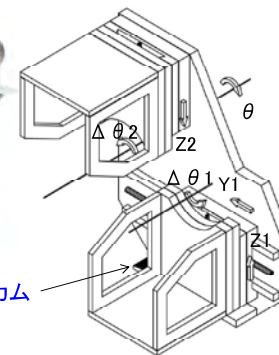


東京駅 から 100 km



41

SSM 駆動装置



名称	範囲	分解能
θ	$-1 \sim 27^\circ$	0.2"
$Y1$	30 ~ 290 mm	1 μ m
$\Delta \theta 1$	$> \pm 2^\circ$	0.01"
$\Delta \theta 1(P)$	$\pm 15^\circ$	0.001"
$Z1$	$> \pm 2$ mm	1 μ m
$\Delta \theta 2$	$> \pm 2^\circ$	0.01"
$Z2$	$> \pm 2$ mm	1 μ m

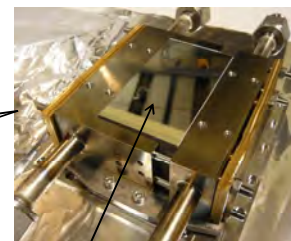
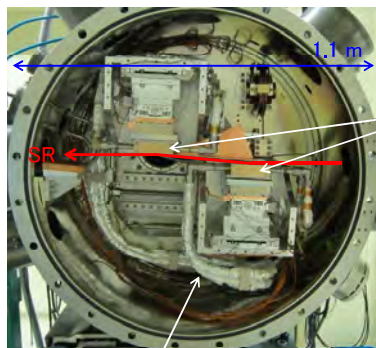
$\Delta \theta 1$ の分解能 : 0.01" ... ステッピングモータで制御
0.001" ... ピエゾ素子で制御

43

SPring-8 標準分光器 (SSM)

SSM : SPring-8 Standard Monochromator

アンジュレータビームライン用、液体窒素冷却結晶タイプ

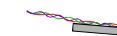


シリコン結晶

液体窒素循環経路

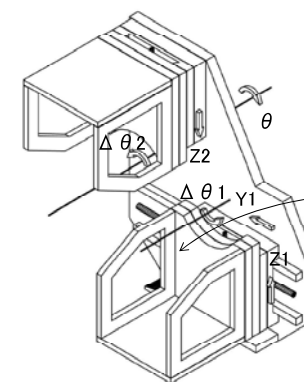
42

SSM 駆動装置



共通ユニット

各種結晶 + 調整ステージ



回転傾斜配置結晶

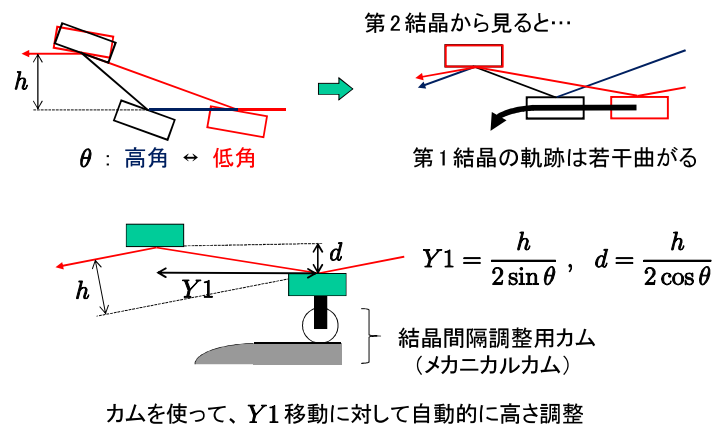
対称カット結晶

回折面切り替え機能付き

44

定位置出射

どうせなら、全ての波長に対してビーム位置を固定したい

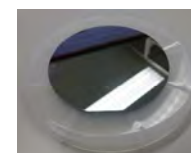


45

シリコン Silicon



シリコンインゴット



シリコンウエハ

2大メーカー

Shin-Etsu

SIMCO



Silicon \neq Silicone
よく間違える人がいる

47

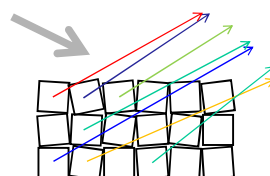
使える結晶

Q. どんな結晶でも分光結晶として使えるか？ 岩塩や氷ではダメ？

ほとんど全ての結晶は多結晶体
= 多数の微小結晶の集合体

微小結晶は方位が揃っていない

反射X線の波長と方向が結晶毎に違う
二結晶に組むと深刻な強度ムラが発生



大型の単結晶が必要

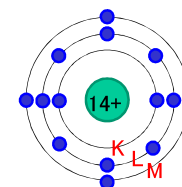
- » シリコン (Si) ... ほぼ完璧な単結晶、メートル級も可能
- » ゲルマニウム (Ge) ... そこそこの完全性
- » ダイヤモンド (C) ... 完全性・大きさともに改良が必要

さらに、熱対策が必要

➡ シリコンが一般的、ダイヤモンドは限定的

46

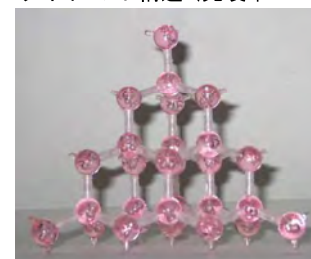
シリコン結晶



最近接原子数4個



ダイヤモンド構造 (充填率 34%)



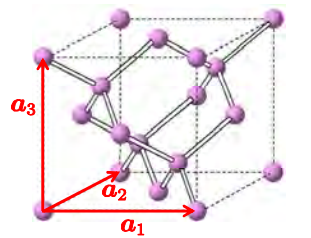
Side view

48

シリコン結晶

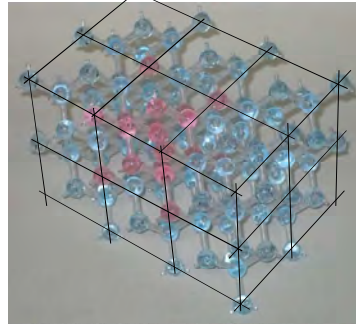
ダイヤモンド構造

単位胞 (原子数 8 個)



$$|a_1| = |a_2| = |a_3| = 5.43 \text{ \AA}$$

周期性



49

シリコン結晶の加工方法 (例)

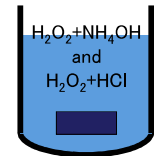
切削



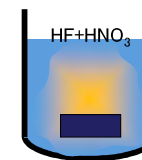
面方位測定用 X 線回折計



洗浄



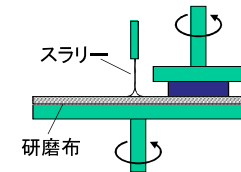
エッチング



研削



メカノケミカル研磨 (MCP)

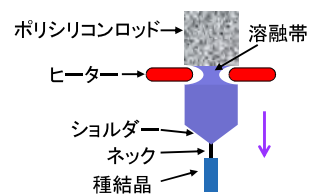


51

シリコンインゴット (材料)

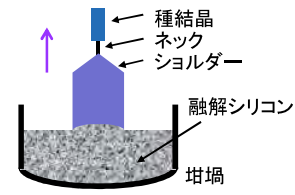
単結晶シリコンの製造方法 :

» 浮融帯溶融 (Floating zone, FZ) 法



FZ シリコンインゴット (φ 125 mm)

» Czochralski (CZ) 法



分光結晶には FZ シリコンを使用

- » 純度 : 11 N (= 99.99999999 % 以上)
- » ほぼ完璧な単結晶 : ひずみ、転位なし

50

反射の指数と格子面間隔

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

使用する結晶の格子面の間隔

シリコンの hkl 反射の場合

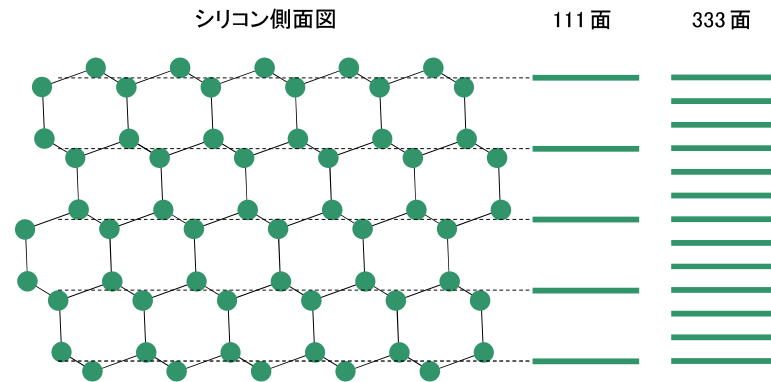
$$d = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$a_0 = 5.43 \text{ \AA}$$

反射の起こらない面もある (例 : 222 反射) ... 禁制反射と言う

52

反射の指数と格子面間隔



53

光の波動性と粒子性

光は粒子 → 光は波

エネルギー量子仮説 (1900)
光のエネルギーはとびとびの値しか取れない

光量子仮説 (1905)
 $E = h\nu$

コンプトン効果 (1922)
光は粒

光の粒子性
光子 (フォトン)

波長 λ

55

高次光

シリコン111 反射で波長 λ を選択する場合

111 反射の格子面間隔 $d = \frac{a_0}{\sqrt{3}}$

ブラッグ条件に代入 $\lambda = 2 \frac{a_0}{\sqrt{3}} \sin \theta$

3で割る

$\frac{\lambda}{3} = 2 \frac{a_0}{3\sqrt{3}} \sin \theta$

333 反射の格子面間隔

333 反射で波長 $\frac{\lambda}{3}$ を選択する条件にもなっている

波長 $\frac{\lambda}{3}$ の X 線 (高次光) が混ざる

(ミラーを使って除去可能 ⇒ P30)

54

波長とエネルギー

光量子仮説 $E = h\nu$

光子のエネルギーは振動数に比例

振動は波動性を表しているのではないかな?

$\nu = c/\lambda$

「光子のエネルギー」と「光波の波長」の関係

$E = \frac{12.4}{\lambda}$

単位 : keV

単位 : Å (= 0.1 nm)

56

技術的な事柄

熱対策

真空

- 悪いと余計な散乱が起こる
 - ⇒ 強度ロス、遮蔽にも関係
 - ⇒ 光学素子の汚れ

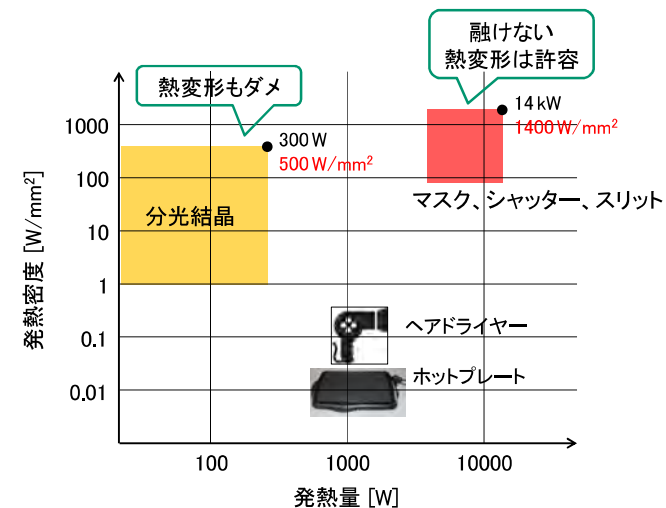
インターロック

ご安全に！

機器制御

57

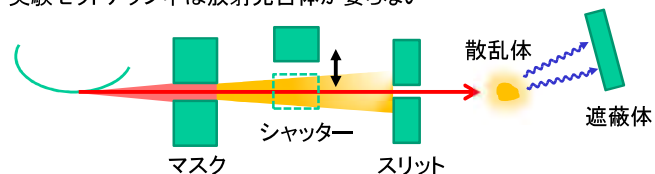
発熱量と密度



59

熱問題

生の放射光には不要な成分がある
健康被害や機器故障の原因となる放射線
軸外の長波長成分 ⇒ 実験には使えず、機器の発熱源にしかない
実験セットアップ中は放射光自体が要らない

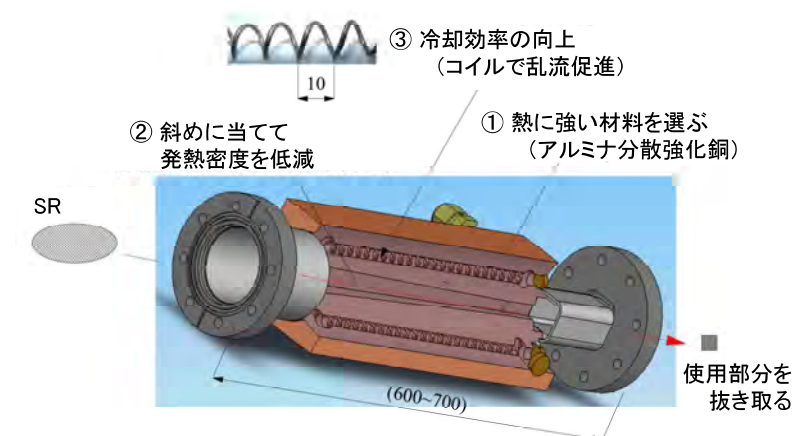


光軸の光も99%捨てている ⇒ 分光器の発熱源



58

マスクの冷却



60

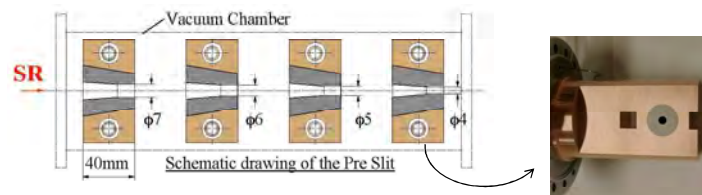
体積発熱技術

X線の吸収率：だいたい密度に比例

Be << Al << Fe < Cu << Pb
透過窓に使う

これを逆手にとる

透過する ⇒ 吸収少ない ⇒ 発熱箇所が分散される



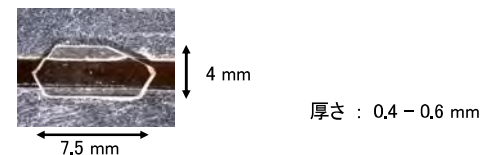
61

高熱負荷用SSM結晶

A) シリコン結晶（水、直接冷却）（1997 - 2013）



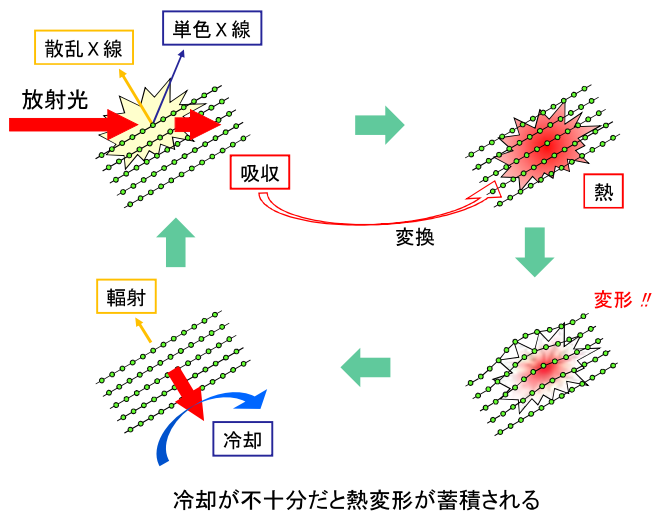
B) ダイヤモンド結晶（水、間接冷却）（2005 - 2013）



C) シリコン結晶（液体窒素、間接冷却）（2000 - 現在）

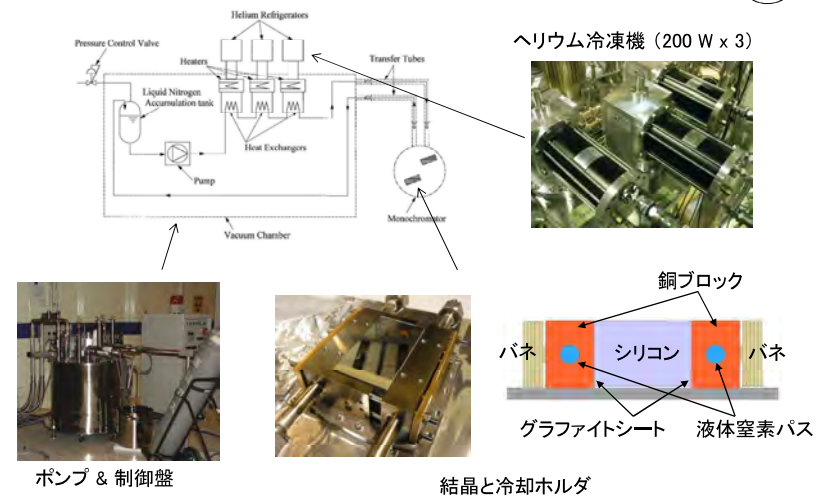
63

分光結晶の熱問題



62

液体窒素冷却



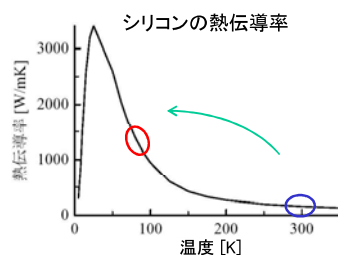
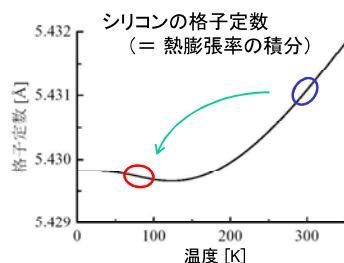
64

液体窒素冷却

結晶の冷却の目的：熱変形を抑えること … ただ冷やせばいい訳ではない
(極論を言えば、結晶全体の温度が均一になるなら温めたっていい)

液体窒素を使うメリット：シリコンの熱特性が低温で良い

$$\text{熱変形量} \propto \frac{\text{熱膨張率}}{\text{熱伝導率}} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{低温で小さい} \\ \leftarrow \text{低温で大きい} \end{array}$$



65

最後に

ビームラインの目的は

「使い勝手がよいX線を安全に提供する」ことです

光軸付近の単色光 … 余計な成分は除去した光
集光した高密度の光

一方で、放射光利用者の多くにとってはインフラです

⇒ 仕組みを知らなくても使えるようになっています

ビームラインを使う際には、「エネルギー 20 keV」とPCに
入力したら何が行われているかを想像してみてください

67

様々な課題

もっと良い光が欲しい！ … あらゆるユーザーの願いです

では、良い光とは？ … 良い実験結果が得られる光

具体的には？

- とにかく強い光
 - 結晶分光器は分解能 (10^{-4}) が高すぎる
 10^{-2} , 10^{-3} でいいから強度を 10 倍に！
- とにかく細いビーム
 - 小さな物を見たい！
- とにかく安定なビーム
 - 短時間で測りたいから、振動させるな！
 - 測定に時間がかかるから、2 週間くらい動くな！
- とにかく均一な光
 - イメージングの精度を上げたい

➡ そのために様々な技術開発も進めています

66

レポート課題

1. エネルギー 20 keV の X 線を使って実験をしたい
 - (a) 波長はいくらですか？ 単位は Å と nm で
 - (b) Si 111 分光結晶ではブラッグ角は何度になりますか？
2. 将来の良質な光を供給するため、下記の画期的なアイデア(夢想)を募集します。
実現可能性は問いませんので、いくつでもご自由に提案してください。
 - (1) 結晶等の冷却方法
 - (2) 新規材料
 - 低温 (-200°C) で機能するゴム ⇒ 液体窒素のシール材、ホース
 - 放射線劣化しないゴム ⇒ 冷却水のシール材
 - 蒸気圧を極限まで下げたグリース
 - 軽元素で作る分光用の多層膜
 - (3) 潤滑剤の要らない機械部品(ウォームネジ、送りネジ、ガイドレール)
 - (4) 汚染対策
 - 放射線に強く、X 線に透明で、炭素を付着しないコーティング
 - 付着した炭素のインライン除去方法

例) シャーベットを結晶に流して冷却してみたらどうか？

融解熱によって温度を 0°C に保ったまま大量の熱を輸送できるのではないかな？

68