

広がる放射光利用

雨宮慶幸

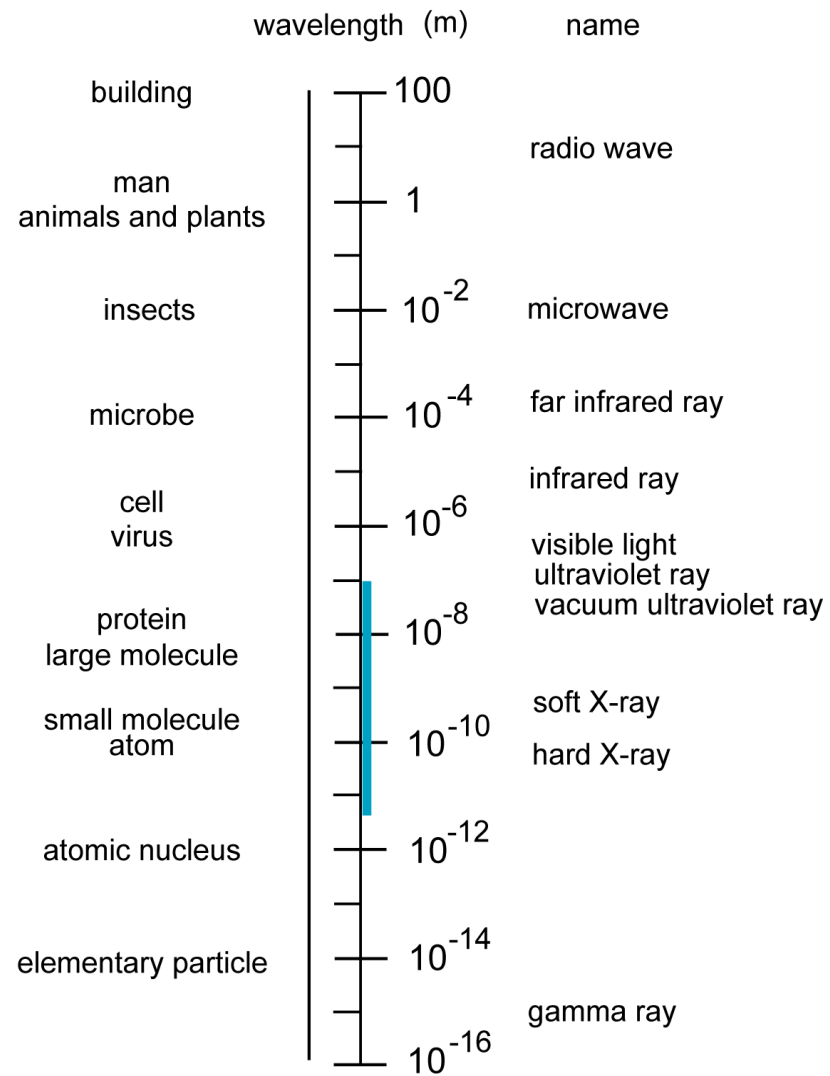
日本放射光学会 会長

東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授

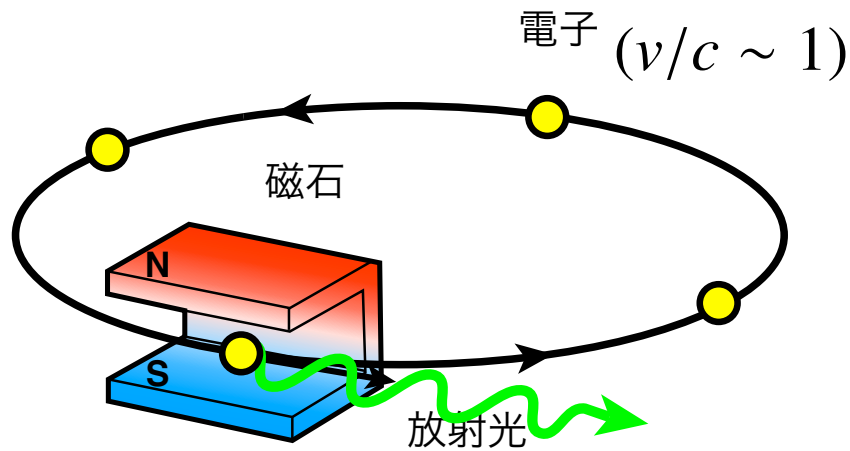
Information obtained by observation

- Seeing $10^6 / \text{sec}$
- Hearing $10^4 / \text{sec}$
- Touch $10^2 / \text{sec}$

Seeing \gg Hearing \gg Touch

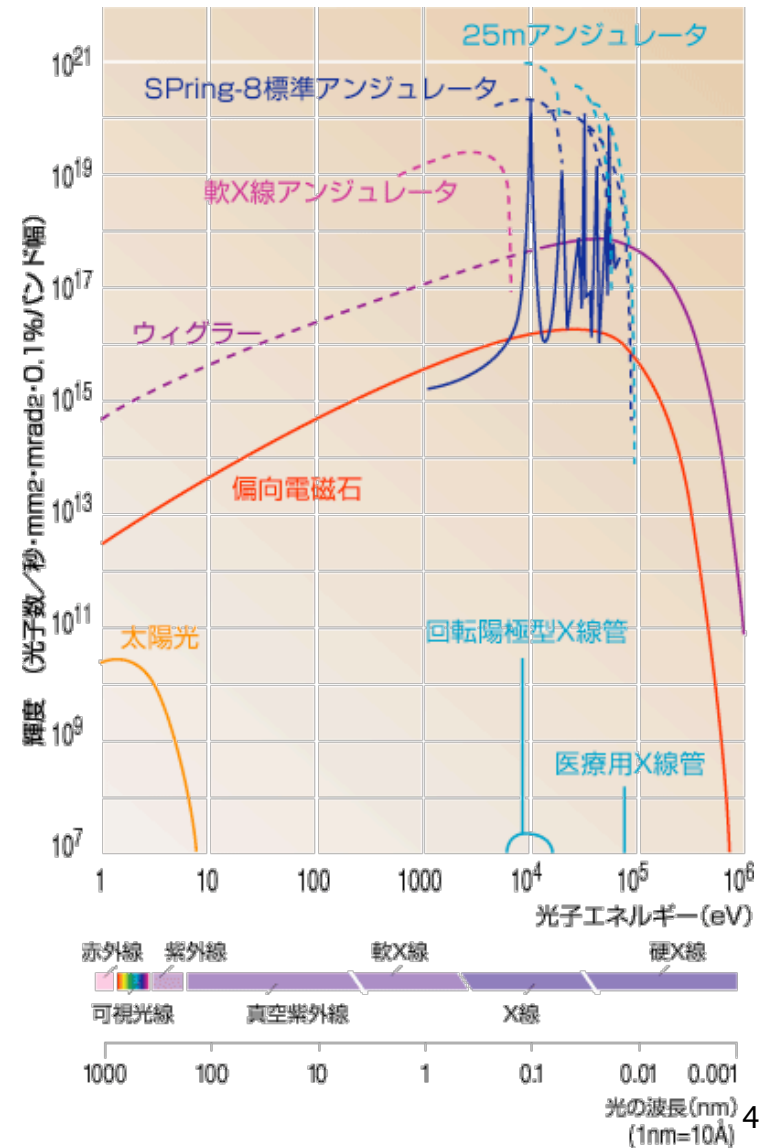


放射光 (Synchrotron Radiation)

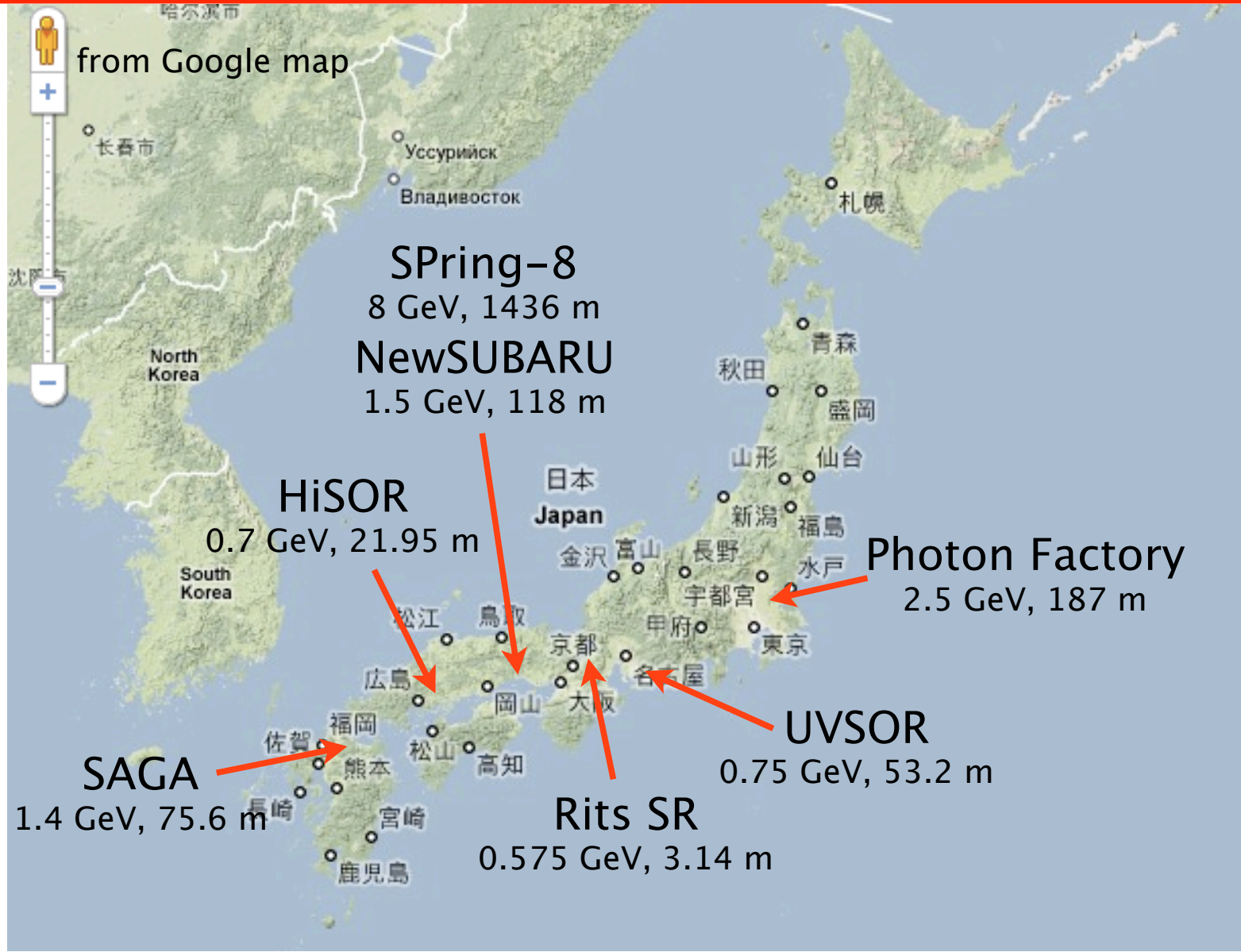


放射光の特長

- 極めて高輝度
- 指向性が高い
- 連続スペクトル (赤外～X線)
- 偏光性
- パルス光

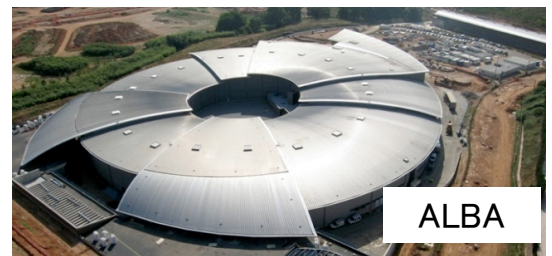
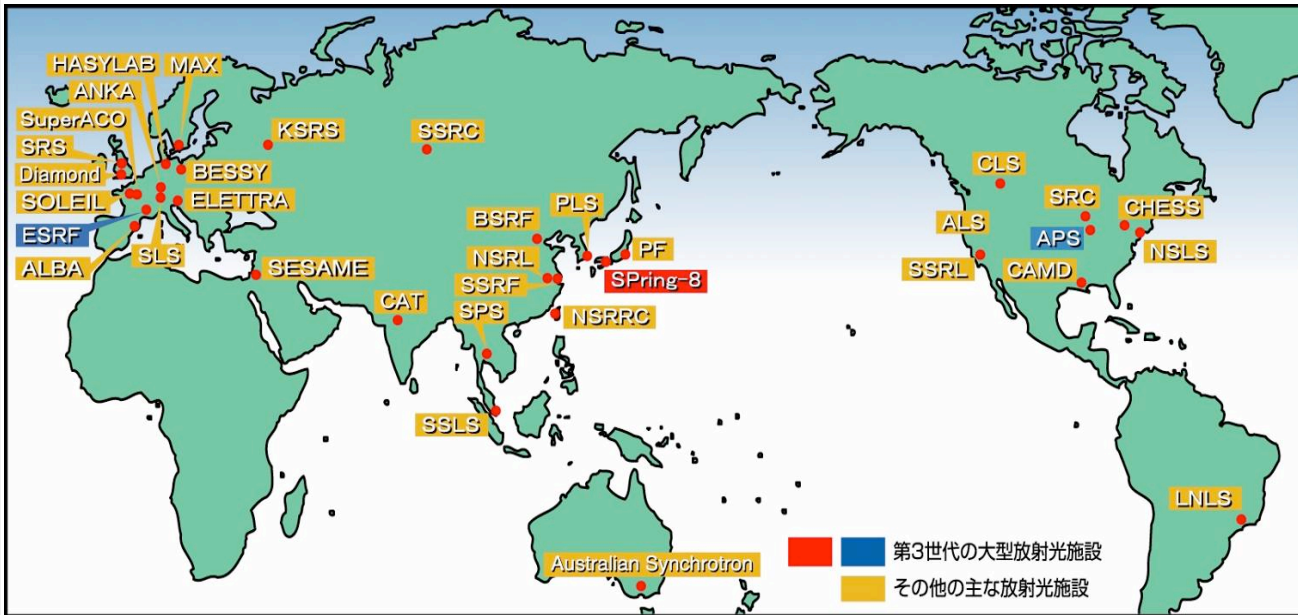


日本の放射光研究施設





世界の放射光施設



世界の放射光研究施設（1 / 3）



[http://www.srs.ac.uk/srs/SRworldwide/
index.htm](http://www.srs.ac.uk/srs/SRworldwide/index.htm)

世界の放射光研究施設 (2 / 3)

Asia & Oceania

- PLS (Korea)
 - 2.5 GeV, 280 m.
- Australian Synchrotron (Australia)
 - 3 GeV, 216 m.
- BEPS (China)
 - 2.2 GeV, 240 m.
- SSRF (China)
 - 3.5 GeV, 432 m.
- SRRC (Taiwan)
 - 1.5 GeV, 120 m.
- VEPP3 (Russia)
 - 2.2 GeV, 75 m.
- PS (Thailand)
 - 1.2 GeV, 81 m.
- INDUS-II (India)
 - 2.5 GeV, 172 m (Under Construction).

North & South America

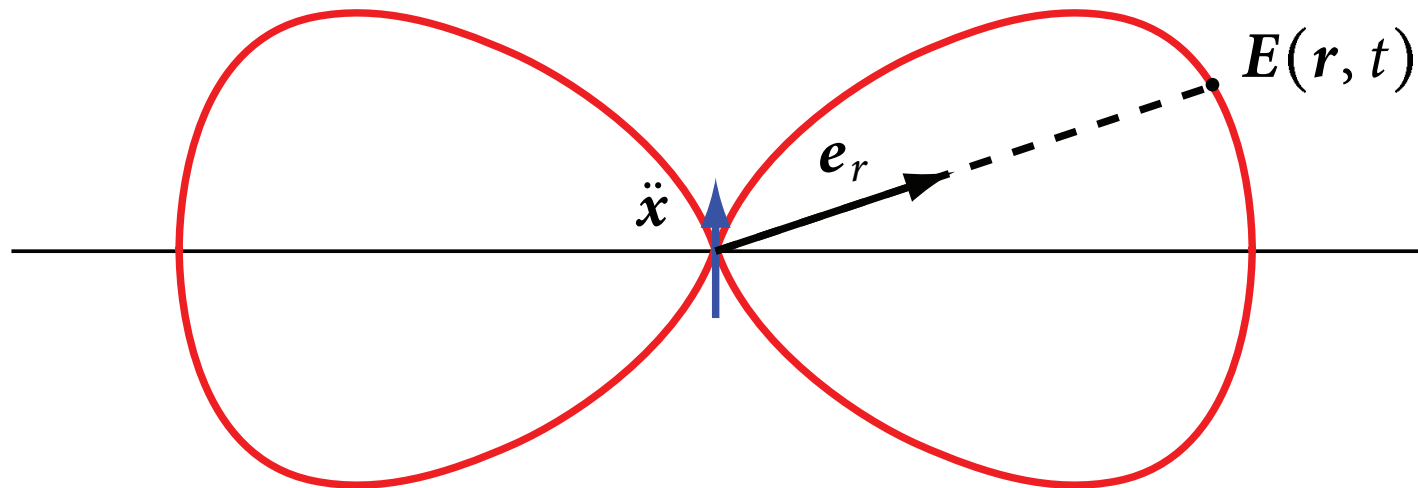
- APS (USA)
 - 7 GeV, 1104 m.
- NSLS (USA)
 - 2.5 GeV, 170 m
- NSLS-II (USA)
 - 3 GeV, 791.5 m.
- SPEAR III (USA)
 - 3 GeV, 234 m.
- CHESS (USA)
 - 5.5 GeV, 769 m.
- ALS (USA)
 - 1.9 GeV, 197 m.
- Canadian LS (Canada)
 - 2.9 GeV, 170 m.
- LNLS-I (Brazil)
 - 1.39 GeV, 93.2 m.

世界の放射光研究施設 (3 / 3)

Europe & Middle East

- ESRF (France)
 - 6 GeV, 844 m.
- SOLEIL (France)
 - 2.75 GeV, 354 m.
- BESSY-II (Germany)
 - 1.7 GeV, 240 m.
- HASYLAB (Germany)
 - 4.45 GeV, 289 m.
- ANKA (Germany)
 - 2.5 GeV, 110 m.
- PETRA-III (Germany)
 - 6 GeV, 2304 m.
- ELETTRA (Italy)
 - 2.0 GeV, 259.2 m.
- SLS (Swiss)
 - 2.4 GeV, 288 m.
- Diamond (UK)
 - 3 GeV, 561 m.
- MAX-II (Sweden)
 - 1.5 GeV, 88 m.
- ALBA (Spain)
 - 3 GeV, 269 m (Under Construction).
- SESAMI (Jordan)
 - 2.5 GeV, 133 m (Under Construction).

放射光の発生原理：電気双極子放射

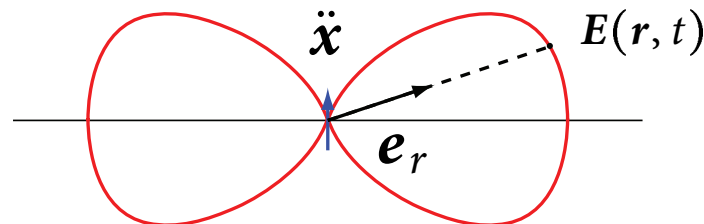


$$\begin{aligned} E(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{r} \{ \mathbf{e}_r \times (\mathbf{r}_r \times \ddot{\mathbf{p}}) \} \\ &= \frac{e}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{r} \{ \mathbf{e}_r \times (\mathbf{r}_r \times \ddot{\mathbf{x}}) \} \end{aligned}$$

放射光の発生原理：電気双極子放射

$$E(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{r} \{ \mathbf{e}_r \times (\mathbf{r}_r \times \ddot{\mathbf{p}}) \}$$

$$= \frac{e}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{r} \{ \mathbf{e}_r \times (\mathbf{r}_r \times \ddot{\mathbf{x}}) \}$$



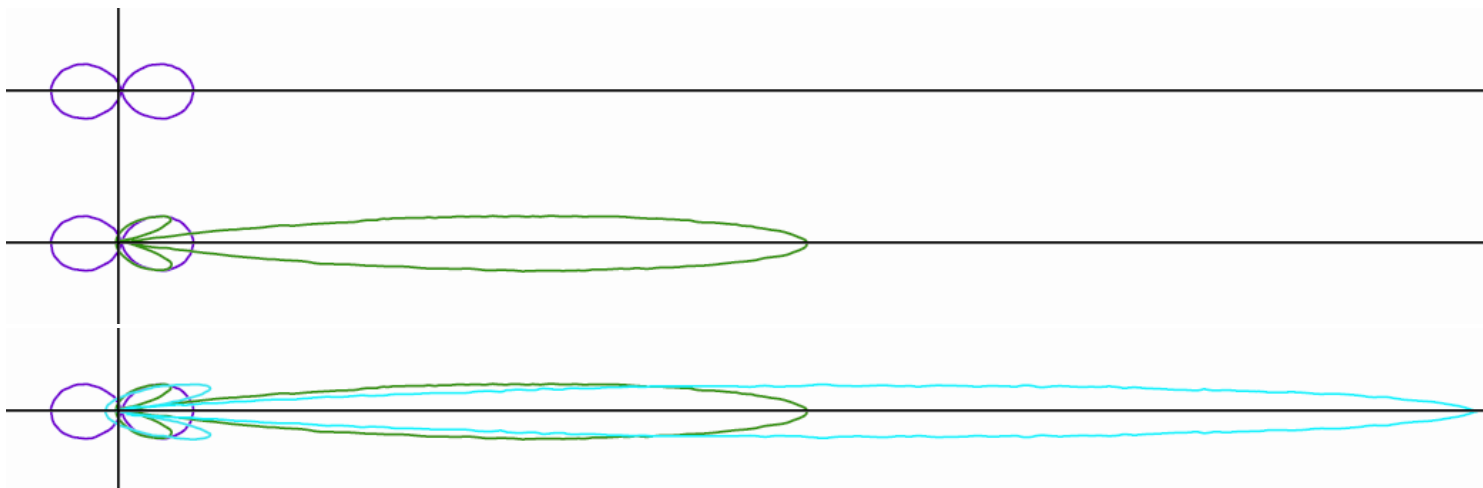
電子の速度が速くなると (光速に近づくと)

→ ローレンツ変換により電気双極子放射が歪む

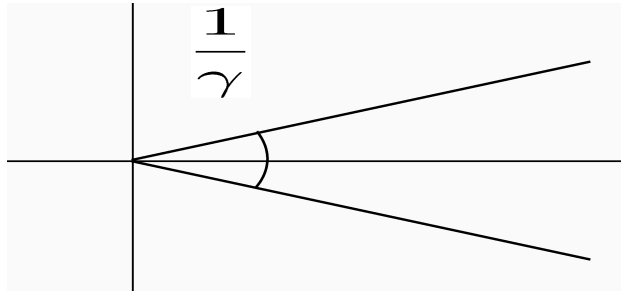
$E = 0.551 \text{ MeV}$

$E = 2.5 \text{ MeV}$

$E = 5.0 \text{ MeV}$



放射光の発生原理：電気双極子放射



$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Electron energy by unit of rest mass energy

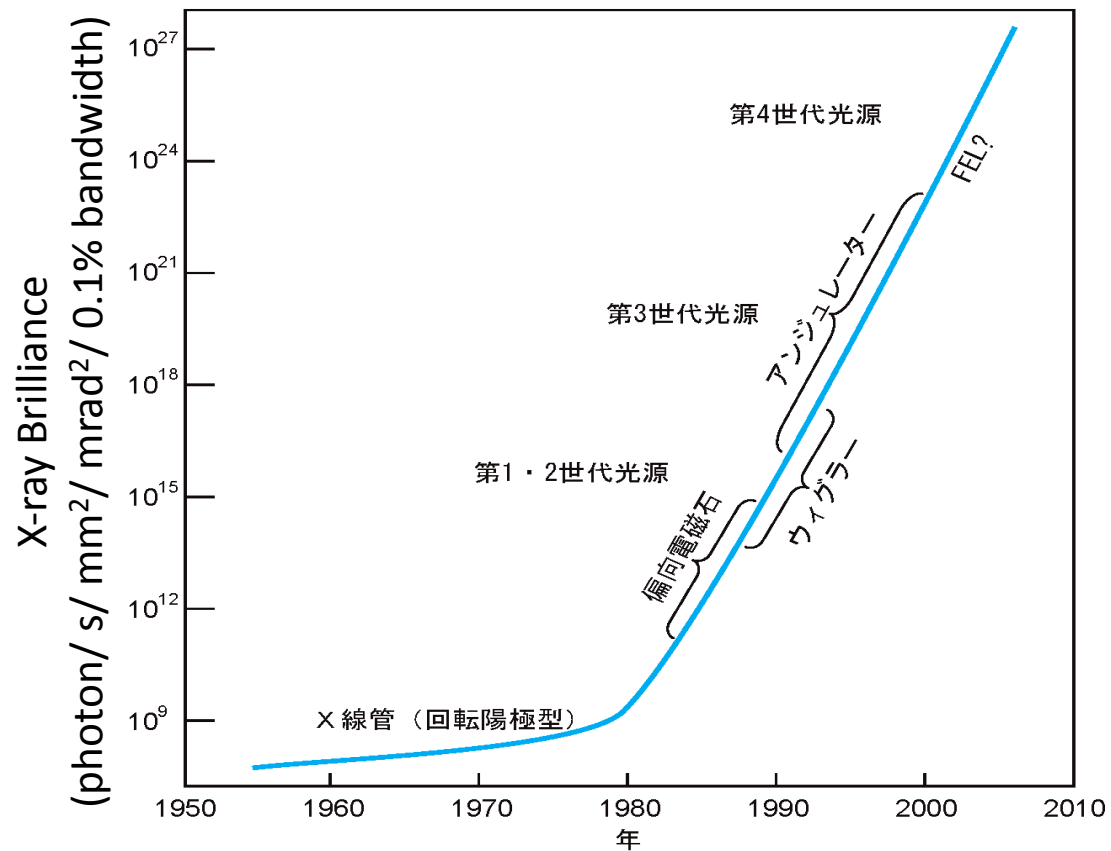
PF ring: $E = 2.5\text{GeV} \rightarrow \gamma \approx 4900$

$$\frac{1}{\gamma} \approx 0.2 \times 10^{-3} \text{rad}$$

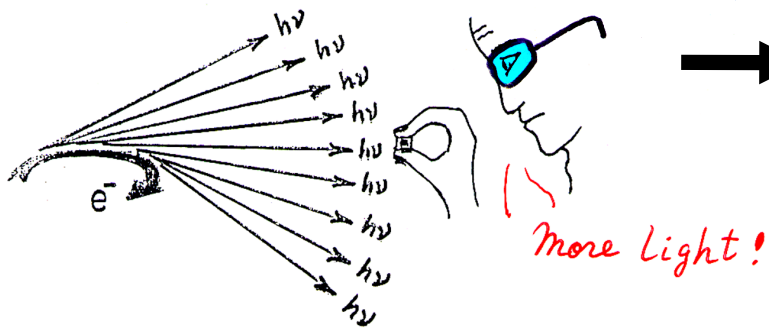
cf. divergence of laser $\sim 1 \text{ mrad}$

放射光源の輝度 (Brilliance)

$$\text{輝度} = \text{Brilliance} = \frac{d^4N}{dt \cdot d\Omega \cdot dS \cdot d\lambda/\lambda}$$

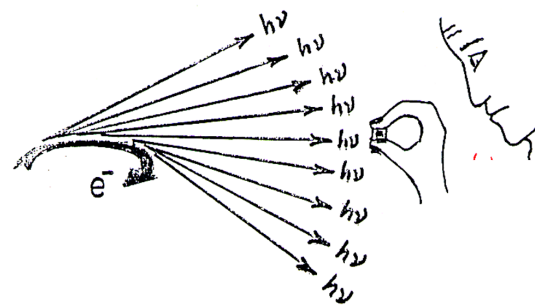


THE DILEMMA



SO MANY X-RAYS
AND SUCH SMALL SAMPLES!

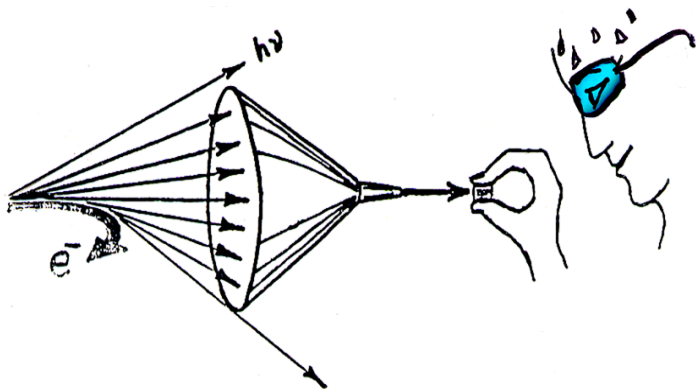
THE DILEMMA



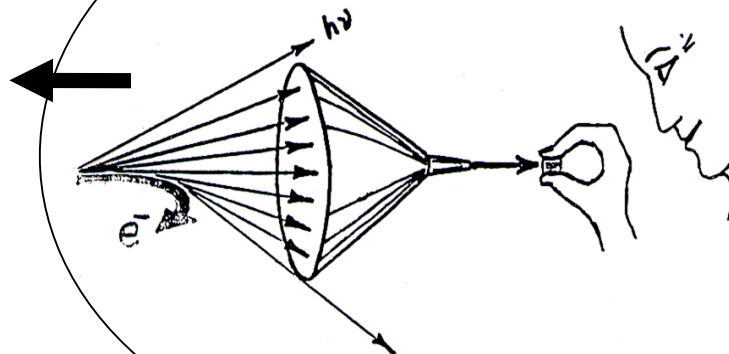
SO MANY X-RAYS
AND SUCH SMALL SAMPLES!

テキスト

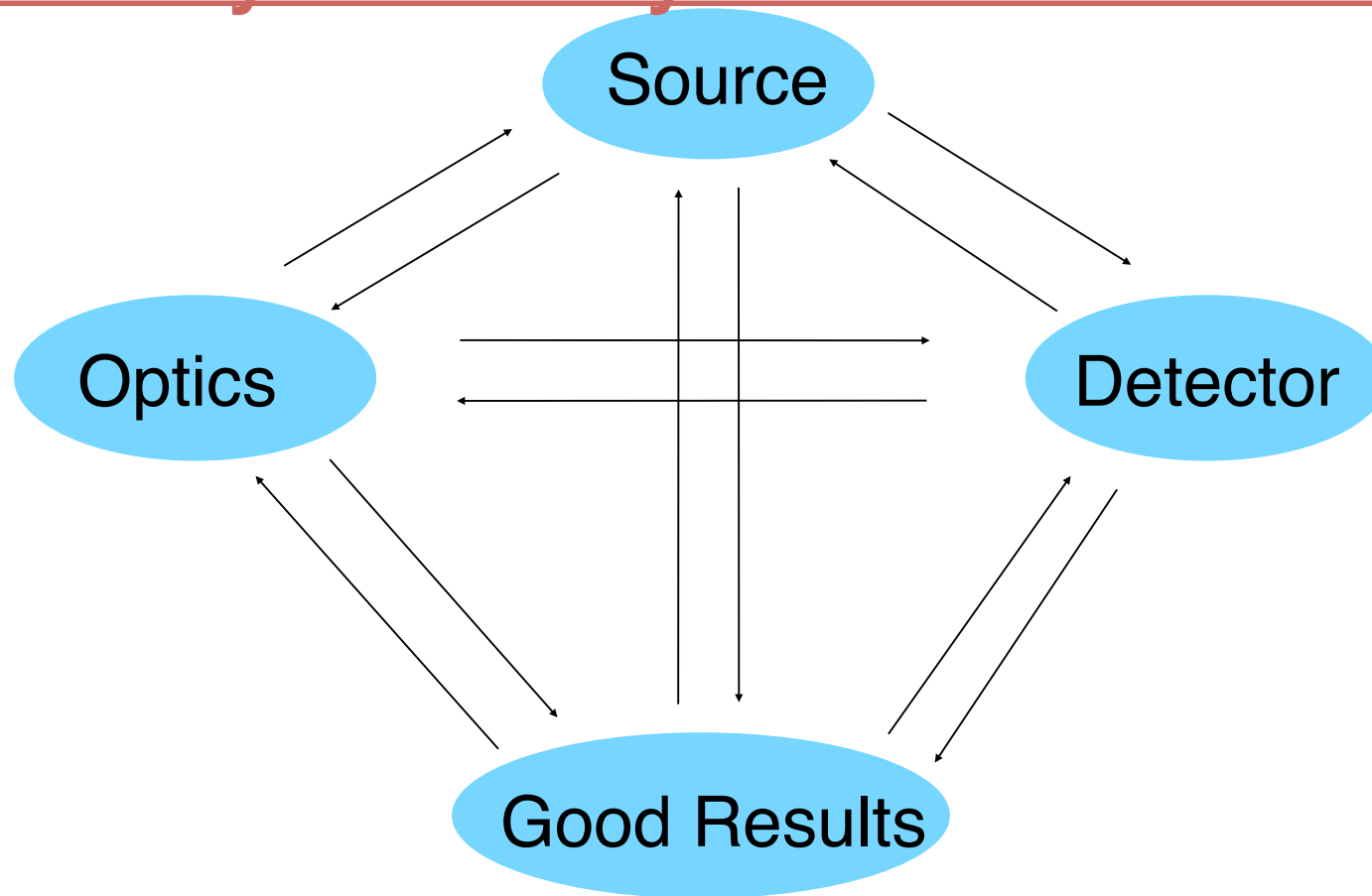
Too brilliant to observe !



THE SOLUTION?

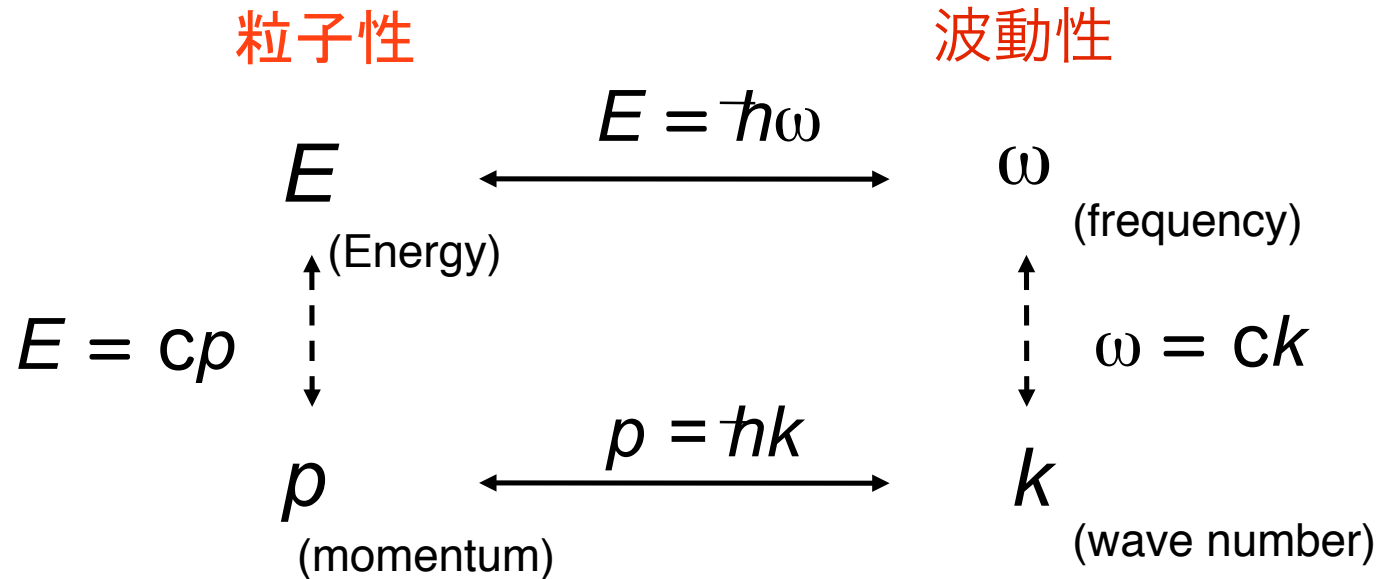


Trinity of X-ray Instrumentation



Four-Position Foundation

光の2重性



検出器

E: energy
p: position (direction)
t: time

光学系 (検波器)

frequency
wavelength
phase ... coherency
polarization

放射光（X線）で何が見えるか？

可視光

放射光（X線）

物質の形が見える



原子・分子の形（構造）が見える
X線回折/散乱

物質の色が見える



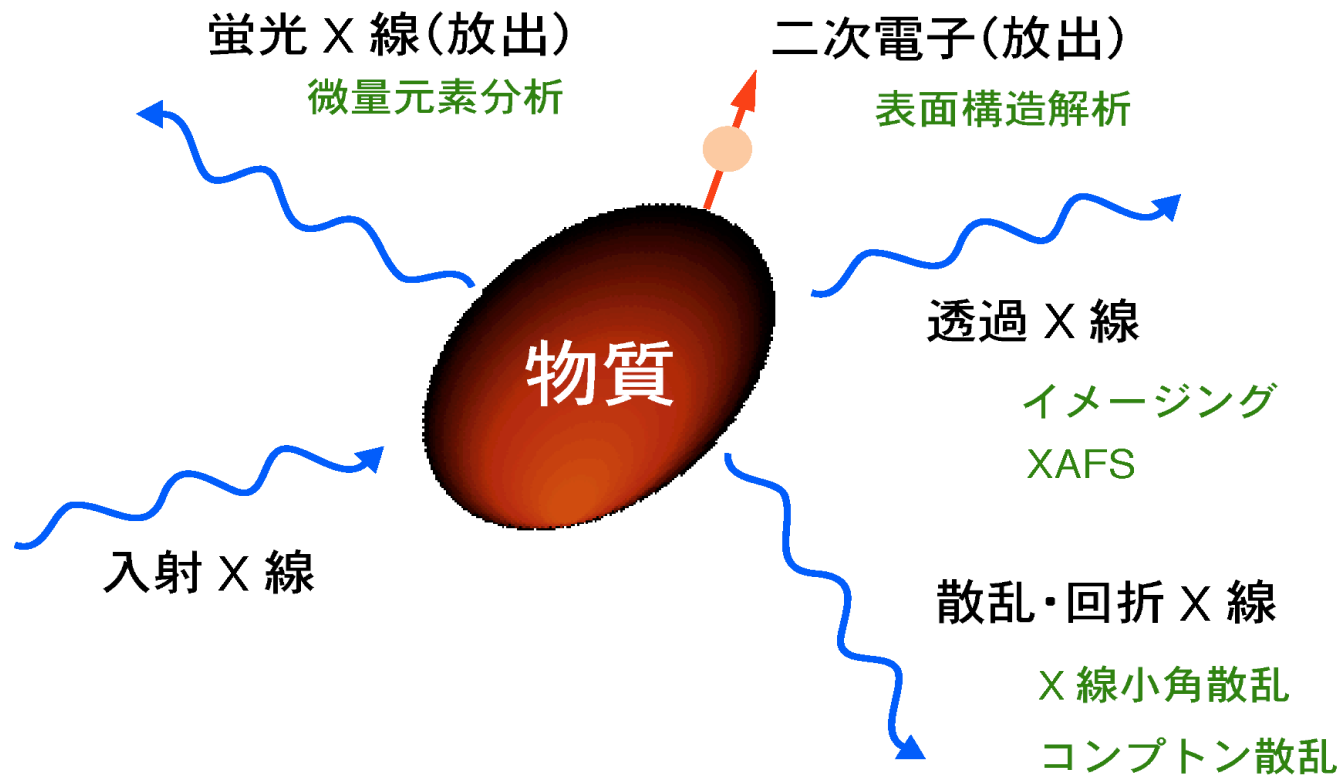
原子・分子の性質（電子状態）が見える
X線分光 : 吸収 & 発光

物質の性質を変える



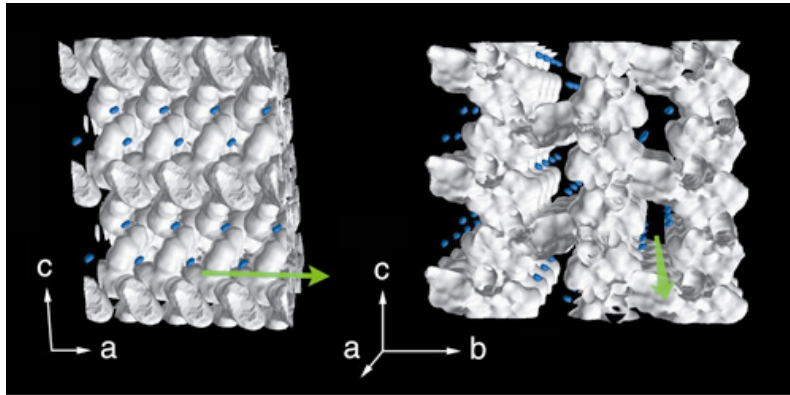
原子・分子の結合を変える
放射線効果

X線と物質の相互作用



物質科学への応用

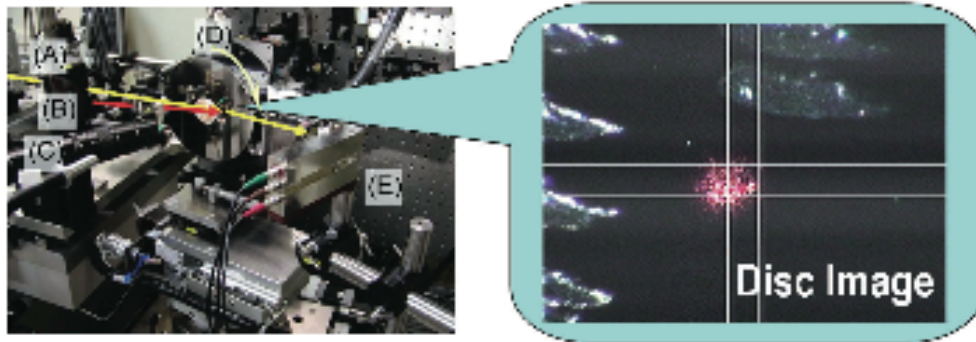
ナノ細孔に吸着された、水素分子の直接観測



Y. Kubota, et al., Angew. Chem. Int. Ed. 44, 920 (2004).

ナノ秒構造ダイナミクス

DVD材料の光誘起構造変化をリアルタイム観測



原子分解能のバルク構造観察

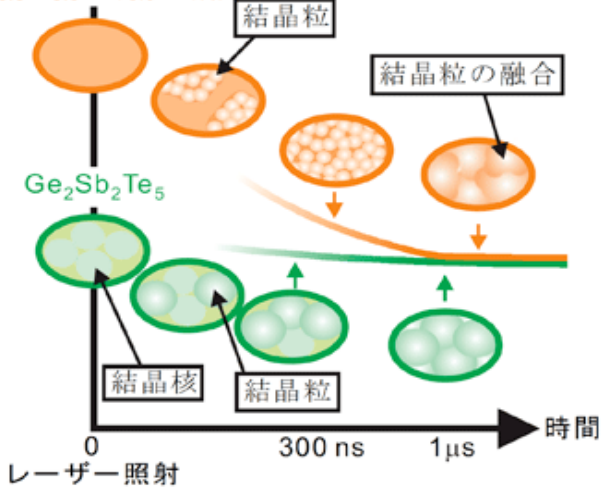
ナノ細孔に吸着・配列貯蔵された分子の物理化学的機能

粉末X線回折

→精密構造・電子密度分布解析

ブラッグピークの幅

$Ag_{3.5}In_{3.8}Sb_{75.0}Te_{17.7}$



Y. Fukuyama, et al., Appl. Phys. Ex. 1 045001 (2008).

高圧・地球科学への応用

地球内部、下部マントル領域の鉱物、物質相を解明

地球内部の層構造、ついに全容解明

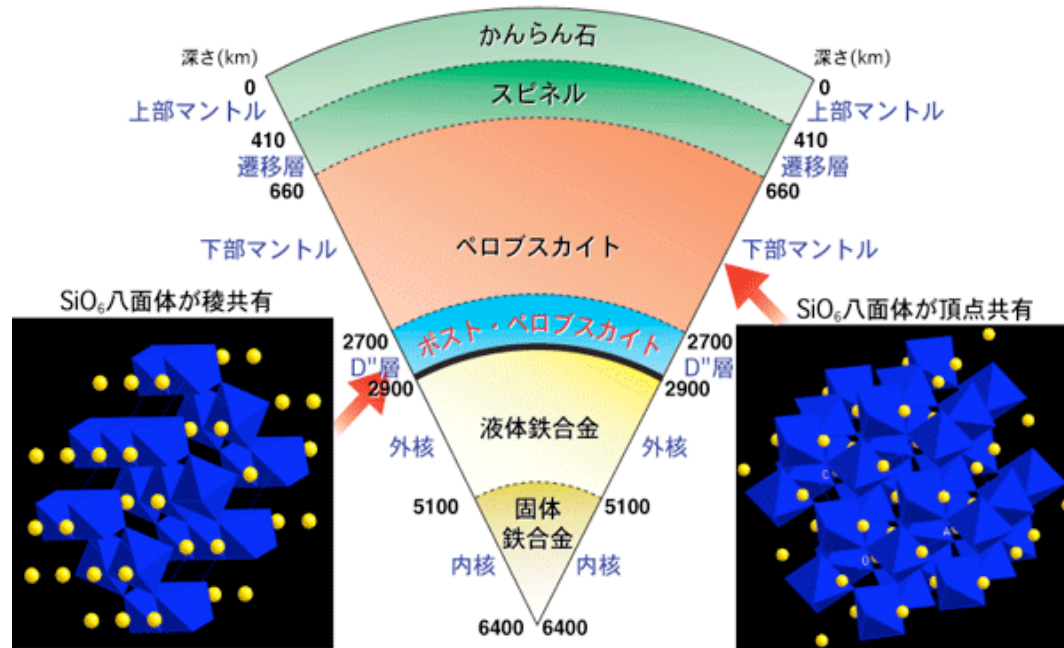


図1 D''層はポスト・ペロブスカイト相 (MgSiO₃) から成ることを解明

125 GPa, 2200°Cでの構造決定

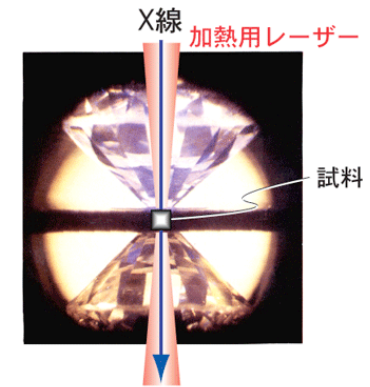


図2

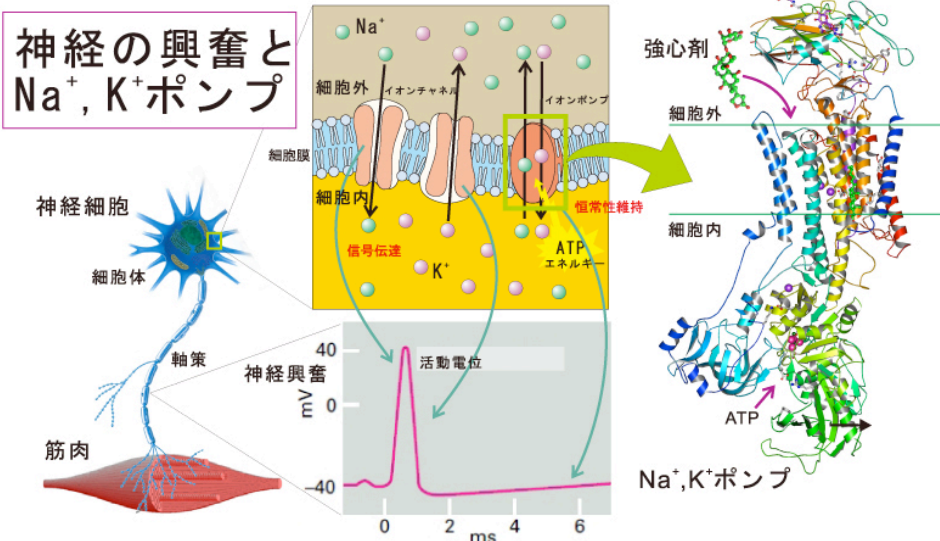
超高温高圧下におけるX線による結晶構造解析

M. Murakami et al., Science 304, 855 (2004).

生命科学への応用

膜蛋白の構造と機能の関係

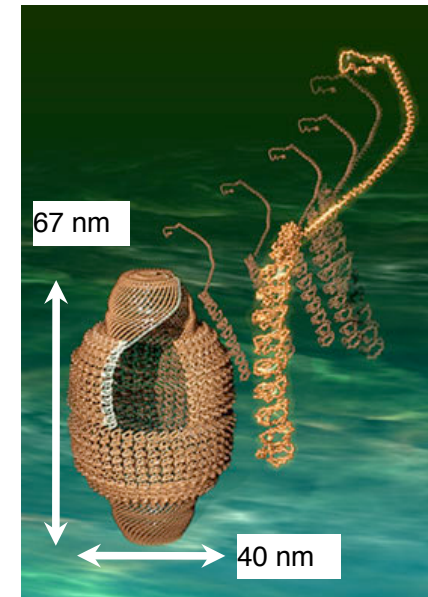
ナトリウム・カリウムポンプ蛋白質の立体構造を解明



T. Shinoda, Nature 459, 446 (2009).

巨大タンパク質ボルトの構造解明

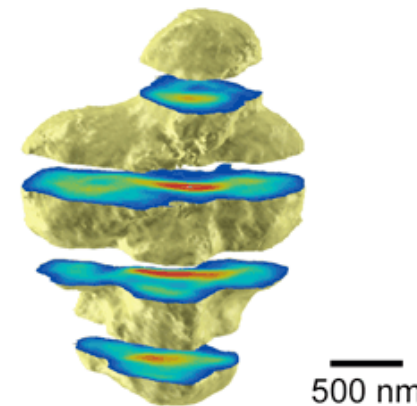
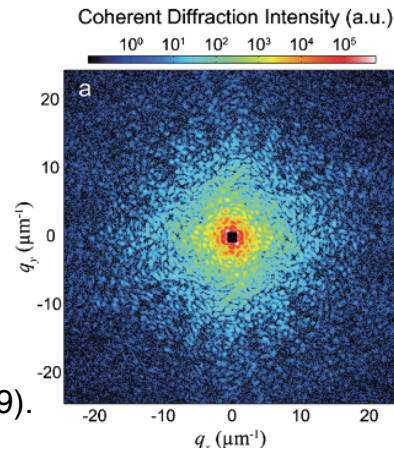
超高分子構造体



H. Tanaka et al., Science 323, 384 (2009).

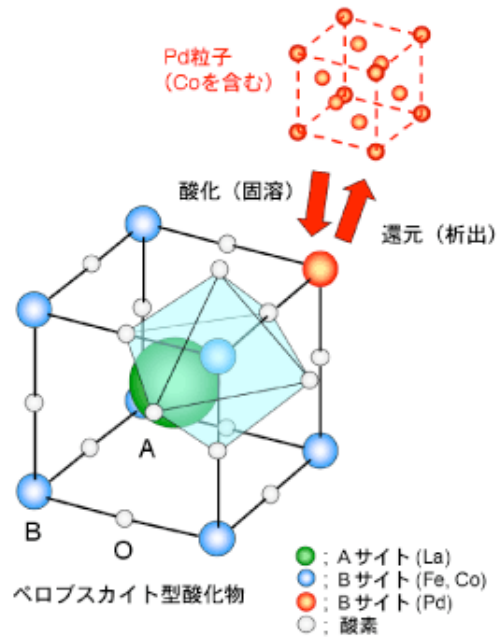
ヒト染色体の3次元CT観察

Y. Nishino et al., PRL 102, 018101 (2009).



環境科学・産業への応用

インテリジェント触媒の機構説明

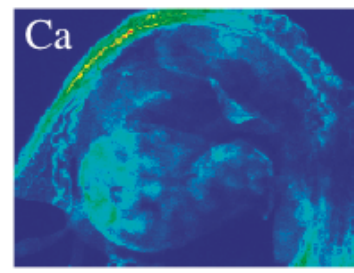
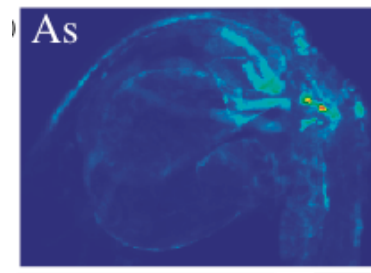
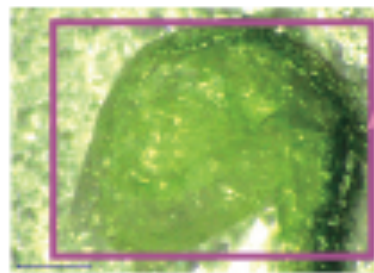


排気ガス浄化触媒のメカニズム
(電子状態、構造)



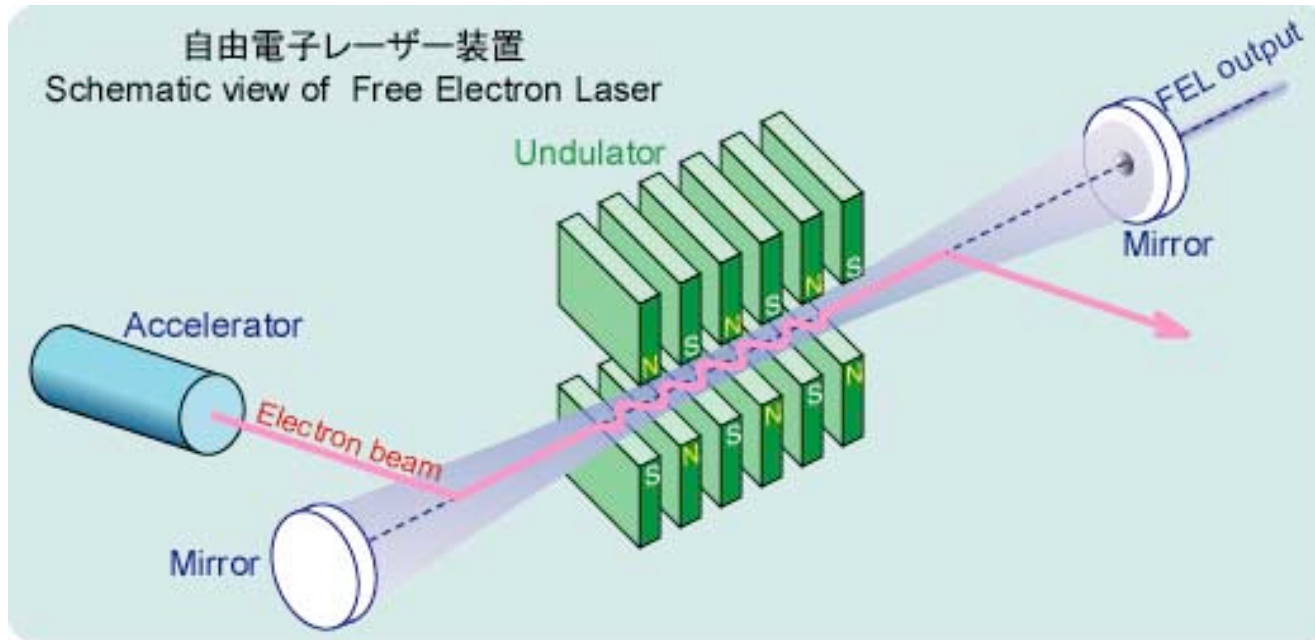
製品としての自動車に搭載

シダの葉に蓄積した有毒元素のイメージング



μm空間分解能
ウェット・ソフト試料
高エネルギーX線

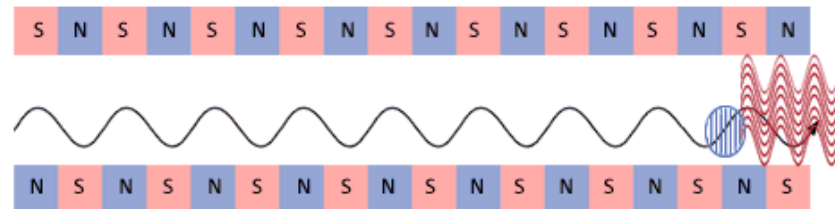
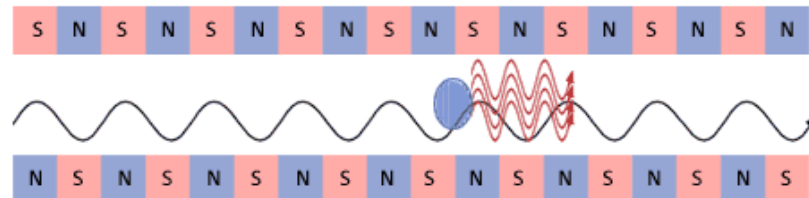
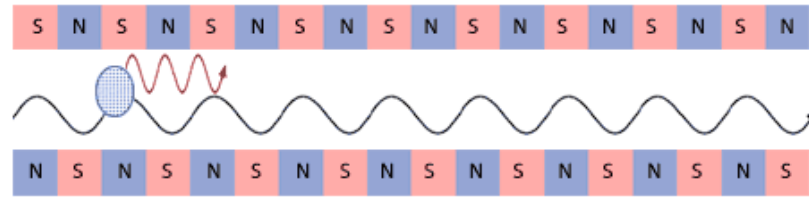
X線自由電子レーザー (Free Electron Laser)



Inst. of Free Electron Laser, Osaka Univ., <http://www.fel.eng.osaka-u.ac.jp/>

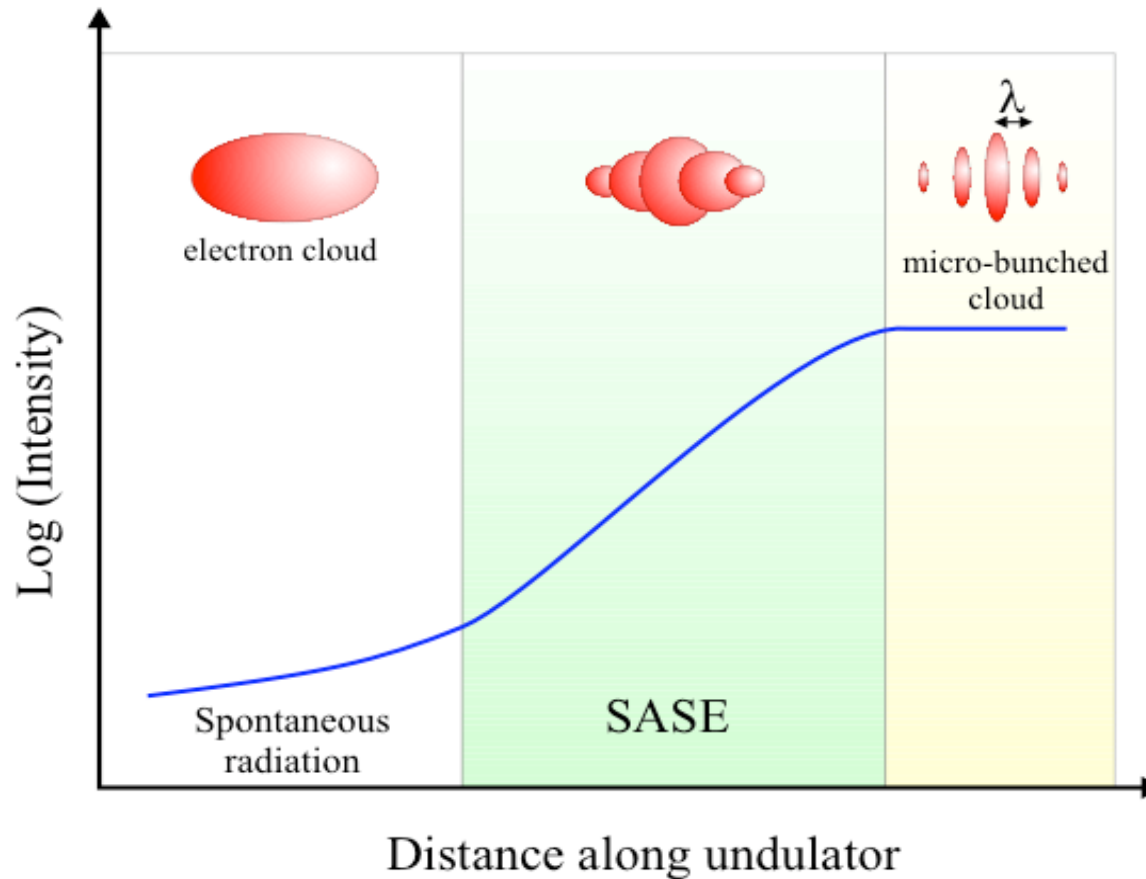
But, mirror is NOT available for x-ray !

SASE : Self Amplified Spontaneous Emission



X線自由電子レーザー

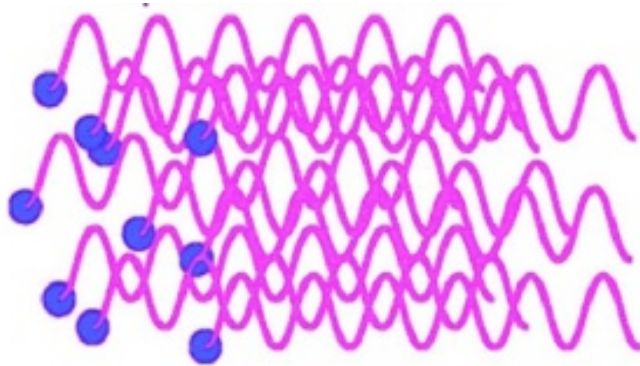
SASE : Self Amplified Spontaneous Emission



J. Als-Nielsen & D. McMorrow, "Elements of Modern X-ray Physics", John Wiley & Sons (2001)

Coherent X-ray from FEL

Spontaneous radiation

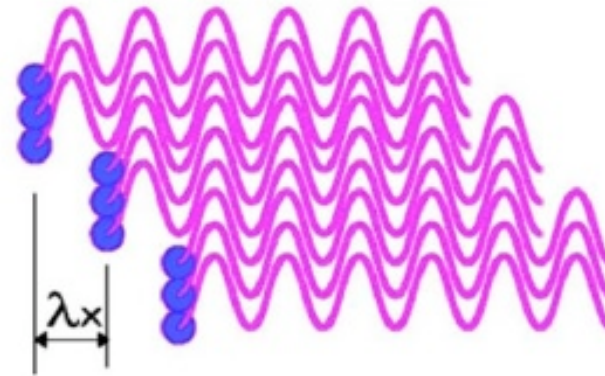


自発放射

各電子から放射された光の
強度が足し合わされる

proportional to N

Stimulated radiation



誘導放射

各電子から放射された光の
振幅が足し合わされる

proportional to N^2

Coherence, phase

X-ray non-linear optics
X-ray phase-contrast microscopy
Photon correlation spectroscopy

Nano-beam

Scanning diffraction
Scanning spectroscopy

次世代放射光

Ultra short pulse

ps- & fs- chemistry

High Brilliance

Single molecule scattering