

OH'25

放射光源加速器の基礎

2025年9月2日(火) ▶ 5日(金)

KEK + オンライン開催

放射光は粒か波か？

加藤政博

(広島大／分子研)

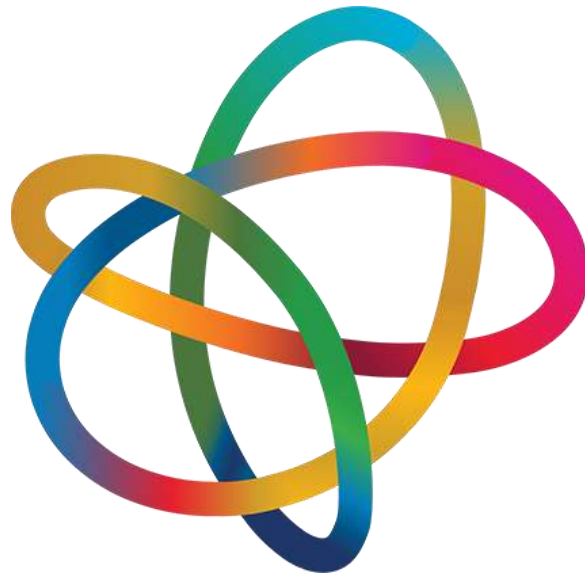


はじめに

放射光は粒か波か？

加藤政博（広島大／分子研）

まったくの偶然ですが・・
今年2025年は「国際量子科学技術年」！



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

量子暗号通信、量子コンピュータ、量子計測・センシング・・・
世の中、量子、量子と騒がしいですが・・・
加速器も一応、量子ビーム、ということでお仲間にいれてもらえるかも・・・??

18-3 All of classical physics

これが古典物理学のすべてだ！

In Table 18-1 we have all that was known of fundamental *classical* physics, that is, the physics that was known by 1905. Here it all is, in one table. With these equations we can understand the complete realm of classical physics.

Table 18-1 Classical Physics

Maxwell's equations

- I. $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ (Flux of $\mathbf{E}$ through a closed surface)
= (Charge inside)/ ϵ_0
- II. $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ (Line integral of $\mathbf{E}$ round a loop)
= $-\frac{d}{dt}$ (Flux of $\mathbf{B}$ through the loop)
- III. $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ (Flux of $\mathbf{B}$ through a closed surface) = 0
- IV. $c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ c^2 (Integral of $\mathbf{B}$ around a loop)
= (Current through the loop)/ ϵ_0
+ $\frac{d}{dt}$ (Flux of $\mathbf{E}$ through the loop)

Conservation of charge

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \left[\begin{array}{l} \text{(Flux of current through a closed surface)} \\ = -\frac{d}{dt} \text{(Charge inside)} \end{array} \right]$$

Force law

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Law of motion

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{p}) = \mathbf{F}, \quad \text{(Newton's law, with Einstein's modification)}$$

where $\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

Gravitation

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{e}_r$$

放射光加速器は
古典物理学で
ほぼ理解できる
のだが・・・

ちょこっとだけ
古典物理学では
説明できない部分
がある・・・

KEKの建物の床にこんな
ことが書いてありました！

なぞがとける、**科学**の花です。
We solve a puzzle.
this is the flower of science.

光は
波でも
粒でもある。
アインシュタイン (1879~1955)
Light is a wave
and is also a particle.

Light is a particle.

光は
粒でも
波でもある。
ニュートン (1643~1727)

Light is a wave. 光は
波でも
粒でもある。
ホイヘンス (1629~1695)

この夜話のあらすじ

- はじめに
 - 光は粒のようでもあり波のようでもある？
- 放射光は粒？
 - 光を出す電子からすると粒と波では大違い？
- 放射光は波？
 - 放射光の波の形は電子の運動で決まる？
- 一粒の放射光の波の性質？
 - 電子一個からの放射光の観測？
- おわりに
 - 放射光はとれたてを生で食べよう！

光の研究史

光の本質は白色光。
光と闇（暗さ）の混ざ
り合いで色が決まる

光は色のついた
粒である

古代ギリシャ時代

1600

1700

1800

1900

2000



ソクラテス
469-399 B.C.



アリストテレス
384-322 B.C.



プラトン
427-347 B.C.



ユークリッド
330頃-275頃 B.C.



イブン・アル=ハイサム
965-1040頃



ニュートン
1643-1727



ホイヘンス
1629-1695



マクスウェル
1831-1879



ヤング
1773-1829



アインシュタイン
1879-1955

電磁波の存在
を予測

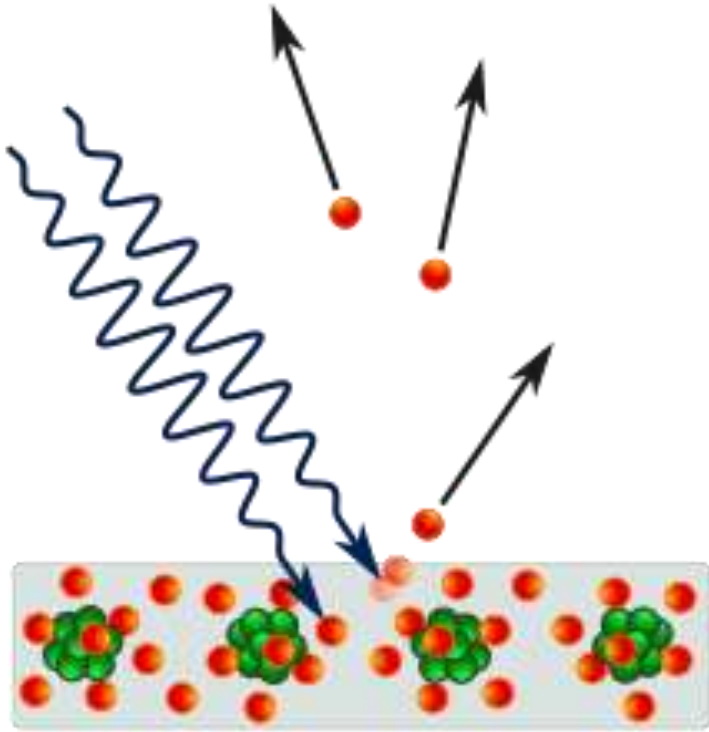
光はフォトン
(光子)である

光は波動である

光の波動を証明

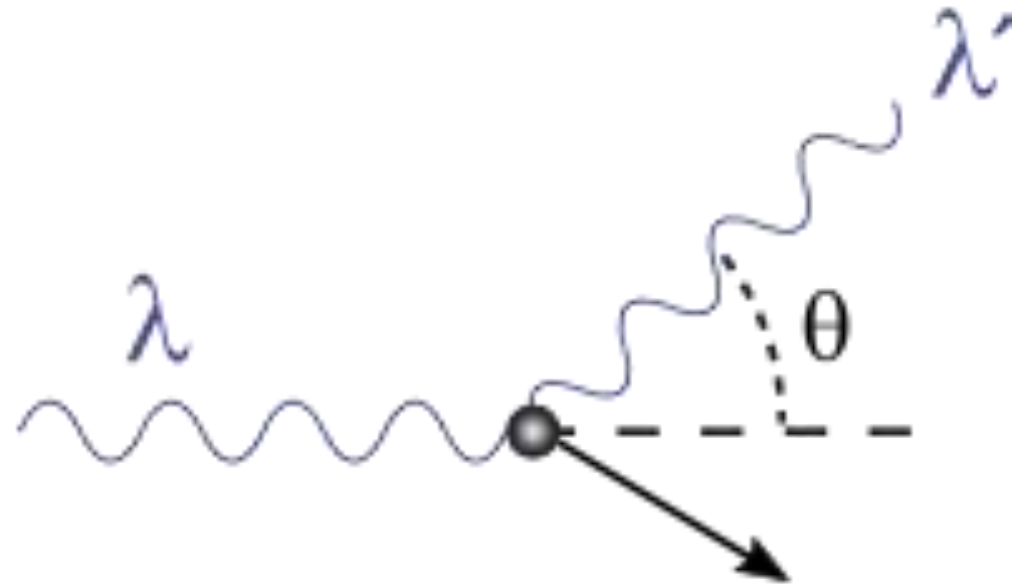
光は粒だ！

Photo-electric effect



https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect

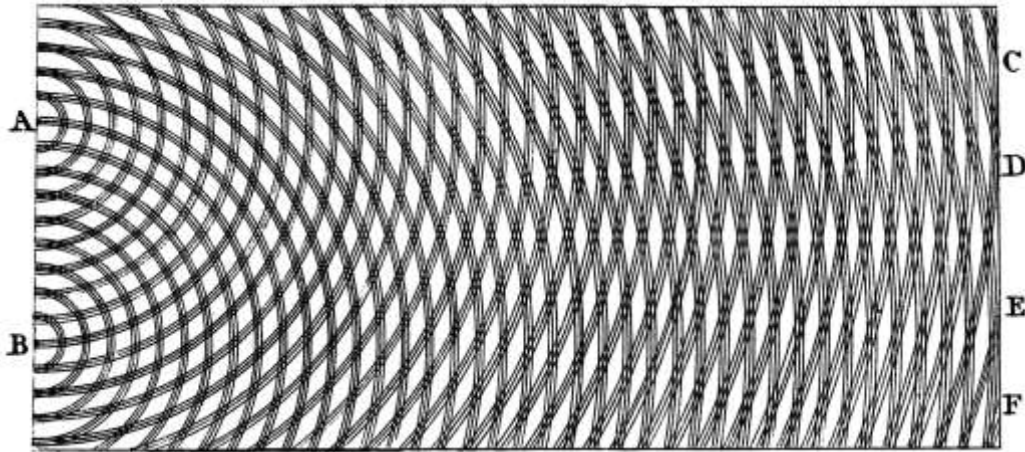
Compton effect



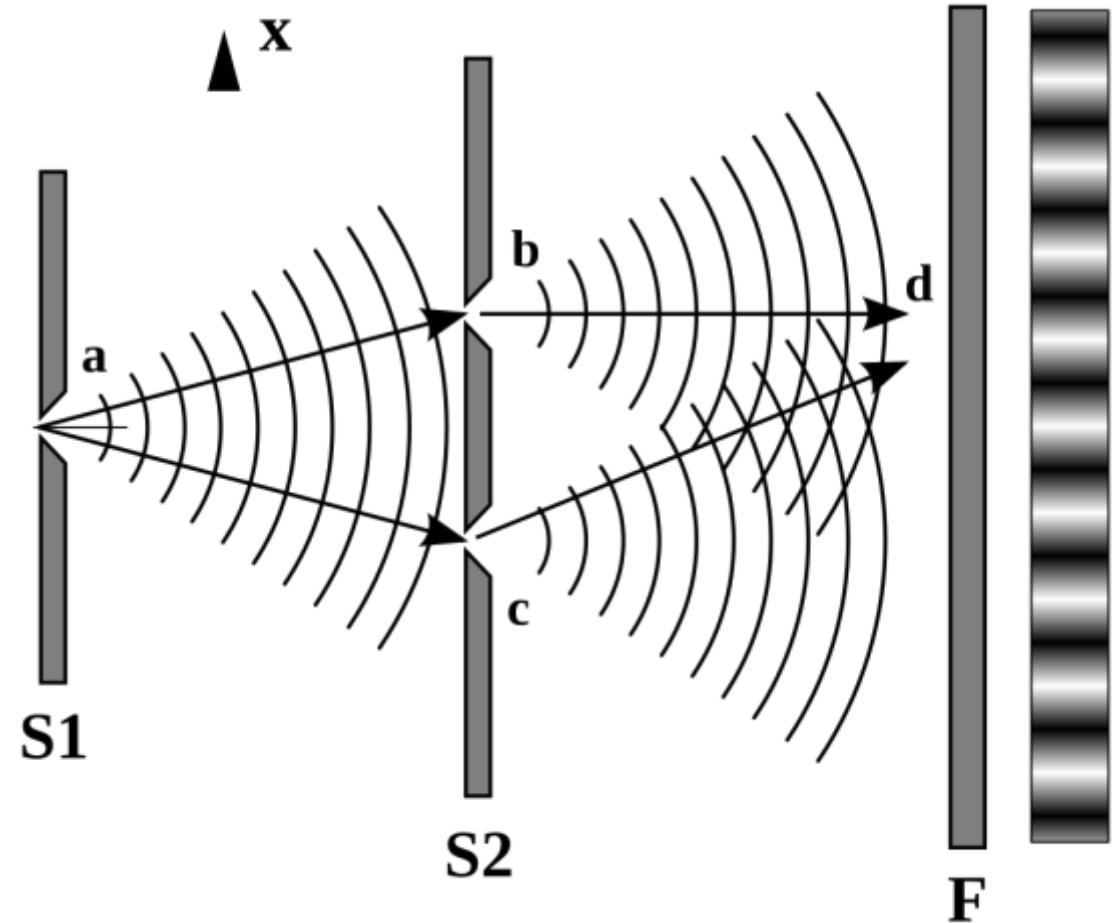
https://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering

光は波だ！

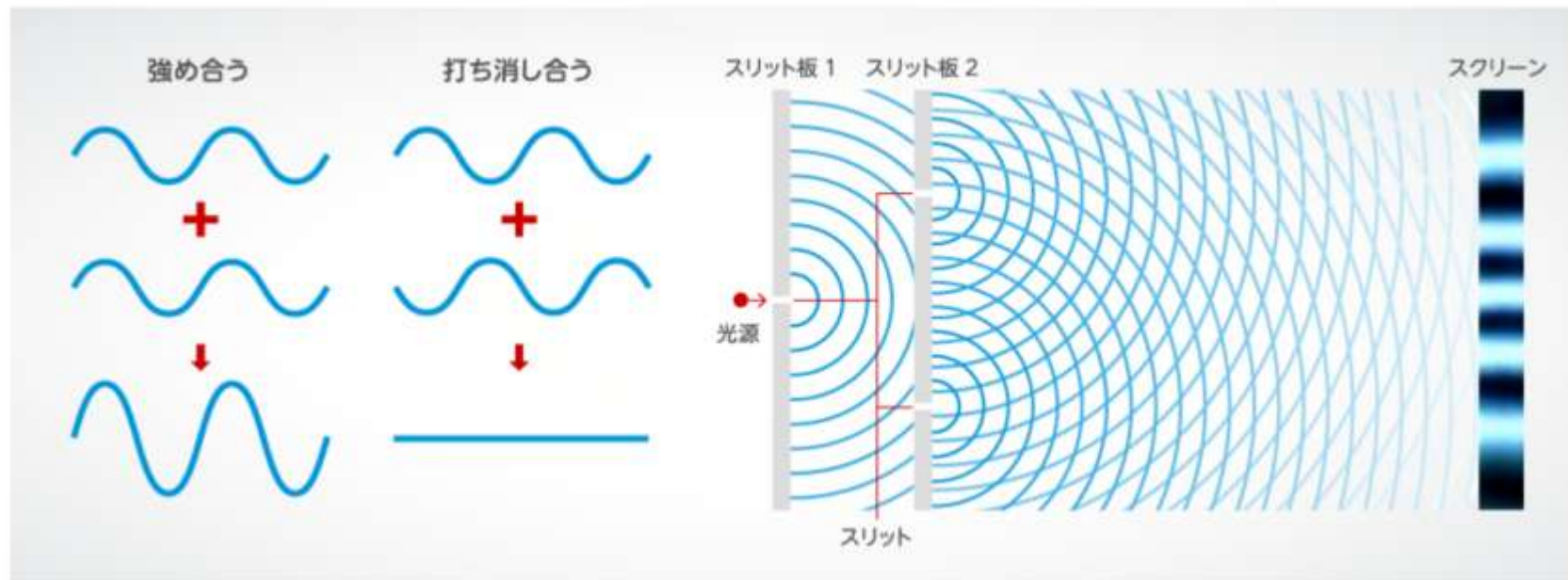
Young's double-slit experiment



Young's drawing of diffraction

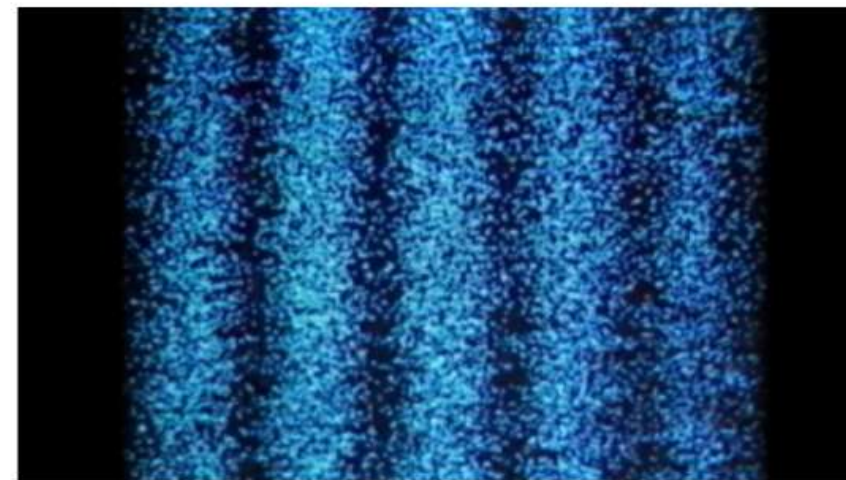
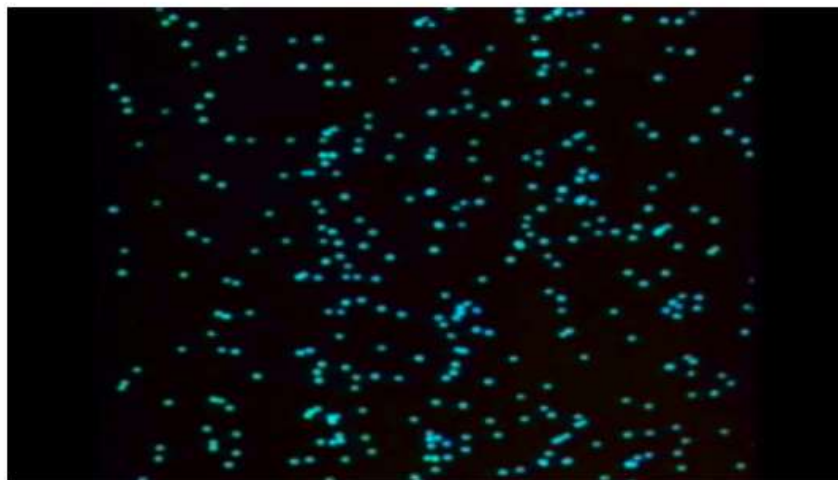


光の 粒子・波動 二重性



ヤングの干渉縞

光は粒のようでもあり波のようでもある？



光は粒か？波か？ 平面波か？球面波か？

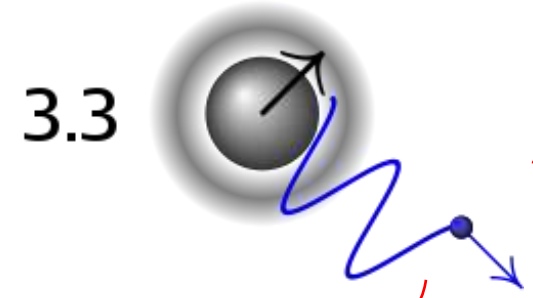
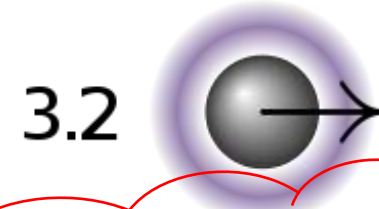
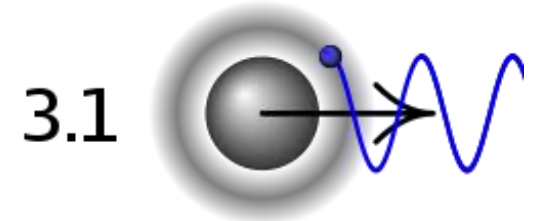
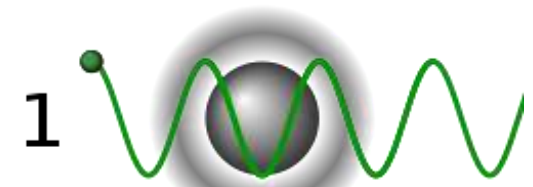
放射の反作用？

If, through an emission process, the molecule suffers a radiant loss of energy of magnitude $h\nu$ without the action of an outside agency, then this process, too, is a directed one. emission in spherical waves does not occur. According to the present state of the theory, the molecule suffers a recoil of magnitude $h\nu/c$ in a particular direction only because of the chance emission in that direction. A. Einstein, *Physikalische Zeitschrift* 18, 121 1917

“分子が、外部からの刺激なしに、大きさ $h\nu$ のエネルギーを輻射(自然輻射)の形で放出して、エネルギーを失ったとする。この過程もまた方向性をもっている。球面波の形の放出輻射は存在しない。自然輻射の素過程の間に、分子は、大きさ $h\nu/c$ の反動を受けるが、その反動の方向は、現状の理論ではただ偶然によって支配されているとする。”

霜田光一氏による訳；レーザー研究25, 7, 531 (1997)

Doppler Laser Cooling



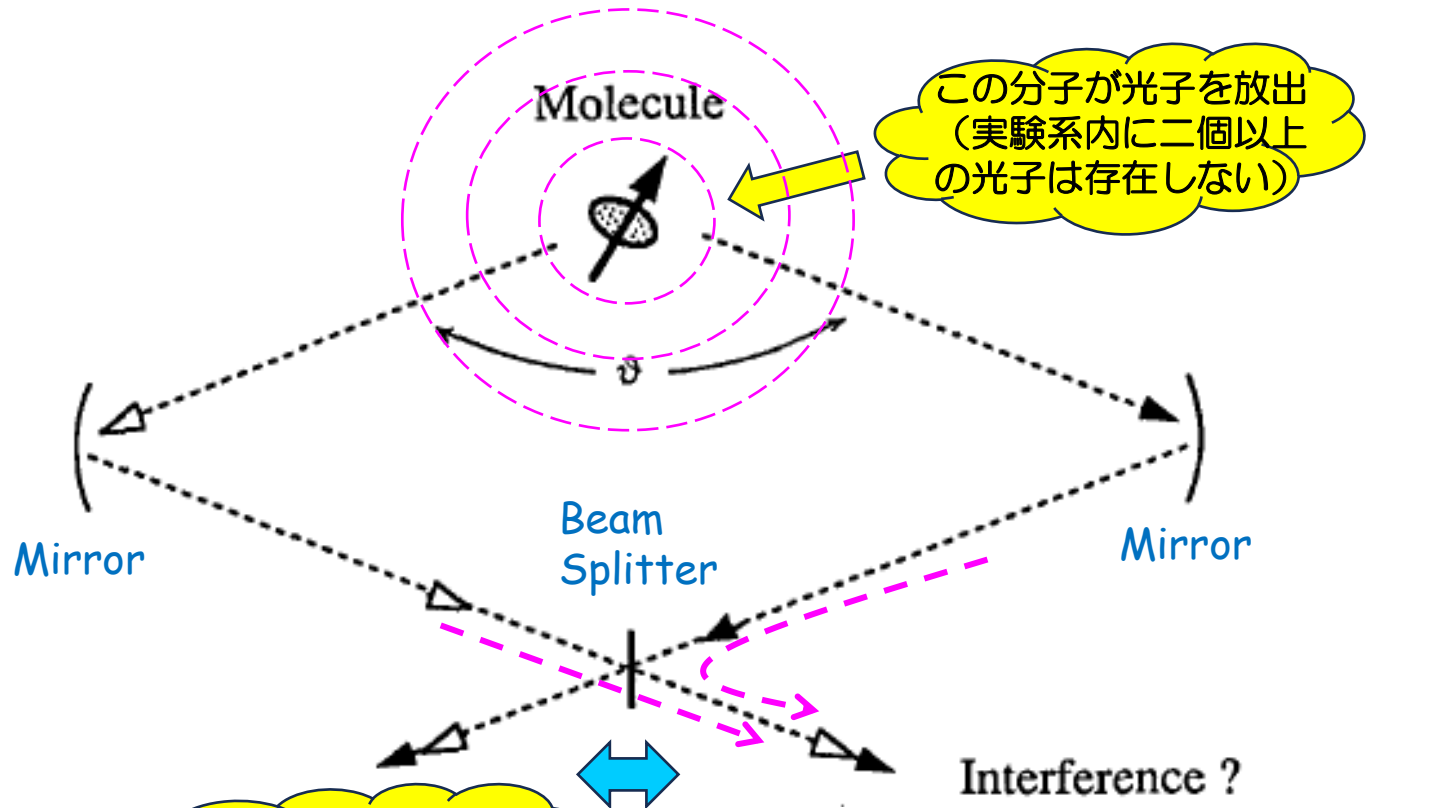
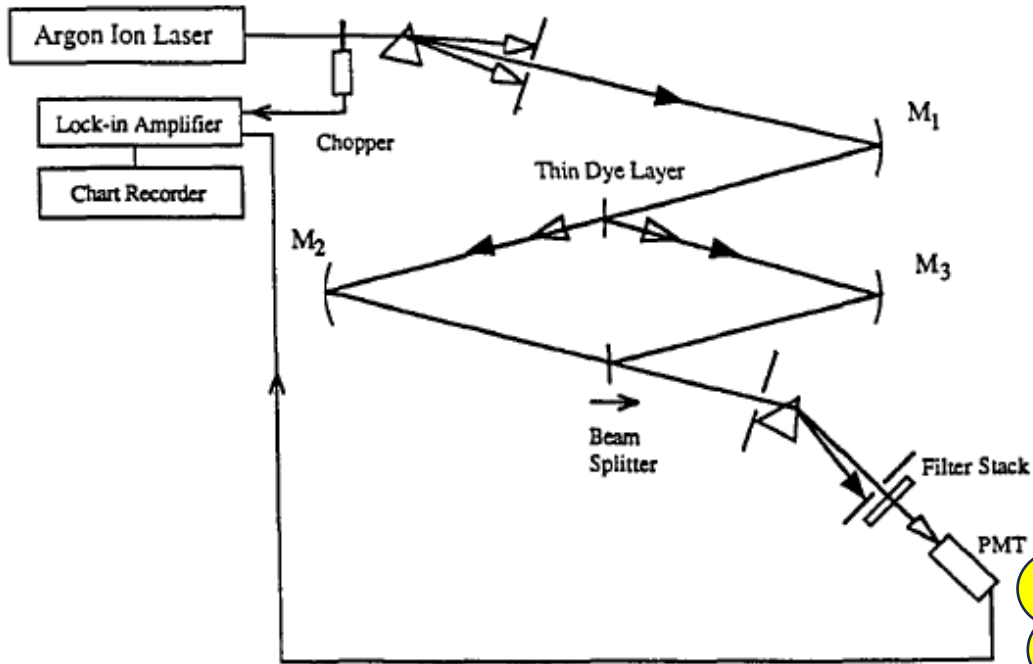
原子からの
自発放射は粒
(平面波)！

原子は反跳
を受ける！

https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_cooling

光は粒か？波か？ 平面波か？球面波か？

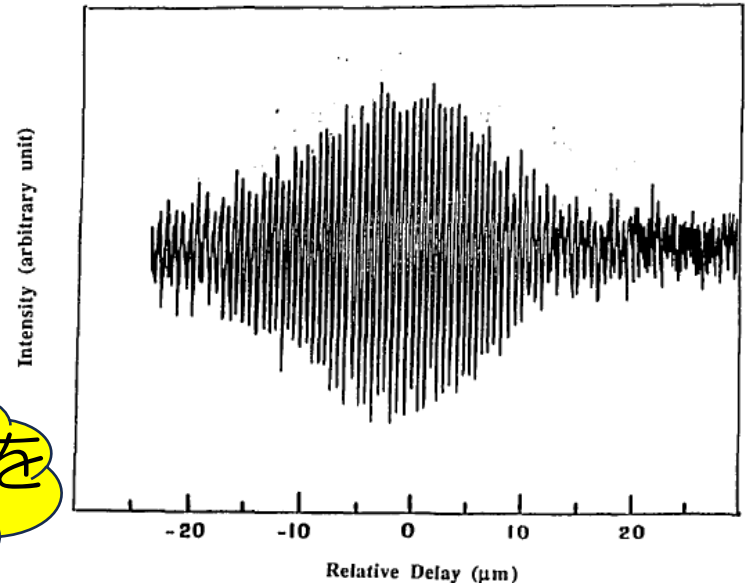
放射の反作用？



BSを左右に動かすと
干渉による強度変調が
見える！

原子からの
自発放射は
球面波！

原子は反跳を
受けない！

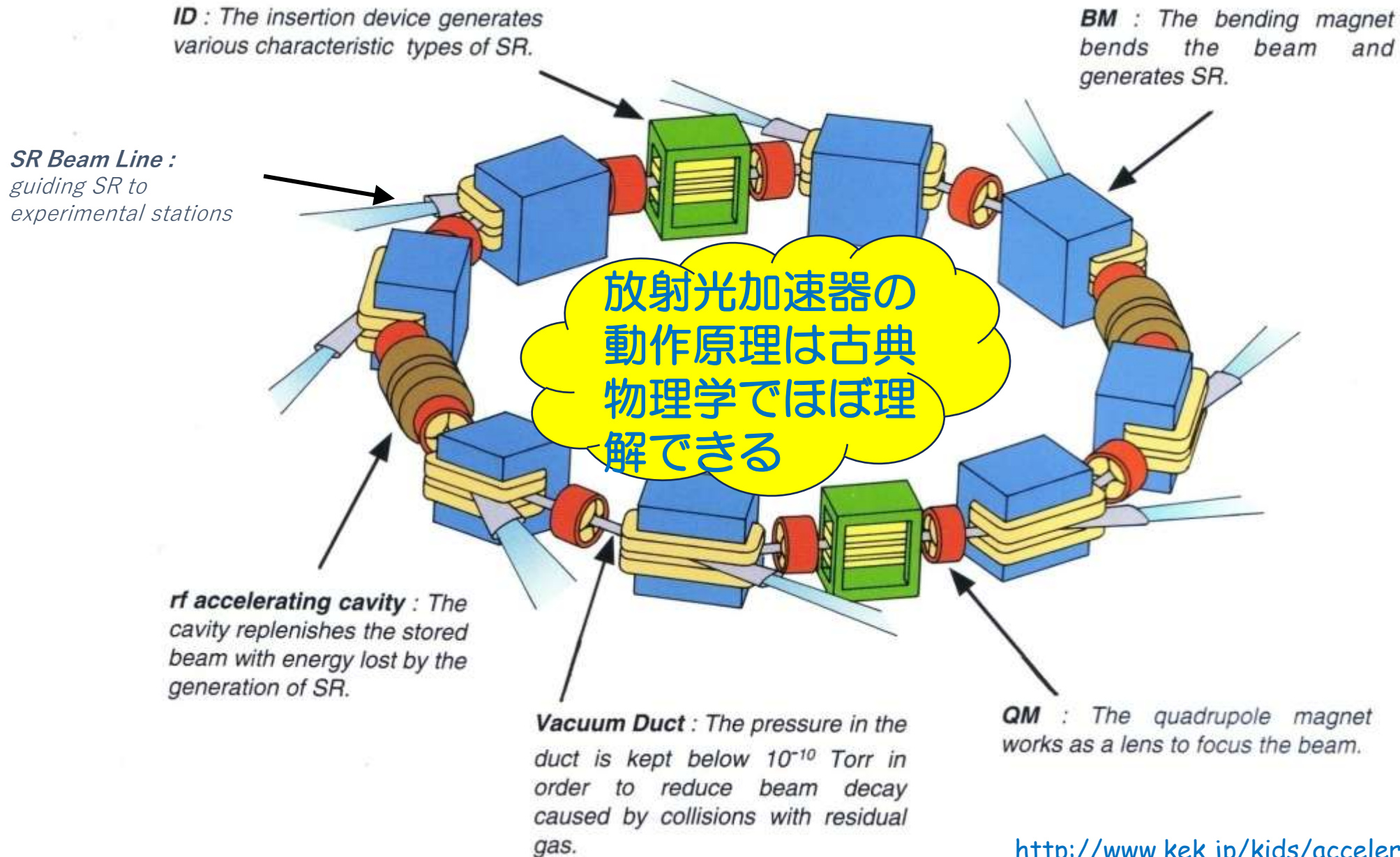


放射光は粒？

放射光は粒か波か？

加藤政博（広島大／分子研）

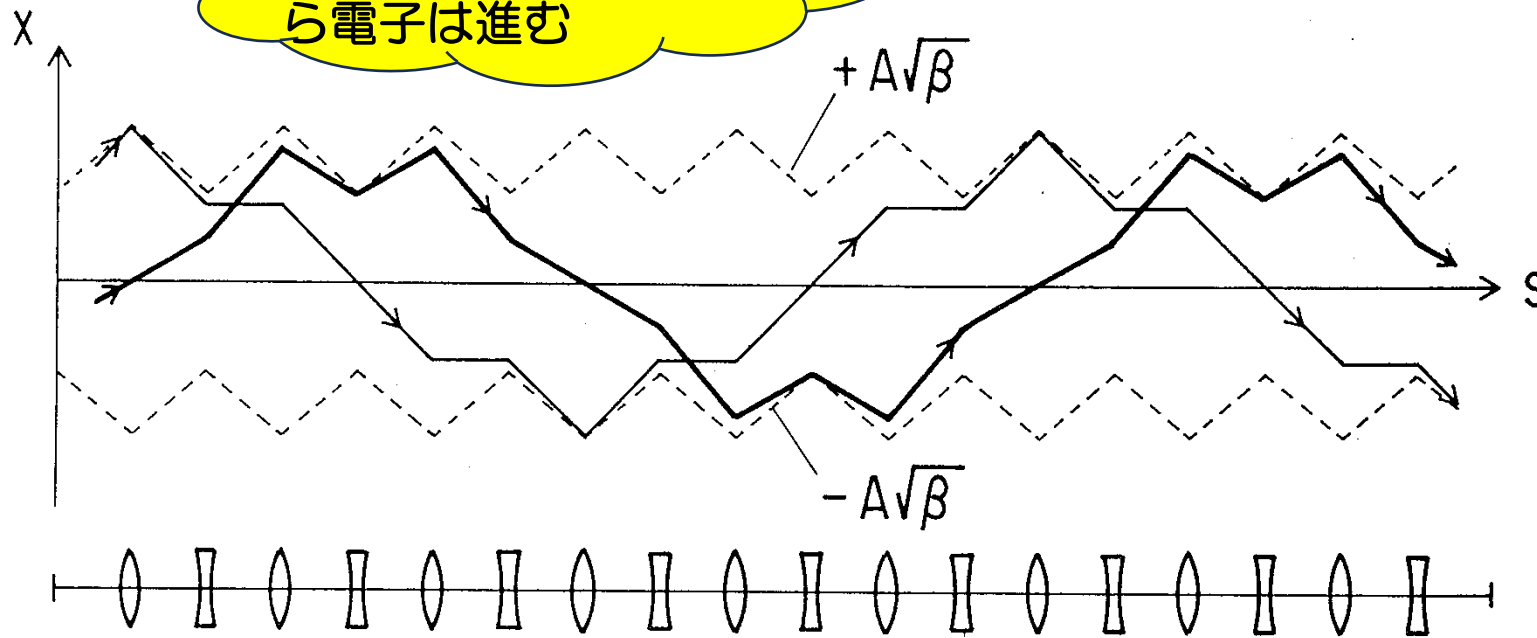
Configuration of Synchrotron Light Source



Transverse Motion

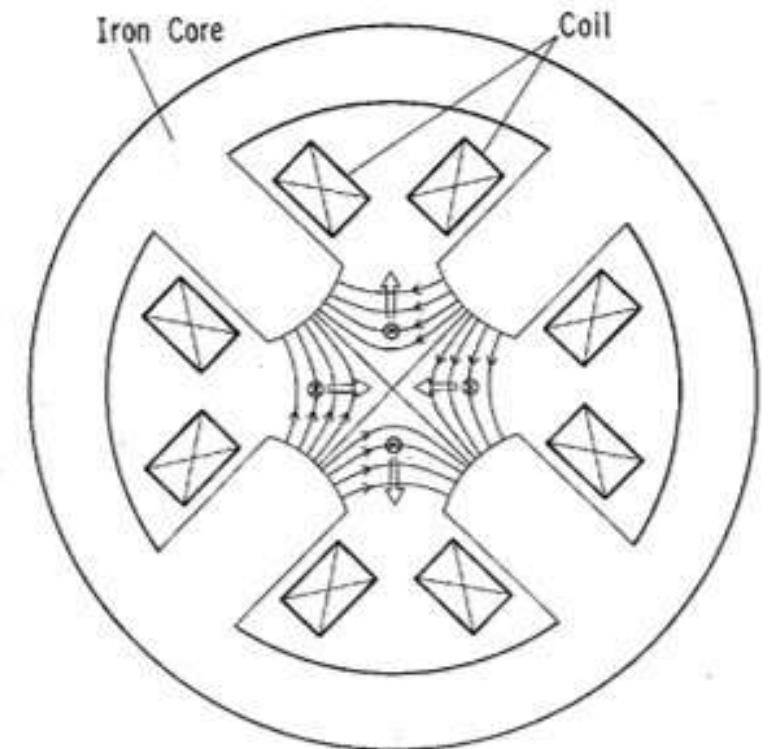
- Strong focusing and Betatron oscillation -

収束力・発散力を交互に
受けゆっくり振動しながら
電子は進む



Betatron Oscillation

四極磁石の収束発
散力で電子を軌道
の近くに束縛する

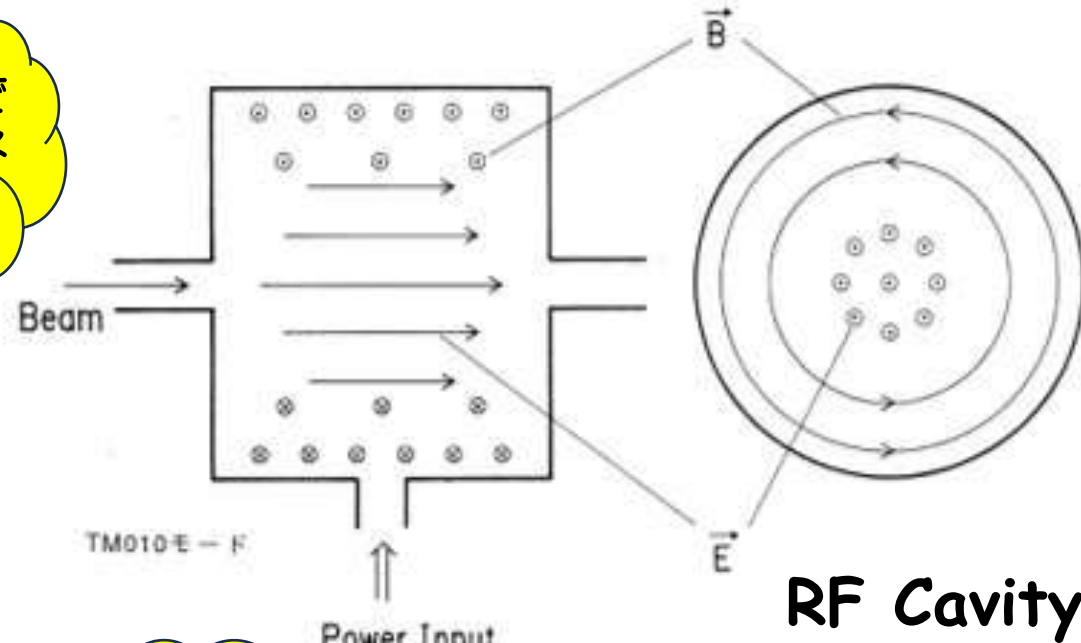


Quadrupole Magnet

Longitudinal Motion

- Phase stability and
Synchrotron oscillation -

交流電場で
加速（エネ
ルギー補
給）する



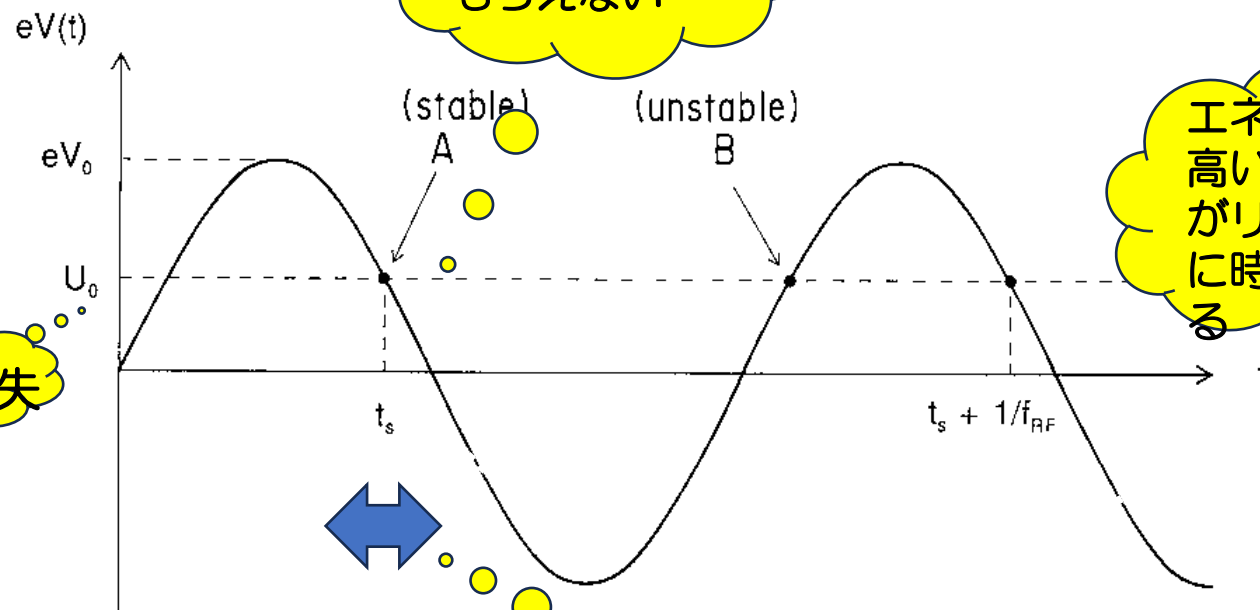
遅く到着するとあ
まりエネルギーを
もらえない

エネルギーの
高い電子の方
がリング1周
に時間がかか
る

$$\Delta\gamma/\gamma > 0$$

$$\Delta\gamma/\gamma = 0$$

$$\Delta\gamma/\gamma < 0$$



放射損失

電子のエネルギーは上がったたり下がった
り、周回時間は早くなったり遅くなつた
り振動しながらある範囲に止まる

Betatron Oscillation and Synchrotron Oscillation

Electron motion in a bunch

電子ビームは塊
(バンチ) を形成

バンチの中で個々の電子は
前後上下左右に振動

様々な振幅や位相で
(互いに独立に) 振動
する電子の集まり

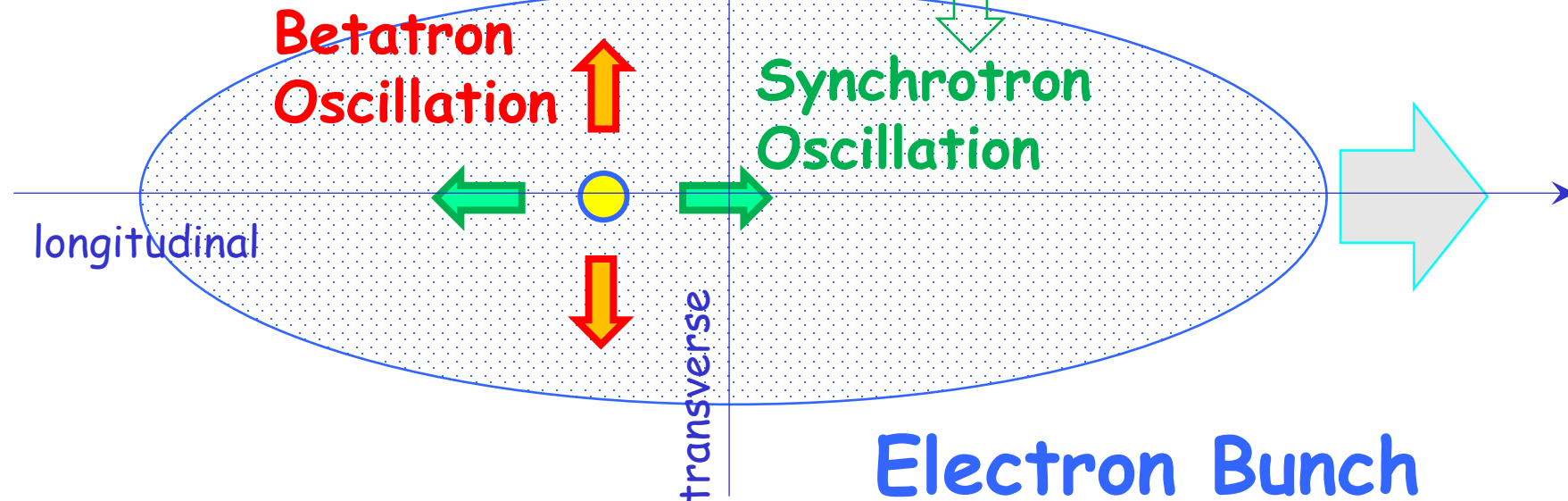
電子バンチ

Quadrupole Magnets

Strong Focusing
(Transverse Focusing)

RF Accelerating Cavity

Phase Stability
(Longitudinal Focusing)

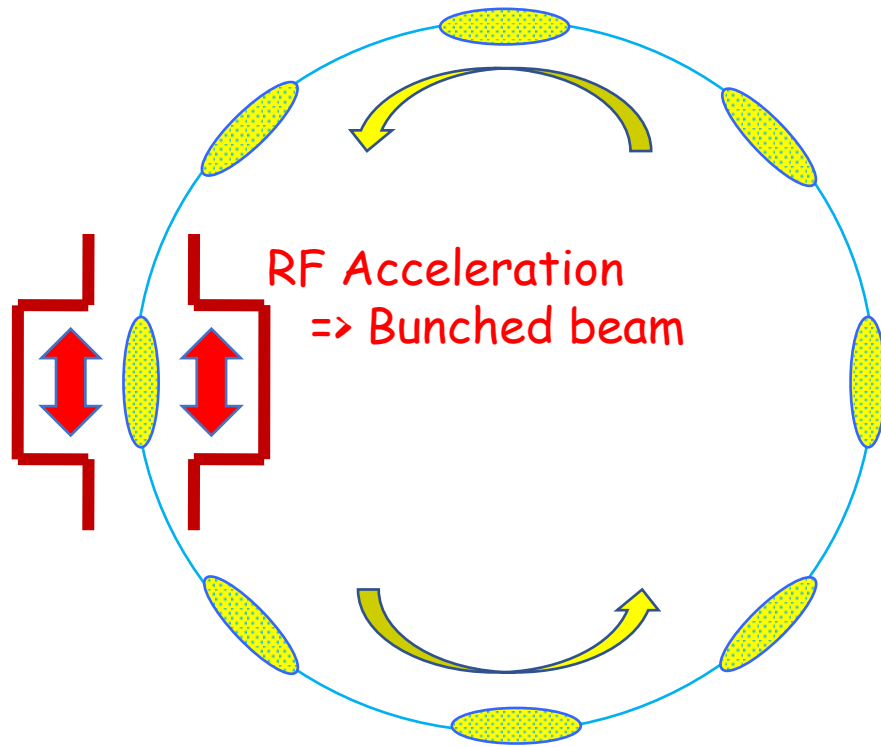


Bunched Electron Beam in Synchrotron

Longitudinal

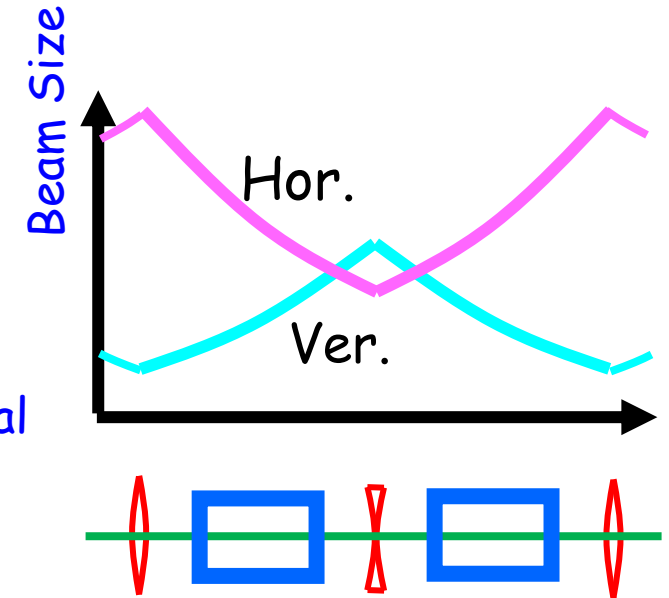
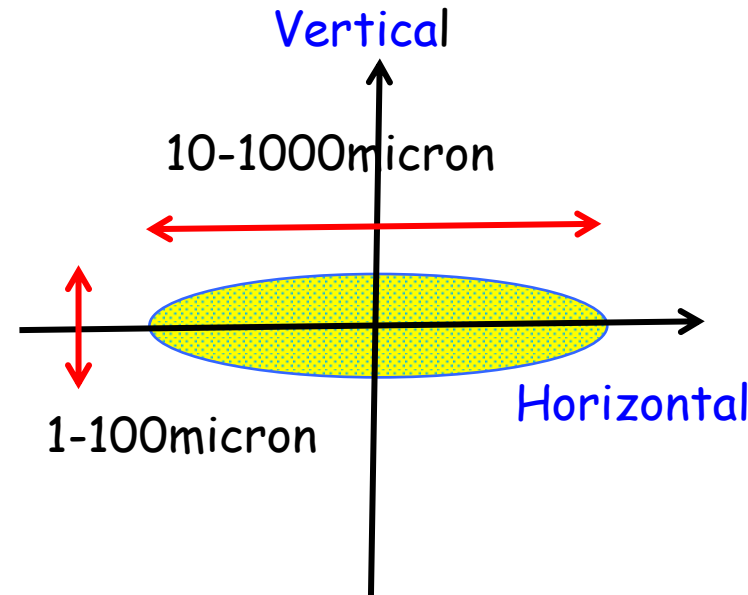
Transverse

バンチの断面の大きさ



10~100psec
=3~30mm

バンチの長さ



収束磁石の作用で断面の大きさ
(ビームサイズ)は場所によっ
て変わる

Origin of Electron Bunch Size?

バンチの大きさ
の起源は？

- 初期値を引きずってる？ ×
- 電子同士の静電的反発？ △
- 放射光を粒で出すから？ ○

電子シンクロトロン
の場合です

The Feynman Lectures on Physics, Volume II

MAINLY ELECTROMAGNETISM AND MATTER

Feynman • Leighton • Sands

Center of the universe of electromagnetisms

So here is the center of the universe of electromagnetism—the complete theory of electricity and magnetism, and of light; a complete description of the fields produced by any moving charges; and more. It is all here. Here is the structure built by Maxwell, complete in all its power and beauty. It is probably one of the greatest accomplishments of physics. To remind you of its importance, we will put it all together in a nice frame.

放射光も古典物理学
でほぼ理解できる

https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_21.html

Maxwell's equations:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Their solutions:

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\phi(1, t) = \int \frac{\rho(2, t - r_{12}/c)}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} dV_2$$

$$\mathbf{A}(1, t) = \int \frac{\mathbf{j}(2, t - r_{12}/c)}{4\pi\epsilon_0 c^2 r_{12}} dV_2$$

Classical Picture of Synchrotron Radiation

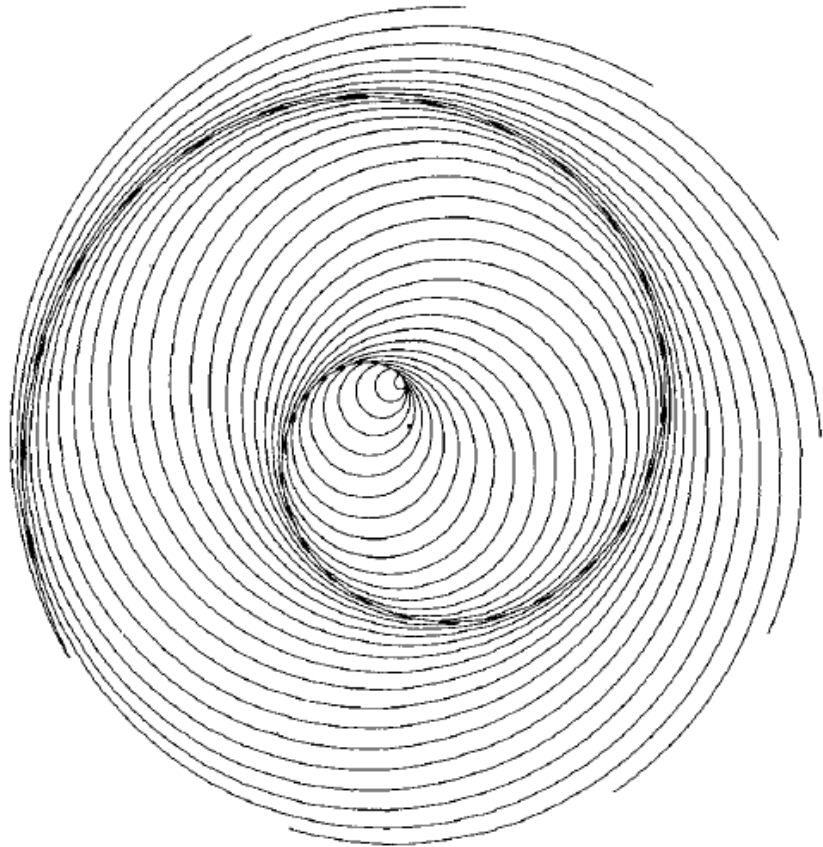
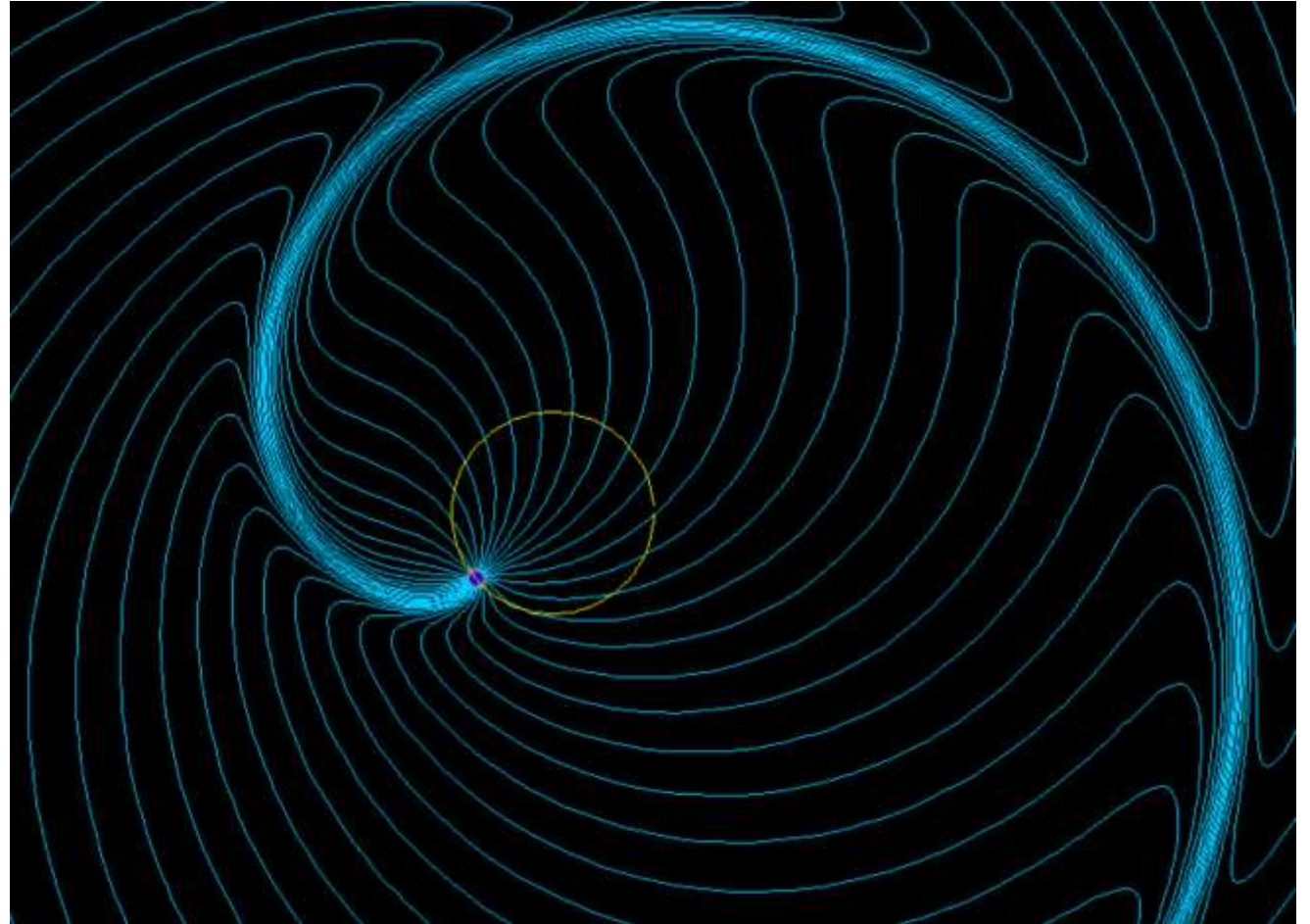


FIG. 6. Electric field lines for a charge moving at tangential speed $\beta=0.95$ on a circular path centered on the $\times$.

R. Y. Tsien, : Am. J. Phys. 40, 46 (1972)



by Radiation2D

Synchrotron Radiation Power

Larmor's Formula for Circular Orbit

$$P = \frac{2}{3} cr_e m_e c^2 \frac{\beta^4}{\rho^2} \gamma^4$$

古典論的には・・・
同じエネルギーの電子は
同じ割合でエネルギーを
失う

Radiation loss per revolution

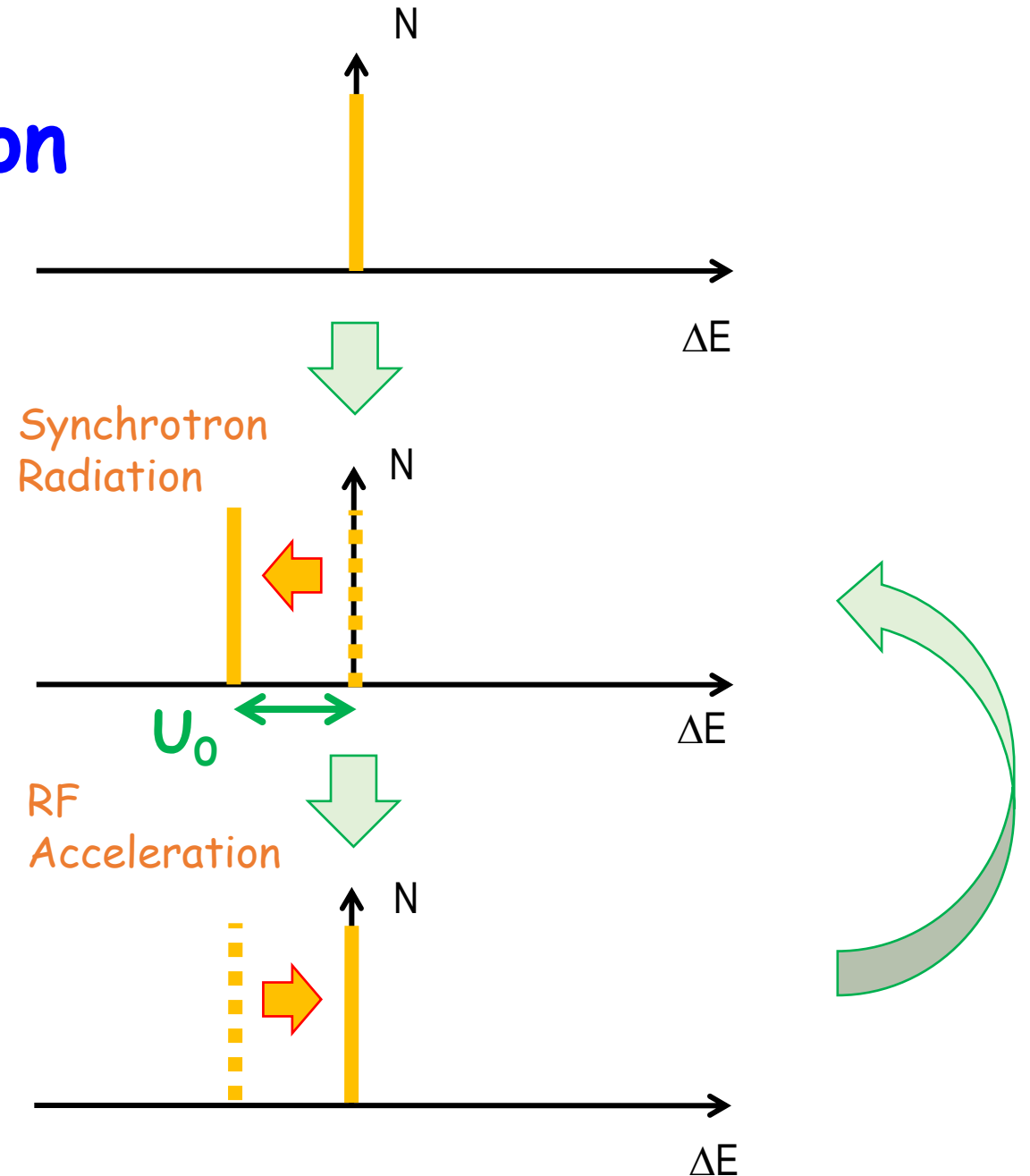
$$U_0 = \frac{4\pi}{3} m_e c^2 \frac{r_e}{\rho} \gamma^4 = 88.5[\text{keV}] \frac{E_e^4 [\text{GeV}]}{\rho [\text{m}]}$$

In case of 2.5GeV KEK Photon Factory; $E_e=2.5\text{GeV}$, $\rho=8.7\text{m}$

Radiation Loss; $U_0 = 400[\text{keV/turn}] \Rightarrow U_0/E_e=400[\text{keV}]/2.5[\text{GeV}]=1.6\text{E-}4=0.016[\%]$

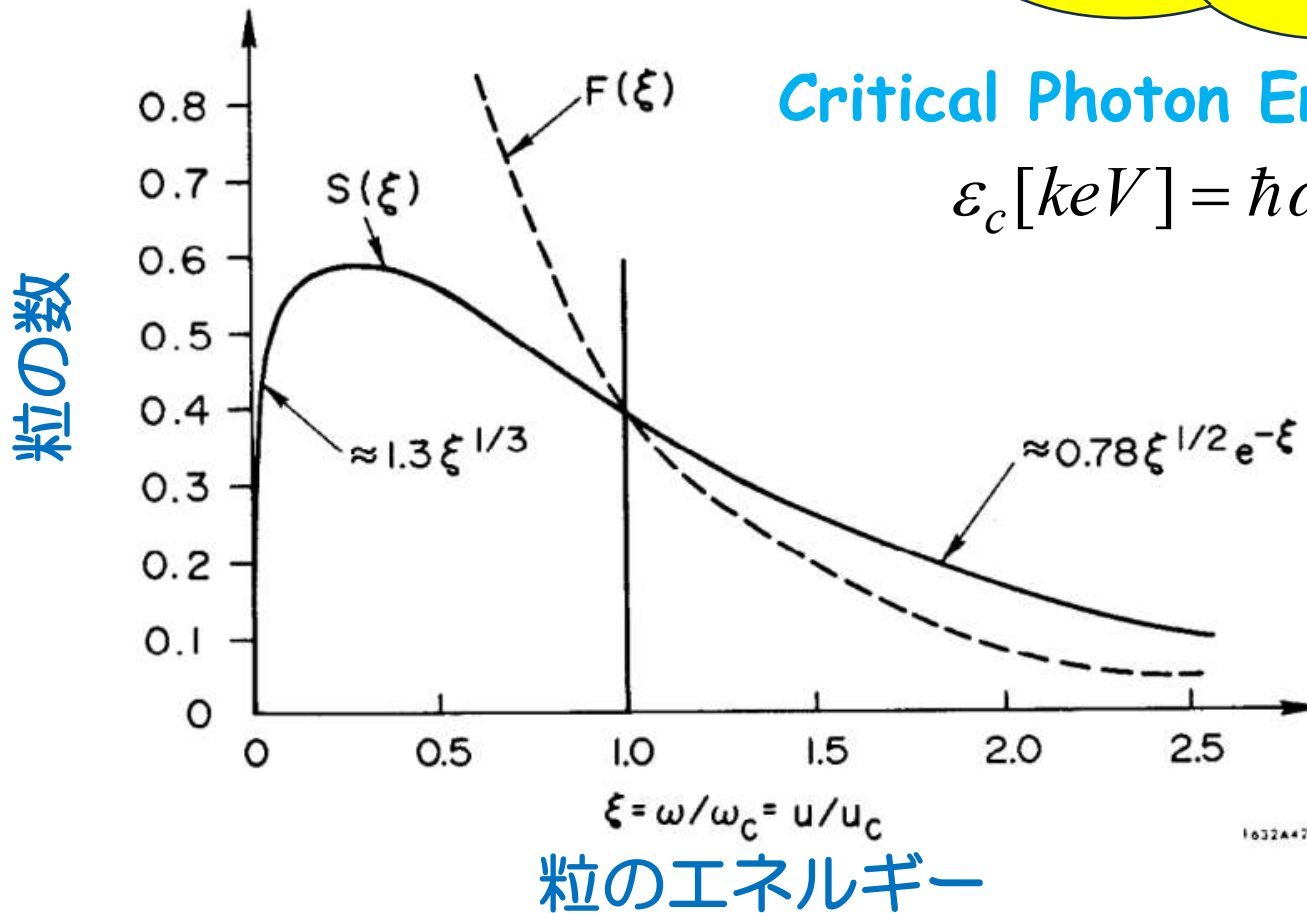
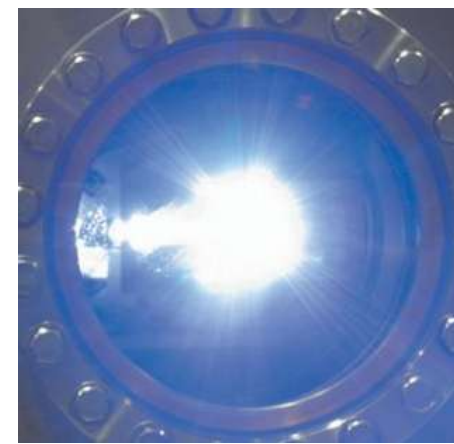
Electron energy change due to synchrotron radiation - classical picture -

古典論的には・・・
全ての電子は同じ量の
エネルギーを放射で失
い高周波空洞で補給さ
れる



Photon Energy of Synchrotron Radiation

放射光が粒だとすると一粒当たりのエネルギー（光子エネルギー）は？



Critical Photon Energy

$$\varepsilon_c [keV] = \hbar \omega_c = \hbar \frac{3\gamma^3 c}{2\rho} = 0.665 E_e^2 [GeV] B [T]$$

Average Photon Energy

$$\langle \hbar \omega \rangle = \frac{8}{15\sqrt{3}} \hbar \omega_c \sim \hbar \omega_c$$

FIG. 42--Normalized power spectrum S and photon number spectrum F of synchrotron radiation.

M. Sands, SLAC-121 UC-28 (ACC) (1970)

放射光の光子エネルギーは非常に広帯域に広がっているが、その平均エネルギーは臨界エネルギー程度

How many photons does an electron emit during one revolution?

1個の電子がリングを1周する間に何個くらいの光子を出すか？

In case of 2.5GeV KEK Photon Factory;

Typical Photon Energy; $h\nu \sim 4 \text{ keV}$

Radiation Loss; $U_0 = 400 \text{ keV/turn}$

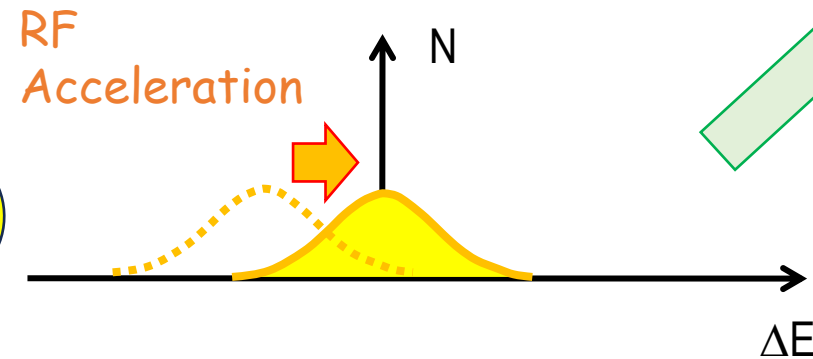
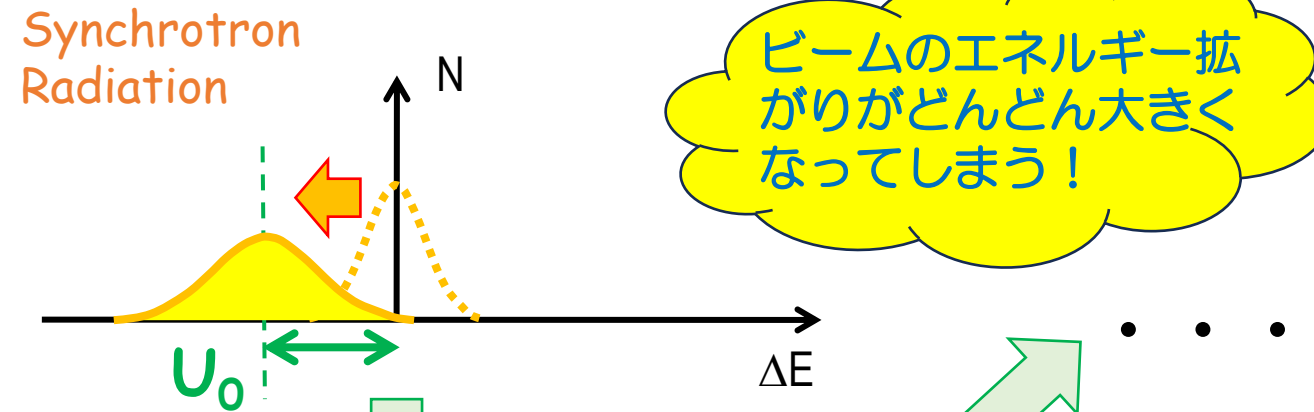
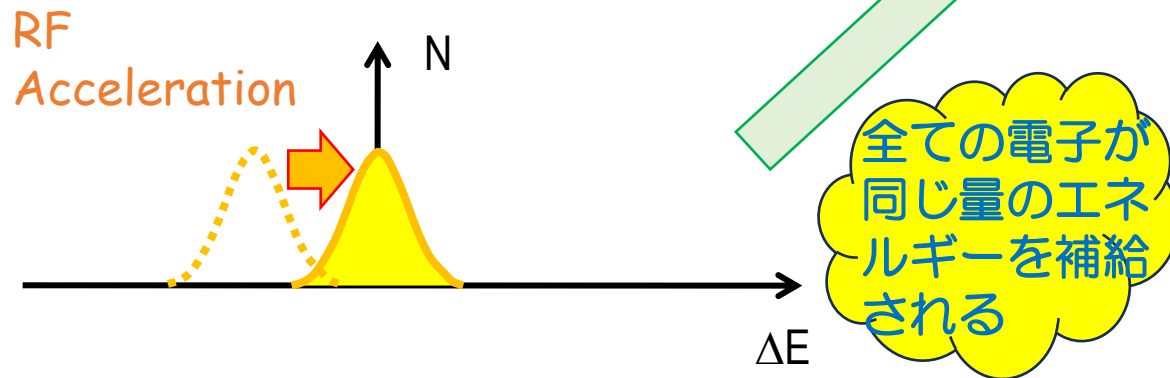
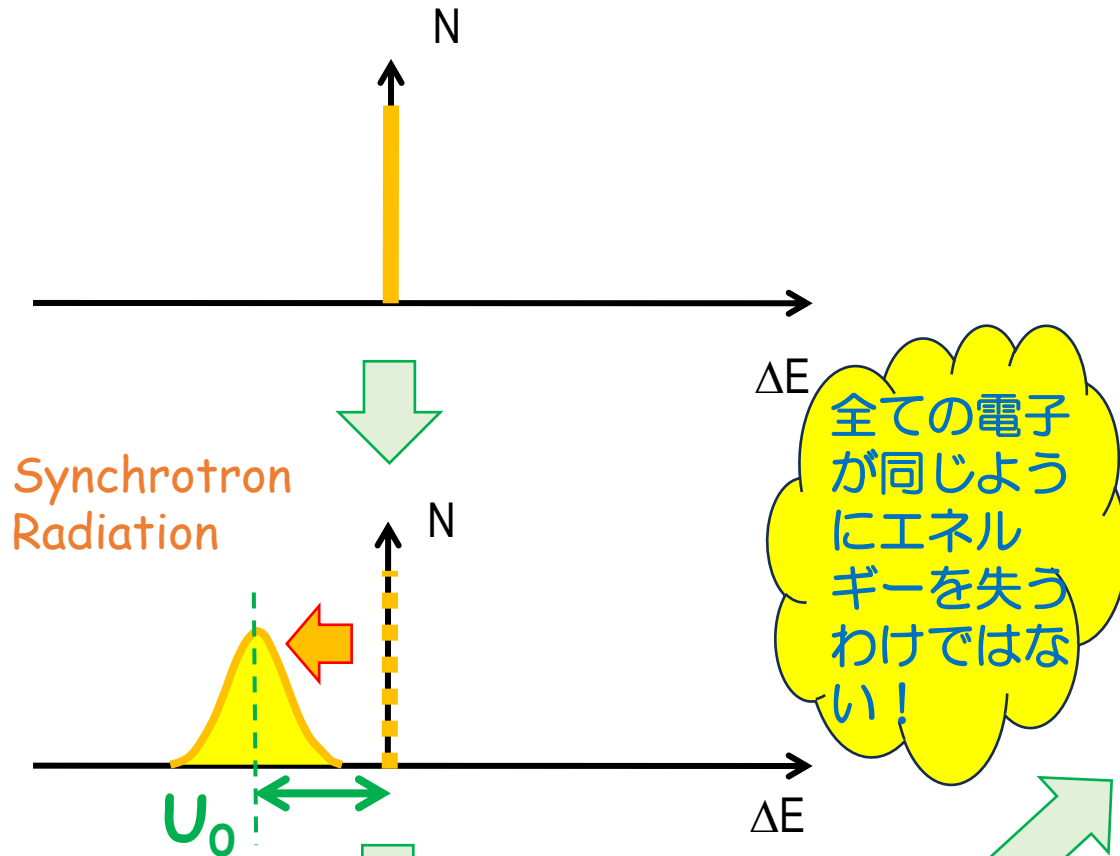
意外と少ない！

Number of Photons; $N = U_0 / h\nu \sim 100 \text{ /turn} \Rightarrow \sqrt{N} \sim 10$

PFリングには28台の偏向磁石
1台の偏向磁石中で出す光子は
3～4粒程度

光子の放出は確率的
 $\Rightarrow \sqrt{N}$ 程度のばらつき

Electron energy change due to synchrotron radiation - quantum picture -



Suppression Mechanism of Energy Spread - Radiation Damping -

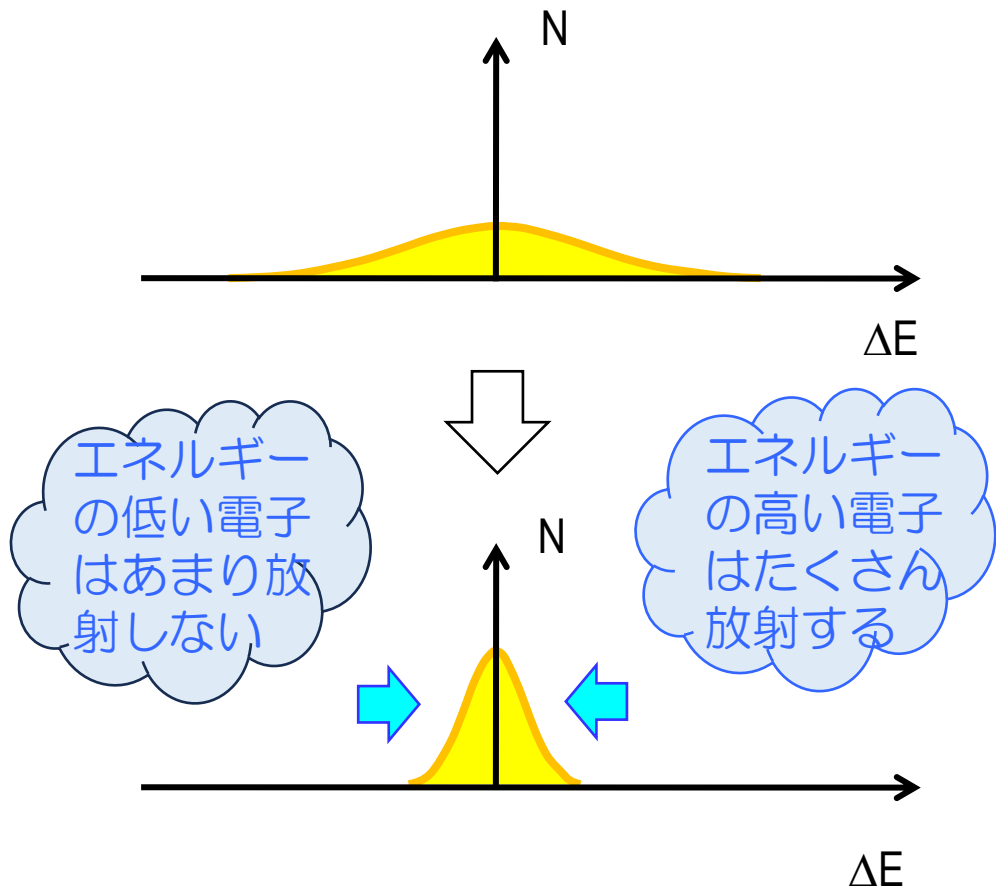
電子のエネルギーによる放射損失の違いがエネルギー拡がりの増大を抑え、平衡状態に落ち着く

Larmor's Formula for Circular Orbit

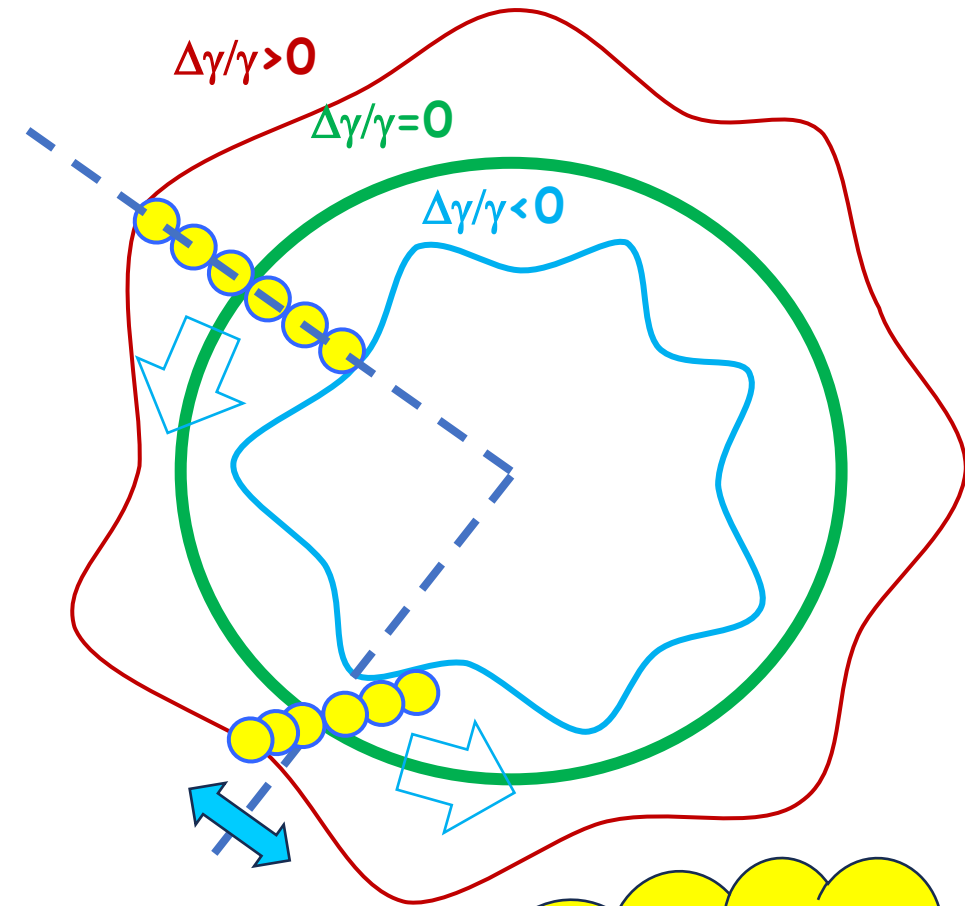
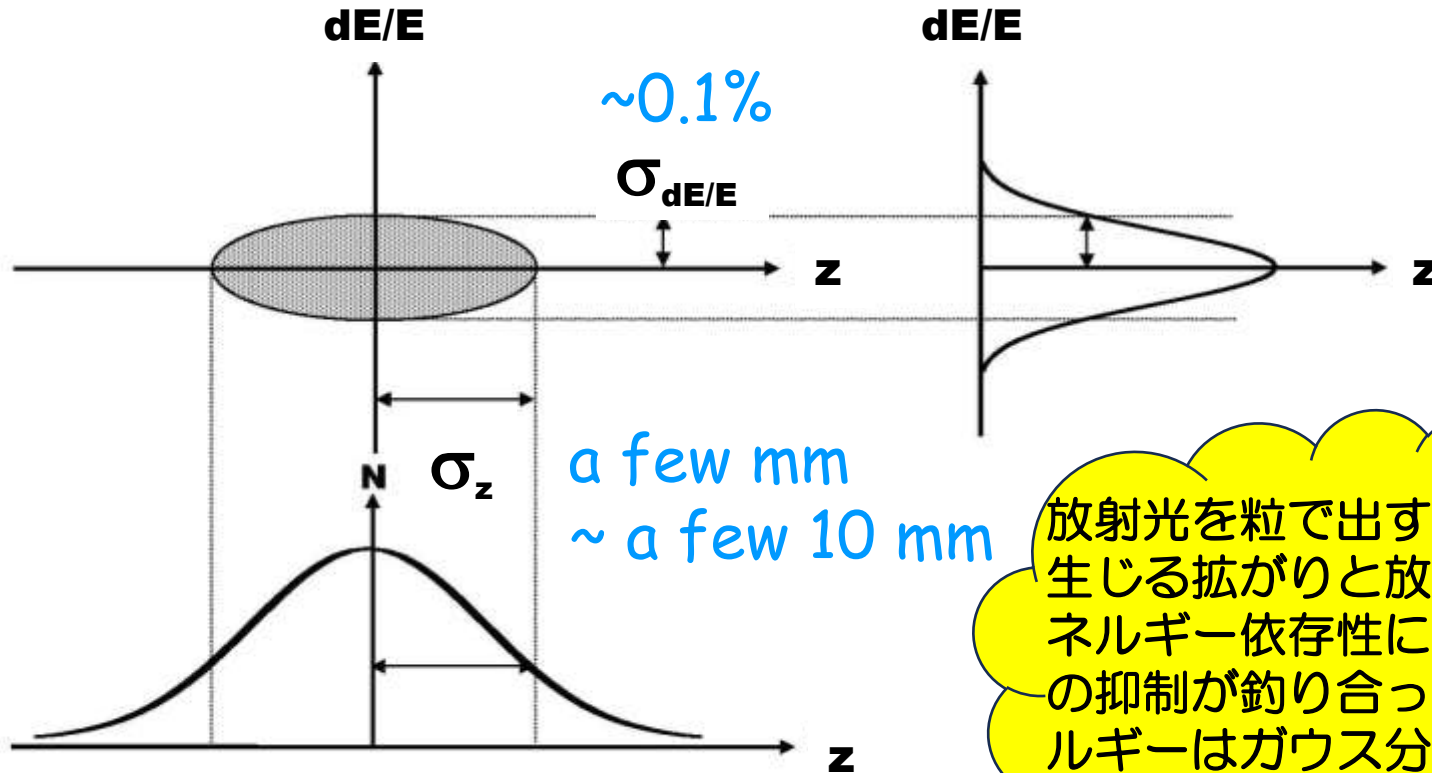
$$P = \frac{2}{3} cr_e m_e c^2 \frac{\beta^4}{\rho^2} \gamma^4 \propto E_e^2 B^2 \left(\rho \propto \frac{E_e}{B} \right)$$

A higher energy electron radiates more.

Suppression of Energy Spread.



Longitudinal Profile of Electron Beam in Phase Space



放射光を粒で出すことで生じる拡がりや放射のエネルギー依存性によるその抑制が釣り合ってエネルギーはガウス分布する

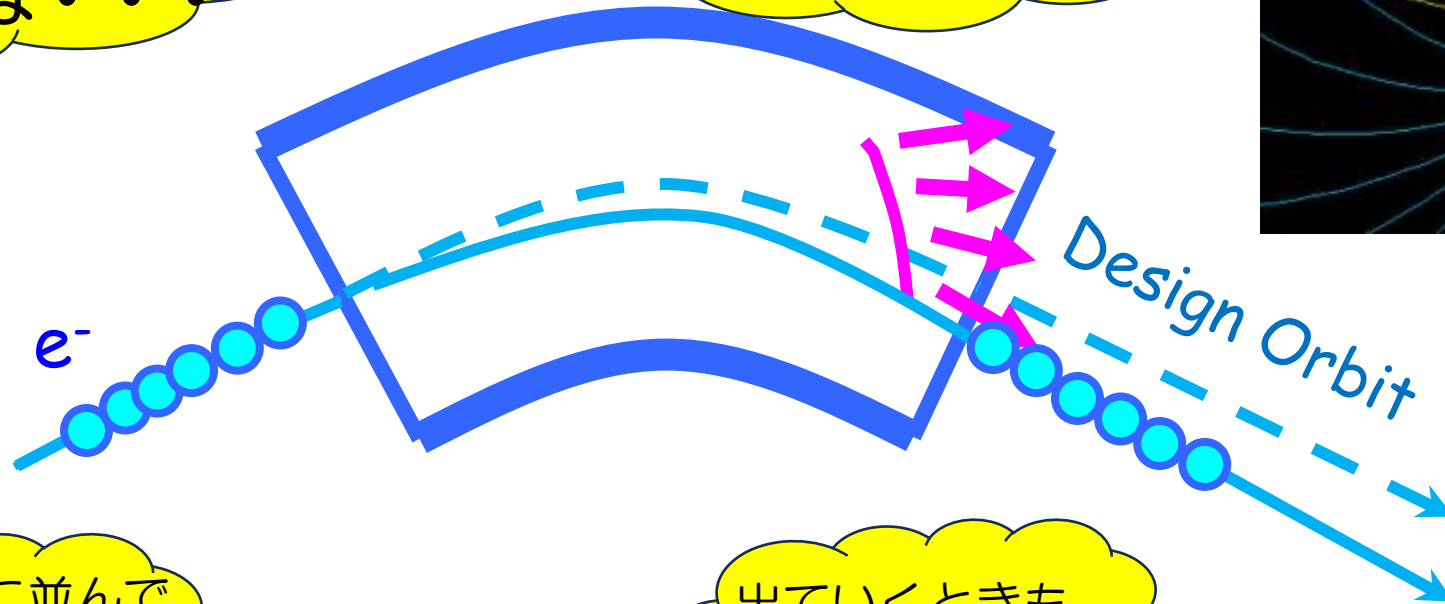
周回時間のエネルギー依存性によって縦方向の空間分布（バンチの長さ）が生じる

Electron orbit change due to synchrotron radiation

- classical picture -

もしも放射光が古典論的な波で放射されるならば・・・

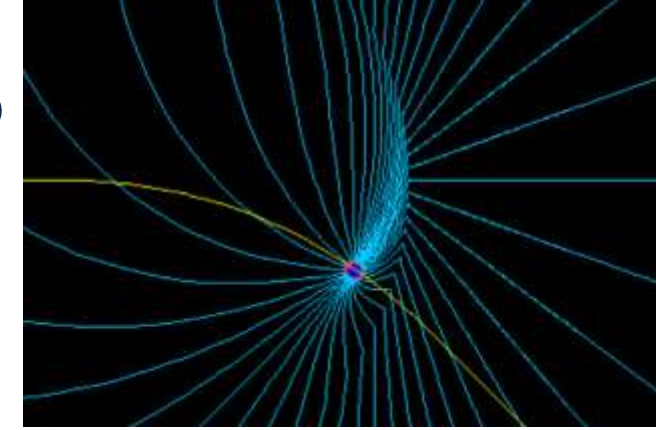
全ての電子は同じだけエネルギーを失う



電子が一行に並んで
偏向磁石に入ってきたとする

出ていくときも
一行で出ていく

一律で失ったエネルギーに
相当して軌道も一律に少し
ずれるはず・・・



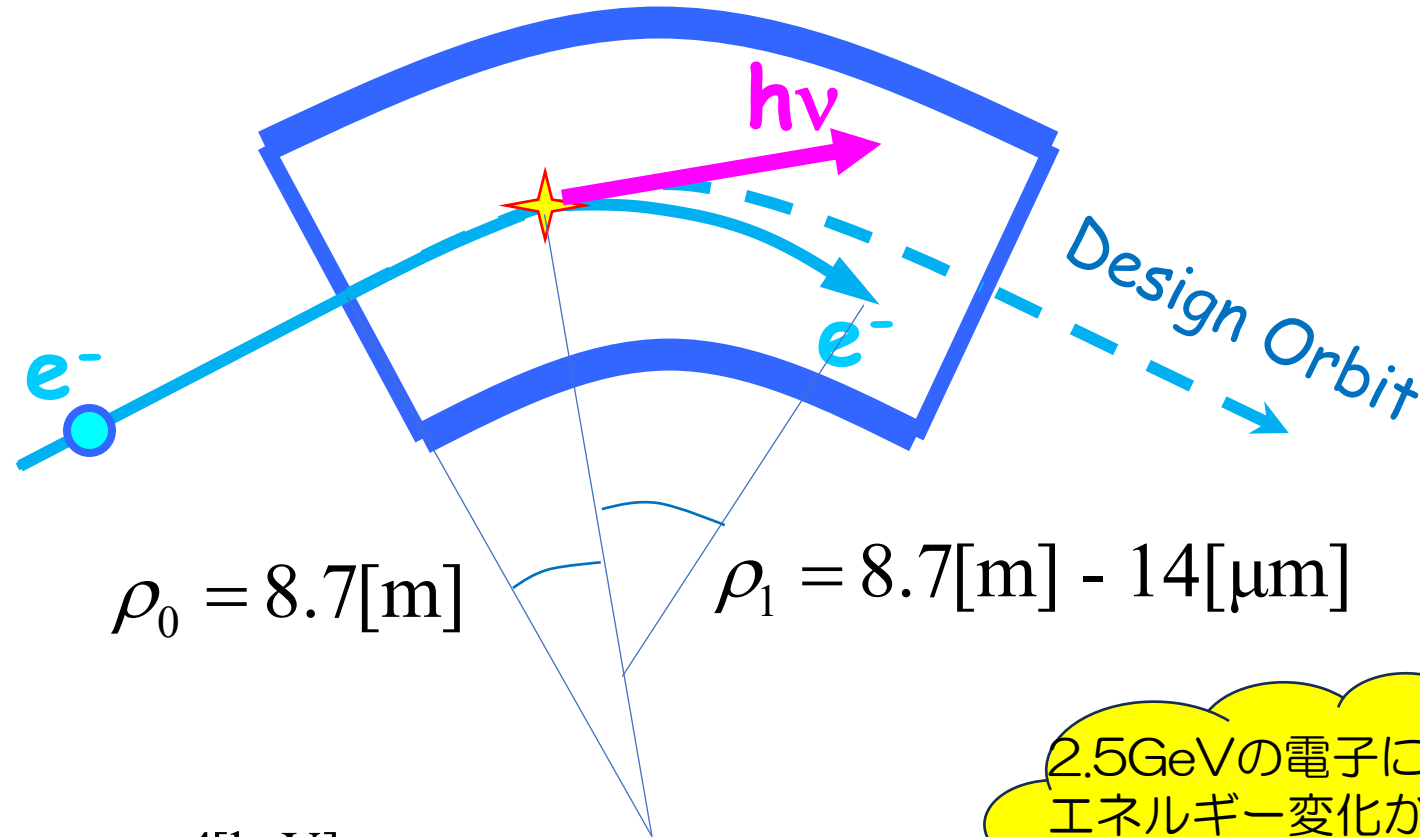
by Radiation2D

Electron orbit change due to synchrotron radiation

- quantum picture -

放射光が粒で
放射されるな
らば・・・

$$E_e = E_{e0} \Rightarrow E_{e0} - \hbar\omega$$



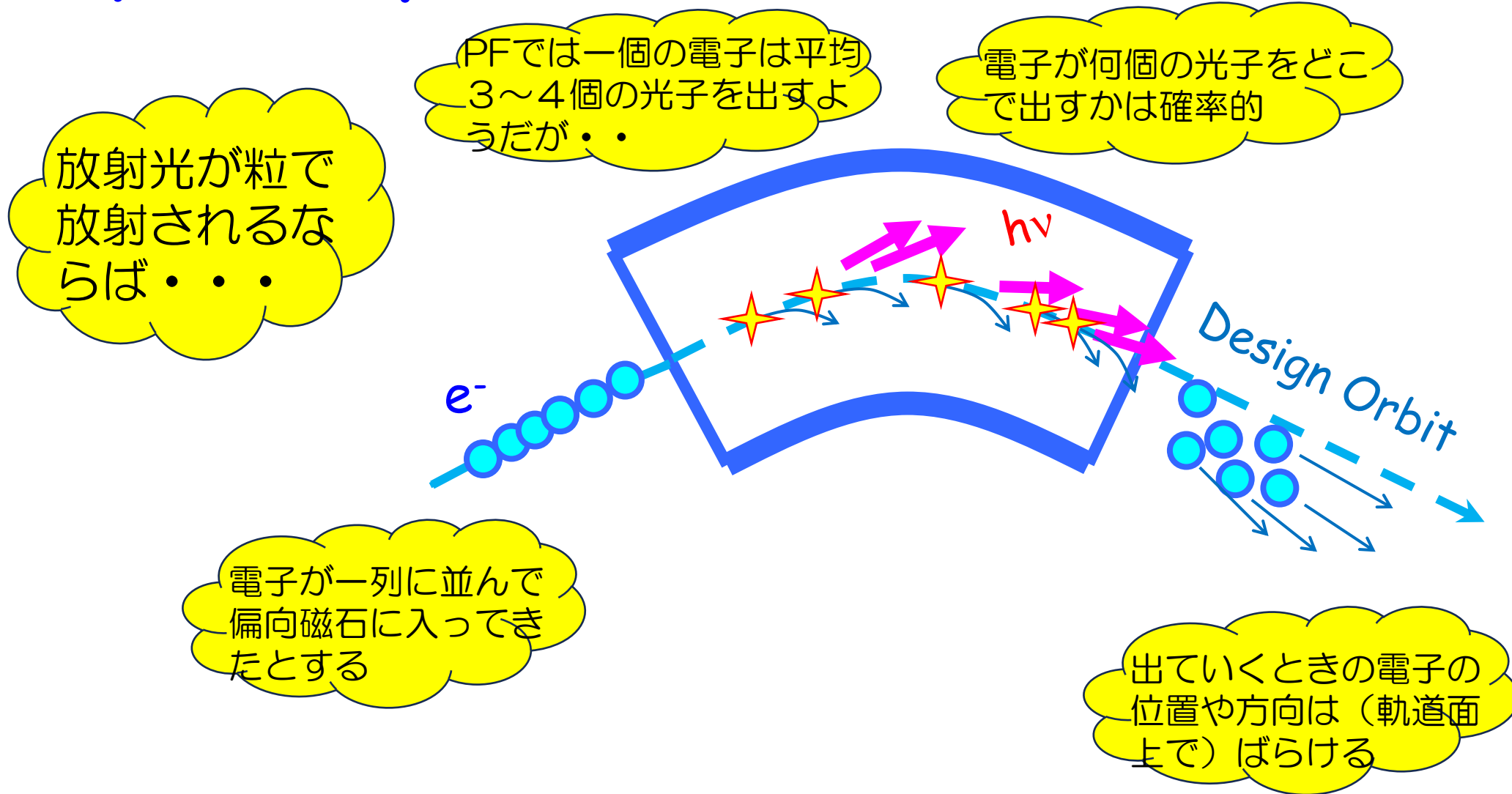
$$\rho_1 = \rho_0 \left(1 - \frac{\hbar\omega}{E_e} \right)$$

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_0 = -\rho_0 \frac{\hbar\omega}{E_e} = -8.7[m] \frac{4[\text{keV}]}{2.5[\text{GeV}]} = 14[\mu\text{m}]$$

2.5GeVの電子に4keVの
エネルギー変化が起きると
曲率半径が14ミクロン変
化する

Electron orbit change due to synchrotron radiation

- quantum picture -

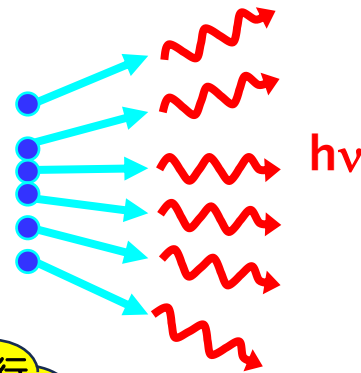
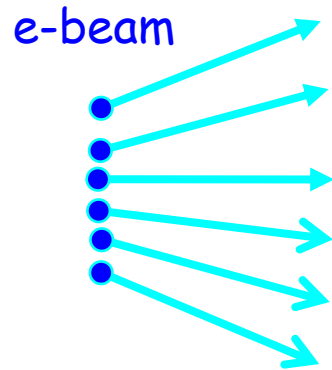
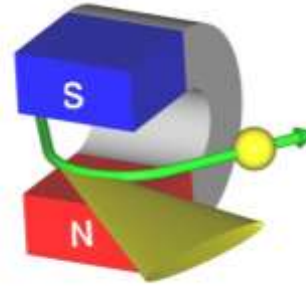


Supression of Orbit Divergence

- Radiation Damping -

加速は運動方向
を揃える働きを
する！

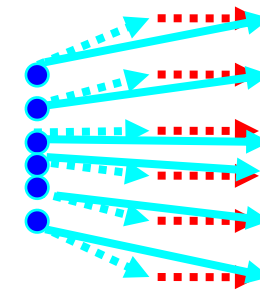
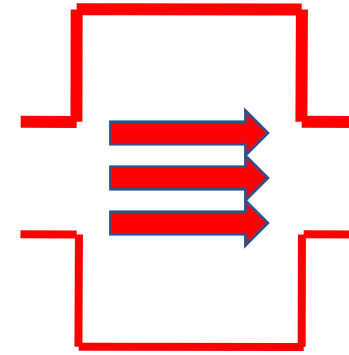
Bending
Magnet



個々の電子の進行
方向に放射 ⇒
縦方向と横方向の
運動量を失う

Synchrotron
Radiation

Accelerating
Cavity

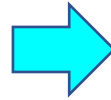


全ての電子が一律
に加速 ⇒ 縦方
向の運動量のみを
得る

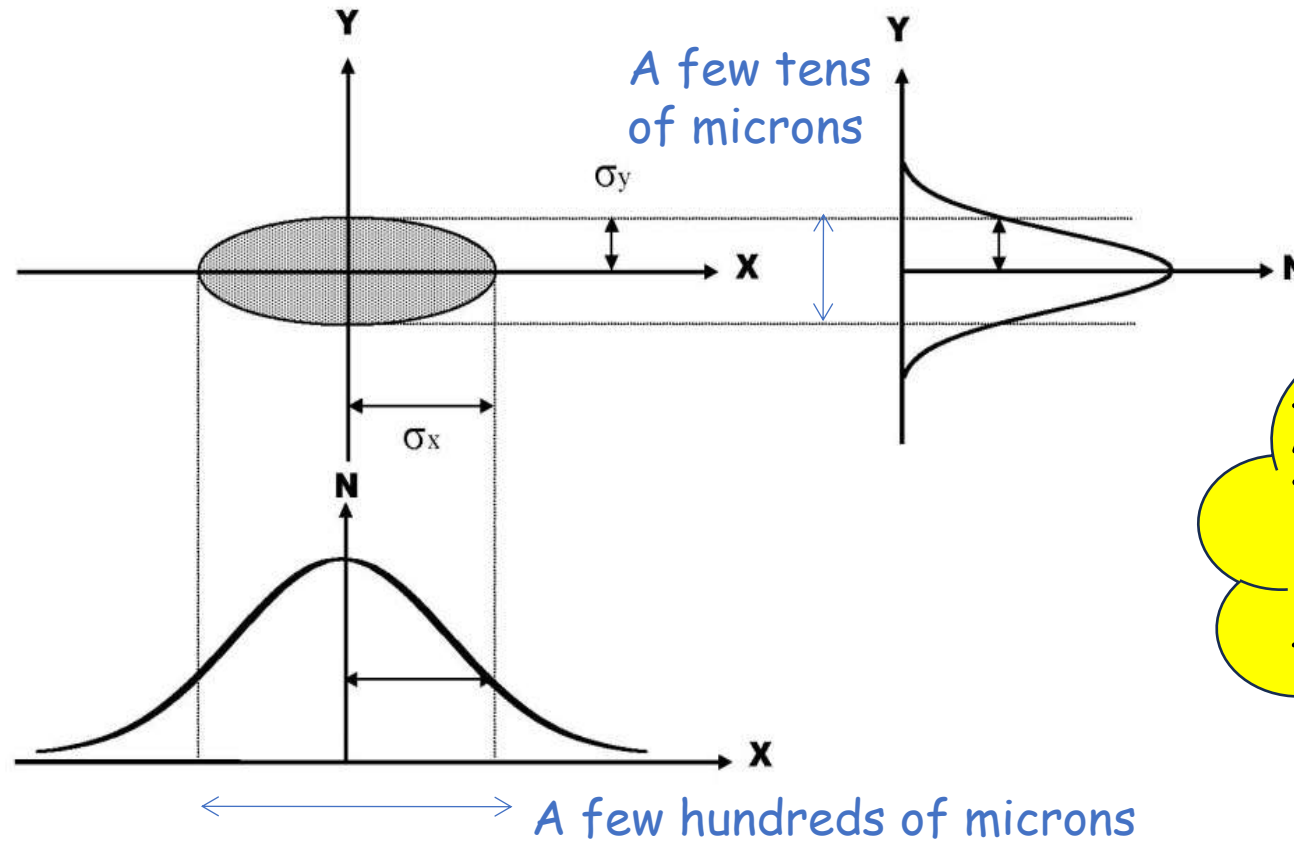
Acceleration

Transverse Profile of Electron Beam

Equilibrium between
Radiation Excitation
and Radiation Damping

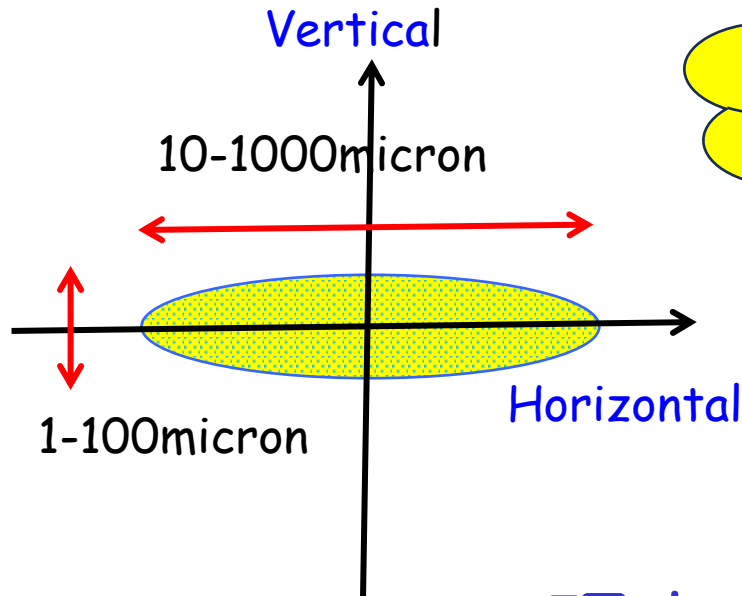


Gaussian Distribution
around Closed Orbit



放射光を粒で出すこと
で生じる拡がりと加速
によるその抑制が釣り
合ってガウス分布する

What is the origin of vertical beam size?



水平方向（軌道面内）の拡がりは、放射光を粒で出すことによる突然の軌道曲率の変化が引き起こす

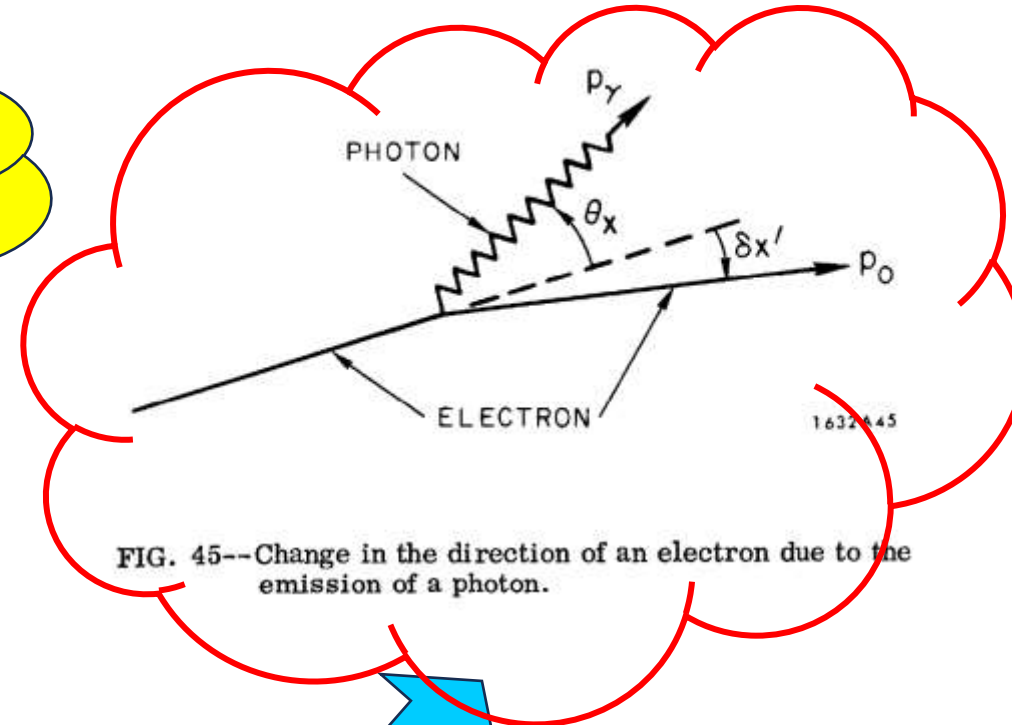
垂直方向は？

現実

現実の加速器では・・・
加速器磁石の磁場誤差などにより、水平方向の振動が垂直方向に回り込むことで生じる

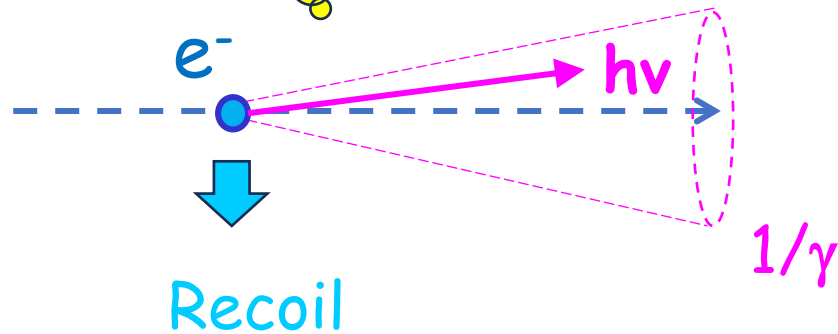
理想

理想的な加速器では・・・
究極的には放射光を粒で出すことによる反作用が源となるらしいが・・・



Recoil of Synchrotron Radiation?

放射光は $1/\gamma$ の範囲で確率的にある方向へ出る?
⇒ 反跳有?



放射光は $1/\gamma$ の範囲に広がる球面波で出ていることを示唆?
⇒ 反跳無?

(• • ?)

放射光のダブルスリット干渉によるビームサイズモニターは広く使われている

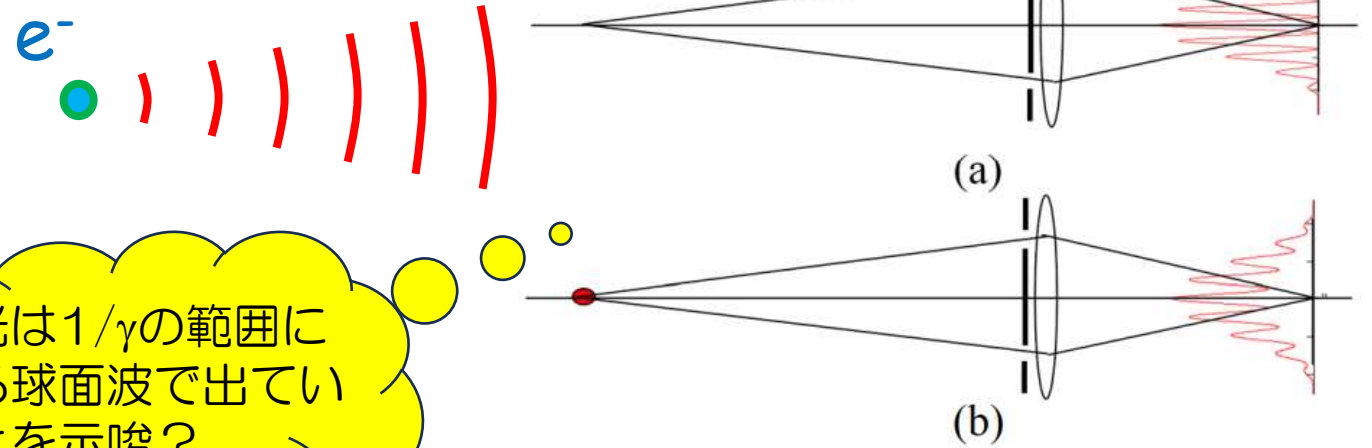


Figure 1: A simple representation of the visibility of an interferogram and light source size. (a) A point source yields an interferogram with a visibility of 1; (b) an ensemble of point sources yields a reduced visibility.

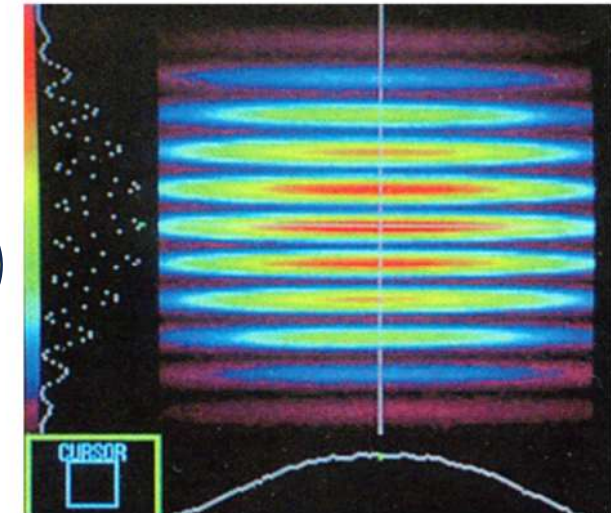


Figure 3: A typical interferogram observed with the SR interferometer.

放射光は波？

放射光は粒か波か？

加藤政博（広島大／分子研）

Electro-magnetic Field radiated from an electron

Liénard-Wiechert potentials

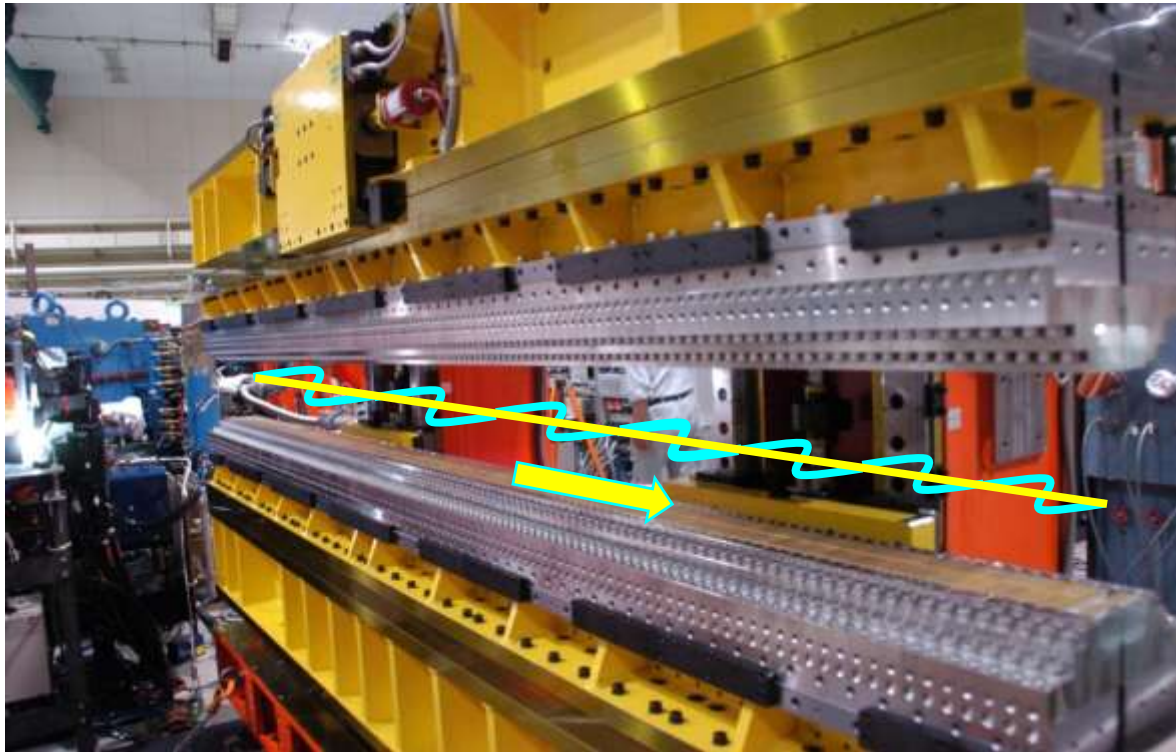
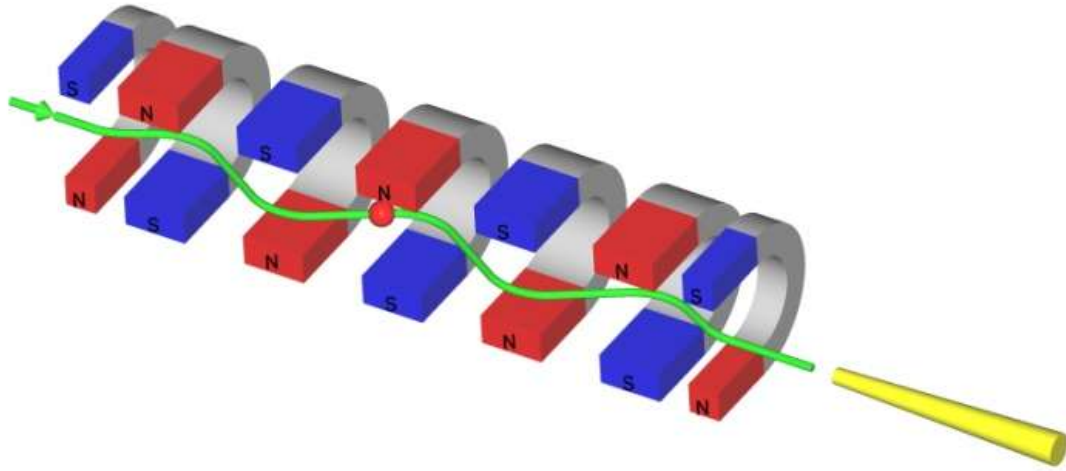
$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{E} = \frac{e}{cR} \frac{\vec{n} \times \left\{ (\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}} \right\}}{(1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta})^3} \bigg|_{t'} \\ \vec{H} = \vec{n} \times \vec{E} \big|_{t'} \end{array} \right. \quad \left(t' = t - \frac{R}{c} \right)$$

放射光の時空間構造
は電子の運動を反映
している



電子の運動を制御すること
で放射光の波の性質を制御
できる

Undulator Radiation

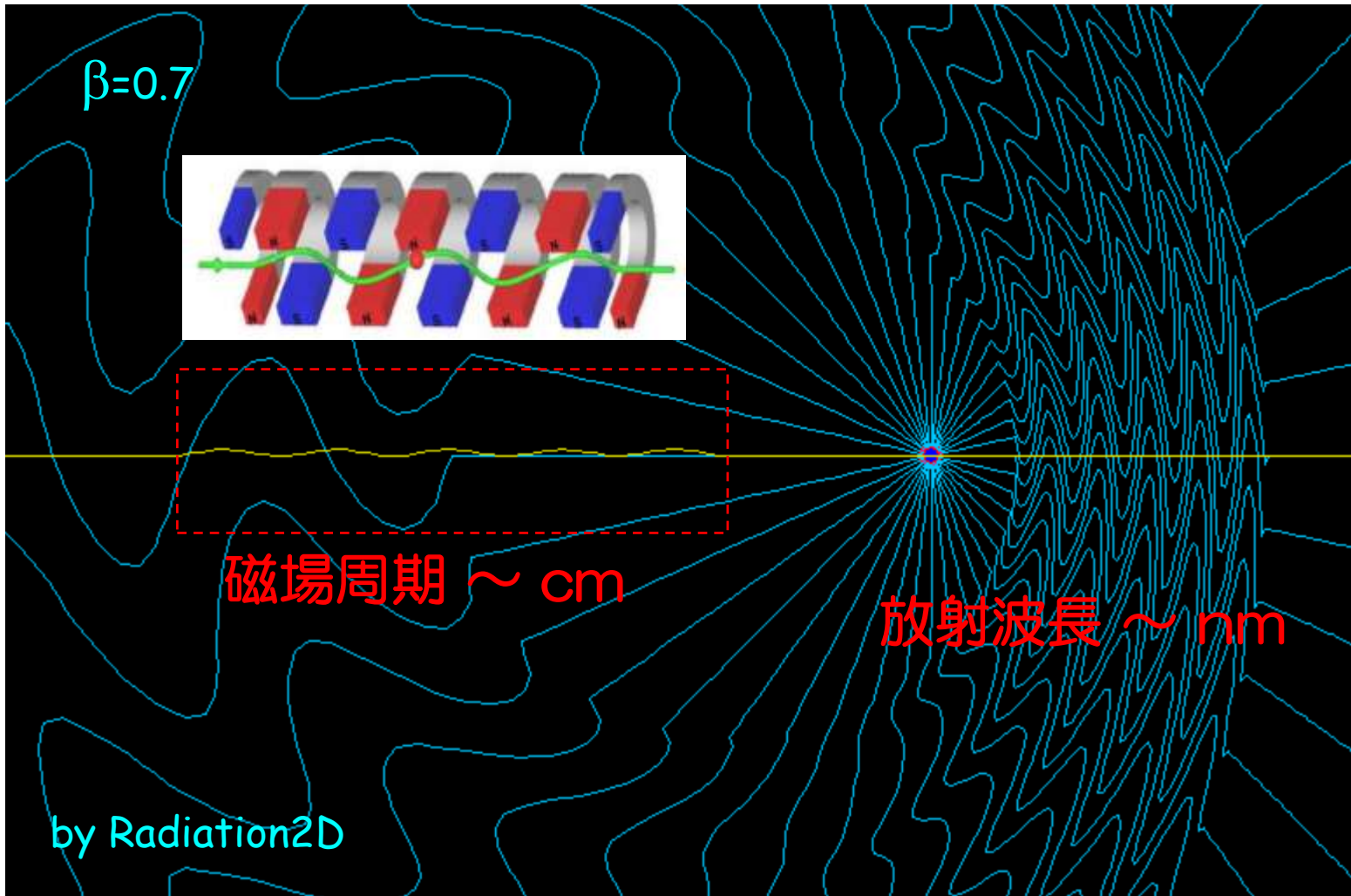


Variable Polarization Undulator at UVSOR-III BL7U

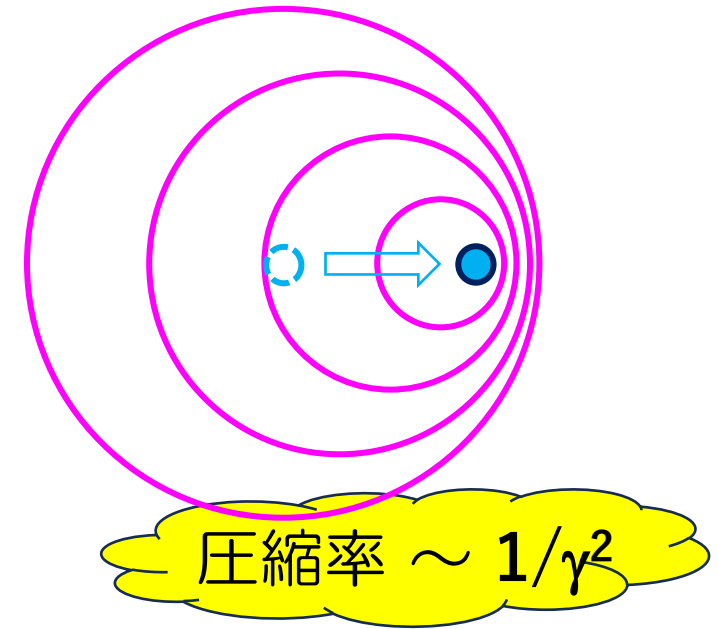


Observed at UVSOR-III BL1U

Principle of Undulator

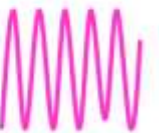


Doppler effect

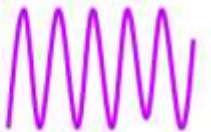


ドップラー効果を制御することで波長可変に！

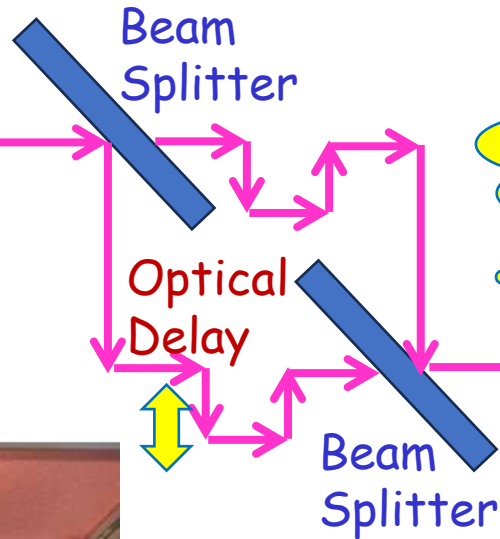
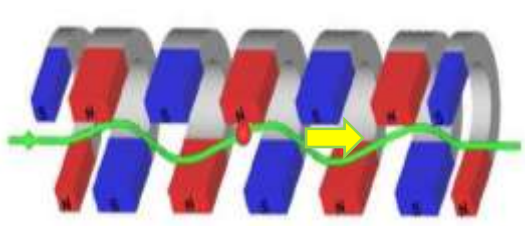
Weak B; Electrons go fast.



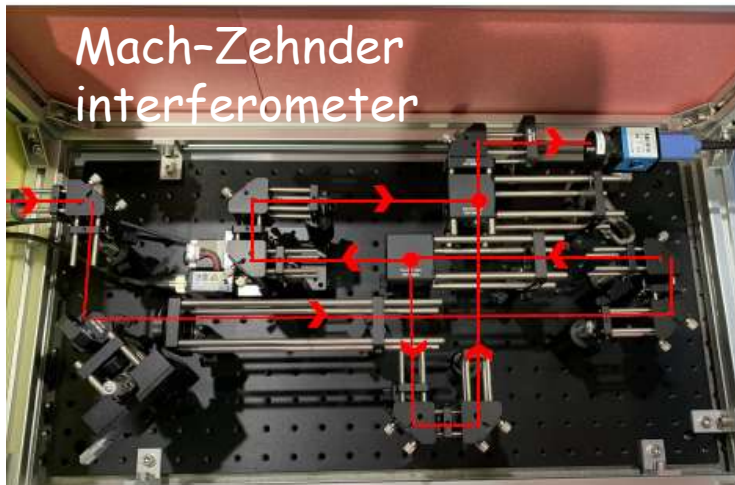
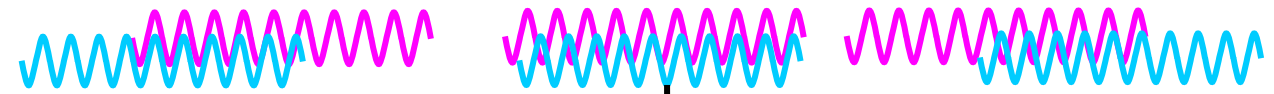
Strong B; Electrons go slow.



N-cycle Undulator produces exactly N-cycle EM wave?

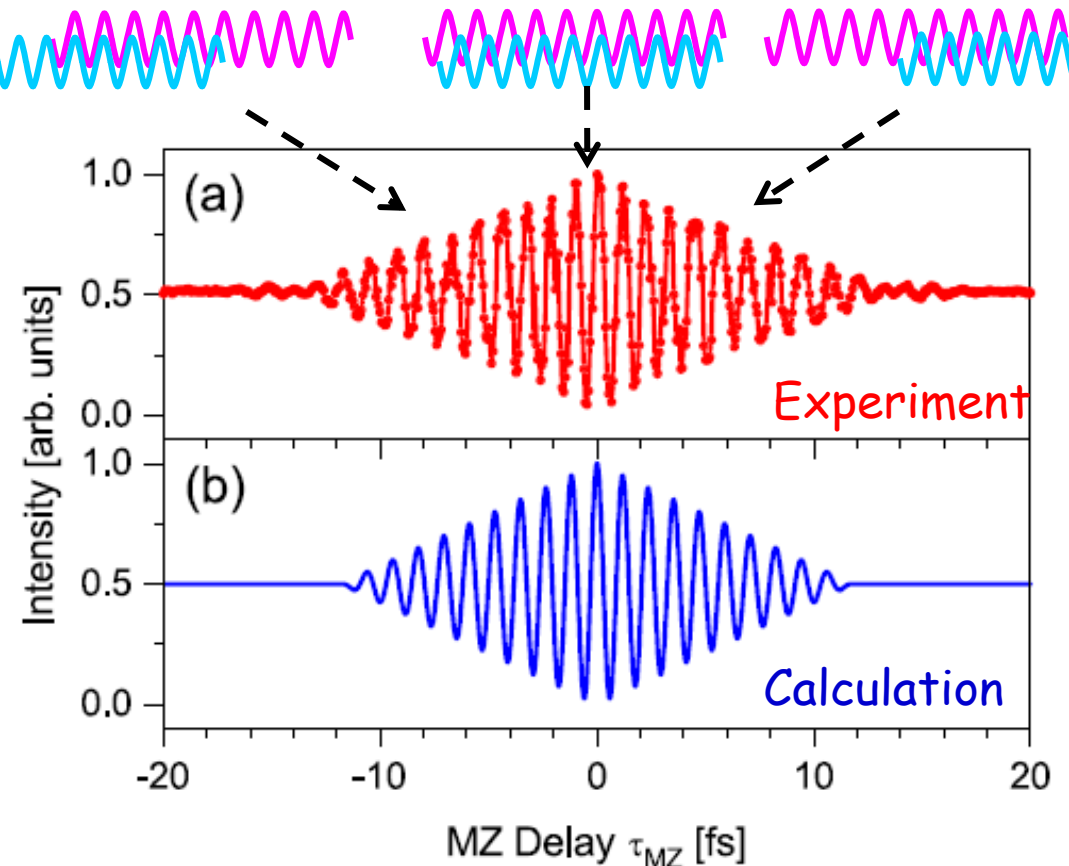


ビームスプリッターで2つに分けた
アンジュレータ光を光路差を変えな
がら干渉させる

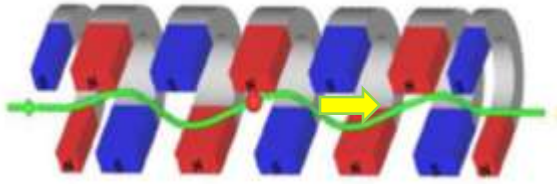


アンジュレータ光
が10サイクルの
矩形波であることを
示す干渉波形が
観測できた！

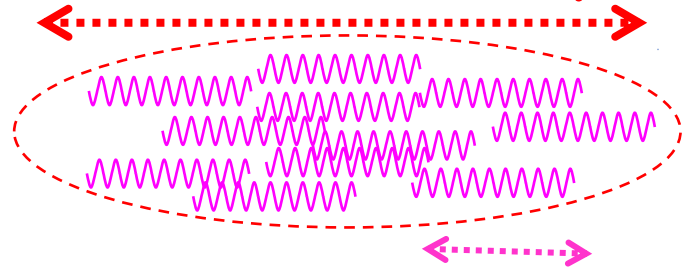
アンジュレータ光は磁場周期数と
同じサイクル数の超短パルス？



N-cycle Undulator produces exactly N-cycle EM wave?

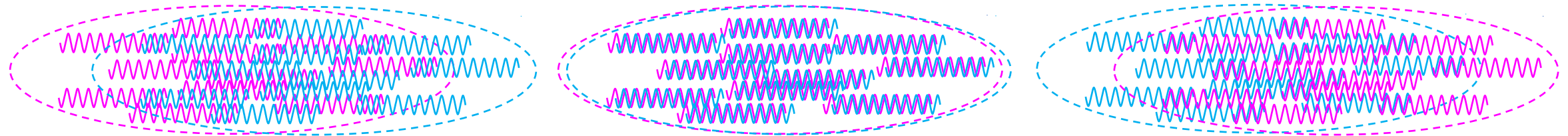
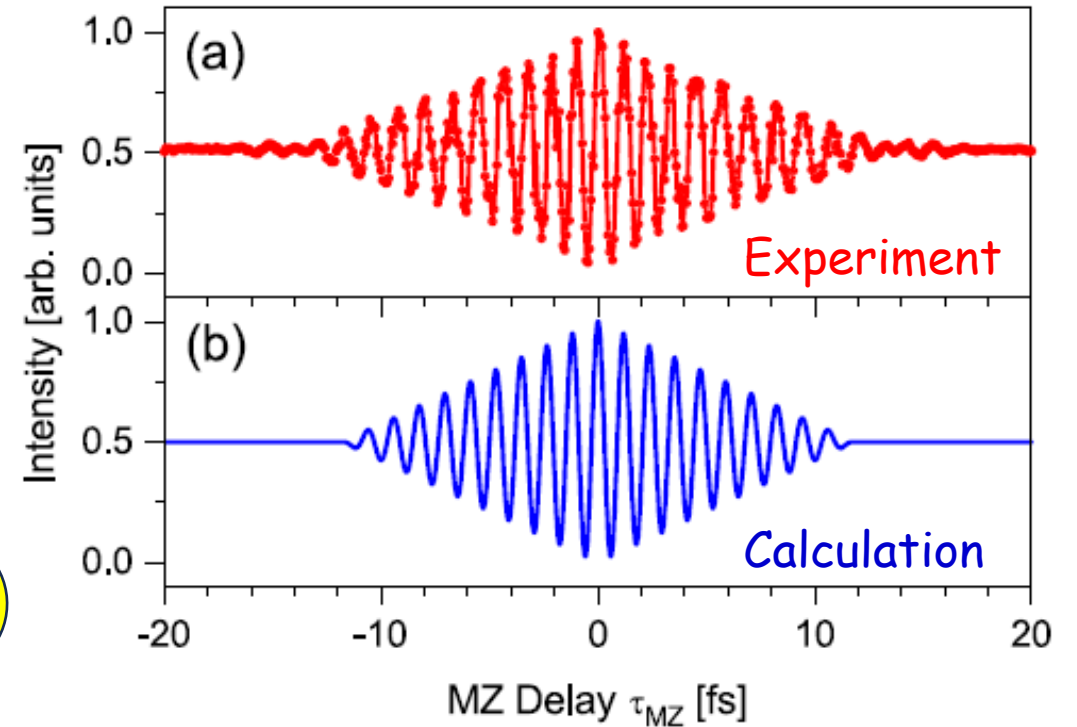


Pulse width ~ 100 psec

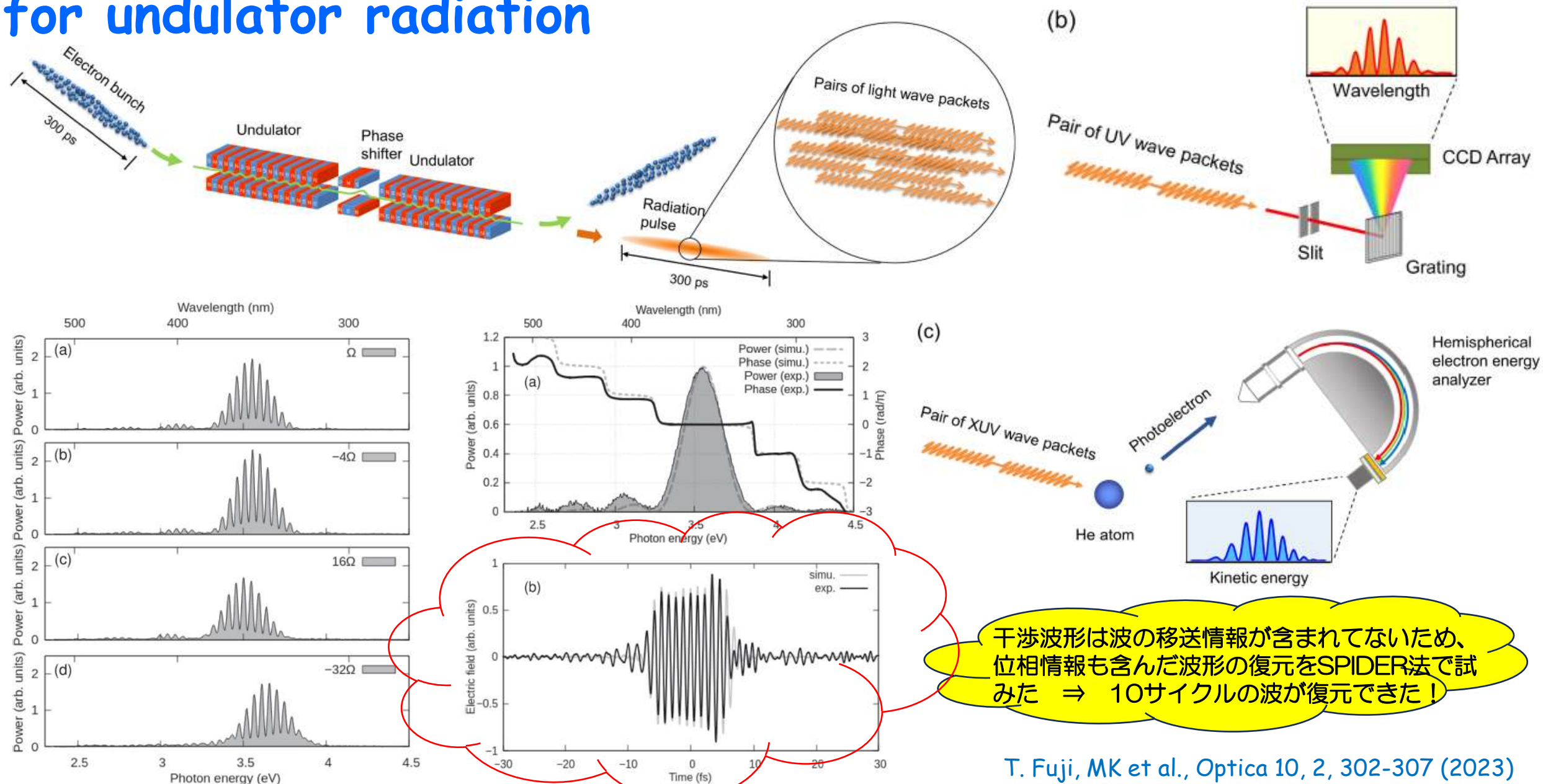


Coherence Length $\sim$ fsec

10サイクル
の超短パルス
の非コヒーレ
ントな集合体



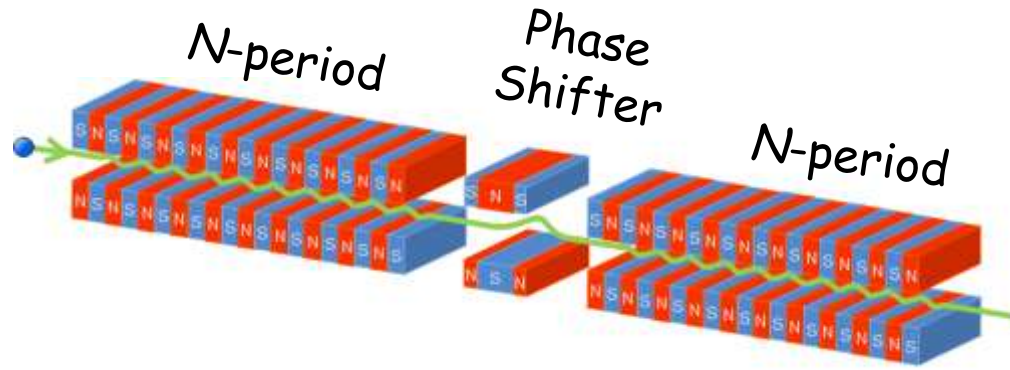
SPIDER (Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction) for undulator radiation



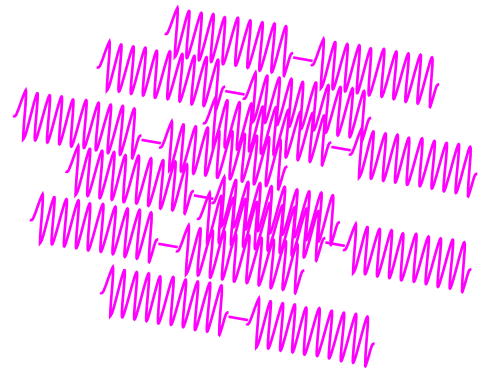
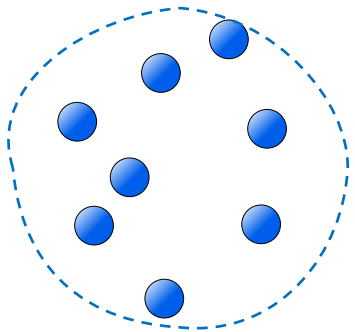
干渉波形は波の移送情報が含まれてないため、位相情報も含んだ波形の復元をSPIDER法で試みた $\Rightarrow$ 10サイクルの波が復元できた！

"Double-pulse" structured light from Tandem Undulator

Tandem Undulator

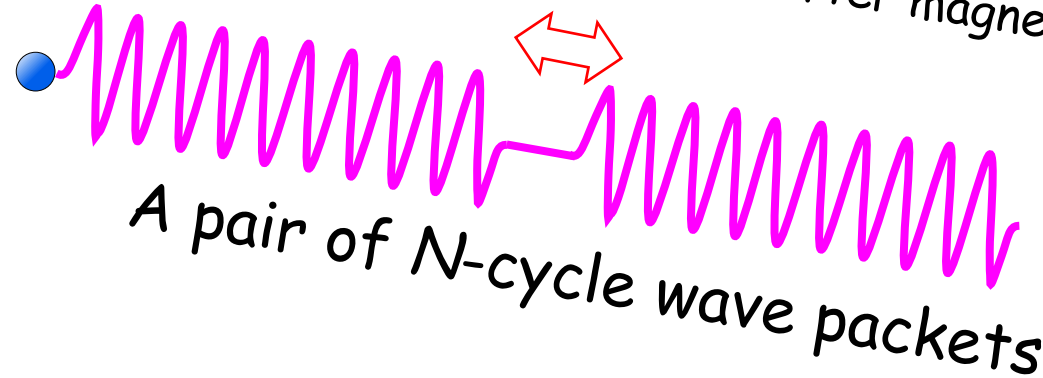


Incoherent Radiation from
a bunch of electrons



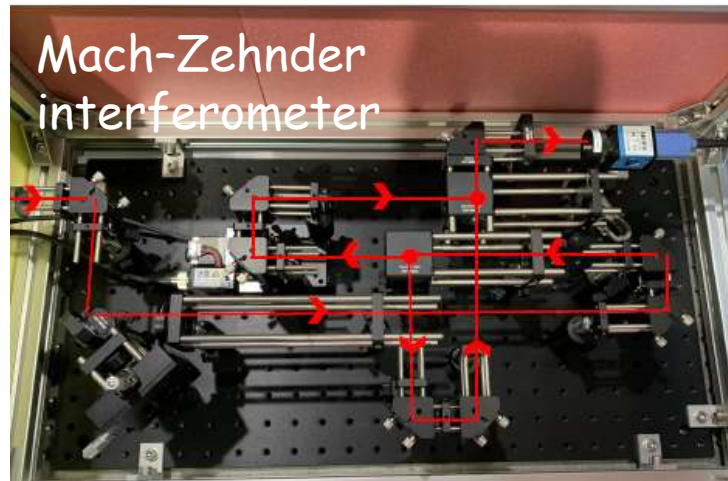
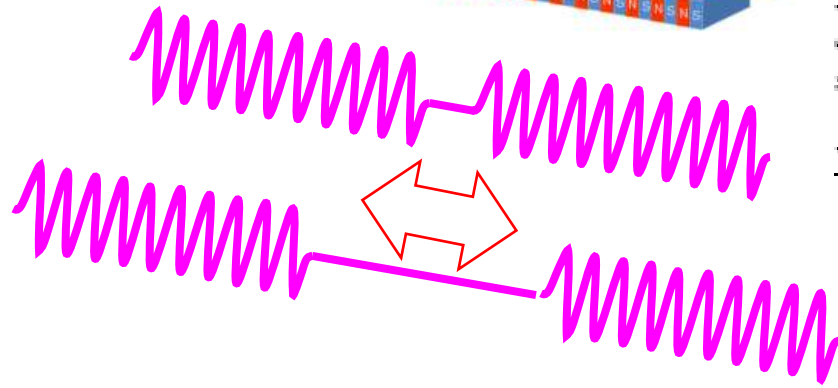
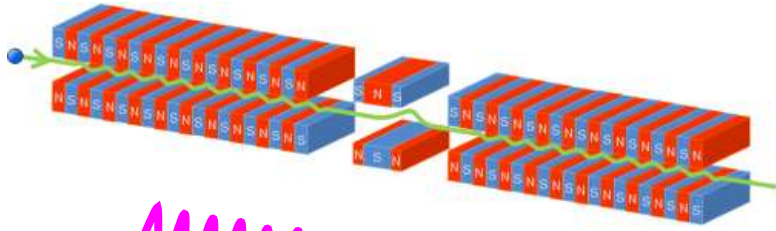
直列2台のアンジュレータからはダブルパルス
の放射光が出てくるのか？

Delay between two wave packets can be
controlled by the phase shifter magnet

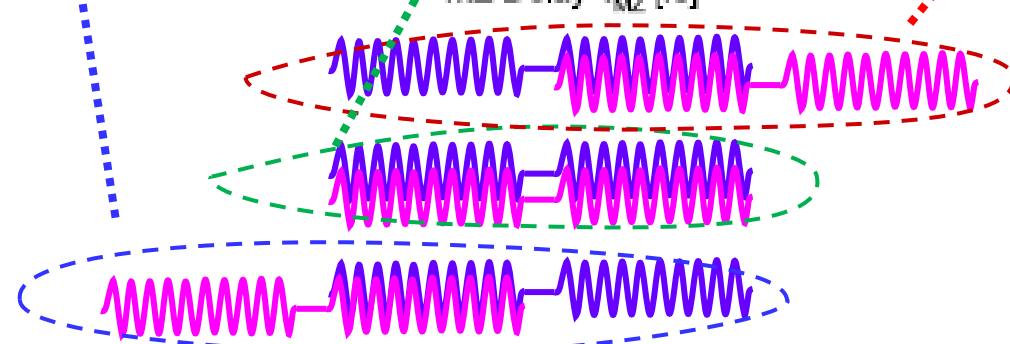
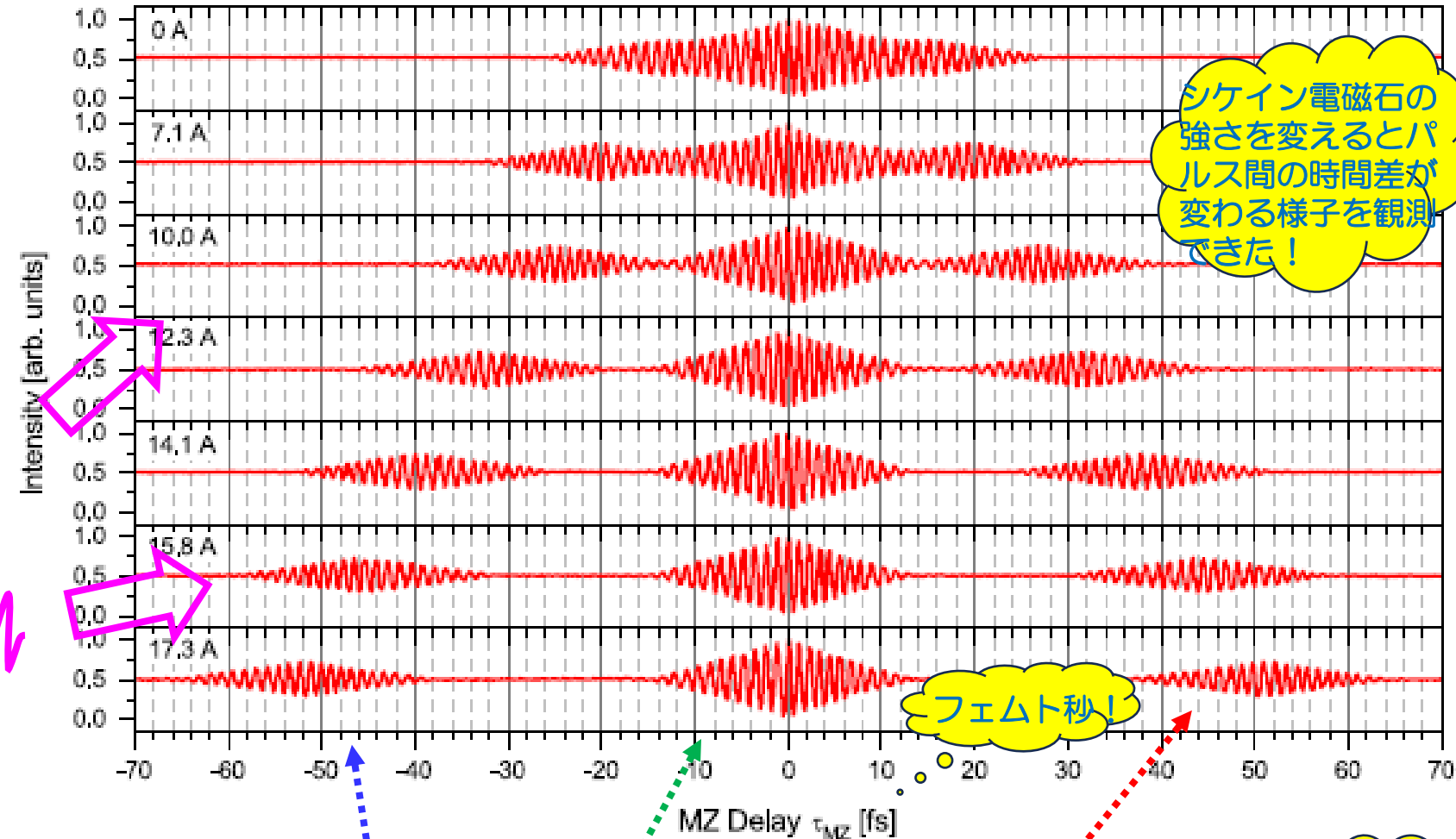


アンジュレータの間に置かれたシケイン電磁石
の強さを変えて電子に回り道をさせるとダブル
パルス間の時間差を制御できる??

Interferogram of Double Undulator Radiation



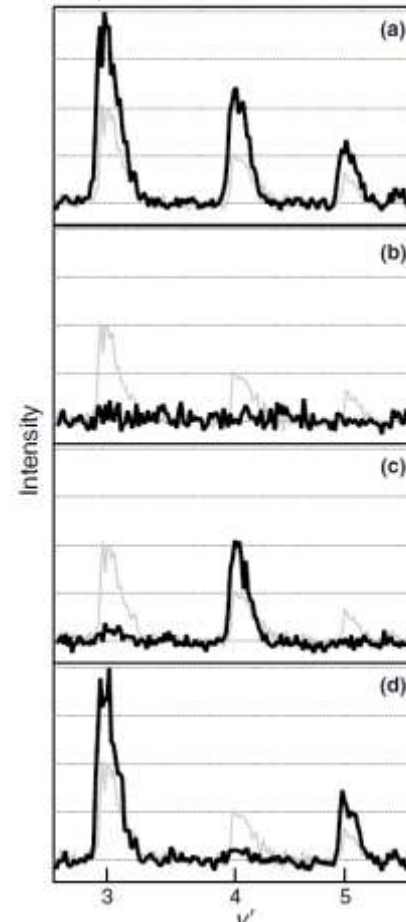
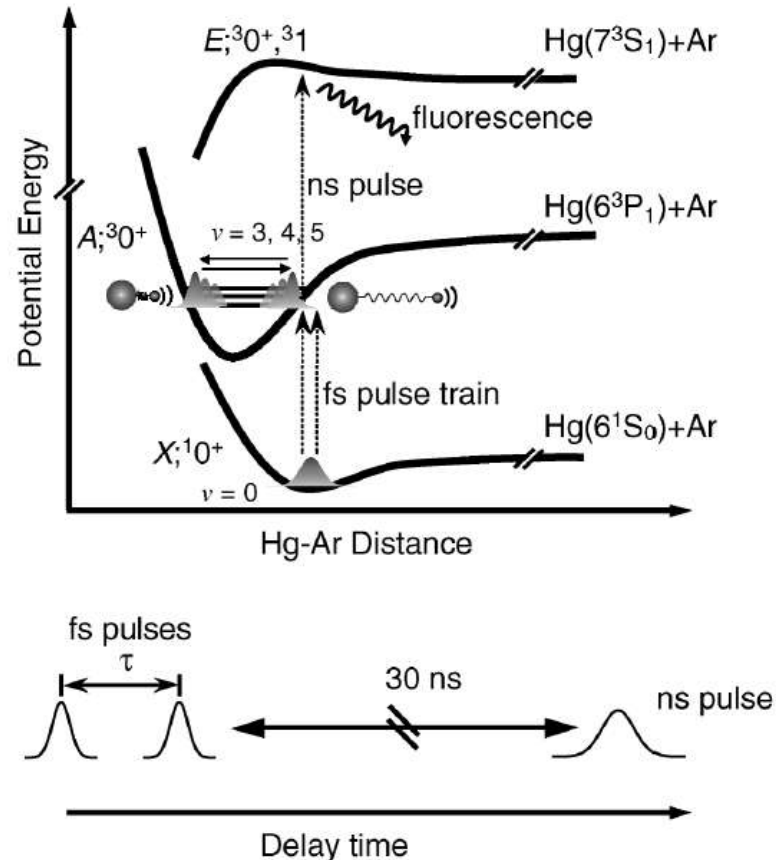
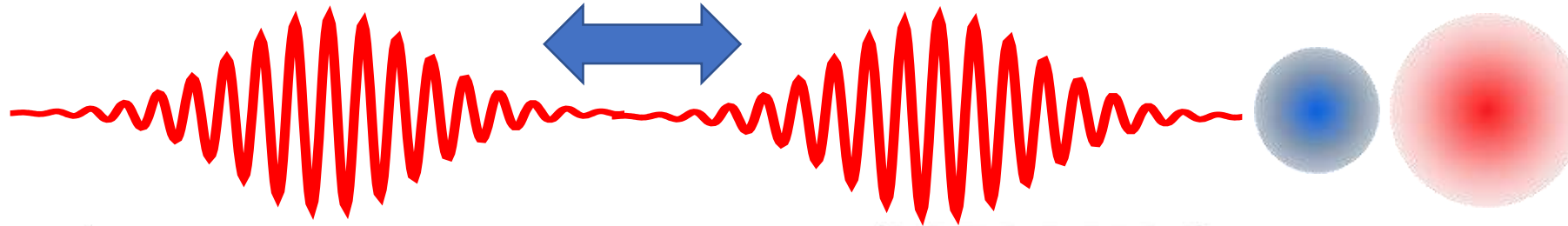
Experiment



サブフェムト秒
(アト秒) の精
度で遅延時間を
制御可能！

Coherent Control by LASER

Wave Packet Interferometry Scheme



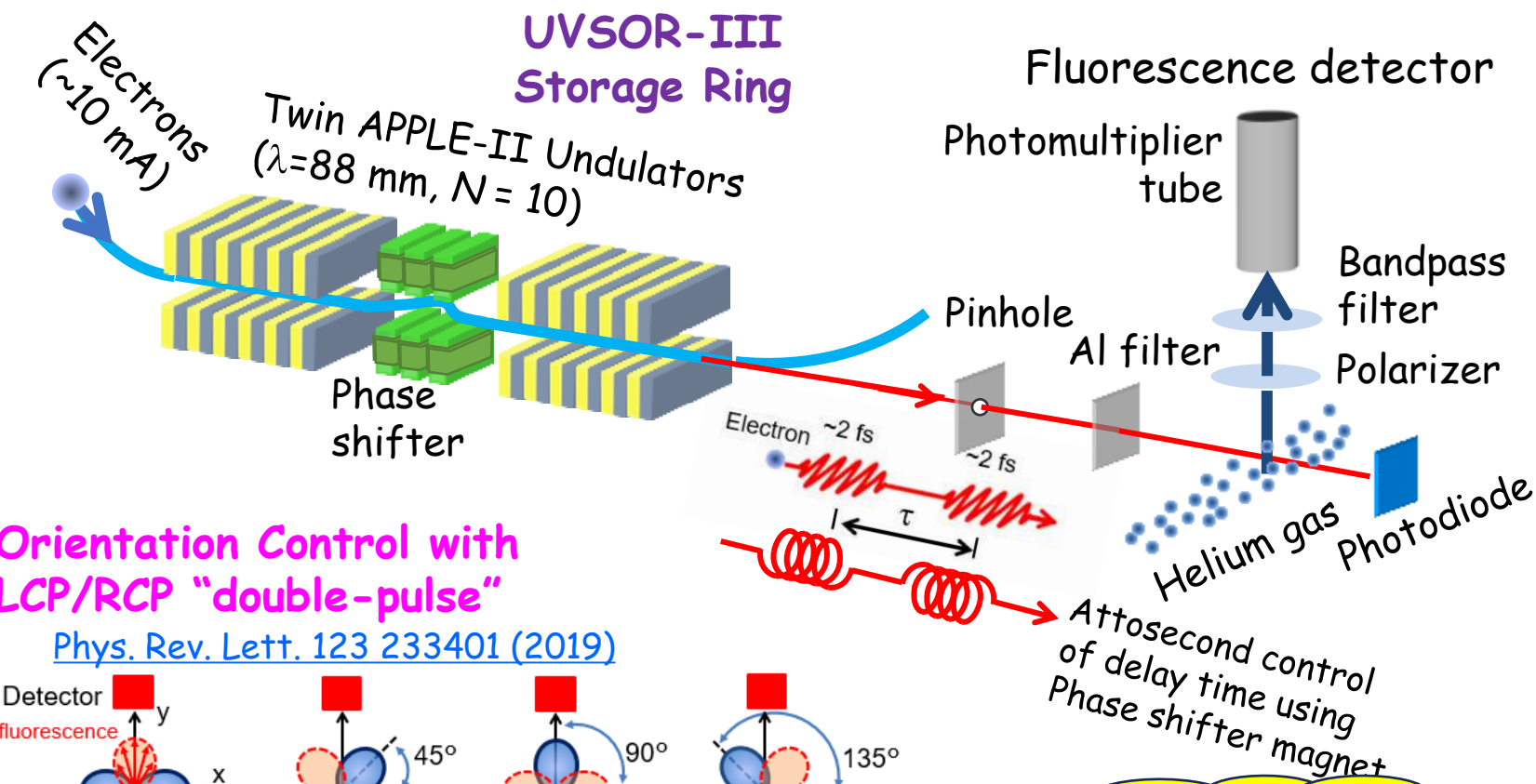
サブフェムト秒（アト秒）精度で制御された
ダブルパルスレーザー
による量子状態制御



直列アンジュレータ光
でやれないだろうか？

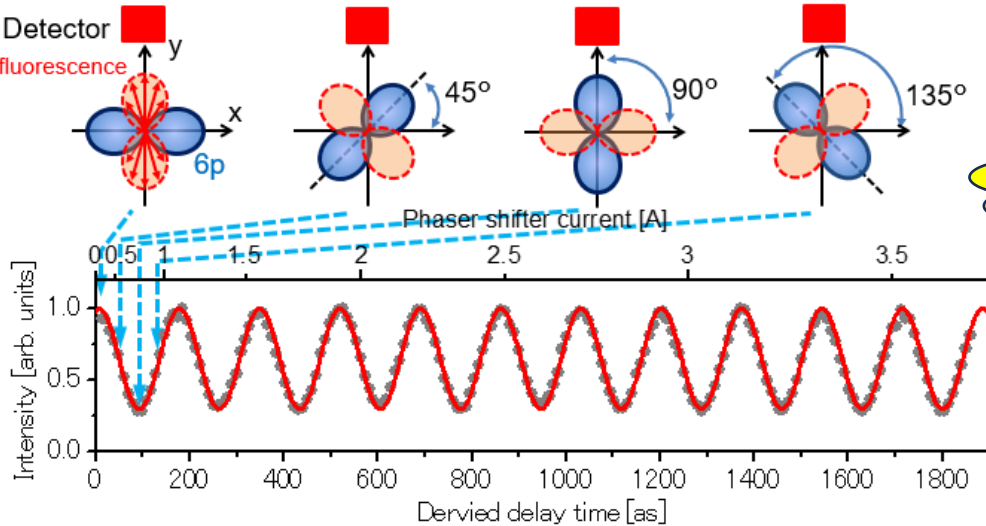
Applications of "double-pulse" structured Synchrotron Radiation

In collaboration with Saga-LS, Toyama U., Hiroshima U. ...



Orientation Control with LCP/RCP "double-pulse"

[Phys. Rev. Lett. 123 233401 \(2019\)](#)



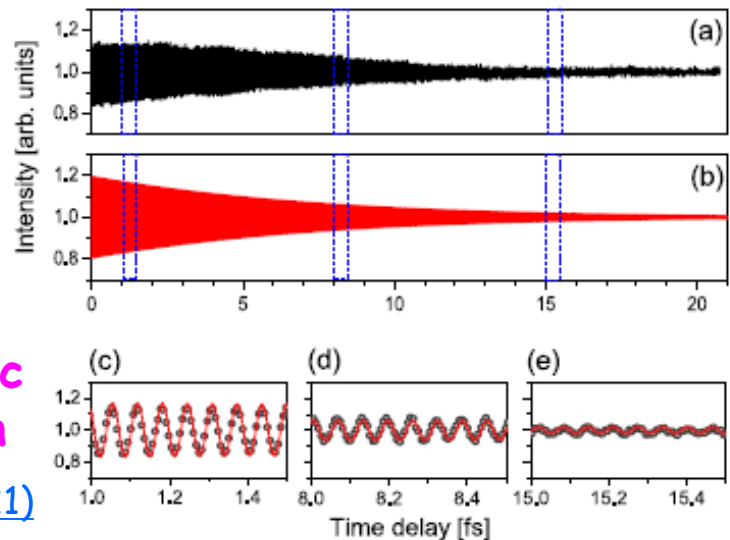
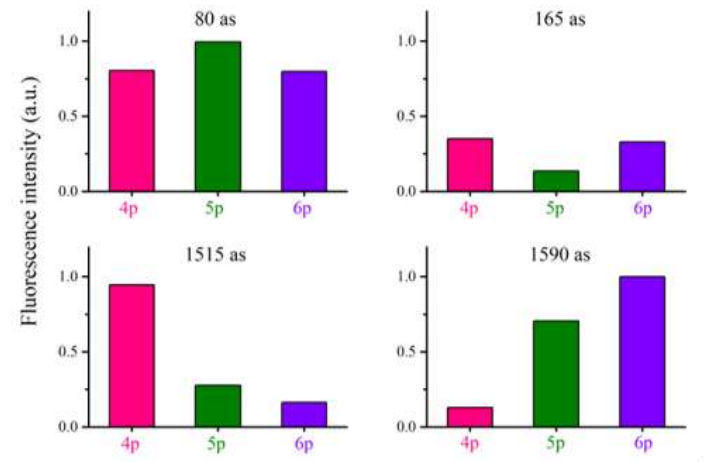
いろいろやってみました

Electron Wave Packet Interference in Atomic Inner-Shell Excitation

[Phys. Rev. Lett. 126, 113202 \(2021\)](#)

Population Control

[Nat. Commun. 10, 4988 \(2019\)](#)



Optical Vortex

Laguerre-Gauss Beam

A solution of Maxwell's equation under paraxial approximation

$$\mathbf{A} = \mathbf{x}u(x, y, z)e^{-ikz}$$

$$u_{pl}(r, \phi, z) = \frac{C}{(1 + z^2/z_R^2)^{1/2}} \left[\frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right]^l L_p^l \left[\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \\ \times \exp \left[\frac{-r^2}{w^2(z)} \right] \exp \frac{-ikr^2z}{2(z^2 + z_R^2)} \exp(-il\phi) \\ \times \exp \left[i(2p + l + 1) \tan^{-1} \frac{z}{z_R} \right],$$

Energy

$$\frac{dU}{dt} = \frac{c}{4\pi} \int r^2 d\Omega \vec{n} \cdot (\vec{E} \times \vec{H})$$

Angular Momentum

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \int cr^2 d\Omega \frac{1}{4\pi c} \vec{r} \times (\vec{E} \times \vec{H})$$

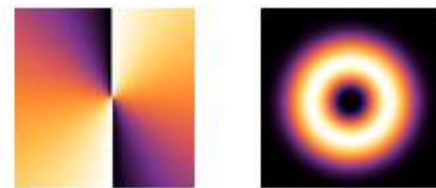
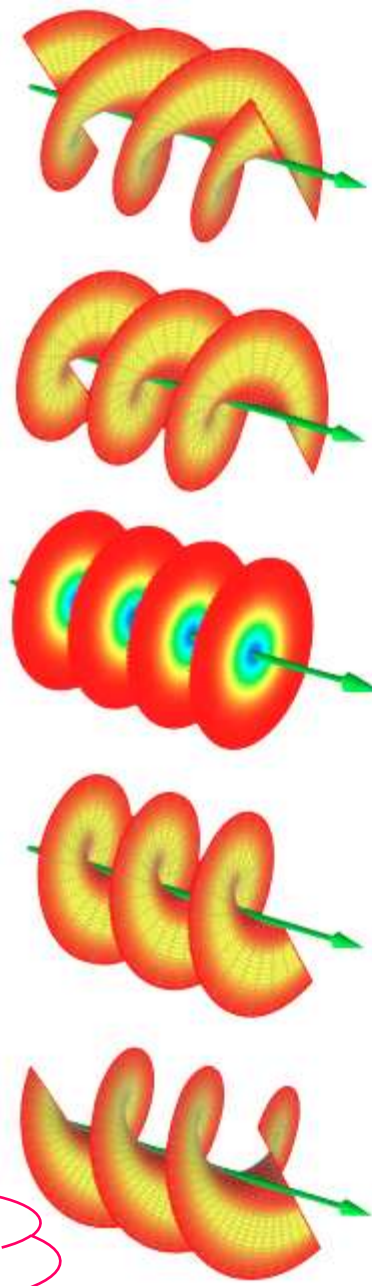
光渦？

ドーナツ状
強度分布

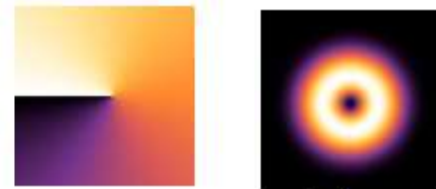
らせん波面

スピンとは別に
軌道角運動量を
運ぶ

A photon carries energy, $\hbar\omega$,
and angular momentum, $\hbar l$.



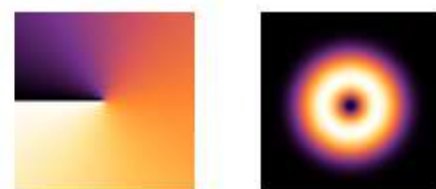
$m = +2$



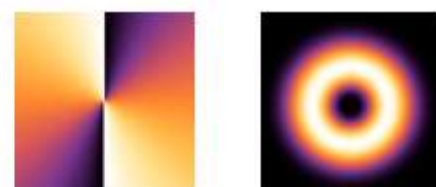
$m = +1$



$m = 0$

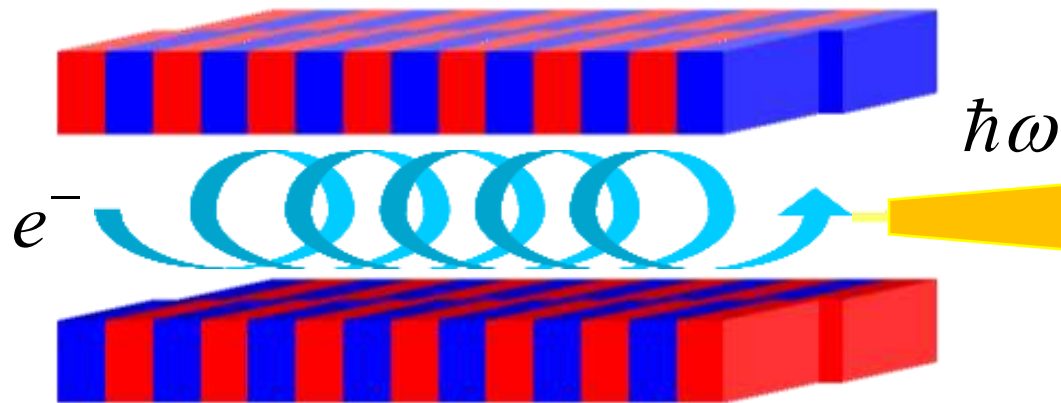
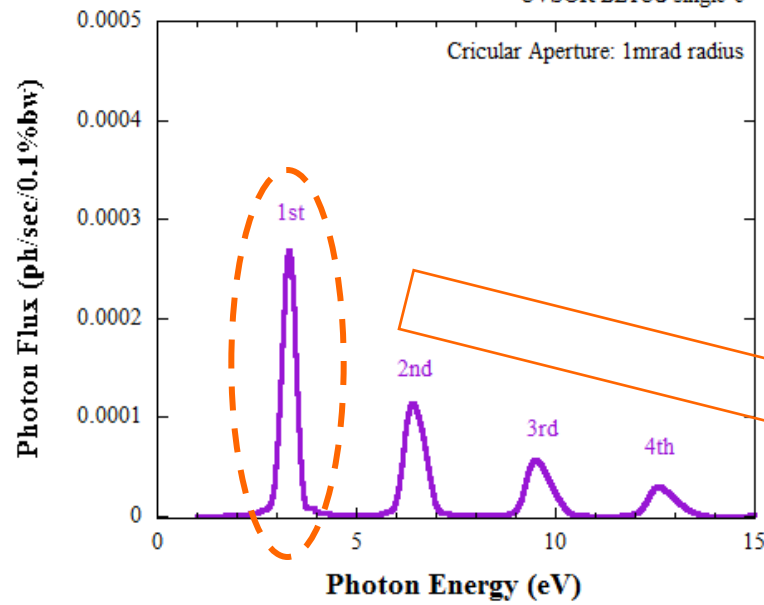


$m = -1$

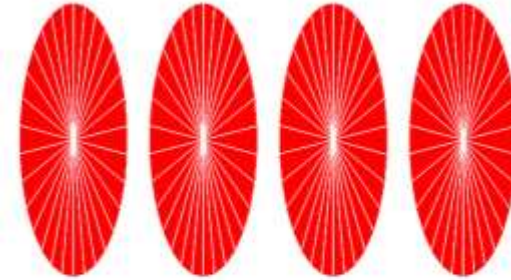


$m = -2$

Optical Vortex from Helical Undulator

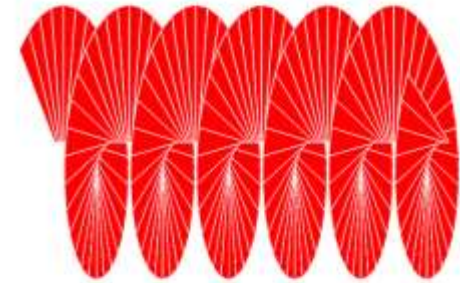


1st



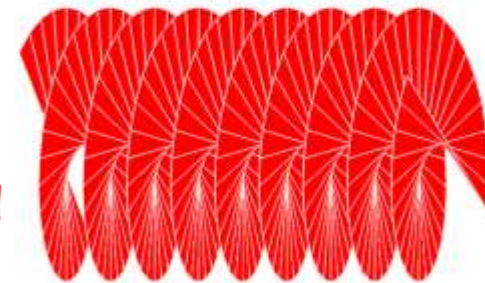
$S=1, L=0$

2nd



$S=1, L=1$

3rd

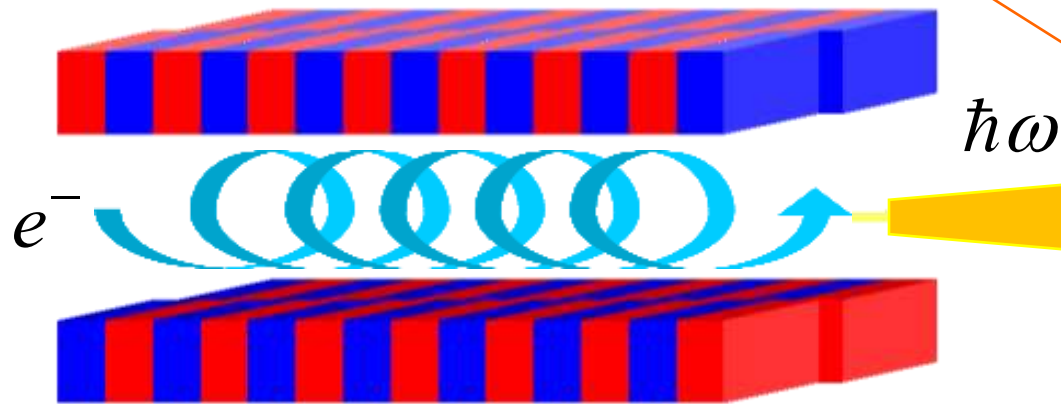
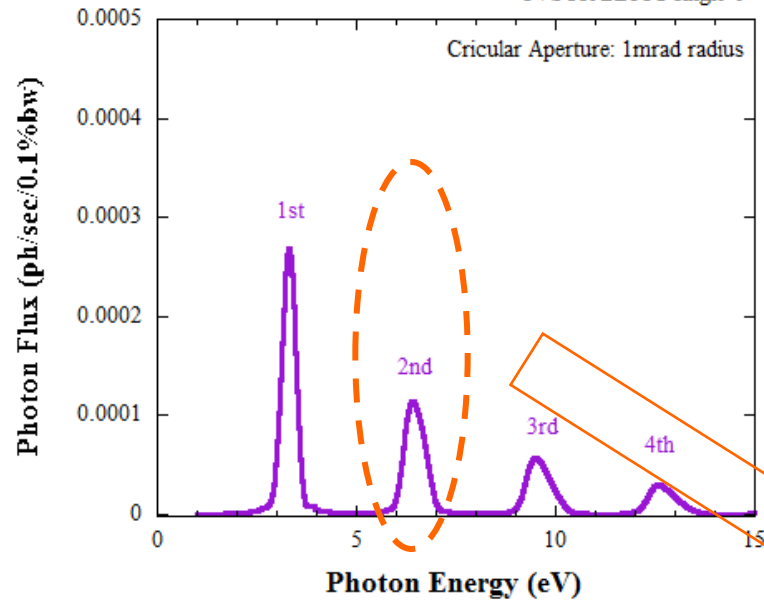


$S=1, L=2$

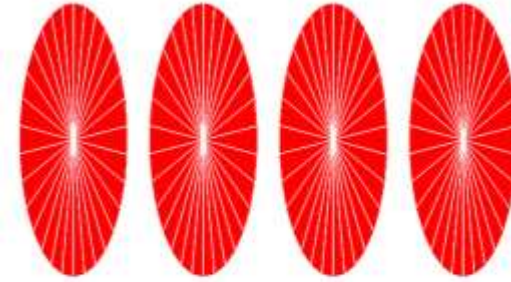
基本波は
平面波
(球面)

O. Chubar et al., NIM A 435 (1999) 495
S. Sasaki & I. McNulty, PRL 100, 124801 (2008)
J. Bahrndt et al., PRL 111, 034801 (2013)
M. K. et al., PRL 118, 094801 (2017)
M. K. et al., SREP 7, 6130 (2017)

Optical Vortex from Helical Undulator

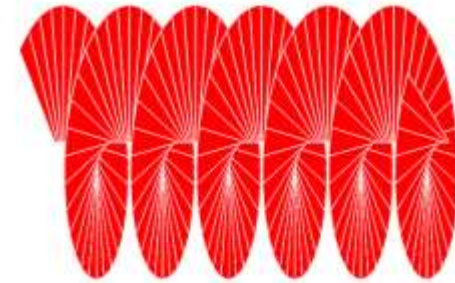


1st



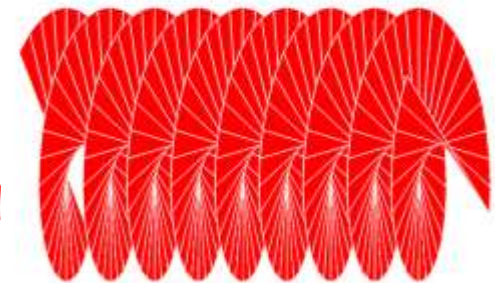
$S=1, L=0$

2nd



$S=1, L=1$

3rd

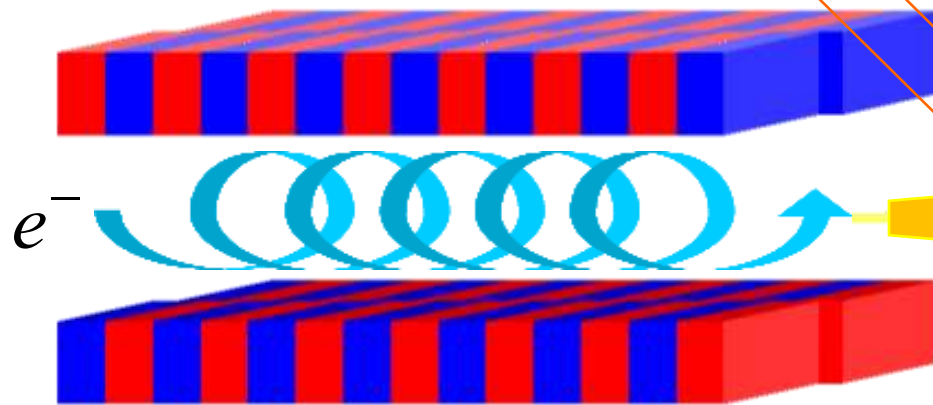
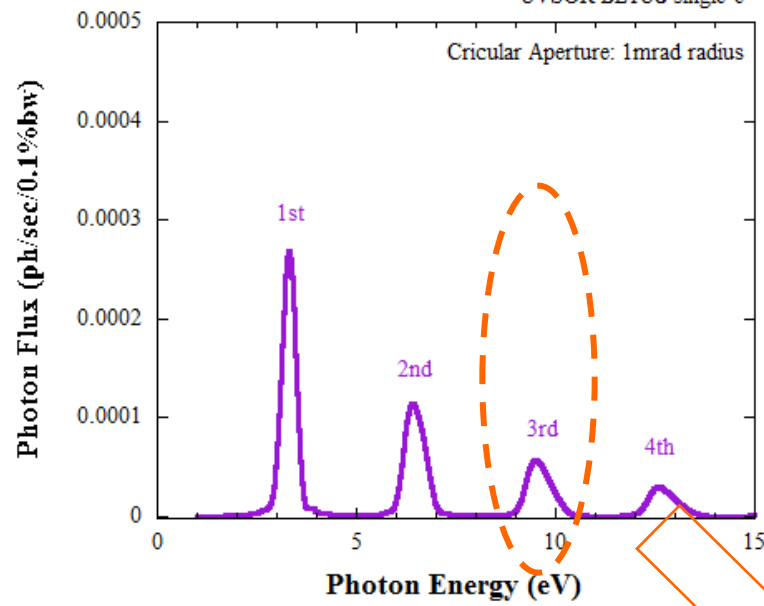


$S=1, L=2$

二倍波は
一重
らせん波

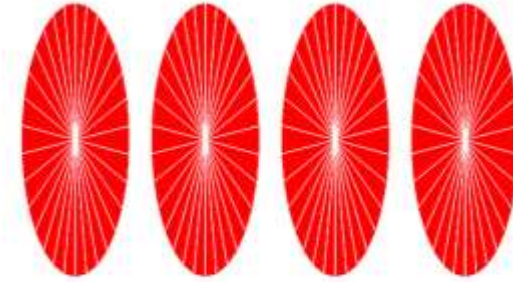
O. Chubar et al., NIM A 435 (1999) 495
 S. Sasaki & I. McNulty, PRL 100, 124801 (2008)
 J. Bahrtdt et al., PRL 111, 034801 (2013)
 M. K. et al., PRL 118, 094801 (2017)
 M. K. et al., SREP 7, 6130 (2017)

Optical Vortex from Helical Undulator



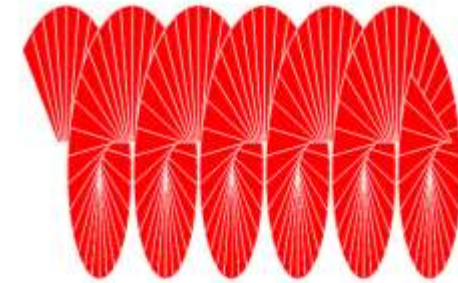
$\hbar\omega$

1st



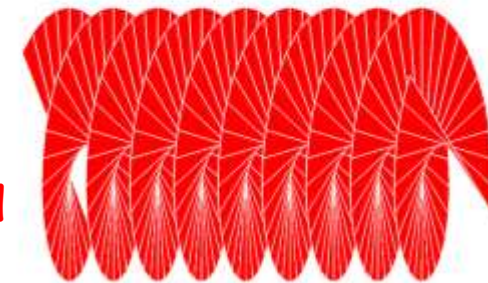
$S=1, L=0$

2nd



$S=1, L=1$

3rd

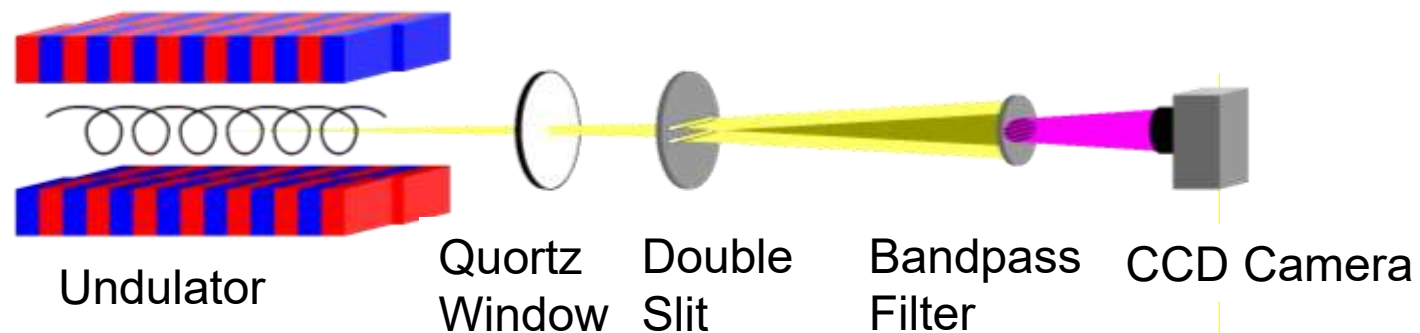


$S=1, L=2$

三倍波は
二重
らせん波

O. Chubar et al., NIM A 435 (1999) 495
S. Sasaki & I. McNulty, PRL 100, 124801 (2008)
J. Bahrndt et al., PRL 111, 034801 (2013)
M. K. et al., PRL 118, 094801 (2017)
M. K. et al., SREP 7, 6130 (2017)

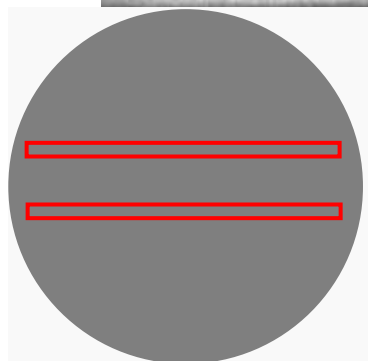
Double-slit Diffraction of Helical Undulator Radiation



光渦の中心は位相特異点！
ダブルスリット回折模様
に断裂が！

1st

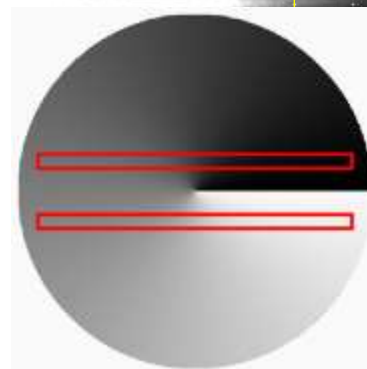
円偏光アンジュレータ
放射の基本波は通常光



355nm

2nd

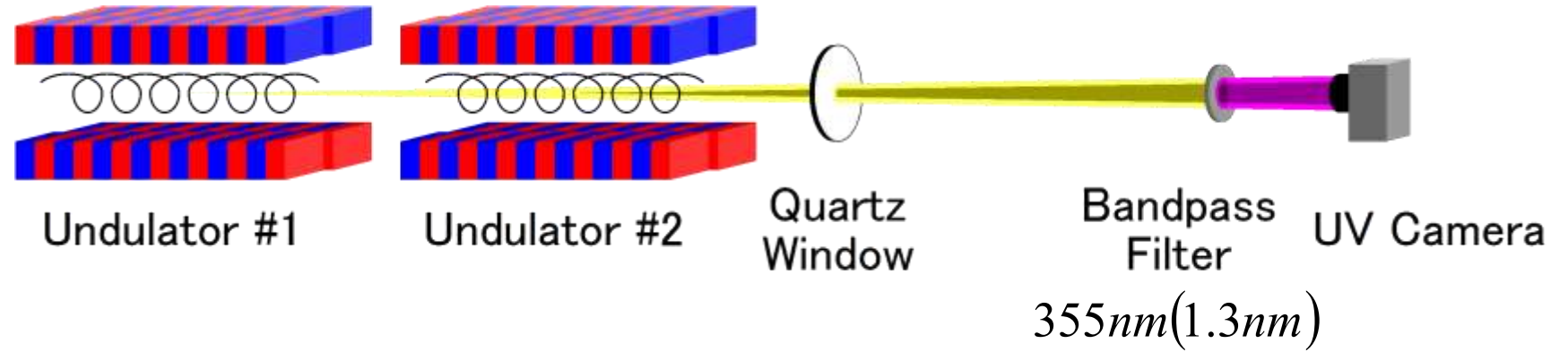
円偏光アンジュレータ
放射の二次光は光渦



355nm

Interference between harmonic radiations from helical undulators in tandem

上流側のアンジュレータから通常光、下流側から光渦を出して干渉させてみた！



#1; $S = -1, L = 0$

#1; $S = -1, L = 0$

#1; $S = +1, L = 0$

#1; $S = +1, L = 0$

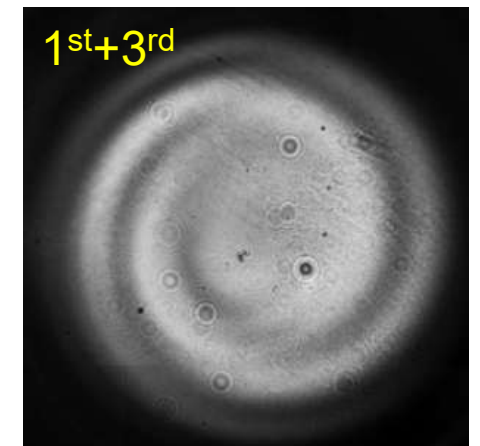
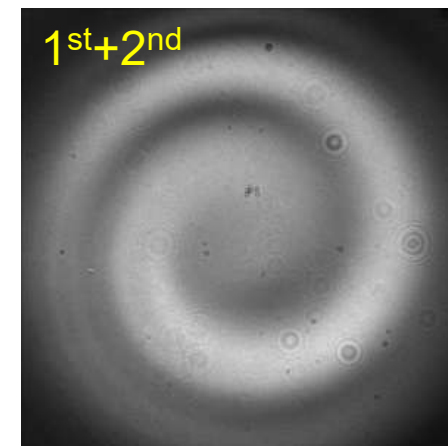
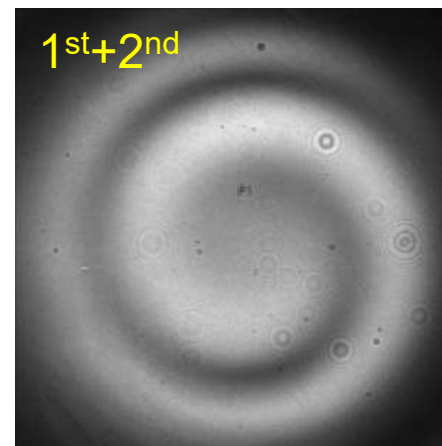
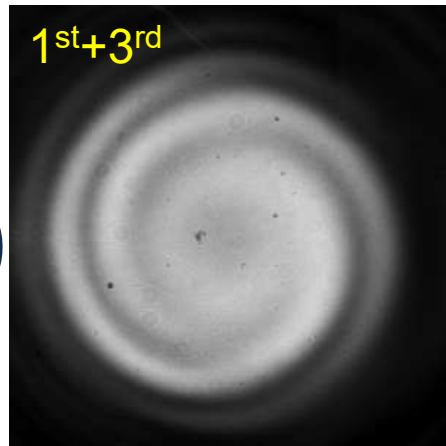
#2; $S = -1, L = -2$

#2; $S = -1, L = -1$

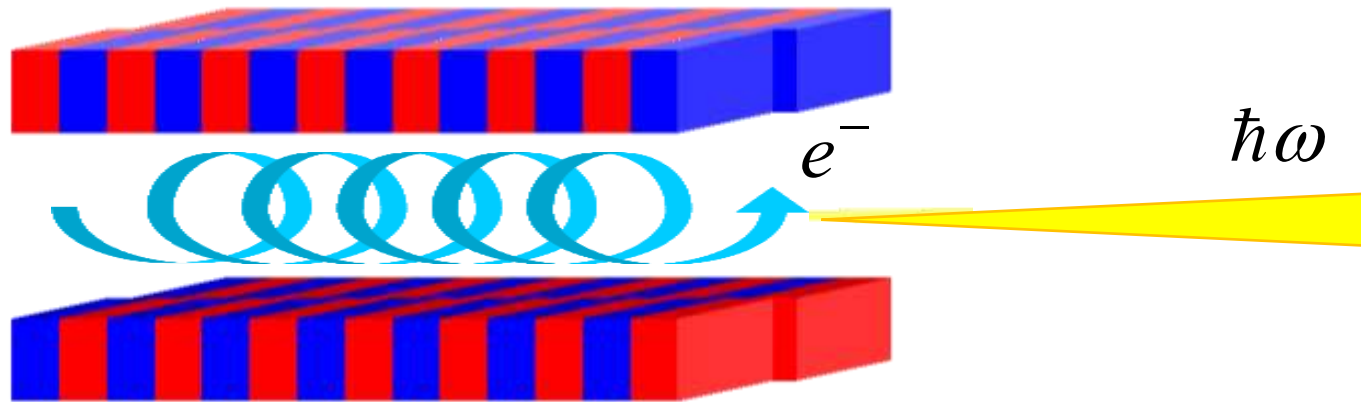
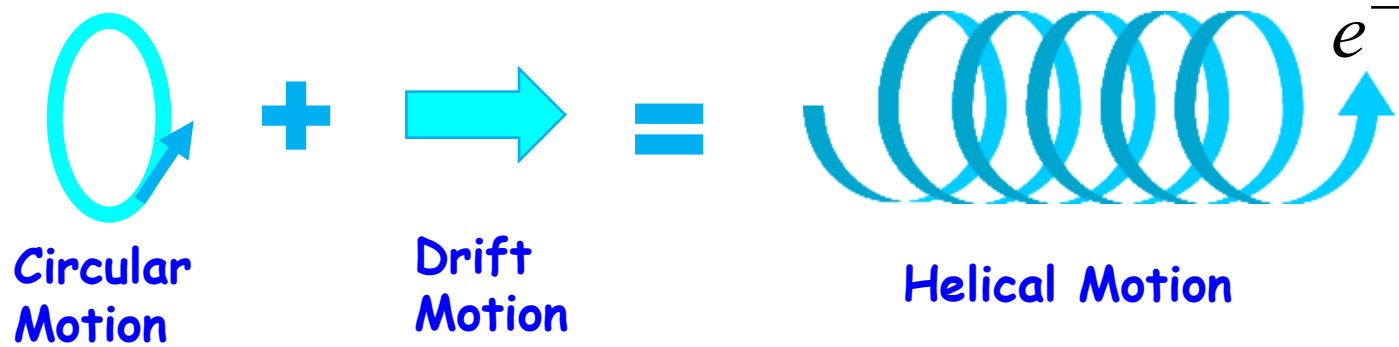
#2; $S = +1, L = +1$

#2; $S = +1, L = +2$

平面波（球面波）とらせん波の干渉による渦巻模様が！



Helical Undulator Radiation



Circular
Orbit
Radiation

X

Lorentz
Transformation

=

Helical
Undulator
Radiation

光渦の起源は
円運動放射に
ある？

Electro-magnetic Field radiated from an electron in circular motion

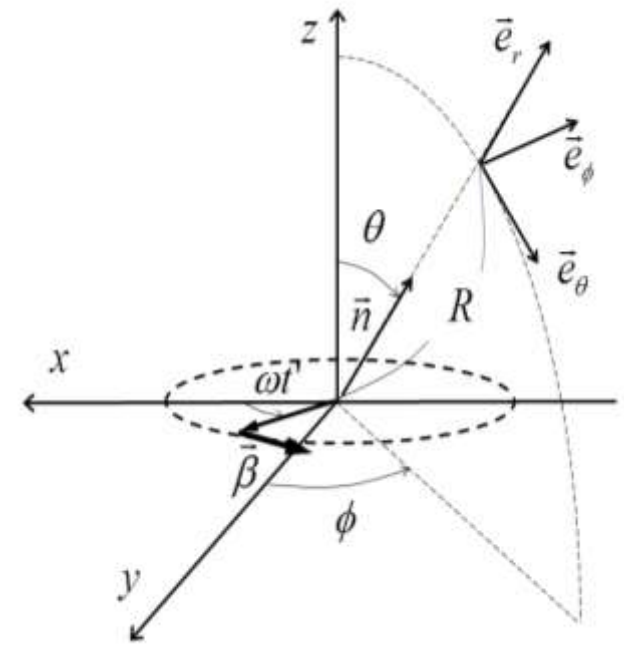
MK et al. Sci. Rep. 7, 6130 (2017)

MK et al. Phys. Rev. Lett. 118, 094801 (2017)

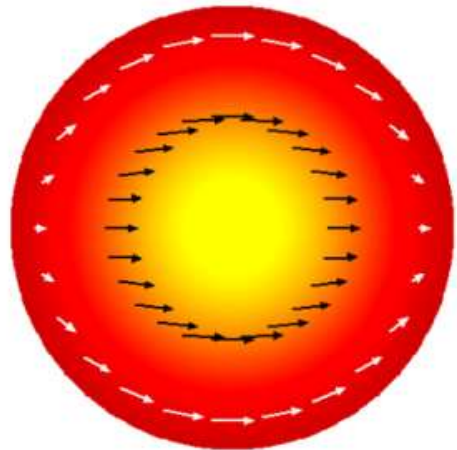
Liénard-Wiechert potentials

$$\vec{E}(R, \theta, \varphi, t) = \frac{e}{cR} \frac{\vec{n} \times \left\{ (\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}} \right\}}{(1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta})^3} \Bigg|_{t'}$$

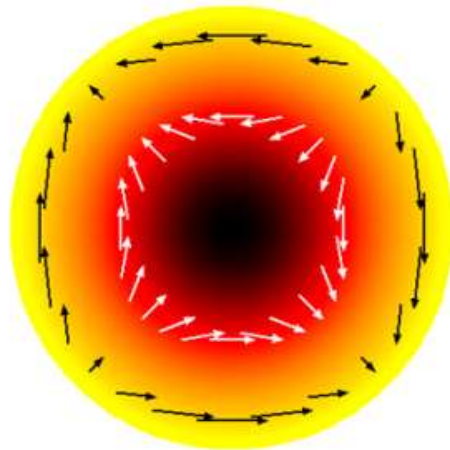
$$= \text{Re} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e}{cR} m\omega \left\{ \varepsilon_+^m(\theta) e^{i(m-1)\varphi} \vec{e}_+ + \varepsilon_-^m(\theta) e^{i(m+1)\varphi} \vec{e}_- + i\varepsilon_z^l(\theta) \vec{e}_z e^{im\varphi} \right\} e^{-im(\omega t - \frac{R}{c})}$$



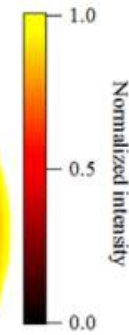
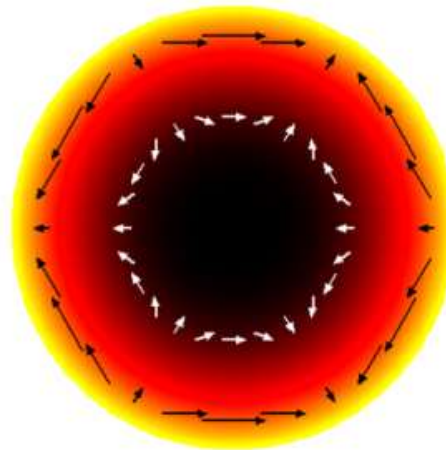
fundamental



2nd harmonic

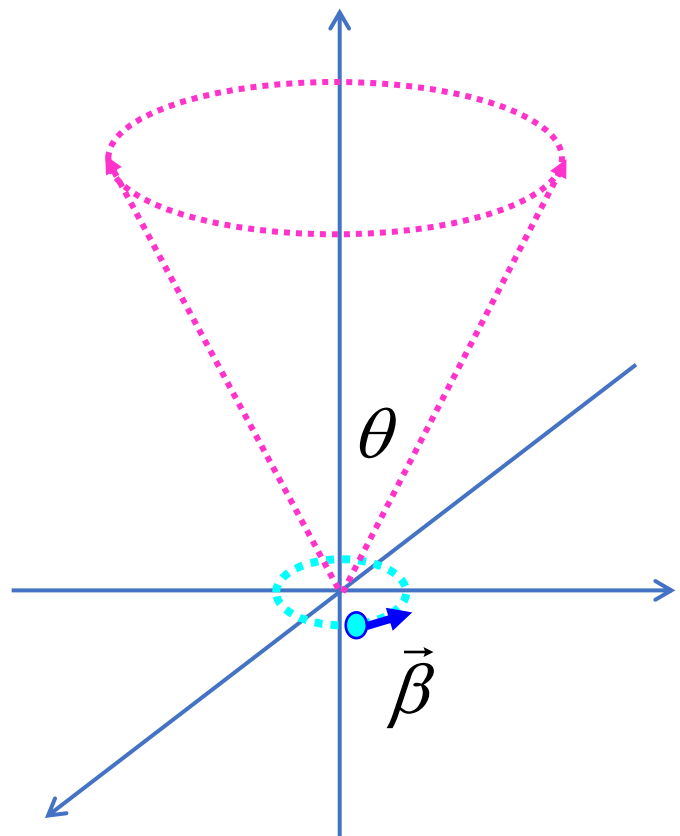


3rd harmonic

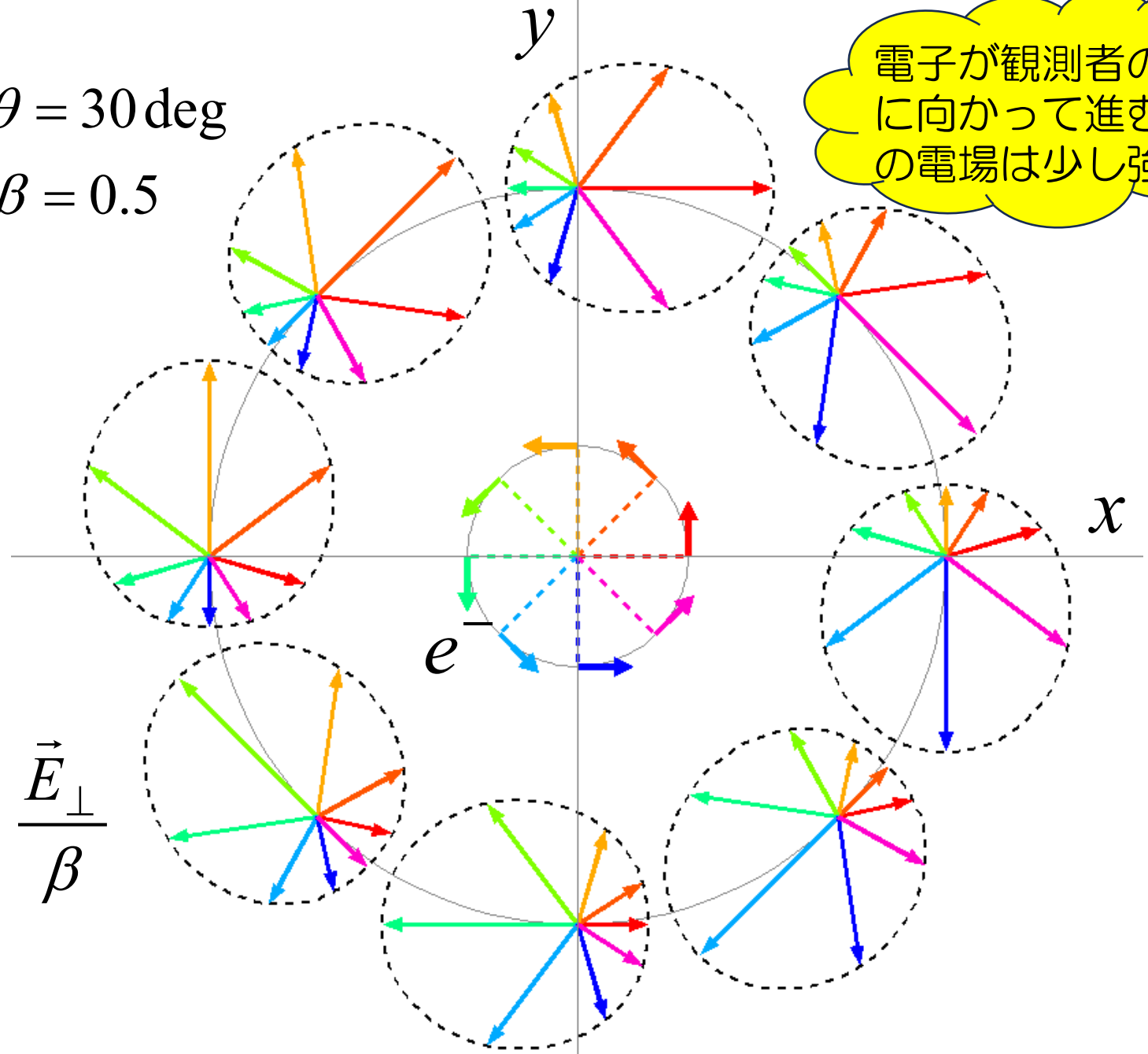


古典電磁気学に基づき
円運動放射を解析する
と高調波成分はらせん
波面を形成しているこ
とがわかった

Electric Field of Radiation from an electron in circular motion



$\theta = 30 \text{ deg}$
 $\beta = 0.5$



電子が観測者の方向
に向かって進むときの
電場は少し強い

Energy and Angular Momentum carried by Radiation from an electron in circular motion

円運動放射は角運動量を運ぶ！

Radiation from electron in circular motion

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \sum_{m=1}^{\infty} e \frac{e^{i(kr - m\omega t + l\varphi)}}{r} \begin{pmatrix} J_m(m\beta \sin \theta) \\ \cot \theta J'_m(m\beta \sin \theta) \\ i\beta J'_m(m\beta \sin \theta) \end{pmatrix}_{r\theta\varphi} + o\left(\frac{1}{r^2}\right)$$

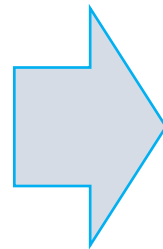


Energy

$$\frac{dU}{dt} = \frac{c}{4\pi} \int r^2 d\Omega \vec{n} \cdot (\vec{E} \times \vec{H})$$

Angular Momentum

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \int \frac{r^3}{4\pi} d\Omega (\vec{E}(\vec{n} \cdot \vec{H}) - \vec{H}(\vec{n} \cdot \vec{E}))$$



$$\frac{\left\langle \frac{dJ_{mz}}{dt} \right\rangle}{\left\langle \frac{dU_m}{dt} \right\rangle} = \frac{N_m \hbar m}{N_m \hbar m \omega}$$

$$\left(N_m \equiv \frac{m\omega}{4\pi\hbar c} \int r^2 d\Omega (A_{\theta}^{(1)} A_{\theta}^{(1)*} + A_{\varphi}^{(1)} A_{\varphi}^{(1)*}) \right)$$

円運動放射の運ぶエネルギーと角運動量を古典論的に計算するとスピン以外の角運動量を運ぶことが示せた

Does each photon possess
the characteristic wave property?

放射光の波の性質に関する実験をやっているうちにこんな疑問が湧いてきた

放射光の示す波の性質は光子一つ一つに付随しているものなのだろうか？
それとも光子の集団がこういう波の構造を形成しているのだろうか？

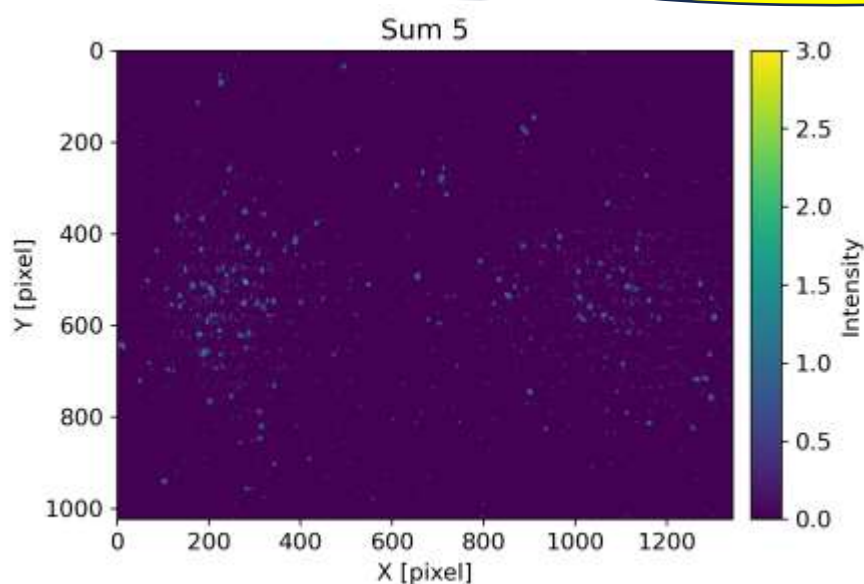
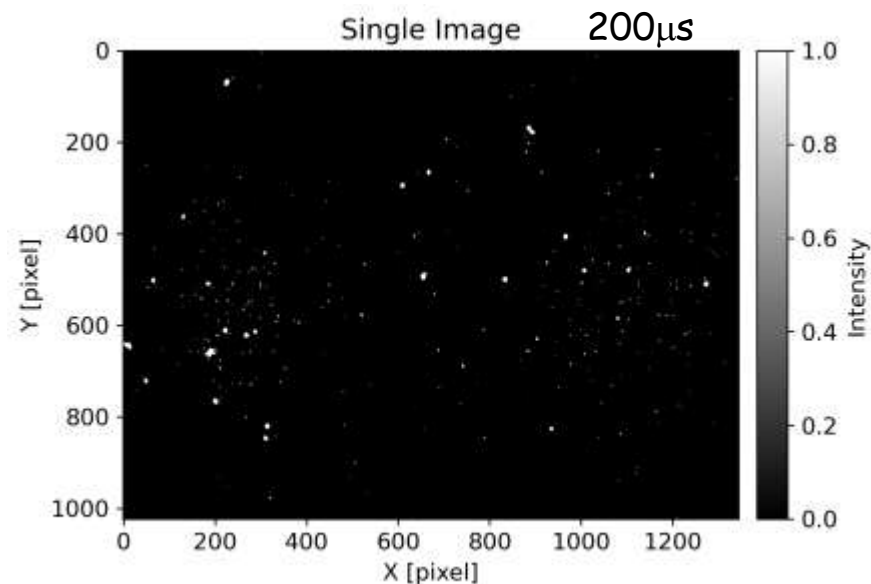
一粒の放射光の波の性質？

放射光は粒か波か？

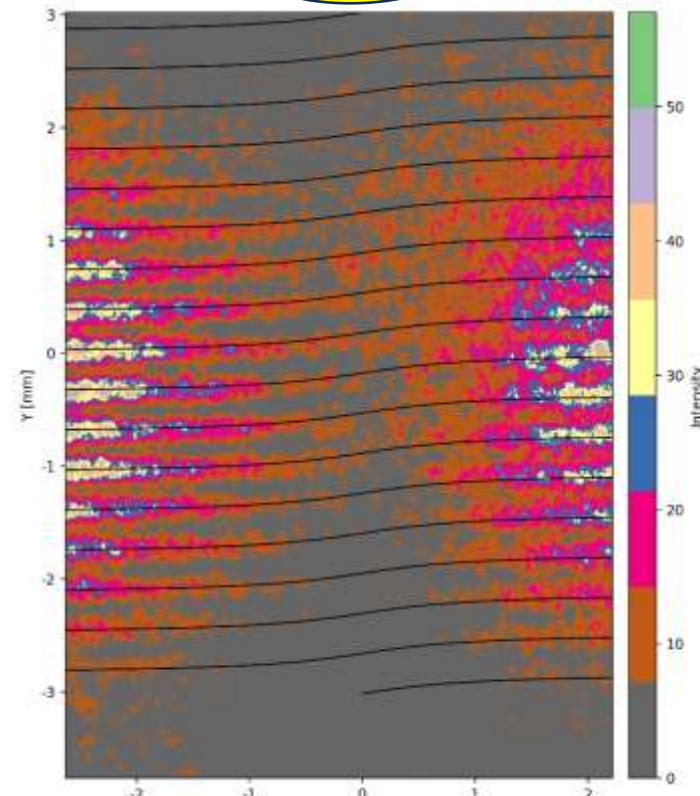
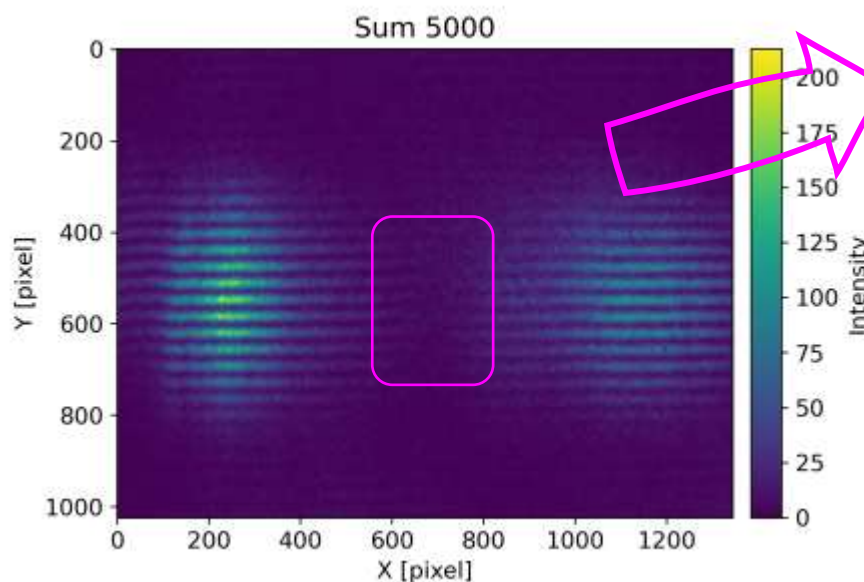
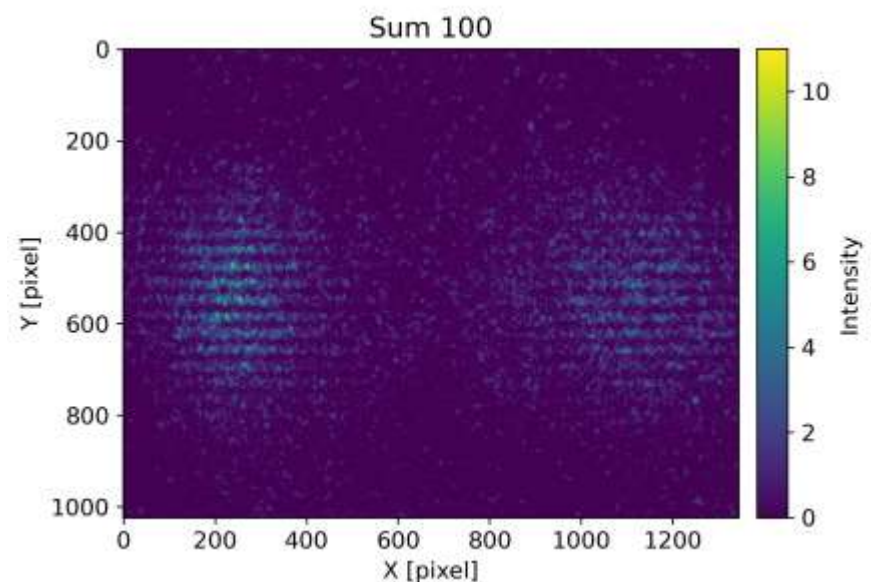
加藤政博（広島大／分子研）

Double-slit Experiment for Vortex Undulator Radiation in Photon-counting Regime

放射光光渦に対する光子計数領域でのダブルスリット干渉実験



減光フィルターで光量を落とし、光学系に2個以上の光子が同時に存在しないような条件下で実験



光子計数領域でも
断裂が見えた！

S. Wada, MK et al., *Sci Rep* 13, 22962 (2023)
H. Ota, Bachelor Thesis (Hiroshima U., 2021)

Single electron storage in a synchrotron?

一個の電子から出る放射光
を観測してみたい！



シンクロトロンに一個だけ
電子を蓄積する？

In case of UVSOR ($C=53.3\text{m}$, $I_b=300\text{mA}$)

Beam Current : $I_b = eN_e f_{rev}$

Number of Electrons : $N_e = \frac{I_b}{ef_{rev}}$

通常運転

$$I_b = 300 [\text{mA}] = 0.3 [\text{A}]$$

$$N_e = \frac{I_b}{ef_{rev}} = \frac{0.3 [\text{A}]}{1.6 \times 10^{-19} [\text{C}] \times 5.6 \times 10^6 [\text{1/sec}]} = 3.3 \times 10^{11} [\text{electron}]$$

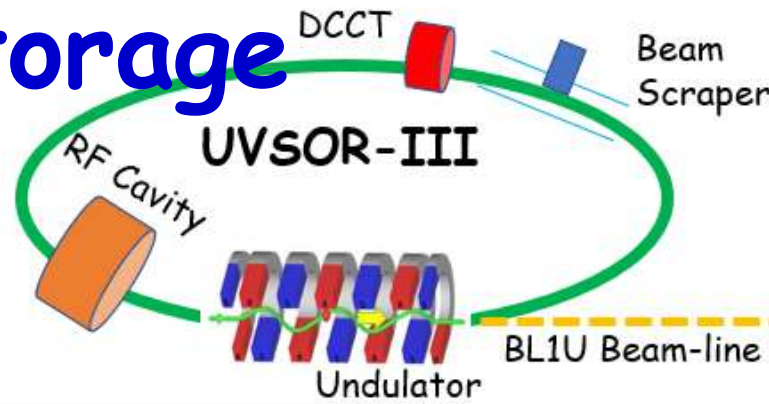
単一電子蓄積

$$N_e = 1$$

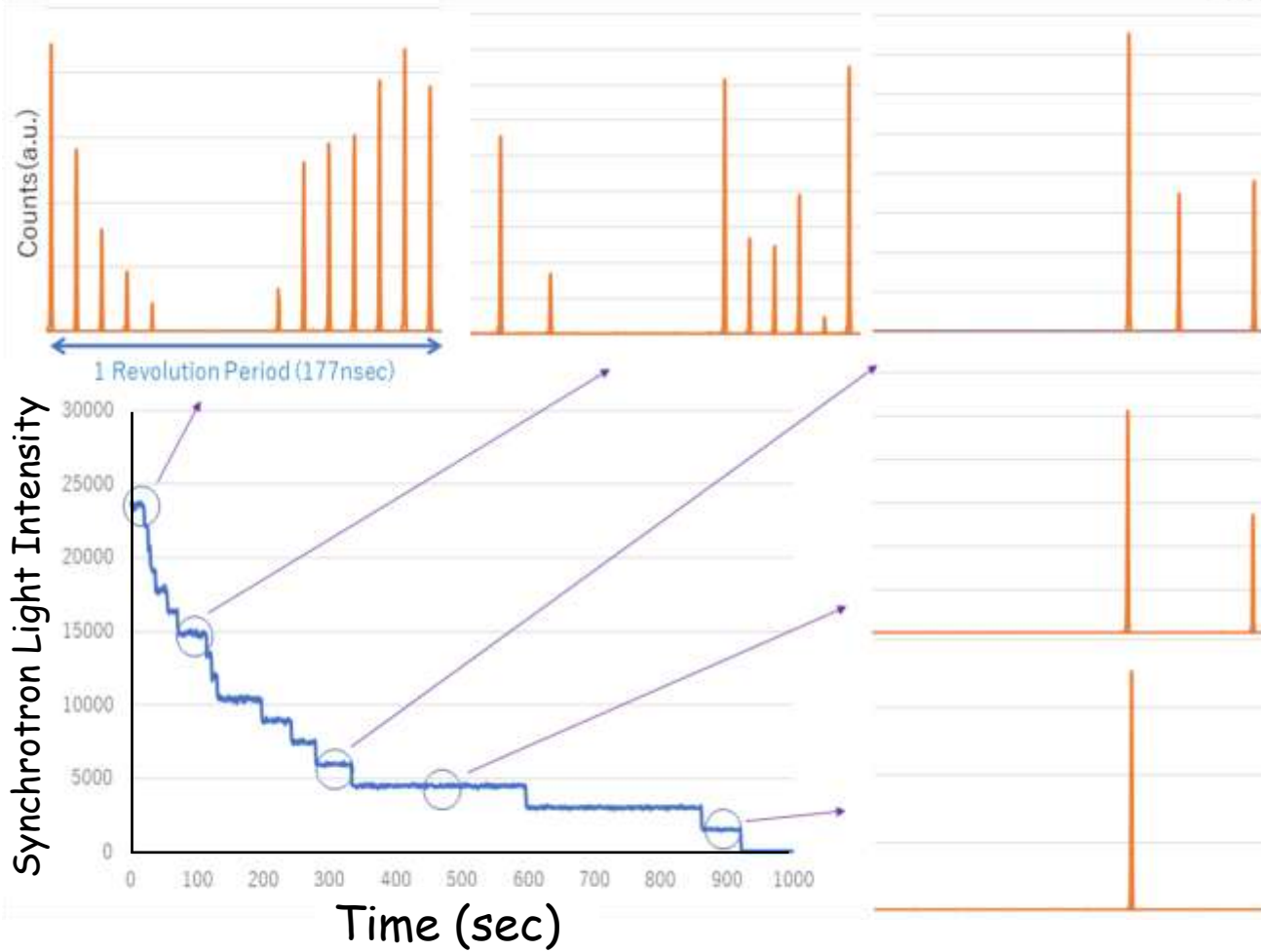
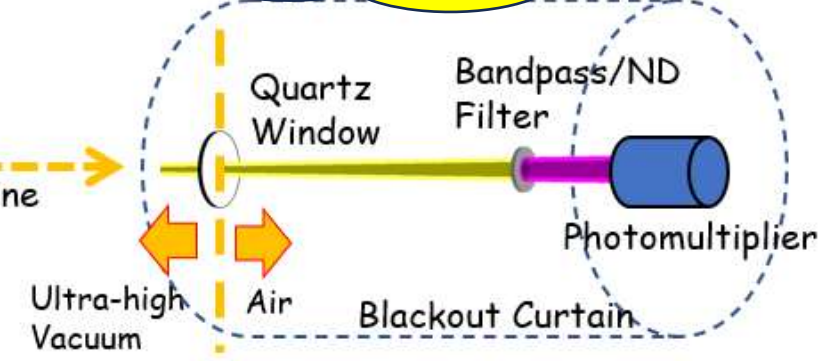
$$I_b = ef_{rev} = 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}] \times 5.6 \times 10^6 [\text{1/sec}] = 0.9 \times 10^{-12} [\text{C/sec} = \text{A}] \approx 1 [\text{pA}]$$

Single electron storage at UVSOR-III

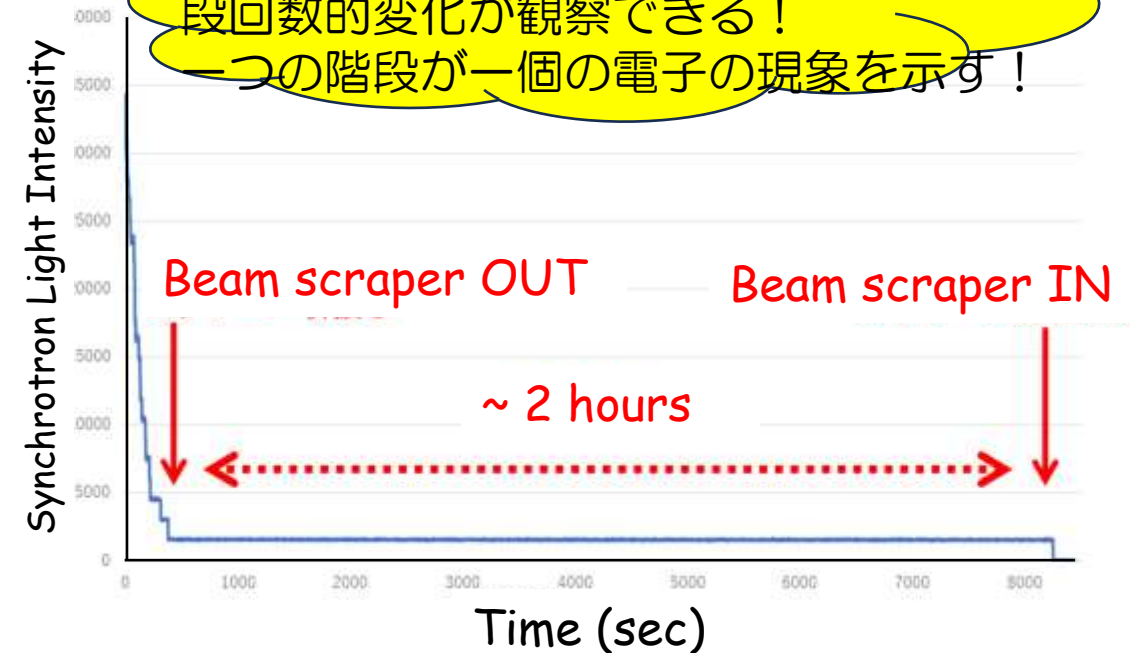
R. Shinomiya, Bachelor's Thesis (Hiroshima U., 2021)
R. Shinomiya, MK et al., presented at JSR2022



ビームスクレーパを使って
電子を減らしていく



電子数が小さくなると放射光の強度に階段回数的変化が観察できる！
一つの階段が一個の電子の現象を示す！



How many photons does an electron emit during single passage through undulator ?

$$F^n = \frac{d^2 F^n}{d^2 \Omega} \bigg|_0 \cdot 2\pi \sigma_{r'}^2 = \frac{\pi}{2} \alpha N \frac{\Delta \omega}{\omega} \frac{I}{e} Q_n(K)$$

Harmonic number

On-axis flux

Angular divergence

$$\sigma_{r'} = \frac{1}{2\gamma} \sqrt{\frac{1+K^2/2}{nN}}$$

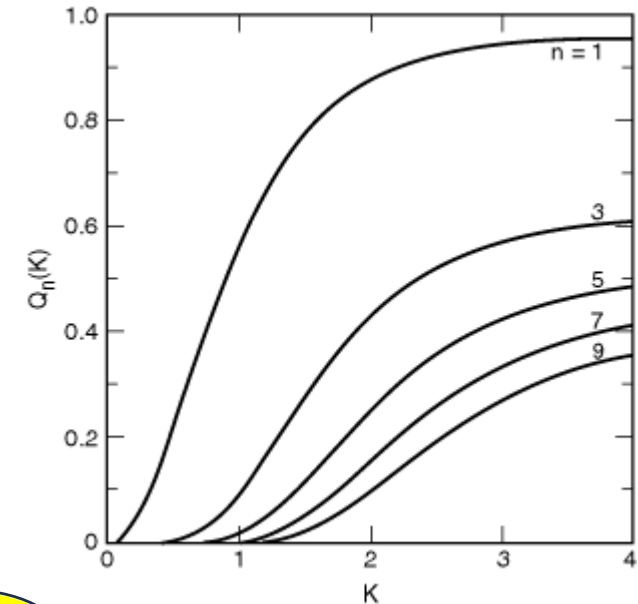
Number of magnetic period

Bandwidth $\frac{\Delta \omega}{\omega} \sim \frac{1}{N}$

Fine structure constant

Number of electrons

K. J. Kim, AIP Conf. Proc. 184, 565 (1989)

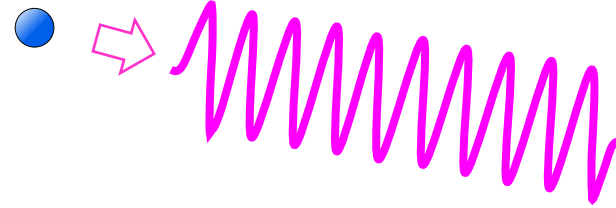
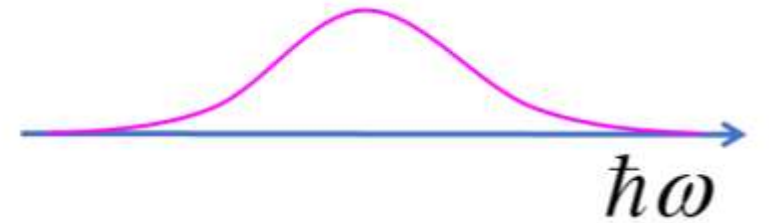
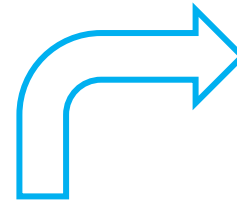
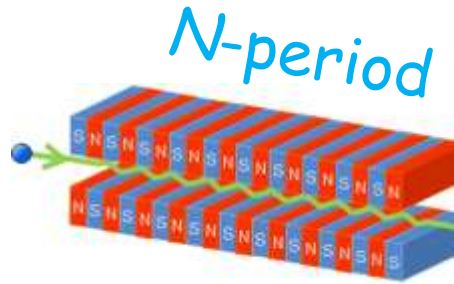


一個の電子がアンジュレータを一回通過するときに出す基本派の平均光子数は1よりもだいぶ小さい！

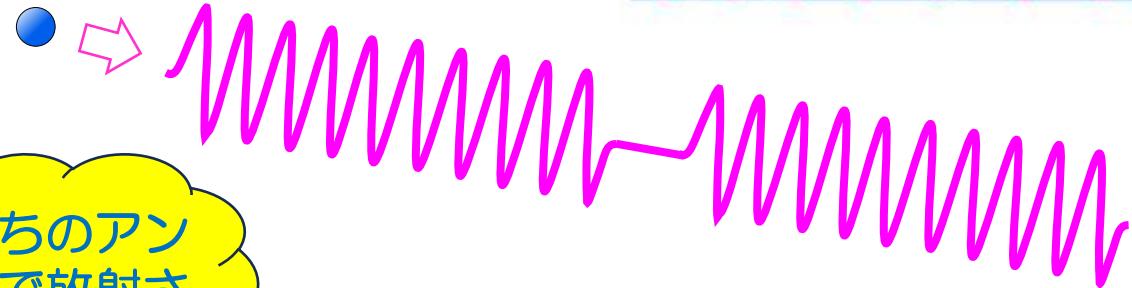
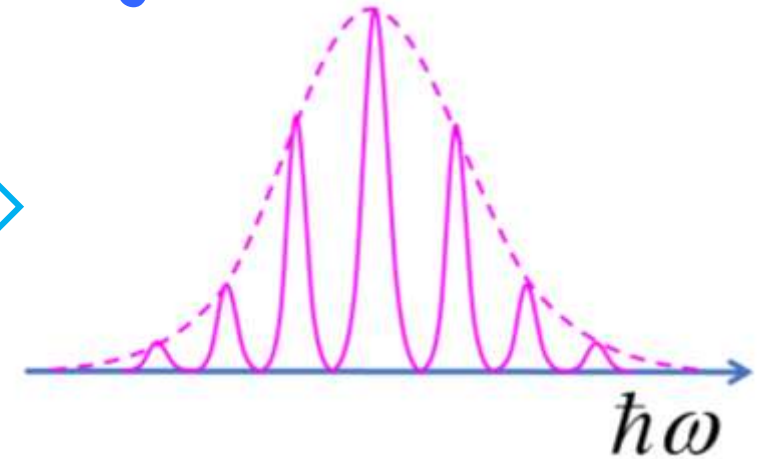
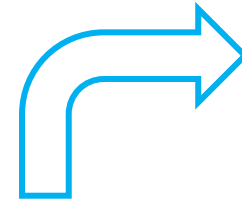
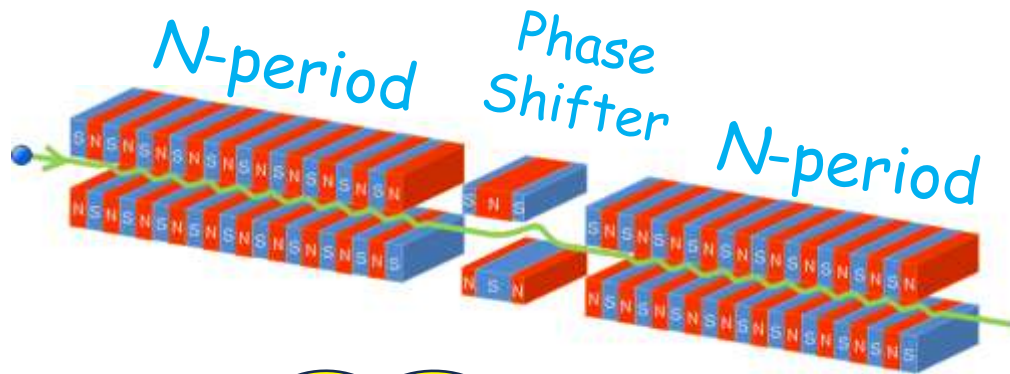
$$F^1 = \frac{\pi}{2} \alpha Q_1(K) \sim \alpha \equiv \frac{e^2}{\hbar c} \cong \frac{1}{137} \ll 1$$

In case of UVSOR, an electron passes through the undulator $5.6E6$ times.
 $\Rightarrow$ Number of photons emitted in one second is $\sim 6E4$.

Single photon emission from single electron in Tandem Undulator



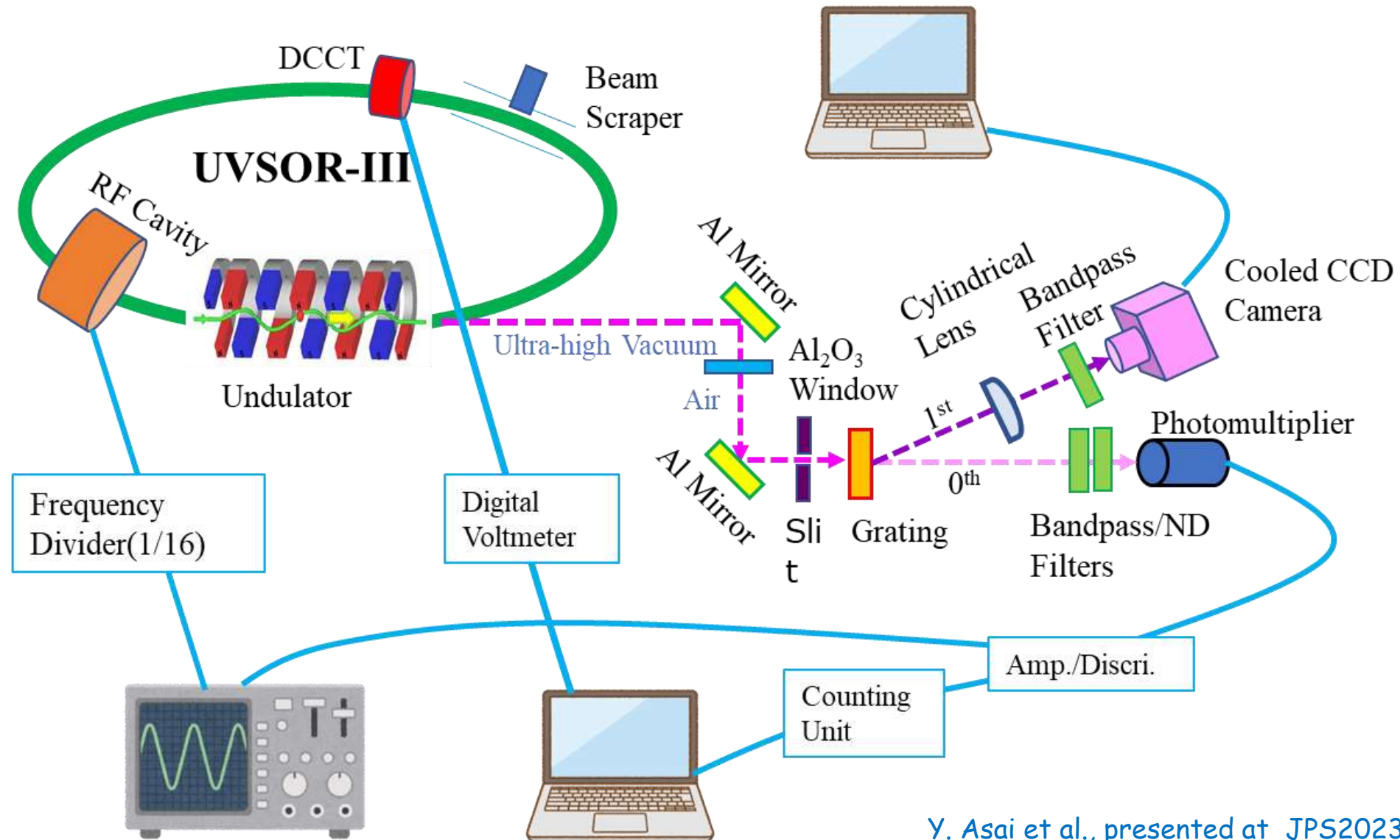
?



一個の電子が2台のアンジュレータを通過する際に放射する光子は高々1個

光子はどちらのアンジュレータで放射されたのだろうか??

Single Photon Spectrum Measurement at UVSOR BL1U



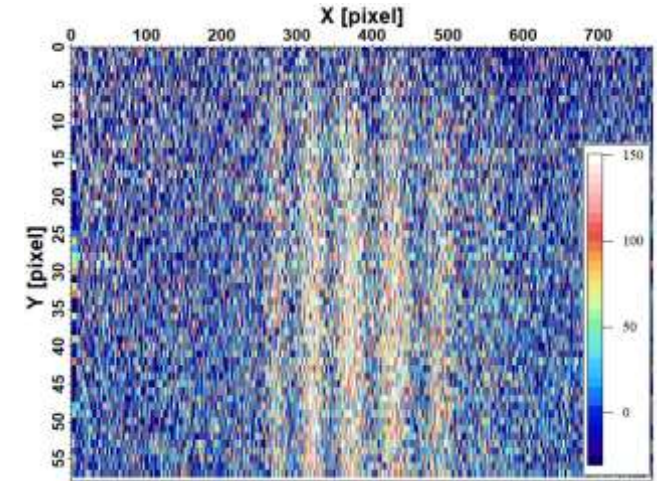
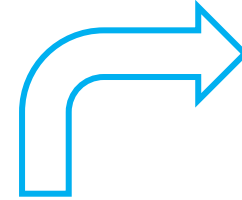
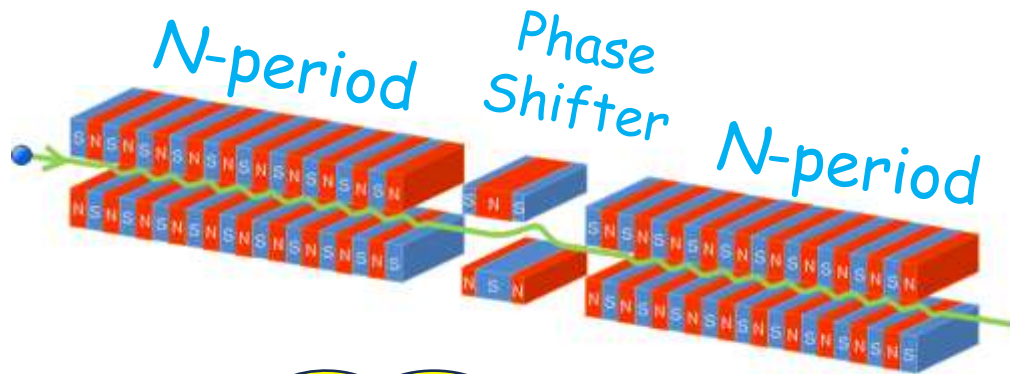
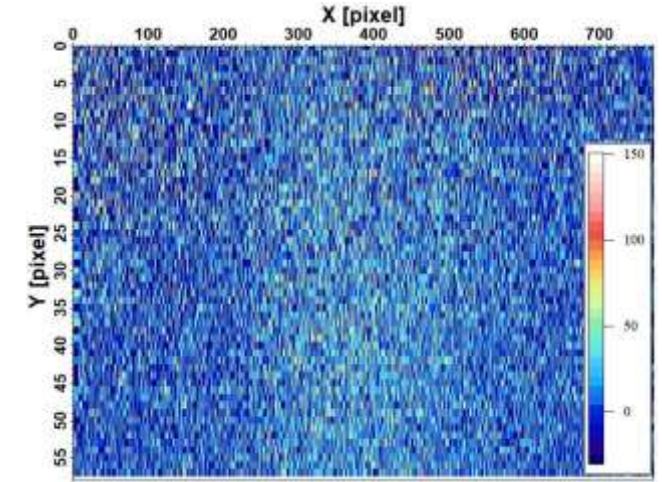
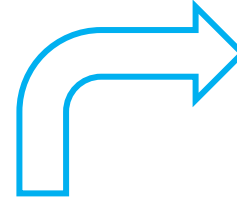
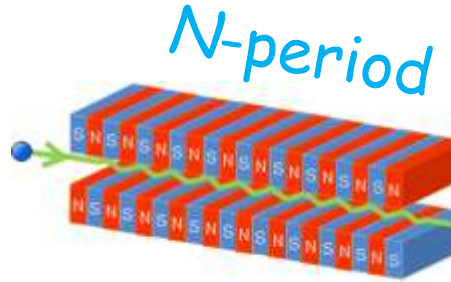
Y. Asai et al., presented at JPS2023 (Sendai, 2023)

Y. Asai, Bachelor's thesis (Hiroshima U., FY2022)

Single photon emission from single electron in Tandem Undulator

Y. Asai et al., presented at JPS2023 (Sendai, 2023)

Y. Asai, Master's thesis (Hiroshima U., FY2024)



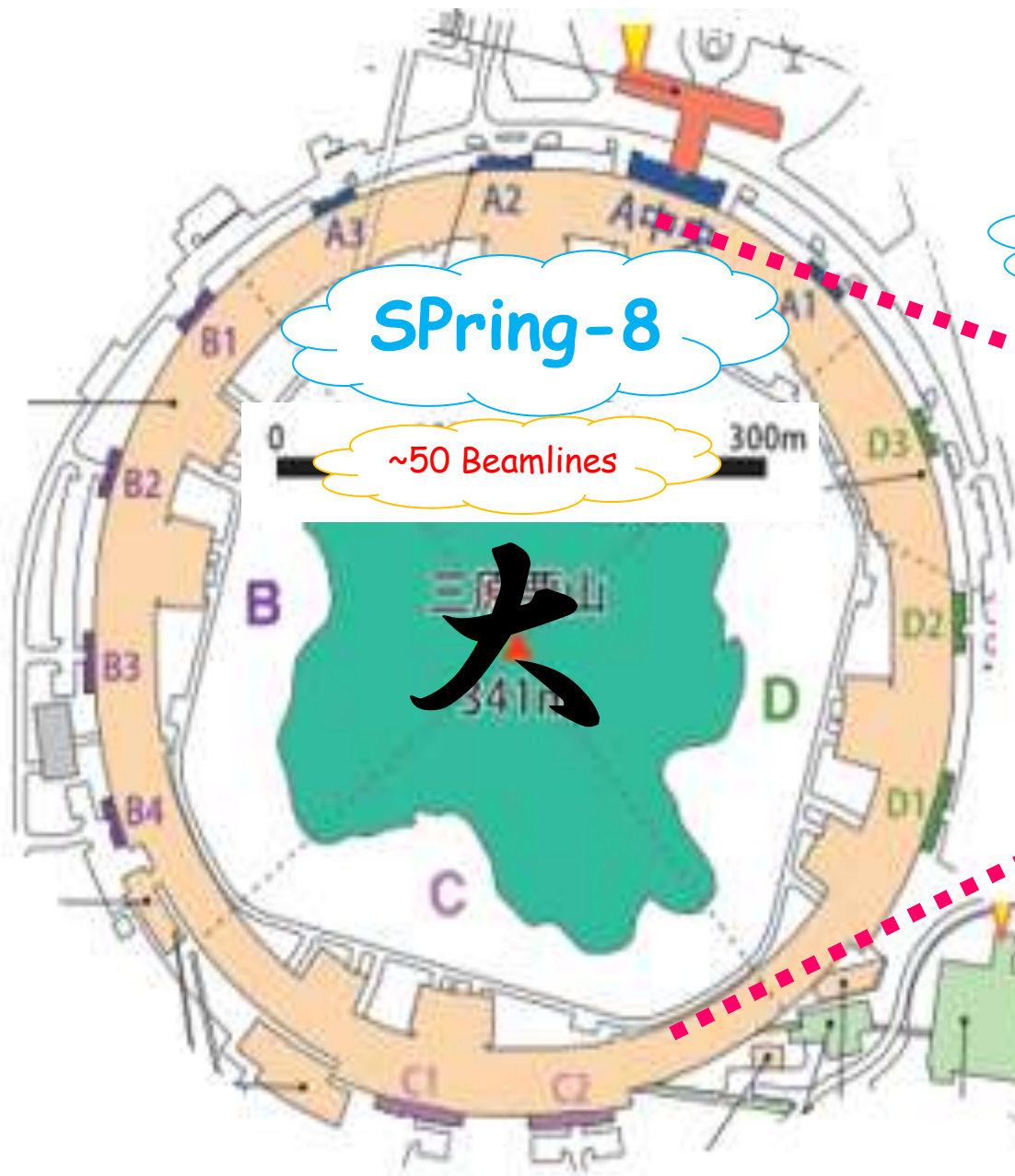
一個の電子からの放射でもスペクトル変調が見えた！

光子はどちらか片方のアンジュレータで生成されるのではない??

おわりに

放射光は粒か波か？

加藤政博（広島大／分子研）



SPring-8

~50 Beamlines

NanoTerasu

Max. 26
Beamlines

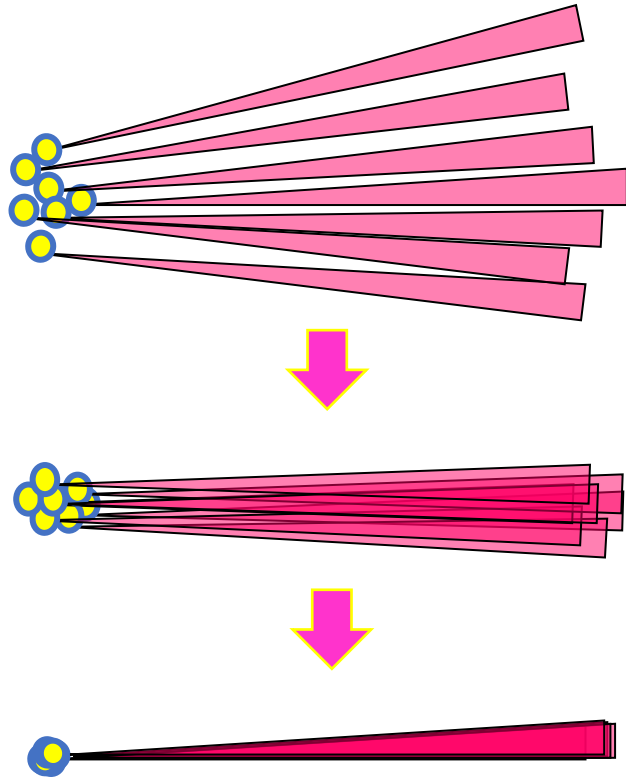
UVSOR

14 Beamlines

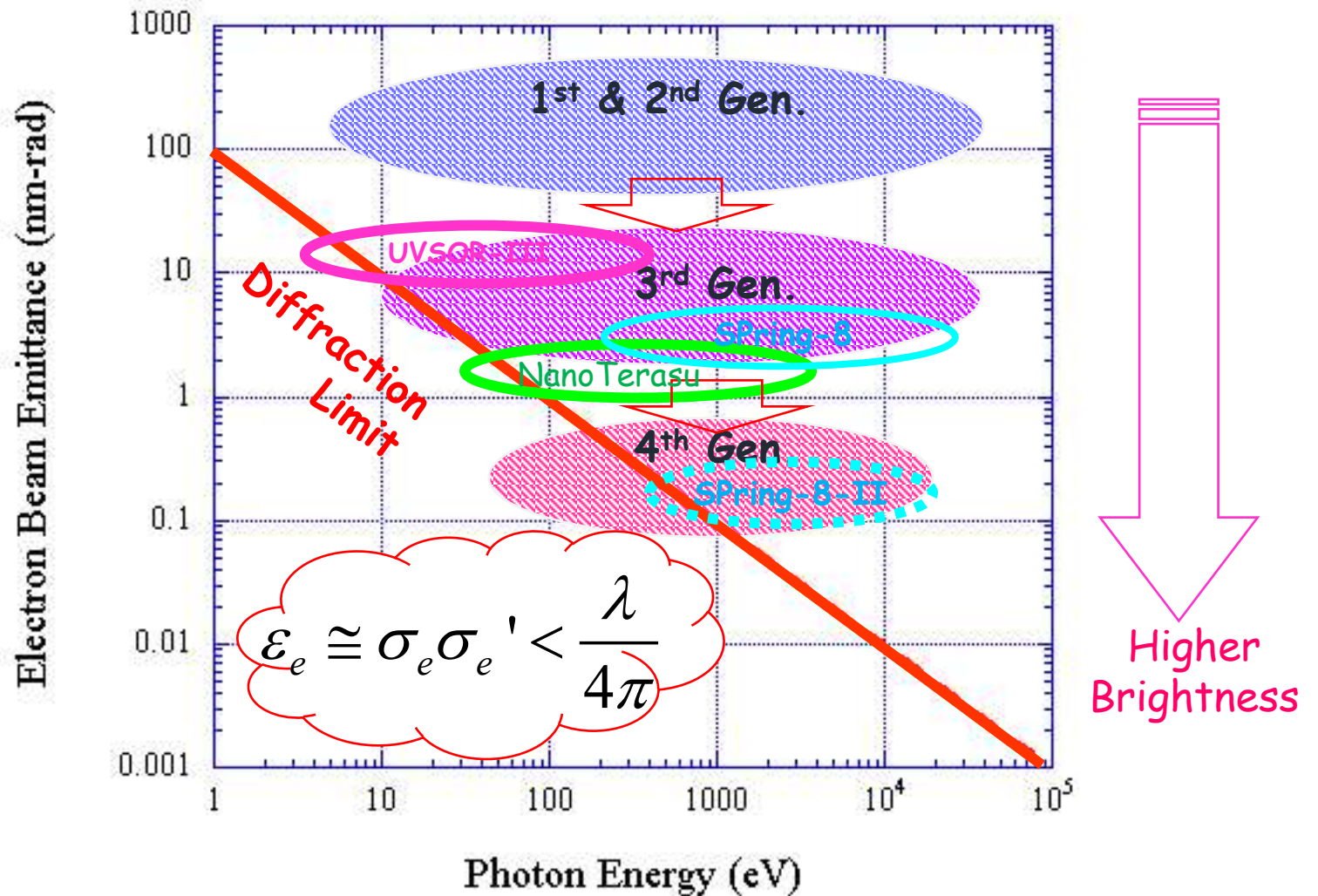
<http://www.slitj.tagen.tohoku.ac.jp/outline/technology.html>

<http://www.spring8.or.jp/ja/>

High Brightness => Diffraction-Limit

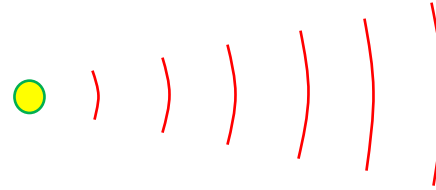


電子ビームの空間的広がりが光固有の
広がりよりも小さくなると、電子ビー
ムの性能をそれ以上上げて光の輝度
は向上しない



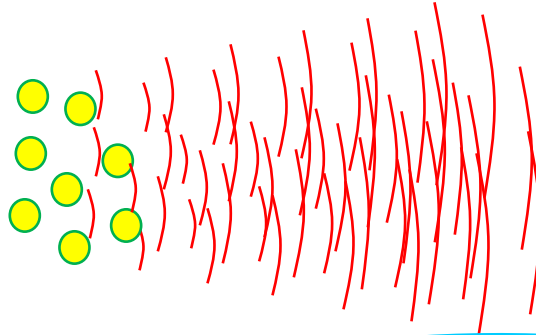
Coherence of Synchrotron Radiation

Undulator radiation
from a single electron



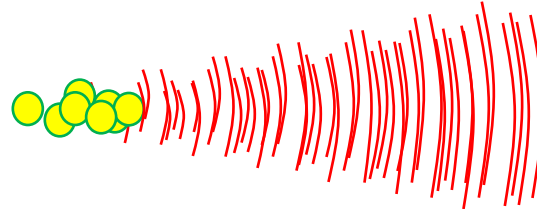
Spatially coherent
Temporally coherent

Undulator radiation
from an electron bunch



Spatially incoherent
Temporally incoherent

Diffraction-limited
Undulator radiation



Spatially coherent
Temporally incoherent

ピンホールから
出たような光

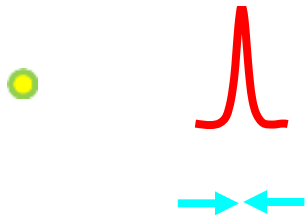
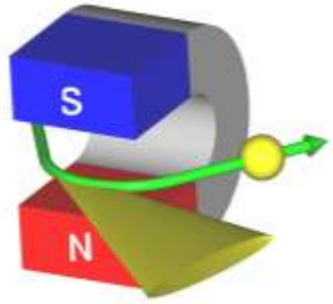
Free Electron Laser



Spatially coherent
Temporally coherent

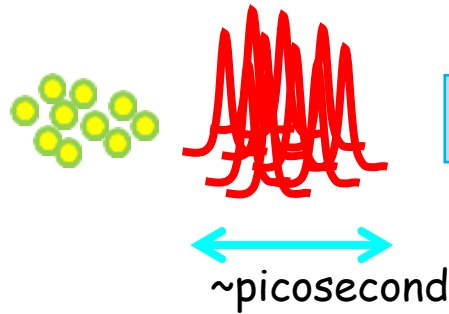
How to use Synchrotron Radiation

Bending Magnet

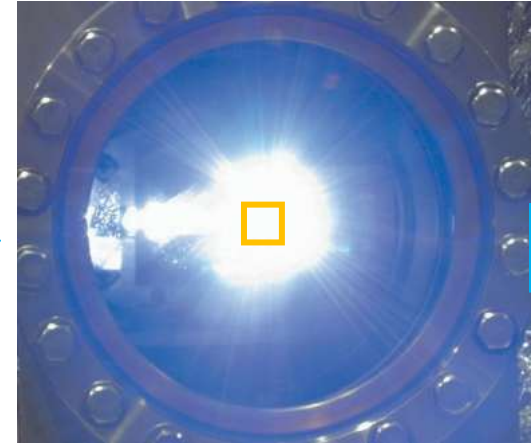


Atto~zeptosecond

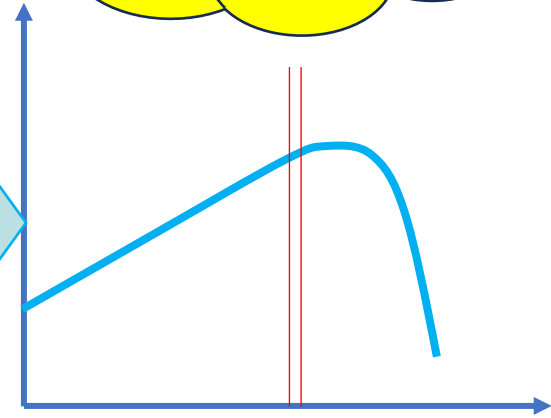
$$N_e \sim 10^9 \sim 10^{11}$$



~picosecond

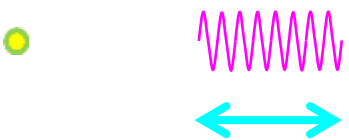
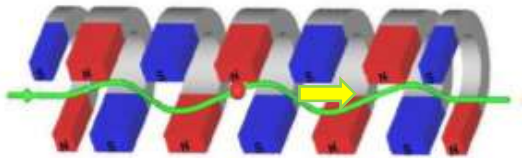


従来の放射光利用では試料上に必要なエネルギー帯の光子を如何にたくさん集めるかが重要

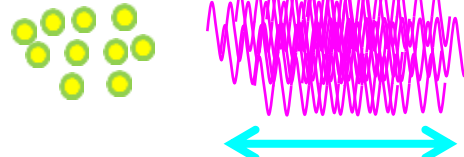


$\hbar\omega$

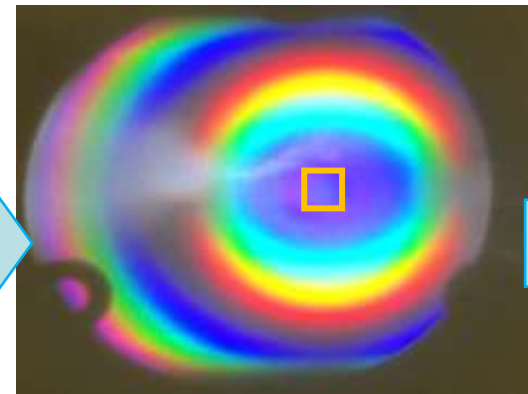
Undulator



Femto~attosecond

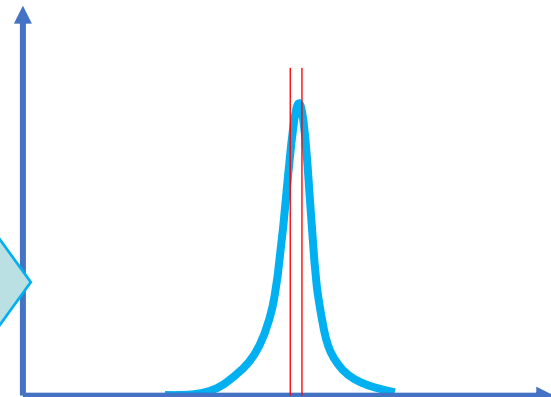


~picosecond



Slit

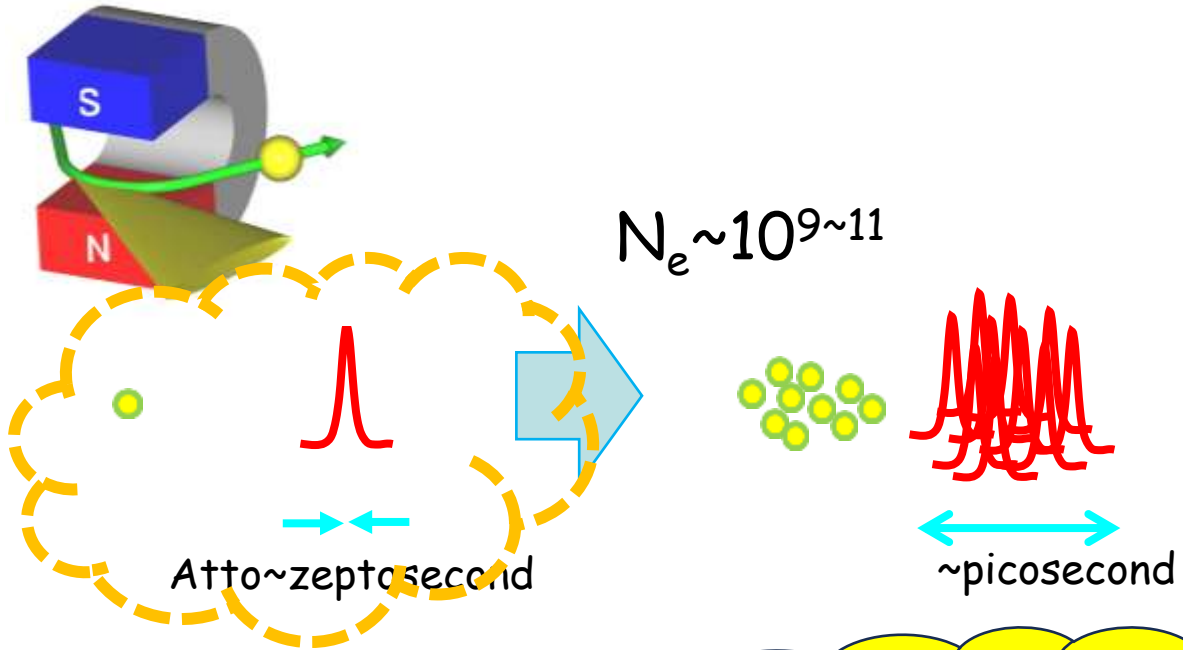
Monochromator



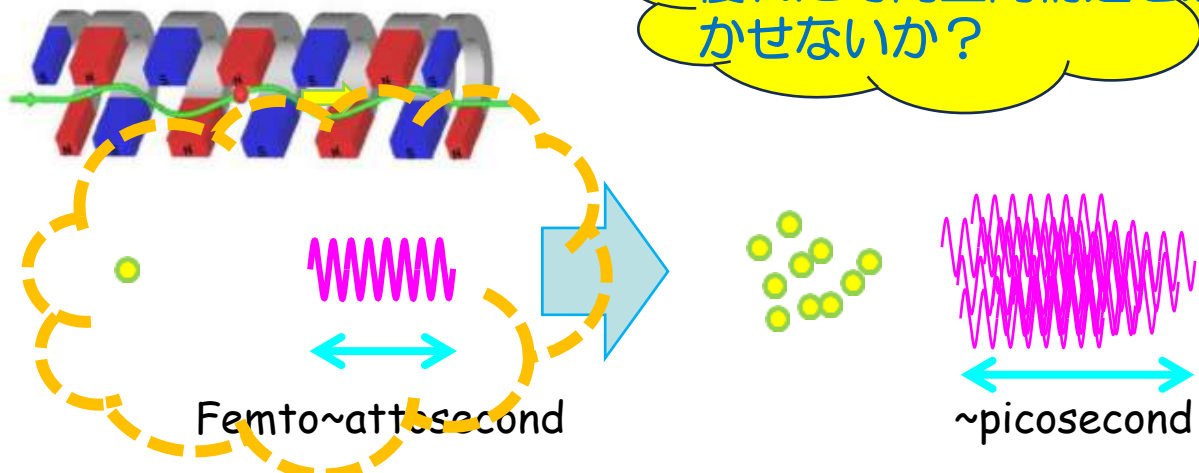
$\hbar\omega$

How to use Synchrotron Radiation

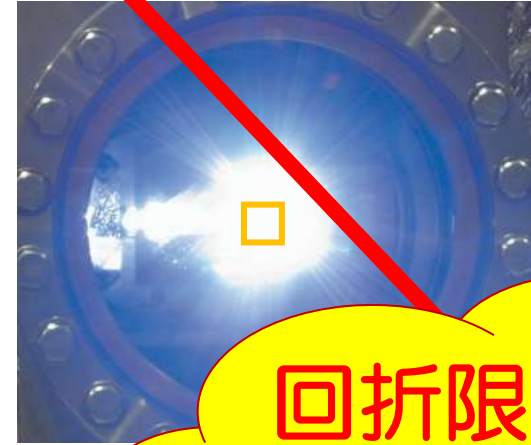
Bending Radiation



Undulator Radiation



放射光が本来有している
優れた時間空間構造を活
かせないか？



回折限界放射光は
とれたてを生で食
べよう！



Thank You !