

2009年度 高エネルギー加速器科学セミナー I

日時: 5月20日(水曜日)午前10時~12時

場所: 2号館1階総研大講義室

放射光を用いた物質科学

物質構造科学研究所

放射光科学第二研究系

足立伸一

アウトライン

- 放射光イントロダクション
- 加速器と放射光源
- ビームラインと検出器
- 物質科学と放射光
- 将来計画



放射光とは

光速に近い高エネルギーの荷電粒子が磁場中を通過すると、磁場によって軌道を曲げられ、そのとき軌道の接線方向に電磁波(光)を出す。

この現象をシンクロトン放射、このとき放出される電磁波をシンクロトン放射光という。

放射光はマイクロ波からX線にわたる広い範囲の連続スペクトルを持っており、指向性がよく、偏光している。

このため、現在では真空紫外からX線に至る波長領域の最も優れた光源として、科学技術の広い分野で用いられるようになってきている。

電子の蓄積エネルギーと速度

電子の蓄積エネルギーEは、GeV (= 10^9 eV)単位の領域にある。例えば、**E=2.5GeV**の時、ローレンツ因子 γ は、

$$\gamma = E / (mc^2) = 2.5 \text{ [GeV]} / 0.511 \text{ [MeV]} \\ \approx \mathbf{4900}$$

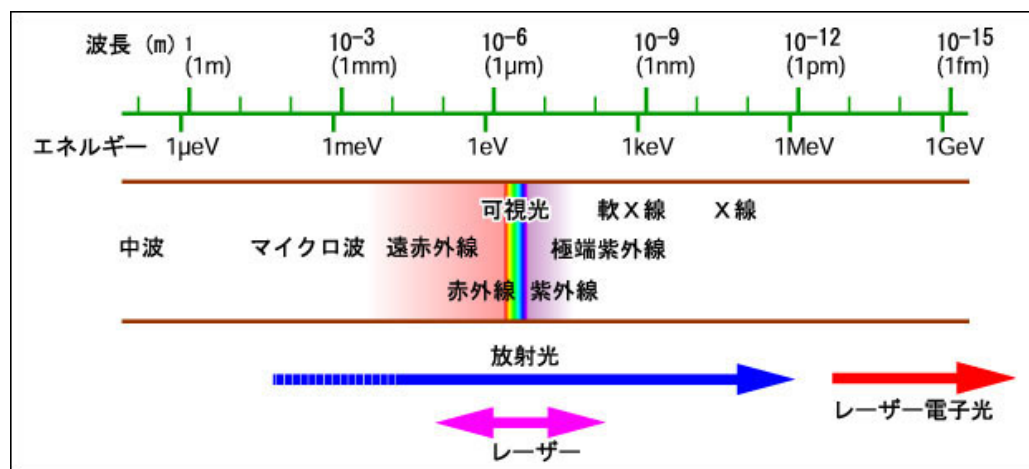
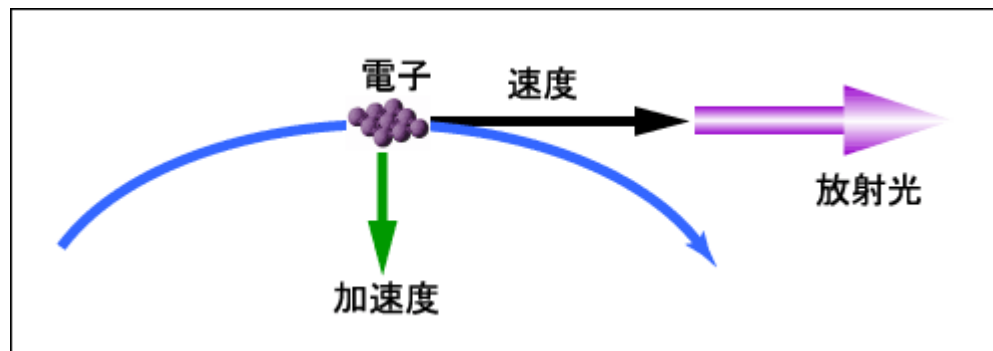
となる。 mc^2 は電子の静止エネルギーである。このときの電子の速度は、ほぼ光速に等しい。

$$\beta = v/c = (1 - 1/\gamma^2)^{1/2} = \mathbf{0.999999998}$$

放射光の発生



高エネルギー加速器研究機構
(茨城県つくば市)



放射光入門

http://prwww.spring8.or.jp/intro_sr/page3_2b.shtml

シンクロトロン放射は 相対論的電磁気学で与えられる

運動する点電荷による電磁ポテンシャル (Liénard-Wiechert ポテンシャル)

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0 e}{4\pi} \frac{\dot{\mathbf{z}}(t_0')}{\left| \mathbf{x} - \mathbf{z}(t_0') \right| - \frac{1}{c} \dot{\mathbf{z}}(t_0') \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{z}(t_0'))}$$

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\left| \mathbf{x} - \mathbf{z}(t_0') \right| - \frac{1}{c} \dot{\mathbf{z}}(t_0') \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{z}(t_0'))}$$

Maxwell方程式より、放射される電場と磁場は、以下のようになる。

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{(n(t_0') - \boldsymbol{\beta}(t_0'))(1 - \boldsymbol{\beta}^2(t_0'))}{\alpha^3(t_0')R^2(t_0')} + \frac{\mathbf{n}(t_0') \times \{ \mathbf{n}(t_0') - \boldsymbol{\beta}(t_0') \} \times \dot{\boldsymbol{\beta}}(t_0')}{c\alpha^3(t_0')R(t_0')} \right]$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{c} \mathbf{n}(t_0') \times \mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$$

$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$ の第1項は粒子の加速度を含まず、 $1/R^2$ で小さくなる。
第2項は粒子の加速度を含み、電磁放射に関係する。

加速された点電荷による電磁波を考える。Poyntingベクトル $\mathbf{S}(\mathbf{x},t)$ を用いて、点電荷が単位時間加速されたときに放射する全エネルギー dW/dt を求める。

$$\mathbf{S}(\mathbf{x},t) = \frac{1}{\mu_0 c} (\mathbf{E}(\mathbf{x},t))^2 \mathbf{n}(t_0')$$

$$\frac{dW}{dt} = \int \mathbf{S}(\mathbf{x},t) \cdot \mathbf{n}(t_0') \alpha(t_0') R^2(t_0') d\Omega$$

$$= \frac{1}{\mu_0 c^3} \left(\frac{e}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \int d\Omega \frac{[\mathbf{n}(t) \times \{(\mathbf{n}(t) - \boldsymbol{\beta}(t)) \times \dot{\boldsymbol{\beta}}(t)\}]^2}{(1 - \mathbf{n}(t) \cdot \boldsymbol{\beta}(t))^5}$$

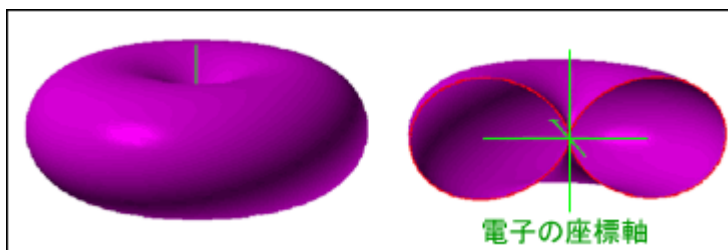
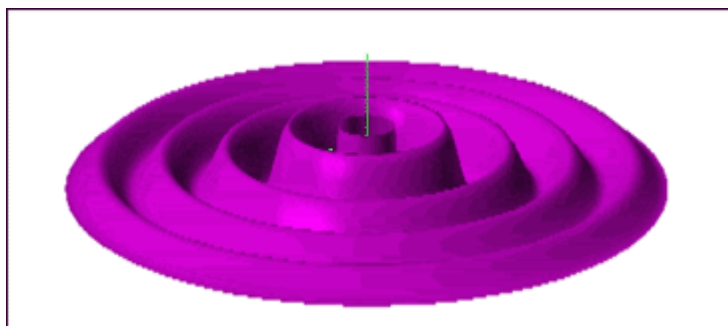
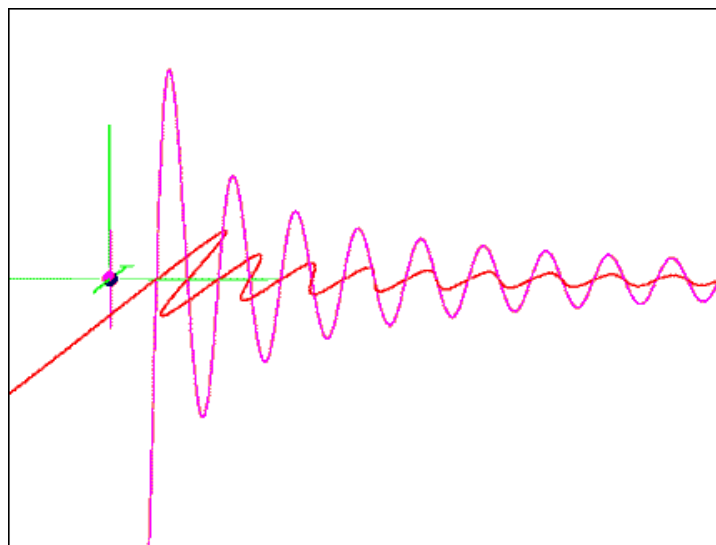
$\beta(=v/c) \ll 1$ のとき、 dW/dt は電気双極子による放射の式に帰着する。

$$\boldsymbol{\beta} \parallel \dot{\boldsymbol{\beta}} \text{ のとき、 } \mathbf{n} \times \{(\mathbf{n} - \boldsymbol{\beta}) \times \dot{\boldsymbol{\beta}}\} = \mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \dot{\boldsymbol{\beta}})$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{e^2 \dot{\mathbf{v}}^2(t)}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3} \int d\Omega \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \frac{\mathbf{v}(t)}{c} \cos \theta)^5}$$

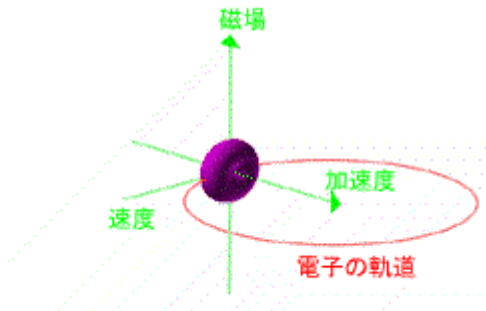
$\beta = v/c$ が1に近づくととき、 dW/dt は点電荷の進行方向 $\theta=0$ に鋭く傾く。

加速運動する荷電粒子による 電磁波の放射



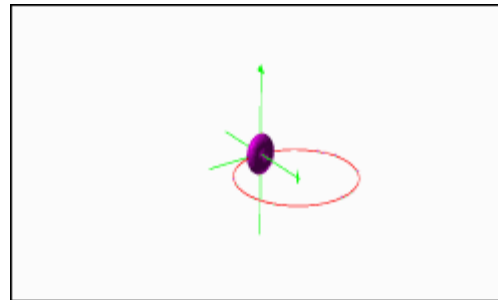
上下に単振動する電子が水平面内に放出する電磁波
の空間分布と電磁波のパワー分布

サイクロトロン放射と シンクロトロン放射



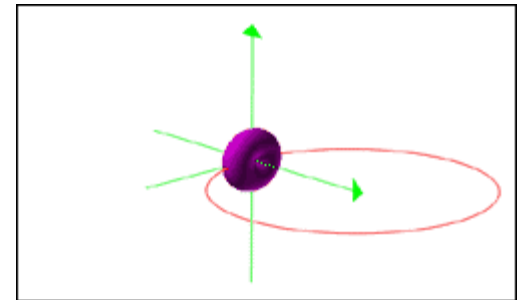
$$E \ll mc^2$$

古典力学が成り立つ。
(サイクロトロン放射)



$$E \sim 250 \text{ keV}$$

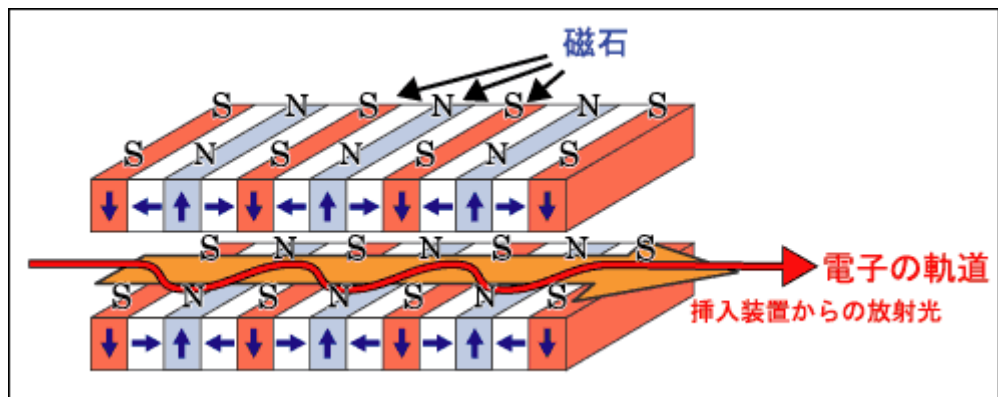
相対論的な世界へ
(シンクロトロン放射)



$$E \sim 10 \text{ MeV}$$

電子のエネルギーが高くなり、電子の速度が光速に近づくと、
相対論的な効果により放射光の指向性が強くなる。
同時に、ドップラー効果により波長が短くなる。

放射光源

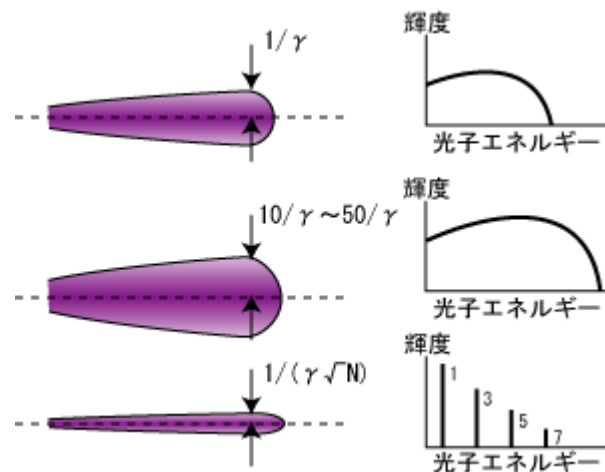
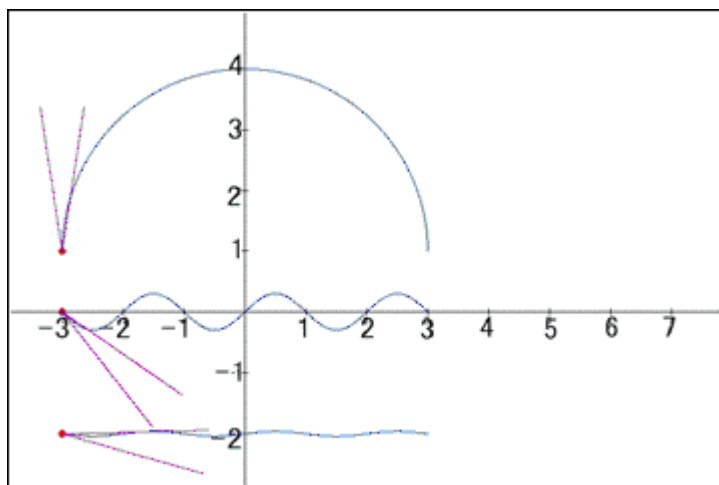


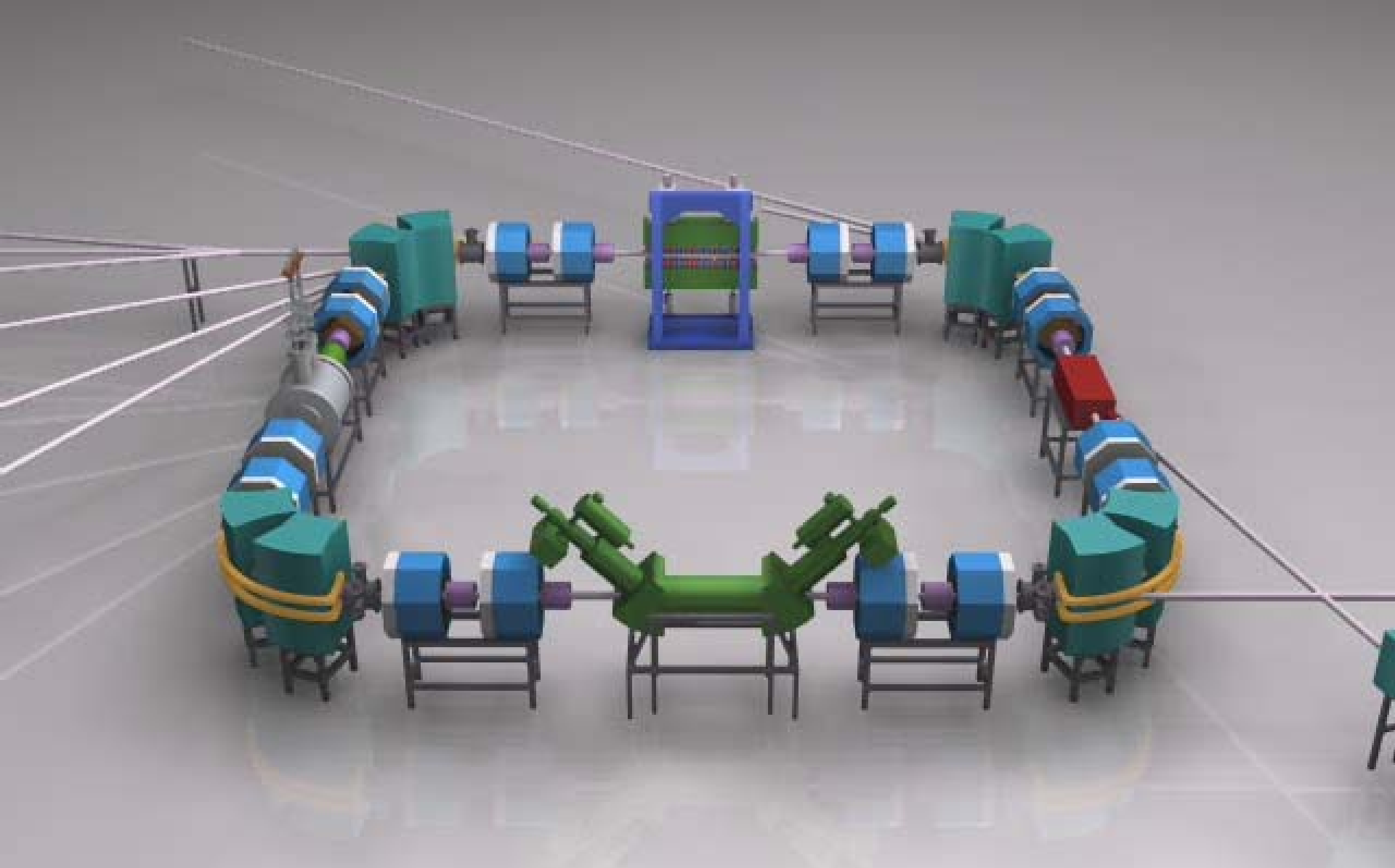
放射光の発生装置である光源には、電子ビームの軌道を曲げるための「偏向電磁石」の他に、放射光を発生させることを目的として、電子ビームの軌道に挿入する「挿入光源」がある。

偏向電磁石

ウィグラー

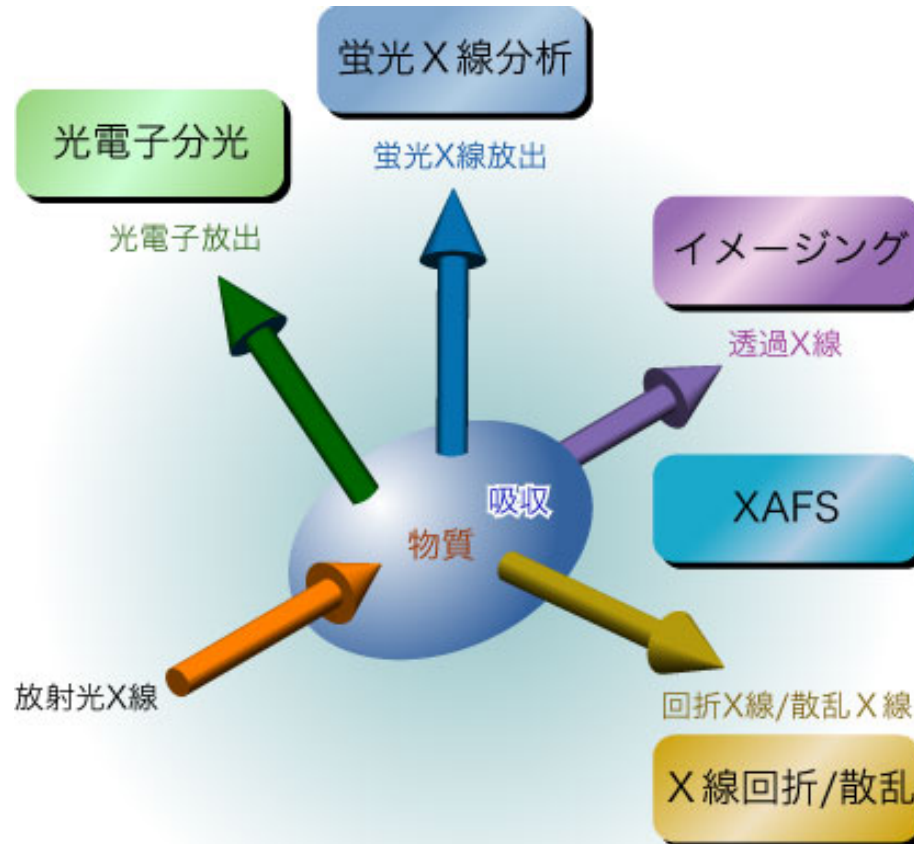
アンジュレータ





<http://www.lightsources.org/>
Institute for Storage Ring Facilities <http://www.isa.au.dk/>
**Electron Injection, Storage and Synchrotron Radiation Light Generation
in the Storage Ring ASTRID.** (Credit: Coldvision Studio/ISA)

放射光の利用



放射光の歴史

- 1865年 電磁場の動力的理論 (James Clerk Maxwell)
- 1905年 特殊相対性理論 (Albert Einstein)
- 1947年 最初の放射光観測。アメリカGM社70MeVシンクロトロン。¹⁾
- 1963年 最初の放射光利用実験。アメリカ企画標準局180MeVシンクロトロン。
(1970年代 第1世代 素粒子実験用のリングで合間を縫って実験)
- 1975年 最初の放射光専用リング。SOR-RING運転開始。²⁾
(1980年代 第2世代 放射光専用リング、挿入光源開発)
- 1983年 PFリング運転開始³⁾
(1990年代 第3世代 挿入光源利用の本格化)
- 1993年 最初の第3世代光源、アメリカAdvanced Light Source運転開始)
- 1997年 SPring-8運転開始⁴⁾
(2000年代 第4世代 放射光のコヒーレント、短パルス化)
- 2008年 世界各地で建設・計画が進行中。

参考文献

- 1) Blewett, J. P. (1998) *J. Synchrotron Rad.* **5**, 135-139.
- 2) 佐々木泰三 (2005) 加速器, 2, 433-442, Taizo Sasaki (1998) *J. Synchrotron Rad.* **5**, 140-146,
佐々木泰三 (1987) 固体物理 **22**, 1007-1016, 佐々木泰三 (1988) 固体物理 **23**, 142-150.
- 3) 佐々木泰三 (2008) 放射光, 21, 150-154.
- 4) 菊田惺志 (2008) 放射光, 21, 155-167.

世界初の放射光の観測 アメリカGM社70MeVシンクロトロン

Blewett, J. P. (1998) *J. Synchrotron Rad.* **5**, 135-139.

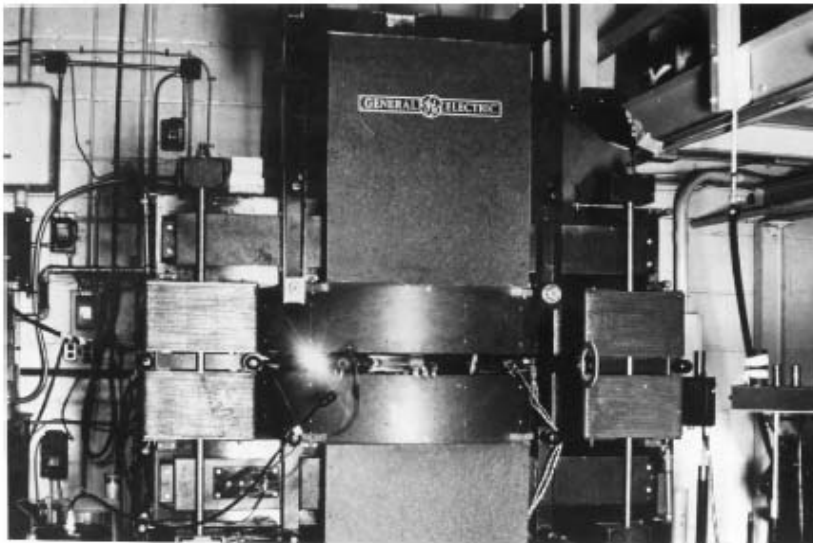


Figure 4
The 70 MeV General Electric synchrotron in 1947 with clearly visible synchrotron light spot (light splash in the lower left center of the picture).



Figure 5
The General Electric team (from left to right, Langmuir, Elder, Gurewitsch, Charlton and Pollock) looking at the vacuum chamber of the 70 MeV synchrotron – the world's second synchrotron.

世界初の放射光専用の電子蓄積リング SOR-RING

佐々木泰三 (2005) 加速器, 2, 433-442.

Taizo Sasaki (1998) *J. Synchrotron Rad.* **5**, 140-146.

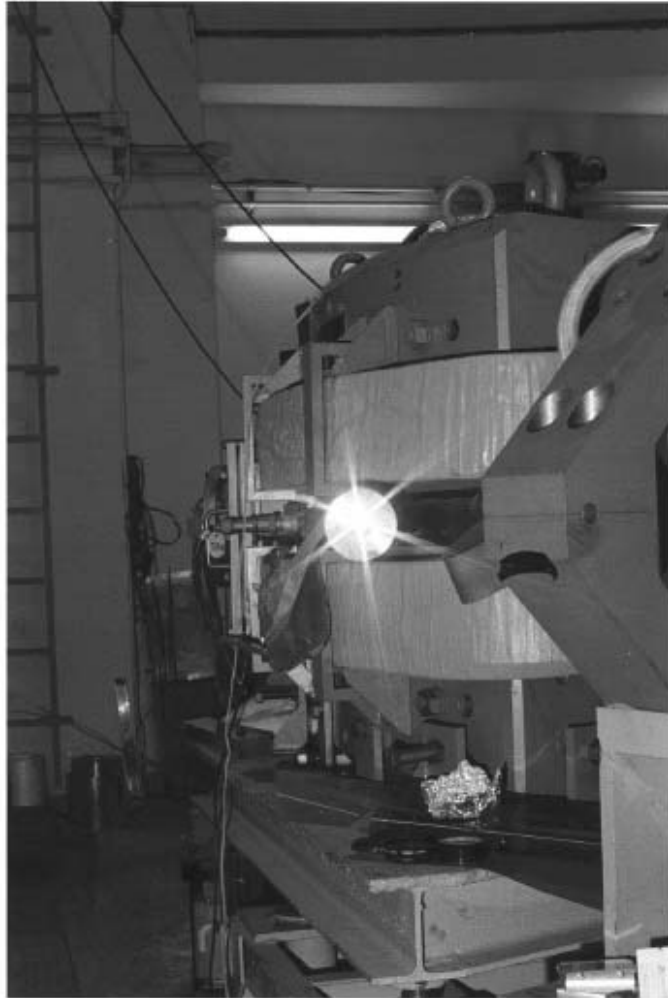


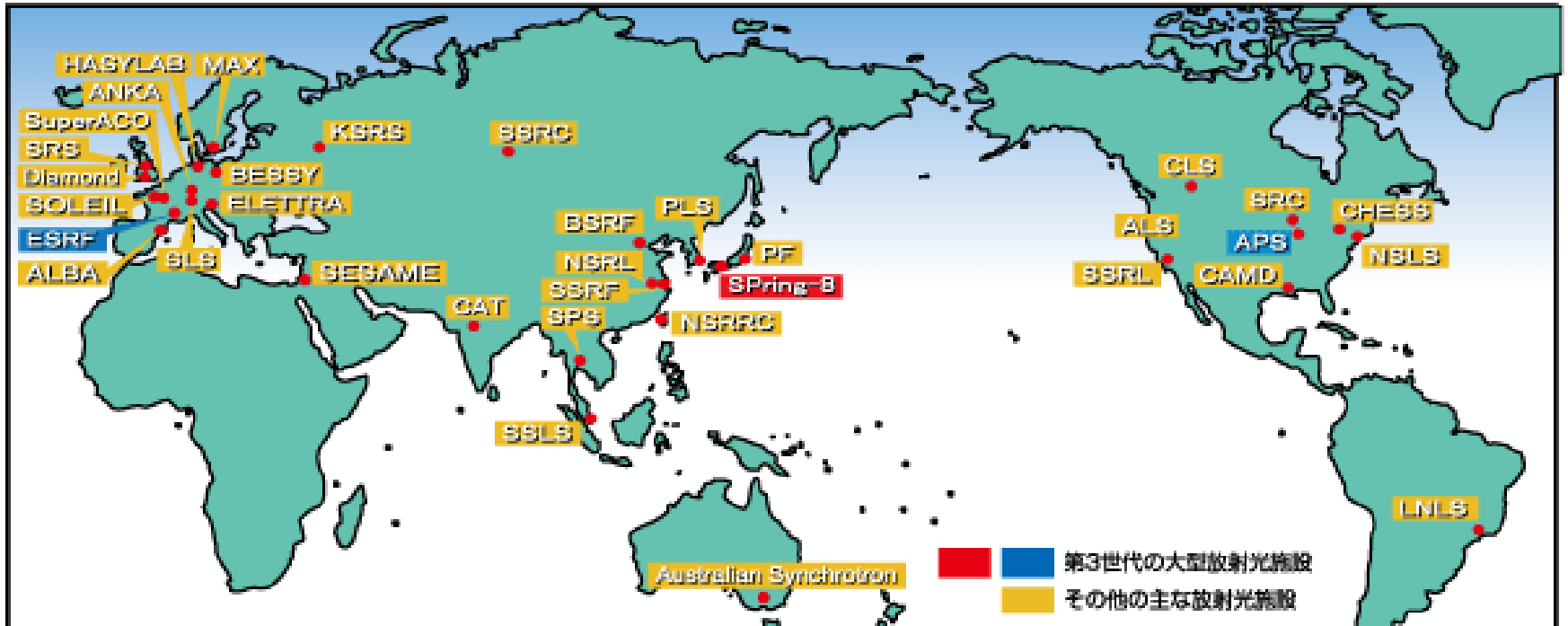
Figure 2
First light from SOR-RING, December 1974.



SOR-RINGは、世界で最初に建設(1974年完成)された放射光専用の電子蓄積リング(第二世代の放射光施設として分類される)です。東京大学物性研究所の軌道放射物性研究施設として、東京都田無市(現在の西東京市)の東京大学原子核研究所(当時)内に設置され、世界の放射光科学の発展に多大な貢献をしましたが、1997年に惜しまれつつその役目を終えました。同年、第三世代の大型放射光施設(SPring-8)が完成し稼働し始めましたので、1997年は、日本における放射光施設の世代交代の年とも言えます。その後、SOR-RINGは当時の姿を保ったままSPring-8に移設され、放射光普及棟の一角に展示されました。

<http://www.spring8.or.jp/ja/support/contact/faq>

そして今、放射光施設は 世界中に。



http://www.spring8.or.jp/ja/support/download/site_tour_doc/sr.html/publicdocument_view