

量子ビーム応用の現在—放射光利用の場合—

Present Status of Quantum Beam Application, in Case of the Availability of Synchrotron Radiation

浅野 芳裕
Asano Yoshihiro

量子ビーム応用のうち、放射光施設の現状と利用技術について概説した。また、放射光を用いた光中性子生産の利用可能性についての検討、および放射光施設のレーザー電子光を用いた原子核物理研究への利用と核廃棄物の半減期短縮化研究について述べた。

New synchrotron radiation facilities and its availabilities were briefly summarized. The availability of the neutrons due to photonuclear reactions was discussed by using synchrotron radiation with beryllium target. The applications on the investigations of quark nuclear physics and the transmutation from the long-lived fission products in nuclear wastes to the short-lived were introduced by using laser electron photons.

キーワード：量子ビーム，放射光，SPring-8，光中性子，レーザー電子光

1 初めに

現在、レーザーやX線・γ線、電子ビームや中性子、陽子ビームなど量子ビームという概念で捉えられるものに実に多種多様なものが含まれている。これら量子ビームは粒子性と波動性を併せ持ったビームということができ、その利用範囲は多岐にわたる。応用技術の発展は目を見張るものがあり、身近なところでもγ線や陽子などの粒子線による癌治療などで顕著な成果を上げつつある。量子ビームは、高エネルギー、大出力になると発生装置も大がかりになり、そのほとんどが加速器を用いた装置である¹⁾。また、日本では現在原子力研究と高エネルギー物理学研究のための世界最大規模の陽子加速器群 (J-PARC)²⁾ を建設中で

ある。

近年、量子ビームの1つである放射光が物性研究や生物・蛋白質研究、各種産業利用などで大きく進展している。放射光は高速の荷電粒子がその軌道を曲げるとき、その軌道接線上に放射される電磁波のことで、荷電粒子として質量の小さい電子が用いられる。放射光は指向性が強く、大強度光が得られること、連続スペクトルであり任意エネルギーの単色光が取り出せること、円偏光や直線偏光などその向きも含めて選ぶことができるなど、その優れた特質を生かした利用技術開発が行われている。また、磁石列により蓄積電子軌道を振動させたり、揺らしたりして非常に指向性の強いコヒーレント光や高エネルギー高強度光を発生させるアンジュレーターやウィグラーと呼ばれる

表 1 世界大型3放射光施設と世界の主要最新放射光施設

	国 (地域)	蓄積電子エネルギー	リング周長	利用開始年
European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)	EU フランス (グルノーブル)	6 GeV	844m	1994
Advanced Photon Source (APS)	米国 (アルゴンヌ)	7 GeV	1104m	1996
Super Photon ring-8 GeV (SPring-8)	日本 (西播磨)	8 GeV	1,436m	1997
SLAC-SSRL SPEAR III	米国 (スタンフォード)	3 GeV	234m	2004
DIAMOND LIGHT SOURCE	英国 (オックスフォード)	3 GeV	560m	2007
SOLEIL	フランス (パリ)	2.75 GeV	354m	2006
Swiss Light Source	スイス (ビリゲン)	2.4 GeV	288m	2002
Australian Synchrotron	豪 (メルボルン)	3 GeV	216m	2007
Canadian Light Source	カナダ (サスカチューン)	2.9 GeV	171m	2005

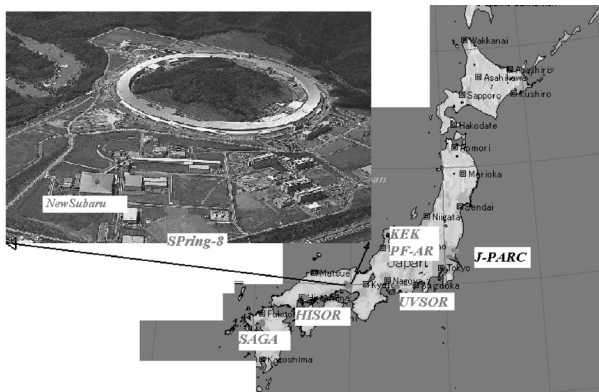


図1 日本の主要供用放射光施設とJ-PARC

挿入装置技術が大きく発展した。現在の新しい施設ではこの挿入装置光源が主流である。表1に世界各地で竣工または建設中である主要放射光施設を示す。ここでESRF, APSとSPring-8は大型放射光専用施設である。特にSPring-8は最大の施設であり、任意の蓄積バンチに電子を入射することができる優れたタイミングシステムを持つなど特徴のある施設である。この他、中国・上海放射光施設、台湾・新竹国立新放射光施設、スペイン・ALBA施設、独・PETRA-III計画など数多くの施設が建設・計画中である。日本の多くの施設のうち、主な供用放射光施設を図1に示す。

2 放射光利用

放射光は赤外から数100keVのエネルギー領域まで利用可能である。図2に示すように放射光は回折や散乱、吸収や透過、蛍光X線や光電子など、X線と物質との相互作用を利用した分析に適しているだけでなく、偏光特性の利用や単色エネルギー光子の組み合わせ、コヒーレントX線の利用などが可能である。最近、高エネルギー放射光を用いた蛍光X線分析が利用可能となったことで高原子番号元素の微量分析精度が格段に向上した³⁾。それに伴って重元素組成分析を用いた考古学や科学捜査に新しい手法が提供された。また、質の高い平行なコヒーレントX線が得られることからナノサイズのビームを得ることが可能になり、蛍光X線を用いたCTや、X線イメージングを分子レベルで行う開発が進められている。放射光は連続スペクトルを持ち、分光器によって任意の強い単色光を得ることができるので、選択的に化学結合

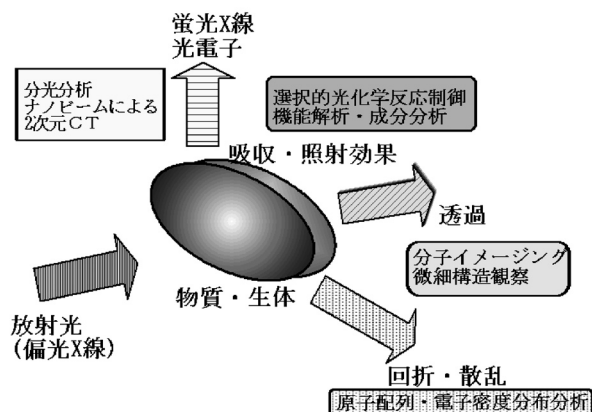


図2 放射光と物質との相互作用

を立ち切ることができることを利用して化学反応制御を行うことや、遺伝情報の担い手であるDNAの特定のアミノ酸を傷つけることによってその修復過程を解明することなどの研究が行われている。特定の分子の動きを時分割測定することや、偏光特性を利用して生体分子の組成は同じであるのに鏡像が重なり合わないカイラル特性の解明に⁴⁾に威力を発揮している。また、高輝度光源の特徴を生かして種々のin-situ実験が行われ、時分割測定と組み合わせた“その場観察”が、たとえば自動車用鋼板溶融亜鉛めっきのZn-Fe合金化反応制御機構の解明⁵⁾など産業応用に利用されている。

3 放射光を利用した中性子生成

放射光 (X, γ 線) とともに中性子は物質・生体研究を行ううえで重要な道具である。放射光を用いて放射性廃棄物の殆ど発生しない中性子生成方法について検討した。図3に示す10テスラの磁力を発生させる超伝導ウィグラーからの放射光

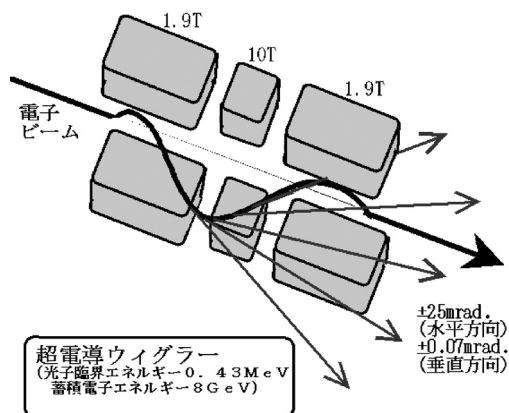


図3 超伝導ウィグラー

をベリリウム-9に照射することによって以下の反応が起きる。



中性子を放出した後に残るベリリウム-8原子核は瞬時に2つのヘリウム原子核に崩壊するので放射性物質は残らない。ベリリウム-9は1.17～3.5MeVと比較的低いエネルギーに共鳴中性子放出断面積領域が存在するなど、大きな利点がある。超伝導ウィグラーから発生する放射光のスペクトルをSPring-8の標準アンジュレーターやウィグラーおよび偏向電磁石からの放射光とともに図4に示す。超伝導ウィグラーから発生する放射光の半分は0.43MeV以上のエネルギーを持ち、2MeVの光子で蓄積電流100mAあたり、開き角1mradあたり、毎秒 10^8 個以上である。計算によると、この放射光を図5に示すベリリウムターゲットと水減速材からなる中性子生産ラインに導くことにより、ベリリウムターゲットから3mの評価点位置で毎秒約 10^5cm^{-2} の熱中性子束を得られることが示された⁶⁾。得られる強度は高エネルギー加速器研究機構のプロトン加速器を用いた核破砕中性子源KENS²⁾の1/15程度と弱い。一方、① 放射性廃棄物の問題がほとんど無いことから維持・運転が容易なこと、② 超伝導ウィグラーは他の放射光ビームラインと同時に運転可能であることから、他の放射光実験を妨害

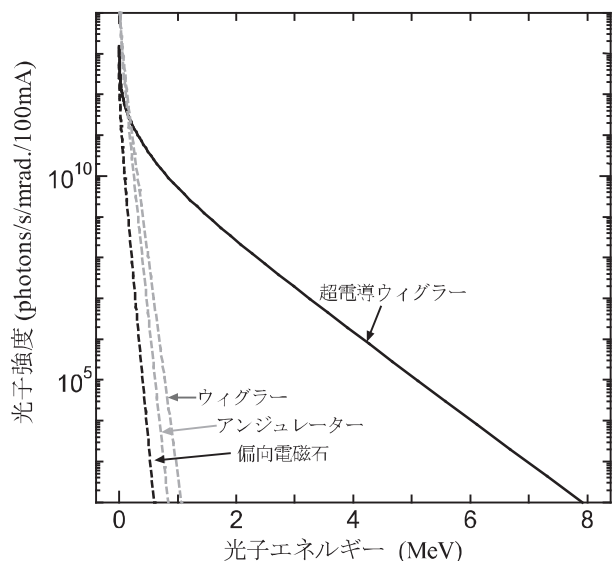


図4 放射光スペクトル (開き角1mrad)

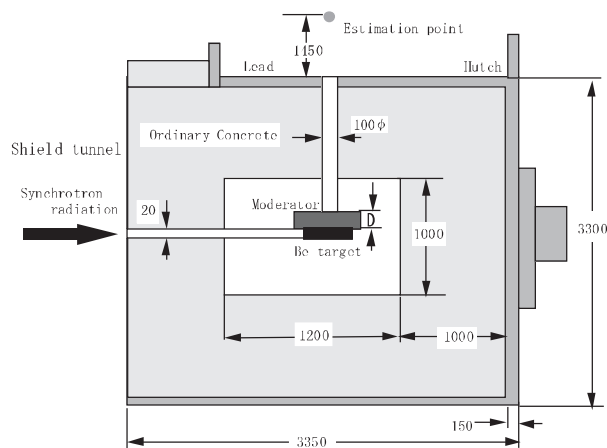


図5 放射光用中性子生産ライン概念図

することなく本実験を行うことができる。また超伝導ウィグラーの開き角は25mradianと大きく、中性子生産ラインと同時に今後利用の拡大が期待される陽電子生産ライン⁷⁾を併設することができる。③ 放射光で発生する中性子の平均エネルギーは0.3MeV以下と低く、厚い遮蔽が必要でないこと。その上、放射光は指向性が強く局所遮蔽が有効である。図に示すように一辺が約3.3mの立方体で遮蔽は十分であり、コンパクトなサイズで建設可能であること、等の大きな利点を有する。既に、超伝導ウィグラーの1mA時運転に成功しており⁸⁾、現在100mAの蓄積電流試験のための検討を行っている。

4 レーザー電子光の利用

周回する蓄積電子にレーザーを衝突させるとコンプトン散乱の結果、電子の持つエネルギーが光子に移り、高いエネルギーを持つレーザー電子光が電子の進行方向に放出される。図6にその概念図を示す。簡単にするために、レーザーと電子は

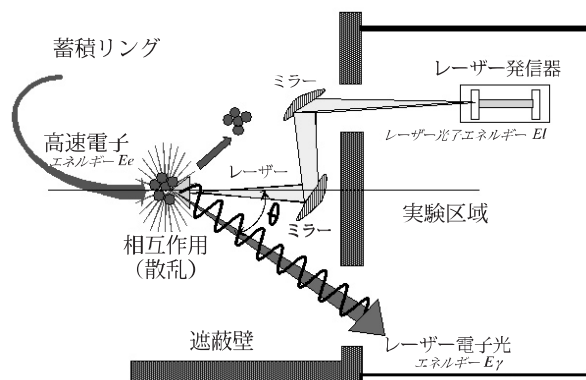


図6 レーザー電子光発生概念図

正面衝突するとし、図に示す θ を衝突からレーザー電子光の散乱角度とする。レーザー電子光のエネルギー E_γ は電子エネルギー E_e 、レーザーエネルギー E_l を用いて次のように表される。

$$E_\gamma = \frac{4 \cdot E_l \gamma^2 / (1+R)}{1 + \gamma^2 \cdot \theta^2 / (1+R)} \quad \theta \ll 1 \quad \dots \dots (2)$$

$$R = 4 \cdot E_l \cdot \gamma / m_0 c^2, \quad \gamma = E_e / m_0 c^2 \quad \dots \dots (3)$$

ここで m_0 は電子静止質量、 C は真空中での光速を表す。SPring-8, BL33LEPビームラインでのレーザー電子光スペクトル計算とタングステン酸鉛シンチレーターでの測定結果例を図7に示す⁹⁾。ここでガス制動放射線とは蓄積電子と蓄積リング内に存在する残留ガスとの相互作用によって発生する制動放射線でビームラインの遮蔽安全設計上、重要な放射線源の1つである。図に示されているようにレーザー電子光は最大エネルギー位置にピークをもつ。BL33LEPで得られるレーザー電子光は素粒子原子核物理研究に威力を発揮している¹⁰⁾。遠赤外レーザー(118.8 μ m)を用いる場合や、蓄積電子エネルギー1GeVとNd:YAGレーザー(1,064nm)を用いて光核反応の巨大共鳴領域に相当する最大エネルギー17.6MeVのレーザー電子光を長半減期核種に照射して短半減期化することを目的とする基礎的研

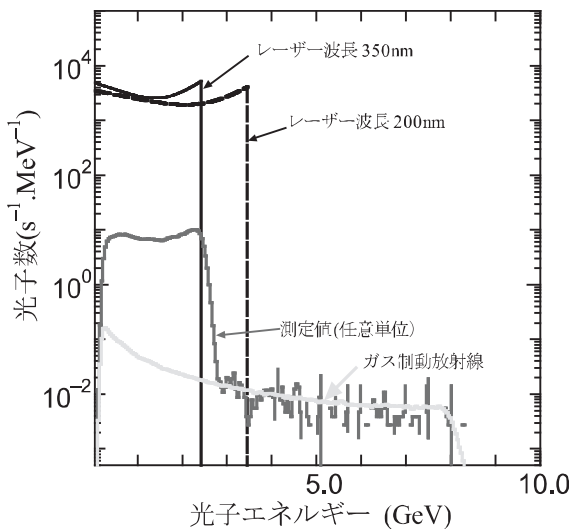


図7 SPring-8, BL33LEP

レーザー電子光スペクトルの計算結果と測定結果
(黒実線：レーザー波長350nm, 破線：200nm, 赤実線：測定値(波長350nm), 黄色実線：ガス制動放射線実測値をレーザー電子光測定条件で規格化)

究¹¹⁾(たとえば核廃棄物である半減期15.7百万年のヨウ素-129にレーザー電子光を照射することにより半減期25分のヨウ素-128に変換する)が始まっている。

5 おわりに

放射光関連で特に原子力・放射線と関係の深い項目を中心に述べた。現在、SPring-8だけでも年間1,500件近くの実験が行われている。詳細は<http://www.spring8.or.jp>を見ていただきたい。SPring-8では非常に質の高い安定した放射光ビームが共同利用の形で産官学に提供されている。ここでは今まで不可能と思われていたことが測定できるようになってきた。今後も大きく発展することが期待される。最後に、利用に関して相談があれば産業利用支援室に問い合わせさせていただきたい。

<参考文献>

- 1) ラジオアイソトープ協会量子ビーム専門委員会, RADIOISOTOPES 54, 2005
- 2) M.Arai et al. : Proc. ICANS-XVI ISSN 1433-559-X, 2003
- 3) 中井泉 : 応用物理, Vol.74, No.4, 2005
- 4) 中川和道 : 放射線, Vol.31, No.3, 2005
- 5) 古宮聰 : 計測と制御, 第45巻, 第2号, 2006
- 6) Y.Asano & Y.Kawashima : Radiation Protection Dosimetry, Vol.115, 2005
- 7) A.Ando et al. : J.Synchrotron Radiation, Vol.3, 1996
- 8) K.Soutome et al., : proc. of Particle acc. con., 2003
- 9) Y.Asano : JAERI-Research 2001-006, 2001
- 10) T.Nakano et al. : Physical Review Letters, Vol.91, No.1, 2003
- 11) S.Miyamoto et al. : SPring-8 Document A2005-002

浅野 芳裕 (あさの よしひろ)
技術士(原子力・放射線, 総合技術監理部門), 博士(工学)



原子力・放射線部会 幹事
(財)高輝度光科学研究センター
e-mail : asano@spring8.or.jp