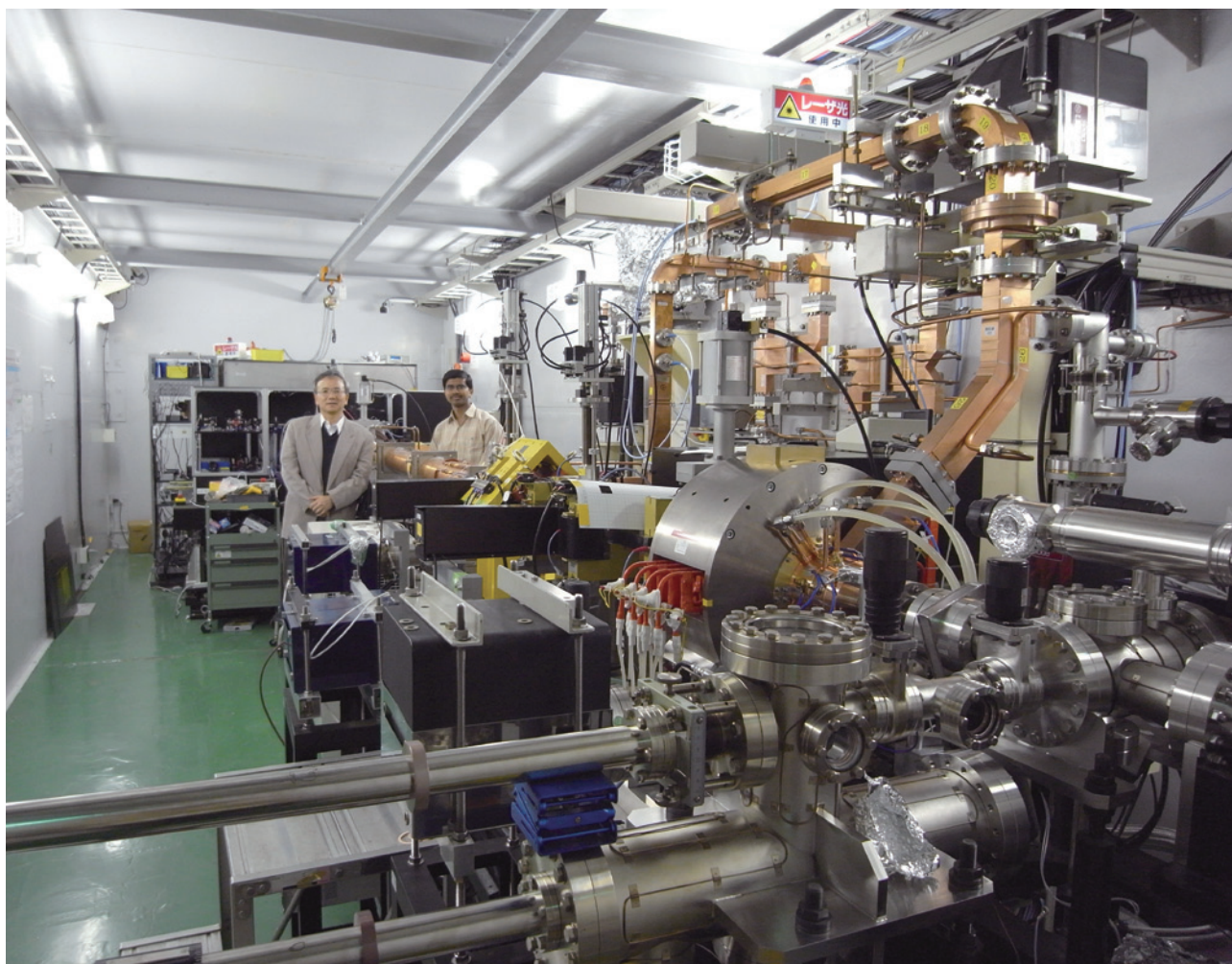


Oct. 2009

高輝度光子ビーム源開発室 ニュース

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

Vol.2



高輝度光子ビーム源開発拠点：S-band 新 Photocathode RF Gun, 3m long S-band Accelerator, Optical Super-Cavity で構成された LUCX (Laser Undulator Compact X-ray source)。この装置を使って、 $10\mu\text{C}$, 5MeV 電子ビームと 10mJ laser pulse の逆 Compton 軟 X 線生成実験の許可申請を次年度行い、2011 年度中に実用的な軟 X 線生成を実証する。これによってレーザー電子ビーム衝突技術確立した後、最終実験に必要な設備を超伝導加速器試験施設 (STF) に構築して、2012 年に STF で応用上有用な硬 X 線生成実験を行う。

高輝度光子ビーム源開発室ニュース Vol.2 をお送り致します。Quarterly 2 として出版しているものです。高輝度光子ビーム源開発室ニュースと呼ぶ方が親しみ易いと貴重な意見を頂きましたので、今後 Quarterly の用語は使いません。ニュース Vol.2 の内容として、新しいレーザー蓄積法の解説を KEK の本田洋介氏にお願いしました。ま

た、レーザー蓄積共振器開発キックオフミーティングの状況報告を広島大学高橋徹氏にお願いしました。ニュース Vol.3 の記事として、最新の Yb fiber laser 増幅を利用した実用化の話と 9-cell Super Conducting Cavity 開発報告を担当者にお願い致しました。ご期待下さい。

■発振型共振器による高効率レーザー蓄積装置

本プロジェクトではレーザーコンプトン方式の小型 X 線発生装置を開発している。この装置の性能を議論するうえで、発生する X 線の強度は最も重要な指標であるが、これにはレーザー標的の強度が何よりも重要な因子である。本プロジェクトではレーザー蓄積装置と呼ぶ光共振器を利用することで、レーザー発生装置から出力された光を共振器内部で実効的に増大して、目的の高強度レーザー標的を実現する計画である。

従来から利用されてきたレーザー蓄積装置は図 1 のような構成のものである。レーザー発振器からの出力をその外部に置かれた光共振器に入射する。光共振器とは複数の鏡で閉じた光路を構成したもので、ここに入ってきた光を閉じ込める。共振器内部の光に位相を揃えて入射を続けると、共振器は共鳴状態になり入射光よりはるかに高強度のレーザー光が実現できる。共鳴は定在波の条件、即ち共振器の周長が波長の整数倍に合致する条件でのみ起こり、その共鳴幅は共振器鏡の反射率で決まる。高反射率で低損失の共振器鏡を使用する程、高増大率にできるが、一方で共鳴幅は狭くなる。例えば増大率 1000 の共振器では、共鳴幅は共振器鏡の位置精度にしてサブナノメートルになり、振動などの環境の擾乱で簡単に共鳴状態が失

われてしまう。共鳴条件を機械的に制御し、レーザー蓄積状態を維持するために、共振器鏡をピエゾ駆動にして高度なフィードバック制御を行うことが必要とされる。現状ではこの制御技術の精度が安定に使用できる共振器の限界を決めており、実用では増大率 1000 程度に留まっている。一方で高反射率低損失鏡は反射率 99.99% を超えるものが製作可能であることから、制御技術の問題を解決できれば増大率 10000 を超える蓄積装置も実用化の見込みがでてくる。

レーザー光源と外部共振器を一体化し、図 2 に示す装置構成を新たに考案した。レーザー蓄積共振器を共鳴、通過したレーザー光を種光としてレーザー増幅部に再入力し誘導放出により増幅した後、共振器に再入射する構成である。増幅部でのゲインが共振器部を含めた周回のロスを上回れば、系は発振回路となって自動的にレーザー光が光路を周回しつづけることになる。発振は増幅器の自然放出光ノイズから始まり、ノイズ光のうちたまたま共振器の共鳴幅に受け入れられたスペクトル成分が共振器を通過する。それが以降の種光となって周回の中で増幅されていき、最終的には増幅器を励起する全エネルギーは全てこの成分に集約され、増幅部が飽和するところで系は定常状

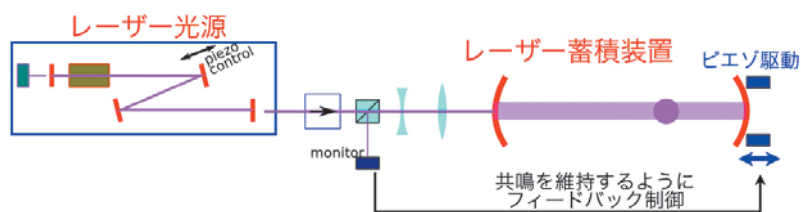


図1：従来の蓄積装置の構成

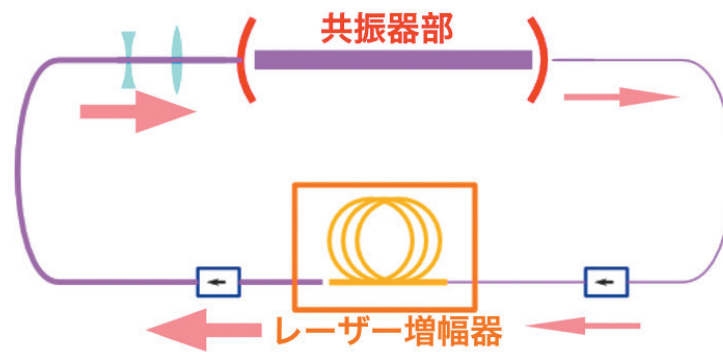


図2：周回発振型光蓄積装置

態になる。このとき蓄積共振器内部にはその共振器鏡の反射率によって定まる増大率に相当する強度のレーザー光が実現されることになる。

共振器部と増幅部が全体で一体となってレーザー発振器を構成する点が従来方式と異なる。従来方式では振動等によって共鳴条件が外れるのをフィードバック制御技術によって無理矢理に維持していたのに対し、この方式では発振のメカニズム自体が自動的に共鳴条件を追従することになる。共振器の共鳴条件が変化したとしても、それに合わせた波長の光でレーザー発振が始まるため、人為的なフィードバックを必要としないのが利点である。このため、従来方式では安定に制御できなかった高増大率の共振器を組み込んで使用することも可能になる。レーザー増幅部は共振器部を含む周回のロスを補う必要があるため、単一パスでも十分な増幅率を得られるものを必要とする。このような用途には最適と考えられる Yb ファイ

バ増幅器を用いることにし、同時に周回部の構成要素もファイバ光学系を使用することで光路の調整を簡便にできる。

この新方式の周回発振型光蓄積装置について、低出力での原理実証試験を行った。増幅部はコア励起の Yb 添加シングルモードファイバを最大 500mW のレーザーダイオードにより励起して使用した。周回光路の一部のパワーをサンプルしモニターしながら励起光の強度を上げていった。図3にその結果を示す。励起光の強度がある値を超えると自発的に光の周回が始まり、励起光強度を上げるにつれ周回光強度が上がっていくことを示している。この状態で共振器部を赤外線ビューアにより観察すると、高強度のレーザー光が蓄積されている様子が図4のように観測される。ここでは反射率 99.99% の共振器鏡を使用した増大率 20000 の共振器を用いており、共振器内部では 440W が蓄積されていると見積もられる。以上の試験により、新方式の原理を確認することができた。共振器の制御が不要であるために、レーザー

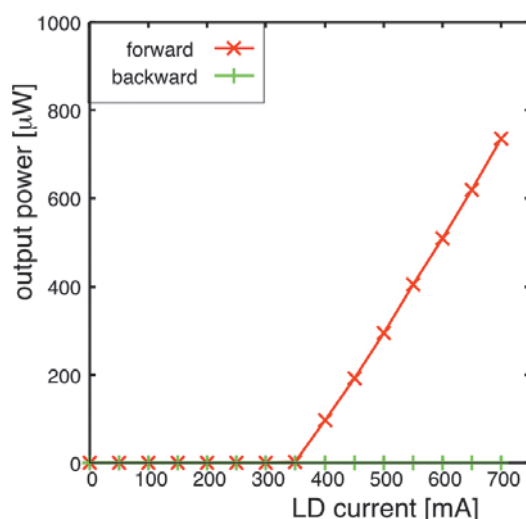


図3：励起 LD の電流と発振強度

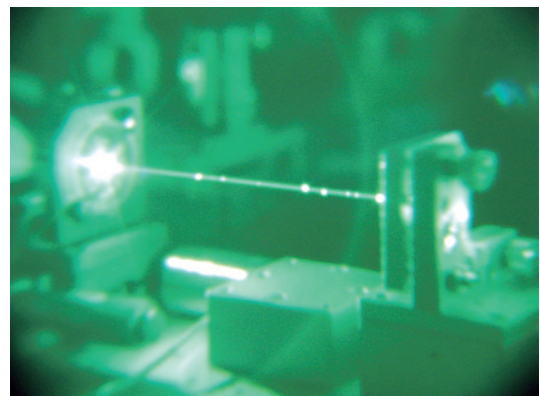


図4：IR ビューアで見た蓄積光

増幅部の出力は低くとも超高増大率の共振器を利用して効率的に高強度に達することが可能である。

超高増大率の共振器を使用した際に細かい強度変動が生じており、今後改良が必要である。発振が定常状態に達するまでの時定数と環境の振動の大きさの関係により変動量はきまると考えられ、共振器の構造を強化して解決できると思われる。今後は、高出力のファイバ増幅器を用いてより高強度での試験を行いたい。また、発振をモードロックパルス化出来れば、同じ平均出力でもはるかに高いピーク強度が得られるので魅力的である。パルス化は、系一周の光路長を共振器部の光路長の整数倍に一致させたいと、何らかの変調をかけることで可能ではないかと考えられる。どのように微調整を行ってパルス化を実現させるか、これからの開発課題である。

以上により、新しく提案した周回発振型のレーザー蓄積装置の構成により、制御技術の限界を

超えて、より効率的に高強度レーザー標的が実現できる可能性が示された。本プロジェクトにおいては、特に連続運転加速器と組み合わせて使用する際、高増大率のレーザー蓄積装置の要求が高い為、新方式が魅力的であろう。

周回発振型共振器の技術を高効率の高調波発生に応用することも可能である。高調波発生は非線形現象なので、基本波が高強度であるほど効率がよくなる。共振器を用いて増大した箇所に変換結晶を配置する図5のような構成にすれば、もともとの基本波の出力が低くとも高効率に2倍波を発生することが可能になる。理想的な状況で、系の損失は2倍高調波発生によるものが支配的であるとき、レーザー発振のために導入したパワーが全て2倍高調波として取り出されることになる。このアイデアは、例えば ERL 電子銃のドライブレーザーなど、連続的に2倍高調波が必要で発生効率が問題になる場合に有用になると思われる。

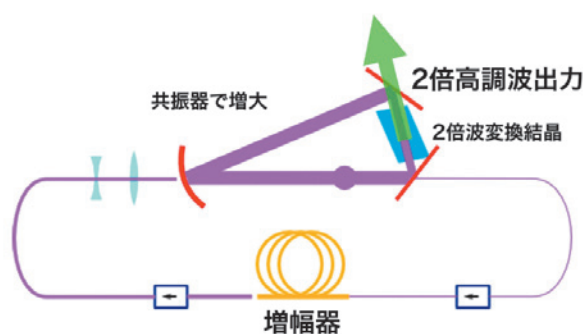


図5：高調波発生に応用

■小型高輝度光子源のためのレーザー蓄積共振器の開発キックオフミーティング

去る2009年6月16日に広島大学において、標記のミーティングを行った。レーザー・電子散乱による光子生成は、放射光を用いる方法に比べて低いエネルギーの電子でX線やガンマ線生成が可能であり、加速器施設を小型化できる。その一方、高輝度の光子源を構築するために、レーザーと電子線の強度をあげることが課題である。

高輝度光子源のためには、高強度かつ高繰り返しのパルスレーザーが必須となる。小型光子源開発では、レーザーパルスが光共振器中に蓄積し、その強度を増大させることを計画している。レーザーと電子の散乱効率を向上させるためには、レーザーの強度を上げるとともに、レーザーを電子との交差点において、強く集光することが必要と

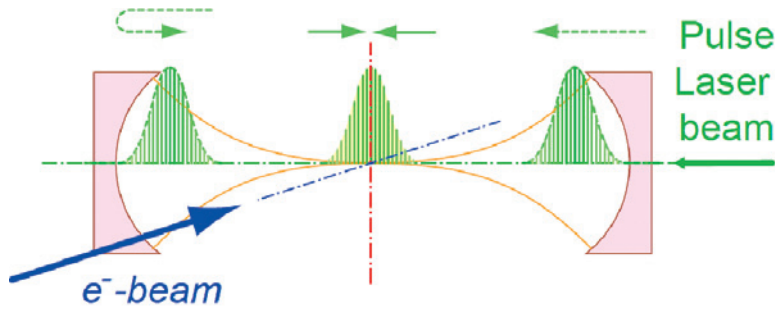


図1：2枚の鏡を使ったレーザー蓄積共振器を用いたレーザーコンプトン散乱の概念

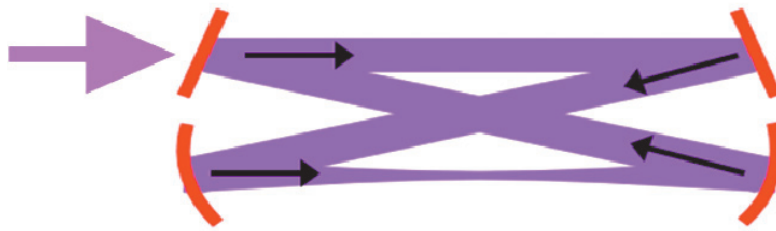


図2：2次元に鏡を配置した4鏡型レーザー蓄積共振器の概念図

なる。したがって光共振器には、レーザーパルスの高い蓄積とともに、レーザー光をその内部で集光できることが求められる。レーザー蓄積共振器のもっとも簡単な構成は、図1に示すような2枚の鏡を向かい合わせた、ファブリ・ペロー型と呼ばれる構成である。

しかし、この単純な構成では、レーザーの高蓄積と集光を同時に達成することが困難であることが知られている。この問題を克服する方法として、4枚の鏡を用いたリング型の共振器がある。図2は、4鏡共振器の構成例であり、2枚の球面鏡と2枚の平面鏡を組み合わせることでレーザーの高倍率の蓄積と集光を達成する。

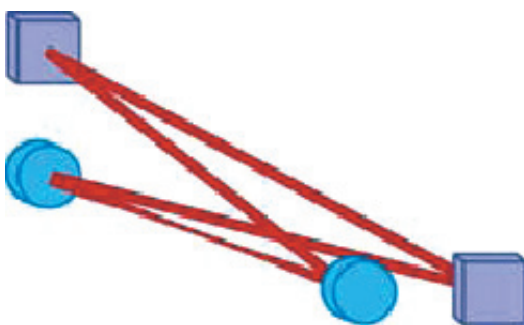


図3：3次元に鏡を配置した4鏡レーザー蓄積共振器の概念図

一方、光共振器をもちいたレーザー電子散乱方式の光子生成は、本プロジェクトの発足以前から、偏極ガンマ線生成や高輝度X線源を目指した研究開発が行われているが、4鏡リング共振器はそれらに共通する研究開発項目となっている。このような状況から、KEK、広島大学、早稲田大学の共同で4鏡リング共振器の開発を進めることになり、第一回の全体会合を広島大学にて開催した。

すでに昨年から、4鏡共振器の基本特性について研究が進められてきたが、そのなかで、4つの鏡を3次元的に配置すると光共振器に蓄積されるレーザーの偏極状態について特徴的な性質があることがKEKの本田洋介氏らによって見いだされた。すなわち、4鏡3次元共振器は、レーザーの円偏光状態にのみ共鳴し、且つ、右偏光、左偏光が共振器の長さの違いにより分離して共鳴するのである。本稿では省略するが、この状況の物理的な背景は本田氏らによってOptics Communications誌に公表されている。円偏光したレーザーと電子の散乱によって生じたX線やガンマ線もその偏光状態を引き継ぐため、この性質を利用すると、円偏光したX線やガンマ線を生成でき、かつ、左右偏光状態を簡単に（すなわち高速で）変えることができる。このように4鏡3次元共振器はレーザーの高蓄積と集光を同時達

成する方法であることに加えて、円偏光状態のX線やガンマ線の生成に非常に有効であることが分かった。

前置きが長くなったが、このようなことから、4鏡3次元レーザー共振器の開発を目指した第一回会合では、我々自身が円偏光X線の開発だけでなくその応用についても学ぶことによって、開発の動機付けと発展の契機にすることを目的に、円偏光X線を用いた物性研究の専門家を招いてその研究について話を伺うとともに、X線源に対する応用の観点からの要求について討論した。筆者は物性研究については素人であるが、理解できる範囲でその時の内容と雰囲気を伝えてみたい。

ミーティングでは、本プロジェクトの責任者であるKEKの浦川順治氏による、小型高輝度光子源開発の概要の説明の後、広島大学の圓山裕氏による「偏光X線を用いた物性研究」についての解説があった。

圓山氏の講演は、有名なランダウ・リフシッツの教科書にある、磁気モーメントと電気モーメントの空間反転、荷電共役反転、時間反転に対する性質の違いの紹介から始まった。この話は素粒子物理学を専門とするものにとってはなじみの深いものであり、冒頭から粒子物理学と物性物理の垣根を低くするような氏の配慮が感じられた。一般に、直線偏光したX線は電気モーメント、すなわち誘電分極に反応する。一方円偏光X線はスピンや軌道角運動量などの磁気モーメントに反応し、物質の磁性に関する情報を調べるのに有用である。実際の測定では、X線の左右偏光を変えたり、物質に外から印可する磁場の方向を反転させた際のX線の物質による散乱の変化、X線磁気円二色性(X-ray Magnetic Circular Dichroism = XMCD)や、X線の直線偏光を変えた際の散乱の変化、X線二色性(X-ray Linear Dichroism = XLD)を測定し、そこから物質の磁性や誘電体情報を得る。講演で示されたX線の散乱断面積の表式は複雑だったが、散乱に対する、X線の偏光ベクトルや、物質の磁化ベクトルの外積や内積に依存する項を、実験から導くという手法は、素粒子実験でもよく使われており、共通性を感じた。研究に必要な偏光X線は放射光からの直線偏光X線からダイヤモンド移相子を使って得ている。ダイヤモンド移相

子というのは、光学でいう、 $\lambda/4$ 波長板の役目をし、直性偏光を円偏光X線に変換する。講演ではSpring-8における装置の実例が紹介された。ここでは、5.6 ~ 13.7keVの円偏光硬X線を試料に加える磁場、温度、圧力を変化させながら測定する装置が構築されている。

このような物性研究の材料科学への応用も紹介された。2007年のノーベル物理学賞受賞対象となった、巨大磁気抵抗効果の発見がスピントロニクスの始まりと言われたことは記憶に新しいが、円偏光X線による磁性研究はスピントロニクスと深く関連している。いまのところ、スピン(すなわち磁化の方向)は磁場で操作しているが、これを電場で操作することができればその速度が向上する。そのために、強磁性と強誘電性を併せ持ったMultiferroics物質が注目を集めている。偏光X線は、直線偏光→誘電性、円偏光→磁性というように、Multiferroicsの研究への応用性をもったプローブである。

続いて広島大学の平谷篤也氏による「宇宙の分子進化と軟X線~アミノ酸の不斉化反応~」と題した講演が行われた。DNAが右巻きの二重螺旋構造をもっていることはよく知られている。アミノ酸にはL体、D体という互いに鏡像の関係にある2種類があるが、自然界のアミノ酸はすべてL体である。

これは生命体において左右対称性が破れているということである。しかし、我々の知っている物質の基本相互作用は、弱い相互作用による小さな効果を除いて左右を区別しない。特に、化学反応の元である電磁相互作用は、完全に左右対称で

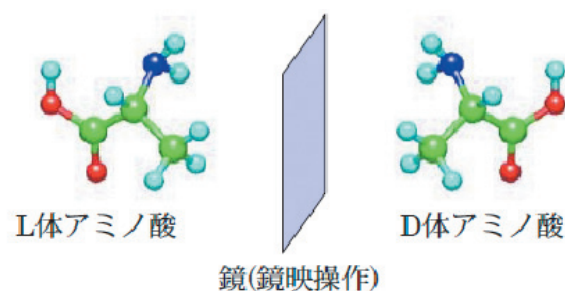


図4: L体、D体アミノ酸の鏡像関係
(平谷氏のスライドより引用)

1 鏡像というのは文字通り鏡に映した像である。元の像と鏡に映った像は左右が入れ替わっている。

ある。しかし現実には生命体は左右非対称であるので、自然界でアミノ酸が生成された過程において、何らかの理由で「L体だけが生成された」、または「等量生成された後にL体だけが生き残るような不斉化反応が起きた」はずである。また、太陽系の創生期に由来するマーチンソン隕石でもL体アミノ酸が過剰であることから、その起源を宇宙にあるという説がある。平谷氏の講演は、現在我々が観測しているL体過剰状態の起源を、宇宙におけるアミノ酸と円偏光X線の反応に求める壮大な話である。

ところで、L体過剰な状態を創り出すには；

- L体、D体アミノ酸が光吸収過程で右偏光、左偏光に違いがあること。

➤ 自然円二色性

(Natural Circular Dichroism=(N)CD)

- 宇宙に円偏光放射光源があること。
が必要である。

よく知られているように、螺旋運動する電子からは円偏光した光が放射される。加速器の螺旋挿入光源（ヘリカルアンジュレータ）もその原理である。宇宙においては、高速で回転する中性子星、すなわちパルサーが円偏光光源となると言われている。図5はその様子を模式的に表したものである。

さらに、不斉化を起こすためには、光源が

- 単色または、擬似的単色性をもつこと。

が必要となる。軟X線領域では、CO分子などにより特定の波長のX線が吸収される。ノッチフィルター効果が期待できる。軟X線は可視や紫外光に比べ、星間雲の内部にまで進入できるなど、L体過剰の起源となる可能生がある。一方、軟X線とアミノ酸の反応はまだ十分に調べられておらず、この仮定の検証には円偏光軟X線とアミノ酸の反応の研究の進展が不可欠である。

平谷氏の話を受けて、産業技術総合研究所の田中真人氏による、「軟X線領域におけるアミノ酸円二色性スペクトルの測定」についての講演が行われた。これは、L体、D体アミノ酸の円偏光X線に対する反応特性の違いを世界で始めて測定した報告である。田中氏の講演ではまず、産業技術総合研究所の放射光施設 Teras において、世界最短波長の 75nm まで、真空紫外領域における CD 値測定がなされており、さらに 40nm に到

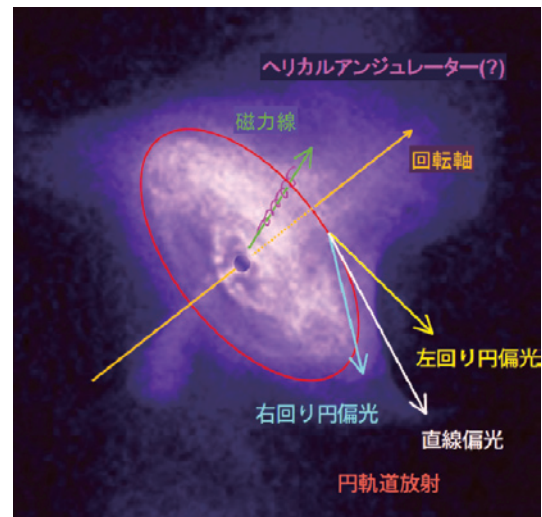


図5：パルサーによる円偏光放射の概念図（平谷氏のスライドより引用）

達する見込みであることが報告された。その感度は 0.01% に達している。これは、ロックインアンプ等を用いて左右の吸収差を高感度に測定する交流法（偏光変調法）で真空紫外領域に適用できる装置の開発による。一方、軟X線領域の測定は Spring-8 で行われた。図6は 2005 年に公表された世界初の軟X線によるアミノ酸 CD の測定結果である。

CD の強度はおよそ 0.2% と報告されている。軟X線では、真空紫外のような交流法が開発されておらず、ヘリカルアンジュレーターによる 0.1Hz 程度の偏光切り替えによって、偏光による違いを測定した。そのために感度は 0.1% と交流法を用いた真空紫外領域より一桁悪い値である。またアミノ酸の CD 値の値そのものが小さいため、試料以外からくる偽 CD 信号の排除、線二色性の評価と分離、入射光の偏光度の測定などを慎重に行う必要があるが、田中氏らの最近の研究ではさらに精度を向上させており、優位な CD 値を得ているようである。

田中氏は最後に偏光X線に対する要求を示した。以下にその要求と本プロジェクトが目指すX線源の特徴を示す。

1. 偏光切り替え：速い方が良いが数 Hz でも何とかなる
→ 数 kHz で切り替え可能
2. 偏光度：測定法があればキャリブレーション

できる。

→ 光共振器原理および、コンプトン散乱の性質から偏光が決まってしまう。

3. エネルギー：吸収端に合わせる

→ X線の最高エネルギーはレーザーと電子のエネルギーと衝突角で高精度に決まる。

4. 安定度：測定中は安定

→ 共振器の高精度制御で可能

5. 強度：強すぎても試料を破壊する。分光後 $10^8 \sim 10^9/\text{s}$ 程度

→ 本プロジェクトの初期目標として適当な強度である。

6. ビームラインがたくさんあると良い

→ 小型光子源としての本領が発揮できる。

このように、軟X線におけるCD測定は生命の起源として科学的に興味があることはもちろん、本プロジェクトが目指す小型高輝度光子源の応用としても適しており、研究開発に力が入る話である。

以上、小型高輝度光子源のためのレーザー蓄積共振器の開発キックオフミーティングにおける、X線応用に関する話を簡単に報告した。今後もこのような機会を通じて我々自身がX線源のみでなく、その応用についても理解しプロジェクトの発展につながるように努力したい。

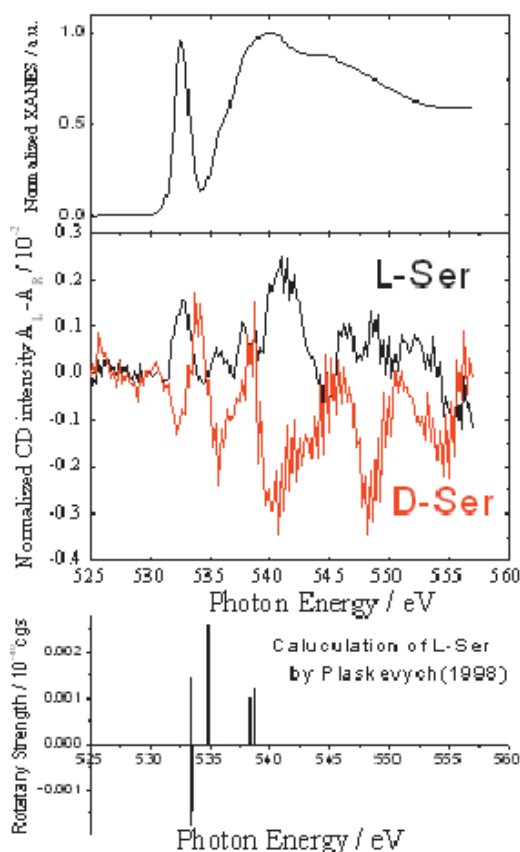


図6：田中氏らによる軟X線によるCD測定
(Physica Scripta T115, 875, 2005)

Acknowledgments

This News is supported by Quantum Beam Technology Program of the Ministry of Education, Science, Sports, Culture and Technology of Japan (MEXT).

量子ビーム基盤技術開発プログラム（2008-2012 年度）

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

次世代ビーム技術開発課題「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」（拠点責任者：浦川順治）

Development for Next Generation Compact High Brightness X-ray Source using Super Conducting RF Acceleration Technique



大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

High Energy Accelerator Research Organization

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 TEL 029(879)6248