

話 題

SPring-8 レーザー電子光施設における 加速器と物理実験の協力 —第二ビームラインの構築へ向けて—

伊達 伸*

Collaborating with Physics Experiments in Laser Electron Photon Facility in SPring-8 —Toward Construction of The Second Beamline—

Schin DATÉ*

Abstract

A close collaboration between accelerator and experimental physicists have been necessary to proceed physics in the laser electron photon facility in SPring-8 (LEPS). After describing how specific features of the LEPS beamline worked and they were necessary for discovering a pentaquark particle, Θ^+ , we show an example of the collaboration in identifying the energy resolution of the γ beam. The demand for a new beamline and its key concepts are shortly mentioned.

1. はじめに

SPring-8 で稼働中のビームラインに、BL33B2^{*1} を改造した LEP (Laser Electron Photon) ビームラインがある。これは図 1 のように電子軌道の直線部分にレーザー光を入射し、後方コンプトン散乱を利用して最大エネルギー 2.4 から 3 GeV までのガンマ線を発生する装置である。現在大阪大学核物理研究センター (RCNP) の専用ビームラインとして運用され、LEPS (LEP Facility in SPring-8) グループを中心として原子核、ハドロン物理学の実験が行われている。1997 年から始まったビームライン建設の経緯と 1999 年春に最初のガンマ線が得られた当時の様子については参考文献¹⁾を、およそ 20 の国内外の大学や研究所からの参加者で構成される LEPS グループについてはホームページ²⁾を参照していただきたい。

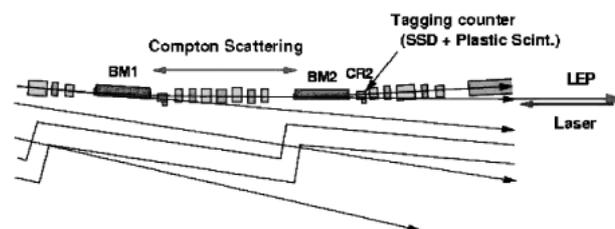


図 1 LEPS-BL

さて、LEPS グループは、2000 年 12 月に物理実験が開始されてからこれまでに数々の面白い成果を上げて来たが、それには 8 GeV の低エミッタンス蓄積リングに設置されたことによって得られる LEP の物理的特性が大きく寄与している。そのような特性を引き出し、有効に実験に役立てて行く上で、物理実験グループと加速器の緊密な連携が重要であった。その内容を具体的に紹介するのが本稿の第一の目的である。

LEPS からの物理的成果が上がるにつれ、さらにその先の性能を持ったビームラインへの要望が高まり、現行の BL33LEP を運用しながらでは実現が不可能な性能があるため、RCNP が建設の主体となり、新た

^{*1} SPring-8 におけるビームライン (BL) の呼称で、電子蓄積リングを構成する 48 セルの内入射点から数えて 33 番目のセルにあり、1 セルに 2 つある偏向電磁石の 2 番目を光源とする BL であることを示している。

* 財団法人高輝度光科学センター SPring-8 加速器部
Accelerator Division, SPring-8 JASRI (Japan Synchrotron Radiation Research Institute)
E-mail: schin@spring8.or.jp

に後方コンプトン散乱のビームライン LEPS2 の建設に取りかかることにした。このビームラインで我々が実現しようとしている性能、基本的なデザインの考え方について触れるのが第二の目的である。

2. ペンタクォークと加速

LEPS がこれまでに上げた成果のうち、最高のものは何と言ってもペンタクォーク粒子 Θ^+ の発見³⁾である。この発見については、その後多くの追試や既存データの再解析が行われ、LEPS の発見を支持する多くの結果が発表されると共に、ほぼ同数の否定的結果が発表され、クォーク 5 個から成る質量 $1.53 \text{ GeV}/c^2$ の Θ^+ という粒子が存在するかどうかについては未だに決着がついていない状況である。Fermilab 等の高エネルギー実験で得られた高統計データが否定的な結果を示している⁴⁾ので、形勢不利ということをする人達も居るが、条件の異なる実験をデータの統計量だけの重みで較べるのも乱暴な話である。実際、粒子生成のエネルギー依存性に関するクォーク勘定則に基づく簡単な議論から、高エネルギーの破砕領域では通常の Λ 粒子などのストレンジバリオンに較べてペンタクォーク粒子の生成が抑制されることが分り⁵⁾、高エネルギー実験でペンタクォーク粒子が見つからない理由のひとつではないかと考えられる。LEPS 実験のように、比較的低エネルギーの実光子を用いた実験として Jefferson Lab. の CLAS のものがあるが、最初に肯定的な結果⁶⁾を報告した後、統計を上げた実験で否定的な見解を示している⁷⁾。この報告は LEPS の発見に疑問を呈する上で最も重大なものとなっているが、両実験を詳細に調べた結果、測定器のアクセプタンスの違いやシグナルの処理の仕方の違いによって、 Θ^+ のシグナルが LEPS では見えるが CLAS では見えないという状況の起こり得ることが理論的に示された⁸⁾。両実験で本質的に違う点は、Bremsstrahlung を使って実光子を取り出している CLAS に対し、LEPS は後方コンプトン散乱を使っているので、主に両者のガンマ線スペクトルの違い (図 2 参照) から、後者では前方でのバックグラウンドが圧倒的に小さくて超前方まで測定器で覆うことが出来るという点である。つまり、LEPS で Θ^+ が見えたのは、きれいな高エネルギーの実光子ビームが得られるという SPRING-8 の特徴を十分に生かした結果なのである。ちなみに Θ^+ 生成のしきい値は光子エネルギーで言うと $E_\gamma = 1.7 \text{ GeV}$ であるが、LEPS で用いている 350 nm レーザー入射でえられる光子の最大エネルギーは 8 GeV の電子ビームに対して 2.4 GeV、電子ビームが仮に 6 GeV (ESRF

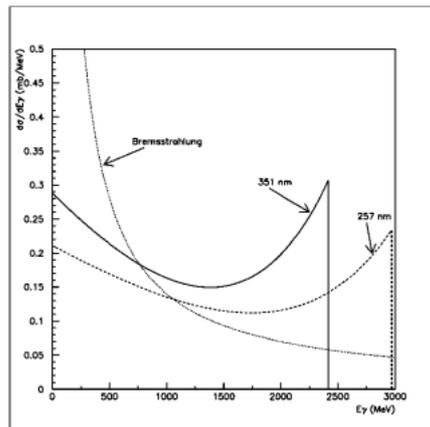


図 2 2つの入射レーザー波長に対応する LEP のエネルギー分布. 比較のため、制動放射の分布形を点線で示してある。

の場合) とすると 1.5 GeV となってしきい値を下回る。この意味でも、ペンタクォーク粒子の発見は SPRING-8 でなければなし得なかったと言えることが出来るだろう。更に、比較的低エネルギーでのハドロンを使った実験では Θ^+ の存在に関してあまり積極的な結果が得られてはいないが、これもペンタクォーク粒子を構成する 5 つのクォークの色空間における特別の配位が、色一重項の 2 つのハドロンの状態からは高いポテンシャルの壁で隔てられているせいではないかと推測されている。つまり、ハドロンと違って標的核子の内部まで容易に入り込んでストレンジクォークを生成することの出来る光子であったからこそ、 Θ^+ 粒子を作ることが出来たのではないかと考えられるのである。

加速器の記事としては少々立ち入り過ぎていると思われるかも知れないが、それこそがこの記事の趣旨の一つなので、いましばらくおつきあい願いたい。上に述べたことは、2.4 GeV のエネルギーでバックグラウンドの少ないきれいな実光子を用いることが出来たという、いわば施設の特徴がペンタクォーク粒子発見の背景にあり、さらに、その特徴が他の素粒子、原子核の実験施設と較べた場合に特殊なものになっているために、他の実験で見えていないからと言って、そのことが直ちにこの粒子の存在の否定にはつながらない、ということである。だから、ペンタクォーク粒子の存在に関する研究は更に続けなければならないで、SPRING-8 はそれに一番適した施設の一つだと言いたいのである。

Θ^+ という粒子のもう一つの著しい特徴として、その巾の異常な狭さがある。通常、このエネルギー領域

のハドロン共鳴の巾は 100 MeV 程度であるが、これまでに得られた情報を総合すると、この粒子の巾は 1 MeV よりも広いことはないと考えるのが合理的である。これは主にペンタクォーク粒子の構造や力学的成り立ちを考える理論家の大きな関心事となっているが、実験家にとっては、実験のエネルギー分解能が悪いと質量スペクトルに現れるはずのピークが簡単に消えてしまうというだけでなく、ピークが見えたら見えたで、その高さから生成反応断面積等の物理量を引き出そうとすれば、ビームや測定器等実験に含まれているエネルギー巾の要因を全て、通常では問題にならない程度の精度で把握しなければならないという事態になっていることを意味する。測定量に含まれるエネルギー巾へのビームからの寄与を、出来得限りの精度で知る必要がある、というところに加速器の出番の一つがある。

3. LEPS-BL におけるガンマ線のエネルギー同定

LEPS-BL では、後方コンプトン散乱を起こして光子を放出した後の反跳電子を、下流にある偏向電磁石をスペクトロメータとして改造チェンバーの窓から取り出し、タギング・カウンターで捕まえて、その位置から E_γ を同定している。タギング・カウンターはシンチレーションファイバーを使った検出器とプラスチックシンチレータホドスコープの組み合わせから成り、電子の位置分解能は 0.3 mm である。このタギングカウンターをビーム軸に近付ければ近付ける程、低エネルギーのガンマ線を同定出来ることになるが、ESRF の GRAAL⁹⁾ では、最初、カウンターボックスを真空チェンバーの中に挿入し、その位置を必要に応じて変えられるようにした。しかし、そのことが災いし、ある時タガーをビーム軸に近付け過ぎてビームを削ってしまい、それ以降ビーム電流に異常があるといつも疑われるようになってしまったという話を聞いた^{10)*2}。SPRING-8/LEPS では、カウンターを設置する偏向電磁石下流部のクロッチチェンバーを改造し、チェンバーの内壁を、リング上でビーム軸にもっとも近い入射部セプタム電磁石の内壁の距離である 18 mm よりも遠くに離し、カウンターボックスはその外側に設置する方式をとった。チェンバーには 3 mm 厚の Al 窓を設け、そこから 6.5 GeV よりも低いエネルギー

をもった反跳電子が取り出される。この方式をとったために、GRAAL が 0.4 から 1.5 GeV までのガンマ線を同定しているのに対し、我々のところでは 1.5 GeV 以下を同定することが出来なくなった。しかしそのおかげで、カウンターボックスの設置や取り外しによる電子ビームへの影響が無く、他の放射光ユーザーに対する信頼の獲得に役立っている。GRAAL と LEPS を分ける 1.5 GeV というエネルギーは、 ϕ 中間子生成のしきい値 1.57 GeV の直下にあり、カイラルゴールドストーンボソンである K 中間子の関与する異常に低いエネルギーの KA チャンネルを除けば、ストレンジクォークを含んだハドロン生成チャンネルが初めて開けてくるエネルギー領域である。従って LEPS での物理はストレンジネス生成に関するものが主眼となる。

タガーによるエネルギー同定の内容を見るために、トラッカーを用いたモンテカルロ計算を行うことにする。このトラッカーでは、まず電子ビームの 7.8 m の直線部分で入射レーザー中の光子密度に従った重みでコンプトン散乱が起こる。レーザーは cw で直線部中央で直径 1 mm に絞られたプロファイルをもっており、通常使われているレーザーの波長では中央の 1 m の部分からの寄与が、上流側および下流側からのそれぞれの寄与とほぼ等しい。電子ビームは極端に平べったい形をしているが、レーザーの中にすっぽり収まっている（電子ビームの水平エミッタンスは 3.4 nm・

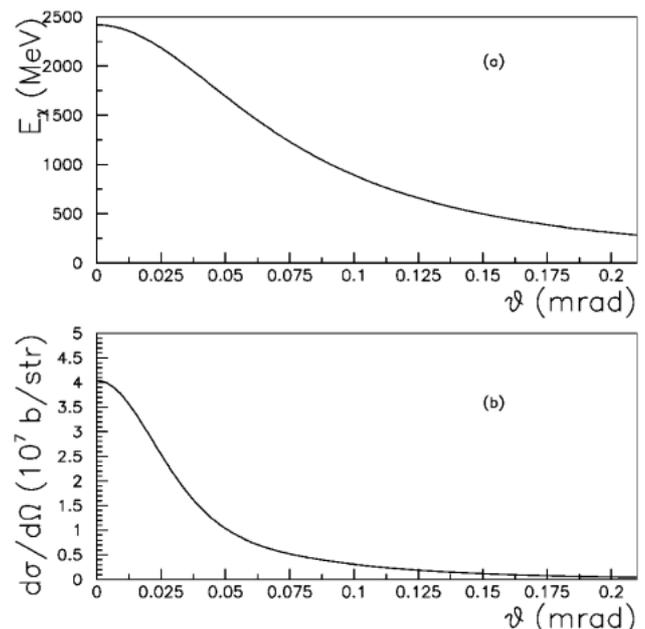


図3 レーザー波長 351 nm に対応する LEP の (a) エネルギーと放出角度の関係、(b) 角度分布

*2 放射光コミュニティには「後方コンプトン散乱のビームラインはビームに悪さをする」という“迷信”が未だに残っているようだが、その原因はこの辺にあるのではないかと疑っている。

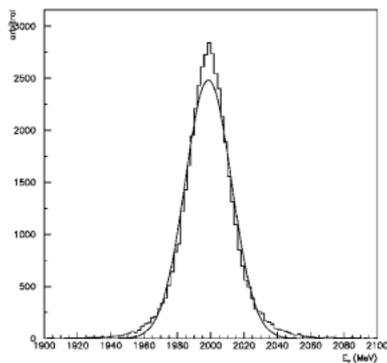


図4 タガー上の一点に対応する E_γ 分布

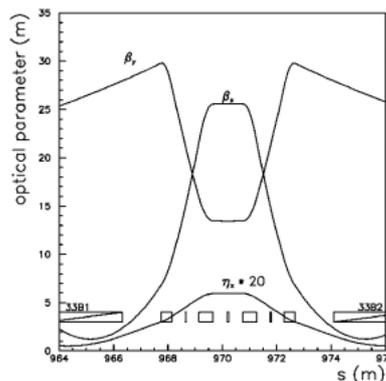


図6 LEPS 相互作用領域のラティス構造と光学パラメータ

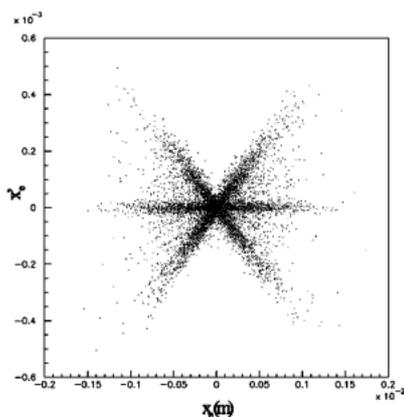


図5 コンプトン散乱を起こす電子の水平方向位相空間中の散乱プロット

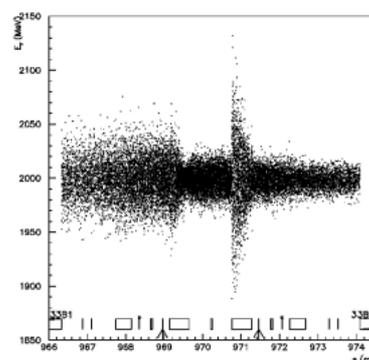


図7 放出点と E_γ の広がり

rad, 水平と垂直のカップリングは 0.2%). 個々の電子は位相空間中で光学的パラメータで決まる分布に従って発生され, Klein-Nishina の公式に従ってガンマ線が生成される (図3). エネルギーを失った反跳電子は 4 極や 6 極電磁石の列の中を通り, 偏向電磁石で曲げられて, 改造チェンバの窓から飛び出し, タガー面に落ちる. タガー面はビーム軸に対してほぼ垂直に設置されている. タガー上の, 位置分解能をもつある一点に落ちて来た電子が上流で吐き出したエネルギーの分布を示したのが図4である. この分布は中心を 2000 MeV にもち, 巾は 14 MeV あるが, 図中の曲線が示すように, 一個のガウス分布によるフィットがあまり良くない ($\chi^2/dof=17$). この原因を調べるために, コンプトン散乱を起こす電子の水平方向位相空間中の散乱プロットをとってみると, 図5のようにガンマ線のソースが大まかに 3 つの部分から成っているように見える. 直線部の光学パラメータを電子ビームの軌道に沿って電磁石のラティスの上に書き込むと図6のようになる. 図中の左右両端に偏向電磁石

があり, 箱は 4 極, 薄い箱は 6 極電磁石である. このラティス構造を, 前に述べたレーザー光子密度で重みをつけて見た結果が図5なのである. 実際, 分布は巾がそれぞれ 9, 19及び 40 MeV の 3 つのガウス分布で非常によくあらわされる ($\chi^2/dof=1.0$). 図7は, ラティスに沿って, その位置で放出されたガンマ線のエネルギーを縦軸とした散乱プロットである. 反跳電子はこれまでと同じ点に落ちた事象だけをプロットしている. これを見ると, 下流側の散乱点からのガンマ線は, 上流と較べてエネルギーの広がりが小さい. これは, レーザーの焦点位置を手前に持って来る等の工夫をすれば, タギングのエネルギー分解能を高めることが可能であることを示唆している.

この図には, BPM (上に丸の付いた棒) と水平および垂直軌道補正電磁石 (それ以外の縦棒) が書き込まれている. 実は運転開始当初このビームラインの電子軌道は完全な直線とは言えず, 補正電磁石の励磁によって水平方向に大きく 3 つの線分に折れ曲がり, COD 補正に伴って折れ曲がり具合が時々刻々と変化

していた。このために標的上のガンマ線の広がり方が変化し、まことに扱にくいものであった。そこで現在は、ガンマ線の広がり大きな影響をもつ水平補正電磁石（矢印の付いている縦棒）2台の使用を止めている。

中心成分の巾 9 MeV という値は、殆ど電子ビームのエネルギー広がり等に等しい。このような小さな値が出て来るには、局所分散といういかにも加速器物理的な量が効いており、その効果を見無視すると巾は 11 MeV まで広がる。

通常、アンジュレータ等の放射光光源の挿入部は光学パラメータが一定にしてあり、ユーザーには加速器のラティス構造は見えないようになっている。しかしレーザーコンプトンのビームラインにおいて物理実験の分解能を追求した結果、このような“舞台裏”まで見えて来てしまったというわけである。

4. LEPS2 に向けて

これまでタギング法によるエネルギー同定について述べて来たが、この方法が本質的に必要となるのは、LEPS の測定器が前方での荷電粒子の測定に特化されており、終状態の完全測定が困難だからである。粒子 Θ^+ のシグナルも、前方に生成された K^+K^- を捕まえて欠損質量を同定して得られたものである。 Θ^+ の存在を確立するためには、より広い運動学的領域をカバーする、分解能の高い測定器が必要である。そのような測定器は一般に大型となり、SPRING-8 の実験ホール内への設置は困難で、ビームをホール外へ引き出さなければならない。後に述べるように、LEPS では既存のビームラインの限界を乗り越えて、新しい物理へと展開してゆくために、新ビームライン LEPS2 建築にむけた議論を進めている。そこでは、新しい大アクセプタンスの測定器として、BNL の E949 実験で用いられていた測定器を、理研の協力を仰ぎながら SPRING-8 に移設する計画が立てられている。

Θ^+ のスピン・パリティは、この粒子を理論的に解釈する上でも本質的に重要であるが、実験的な情報は何も得られていない。LEPS の実験でこれが得られなかったのは、ビームエネルギーが低く、 Θ^+ と共に終状態に生成される粒子として疑スカラーの K 粒子しか許されなかったことが大きな原因の一つである。そこでベクターの K^* を生成出来るようにエネルギーを 3 GeV 以上に上げたい。エネルギーを上げるためにはレーザーの波長を短くする必要があるが、そうするとパワーが落ちるので、強度対策が必要となる。

エネルギーを上げて K^* を生成するのは偏極量を測

定したいからであるが、その際にビーム光子が偏極しているということも、本質的に重要で欠かせない要素である。後方コンプトン散乱を用いたガンマ線の偏極度は簡単にコントロールすることが出来、この点でも SPRING-8 に LEPS 2 を建設する利点がある。また標的についても、偏極標的に対する要求が出て来るが、これについても既に RCNP 等で準備が進められている。

エネルギーのアップグレードを別にしても、 Θ^+ に限らず、LEPS 領域で興味を持たれる粒子の生成断面積は非常に小さく、統計を上げるにはより強力なビームが望まれる。その一つとして、複数のレーザーを入射することが考えられている。この場合、全部のレーザーを一点に集中させると強度の揺動が大きくなるので、焦点をずらさなければならず、長い相互作用領域が必要となる。また、電子ビームは水平方向に平べったい形をしているので、レーザーとの幾何学的な重なりを増すために、レーザーや電子ビームを整形できないかどうか検討を始めている。電子ビームを整形することになれば、やはり磁石の無い長い領域が必要になってくる。LEPS では多数レーザー入射に繋がる試みとして 2 レーザー入射を行い、ほぼ予想通りの強度を得ることに成功している。

LEPS の物理はペンタクォークに限らず、実光子でアクセスが可能なハドロンの励起状態一般に及ぶが、やはりこれまでに見つかっていない、例えばグルーボールのような粒子を、断面積の小さい実光子を用いて色配位組み替えのバリヤをかいくぐって生成したり、交換チャンネルに生成するような実験が特徴となるはずで、その場合には上に挙げた要求はすべて共通の要求となる。特に、相互作用断面積が小さいことの欠点は事象生成に長時間かかることだが、それに対してはビーム強度を上げるのと同時に、アクセプタンスの大きい検出器を活用して最小バイアスかつ終状態を全て捉えるようなデータの取り方を行うのが効果的と思われる、そのためのデータ収集系が必要となる。

これらすべての要求とその方策を考える上で、SPRING-8 の高度に安定したビームや運転状況¹¹⁾は欠かせない条件である。SPRING-8 蓄積リングの電子ビームはバンチ構造を持っており、ユーザーからの要請によって様々なバンチ充填パターンを提供している。LEPS や LEPS2 の実験では、バンチ毎の電流をなるべく平滑化したような充填パターンが望ましい。

更に、上で述べた新粒子を探すようなハドロンの物理の話だけでなく、GeV 領域で見る原子核物理にも、カイラル対称性の部分的回復や、原子核内の多ク

ワーク状態等, LEPS の増強によって開けて来る話題は多く, 沢山の研究者が関心を寄せている.

このような状況の中で, LEPS グループでは, 2005 年より新しいビームラインを建設することを念頭に, そこで展開すべき物理, ビームラインおよび検出器に要求される性能, 基本的なデザインの考え方等について, 定期的に会合を持って議論して来た¹²⁾. その間にワークショップも 2 回開催されている. その間の議論に基づいて, 昨年 12 月, SPring-8 の運営団体である財団法人高輝度光科学研究センター宛に大阪大学核物理研究センターより計画趣意書が提出され, 本年 2 月に承認されている. LEPS の新しいビームラインは暫定的に LEPS2 と呼ばれている.

LEPS2 では, 30 m 長直線部に 8 本の紫外レーザーを入射し, 3 GeV を越えるエネルギー同定されたガンマ線を $10^7/\text{sec}$ 程度発生させる予定である. また将来的には, 直線部にアンジュレータを設置し, 出て来た放射光をミラーで 180 度方向を変えて再び電子ビーム軸上に入射させることにより, さらに高いエネルギーの光子を取り出すということも考えている¹³⁾. もし 100 eV の放射光の 10% の強度を再入射させて結像することが出来れば, 4 から 6 GeV の光子を $10^5/\text{sec}$ 程度生成することが出来る. これが本当に可能かどうか, 特にミラーシステムに関してスタディが必要であり, ビームライン研究としての今後の課題の一つである. LEPS2 の議論は, 現在検出器とビームラインの 2 本を柱として進められており, 概念設計から実設計の段階へと移行しつつある. その具体的内容についても述べたいのだが, それはまたの機会に譲ることにする.

謝辞

加速器所属の者までを含む LEPS グループを引張り, ご指導下さっている LEPS グループリーダーの中野貴志博士に深く感謝します. 多くの物理の議論に誘って下さり, LEPS の物理の理論的な側面について教えて下さる A. Titov 博士に感謝します. LEPS-BL の現場を切り盛りされ, 理論出身で実験の基礎的な知識の無い私に厭きずに手ほどきをして下さり, 議論して下さる大橋裕二博士に感謝します. 本稿の内容の多くは LEPS の他のメンバー及び SPring-8 加速器部門メンバーの仕事や彼等との議論に基づくものです.

参考文献

- 1) J. K. Ahn et al., Proc. of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Wako, 141 (1999).
- 2) URL <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/index.html>
- 3) T. Nakano et al. (LEPS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **91**, 012002 (2003).
- 4) D. O. Livintsev, hep-ex/0410024
- 5) A. I. Titov et al., Phys. Rev. C **70**, 042202 (2004).
- 6) S. Stepanyan et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 252001 (2003).
- 7) B. McKinnon et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 212001 (2006); M. Batarelli et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 042001 (2006).
- 8) A. I. Titov et al., Phys. Rev. C **74**, 055206 (2006).
- 9) C. Schaerf, Nuclear Physics News **2**, 7 (1992).
- 10) D. Rebreyend, private communication (1994).
- 11) H. Tanaka et al., J. Synchrotron Rad. **13**, 378 (2006).
- 12) URL <http://www.hadron.jp/index.htm>
- 13) V. Nelyubin et al., Nucl. Instr. and Meth. A **425**, 65 (1999).