

CERN 滞在記

日本原子力研究所

中島 宏

e-mail: nakasima@shield2.tokai.jaeri.go.jp

1. CERN の概要

CERN(the European Laboratory for Particle Physics: Councel Europeen pour la Recherche Nucleaire)は原子核、素粒子物理学研究のために、1954年に設立されました。場所は、ジュネーブ中心部から西方に8kmほど離れた、スイスとフランスの国境にまたがったところにあります。CERNの主要研究施設は、地下約100m、一周約27kmの87GeV電子陽電子シンクロトロン加速器(LEP-II)と、一周約6.9kmの450GeV陽子シンクロトロン加速器(SPS)などの加速器群です。

CERNは、欧州の19ヶ国の協力の基に構成されています。オブザーバーとして、日本なども参加しています。総予算は、1996年現在約850億円で、構成国の国民所得に比例して出資が分担されており、主なところでは、ドイツ23%、フランス18%、イギリス14%、イタリア13%です。研究所の運営は、約20名の理論物理学者を中心に行われ、それを取り巻く約100名の物理学者が、研究所の方針、実験の是非について検討しています。この運営方針は各国代表からなる評議会に掛けられ、決定されます。このブレインの下に、物理学者、応用物理学者約830名がおり、技術系及び、事務系職員約2000名がそれを支えています。ちなみに、先の予算の約半分は、これらの人件費です。

ここでの実験に関わっている研究者は、世界80ヶ国から約6700名おり、欧州からの約5000名以外ではロシア、アメリカの各600名が際立っています。日本からも約90名が現在参加していますが、CERNの次期計画であるLHC(Large Hadron Collider)に文部省が50億円出資することが一昨年決まりましたので、今後CERNに行く研究者も増えていくのではないかと思います。東洋人では、中国人がかなり目立っており、何度か彼らに中国語で話しかけられました。

2. CERN の加速器

CERNには、十数種の加速器があり、これらを組み合わせて様々な粒子が加速されています。これらの粒子加速に際して、24GeV陽子シンクロトロン(ps)では、三種類のLINACから受けた粒子を14.4秒のスーパーサイクルと呼ばれる時間の中で、最初の数秒間で電子、次の数秒間で陽電子、次に陽子、次に反陽子、更に次に重イオンを加速し、後段の加速器にビーム供給することにより、数多くの実験を同時に行うことを可能としています。

CERN で最も広く世の中に知られた成果を上げている加速器は、反陽子集積リングでしょうか。ルビア氏とメール氏は、不可能と言われていた反陽子の集積、加速をこの加速器で成功し、W、Z 粒子を発見した功績により、1984 年にノーベル賞を得ています。この反陽子は、減速リングにも送られ、1GeV から 5MeV までエネルギーを変えて用いられています。ここでは、CP-対称性の破れに関する実験とか、反陽子に対する重力の効果とか、核分裂断面積、阻止能測定まで行われています。一昨年新聞に掲載された反原子水素の生成や、電子の代わりに反陽子が回っている He 原子の生成は、ここで行われました。突然ですが、「スタートレック」という映画をご存じでしょうか？その映画では、反陽子エンジンを搭載したロケットが登場し、宇宙を飛び回りますが、現在の反陽子集積技術では、地球上の全エネルギーを用いても、車 5 台を数百キロ動かすのがやっとだそうです。

現在、CERN の中心となっているのは、LEP-II です。数年前までは、50GeV の電子及び陽電子を加速して実験を行っていました。Z 粒子の寿命の測定とか、三種類のニュートリノが存在することなどが検証されたそうです。最近、超電導加速空洞に置き換えられ、87GeV で昨年の夏から実験を開始しました。が、開始早々一週間ビームが止まりました。「加速管に置き忘れられたビールの缶は、電子を正常に加速することを妨げる。」というのが、LEP-II の最初の成果です。

3. LHC について

LHC とは、現在稼働中の LEP のトンネルを利用した、ハドロン衝突型シンクロトロン加速器です。次期の CERN の中心の加速器となるべく、2004 年の稼働に向けて詳細な検討が進められています。第一段階の設計エネルギーは 7TeV 陽子+7TeV 陽子で、その強度は、 $10^{34}/\text{cm}^2/\text{sec}$ です。次の段階では、Pb イオン同士を全エネルギー 1150TeV、強度 $10^{27}/\text{cm}^2/\text{sec}$ で、衝突させる予定です。この Pb イオンの加速については、既に一昨年 SPS で、全エネルギー 33TeV の加速に成功しています。更には、再度 LEP を組み直し、電子陽子衝突の実験も計画されています。

LHC の目的は、Higgs ボソンの発見若しくは CP-対称性の破れについて検証すること即ち、現代物理学の基を成している「標準モデル」に代わるものを探求することです。このモデルでは、「何故物質は質量を持つか？」という問いに答えるために、対称性の破れを仮定しなければならず、そのために導入されたのが、新粒子 Higgs ボソンです。このモデルによると、この粒子の質量は、1TeV 以下と予測されており、最近の Tevatron での Top quark の測定からは、100 から 400GeV と予測されています。これは、LEP-II の測定範囲内であり、検出される可能性があります。しかしこれは、あくまで「標準モデル」による予測であり、現在このモデルの拡張として最も知られている超対称性理論では、2 個の中性粒子と 2 個の荷電粒子の Higgs 粒子を予測しています。これらも、LEP-II で検出されるならば、それはこの超対称性理論による新しい物理の始まりであり、現在観測されてい

る粒子の対称粒子の観測が新たに始まることを意味しています。

ところで、何故陽子を加速するかと言いますと、更に電子のエネルギーを上げようとした場合、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が増大しますので、現在の LEP の周長では 100GeV が限界となるからです。そこで、質量が重く、シンクロトロン放射が問題にならない、陽子の加速が検討されました。陽子の場合には、このトンネルで、約 7TeV までの加速が可能で、その限界はマグネットのパワーで制約されます。しかし、陽子は、クォークとグルーオン（総称パートン）から形成されているため、個々のパートンが持つ運動量が異なると共に、パートン同士の正面衝突確立が低く、粒子生成に全エネルギーの一部しか使用されません。ですから、陽子陽子衝突実験の場合、非常に強いビーム強度が要求されます。また、目的としない多くの反応が生じ、観測に必要なとしない多量の粒子の中から、選択的に目的のものを観測しなければならなくなるという測定精度上の大きな欠点を持っています。そのため、直線型の電子陽電子衝突型加速器に素粒子物理の明日を賭けている物理学者が CERN にもいて、検討を進めています。

4. LHC の遮蔽設計計算法について

LHC の遮蔽設計計算は全て、高エネルギー粒子輸送計算モンテカルロコード FLUKA で行われています。私もこのコードを用いて、遮蔽設計を手伝ってきました。TeV エネルギー領域のハドロン輸送を扱い得る遮蔽設計計算コードは、この FLUKA の他、ロシアや Fermi 研究所で開発が進められている MARS などがありますが、遮蔽設計計算に重要となる 100MeV 以下の中性子エネルギー領域や、電磁カスケードまで単一コードで追える高エネルギー粒子輸送計算コードは、今のところ FLUKA しかありません。また、4m 厚さの遮蔽壁の透過計算や、100m 長さのダクトストリーミング計算が行えるところなどは、FLUKA に導入されている各種分散低減法の効果といえると思います。但し、FLUKA は非公開コードですので、使用には著者の許可が要りますし、ベンチマーク解析は出来ません。

FLUKA では、ハドロン計算に関して、大雑把に言いますと、TeV 領域から順に、Dual Parton Model、共鳴生成崩壊モデル、核内カスケード・前平衡・蒸発モデルが用いられています。それらの接続領域での整合性について聞いたところ、著者の一人であるファッソ氏は、にこやかに笑っているのみでした。GeV 領域については、彼らのレポートを見る限りにおいてさしたる問題はなさそうですが、やはり何か問題が隠されているのでしょうか。TeV 領域の反応についても、計算結果がどの程度正しいのか実験との比較のしようがないので定かではありません。只、LHC のビームダンプ周囲における線量当量を、ロシアの人が MARS で計算した結果と比較したところ、かなり良く合っていました。

ところで、CERN でもそうですが、素粒子実験用の検出器の設計には、現在でも GEANT がよく用いられています。FLUKA も GEANT も同じ Dual Parton Model に基づいたコー

ドから派生したので、両者はほとんど同じようなものであろうと思っていました。ところが、FLUKA の著者の一人であるフェラーリ氏は、数 GeV 以上に用いられている物理モデルについて大分修正したらしく、GEANT の物理上の問題点を並べあげたレポートを昨年発表していました。随分自信があるようです。

5. CERN中性子場におけるCEC共同実験について

SPS では、加速器に設置された内部ターゲットに、450GeV の陽子を当て、そこで生じる二次粒子をマグネットで集めることにより、陽子や π などをエネルギーを変えて(205～24GeV/c) 取り出すことができます。もちろん、SPS の一次ビームである、450GeV 陽子、電子や鉛イオンなども引き出せます。以前は、高エネルギー粒子輸送計算コードの検証のために、これらのビームを鉄体系などに入射し、体系内の中性子分布などの測定が行われていました。現在では、これら二次粒子を銅ターゲットに当てて中性子を発生させ、ターゲット周囲に積んだコンクリートブロックや鉄ブロックで、中性子減速場を構成しています。この減速場で得られる中性子スペクトルは、宇宙線により生じる大気圏高層中での中性子スペクトルに類似しているとのこと。コンクリートブロックの外側でのスペクトルは、100MeV 近辺と MeV 領域にピークがあり、鉄ブロック外側では、keV 領域にピークがあるようなスペクトルになると FLUKA で計算されています。

Commission of European Communities(CEC)の基、この中性子場を用いて、高エネルギー加速器の放射線の防護と商業用航空機乗務員の宇宙線による線量当量評価を目的としたスペクトロメーター及び線量計の開発が行われています。昨年の実験で目立っていたのは、Tissue Equivalent Proportional Counter(TEPC)、ポケット線量計、TLD 及び CR39 で、後半には、LHC の検出器 ATLAS 用の Si 検出器の放射線損傷に関する実験も行われていました。この共同実験は、昨年からその枠が全世界に広げられており、日本からも参加できます。昨年は、固体飛跡検出器及び、ポケット線量計の照射を行いました。CERN の放射線防護グループリーダーであるヘッフェルト氏は、日本製のポケット線量計などに大いに関心があるようで、自分でも照射を行っていました。

6. Energy Amplifier project について

数年前に一般紙でも報じられたので、ご存じの方も多いと思いますが、Energy Amplifier(EA) project とは、ルビア氏が中心となり、CERN で現在進められている、加速器を用いた核エネルギー利用計画です。この装置では、1GeV-12.5mA の陽子を炉心にある鉛ターゲットに入射し、中性子を発生させ、未臨界高速炉を駆動します。加速器は、PSI で開発しているサイクロトロンを用います。炉型は、液体金属鉛を冷却材とし、自然循環のみを用いた、高さ約 30m、直径約 6m の固有安全炉です。一昨年前までは、熱中性子体系で設計を行っていたそうです。概念設計では、Th-²³³U 系の酸化物燃料を用いています

が、TRU や、Pu の燃焼も検討しています。燃料は何でも良いと言った感じでしょうか。5 年間燃料を交換しないそうです。この装置によるエネルギーゲインは、入力エネルギー 12.5MW に対して、120 倍と計算されています。

この検証実験として、PS を用いて、約 3m 立方の鉛体系内に数 GeV の陽子を入射し、中性子束空間分布とエネルギースペクトルの測定を行っています。また、 ^{99}Tc などの断面積測定も行っています。今後、鉛体系周囲にブランケットとして劣化ウランを巻いた体系による測定も計画されています。

概念設計は既にほぼ終了しており、次に国際協力による詳細設計が約 1、2 年かけて、20M ECU の予算で行われ、詳細設計が終了した時点で、加速器及び炉心の建設を約 5 年の歳月と 300/400M ECU で行うそうです。彼らの弁を借りると、「現在の核融合炉技術は、現実のものとするのに未だ多くの外挿を必要とするのに比べて、EA は現在の技術レベルで十分に実現可能である。」とのこと。3、40 人のグループで設計、実験などが行われているのですが、設計での変わり身の早さや、検証実験の進め方の早さに、彼らの勢いを感じました。

7. CERN の計算機環境

CERN では、私のような計算機の素人にとって、非常に優しい、親しみ易い環境が構築されています。新品の PC でも、フロッピーディスク一枚入れるだけで、ネットワークに接続され、センターがインストールしたワープロなどが全て使えるようになります。NICE システムというそうです。私は、IBM-PC を使っていましたが、CERN では X-端末が急速に普及しているようです。Mac は年輩の方が主に使用しているようでした。

各研究室の WS も、AFS というシステムを介して、センターで一括管理されており、各種ソフトや CERNLIB をインストールせずに使えますし、バックアップまで毎日やってくれます。長時間 JOB をセンターの WS で流す際も、ちょっとコマンドを変えるだけで、研究室の WS で使用していたファイルでそのまま計算できるので大変助かりました。サポート体制も万全で、日本語の入った PS File が打ち出せないというトラブル以外は、センターに電子メールを入れておくだけで全て解決しました。CERN では、余りに全てが便利だったので、今はストレスの積もる毎日です。

ところで、CERN は WWW の発祥地としても知られています。CERN のホームページ <http://www.cern.ch> には、美しい写真などがたくさん格納されていますので、敢えてここにはモノクロ写真を載せませんでした。是非一度ご覧になってみて下さい。