

7. 中間子工場

7.1 大型ハドロン計画における中間子利用計画

永嶺謙忠

東京大学理学部中間子科学研究センター
・理化学研究所ミュオン科学研究室

Meson/Muon science research program under planning at the future high intensity proton accelerator of the Japan Hadron Project is reviewed. Main subjects will be μ SR studies on condensed matter, muon catalyzed fusion and fundamental physics, etc. Possible future development of new muon beam concept is also described.

1. はじめに

大型ハドロン計画 (JHP) は、大強度陽子加速器施設将来計画として、東京大学原子核研究所を中心にして1986年頃立案され、1989年には日本学術会議から「要望」という形で評価され、1993年には文部省学術会議加速器部会から、「そのための研究機関(所)の設置と計画の段階的実現」を勧告されている。

我々ミュオン科学を中心とする中間子科学を研究する者にとっては、パルス状ミュオンの科学研究に関して1980年から世界に先駆けた成果をあげた高エネルギー物理学研究所 (KEK) 内東京大学理学部中間子科学研究センター (UTMSL/KEK) が、国内に現存する唯一の施設である。しかしながら、得られるミュオンビームは、平均強度においても、パルス当り強度においても、世界最強から50分の1程度離されている。このような現状を考えると、計画の実現は必要不可欠の要求である。

中間子発生用大強加速器の世界の現状は図1に示す通りであって、ビーム強度(図中に対数標示されている)においてDC状ではLAMPF(米)、PSI(ス)、TRIUMF(加)が、パルス状ではRAL(英)が世界をリードしている。JHP実現の「遅れ」に対応する道として、これら他国の加速器の積極的利用という「国際協力」の道があり、1988年に実現されたUTMSLによるTRIUMFでの超伝導ミュオンチャンネルの実現、1994年に完成した理化学研究所RALミュオン施設の建設、などの大きな国際協力研究がすすめられている。

本来JHPにおける中間子利用計画は、M (Meson) -Arenaとして組織化され、1980年代末には図2に示されるような施設計画がたてられていた。そこではミュオン利用に加えて、0.6 GeVのパイ中間子(π)を使う計画、ビームダンプからのニュートリノ(ν)を使う計画とが一体化されて計画されていた。その後 π はより高いエネルギーを望むことから12 GeVのKEK-PS、30 GeVのTRIUMF-KAONに関心が移り、 ν は ν 振動現象を高エネルギー ν を用いて測定する方向に興味に移り、現在のM-ArenaはMuon中心ということになっている。1995年2月の時点で、図3のようなレイアウトが提案されている。

以下では、ごく簡潔に、「JHP時代」の「ミュオン科学」の主題は何であるかを概観したのち、今後何をすべきか考察してみることにする。

2. いくつかの重要研究課題

2 a μ SR物性

大強度ミュオンビームが得られると、高感度微視的磁気プローブである μ SR（ミュオンスピン回転／緩和／共鳴）法にとって、どのような発展が実現されるであろうか。

物質材料の磁気プローブとして考えると、極微量の試料（現在の数cmからmm以下に）を対象とすることができる。さらに、後述する超低速ミュオンビームの進展によって、飛程nm以下のがミュオンビームの利用が可能になり、表面や界面の原子層の1層ずつが対象となる μ SR実験が可能になる。

ミュオンは、“静かな”微視的磁気プローブであると同時に、ミュオンの導入によって新しい微視的秩序状態が生まれ、それを高感度でプローブでききるというユニークな研究が展開できる。このすぐれた特徴は、金属中の正ミュオンの拡散現象やミュオニウム／正ミュオンの化学反応などの研究に利用されてきた。最近になって、有機半導体の二重結合部に正ミュオンが導入されることによって生ずる不対電子やポーラロンがどのような伝導機構を持つか調べる実験が行われてきた。さらに、酸化物高温超伝導体中の酸素位置に負ミュオンがつくことによって生ずる常磁性電子を用いて、超伝導電流と電子の相互作用を探究することもできるようになった。大強度ミュオンビームは、これら“能動的” μ SR研究にも飛躍的な進展をもたらすであろう。

2 b ミュオン触媒核融合 (μ CF)

μ CFは、負ミュオンがクーロン反発力を押さえて2つの原子核(dとt, dとd, など)を近づけ、小さな分子をつくり分子力核融合を起こさせ、さらに自由になったミュオンが寿命の間に何度も連鎖的に核融合反応を起こさせる現象である。

この μ CF現象に関して、これまでに数々の重要な発見がなされてきている。しかしながら、以下の点で十分な理解が得られていない。これらの問題を解決してゆくには、さらに大強度のミュオンビームの実現などの実験手法の抜本的な高度化が不可欠である。

1. μ CF現象での(dt μ)や(dd μ)などのミュオン分子生成が共鳴的であることが知られている。しかしながら実験的に得られた(dt μ)生成の温度依存性や密度依存性(多体衝突効果)などについて定量的理解が全く得られていない。さらに、eVエネルギーに期待されている共鳴反応については、全く実験がなされていない。
2. 核融合反応後に放出される α に負ミュオンが付着する現象は μ CFにおけるエネルギー生産性をきめる。このアルファ付着率に関して、観測されている密度依存性に対する理解や、残留 ^3He 不純物の効果、($\alpha\mu$)状態からのミュオン脱離などの現象が理解されていない。高度化された実験が待たれる。
3. DとTの混合系における μ CFでは、(d μ)からtへのミュオン移行現象がまず起こり、つづいて(dt μ)生成が起こるとされている。このような移行現象が(d μ)の基底状態から起こっているのか、励起状態から起こっているのかが判っていない。大強度ビーム下でのX線測定などが問題の解決を与える。

2 c ミュオン基礎物理学

ミュオンが関与する系の電磁氣的相互作用や弱い相互作用に関する観測量の精密測定は、数々の重要な物理量を提供する。ミュオンビームの制限のために、きわめて基本的な次のような実験の進歩が止まっている。大強度加速器を得て、大きな進歩を期待したい。

1. 正ミュオンの寿命の精密測定
2. 水素への負ミュオンの核捕獲率
3. ^{12}C 核への負ミュオン捕獲の偏極効果
4. ミュオニウムの超微細相互作用定数
5. ミュオニウムの1s-2s準位間エネルギー差
6. (μ^- He)原子の(3p-3d)、(2s-2p)エネルギー差

3. ミュオンビーム先端技術開発

もとより、ミュオン科学の発展には良質のミュオンビームの存在が前提となる。「大強度」以外にビームのエネルギー幅やビームのサイズが画期的に向上することが望まれる。一つの重要な方向として、eV~keVの超低速のビームを大量につくることが望まれる。これまでのビームを使って、以下のような開発研究がUTMSLなどを中心に行われている。大強度ビームの実現とともに、今後の大いなる発展が期待できる。

1. 超低速正ミュオンビーム

UTMSLでは、高温タングステンを陽子ライン上に置いて、大量の熱エネルギーミュオニウムを真空中に発生させ、そこへレーザービームを導入して共鳴解離を起こさせ、超低速正ミュオンビームを得る。昨年度夏に成功をみた。

2. 超低速負ミュオンビーム

UTMSLではミュオン分子内 μCF 現象の後に放出される10 keV負ミュオンを用いて低速ビームをつくる実験が進行している。トライアムフにおける予備的な実験で、今後の発展が期待できる結果が得られている。

4. 結論

JHPは「陽子工学センター」と共に、21世紀にむけた日本が世界に誇り得る大強度陽子加速器計画である。以下に示す理由によって、ミュオン科学の立場から、これらの計画は何らかの形で早期に実現されなければならない。

1. 現在から21世紀にむけた重要な科学研究課題が存在している。その一部をこのレポートに記した。
2. UTMSL/KEKを中心に国内の「ミュオン科学」に関するユーザーが多数存在する。1990-94年にわたり、国内約220人がUTMSL/KEKを利用し、50人がTRIUMFを使用した。理研-RALによりさらに増大するであろう。
3. すでに、試料のサイズや条件によって、TRIUMF、PSI、RALでも難しいミュオン科学実験があり、いっそうの強度増が望まれる。
4. 超低速ミュオンなど、良質の高強度ビームを生成するにはぜひとも大強度陽子加速器がいる。
5. 極限的に大強度を必要とする実験が存在している。その極限は、正ミュオンと負ミュオンとを大量に発生させ、TeVまで加速し衝突させるミュオンコライダー計画であろう。

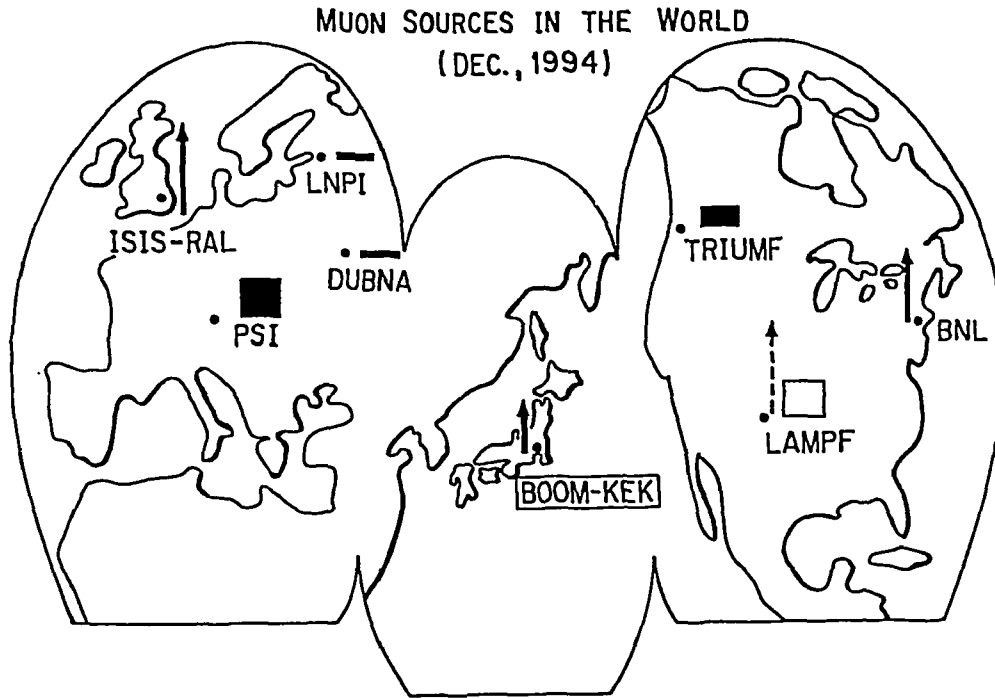


図1 世界の代表的なミュオン実験施設。パルス状ミュオンが矢印で、DC状ミュオンが黒帯で示されている。高さが強度の対数値に対応する。

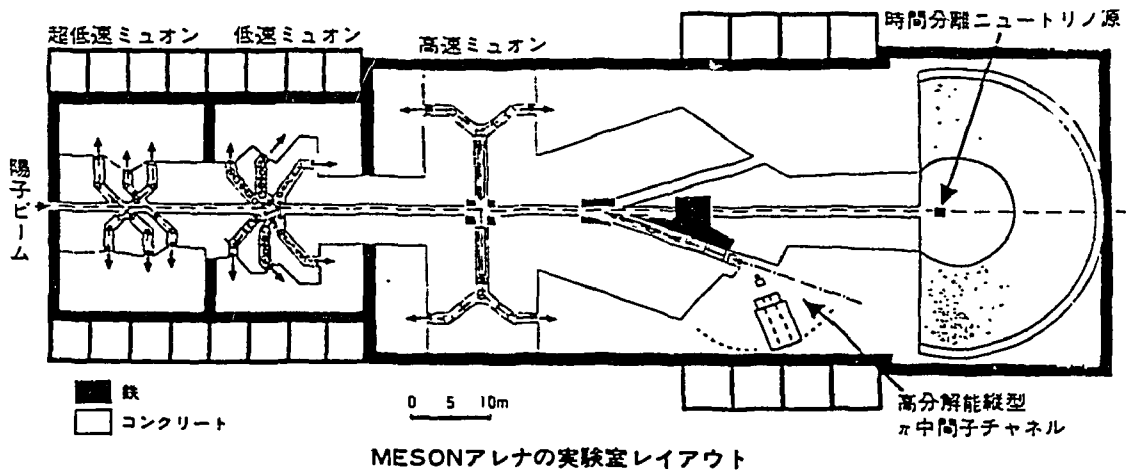


図2 1988年に提案されたJHPの中間子施設計画

