

1. はじめに

ニュートリノに関する研究はここ 10 年で飛躍的に進展した。ニュートリノには 3 種類 (ν_e, ν_μ, ν_τ) あって、それぞれわずかに異なる質量を持っており、飛行する間に振動して他の種類のニュートリノに変化してしまう。このようなニュートリノの驚くべき姿を明らかにしてきた立役者は、非常に弱い相互作用しかしないニュートリノを捕まえることのできる巨大なニュートリノ検出器である。

ニュートリノの生成源についても、太陽や大気あるいは原子炉から発生するニュートリノ以外に、加速器を用いて人工的に作り出されたニュートリノビームが研究に用いられ、実際に K2K 実験等で成果を出しつつある。研究をさらに推進するためには、より強力で良質なビームが必要となってくる。その究極の目標が今回の講義のテーマとなるニュートリノファクトリである。

今回一連の講義において大強度陽子加速器の将来的な利用方法として、ニュートリノビーム、特にミューオンベースのニュートリノファクトリを取り上げ、それについて解説を行う。本講義では、そのイントロダクションとして、ニュートリノファクトリの目的、原理、必要な技術等を従来のニュートリノビームも含めて説明していく。後半部では現実のニュートリノファクトリ計画の概要、各構成要素の R&D の状況を述べる。技術的細部については続きの講義を参照されたい。なお、前半部には理解を助けるために簡単な設問を設けた。解答は後日 Web page に載せるので参考にしていきたい。

2. ニュートリノビーム

2.1. ニュートリノとその検出

ニュートリノは現在の素粒子の標準模型を構成する基本粒子で、強い相互作用をしないレプトンに属する。現在 3 種類のニュートリノ (ν_e, ν_μ, ν_τ) とその反粒子の存在が確認されている。弱い相互作用しかしないために、物質との相互作用は

きわめて弱く透過力が強い。ニュートリノと原子核の反応の断面積は 10^{-38} cm^2 程度で、陽子と原子核の反応断面積にくらべ 15 桁も小さく、陽子と同様の反応を起こそうとすると、 10^{15} 倍の質量が必要になる。ニュートリノの検出がいかに困難かは、パウリによって理論的に予言されてから、ライネス、コーワンらによって原子炉からのニュートリノが発見されるまでに 30 年近くかかったことからわかる。このようなニュートリノを観測して、その性質を調べるためには、強力なニュートリノの源と大きな検出器が必要ということである。

設問 1: ニュートリノの透過力

水の中に陽子およびニュートリノを入射したとき原子核反応を起こさずに進む距離、平均自由行程 (mean free path) はどのくらいになるか? 反応断面積は本文中の値を使用して答えよ。

2.2. ニュートリノ振動

太陽ニュートリノおよび大気ニュートリノの観測結果から、ある種のニュートリノが予測よりも少ない量しか観測されることがわかってきた。これは、ニュートリノが飛行中に振動して別の種類のニュートリノに変化すると考えるとよく説明できる。

ニュートリノ振動は質量の固有状態と相互作用の固有状態が一致していないことにより起こる。簡単のために 2 種類のニュートリノで考えると弱い相互作用の固有状態 ν_μ, ν_τ は、質量の固有状態 ν_1, ν_2 の混合状態で表される。

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

ここで、 ν_1 と ν_2 に質量差 $\Delta m^2 (= m_1^2 - m_2^2)$ があると、エネルギー E (GeV) のニュートリノが真空を L (km) 飛行する間に ν_μ が ν_τ に振動する確率は

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 (\text{eV}^2) L (\text{km})}{E (\text{GeV})} \right) \quad (2-2)$$

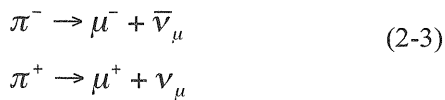
であらわされる。

1998年スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測により、 ν_μ が ν_τ に振動しているのが初めて捕らえられた。このニュートリノ振動の発見は、ニュートリノが有限な質量を持つはじめての証拠であり、これまで成功を収めてきた素粒子物理学の標準模型の綻びが見えた瞬間である。この綻びを広げ、ニュートリノ振動の背後に潜む物理（レプトン CP 非保存等）を探究するのが、今後のニュートリノ研究の大きな課題である。

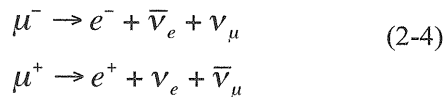
2.3. ニュートリノビームの生成

加速器を用いてニュートリノを得る方法には以下の3種類の方法がある。

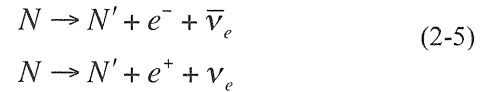
- パイオンの崩壊を用いる方法



- ミューオンの崩壊を用いる方法



- 放射性同位元素のベータ崩壊を用いる方法



それぞれの方法について、以下に、原理、構成および特徴を説明する。

2.3.1. パイオン崩壊によるビーム（コンベンショナルビーム）

高エネルギー陽子ビームを生成標的に衝突させ、生成するパイオンを崩壊させて、ニュートリノビームを得る方法は、古くから実践されてきた。近年はニュートリノを250km彼方にある検出器に打ち込んでニュートリノ振動を観測した、K2K長基線ニュートリノ実験に用いられている。すでに実現しているという意味で、コンベンショナルビームと呼ばれている。パイオンを作り出す大強度陽子加速器の強度が1MW〜4MWに増強され、強度を飛躍的に改善したものはスーパービームと呼ばれている。

コンベンショナルビームの構成を図1に示す。

まず生成標的に陽子ビームをあててパイオンを生成する。標的には、数GeVでパイオンの収量が多い、炭素やアルミニウム等の原子番号が小さい元素が用いられ、陽子ビームをより多く反応させるため、細長い形状をしている。

生成した正負のパイオンのいずれかを前方に平行になるように収束させるために、電磁ホーンというデバイスを用いる。2層の同軸状に置かれた電極にパルス電流を流し、極板間に中心軸からの距離rに逆比例するようなトロイド磁場を発生

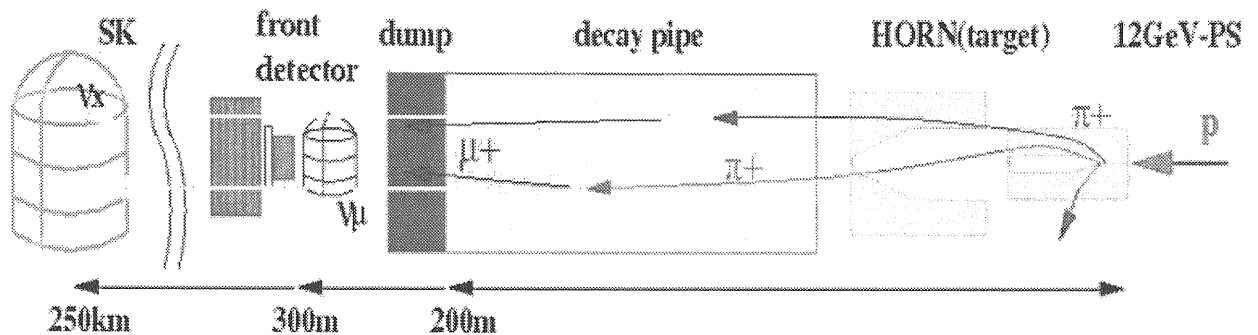


図1：コンベンショナルビームの例(K2K実験)

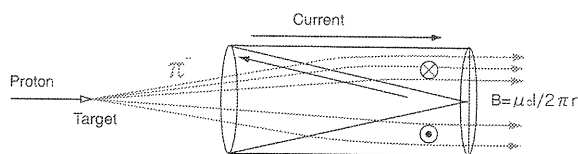


図 2 : すべての運動量のパイオンを集束させるホーン形状

させることにより、放射状に生成されるパイオンを偏向させて向きを平行にそろえる。生成時のパイオンの横方向運動量 P_t はほぼ一定であるので、それを磁場で曲げてやるためには、

$$p_t = \int B dl \propto \frac{l}{r} = \text{const.} \quad (2-6)$$

のようにコーン状のホーンで r に比例した距離を通過するにすれば、一定の P_t キックが得られ(図 2)、広い運動量範囲のパイオンが一様に収束される。一方、ある運動量のパイオンだけを収束させるには、次の設問のようにホーン形状を変えてやればよい。

設問 2 : ホーンの収束について
運動量 p をもつ単色のパイオンを収束させるにはホーン形状をどんな形にすればよいか? 標的の大きさは無視して考える。

方向をそろえたパイオンは崩壊領域(decay pipe)とよばれる大きな空洞で崩壊して、ニュートリノビームを生成する。崩壊領域の長さについては、なるべく多くのパイオンを崩壊させるためには長い方がよいが、パイオンが崩壊してできるミュオン崩壊による電子ニュートリノのバックグラウンドが増えてしまうため、最終的には許容できるバックグラウンドレベルにより決定される。K2K 実験では約 200m の崩壊領域を設置した。

設問 3 : 崩壊領域の長さ
パイオンの平均エネルギーが 9 GeV としたとき、電子ニュートリノのミュオンニュートリノに対する割合が 0.1% にするためには、崩壊領域の長さの最大値は? そのときの、パイオンはどのくらい崩壊せずに残っているか?

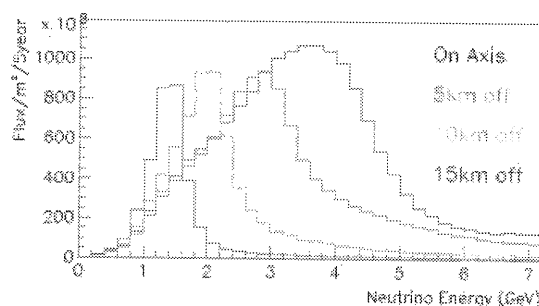
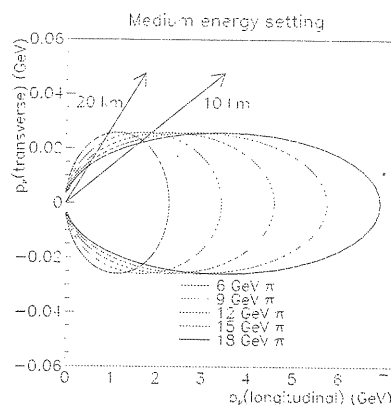


図 3 : Off Axis ビーム

コンベンショナルビームではこれまで広い運動量範囲のパイオンをできる限り多く測定器方向にフォーカスさせ、その崩壊から生じるニュートリノを用いていた。これを Wide band ビームと呼んでおり、K2K 実験等で採用されている。最近の研究では、パイオンの方向から少しずらしたところに測定器を置くと、エネルギーの広がり小さいビームが得られることがわかってきた。図 3 に様々なエネルギーのパイオンから生成されるニュートリノの角度分布と測定器を中心からずらしたときに予想されるニュートリノのエネルギー分布を示す。図からわかるように、測定器をパイオンビームの方向からずらして置くことにより、全体のニュートリノ数は減少するが、準単色でバックグラウンドの少ないビームが得られる。このスキームは Off Axis ビームとよばれ、次世代のスーパービーム計画 (T2K, NOvA) 等で利用されることが決まっている。

コンベンショナルビームについてまとめると、

- 大強度の(反)ミュオンニュートリノビーム

- 電子ニュートリノのバックグラウンドが存在するが、Off Axis にすることにより、小さくすることが可能。
- すでに確立した技術であり、数多くの実験の実績がある。
- スーパービームは技術的にはコンベンショナルビームの延長上にあるが、大強度ビームに起因する問題（放射線、熱）を克服する必要がある。
- 従来、実験に用いられて性能のよくわかった測定器を使用できる。

2.3.2. ミューオン崩壊によるビーム(ニュートリノファクトリ)

ミューオン崩壊をもとにしたニュートリノビームは、もとはミューオンコライダー（付録参照）から派生してきたものである。ミューオンコライダーは大量のミューオンを加速して蓄積する必要があるが、それを直線部のある貯蔵リングに貯めて崩壊させれば、大強度かつ高品質の電子ニュートリノとミューオンニュートリノビームが得ら

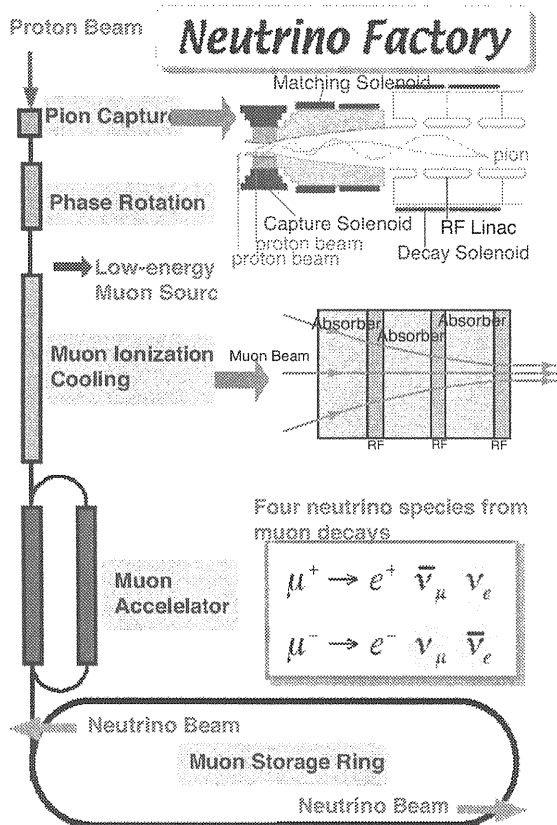


図4：ニュートリノファクトリの構成

れ、ニュートリノ振動の研究に非常に有用なことがわかり、ニュートリノファクトリと名付けられた。1990年代後半から加速器、物理、理論の分野において様々な検討がなされている。

図4にニュートリノファクトリの模式図を示す。大強度陽子加速器からの陽子をパイオン生成標的に衝突させ、大量のパイオンを生成し、ソレノイド磁場により捕獲する。コンベンショナルビームの場合と異なり、ここでは、最も収量の多い、数100 MeVのパイオンを捕獲する。捕獲したパイオンは徐々に減少するソレノイド磁場を通過する間にミューオンに崩壊する。ここで、磁場の変化を十分緩やかに行うと（断熱的）、粒子のもつ磁気モーメント保存することから、磁場が下がるにつれて、ミューオン（パイオン）の運動量の方向はビーム軸方向に向いてくる（静磁場中では全運動量は変化しないため）。模式的にあらわすと図5のようになる。

設問4:ソレノイド捕獲

横方向運動量 200 MeV/c のパイオンが 20 Tesla の磁場中に捕獲されるためには、ボアの内径がどのくらい必要か？パイオンの生成はビーム軸状で行われるとする。また、この磁場を徐々に（断熱的に）1.5 Tesla に減らしていった場合に、真横に出た 200 MeV/c のパイオンの横方向運動量はいくつになるか？

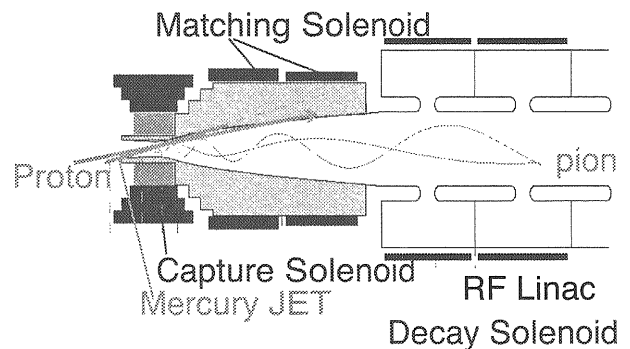


図5：高磁場ソレノイドによるパイオン捕獲とマッチング

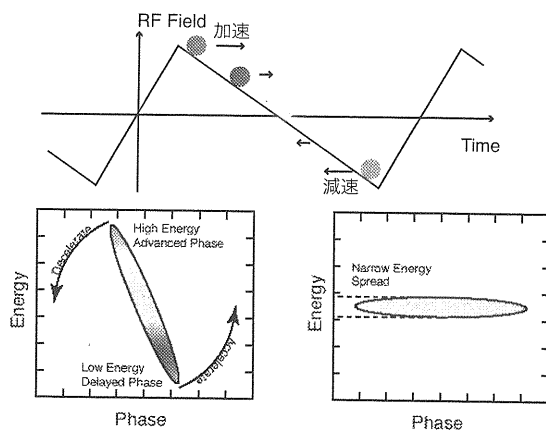


図 6 : 位相空間回転の原理

二次粒子であるパイオン、崩壊してできたミュオンは運動量、ビームサイズ、方向も広がっており、そのままでは通常の加速器に入れることはできない。まず運動量の広がりを小さくし、後段の RF のバケツで加速されるようにするために、位相空間回転 (Phase Rotation or Bunch Rotation) という操作を行う。その原理を模式的に図に示す。飛行中に速度の違いによりできた時間構造を利用し、早く到着する運動量の高い粒子を減速し、遅く到着する運動量の低い粒子を加速するように、RF をかけてやると、位相空間上で回転し、運動量の広がりが小さくなる。

さらに、横方向のエミッタンス (ビームサイズ×角度の広がり) を小さくして、なるべく多くのビームを加速管に入れられるようにビーム冷却を行う。ミュオンは 2.2 マイクロ秒で崩壊するので、通常使われている電子冷却法、確率冷却法等、は使用することができず、イオン化冷却という方法が唯一の方法である。図にその原理を模式的に

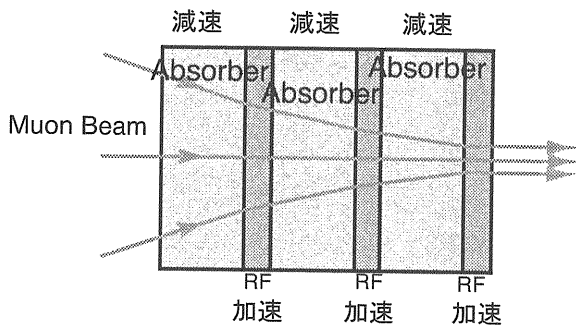


図 7 : イオン化冷却の原理

示す。ミュオンビームを減速剤 (アブソーバ) とよばれる物質を通して、イオン化損失によりエネルギーを失わせ、その後 RF により加速して、縦方向の運動量だけを回復させる。この作業を繰り返して行くと、相対的に横方向運動量が徐々に小さくなり、ビームは平行になっていく。実際の冷却チャンネルには、多重散乱によってビームが散乱されるのを防ぐために、液体水素アブソーバが用いられる。

設問 5 : 液体水素による冷却

2000 π mm mrad のエミッタンスをもつ 200 MeV/c のミュオンを 20cm の液体水素を通過させて、縦方向のエネルギーロスのみを回復させた場合、エミッタンスはどのように変化するか?

ミュオンビームは冷却後、加速器を用いて加速されるが、必要とされる加速器の条件は

- ミュオンが崩壊して無くなる前に素早く加速できること
- 早い繰り返し ($\sim 50\text{Hz}$) で加速できること
- アクセプタンスが十分に大きいこと

必要なアクセプタンスはビームがどこまで冷却されているかによって決まってくる。上記の条件を満たす、線形加速器 (Linac) およびそれに複数の偏曲部を組み合わせた Recirculating Linac (RLA)、そして後述する FFAG (Fixed Field Alternative Gradient) が、ミュオン加速器として用いられる。

設問 6: 加速勾配とミュオン崩壊によるロス

ミュオンを 0.3 GeV から 50 GeV まで一定の加速勾配 E (MV/m) で加速する時、生き残るミュオンの数を時間の関数として求めよ。最終的に崩壊しないで残るミュオンの割合はどのくらいか? 簡単のためミュオンの速度は光速で一定 (即ち、単位時間あたりの加速エネルギーは一定) とする。

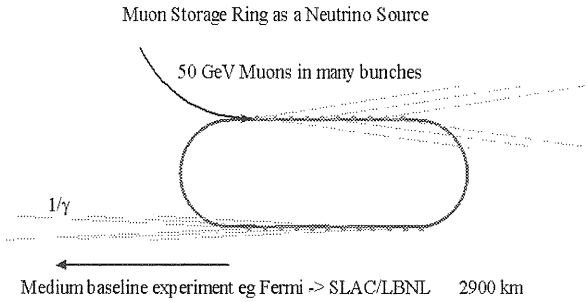


図 8: ミューオン貯蔵リングとニュートリノビームの広がり

最終的に 20 GeV ないしは 50 GeV まで加速されたビームは貯蔵リングに蓄積され、その直線部で崩壊したミューオンから、ニュートリノビームを得る。

ここで得られるビームの性質を見てみよう。まず、ミューオンの重心系で崩壊したときにエネルギー E_ν をもつニュートリノのスペクトラムは以下の式で表せる。

$$\frac{d^2\sigma_{\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu}}{dxdt} = x^2(3-2x) \quad (2-7)$$

$$\frac{d^2\sigma_{\nu_e, \bar{\nu}_e}}{dxdt} = 6x^2(1-x)$$

ここで、 $x = E_\nu/m_\mu$ 。ミューオンを E_μ まで加速すると、重心系は $\gamma = E_\mu/m_\mu$ で前方にブーストされ、実験室系でみた角度の広がり

$$\theta = \frac{1}{\gamma} \quad (2-8)$$

一方、貯蔵リング中のミューオンのベータatron 振動による角度の広がりの最大値は、ラティスのベータを β_0 、ビームのエミッタンスを ε として、

$$\theta_{\max} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\beta_0}} \quad (2-9)$$

により決まる。

高い β_0 のラティスを用いることにより、(2-9)式は(2-8)式に比べ無視することができ、角度の広がり θ は γ に逆比例することになる。ミューオンを高エネルギーまで加速することにより、シャープで遠方の測定器まで届くビームが得られる。距離 L

設問 7: ニュートリノビームの広がり

エミッタンス 0.0016 m rad のビームを 50 GeV まで加速して、貯蔵リングに入れたとき、リングの直線部の $\beta_0 = 160$ m とすると、最終的に得られるビームの広がりはいくらになるか？ コンベンショナルビームの場合は典型的にはパイオンのエネルギーは 3 GeV とすると、崩壊によるビームの広がりはいくらになるか？

(km) まで到達するニュートリノフラックスのエネルギー分布は以下の式で表される。

$$\Phi_{\nu_\mu} = \gamma^2 \frac{n_\mu}{\pi L^2} \{2y^2(3-2y)\} \quad (2-10)$$

$$\Phi_{\nu_e} = \gamma^2 \frac{n_\mu}{\pi L^2} \{12y^2(1-y)\}$$

ここで、 $y = E_\nu/E_\mu$

一方、ニュートリノと物質の反応はニュートリノのエネルギーが 5 GeV より大きくなると、深非弾性散乱（核子がこわれて多くの二次粒子ができる）の効果が大きくなり、その断面積は

$$\sigma(\nu) \approx 0.67 \times 10^{-38} \text{ cm}^2 \times E_\nu (\text{GeV}) \quad (2-11)$$

$$\sigma(\bar{\nu}) \approx 0.34 \times 10^{-38} \text{ cm}^2 \times E_{\bar{\nu}} (\text{GeV})$$

となり、ニュートリノのエネルギーに比例する。(2-10)(2-11)式より M (kton) の測定器を L (km) の場所に置いたときの、イベントレートは

$$N_\nu \approx \frac{n_\mu [10^{21}] E_\mu^3 [\text{GeV}] M [\text{kton}]}{L^2 [1000 \text{ km}]} \quad (2-12)$$

$$f = 8, 7, 4, 3.5, \text{ for } \nu_\mu, \nu_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_e,$$

となる。

設問 8: ニュートリノのイベントレート

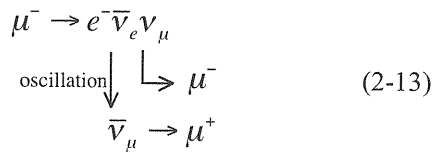
(2-10)(2-11)式より(2-12)式を導け。 $E_\mu = 20$ GeV, $n_\mu = 10^{21}$ 個で 7000 km の距離に 50 kton の測定器を置いた場合、何個のニュートリノが観測されるか？

このようにして作られたニュートリノファクトリの特徴は

- 大強度のビーム ($10^{20} \sim 10^{21}$ muon decay/year)

- 高エネルギーの2種類の(電子、ミューオン)ニュートリノが同時に得られる。(E_v=20 GeV~50 GeV)
- バックグラウンドが少ない (10⁻⁴ 以下)
- ニュートリノビームの強度、スペクトルが精密に予測可能である。

一方、同時に2種類のニュートリノが観測されるため、ニュートリノ振動の観測においては、以下のように



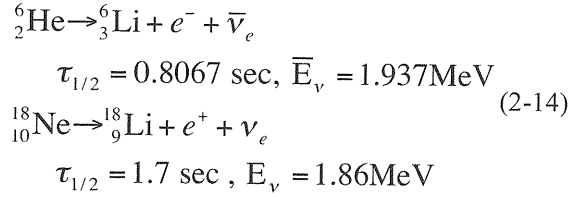
振動したニュートリノから生じた電荷の異なるミューオンを判別する必要があり、磁場によりトラックを曲げて電荷の正負を測定する必要がある。コンベンショナルビームでは、電子とミューオンの判別を行えばよく、従来の測定器をそのまま使えるのに対して、ニュートリノファクトリでは新しい測定器を建設しなければならない。

2.3.3. 放射性同位体のベータ崩壊によるビーム(ベータビーム)

短寿命の放射性同位元素を加速して、その崩壊から高エネルギー電子(反電子)ニュートリノビームを得るというスキームが2002年に初めて考案され[1]、CERNを中心に検討されている。原子核のベータ崩壊を用いるのでベータビームと呼ばれている。十分な強度のニュートリノビームの生成に適した以下のような条件

- 高エネルギーに加速しても、崩壊するように適度に短い寿命を持つ
- 十分な数の同位元素を蓄積できるよう、適度に長い寿命を持つ
- 同位元素の収量が多い
- 同位元素を取り出す際に容易な希ガスが好ましい

を満たす核種として、ヘリウム6とネオン18が選定された。それぞれ、以下のような反応で反電子ニュートリノと電子ニュートリノが得られる。



それぞれγ=100まで加速される。目標とする強度は2.9 x 10¹⁸ He/yr, 1.1 x 10¹⁸ Ne/yrである。ベータビームには次のような特徴がある。

- バックグラウンドのない純粋な低エネルギーの電子(反電子)ニュートリノビームが得られる。E_v~0.5 GeV
- ビームの強度、スペクトルが精度よく予測可能である。
- ビームには1種類のニュートリノのみ含まれるために、観測には粒子識別のみ行えばよく、従来の測定器がそのまま利用できる。

放射性のイオンを加速することに伴う施設の放射化、同位体の十分な量の生成が難しいなど、乗り越えなくてはならない問題があるが、低エネルギーの電子ニュートリノビームが得られるメリットは大きく、CERNにある加速器PS/SPSを有効に利用したデザインスタディが進められている。

2.4. ニュートリノビームのまとめ

以上で3種類の加速器によるニュートリノビームの概略と特徴を述べてきた。これらのビームのニュートリノの物理に与えるインパクトはこれまでに数多く報告されている。その一つの例として、まだ測定されていない振動パラメータθ₁₃に関する感度を図9に示す。スーパービームに比べ、ベータビーム、そしてニュートリノファクトリの感度が優れているのがよくわかる。感度に幅があるのは、パラメータ間に相関があったり(correlation)、パラメータの解が複数ある(degeneracy)ことによるものであり、それぞれ単独の観測のみでは、パラメータを正確に決定することができない。究極の目標のひとつである、CP位相δの測定についても同様であり、これらのビームは相補的であるといえる。今後、段階的な実現を目指した努力が続けられている。

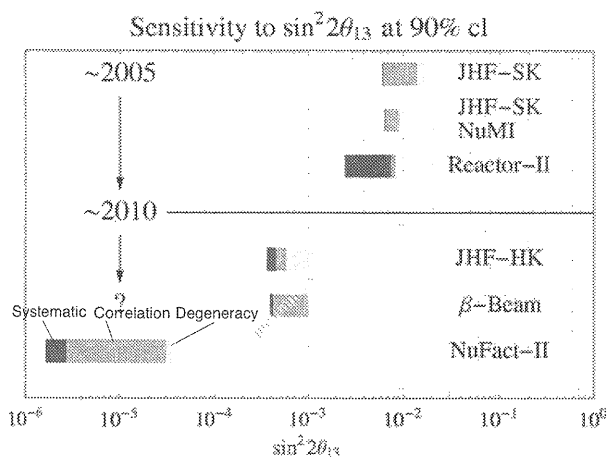


図 9: θ_{13} に関する感度

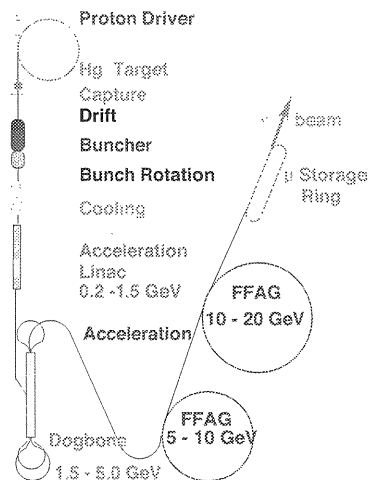


図 10: US ニュートリノファクトリの模式図 (Study IIA)

3. ニュートリノファクトリ計画

本節ではニュートリノファクトリ計画について、現在検討されているスキーム、実際のパラメータ、R&D 結果を示しながら紹介する。これまで、ニュートリノファクトリの実現に向けて各国で Feasibility study (技術面、コスト面からの実現性の検討)が行われてきた。米国では2000年に Study I[2]、2001年にパフォーマンスを向上させた Study II[3]、さらに改良を重ね、コストの削減を行った Study IIA[4]が2004年に報告されている。また、ヨーロッパでも CERN を中心とした Study が行われデザインレポート[5]が2004年に報告されている。これら欧米のスキームは前節で述べた位相空間回転とビーム冷却を用いるものである。日本グループは、これらのスキームとは全く異なる、位相空間回転と冷却を必ずしも必要としない、FFAG 加速器を基本にしたスキーム[5]を提唱している。

3.1. US および EU のスキーム

図 10, 11 に US および EU スキームの全体像を示す。2つのスキームにおいて、基本的な構成要素はほとんど同じで、プロトンドライバ（陽子加速器）、標的およびパイオン捕獲、バンチャー、位相空間回転、バンチコンプレッサー、冷却チャンネル、Linac、Recirculating Linac、FFAG、貯蔵リング等からなる。以下実際の R & D の状況を交えながらデザインを説明していく。

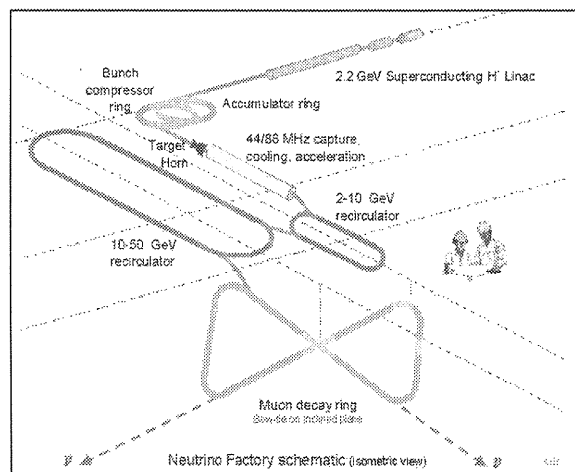


図 11: EU ニュートリノファクトリの模式図

3.1.1. プロトンドライバ

ミューオン生成に用いられる低エネルギーのパイオンの収量は一次ビームのエネルギーにあまり影響は受けず、全体のパワーによって決まるため、いずれのスキームにおいても十分なニュートリノ強度を得るために 1MW~4MW 級の陽子加速器が必要である。陽子ビームの時間構造は以下のような条件を満たさなくてはならない。

- 最も小さい時間構造 (マイクロバンチ) のパルス幅は位相空間回転を行って運動量をそろえるために、3ns 以下である必要がある。

- マイクロバンチの周波数は後段の加速器にあわせる必要がある。
- 繰り返しは 15~50Hz 程度

使用可能なプロトンドライバの時間構造が、要求されるものと異なる場合には、バンチ操作を行って目的の時間構造を得ることになる。例えば EU スキームでは超伝導 Linac である SPL をプロトンドライバとして用いることを検討している。SPL から取り出されるビームは 2.8ms の間に連続してマイクロバンチが連なる DC 的なバンチ構造をしているが、これを貯蔵リングとバンチコンプレッションリングの 2 つのリングを用いて、 $3.2\mu\text{s}$ の間に 140 個のパルスが連なる構造に変えている。

3.1.2. 標的およびパイオン捕獲・輸送システム

標的システムでもっとも問題になっているのは、熱衝撃による破壊である。シャープに絞られたビームが固体の標的にあたると、局所的に熱膨張し、大きな熱応力が生じる。スーパービームで用いられている等方グラファイト（炭素）は 1MW 程度まで耐えると見られているが、低エネルギーパイオンの収量が多い、原子番号の大きい金属は 1MW の熱衝撃により一瞬にして破壊されてしまう。この問題を解決する方法として、水銀などの液体金属を用いる方法があるが、容器にいられた水銀にビームをあてると熱衝撃によりキャビテーション（渦）が生じて、容器を浸食してしまうという問題が起こる。現在 4 MW まで耐えうる標的として考えられているのは、水銀をノズルからジェット状に吹き出して、飛行中にビームをあてる

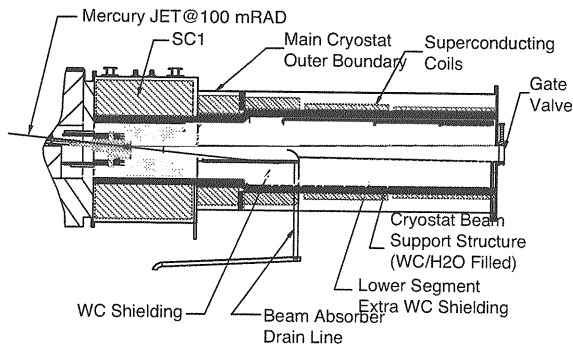


図 12：4MW 標的システム
水銀ジェット, 20 T ソレノイド

という方法である。図 12 に 4MW の標的システムの概略を示す。すでに、BNL、CERN を中心に様々な R&D が行われており、実際に水銀ジェットが陽子ビームと反応して飛び散る様子や（図 13）、強磁場の中に金属のジェットを飛行させるときに渦電流により表面が平滑化される（Magnetohydrodynamic）MHD 現象が観測されている。数値シミュレーションも精力的に行われている。今後、磁場中でジェットにビームをあてて、MHD により水銀ジェットの爆発が緩和されるかどうか確認することになる。

US スキームでは高磁場ソレノイドを用いてパイオンを大立体角で捕獲する。15~20 テスラの磁場を発生させるために超伝導コイルとその内側に置かれたホローコンダクタ（中空の）銅線で巻かれたコイルが用いられる。この磁石の開発にあたっては、4MW のビームが標的との衝突により、そのエネルギーのほとんどをコイルに落とすため、その遮蔽と冷却が大きな課題となっている。EU スキームではホーン磁石を用いてほぼ同様のパイオン捕獲効率を達成している。

3.1.3. 位相空間回転とバンチャー

StudyII では位相空間回転を Induction Linac を用いて行い、運動量をそろえてから、時間的にのびたビームを RF をかけてバンチ化して、後続の冷却チャンネルに入射するというスキームを採用していた。しかしながら、Induction Linac がとても高価であるため、Study IIA では、バンチ化を行ってから変調した RF パルスにより、位相空間回転を行うというアイデアを採用した（図 14）。これにより、非常に大きなコストダウンをはかることが可能になった。



図 13：BNL E595 において 2×10^{12} の 24 GeV 陽子が 1cm 径の水銀ジェットに衝突

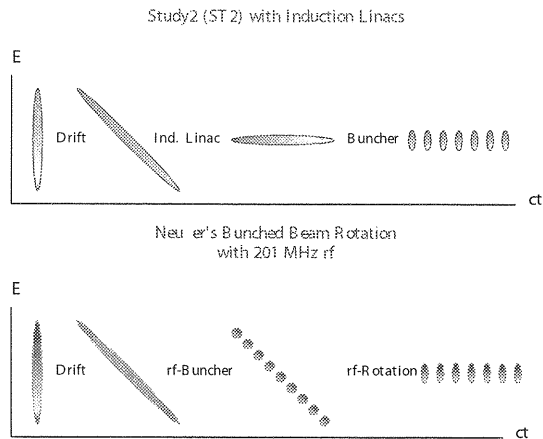


図 14 : Induction Linac (Study II) および RF (StudyIIA) による位相空間回転

3.1.4. 冷却チャンネル

US スキームの冷却チャンネルの基本ユニットを図 15 に示す。エネルギーをロスさせる減速材と加速して縦方向のみ運動量を回復させるための RF が交互にならんでいる。冷却効果は以下の式で表される。

$$\frac{d\varepsilon_N}{ds} = -\frac{1}{\beta^2} \frac{dE_\mu}{ds} \frac{\varepsilon_N}{E_\mu} + \frac{\beta_\perp (0.014 \text{ GeV})^2}{2\beta^3 E_\mu m_\mu L_R} \quad (3-1)$$

第 1 項は冷却をあらわし、第 2 項はミュオンが多重散乱を起こすことにより、逆に加熱するタームである。第 2 項を少なくするために、減速材と

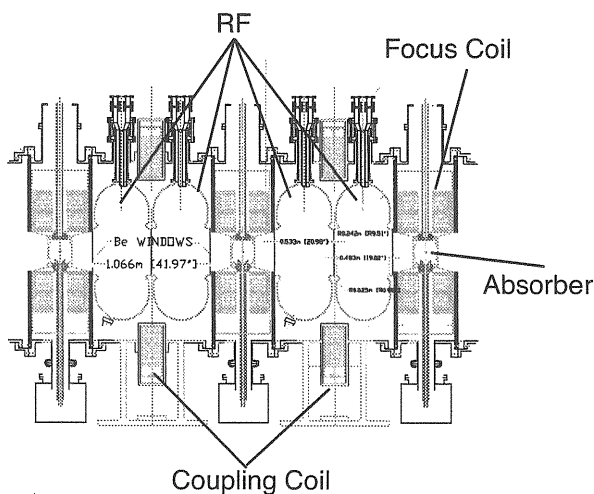


図 15 : 冷却チャンネルの基本ユニット

しては輻射長のもっとも長い液体水素を用いることが検討されている。また、減速材での β 関数を小さくするために、超伝導ソレノイドによる収束磁場が用いられている。磁場による角運動量をキャンセルするために、磁場をアブソーバのところで反転させている。RF は速やかに冷却を行うため、高加速勾配 $\sim 15 \text{ MV/m}$ のものが必要となる。このような冷却チャンネルは 1 段あたり約 10% 程度の冷却が可能となっている。これを何段も重ねることにより冷却をおこなうが、エミッタンスが小さくなってくると、冷却効果が減少していき、ついには加熱項と釣り合って平衡状態に達する。この時のエミッタンスは約 340 mm mrad と見積もられている。どこまで冷却を行うかは、後段の加速器のアクセプタンス、全体の収量、そしてコストとの兼ね合いによる。現在のデザインでは冷却チャンネルの長さは 150 m 程度である。

3.1.5. ミューオン加速器

前で述べたようにミュオンを加速するには大きなアクセプタンスを持ち、高い加速勾配を持つ加速器が必要である。US スキームでは 201 MHz 、の超伝導 RF 加速空洞を用いて加速勾配 $10 \sim 15 \text{ MV/m}$ で加速する。Study IIA ではコストの削減のためにこれまで Recirculating Linac (RLA) を用いていたところを、一部 FFAG で置き換えている。図 16 に Study IIA の加速スキームを示す。まず Linac で 1.5 GeV まで加速した後、犬の骨の形をした RLA で $1.5 \text{ GeV} - 5 \text{ GeV}$ まで加速し、 $5 \text{ GeV} - 10 \text{ GeV}$ 、 $10 \text{ GeV} - 20 \text{ GeV}$ の加速を FFAG で行う。ただし、US スキームで用いられているのは、Q と D のリニアエレメントを用いた、Non-scaling FFAG (後述) である。

一方 EU スキームでは 3 GeV までは $88 \text{ MHz} - 200$

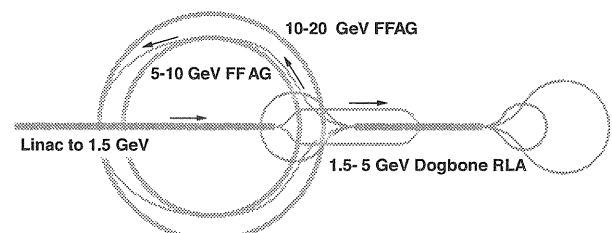


図 16 : ミューオン加速スキーム (Study IIA)

MHz の Linac で加速し、その後 2 段の 220 MHz の超伝導 RF を用いた RLA でそれぞれ 3-11 GeV, 11-50 GeV まで加速する。

3.1.6. ミューオン貯蔵リング

直線部でミューオンを崩壊させて、ニュートリノビームを生成する。約 35%の直線部を確保するとともに全体をコンパクトにするために、ARC 部は高磁場を発生する超伝導コイルが用いられる。直線部は高ベータのラティスで構成され、ビームサイズを大きくし、ベータatron 振動によるビームの角度の広がりをおさえている。

US スキームではレーストラックの形状であるのに対して、EU スキームでは 2 つの直線部を利用し、2 方向へニュートリノビームを供給できるようになっている。貯蔵リングで問題となるのがミューオンの崩壊でできる電子による熱負荷である。全体で数 10kW の熱が予想されるので、これに耐える超伝導コイルが必要となる。

3.2. FFAG シナリオ (日本スキーム)

上記の US/EU スキームは基本的には線形のシステムであり、冷却チャンネルや Linac を直線上に並べていく方式であり、高加速勾配を持つ膨大な数の RF が必要となり、コスト的に負担が大きい。ここで、アクセプタンスの大きいリング加速器をミューオンに加速に利用することができれば、ビーム冷却を省くか、あるいは大幅に削減でき、また RF を何回も利用できるのも、非常にシンプルかつ安価なシステムが構築可能となる。日本グループは、近年急速に開発が進められている FFAG (Fixed Field Alternative Gradient) を使えばこのスキームを実現できることを見つけた。FFAG は縦方向 (運動量)、横方向のアクセプタンスが従来の加速器に比べて大きく、固定磁場のために繰り返しを早くすることができ、ミューオン等エミッタンスの大きいビームの加速に適している。低周波数の RF を利用することにより、十分な運動量アクセプタンスを得ることができ、位相空間回転なしに加速を行うことができる。RF の周波数を下げるにより加速勾配は低くなり、崩壊に

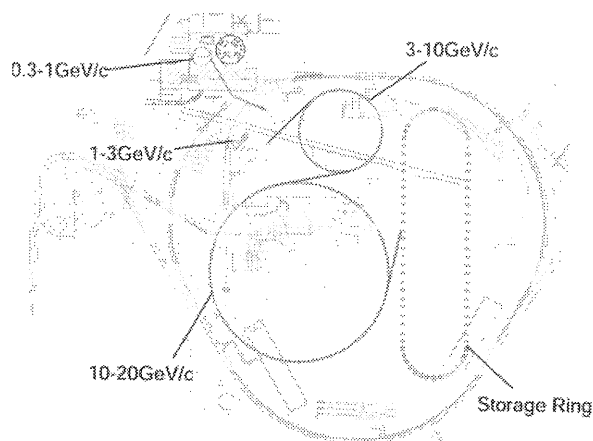


図 17: 日本の FFAG ベースのニュートリノファクトリ

よるロスが増えることが懸念されるが、後段であまり問題にならない (設問 6 参照)。

図 17 に日本グループが想定する FFAG をベースにしたニュートリノファクトリの概要を示す。プロトンドライバは J-PARC 50GeV PS を仮定している。標的、崩壊領域は US スキームとほぼ共通の仕様で、その後、3 段の FFAG リングで 20 GeV まで加速を行う。加速勾配は 1MV/m である。このような日本スキームのメリットの一つは各ステージで用いられるテクノロジーは共通であるので、開発が容易であるということである。また、段階的に小さいリングから建設を始め、徐々に増強していくというアプローチをとることにより、それぞれのステージで物理の結果が期待できるというメリットもある。例えば、もっとも最初に建設される PRISM/FFAG は大強度高輝度の低エネルギーミューオンを供給し、レプトンフレーバの破れの探索に用いられる。

4. ニュートリノファクトリ実現に向けた R & D

前節までの説明でわかるように、ニュートリノファクトリの構成要素の中には先進的で R&D が必要なものもあるが、現在の加速器技術を駆使すればほどなくニュートリノファクトリの建設が可能なレベルまで到達すると思われる。しかしながら、その規模やコストから考えて、世界に何台も

できるというわけではなく、国際協力によりいずれかの場所に建設される可能性が高い。そのような観点から R&D についても国際協力で取り組みが始まっている。現在、イオン化冷却、標的技術、そして FFAG 加速器が国際共同で R&D が行われている。詳しくは本セミナーの講義で解説されるが、以下簡単にその概要を説明する。

4.1. ミューオンイオン化冷却の R&D

イオン化冷却を実現するためには、以下のような懸案事項がある

1. 高加速勾配の RF を作ることができるか？
2. 液体水素標的をビームによる高い熱負荷の状態安定かつ安全に運転可能であるか？
3. イオン化冷却は本当に可能か？
4. どうやって、冷却の効果を計ることができるか？
5. 全体のコストは？

以上の点に答えるべく、国際共同で R&D を行っている。1 および 2 については米国 FNAL がホストとなり MTA(ミューオンテストエリア)という、実験施設を建設し、RF の試験、液体水素アブソーバの冷却試験等をおこなっている。将来的には大強度の陽子ビームを用いて、高熱負荷の状況での液体水素の挙動を調べる予定である。3, 4, 5 については、実際に冷却チャンネルを建設し、ミューオンビームを通して、冷却効果を測定するイオン化冷却実証実験 (MICE 実験) が計画され、英国 RAL をホストとする実験として認められた。図 18 に実験のレイアウトを示す。現在、ビームライ

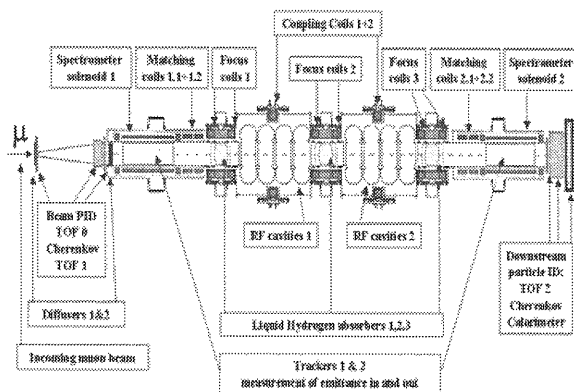


図 18 : MICE 実験のレイアウト

ン、アブソーバ、冷却効果を測定するための測定器が開発されつつあり、2007 年のビームテストに向けて準備が進められている。

4.2. 標的技術の R&D

水銀ジェット標的はこれまでの R&D により、ビームあるいは磁場のいずれかの存在のもとでは、シミュレーションによる予想通りの振る舞いを見せている。今後、実際の運転と同じ状況、即ち、磁場中でビームを当てた場合、にどう振る舞うかをテストする必要がある。この原理実証のプログラムが CERN において nToF11 実験として認められ、2007 年から行われることになった。図 19 にセットアップを示す。この実験のために開発された液体窒素冷却の常伝導マグネットにより 15-T の磁場を発生させ、その内部で最大 20m/s の水銀をとばして、CERN-PS から引き出された 24GeV の陽子ビームを衝突させる。ビーム強度は 28×10^{12} protons/spill と実際に用いられるものより一桁程度低い。この実験により、次のスタディを行う。

- 現実の標的システムと近い現実的なセット

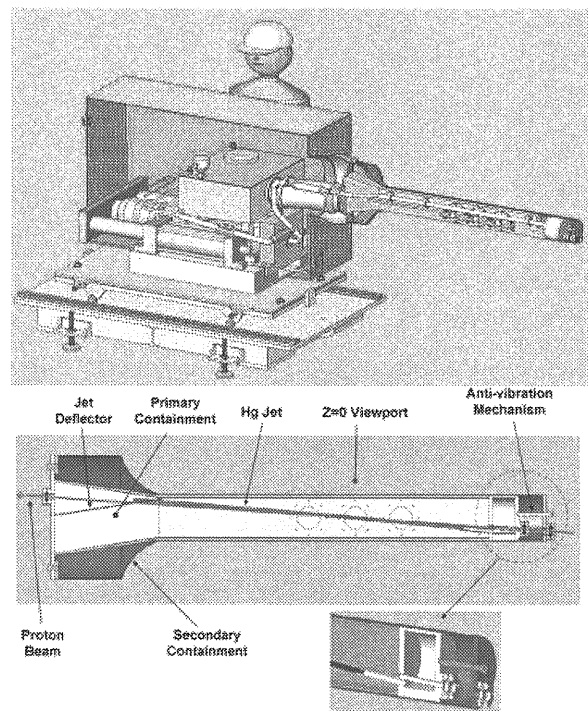


図 19 : nToF11 実験のセットアップ

アップでMHD効果を観測する。

- 衝突後の水銀ジェットの磁場中での振る舞い、爆発が抑制されるかを観測する
- 磁場中でビーム起因のノズルの耐久度をチェックする。

将来的には、セットアップをJ-PARCに移設し、ニュートリノファクトリのデザインと同様の強度である、 3.3×10^{14} のプロトンビームをあてて、最終的にフィージビリティのチェックを行うことを計画している。

4.3. FFAGのR&D

前述のように、2001年に日本グループにより発表されたFFAGベースのシナリオは徐々に世界に浸透し、今や、ミューオン加速の本命になりつつある。ただし、日本グループが提唱するFFAGとEU/USが計画するFFAGは別の原理に基づいている。前者はScaling FFAGと呼ばれ、磁場が r の関数として

$$B = B_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^k \quad (4-1)$$

のような形をしており、光学系のパラメータが運動量によらないという特徴を持っている。一方、後者のデザインは、通常の線形の磁石で構成され軌道の動きが少ないため小さいボアサイズのマグネットを使用することができるというメリットがあるが、チューンが加速により変化するために、共鳴点をこえなければならないという難しさも存在する。Scaling FFAGのR&Dは主に日本を中心に行われており、現在稼働中の150 MeVの陽子FFAGを用いたスタディが行われている。一方Non-scaling FFAGは、まだ実機が存在しないが、国際共同でNon-scalingの電子モデル(EMMA)を英国RALに建設して、原理実証を行う準備が進められている。

最近は両者を折衷するようなオプション-semi-scalingも検討されており、今後の進展が期待されている。

5. まとめ

ニュートリノファクトリは、最先端の加速器技術を集約した究極のマシンであり、ニュートリノ物理を極限まで精査する可能性を持っている。ニュートリノファクトリの建設は、LHCやILCなどのエネルギーフロンティアの加速器と並んで、今後の素粒子物理学の進展に非常に大きなインパクトをもつ。その実現に向けて、多くの加速器科学、素粒子物理の研究者が取り組み、国際共同によるR&Dが活発に行われつつある。その結果をもとに、今後はいよいよ実機の建設に向けて、デザインをより現実的なものにしていく段階に入りつつある。

今回の講義では、陽子加速器の利用のひとつとしてニュートリノビームの生成がテーマであったが、そのもとになるミューオンについては、今後幅広い利用が期待できる。物性、生命科学への利用、低エネルギーミューオンを用いた素粒子実験、究極の加速器ミューオンコライダなど、その他、まだ気づかれていない分野へ応用が拓ける可能性もある。ミューオンビームのハンドリング技術(位相空間回転、冷却、加速、蓄積)の蓄積は、将来の発展に向けての投資ともいえる。

6. 付録

6.1. ミューオンコライダ

ニュートリノファクトリの計画のそもそもの始まりはミューオンコライダであった。ミューオンコライダとは、正負のミューオンを加速して、貯蔵リングにため、衝突させて高エネルギーの素粒子事象を研究するマシンである。電子陽電子衝突型加速器(e^+e^- コライダ)ではシンクロトロン放射のために、円形加速器ではある程度以上はエネルギーをあげることができない。従って、今後の e^+e^- コライダの高エネルギーマシンは線形加速器(リニアコライダ)になる。一方、陽子(反)陽子衝突型加速器は、高エネルギーまで容易に加速できるので、エネルギーフロンティアには向いているが、衝突反応が素過程ではないため、精密

測定には向いていない。このような中で、ミュオンを用いて小型の円形加速器を作るというアイデアが真剣に検討された。ミュオンを用いるメリットは、質量が電子の200倍以上大きく、シンクロトロン放射は無視でき、コンパクトなMulti-TeV コライダーが実現できることである。また、ヒッグスに対するカップリングが大きいいため、S-channel でヒッグスを生成することが可能であり(e^+e^- の4000倍)、ヒッグスファクトリとして、ヒッグスの性質解明に大きく寄与することが期待されている。問題点はミュオンには寿命があり素早く加速しないと無くなってしまふこと、生成時のエミッタンスが大きいビームをいかにして加速し、冷却してルミノシティを上げることができるかである。コライダーとして用いるためには、エミッタンスを極限まで下げなくてはならず、また、縦方向の冷却も必要であるという点でニュートリノファクトリよりも条件は厳しい。そのため、まず最初のステップとしてニュートリノファクトリを実現しようというのが、現在までに至る流れである。ニュートリノの振動が確認された1998年と時を同じくして、まさにこのような動きがおこり、物理の動機づけも手伝って、以来、精力的なスタディが行われ続けている。一方で、最近ミュオンコライダの必要性が見直されるとともに、ビーム冷却の新しいアイデアが次々と提案され、6Dの冷却を効率よく行えるようにする方法が検討されている。ミュオンコライダがニュートリノファクトリとともに実現する日も案外そう遠くないかもしれない。

参 考 文 献

- [1] P. Zucchelli, "A novel concept for a $\bar{\nu}_e/\nu_e$ neutrino factory: the beta-beam, Phys. Lett B 532 (2002) 166-172
- [2] N. Holtkamp and David Finley, eds, "A Feasibility Study of a Neutrino Source Based on a Muon Storage Ring", FERMILAB-Puub-00/108-E, 2000
- [3] S. Ozaki R. Palmer, M. Zisman, and J. Gallardo, eds., "Feasibility Study-II of a Muon-Based Neutrino Source,"BNL-52623, 2001
- [4] C. Albright, et. al., "Neutrino Factory and Beta Beam Experiments and Development", BNL-72369-2004, 2004
- [5] "ECFA/BENE studies of a European Neutrino Factory Complex," CERN, 2004-002, ECFA/04/230
- [6] "A feasibility study a neutrino factory in japan", KEK Report 2003-5, 2003