第1章　序

現在の素粒子標準理論は、物質を構成する基本粒子はクォークとレプトンであるとしている。このうち電荷をもっていないレプトンに分類されるニュートリノは1930年にPauliによって原子核のベータ崩壊の際の電子のエネルギースペクトルを説明するために提唱された。1956年にReines,Cowan等は原子炉から放出されるニュートリノの起こした反応の検出に成功して、実際にニュートリノが存在することを証明した[1]。1962年にはπの崩壊で出来るニュートリノが原子炉からのニュートリノとは別物であること、すなわち2種類のニュートリノ(ν_e, ν_μ)が存在することが証明された[2]。こうしてニュートリノが、荷電レプトン(e,μ)と対をなすとする標準理論の原型が提唱された。その後1975年になってPerl等によって3世代目の荷電レプトンであるタウ粒子(τ)が発見され、対になる3世代目のニュートリノの存在が予想された。本論文で紹介するDONUT実験は、原子核乾板を主体にした検出器でタウニュートリノの反応を直接捕らえることに成功し、3世代目のニュートリノの存在を確証した。

タウニュートリノの直接検出実験は約20年前、Fermilab(Fermi National Accelerator Laboratory)で検討され、原子核乾板を使用する設計と泡箱を使用する設計があった。原子核乾板を使用した設計は、大量の原子核乾板を処理する技術、原子核乾板に記録されたタウニュートリノの信号を読み取る解析速度が不十分であった為に実現に至らなかったが、泡箱の設計は承認されて実施に移された。タウニュートリノを検出する為にタウニュートリノを大量に作る必要がある。これには高エネルギー陽子と標的の衝突により生成される粒子群の中で、少量含まれるチャーム粒子の一種、D_sのタウニュートリノを伴う崩壊$(D_s \to \tau\nu_\tau)$と引き続いて起こるタウ粒子の崩壊$(\tau \to \nu_\tau X)$を利用する。またチャーム粒子の大半を占める$D^{\pm}$、D^0はミューニュートリノ、電子ニュートリノにそれぞれ約10%の崩壊分岐比を持つ。従って高エネルギーの陽子を標的に衝突させることによって、タウニュートリノ、ミューニュートリノ、電子ニュートリノが放出される。衝突によってチャーム粒子以外に、複数の種類の中間子$(\pi^{\pm 0}$、$K^{\pm 0})$と少量のバリオンが発生するが、標的の厚さが十分にあれば衝突を繰り返して標的内で吸収される。この様に加速した粒子を標的に入射し、その生成粒子を含めて大半を吸収させることをビームダンプと呼ぶ。ニュー

トリノの他、ミューニュートリノと供に生成されるミュー粒子は、貫通力が強く標的の外に出てくる。ミュー粒子は検出器を貫いて電離作用によって悪影響を及ぼす。泡箱の実験では、このミュー粒子の量を解析を可能にする許容量にまで抑えることの困難さ、タウニュートリノの量を見積もるための D_s からタウ粒子への崩壊率も当時実験値がなかったこと、そして泡箱が検出できるとしたタウニュートリノ反応の証拠であるタウ粒子の検出感度が十分でなかったこと等の理由により実行途中で頓挫した。

再び原子核乾板を使用したタウニュートリノ反応の検出実験の計画が現れた背景には、1985 年頃に名古屋大学で「自動飛跡読み取り装置」[6] の実用化に成功したことによる解析速度の飛躍的な向上と、1992 年に原子核乾板を使った CERN WA75 実験による D_s のミュー粒子への崩壊率の測定 [7] に成功し、D_s のタウ粒子への崩壊率が高い信頼性で予測出来るようになったことがあげられる。一方、1990 年代に入って、名古屋大学を中心とする日本のエマルショングループは「自動飛跡読み取り装置」を武器に CERN の加速器を使った短基線 $\nu_\mu \to \nu_\tau$ ニュートリノ振動実験（CHORUS）を推進しており、技術的側面からもタウニュートリノ反応を実際に原子核乾板中で捕らえておくことの重要性が増していた。そこで 1993 年末に、我々日本の原子核乾板グループは、米国のグループと共同して、原子核乾板を使ったタウニュートリノ直接検出実験（DONUT）計画を Fermilab に提出した。使用するニュートリノビームラインは、かつて計画され途中で頓挫したニュートリノビームラインをベースにしており、即座にこの計画は承認され実施に移された。

タウニュートリノ反応の検出はそれ自身非常に意味のあることであるが、これをめぐる背景はプロポーザル提案から今日に至るなかで変化している。上に述べたように当初は短基線ニュートリノ振動実験 CHORUS におけるタウニュートリノ検出能力のデモンストレーションとしての意味が大きかった。CHORUS はタウニュートリノが宇宙のダークマターであるとの仮説を実証するために計画されたがシグナルはなく、一方で 1994 年 KAMIOKANDE-II 実験は水タンクでのチェレンコフ光を観測する手法で大気ニュートリノ中のミューニュートリノの欠損を検出、その天頂角依存性を測定し、ニュートリノ振動の徴候を捕らえたとした。その指し示す質量領域は質量差の二乗で $\Delta m^2 \sim (10^{-3} \sim 10^{-2}) eV^2$ の領域であり、CHORUS の探索領域とは全く異なる所であった。このニュートリノ振動の可能性として $\nu_\mu \to \nu_\tau$ があげられたのであるが、それを実証するためには振動してできたタウニュートリノを捕らえる必要がある。これは水タンクの手法では全く無理であり他の手法を必要とする。この質量領域の実験は長基線ニュートリノ実験にならざるを得ず、反応数を得るためにニュートリノの標的は 100 トンから 1000 トンが必要とされる。原子核乾板は本質的にタウニュートリノ反応を捕らえる能力を持つが、この大質量の要求に対応す

る為には後で説明するECC(Emulsion Cloud Chamber)型という、ニュートリノの標的と粒子飛跡検出の役割を分けたタイプの標的が必要であった。当時DONUTでは他の理由からこのECC型の導入の検討を始めており、学問上の背景の変化に伴ってその導入とその中でのタウニュートリノ反応の検出を示す事が大きな目標となった。

私はこのDONUT実験に準備段階からメンバーの一員として参加し、心臓部である原子核乾板ハイブリッドターゲットの製作と設置、ニュートリノビームラインの作成に貢献した。本番照射中は検出器の管理と原子核乾板の現像を行った。その後ニュートリノ反応点の予測位置を作成し、タウニュートリノ反応の検出を行った。

以下に順を追ってDONUT実験におけるタウニュートリノ反応の検出について説明する。