

# 大阪大学大学院理学研究科物理学専攻 ・素粒子核分光研究室



岸本 忠史\*

**Key Words** : Dark Matter, Double beta decay, Hypernuclei, Strangeness, Spin-orbit Interaction

## 1. はじめに

20世紀は物理学の時代で21世紀は生命を始めとする複雑系の時代と言われているが、物理学の基礎的な分野でも興味ある問題への挑戦が進められている。我々の研究グループでは原子核物理学、素粒子物理学、宇宙物理学にまたがる問題を追求している。研究の進歩は加速器の発達と不可分の関係にあったが、最近はそのだけでは追求しきれないテーマも増えている。我々のグループでは実験方法の点から加速器実験と非加速器実験を2つの柱におき、非加速器実験として(1)宇宙のダークマターの探索と(2)二重ベータ崩壊とニュートリノの性質、加速器実験として(3)ハイパー核(超原子核)と一般化された核力(4)弱い核力によるストレンジネス(奇妙さ)の生成(5)中性子星とK中間子凝縮、といったテーマに取り組んでいる。これらを粒子(素粒子や原子核)を1個ずつ計測する素粒子・核分光法で実験的に研究している。

## 2. 研究活動の概要

### 2.1 ダークマターの探索

宇宙の質量のほとんどはダークマター(暗黒物質)で占められている様である。銀河の中の星の回転速度の観測から周りの暗い領域にも質量がある事がわ

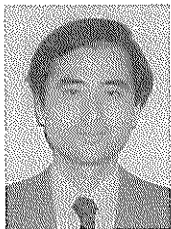
かっている。またより大きな構造にも同様な観測があるなど、多くの事実と推論は何らかの光らない物質があまねく存在していることを示す。

現状ではこれらがどういう物質なのかかわかっていないが、超対称性対粒子と呼ばれる未知素粒子が有力な候補であると考えられている。現代物理学で知られている粒子には、物質を代表するフェルミオン(スピンの半奇数の粒子)と力を媒介するボソン(スピンの整数の粒子)の2種類ある。例えば水素原子ではフェルミオンの電子と陽子がボソンの光をやり取りしてクーロン力で引きあっている。自然界の力(重力、電磁力、弱い力、強い力)は全て同じ構造をしており、関係する粒子の種類だけが違う。生命の進化と同様にもともと同じ力が宇宙の進化で分岐したと考えるとき、超対称性を考慮すると全てがうまく説明できる。超対称性理論とは極微の世界では役割が逆転するボソンとフェルミオンが存在するという理論である。但し理論はどこにも超対称性対粒子が存在しないという唯一で最大の困難を抱えている。もしこの粒子が宇宙のダークマターであるとするならば宇宙論、素粒子物理、原子核物理にまたがる問題が一挙に解決することになる。

ダークマターは我々の銀河の中を漂っており、非常に稀に通常の物質(原子核)と散乱する。この反跳核を捉えることがダークマター検出の唯一の信号である。反跳エネルギーは桁で10keV程度で反応率はキログラム程度の物質でも1日に数回程度である。我々の周りの宇宙線や物質中の放射性同位元素からの放射線はダークマターの信号の5-7桁多い。こういった膨大なバックグラウンドから信号を選び出すために、極低バックグラウンドの検出器で低エネルギー領域を観測しなければならない。

#### 2.1.1 蛍石(CaF<sub>2</sub>)検出器

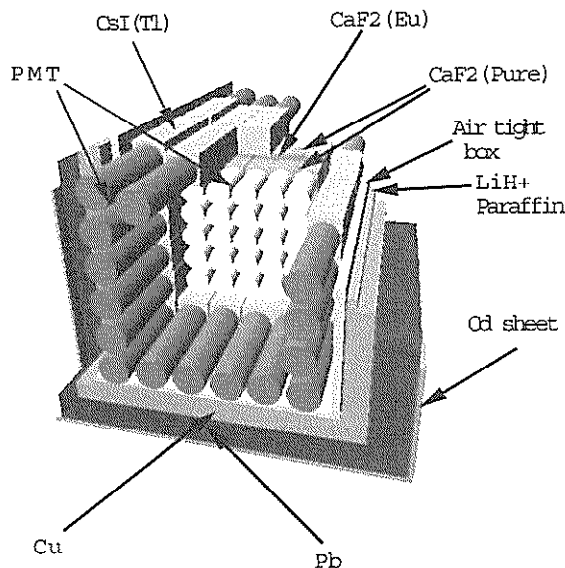
我々のグループでは蛍石(CaF<sub>2</sub>)シンチレーター中のフッ素原子核(<sup>19</sup>F)との散乱を利用してダーク



\* Tadafumi KISHIMOTO  
1952年8月25日生  
1980年大阪大学大学院理学研究科・物理学専攻修了  
現在、大阪大学大学院理学研究科・理学部・物理学・素粒子核物理、教授、理学博士、素粒子・核分光学  
TEL 06-6850-5353  
FAX 06-6850-5530  
E-Mail kishimoto@phys.sci.osaka-u.ac.jp

マターの探索を行なっている。ダークマターによって反跳(飛ば)されたフッ素原子核はエネルギーもらい、CaF<sub>2</sub>(Eu)結晶はそれに比例したシンチレーション光を発生させる。それを測定して検出する。実験に使っているCaF<sub>2</sub>(Eu)は高純度のCaF<sub>2</sub>結晶にユーロピウム元素(Eu)を入れ発光量を増やしたもので淡い紫色である。

我々が開発したエレガントVIと呼ばれている検出器の中心部を図1に示す。CaF<sub>2</sub>結晶の周りをCsI(Tl)検出器の動的しゃへい(Active shield)が囲んでいる。動的しゃへいとはしゃへい体を検出器にして通り抜けるバックグラウンドをも除去するものである。検出器全体は気密箱に入れられ、窒素ガスで大気中のラドンガスを置換している。ラドンガスは放射性であり、非常に稀な現象を探すときは注意を要する。気密箱の周りにはパラフィンで固めた水素化リチウム層(1.5cm)の中性子のしゃへい(シールド)があり、外側を銅(5cm)と鉛(10cm)のγ線シールドが囲っている。これらの材質は放射性物質を含まないものが選定されている。一番外側はガドミウムのシート(0.5mm)とホウ酸入りの水槽(20cm)で中性子がシールドされている。中心のCaF<sub>2</sub>(Eu)結晶は45ミリ立方体であるが、周りのしゃへいまで入れた大きさは2m(縦)×2m(横)×3m(高さ)といった大きさになる。



阪大理学部の実験室(地上)でのテスト実験では海外のバックグラウンドの最も少ないと考えられているグランサツ(イタリア)の地下実験室で行なわれた実験とそん色無い結果が得られている。現在検出器

系は奈良県大塔村の地下実験室(大阪大学核物理研究センターの大塔コスモ観測所)に移されており測定を進めている。この研究ではニュートリノの質量のタイプを決める2重ベータ崩壊の実験にも取り組んでいる。

## 2.2 ストレンジネスと強弱相互作用

加速器を用いた実験としては高エネルギーの加速器を用いて生成できるハイペロン(陽子や中性子の仲間であるがストレンジネスをもつ)を用いてハイパー核の実験を進めている。強い相互作用がつくるハイパー核の構造と弱相互作用でストレンジネスが変化する様を研究している。

### 2.2.1 Λハイパー核のスピンの軌道力

スピン軌道力は原子核物理学の殻模型の成立に本質的な働きをした。原子核の魔法数は原子と異なっているが、これは力の到達範囲(中間子交換力)が短いことと大きなスピン軌道力によっている。特にスピン軌道力の大きさは中間子交換力だけでは説明し切れない。これは核子がクォークからなる複合粒子であることが関係していると考えられる。中間子の影響が全く異なるΛ粒子のスピン軌道力は一体どうなっているのだろう。そこで<sup>13</sup>ΛCでこれを直接決定する実験を行った。図2に示す様に<sup>13</sup>ΛCには<sup>12</sup>C(0<sup>+</sup>)芯に p<sub>3/2</sub>(Λ)と p<sub>1/2</sub>(Λ)がついた状態、言い替えると公転と自転の向きが同じものと反対の状態が存在する。このエネルギー差がスピン軌道力によって決まっている。運良くこの状態はγ崩壊するので、我々は大型のNaI結晶を用いてこの11MeVのγ線を0.3 MeV程度の分解能で測定し、今までの精度大きく超えてスピン軌道力を決定した。ハイパー核を作るにはK中間子ビームを用いる必要があるので、実験

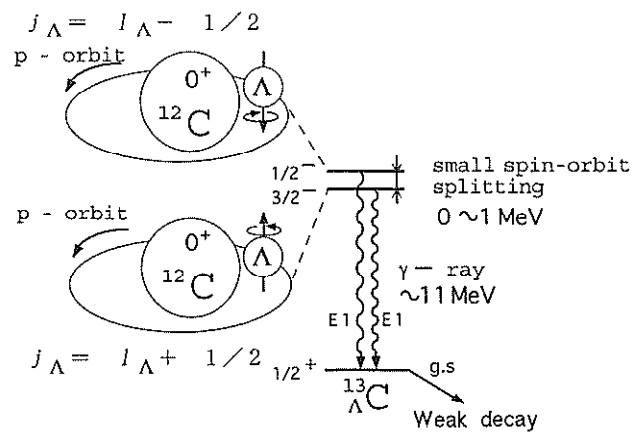


図2 <sup>13</sup>ΛCのスピン軌道力の概念図

は現在世界で最強のK中間子ビームを供給出来る米国BNL(ニューヨーク州)のAGS加速器で行った。

$^{13}\text{C}$ は( $K^-$ ,  $\pi^-$ )反応で生成し、 $\pi$ 中間子と $\gamma$ 線を同時計測した。K中間子は飛行中に崩壊して $\pi$ 中間子を放出する。これが最も大きなバックグラウンド源であり、 $\gamma$ 線の測定の最大の障害となっていた。ベンゼンの炭素を全て $^{13}\text{C}$ に置き換えた液体シンチレーター標的を120cc用意して標的中の弱崩壊からハイパー核の生成をタグし、K中間子の崩壊をほぼ完全に除外した。

スピン軌道力による分離は $0.15 \pm 0.05 \text{MeV}$ と求まった。原子核の4~6MeV程度に比べて数十分の1程度に小さくなっていることが明確になった。クォークの影響を考えないと説明出来ない結果が得られた。

### 2.2.2 弱い相互作用

自然界の力の中で弱い力(ベータ崩壊などを引き起こす)だけが粒子の種類を変えることができる。今までこの力は崩壊を通して研究されてきたが、我々は弱い力でストレンジクォークを生成する $pn \rightarrow p\Lambda$ 反応の測定の実験を進めている。大阪大学核物理研究センターのリングサイクロトロンから得られる400 MeVの陽子ビームを用いるとこの反応が引き起こせる。実験的には $\Lambda$ 粒子をその崩壊からの $\pi$ と陽子を捕まえることで同定する。しかし予想される断面積は $\sim 10^{-39} \text{cm}^2$ と非常に小さいため(例えば強い力

による $\pi$ 中間子生成の断面積は $10^{-27} \text{cm}^2$ )、膨大なバックグラウンドから信号を取り出すための検出器を建設している。成功すればもちろん世界で初めての試みである。

### 2.2.3 中性子星の中でのK中間子凝縮

中性子星の質量はかなり一定している。これはある程度重いとブラックホールになるためと考えられている。どれぐらい重くなれるかは状態方程式で決まるが、このときストレンジネスをもつK中間子が凝縮できるかどうかによって結果が大きく変わる。これをK中間子核を研究すれば明らかに出来る事を示した。

実験は前述の米国BNLが最適で米国の研究グループと具体的な実験の検討を進めている。

## 3. 終りに

我々の研究グループはスタッフとして阪口篤志、味村周平、小川泉、他にポストドク、大学院博士(後期)課程の学生が主力で研究を進めている。粒子を1個ずつ測定する方法は純粋な研究目的で進歩してきたが、最近は企業活動で有用な場合も増えていくと感じる。ただ研究の動機は結局面白いテーマかどうにかかっている。今運良く非常に面白い時期にあると思える。

