

## 話題 (IV)

# ダークマターの探索

大阪大学大学院理学研究科

岸本 忠史

## 1 始めに

最近宇宙のダークマターが話題に登ることが多い。宇宙のダークマターの問題は宇宙論だけでなく、素粒子物理学と原子核物理学に跨る幅広く、基本的な問題である。まずダークマターがなぜ必要かを説明し、次にそれが未知素粒子と考えられている理由を示し、最後に我々がその検出に向けて行なっている実験を紹介する。

何らかの形で宇宙の質量のほとんどがダークマターで占められていることには実はかなりしっかりした証拠がある。多くの銀河で星の運動の観測から相当外側の天体についても公転周期が一定であることが知られており、質量が明るい中心部よりも相当広がっていることを示している。これは非常に多くの銀河に共通して見られる現象である。更に銀河やクラスターなどもっと広い領域での天体の運動の観測からも、光を放つ物質より多くの質量があるとの結論が得られている。これらの観測とインフレーション宇宙論から宇宙の密度は臨界密度（これより大きくなると宇宙がいずれ膨張から収縮に転ずる密度）に近いと考えられている。

ではこれらはどういう物質なのだろう。もちろん燃え尽きた星や、ガスが集まって星にはなっているが光るほど大きくないと言った光らない星の可能性がまず考えられる。実際このような物質を重力レンズの方法を使って探そうという実験が進行しており、いくつかの候補者が見つかっている。しかしダークマターを説明するには足りないようである。更に決定的なのは宇宙の元素合成からくる制限である。ビッグバンで発生した高温宇宙から現在の宇宙が出来たというシナリオに基づいて宇宙の元素合成を計算すると現在の宇宙の元素の存在比が非常にうまく説明出来る。しかし、それは原子核の全密度が宇宙の臨界密度のせいぜい数% ほどである場合に限られることが明らかになってきた。それより大きく或は小さくなると現在観測されている存在比と矛盾するのである。つまり通常物質（光らない星など）はダークマターになり得ないことを示している。現在宇宙がビッグバンから進化してきたことは (1) 宇宙の膨張と (2) 宇宙の背景輻射 (3 度 K の黒体輻射) という確固たる証拠がある。そこで宇宙の元素合成からくる制限は相当厳しいものと言わざるを得ない。結局非常に素直

な結論は宇宙はダークマターで満たされているがそれは我々が今まで知らない未知素粒子であるということである。

さてそのような素粒子はあるのであろうか。実は非常に有力な候補者がいる。それは超対称性対と呼ばれる粒子群である。現在物理学が認識している相互作用は重力、電磁力、弱い力、強い力の4つあるが、70年代から80年代にかけて電磁相互作用と弱い相互作用は標準理論として統一された。更に強い相互作用を統一する統一理論が研究され多くの模型が提案されたが、標準模型を作る時に行なわれたような両方の相互作用と既に知られている粒子を含む広い群を考える方法を適用して作られる統一理論は実は既に実験で否定されてしまっている。そこで超対称性をもった統一理論の登場となる。超対称性とは現在我々が知っている物質を代表するフェルミ粒子と力を代表するボーズ粒子にそれぞれ同じ役割を持つボーズ粒子とフェルミ粒子が存在するという対称性である。これは現在までの実験に矛盾しないばかりでなく、物理学者を魅了する美しさを持っている。一番のそして決定的な問題は現実にはどこにも超対称性粒子が存在しないことである。さてもしそれが宇宙のダークマターであったとするならば宇宙論、素粒子物理、原子核物理の問題がすべて一挙に解決する。これは非常に魅力的な可能性である。この他にもいくつかの未知素粒子が預言されているが、それぞれ理論の自然さから予想されている粒子であり、何らかの形で未知素粒子がダークマターになっている可能性は相当高いと言える。そこでダークマターの検出が重要になる。

ダークマターは高エネルギー加速器でも探索されており、それで到達できる軽い粒子である可能性は排除されている。現在質量数20の原子核よりは重いと考えられる。ダークマターは我々の銀河の中を漂っており、その平均速度は地球の辺りで光速の0.1%程度である。ダークマターはその名の通り見えない(通常物質との相互作用が弱い)が、非常に稀に通常の原子核と散乱し、原子核に反跳エネルギーを与える。この反跳を捉えることがダークマター検出のほぼ唯一の信号である。つまり何も無い所で突如原子核が反跳を受けるという信号を探すのである。この反跳エネルギーは10 keVの程度であり、更に反応率は1日に数回(イベント)といった量なので非常に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 CaF<sub>2</sub> 検出器

我々のグループではCaF<sub>2</sub>検出器中の<sup>19</sup>Fとの弾性散乱を利用してダークマターの探索を行なっている。<sup>19</sup>Fは特に超対称性の粒子といった原子核のスピンと結合する

ダークマターとの相互作用が大きく、また自然の存在比も 100% なので検出器の物質として最良である。更に  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  は比較的発光量の大きなシンチレーターであり、低エネルギーまでの測定が可能である。

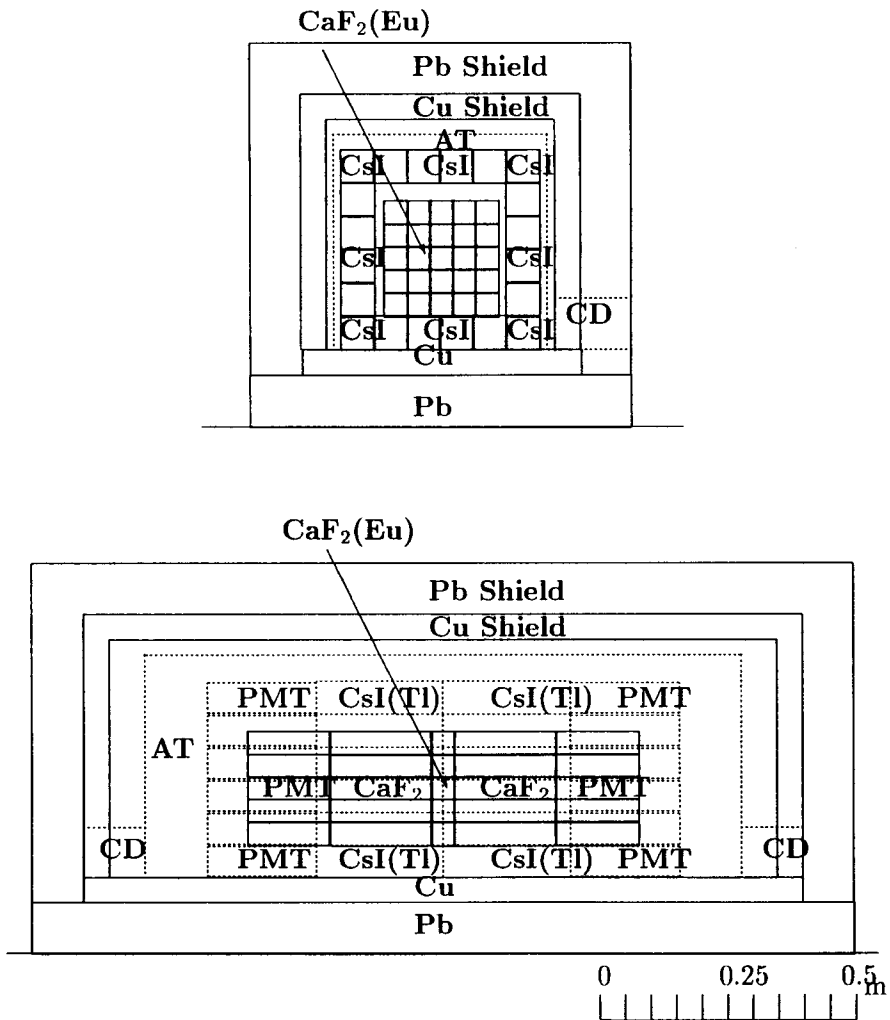


図1  $\text{CaF}_2$  検出器システム (ELEGANT VI)、中央におかれた  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  が検出器でその周りに  $\text{CaF}_2(\text{pure})$  のライトガイドがついている。実は  $\text{CaF}_2(\text{pure})$  もシンチレーターである。現在は一番外側にはガドミウムのシートと内側のラドンガスをパージするための気密箱 (Airtight Box(AT)) と銅のシールドの間に水素化リチウムをいれ中性子のシールドを行なっている。

我々はこれらの低エネルギーの信号を低バックグラウンドで測定できる検出システムを開発した。これは通称エレガント VI と呼ばれている。図 1 に検出器を示す。中心に  $\text{CaF}_2$  結晶があり、すぐ周りを CsI(Tl) 検出器の Active shield が囲みさらにその外側に鉛、銅といった Passive shield がある。誰が考えても似たようなデザインにはなるが、この検出器はいくつかの点で今までの検出器にない特徴をもっている。一例をあげれば全方向が Active shield されている。普通ならばライトガイドで Passive shield しか出来ない光電子増倍管 (PMT) 側にも  $\text{CaF}_2$  結晶のシンチレーターをつけ左と右の PMT の波高の違いで中心の検出器から出てきた信号を選べるようになっている。この他の特徴等についてはここでは書き切れないが現状では世界で最も優れた検出器になっている。

### 3 核反跳に対する応答

さてシンチレーターを粒子の検出に使う場合には同じエネルギーでも電子と粒子では発光量が違うことを考慮に入れなければならない。ダークマターの探索に使う場合にはこの比  $f$  値を求めなければならない。我々はこの発光量の違い  $f$  値を測定するために中性子で  $^{19}\text{F}(n,n')$  反応を起こさせ、シンチレーター中で突如  $^{19}\text{F}$  が散乱された様な現象をシミュレートした。この実験のため東工大のペレット加速器からの中性子を利用して戴いた。

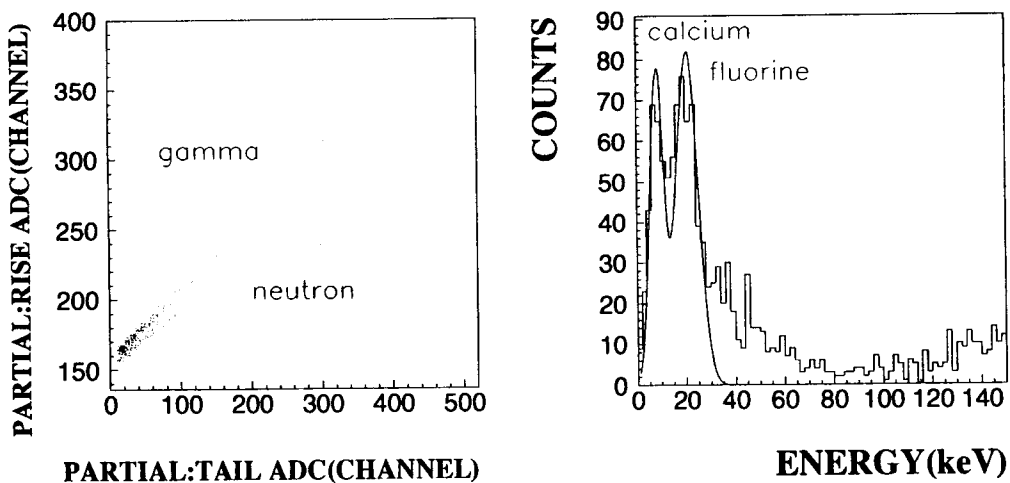


図 2、左図: 中性子検出器からの信号の波高のうち時間的に早い成分 (縦) と遅い成分 (横) の 2 次元プロット。中性子の信号が  $\gamma$  線に比べて立ち上がりが遅いことに

起因する差が明確に見えている。右図： 中性子検出器での中性子のみを選んだ時の  $\text{CaF}_2$  検出器の波高分布。F Ca の反跳に対するピークが見えている。

東工大の 3.2 MeV ベレトロンで加速された 0.75 MeV の重陽子を  $\text{Tid}_2$  標的に照射し、 $d(d,n)^3\text{He}$  反応で得られた 3.7 MeV の中性子を  $\text{CaF}_2$  結晶に照射する。この中性子による F と Ca 核の弾性散乱のエネルギースペクトルを観測した。散乱された中性子を散乱角 30 度より 10 度おきに 60 度まで 2m 離れた位置においた中性子検出器で同時計測した。これにより F 及び Ca 核の反跳エネルギーを決めることができ、それぞれ 53 ~ 192 keV と 25 ~ 91 keV に対応する領域を調べた。弾性散乱の現象だけを捕まえるために中性子検出器で一般的に行なわれている PSD (pulse shape discrimination) 法を用いて、 $\gamma$  線のバックグラウンドを落した。中性子検出器を 60 度においた場合の PSD 信号の 2 次元プロットを図 2 (左) に示す。中性子と  $\gamma$  線がきれいに分かれている。 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  結晶に対する散乱角 60 度の場合に得られた反跳エネルギースペクトルを図 2 (右) に示す。F と Ca に対応するピークが明確に見える。この位置から原子核が反跳された場合、電子に対してどの程度パルス波高が減少するかがわかる。(この結晶のエネルギー較正は  $\gamma$  線で行なっており、 $\gamma$  線のエネルギーは光電効果等で生成された電子のエネルギーに対応している。)

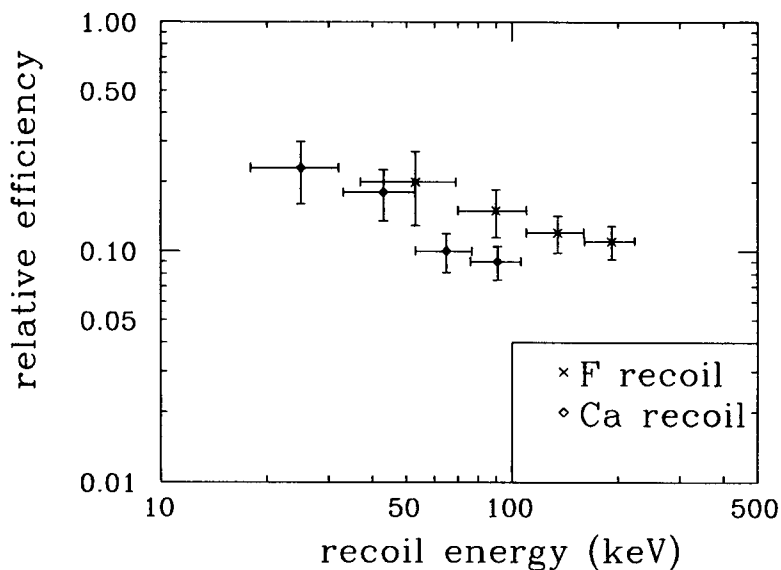


図 3、今回の実験で求めた f 値。電子に対して 10~20% 程度の大きさになっていくだけでなく、低エネルギーになるほどその比が増していることがわかる。これは原子核のエネルギー損失と密接な関係があり、ブラッグピークより小さいエネルギー

では  $dE/dX$  が減少している。電子は最も小さい  $dE/dX$  をもつが、これに近づくことで  $f$  値が改善しているのではないかと考えている。この点からもエネルギー依存性がある方が理解出来ると思われる。

これまでに BPRS(Beijin-Paris-Rome-Saclay) 国際共同研究グループ、及びイギリスのグループが F と Ca の核反跳についての  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  結晶の応答について測定を行なっている。これらのこれらの 2 グループの測定にはエネルギー依存性の有無で矛盾しており、我々がどちらの測定を使うべきか明らかでなかった。もちろんダークマターの探索において  $f$  値は測定の感度を決定する極めて重要な量である。イギリスのグループは低エネルギーでは  $f$  値が増加するという結果を得ていたが、一方 BPRS グループは変化しないと言う結果であった。そこでは我々は出来るだけ低エネルギーまで測定し、その矛盾を実験的に解決しようと考えた。図 3 に今回の実験で得られた原子核 (F と Ca) の反跳エネルギーが同じエネルギーを持った電子に対してどの程度減少しているか ( $f$  値) を示す。我々は今回の実験で BPRS のグループと同じようなエネルギー依存性が存在することを確認した。これは我々が独自に開発した超低エネルギー測定のために回路系により可能になった。更に我々が得た  $f$  値は他のグループの測定より大きく、我々の結晶による測定が他のグループに比較して特に優れているものとなった。結晶によって  $f$  値の違いが現れるのは結晶に含まれる Eu のドーブ量によると考えられているが、必ずしも確立している事実ではない。しかし我々結晶の  $f$  値が大きく出たのはとにかく我々にとっては好運であった。

## 4 ダークマターの上限値

我々の検出器がどの程度の性能を出しているかを調べるために阪大理学部の実験室（地上）でテスト実験を行なった。低エネルギーのスペクトルが図に示されている。ここで得られた計数をダークマターの信号と考えその存在の上限値を求めると図 4 のようになった。これは驚いたことに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地下実験室で行なわれた実験と遜色無い結果を与えている。現在地上の実験ですべてを動かしての測定を始める所である。希望としては地上の測定だけで世界一のデータを出したいと考えている。地下に持ち込めば一般的に 2 桁近くのバックグラウンドの減少が期待できる。現在の上限値でも実験感度は 2 桁近く足りないの、地上で出来る限りの所まで持ち込みたい。我々は今後検出器を地下実験室（現在大阪大学核物理研究センターが中心になって建設を進めている）に移す予定であるが、その結果に大い

に期待が持てる。

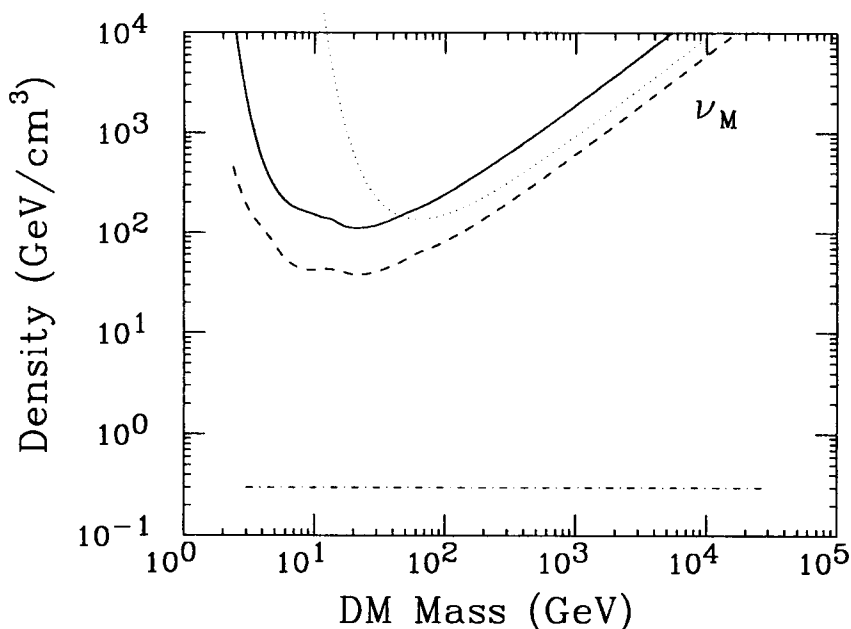


図4、地上の実験室で一部の検出器を動かして得られたダークマターの存在に対する上限値。実線が我々が得た値。点線が海外の地下実験の値。破線は検出器の効率を正しく評価しないと間違った値を出すという例。一点鎖線は重いニュートリノがダークマターである場合に必要な感度。

## 5 終わりに

非常に高エネルギーの加速器を使ってようやく到達出来る領域の基礎的な物理が宇宙のダークマターの探索という形で低雑音の検出器で研究できることは非常に面白い。更にはもはや加速器では到達できない領域も今まで誰も調べたことのないほど稀に起こる現象を調べることで探索出来る。高エネルギー物理学にとってより高いエネルギーが常に研究のフロンティアであることは変わらないが、加速器を使わない物理は高エネルギーに行くことが簡単でなくなってきた現代において別の研究の方法を示唆している様に見える。

尚今回の実験に当たっては東工大の井頭、永井の両先生を始め、研究グループの方々には大変お世話になりました。紙上を借りてお礼を申し上げます。