

暗黒物質探索実験と低速重粒子の検出器物性

月 出 章

宇宙の暗黒物質の有力な候補である弱い相互作用をする大質量粒子 (WIMPs) の直接探索実験について述べる。WIMPs の検出は弾性散乱によって生じる数十 keV の低速反跳核による電離や発光を観測する。低速重粒子と物質との相互作用について触れ、主に気体タイムプロジェクトンチェンバー (TPC) と液体希ガス検出器における電離密度と消光^(用語)について述べる。

Keywords : dark matter, WIMPs, Lindhard factor, quenching, liquid Xe, TPC, LET, CS₂, head-tail

1. ま え が き

都会の人々が忘れてしまった疑問、「夜空はなぜ暗いか」という Olbers の背理は宇宙が年齢をもち、膨張していることから説明されている。しかし、宇宙にはまだ暗い面がある。

1933 年 Zwicky はかみのけ座銀河団の動きを観測し、赤方偏移から得られる速度が Virial 定理によるものよりずっと速いと発表し、見えない質量の存在を示した¹⁾。この定理は、重力のように中心力でその大きさが逆自乗の法則に従う場合には、

$$\bar{T} = -\frac{1}{2} \bar{V} \quad (1)$$

というよく知られた形になる。ここで $\bar{T}$ は平均運動エネルギー、 $\bar{V}$ は平均位置エネルギーである。銀河が互いの重力で運動していれば、その速度は質量の総和から与えられる。また、質量の塊から離れれば速度は遅くなる。

1970 年代初期に水素原子の出す 21 cm 輝線による銀河回転速度の測定が行われ、銀河円盤内の星や水素の雲の回転速度が銀河の端までほぼ一定であることが報告された。見えない質量—暗黒物質—の分布は銀河の半径の 10 倍程度まで及ぶと推定される。また、薄い渦巻銀河は球状の物質に包まれていなければ安定でない。ほかにも、宇宙マイクロ波背景輻射や Einstein によって予言された重力レンズの効果などが暗黒物質の存在を支持した。

実は暗黒物質は黒くない。光を発せず、吸収も散乱もしない。まったくの透明である。暗黒星雲のような通常の物質は暗黒物質の候補にはなり難い。平衡状態にあるとき、吸収されたエネルギーは出ていく。光の全スペクトルを観測すれば出ていく部分がとらえられる。また、ニュートリノはスーパーカミオカンデでとらえられた質量が小さく、その総量をもってしても暗黒物質たりえない。さらに厄介なことに宇宙には暗黒エネルギーという正体の知れないも

の存在もあげられている²⁾。宇宙を構成する物のうち、われわれの知る通常の物質はわずか 4% に過ぎず、暗黒物質が 23%、残り約 3/4 は暗黒エネルギーと考えられている。暗黒物質の候補はいろいろあげられている。それらはほかの解説記事に譲り^{3~5)}、ここでは有力な候補の一つである WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) の探索について、またその検出に特に優れた特性をもつ液体希ガス検出器について主に述べる。また大部分の研究グループは、Web によって容易にアクセスできるので、呼名のみ示し参考文献には記載しない。

2. 地下施設と検出器

1990 年代になって研究者たちは宇宙の暗黒物質の探索のため地下深くに降りた。WIMPs を直接とらえるためである。WIMPs の質量は陽子の 100 倍ほどと推定され、ごくまれに検出器内の物質と弾性散乱を起こす。そのとき生じる数十 keV の反跳原子核 (以下、「反跳核」という) の検出を目指す。

WIMPs と原子核との散乱断面積 σ は

$$\sigma = \sigma_{SD} + \sigma_{SI} \quad (2)$$

と書くことができる。ここで、 σ_{SD} はクォークのスピンの依存する項、 σ_{SI} は依存しない項である。 σ_{SD} を利用する測定には ¹⁹F や ²³Na のような核スピンをもつ原子核が有効で⁶⁾、 σ_{SI} には Xe のような重い原子核が優れている。おおまかに言えば、衝突の頻度は 1 kg の物質で 1 年間に 1 度起こるかかどうかである。

宇宙線は地下深くに逃れることにより非常に少なくなる。しかし、地下施設でも突き抜けて来たミューオンにより創り出される低エネルギーの中性子や、岩盤から洩れてくるウラン系列やトリウム系列の自然放射能などに対する遮蔽が必要である。さらに容器や電極、光電子増倍管の素材などにも十分な注意を払わなければならない。ZEPLIN

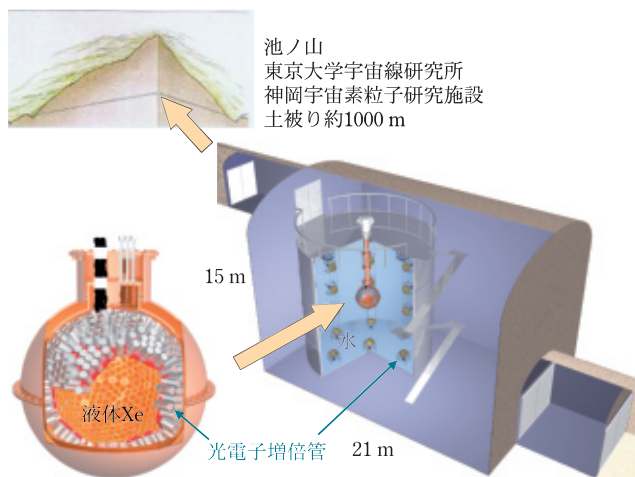


図1 液体Xeの発光を利用した暗黒物質探索器(XMASSの厚意による)。

III実験では無酸素銅の容器を用い、XMASS実験ではXeから放射性のKrを取り除くために大きな蒸留塔が作られた。図1は神岡に建設中のXMASSの例である。1000 mの地下に、わずかに残る宇宙線ミューオンを同定する巨大な円筒状の純水チェレンコフ検出器があり、その中心部分に光電子増倍管に取り囲まれ、 -100°C ほどに冷却された800 kgの液体Xeを収納する直径1 mの検出器本体がある。純水の検出器は岩盤からのガンマ線や中性子を除く遮蔽としても働く。Xe検出器自体も外側20 cmほどは周りからの放射線の除去に使われる。

地下に入ってからさまざまな工夫を凝らしても、検出器に生じる信号の大部分はバックグラウンドで、その主なものは γ 線である。露出(質量 $\times$ 測定時間)よりもバックグラウンドの除去と粒子弁別が重要になる。反跳核(RN)と γ 線の信号の違いとその強度比(RN/ γ 比)[†]が重要な指標となる。

反跳核は検出器の中で電離、励起、熱などを生み出す。

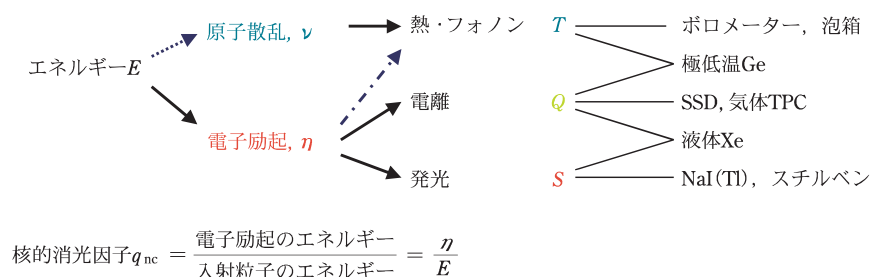


図2 低速重粒子衝突による物質中のエネルギー分配と暗黒物質探索に用いられる代表的な検出器。点線矢印は核的消光を、一点鎖線矢印は電離の消光を示す。

[†] 実験家はしばしばRN/ γ 比をLindhard因子あるいはquenching因子と呼ぶが、本稿で述べるように必ずしもそれらは同じではない。

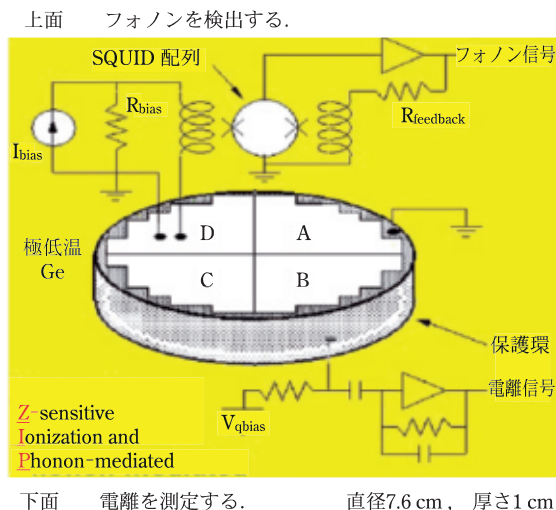


図3 極低温Ge検出器(CDMSの厚意による)⁷⁾。
(<http://cdms.berkeley.edu/>)

図2に反跳核による物質中でのエネルギー分配とそれを利用した検出器の関係を示す。図の点線は核的消光を、一点鎖線は電離の消光を示す。これらの消光については後に詳しく述べる。線質の違いにより、熱、電離、発光に寄与するエネルギー比が異なる。例えば、反跳核では核的消光が大きく、 α 線や γ 線では核的消光はない。一般的な放射線検出器は電離または発光を利用するが、暗黒物質の探索では検出された入射粒子が何かということが重要なので、2種類同時に測定し粒子弁別に利用することがある。例えば、CDMSは20 mKほどの極低温に冷やされたGe(250 g)とSi(100 g)を用い、フォノンと電離信号を測定する⁷⁾(図3)。

フォノンの擾乱による温度変化を超伝導体の抵抗遷移領域を利用して計測する転移端温度計(TES)が用いられる。直径7.6 cmの検出器の上面は4分割され、おのおのが並列に働く1036個のTESをもつ。その信号を超伝導量子干渉素子(SQUID)により測定する。下面には直径6.9 cmの円盤状の電極があり電離が測定される。

その外側には保護環があり、結晶の端の一樣でない電場での信号を除去するために用いられる。

また、XMASSの中で早大グループが中心となっているXMASS IIや、XENON、ZEPLIN IIIは液体Xeを用い、電離と発光を観測する。その割合が線質によって異なり^{8,9)}、これを粒子弁別に巧妙に利用するのが鈴木ら¹⁰⁾の考案による2相型Xe検出器である(図4)。Xeから発せられる真空紫外光は光電子増倍管により検出され増幅されるが、電離信号は弱い。液体Xe内で電子増幅や比例蛍光を起こすこともできるが、それには非常に強い電場が必要である。2相

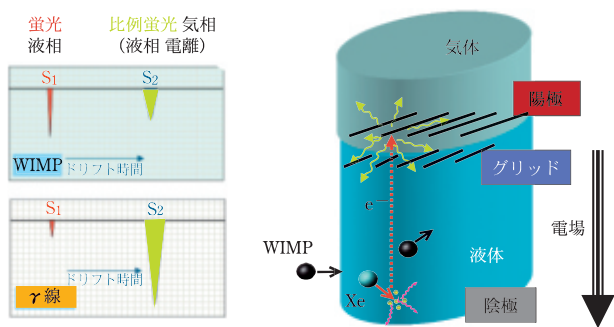


図4 2相型Xe検出器では発光は一次光 S_1 として、電離は電子が電場により上の気相部分に引き出され、比例蛍光 S_2 として観測される。 S_2/S_1 比が反跳Xeと γ 線バックグラウンドの弁別に用いられる(XENON, XMASS IIの厚意による)。

型検出器では液体中の発光は一次光 S_1 として観測される一方、電子は電場により上の気相部分に引き出され陽極での比例蛍光 S_2 として観測される。 S_2/S_1 比が粒子弁別に用いられる。ZEPLIN IIIのある、海底深くの岩塩の鉱山プールヴィの地盤は安定していない。坑道はゆっくりであるが動いている。水平を保つ工夫も必要である。

さらに信号の性質も粒子弁別に利用される。液体希ガス(Ar, Xe)の発光は再結合光、励起光とも励起分子 R_2^* からである。液体Arでは、 Ar_2^* の一重項と三重項の寿命がそれぞれ約7 nsと1.7 μ sと大きく異なり、その発光強度比(I_s/I_t 比)は線質に依存する¹¹⁾。発光の時間減衰の違いで γ 線と反跳核とを区別できる(WARP)。さらに液体Xeと同様に電離と発光の比も使える。ただし、Arの三重項成分は寿命が長いので不純物によって脱励起されやすく¹²⁾、 I_s/I_t 比がその影響を受ける。したがって、純化を十分に行わなければならない。電離を測定するときは O_2 など電子親和性^(用語)の不純物を除去するが、発光の場合は N_2 などの電子親和性でない分子も問題になる¹³⁾。また、Arの発光波長はXeよりさらに短く波長変換剤が必要となる。

暗黒物質は光っている銀河を包み込むように広がり、銀河全体の重力のもとにさまざまな方向に動いていると考えられる。太陽系は銀河の周りを約230 km/sで、はくちょう座方向に動いている。地球の軌道は銀河面に対して60度ほど傾いている。したがって地球で受ける暗黒物質の「風」の方向は季節によって変動する(図5(a))。この季節変動¹⁴⁾が暗黒物質検出の一つの証拠となる。さらに、地球の自転軸は公転軸に対して23.5度傾いている。もし、暗黒物質の入射方向が検出できれば、その方向は夜と昼とで異なるはずである¹⁵⁾。

それを検出するために、気体のタイムプロジェクトンチェンバーTPCの開発が進められている(DRIFT, NEWAGE)。わずかな電荷量の空間分

布を得るために、さまざまな電子増幅装置が考案された¹⁶⁾。例えば、図5(b)は、NEWAGEに用いられる μ -PICで¹⁷⁾、回路基板上にピクセル型比例計数管を配列したものである。互いに垂直に配置された陰極・陽極のストリップからなる。陰極ストリップには円形の穴があり、その中心に基盤を貫いて50 μ m径の陽極ピクセルを形成し電子増幅を行う。これを縦横に多数配置しTPCの電極とする。放電に強く高い電子増幅率が得られる。TPCとしての x - y 方向の位置はこれらの電極で、 z 方向は電荷のドリフト時間で決定される。

TPCのガスには、ArやXeを主成分とする混合気体や核スピンの断面積をもつ CF_4 などの分子ガスが使用される。しかし、低圧でも反跳核の飛程は1 mm程度に過ぎない。通常の電離箱や比例計数管は速い測定をするため、電子移動を観測する。電子やイオンの拡散定数 D と移動度 μ には

$$D = \mu k_B T \quad (3)$$

のEinsteinの関係式がある¹⁸⁾。ここで k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。拡散が大きいと飛跡がぼけて、入射方向や飛跡の情報が失われてしまう。そこで、速さをあえて犠牲にし、一般の電離箱では嫌われる CS_2 のような電子親和性のガスが注目された¹⁹⁾。電離により生じた電子は周囲の分子に付着し、負の分子イオンを作る。この分子イオンによる信号を観測すると拡散が小さいので反跳核の飛跡が再現されやすい。陽極付近に到達すると、分子イオンは付着した電子を放出する。この電子が高電場により比例増幅され、大きな電荷信号が得られる。

3. 低速重粒子による相互作用

では、WIMPsによる信号はどのようなものか？ 実験室では、図4のWIMPの代わりに中性子を照射して、弾性散乱による反跳核の信号を観測すればよい。中性子の散乱方向に検出器を置き、反跳核と同時計測をする。エネルギーと運動量の保存則から、中性子の入射エネルギーと散乱角が決まれば、反跳核のエネルギーが決まる。しかし、そのような実験は大変である。また、装置の感度や分解能によっ

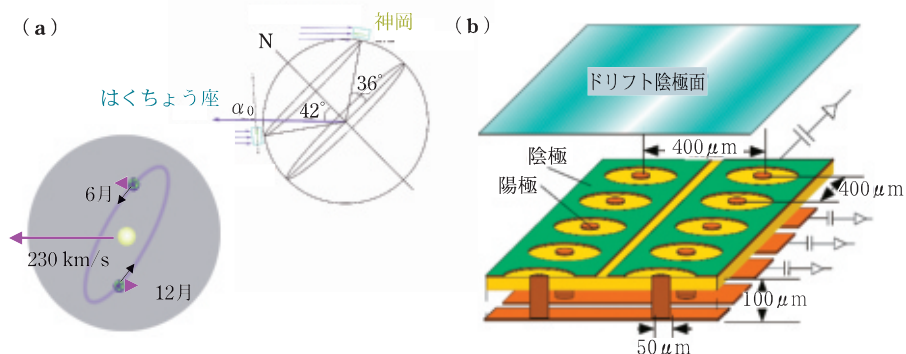


図5 暗黒物質の季節変動、昼夜変化と入射方向検出用気体TPC¹⁷⁾(μ -PIC開発グループの厚意による)。

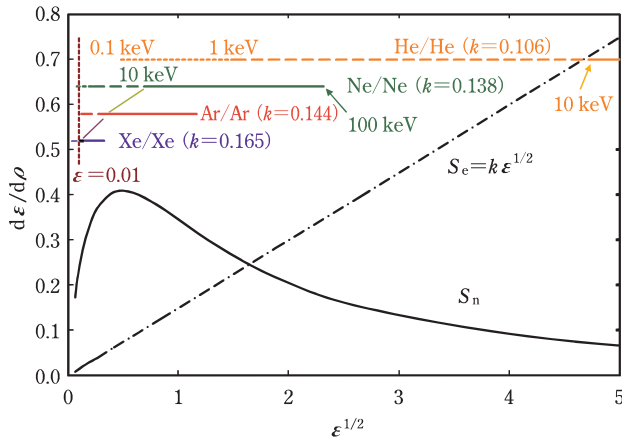


図6 希ガス中の反跳核の電子的阻止能 S_e と核的阻止能 S_n 。エネルギーと飛程は無次元化された ε と ρ で表されている。上方の線が反跳核のエネルギー (keV) を各元素に対し示す。

ては必要な情報が得られない。理論的評価が必要とされるゆえである。

エネルギー E の荷電粒子は物質の中を距離 dx 進むにつれエネルギー dE を失う。その割合、 $S=dE/dx$ を阻止能という。その過程は α 線やがんの治療などに利用されている炭素などの高速重粒子では原子の電離や励起によるもので、特に電子的阻止能 S_e と呼ばれ、Bethe の式などで与えられる¹⁸⁾。

重粒子はエネルギーが高いうちはほぼ直線的に進む。その電離作用は飛程の終端部分で急激に高くなり、鋭いピークを形成する。この曲線をブラッグ曲線、ピークをブラッグピークと呼ぶ。重粒子治療にはこのピークの部分が用いられる。ここで問題になる反跳核は、ブラッグピークを越えた止まりがけであり、そこでの荷電粒子と物質との相互作用はまだわかっていない点が多い。

阻止能理論で低速とは水素原子の軌道電子の速度 $v_0 = e^2/\hbar \approx c/137$ が目安となる (c は光速)。低速重イオンの阻止能を、希ガスを例に図6に示す²⁰⁾。無次元量に変数変換されたエネルギー ε と飛程 ρ で示してある。 ε と ρ は入射粒子と標的原子の原子番号と質量数それにエネルギーとで決まる。通常エネルギー尺度 (keV) を上方の線で示す。この一つの図で、すべての入射粒子と標的原子の組み合わせに対する阻止能が与えられる。反跳核の電荷数はここでは問題にならない。周囲の原子との電子のやり取りによって速度により決まる平衡電荷になるからである。低速では原子との散乱によってエネルギーを失う核的阻止能 S_n の寄与が大きくなる。これは核散乱と呼ばれるが、いわゆる核力による衝突ではなく、遮蔽されたクーロン力の弾性散乱によるエネルギー損失である。重い元素ほど S_n の寄与が大きくなる。

電子的阻止能 S_e は低エネルギーではトーマス-フェルミモデルがよい近似で、

$$S_e = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_e = k\varepsilon^{1/2} \quad (4)$$

となり速度に比例する。ここで k は入射粒子と標的原子で決まる定数で、大部分の組合せに対し、0.1~0.2 の値をとる。全阻止能 S_T は $S_e + S_n$ で与えられる。この全阻止能が電子的阻止能と核的阻止能の和になるという単純な事実が物事を複雑にする。

入射粒子は二次電子や二次イオンを作り出すが、その二次イオンや二次電子もまた電離や散乱をして、標的原子の第1励起エネルギー以下になるまで、原子との衝突を繰り返す。この衝突カスケードが終了したときに、入射粒子のエネルギー E は、電子励起 (電離や励起) に費やされるエネルギー η と原子の運動 (熱) になるエネルギー ν とに分配される (図2)。通常検出器は電離や励起による信号を観測するので、 ν のエネルギーは利用できない。入射粒子のエネルギーのうち電子励起に費やされる割合 $q_{nc} = \eta/E$ は核的消光因子あるいは Lindhard 因子と呼ばれる。

では、 q_{nc} は実験的にはどうすれば得られるか。それには気体中で低速重粒子と高速粒子による生成イオン数を比べる。単純化のため、荷電粒子により気体中に生じるイオン対の数 N は η に比例すると仮定する。 N は W 値 (イオン対一つを作るのに必要な平均のエネルギー) を使うと、 $N = E/W = \eta/(q_{nc} \cdot W)$ と表される。高速粒子では $N = E/W = \eta/W$ である。したがって炭化水素を除き、 N の比から近似的に $q_{nc} = W(\alpha)/W(RN)$ で与えられる。ここで、 $W(\alpha)$ は高速粒子 (電子線や α 線) に対する W 値、 $W(RN)$ は反跳核に対する W 値である。

検出器の信号を考えるには、線エネルギー付与 LET がよい指標である。一般に、 $LET = -dE/dx$ で、阻止能とは入射粒子から見た量で、LET は標的のほうから見た量である。しかし、核的阻止能の寄与が無視できないと、電子的 LET (LET_{el}) という概念を導入する必要がある^{21,22)}。 LET_{el} は単位長さあたりに電子励起に費やされるエネルギーで $-d\eta/dx$ で与えられる。 LET_{el} が与えられると検出器の発光や電離のこれまでの研究でわかっている LET 依存性と比べることができる²³⁾。

反跳核のような低速重粒子では、散乱が多く飛跡は直線ではない。枝分れも起こる。TPC には飛程として深さ R_{PRJ} を取ると実用的である。これを用いた疑似ブラッグ曲線 $-d\eta/dR_{PRJ}$ が TPC 中の粒子の深さ方向の電離分布の平均値を与える。低速重粒子に対しては、 $(dE/dx)_e < d\eta/dx < d\eta/dR_{PRJ}$ となる。 α 線など高速重粒子では三者は等しい。

図7に CS_2 中の C イオンと S イオンの疑似ブラッグ曲線を示す²²⁾。ブラッグピークは C イオンで 3 MeV、S イオンで 25 MeV 付近で、図のはるか右外側である。縦軸が付与された電子的エネルギー密度で、右の軸は長さあたりに生成されるイオンの数 ΔN を示す。曲線の下面積がその総数 N を与える ($N = E/W(RN) \sim \eta/W(\alpha)$)。イオンは右側から入射する。反跳核のエネルギーは単色でなく分布する。図7は 10 keV から 200 keV のエネルギー範囲ならばどのエネルギーから始めてもよい。エネルギーが低くな

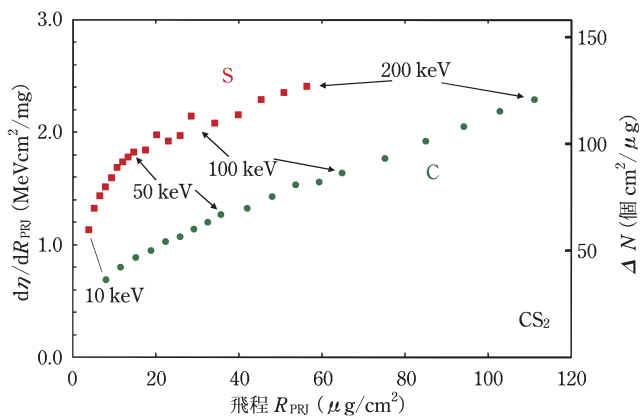


図7 CS₂中のCおよびSイオンに対する電離密度の深さ方向の分布. 反跳核は右側から入射.

るにつれて左に進み、電離密度は小さくなる。一般に軽い元素ではこの傾向はゆるく、重い元素では電離密度の変化が急になる。低速では散乱によるストラグリングが大きい。実際には縦方向のストラグリングのため先端で電離密度が下がり、電離密度の変化は計算値より急になり入射方向が判別しやすくなる。一方、横方向のストラグリングによって入射方向が決めにくなる。

4. 液体希ガス検出器と電子的消光

気体や半導体では、電子線から α 線、さらにわずかの欠損を無視すれば、核分裂片まで電離信号強度とエネルギーはほぼ比例関係にある。したがって、 RN/γ 比は q_{nc} で与えられる。

しかし液体や固体のシンチレーターでは事情が異なる。液体Xeの発光効率をLETの関数として図8に示す。CからFeまでの $\sim GeV/n$ の相対論的重粒子(速度が相対論的領域になり、プラグ曲線上での阻止能が小さい領域、●印)の発光効率はほぼ等しく消光はない(電子的消光因子 $q_{e1}=1$)。 α 線や核分裂片では高電離密度による電子的消光が観測され、発光効率は小さい⁸⁾。液体Xe中で反跳Xe核に対する LET_{e1} を計算すると α 線のLETに近いことがわかる(反跳Xe_{e1}で示す)。したがって反跳核は電子的消光も受け、その全消光因子 q_T は $q_{nc} \cdot q_{e1}$ となる²¹⁾。また、反跳核による信号の性質も α 線と似たものとなる。

一方、電子線や γ 線ではLETは小さく消光はないが、発光効率は1より小さい^{24,25)}。電子が再結合し発光に寄与するためには余分な運動エネルギーを失わなければならない。希ガスではこの熱化効率がきわめて悪く、生成された電子のかなりの部分は親イオンを離れ、再結合を逃れるためである。電場を掛けるとこれらの電子は電荷信号として観測される。そこで単位エネルギー当たりの電荷数 Q と光子数 S の和 $Q+aS$ (a :定数)を取ると、相対論的重粒子のそれと等しく、その効率は1となる。

したがって、 γ 線の発光効率を Y とおくと RN/γ 比は次式で与えられる。

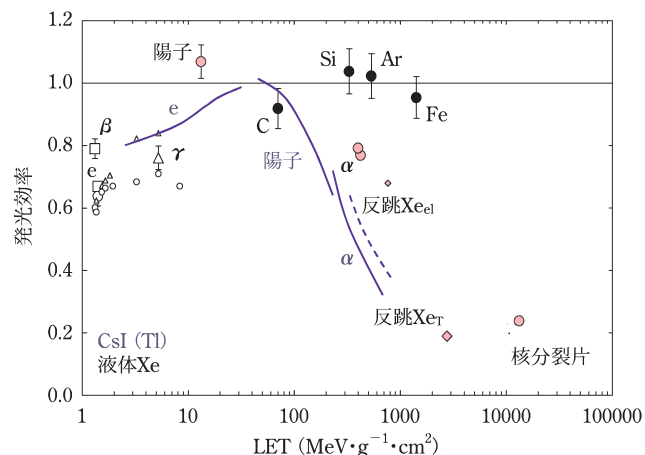


図8 さまざまな粒子に対する液体XeとCsI(Tl) (線)の発光効率のLET依存性. 反跳Xe_{e1}は反跳Xe核のLET_{e1}での q_{e1} を、反跳Xe_Tは全LETでの q_T を示す。

$$\frac{RN}{\gamma} = \frac{q_T}{Y} = \frac{q_{nc} \cdot q_{e1}}{Y} \quad (5)$$

高速重粒子による飛跡構造は円筒状で電離密度の高い芯部(core)と δ 線による周辺部(penumbra)に分けられる²⁶⁻²⁸⁾。消光は芯部だけで起こると考えてよい。芯部の消光因子を q_c とおくと、発光に利用できるエネルギーは

$$q_{e1} \cdot \eta = q_c \cdot \eta_c + \eta_p \quad (6)$$

で与えられる²⁸⁾。ここで η_c 、 η_p は芯部と周辺部の電子励起のエネルギーで、その比は粒子の速度による。

液体希ガスの発光は励起分子 R_2^* からであるが、その状態の寿命はLETに依存しないので、消光は R_2^* になる以前に起こると考えられる。液体希ガスでは非常に短い寿命であるが自由励起子(R^*)が存在する。電離密度の高い芯部で R^* 同士の衝突が起こると、エネルギー的に電離を起こす。

$$R^* + R^* \longrightarrow R + R^+ + e^- (KE) \quad (7)$$

この電子が再結合する前に、ほぼ励起エネルギー一つ分の運動エネルギー(KE)を失えば、二つの光子が出るはずが一つになる。芯部での円筒上の電離分布を仮定し拡散と(7)式の消光過程を計算すると q_c が得られ、(6)式から q_{e1} が得られる。図9(a)に中性子散乱による実験結果との比較を示す。WARP(▲)を除く実験結果とよい一致がみられる。実験値との差の主なものは γ 線の発光効率 Y の不確かさによる。なお、反跳核によって生成される光子の数は1 keV当たり十数個と非常に少ない。

無機結晶シンチレーターの発光効率も、液体Xeと似たLET依存性をみせる。発光収量は η_c 、 η_p の比が粒子速度に依存するためLETだけでなく速度にも依存する。反跳核は遅いので、 δ 線の飛程が短い。図8の曲線は遅い粒子に対する値を結んだ。CsI(Tl)に対して反跳核のLET_{e1}を求め、この曲線から得た RN/γ 比を図9(b)に示す²⁹⁾。

得られたエネルギー依存性は液体 Xe と CsI(Tl) とで逆の傾向を示す。I, Xe, Cs は周期律表で隣り合っているの、液体 Xe と CsI(Tl) の q_{nc} はほぼ同じと考えるとよく、逆傾向の RN/ γ 比のエネルギー依存性は主に電子的消光による。

また、反跳核の飛跡は直線ではなく、曲がりくねり枝分れも多い。そして飛程自体が短い。また先端で電離密度は急速に低くなる。これらの傾向は非常に低いエネルギーで著しく、その影響をどう扱うかが今後の課題である。

5. 最近の動向

暗黒物質の直接探索実験は、伊国のグランサッソ (DAMA, XENON, WARP, CREST), 英国 プールヴィ (DRIFT, ZEPLIN), 米国 スダグン (CDMS), わが国の神岡 (XMASS, NEWAGE) など多くの検出器が稼働中である。気体検出器, 結晶シンチレーター, 半導体検出器 (SSD), 希ガス液体検出器, 泡箱などあらゆる種類の放射線検出器が用いられている。

1998 年に DAMA³⁰⁾ が約 90 kg の NaI(Tl) を使い、季節変動により WIMPs を検出したと発表した。その後、CDMS をはじめとする多くの実験がよりよい精度で行われたが、WIMPs は検出されず疑問視されている。希ガス液体では安価で大型化が容易な Ar を使う WARP, ArDM, 放射性同位元素のない Ne を使う CLEAN などがある。極低温無機シンチレーターの CaWO_4 などが CRESST や ROSEBUD で用いられている。これは光と熱を利用する。また、Picasso や COURD は泡箱を使用する。極低温 Ge で電離と熱を使用するものに Edelweiss がある。また、NaI(Tl) を使用する徳島大を中心とする PICO-LON は ^{23}Na の核スピンによるスピン依存項のほかに、暗黒物質の弾性衝突による ^{127}I の X 線や γ 線を利用することで注目される。PICO-LON の置かれた大塔村のトンネルは風が通りラドンが少ない。長い間、バックグラウンド除去に非常に優れた CDMS がこのレースの先頭を走ってきた⁷⁾。2007 年になって 15 kg の液体 Xe を用いた 2 相型検出器を用いる XENON 10 がこれを越えた³¹⁾。

この 25 年余で検出器の検出限界は WIMP の断面積に換算して 3 桁ほどよくなった。現在は各グループとも検出器の大型化を進めている。液体希ガスは巨大化しやすい。XENON は液体 Xe 部分の直径 30 cm, 高さ 30 cm, 有効質

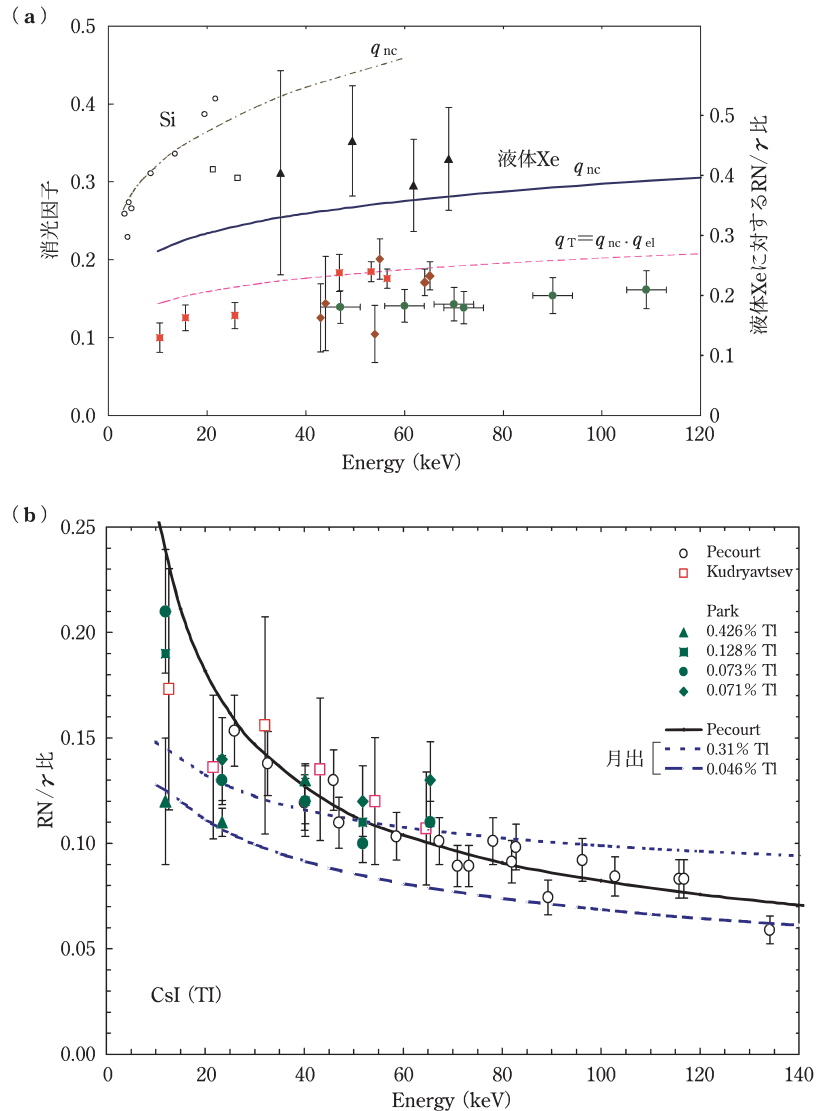


図9 (a) Si と液体 Xe の RN/ γ 比と消光因子。半導体では RN/ γ 比の実験値 (○, □) は q_{nc} で説明されるが、凝縮相のシンチレーターでは q_{el} も考慮しなければならない。(b) CsI(Tl) の RN/ γ 比²⁹⁾。点線は著者による暫定値、実線は Pecourt らによるフィッティング。

量 60 kg の XENON 100 を設置中である。また、XMASS は 800 kg の球形の検出器を建設中である (図 1)。これらにより、検出器の性能の向上はさらに加速され、多くの理論により暗黒物質の存在が予想される領域に到達すると思われる。

まもなく欧州合同原子核研究所 (CERN) に建設中の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) が稼働し、暗黒物質候補を作り出すエネルギー領域に到達する³²⁾。しかし、それは WIMPs の質量が 200 GeV 程度より軽い場合のことである。また加速器で生み出された粒子が、宇宙の暗黒物質と同じものかどうか証明されなければならない。したがって、当分はここで述べたような地下深くに設置された検出器による探索が続くと思われる。

用語の解説

消光 (quenching) : 一般には, シンチレーターで α 線や核分裂片など重粒子に対する発光効率が高密度励起により, 電子線など軽い粒子のそれより小さくなることをいう。しかし, 低速重粒子で核的阻止能の寄与により電離や発光の効率が下がることも指す。前者を電子的消光, 後者を核的消光として区別する。消光因子は消光を逃れる割合として定義され, 消光なしで 1, 全消光で 0 である。

電子親和性 : 原子や分子に電子が付着したとき発生するエネルギーを電子親和力 (electron affinity) といい, 正負両方の値をもつ。電子が分子に付着して負イオンとなると, 余分なエネルギーを放出して安定化する場合と, そのままでは付着せずエネルギーを与えると付着する場合がある。前者のように電子親和力が正であると負イオンになりやすく, 電子親和性があるという。

文 献

- 1) F. Zwicky : *Helv. Phys. Acta.* **6**, 110 (1933).
- 2) 須藤 靖, 高田昌広, 相原博昭 : *物理学会誌* **62**, 83 (2007).
- 3) 蓑輪 真 : *物理学会誌* **60**, 609 (2005).
- 4) M. Fukugita : *Nature* **422**, 389 (2005).
- 5) P. Coles : *Nature* **433**, 248 (2005).
- 6) J. Ellis and R.A. Flores : *Phys. Lett. B* **263**, 259 (1991).
- 7) P.B. Cushman : *Nucl. Instr. Meth. A* **579**, 437 (2007).
- 8) A. Hitachi *et al.* : *Phys. Rev. A* **35**, 3956 (1987).
- 9) K. Masuda *et al.* : *Phys. Rev. A* **39**, 4732 (1989).
- 10) 鈴木 聡 : *物理学会誌* **53**, 181 (1998).
- 11) A. Hitachi *et al.* : *Phys. Rev. B* **27**, 5279 (1983).
- 12) A. Hitachi : *J. Chem. Phys.* **80**, 745 (1984).
- 13) S. Himi, T. Takahashi, J. Ruan (Gen) and S. Kubota : *Nucl. Instr. Meth.* **203**, 153 (1982).
- 14) D.N. Spergel : *Phys. Rev. D* **37**, 1353 (1988).
- 15) CYGNUS2007.
<http://www.pppa.group.shef.ac.uk/cygnus2007//talks/>
- 16) 3rd Symposium on Large TPCs for Low Energy Rare Event Detection. *Journal of Physics: Conference Series* **65** (2007). jpcs.iop.org
- 17) 窪 秀利, 身内賢太朗, 谷森 達 : *応用物理* **76**, 636 (2007).
- 18) R.K. Hobbie : *Intermediate Physics for Medicine and Biology*, 2nd edition (John Wiley & Sons, New York, 1987).
- 19) D.P. Snowden-Ifft, C.J. Martoff, J.M. Burwell : *Phys. Rev. D* **61**, 101301 (2000).
- 20) J. Lindhard, V. Nielsen, M. Sharff and P.V. Thomsen : *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* **33**, no.10 (1963).
- 21) A. Hitachi : *Astroparticle Physics* **24**, 247 (2005).
- 22) A. Hitachi : *Rad. Phys. Chem.* special issue on ASR2007. in press.
- 23) J.B. Birks : *The Theory and Practice of Scintillation Counting* (Pergamon, Oxford, 1964).
- 24) T. Doke *et al.* : *Nucl. Instr. Meth. A* **269**, 291 (1988).
- 25) T. Tanaka *et al.* : *Nucl. Instr. Meth. A* **457**, 454 (2001).
- 26) 放射線化学会 編 : *放射線化学のすすめ* (学会出版センター, 2006).
- 27) 月出 章 : *Radioisotopes* **43**, 88 (1994).
- 28) A. Hitachi, T. Doke and A. Mozumder : *Phys. Rev. B* **46**, 11463 (1992).
- 29) H. Park *et al.* : *Nucl. Instr. Meth. A* **491**, 460 (2002) and refs. therein.
- 30) R. Bernabei *et al.* : *Phys. Lett. B* **424**, 195 (1998) ; *Riv. Nuovo Cim.* **26**, 1 (2003).
- 31) B. Schwarzschild : *Physics Today*, p. 16, August 2007 ; 山下雅樹 (訳) : *パリティ* 2008 年 3 月号.
- 32) 野尻美保子 : *物理学会誌* **62**, 929 (2007).

(2007 年 12 月 18 日 受理)

月出 章

1972 年茨城大学物理学科卒, 80 年早稲田大学理工学研究科修了。理学博士。マンチェスター大学, ノートルダム大学, コインブラ大学などでの客員研究員などを経て, 現在, 高知大学医学部助手。原子衝突, 放射線物理学。特に希ガス液体の発光・電離, および光ドップラー速度計の研究。