



ISSN 0285-3604

放射線 學術刊行物指定 平成7年1月20日

郵政省告示内24号 第26卷1号

放 射 線

Ionizing Radiation

特集—低温放射線検出器



Vol. 26 No. 1 JAN. 2000

応用物理学会放射線分科会

暗黒物質検出のための複合型ボロメータとNTDサーミスタ

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

身内賢太郎 菱輪眞

Composite Bolometer and NTD Thermistor for Dark Matter Detection

Kentaro Miuchi and Makoto Minowa

Department of Physics, School of Science, University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

A composite bolometer consists of an absorber and an attached thermometer. One has a wide choice of absorber materials; insulators, semiconductors and superconductors. Sensitive thermometers like thermistors and transition edge sensors are used for the composite bolometers. We report on our composite bolometers with neutron transmutation doped germanium thermistors for an experiment to search for hypothetical cosmic dark matter particles together with various other examples.

1 はじめに

ボロメータとはカロリメータと同義であり、広義では熱量計ということになる。物性実験で物質の比熱を測定する装置をボロメータと呼ぶこともあるが、本稿では意味を限って極低温熱量計型粒子検出器のことをボロメータということにする。マイクロカロリメータと呼ばれるものも同じものである。

ボロメータでは、極低温に冷却された吸収体が放射線やその他の粒子によってエネルギーを付与されたときに温度が上昇するのを高感度温度計で検出する。この場合、一個一個の粒子をパルスとして数えることができる。微小な半導体サーミスタ自身を吸収体として利用することもできるが、別々の吸収体と温度計を結合させて複合型のボロメータとすることもできる。

我々は、複合型ボロメータの以下に述べるような特徴を利用して宇宙の暗黒物質候補である仮説的素粒子の探索実験に利用している¹⁾。また、複合型ボロメータ用の高感度温度計として Neutron Transmutation Doped(NTD) Germanium Thermistor を独自で作り出すことに成功した。以下に、その他の事例を交えながら複合型ボロメータについて解説する。

2 複合型ボロメータの特徴

図 1 に複合型ボロメータの概念図を示す。

複合型ボロメータは極低温に冷却された吸収体 (absorber)、温度計 (thermistor) で構成され、さらに極低温部におかれたヘッドアンプも重要な役割をはたしている。

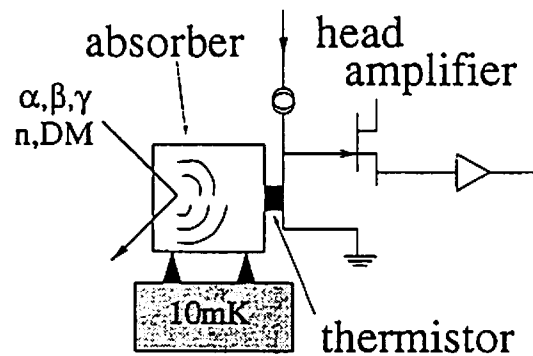


図 1: 複合型ボロメータの概念図

以下に、複合型ボロメータの特徴について述べる。一番目に示す特徴が複合型ボロメータと一体型ボロメータとの違いであり、その他はボロメータの一般的な特徴である。

- 複合型ボロメータでは吸収体と温度計が分かれているので、吸収体の選択肢が広い。絶縁体、半導体及び超伝導体の比熱は、低温では格子比熱のみで記述され、絶対温度 T^3 に比例するため、吸収体としてこれらの物質の中から比較的自由に選択することができる。
- ボロメータの分解能を決定するフォノンの揺らぎは、動作温度 10mK では eV のオーダーとなるため、高分解能が実現できる。(5.9keV の $^{55}\text{Mn}K_{\alpha}$ 線に対して FWHM $\sim 5.2\text{eV}$ の分解能が得られている²⁾。)
- シンチレーターや半導体検出器では、中性子や暗黒物質に対する応答が、 β, γ 線に対してのものより小さくなるが (quenching)、ボロメータではそれがない。その為、暗黒物質探索についてはシンチレーターや半導体検出器を用いたものよりも低閾値を実現できる。(Al₂O₃ を用いた測定で 4keV の閾値が得られている³⁾。)
- ボロメータでは、吸収体の温度が上昇する熱的過程を信号として見るため、シンチレーターや半導体検出器に比べて信号が遅い⁴⁾。($\tau_{\text{rise}} \sim \text{ms}$)
- ボロメータを検出器として動作させるには、希釈冷凍機を運転して 10 ~ 20mK の低温を実現する必要があり、シンチレーターや半導体検出器など、従来型の検出器に比べて扱いが複雑となる。このため、他の検出器に比べて開発が遅れ、現在開発段階からようやく実用段階に移行したところである。

次章以降、複合型ボロメータ各部について吸収体、温度計、極低温ヘッドアンプの順で説明していく。

3 複合型ボロメータの使用目的と、吸収体の選択

複合型ボロメータは、吸収体の選択の幅の広さを活かして、暗黒物質探索実験及び二重ベータ崩壊実験に利用されている。(表 1参照) これらの実験は非常に稀な事象を検出しようとする実験であり、少しでも有利な物質を検出器に使うことは、そのまま感度の上昇につながる。以下、これらの実験の吸収体としてどのような物質が有利であるかを述べる。

表 1: 複合型ボロメータを用いて現在行われている実験。DM は Dark Matter、DBD は Double Beta Decay、NTD は Neutron Transmutation Doped、SPT は Superconducting Phase Transition をそれぞれ表す。

実験名称	実験目的	吸収体	質量	温度計
CDMS ⁵⁾	DM	Ge,Si	165g(Ge)	NTD Ge
CRESST ⁶⁾	DM	Al ₂ O ₃	262g	SPT W
EDELWEISS ³⁾	DM	Al ₂ O ₃	24g	NTD Ge
Milano ⁷⁾	DM,DBD	TeO ₂	20×340g	NTD Ge
Rosebud ⁸⁾	DM	Al ₂ O ₃	2×25g	NTD Ge
Tokyo ⁹⁾	DM	LiF	8×21g	NTD Ge

3.1 暗黒物質探索実験

暗黒物質問題は、宇宙物理、素粒子物理の両方にまたがる重要な問題であるが、未だ直接検出による解決はなされていない。現在のところ暗黒物質の有力候補は、素粒子物理学の超対称性理論が予言するニュートラリーノである。ニュートラリーノが通常原子核と弾性散乱を行なうと、10keV程度の反跳エネルギーを原子核に与える。この反応を利用して複合型ボロメータによる暗黒物質の直接検出を行なおうとする実験が行なわれている。ニュートラリーノと原子核との反応はスピンの依存したものと、スピンに依存しないもののが考えられており、それぞれの散乱弾面積は以下に示すように原子核による違いが大きい。

- スピンに依存しない反応では、全ての核子が散乱に寄与するため、散乱弾面積は A^2 に比例する。(A は、原子核の質量数。) このため、Ge や I 等、A の大きな物質が有利となる。
- スピンに依存した反応では、散乱弾面積は表 2. に示した $\lambda^2 J(J+1)$ の値に比例する。このため、特に ¹⁹F が有利である。

表 2: 暗黒物質ニュートラリーノと原子核の、スピンの依存した反応断面積の大きさを表す $\lambda^2 J(J+1)$ の値。 J は核スピン、 λ は、核スピンに対する核子スピンの寄与を表す指数。(¹⁰)より、 odd group model の値を抜粋。)

Isotope	J	Abundance(%)	$\lambda^2 J(J+1)$
¹ H	1/2	100	0.750
⁷ Li	3/2	92.5	0.411
¹⁹ F	1/2	100	0.647
²³ Na	3/2	100	0.041
²⁷ Al	5/2	100	0.087
¹²⁷ I	5/2	100	0.023
²⁹ Si	1/2	4.7	0.063
⁷³ Ge	9/2	7.8	0.065
¹²⁹ Xe	1/2	26.4	0.124
¹³¹ Xe	3/2	21.2	0.055

Tokyo グループでは、¹⁹F を含んだ吸収体として LiF を、 CRESST などの group では、不純物を含まない結晶の得やすさやフォノンの平均自由行程が長いことなどから、 Al₂O₃(サファイア) を吸収体として用いている。また、 CDMS group は、半導体検出器との融合(後述)を考慮して、 Ge や Si などを吸収体としている。

3.2 二重ベータ崩壊実験 (Double Beta Decay)

二重ベータ崩壊は、原子核が 2 個の電子を放出する反応であり、 2 つのニュートリノを放出する $2\nu\beta\beta$ mode とニュートリノを放出しない $0\nu\beta\beta$ mode の 2 つのモードが主に考えられている。このうち、 $0\nu\beta\beta$ mode は、レプトン数が保存されない反応のため、検出されれば標準理論を越えた理論が必要となるが、現在までのところ崩壊が予言されているいくつかの原子について、半減期の制限が与えられているのみである ¹¹⁾(図 2)。 $0\nu\beta\beta$ mode の二重ベータ崩壊は、予言されている物質が限られているので、それらを含む物質を吸収体として選択すれば実験を行なうことが出来る。 MILANO group では、 ¹³⁰Te の二重ベータ崩壊実験のため、 TeO₂ を吸収体として用いて測定を行なっている。

4 各種温度計

複合型ボロメータの心臓部とも言えるのが高感度温度計であり、この性能によって複合型ボロメータとしての能力が大きく左右される。現在使用されている温度計は、NTD(Neutron Transmutation Doped) Ge thermistor と呼ばれるものと、SPT(Superconducting Phase Transition) ther-

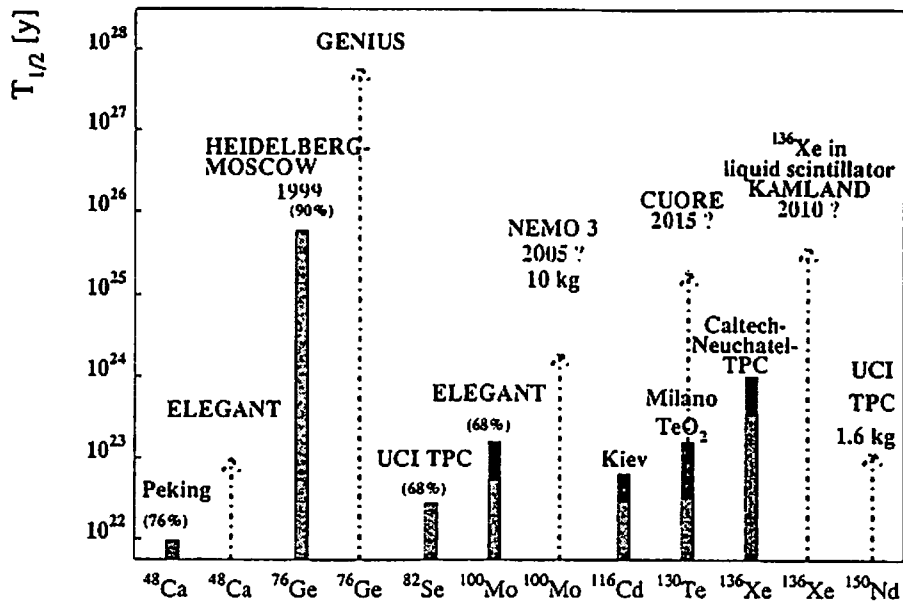


図 2: 二重ベータ崩壊実験の現状。薄いグレーで表された部分が否定された半減期の領域。色の濃い部分は現在行なわれている測定で最終的に期待される感度、一点鎖線は現在計画中の実験¹¹⁾

momometer と呼ばれるものの 2 種類である。温度上昇を抵抗値の変化としてとらえるという点は両者共通している。

4.1 NTD Ge thermistor

Tokyo group を始めとして、殆どの複合型ボロメータで使用されているのがこの NTD Ge thermistor である。高純度の Ge に熱中性子を照射して、Ge の同位体との反応で dopant を作り出す方法である。表 3 に、Ge の同位体と熱中性子吸収反応を示す。

この方法では Ge の中に一様に dopant が出来るため、同じ性能の温度計を大量に生産することが出来る。熱中性子の照射量によって温度計のもつ性能を調整することが出来る。図 3 に、Tokyo

表 3: Ge の同位体と熱中性子吸収反応

Isotope	Abundance (%)	Cross section (barn)	Reaction	Dopant type
$^{70}_{32}\text{Ge}$	20.5	3.25	$^{70}_{32}\text{Ge}(n, \gamma)^{71}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{11.2\text{d}} ^{71}_{31}\text{Ga}$	p
$^{72}_{32}\text{Ge}$	27.4	1.0	$^{72}_{32}\text{Ge}(n, \gamma)^{73}_{32}\text{Ge}$	-
$^{73}_{32}\text{Ge}$	7.8	15	$^{73}_{32}\text{Ge}(n, \gamma)^{74}_{32}\text{Ge}$	-
$^{74}_{32}\text{Ge}$	36.5	0.52	$^{74}_{32}\text{Ge}(n, \gamma)^{75}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{82.8\text{m}} ^{75}_{33}\text{As}$	n
$^{76}_{32}\text{Ge}$	7.8	0.16	$^{76}_{32}\text{Ge}(n, \gamma)^{77}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{11.3\text{h}} ^{77}_{33}\text{As} \xrightarrow{38.8\text{h}} ^{77}_{34}\text{Se}$	n

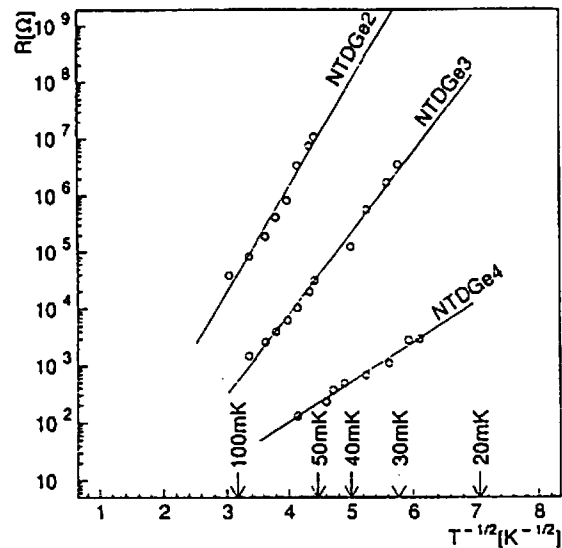


図 3: Tokyo group の NTD Ge thermistor の温度特性。熱中性子の照射量によって、性能の違う thermistor が作られている。

group の製作した NTD Ge thermistor の温度特性を示す¹³⁾。

4.2 SPT

CRESST group で用いられている温度計が SPT thermometer である。Al₂O₃ 結晶の表面に蒸着された W を、超伝導状態と常伝導状態の転移温度にしておく。吸収体の温度が上昇すると、W は常伝導状態になるため、わずかの温度変化で抵抗値が大きく変化する。吸収体に Al₂O₃ を使い、SPT を温度計として使用した組合せの複合型ボロメータでは、thermalize する前のフォノンを捉えることができるので、立ち上がりが早く、吸収体の比熱によらないゲインを期待できる。立ち上がりの早さは、他の技術との融合によるバックグラウンド低減に有利であり、比熱によらないゲインは大質量化に有利である。

CDMS は TES(Transition Edge Sensor) という名称で同様の原理の温度計を開発中である。

5 極低温ヘッドアンプ

複合型ボロメータは検出器が極低温にあることから、雑音の少ないデータを得るために極低温で動作する性能の良いヘッドアンプが必要になる。現在使用されているヘッドアンプは J-FET (Junction Field Effect Transistor) を用いたものと、SQUID (Superconducting QUantum Interferometric Device) を用いたものの 2 種類が主流である。高抵抗の NTD には J-FET が、低抵抗の SPT には SQUID が、それぞれ適合する。

5.1 J-FET

殆んどの group で採用されているのが、低温で使用可能な FET を用いるという方法である。図 4 に東京グループのソースフォロアー回路を示す⁴⁾。このソースフォロアー回路は、4K の液体ヘリウム温度中に置かれ、検出器とはマンガニン線及び超伝導線で接続されている。高インピーダンス ($100\text{M}\Omega$) によって定電流バイアスをかけられた NTD 温度計の抵抗値変化が、ソースフォロアー回路を通じて、常温部に置かれたメインアンプへ電圧信号として与えられる。Tokyo group の使用している 2SK163 は、動作可能温度が 100K 程度以上なので、4K のままでは動作しないが、最初ヒーターを焚いて動作させてやると、その後は外から熱を加えなくても自己発熱で動作し続ける。

5.2 SQUID

CRESST group は、SPT 温度計と並列に接続されたコイルを流れる電流値の変化を、4K の液体ヘリウム温度中に設置された SQUID によって読みだしている。また、現在開発段階の CDMS group の TES 温度計も SQUID による読み出しを行なっている。図 4 に、CDMS group のヘッドアンプを示す¹³⁾。

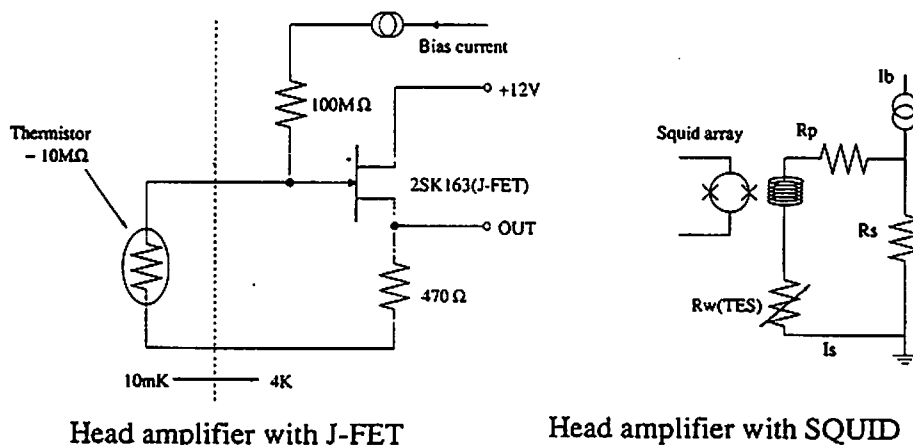


図 4: Tokyo グループの J-FET を用いた極低温ヘッドアンプ (左) と⁴⁾、CDMS group の SQUID を用いた極低温ヘッドアンプ (右)¹³⁾。

6 複合型ボロメータと他の検出器との融合

複合型ボロメータでは入射放射線によって吸収体の電子が反跳した場合でも原子核が反跳した場合でも、応答が同じであるため、暗黒物質探索の為に γ 線が大きなバックグラウンド源となる。宇宙線の影響を低減するために地下深い実験室で実験を行ない、環境 γ 線を遮蔽するために鉛や銅などで検出器を囲むという対策が殆んどの group で行なわれているが、いくつかの group では、

半導体検出器や、シンチレーターなどの技術との融合によって γ 線に依るバックグラウンドをさらに低減させる工夫をしている。二重ベータ崩壊実験については、興味あるエネルギー領域が U,Th 系列放射性不純物の α 崩壊の Q 値に近いことが多いため、 α 線による事象を弁別することが重要であり、シンチレーターと融合した検出器の開発が進められている。

6.1 半導体検出器との融合

CDMS group では、Si 及び Ge の複合型ボロメータを半導体検出器としても同時に使用し、Ionization energy(半導体検出器の出力)/Recoil energy(複合型ボロメータの出力)の比が 1 に近いものは γ 線に依る事象として排除している。この検出器はすでに実用の段階に入っており、長期測定が行なわれている。⁵⁾

6.2 シンチレーターとの融合

CRESST group は、 CaWO_4 を吸収体として用い、 CaWO_4 のシンチレーション光を隣に設置したもう一つの複合型ボロメータで検出する、という原理の検出器を開発、電子反跳及び原子核反跳の事象の弁別に成功している。

MILANO group は、 CaF_2 を吸収体として用い、NTD 温度計で温度上昇を検出する一方で PIN フォトダイオードでシンチレーション光を検出、発光の少ない α 線と、通常の発光をする β 線の事象を区別している¹⁴⁾。

これらの検出器は、現在は開発段階で、まだ大質量での長期測定は行なわれていない。

7 各種実例とその性能

7.1 暗黒物質探索実験

現在実用化されている複合型ボロメータの殆どは、暗黒物質探索実験を目的としている。スピンに依存した反応断面積について、ニュートラリーノの質量が 5GeV 以下の領域で Tokyo group がシンチレーター、半導体検出器を含んだ全ての検出器の中で、最も厳しい制限を与えている⁹⁾(図 5)。Tokyo group では、東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の地下実験室への移設を完了し 2000 年にはさらに高感度の測定を開始する予定である。

スピンに依存しない反応断面積については、CDMS group が Ge を用いた測定で特定のニュートラリーノ質量領域で最も厳しい制限を与えている⁵⁾。

7.2 二重ベータ崩壊実験

現在測定が行なわれている複合型ボロメータを用いた二重ベータ崩壊実験は MILANO group のみであり、340g の TeO_2 を 20 個用いて測定している⁷⁾。1.5kg \cdot year の測定で、 ^{130}Te の 0 ν DBD モードについて $9.5 \cdot 10^{22}\text{y}$ の制限を与えている。(図 2 参照。)これは、 ^{130}Te の崩壊半減期に付け

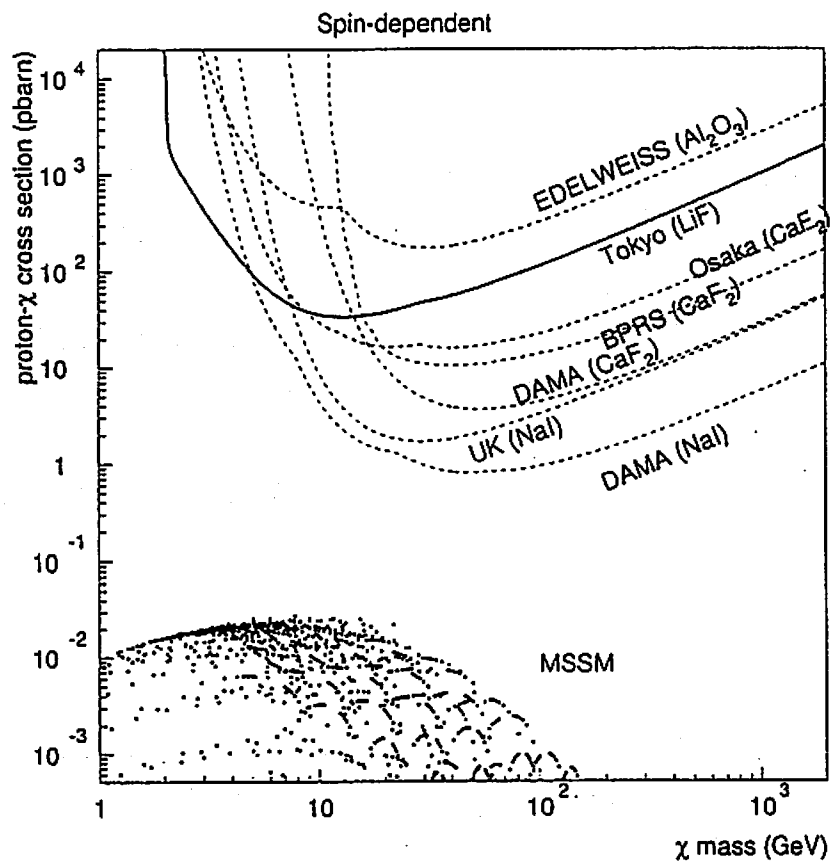


図 5: ニュートラリーノの質量に対する陽子-ニュートラリーノのスピンの依存した反応断面積。曲線の上部が各実験で排除された領域。⁹⁾

られた最も厳しい制限であり、複合型ボロメータが二重ベータ崩解実験に対して、シンチレーターや半導体検出器を越える性能を持っていることが分かる。MILANO groupは、750gのTeO₂を1020個モジュール化した、CUOREと呼ばれる検出器(～1t)を開発中であり、2001年から予備実験を行なうことになっている。

8 結語

複合型ボロメータは、今後も改良が続けられ性能が向上してゆくと思われる。またここでは触れなかったが、その融通性を生かして新しい応用分野も広がってゆく可能性がある。ボロメータのX線計測への応用については本号の別稿に解説を譲った。

参考文献

- 1) 菱輪 眞: 「暗黒物質をつかまえる」、ニュートン 1999年3月号 42-49, 菱輪 眞: 「暗黒物質をとらえる - すぐそばにある未知の素粒子」、科学 69(1999) 472-478.
- 2) A.Alessandrello et al., Phys. Rev.Lett. 82(1999)513.
- 3) A.de Bellefon et al., Astropart. Phys. 6(1996)35, A.de Bellefon, Nucl. Instr. and Meth. A. 370(1996)230,
- 4) W. Ootani, doctoral thesis, University of Tokyo, 1998.
- 5) S.R.Golwala et al., Proceedings of the Eighth International Low Temperature Detectors.(<http://cfpa.berkeley.edu/group/directdet/gen.html>)
- 6) M.Sisti et al., Proceedings of the Eighth International Low Temperature Detectors.(<http://wwwvms.mppmu.mpg.de/cresst/>)
- 7) S.Pirro, et al., Proceedings of the Eighth International Low Temperature Detectors.(<http://hpmimi.mi.infn.it/index.html>)
- 8) S.Cebrian et al., Astropart. Phys. 10(1999)361
- 9) W. Ootani, et al., Phys. Lett. B 461(1999)371.
- 10) J.Ellis and R.A.Flores, Phys. Lett. B 263(1991)259.
- 11) H.V.Klapdor-Kleingrothaus, hep-ex/9907040.
- 12) W. Ootani, et al., Nucl. Instr. and Meth. A. 372(1996)534.
- 13) B.Cabrera, Proceedings of the Eighth International Low Temperature Detectors.(<http://cfpa.berke>

14) A. Alessandrello et al., Phys.Lett.B 420(1998)109.

... ..

Fig. 5

... ..

Fig. 6

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..

... ..