

論文内容の要旨

論文題目: Experimental Study on Anisotropic Scintillation Response of a Stilbene Crystal to Nuclear Recoils and Its Application to the Direction Sensitive Dark Matter Search

(原子核反跳に対するスチルベン結晶の非等方的発光応答の実験的研究および方向有感型暗黒物質探索への応用)

氏名: 関谷 洋之

数多くの観測結果から、我々の宇宙、銀河に存在する物質の大部分を暗黒物質が占めることが確実になっている。そして、この暗黒物質は宇宙初期において、非相対論的な速度を持って粒子数凍結した、非バリオンの暗黒物質 (CDM) であることも明らかになってきている。暗黒物質候補のうち、Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) として分類される neutralino という素粒子は、超対称性理論から予言され、宇宙物理学及び素粒子物理学両方の観点から、CDM の候補として最も有力である。

WIMPs は、通常の原子核との弾性散乱を利用し、原子核に与えられた反跳エネルギーを測定することで直接検出することが可能である。そして実際に直接検出実験が様々な検出器を用いて世界各地で行なわれている。しかし、現在のところまだ WIMPs の存在の確認はされていない。これは、暗黒物質存在の証拠として、原子核に与えられた反跳エネルギースペクトルを測定し、地球の公転に基づくわずかな年変化をとらえることに主眼がおかれていたため、非常に難しい実験であるからである。一方、地球は銀河の回転運動として 230km/s で動いている。したがって、銀河ハローに付随してい

ると考えられている暗黒物質は、図1のように地球上では“風”として感じることができるはずである。このため、原子核の反跳方向は非等方的になり、原子核反跳の方向に関する情報が分かれば従来の手法に比べはるかに確度の高い暗黒物質探索が可能となる。本論文において、方向感度のある検出器を考案、実証し、それを用いた暗黒物質探索実験を提案、実行した。

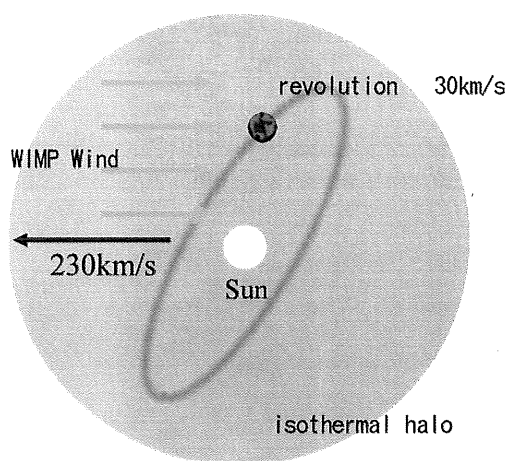


図 1: 地球に吹く暗黒物質の風

スチルベンなどの有機単結晶シンチレーターはその構造の非対称性(図2)から、MeV領域の荷電重粒子の入射方向により発光効率が異なることが知られていた。この発光量の異方性はkeV領域の原子核反跳でも予想され、この性質を利用すれば暗黒物質の運動方向に関する情報が得られる画期的な検出器となると考えた。

実際にウクライナからスチルベン単結晶を購入し、暗黒物質に感度のある炭素反跳をみるため、東京工業大学原子炉工学研究所3.2MVペレトロン加速器において中性子ビームを用いた実験を行った。ペレトロン加速器はパルス化された中性子が放出可能で、そのタイミングが取り出せる。これを利用することにより、精度よく中性子の入射エネルギーを測定することができた。その結果、30keVから1MeVまでの低いエネルギー領域において、炭素の反跳方向によって発光量が7%変化することを初めて確認した(図3)。さらに、この変化を有機シンチレーターの電子に対する発光効率を表すクエンチングパラメータ k_B によって説明し、暗黒物質探索実験に利

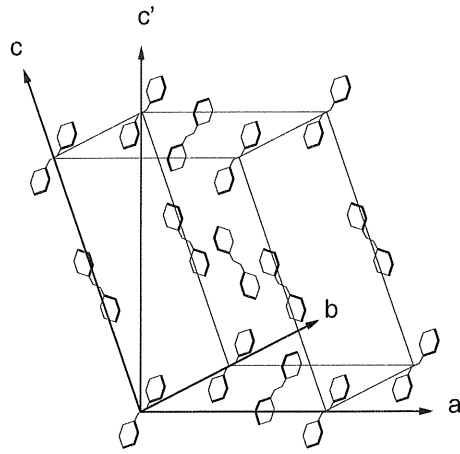


図 2: スチルベンの結晶構造

用できることを確認した。スチルベンを地球上に固定して置けば、自転により暗黒物質の風向きにあわせて、発光量が変化するはずである。

そして、2003年11月より、地下2700m.w.eの神岡地下実験室において、116gのスチルベンを用いて暗黒物質探索実験を行った。厳重に遮蔽した放射線シールドの中にスチルベン単結晶を設置し、発光量の観測を行った。

2003年12月までの観測で、発光量の変化をとらえることはできなかった。しかしこのことから、spherical isothermal halo modelを仮定し、陽子とneutralinoのスピンの依存しない相互作用に対する断面積 $\sigma_{\chi-p}^{\text{SI}}$ に対する上限値を得た(図4)。50GeVの質量をもつneutralinoに対してとして $\sigma_{\chi-p}^{\text{SI}}=5.6\text{pb}$ という上限値である。この結果は、暗黒物質の方向に関する特徴から求められた最初の制限である。116gという小質量で、バックグラウンドレートがまだ高いため、これまで行われた実験から得られている制限には及ばないものの、方向感度が暗黒物質を探索する上で有効であることを実証することができた。

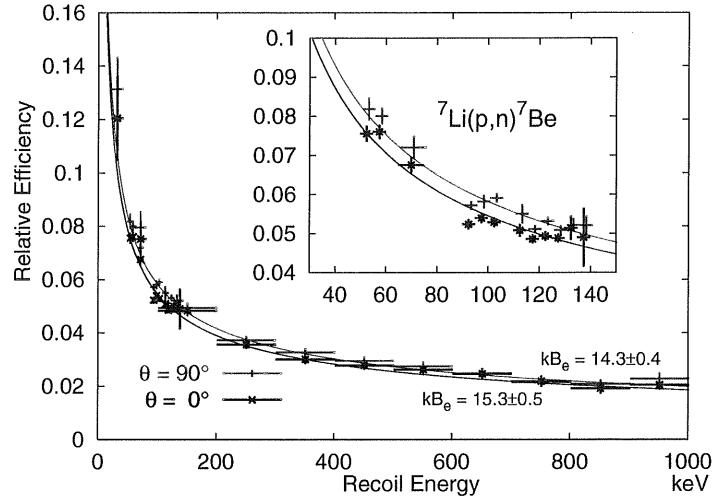


図 3: スチルベン中の炭素反跳の発光効率の変化. 結晶軸に対する角度 θ による発光効率の違いを、反跳エネルギーの関数として示してある。

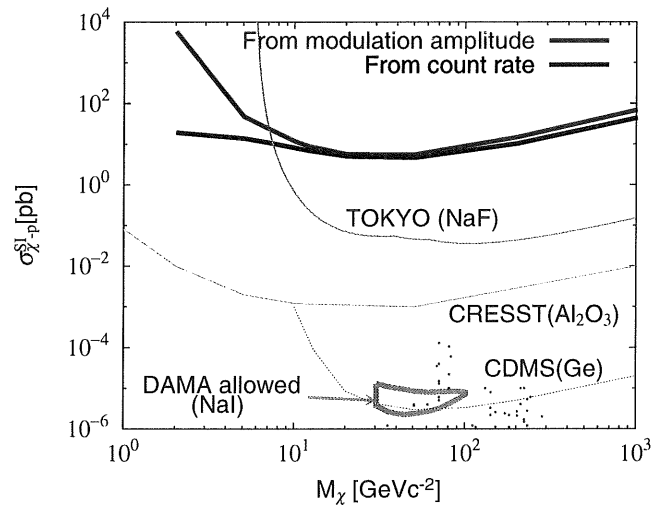


図 4: 陽子と neutralino のスピに依存しない相互作用に対する断面積 $\sigma_{\chi-p}^{\text{SI}}$ に対する上限値. 赤線が本実験により暗黒物質の方向に関する特徴から求められた制限.