

Direct Dark Matter Search

“CDMS II experiment”

Contents

- **Direct Dark Matter Search**
 - Dark Matter
 - Method
- **CDMS II experiment**
 - Detector & Setup
 - Data
 - Event Selection
 - B.G. estimation
 - Results

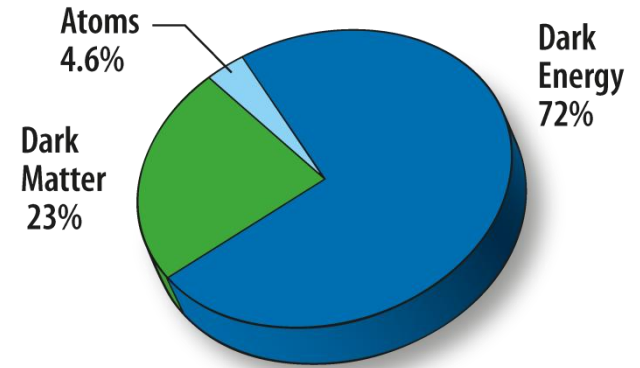


@ アメリカ、ミネソタ州スーダン鉱山

観測によるダークマター存在の示唆

WMAP の観測結果

- 宇宙を構成している物質の95%以上はまだ知らない。



銀河の回転速度

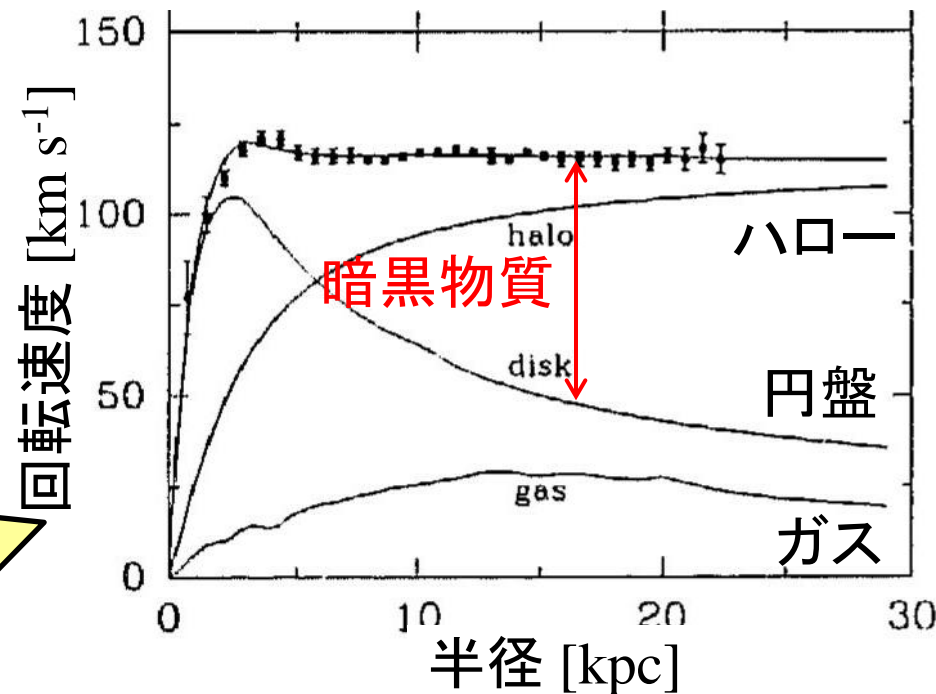
- “目に見える”物質分布から予測される銀河の回転が観測と一致しない。
 - ケプラーの法則

$$v^2 = G \frac{M(r)}{r}$$

半径によらず回転速度一定
→ 半径に比例して質量が増加

$$M(r) \propto r$$

→ 銀河の端にも物質がある？



ダークマターの候補

ニュートリノ

- 軽すぎる、速度が速い → 大規模構造ができない。

MACHO (Massive Compact Halo Object)

- 惑星サイズのブラックホール、中性子星など
- 重力レンズの観測により否定。

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)

- 中性である
 - 電磁相互作用をしない (見えない)
- バリオン (陽子・中性子) でない
 - 強い相互作用をしない
- 冷たい (非相対論的粒子)
 - 大規模構造ができる

→ WIMP がダークマターの有力候補である。

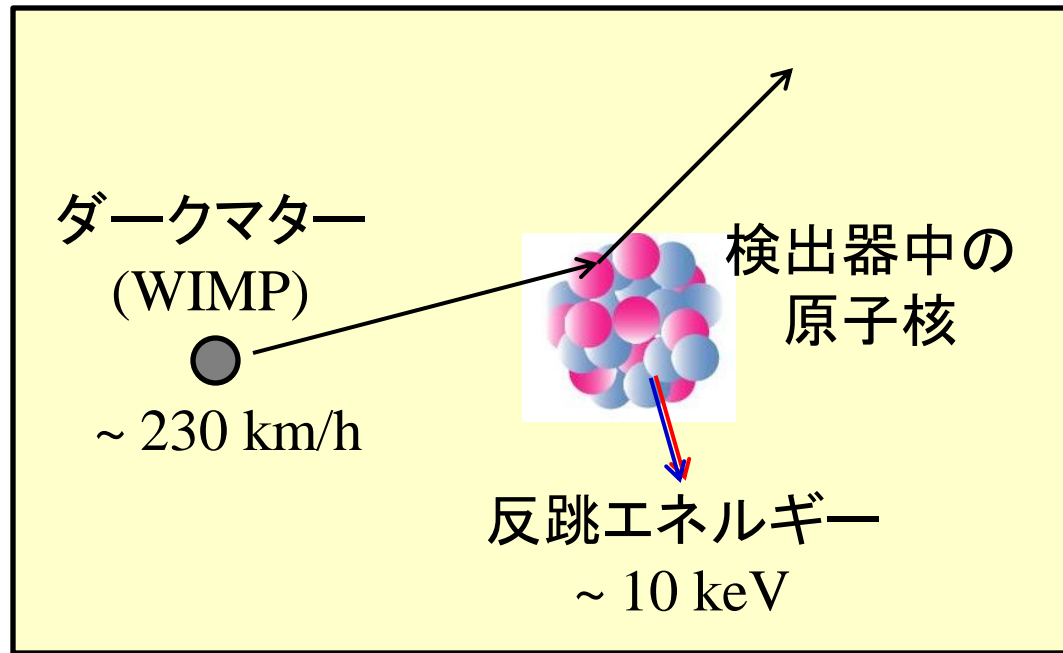


ダークマターの直接探索

探索方法

- 反跳原子核のエネルギーを測定する。
 - 光、電離、温度、(原子核飛跡)

CDMS ←

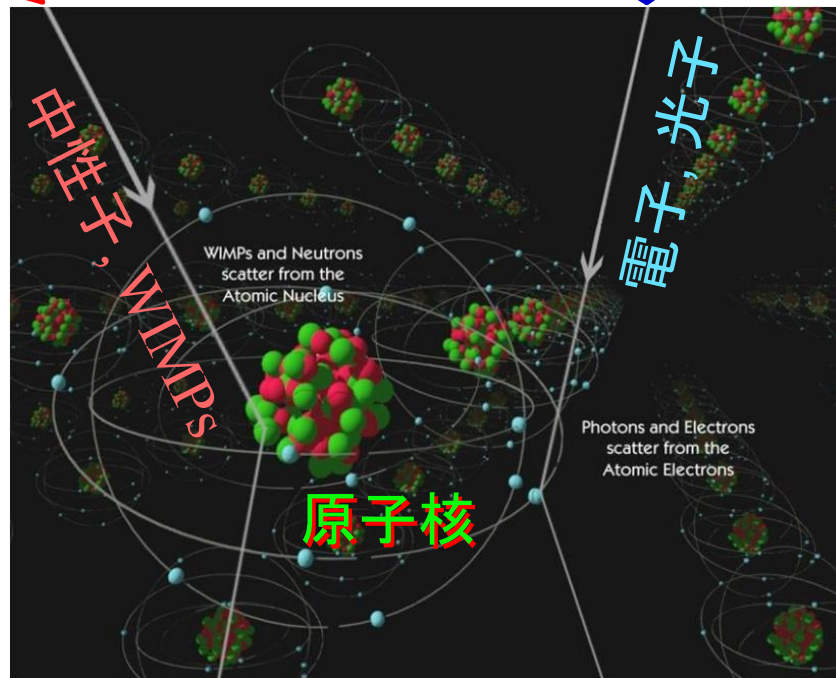


- イベントレートが少なく、反応が低エネルギー
→ 大容量検出器・低放射線B.G.・低エネルギー閾値

バックグラウンド

Signal
原子核反跳イベント
(Nuclear recoil event)

B.G.
電子反跳イベント
(Electron-recoil event)



→ 電子反跳イベントとの区別、中性子による原子核反跳イベントの抑制が重要！

CDMS II experiment

Cryogenic Dark Matter Search experiment

- 低温でのダークマター探索実験
- 場所
 - 1st stage : カリフォルニア州スタンフォードの地下深く (10.6 m)
 - 2nd stage : ミネソタ州スーダンのもっと地下深く (780 m, 2090 m.w.e)
 - ニュートロンB.G. が1/kg/day → 1/kg /year に減った。
 - 地表に比べて、muon flux を 5×10^4 分の1 に減らす。
- 反跳原子核のイオン化と音を同時測定。

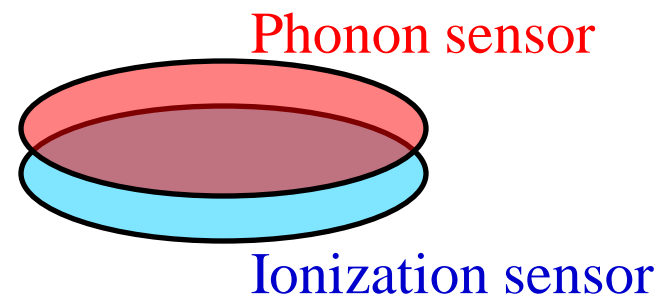
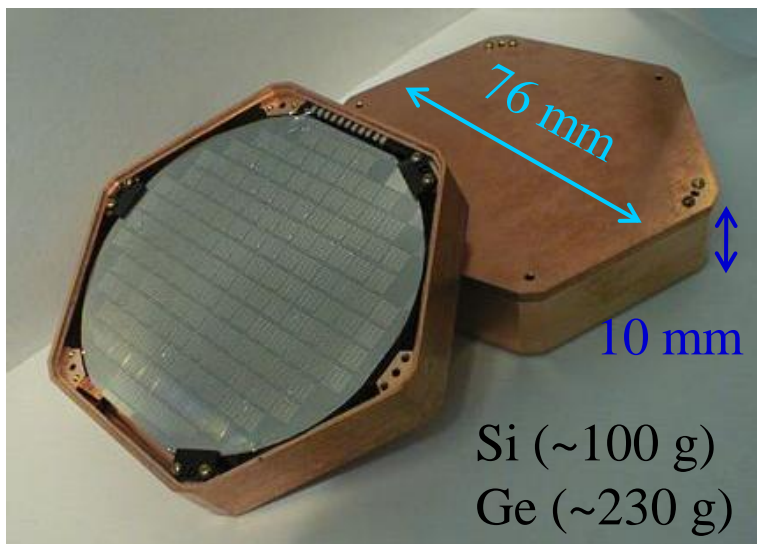
Meters water equivalent
2090 m の厚さの水の物質質量に相当
KamLAND は1000 m (2700 m.w.e)

検出器 (ZIP Detector)

Z-dependent Ionization- and Phonon-mediated Detector

反跳原子核のイオン化と音を同時測定することによりB.G. を除去。

- イオン化 (Ionization)
 - 反応で生じた電子・正孔ペアを測定する。
- 音 (Phonon)
 - Si, Ge の格子中の原子が衝突を受けて動き出すと、音(格子振動)が生じる。
 - 音を観測するため(格子振動を抑えるため)、低温に冷やす。



Ionization measurement (検出原理)

収集された電荷からイオン化エネルギーを測定する。

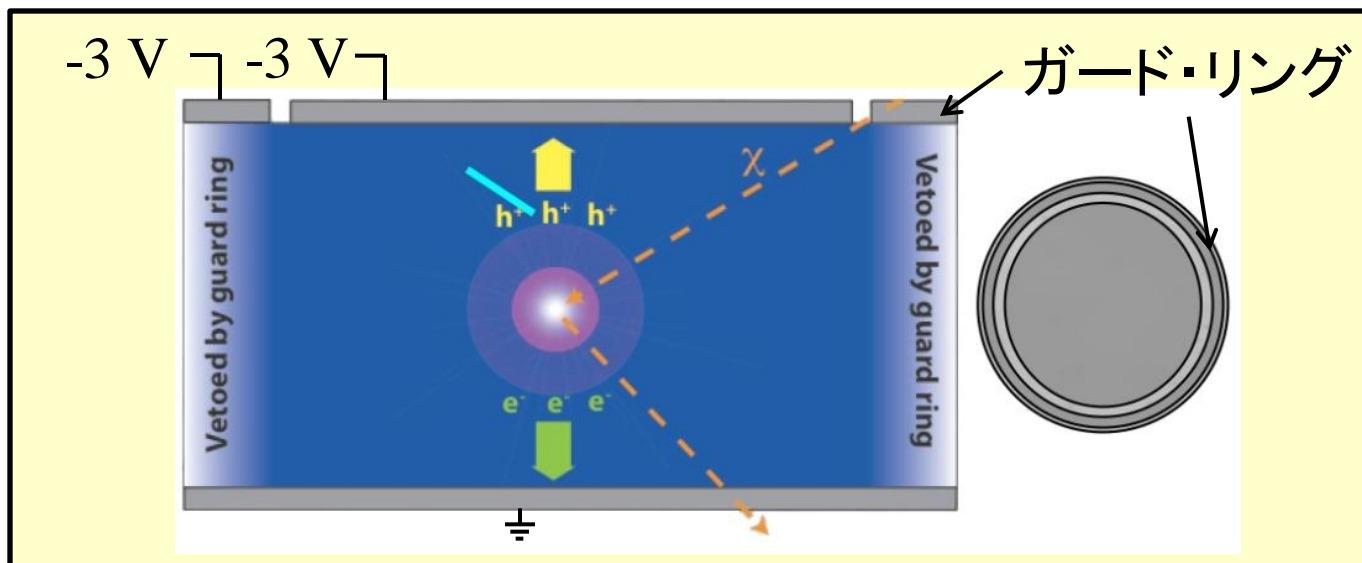
$$E_{\text{ionization}} = N_{\text{charge}} \times \varepsilon$$

↑
収集された電荷

← 電子・正孔ペアを生成するのに必要なエネルギー

($\varepsilon_{\text{Si}} = 3.8 \text{ eV}$)

($\varepsilon_{\text{Ge}} = 3.0 \text{ eV}$)



- ガード・リングによって、エッジ付近のイベントを排除。
 - 電場非一様性から電荷収集率低下の可能性。
 - Phonon sensor が完全に配置されていない領域。
 - Self-shielding がないので、B.G の反応が多い。

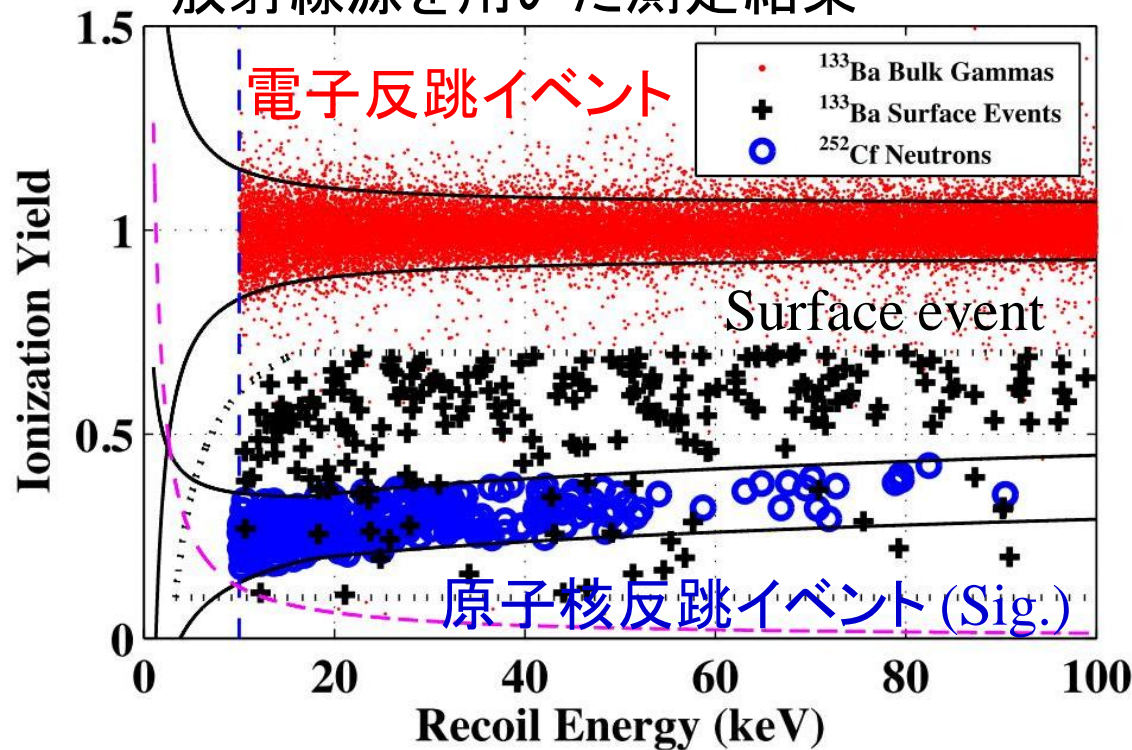
Ionization measurement (B.G. との分離方法)

B.G. を分離するための変数

$$\text{Ionization Yield} \equiv \frac{E_{\text{ionization}}}{E_{\text{recoil}}}$$

→ 1: 10⁴ 以上で電子反跳イベントを分離!

放射線源を用いた測定結果



→ 除去できないイベントは
“Surface event”

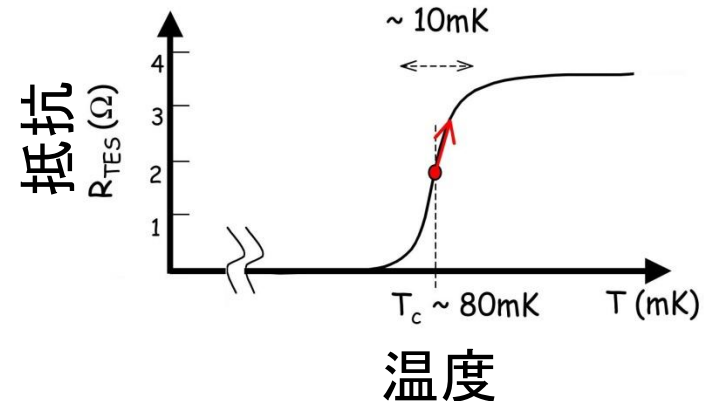
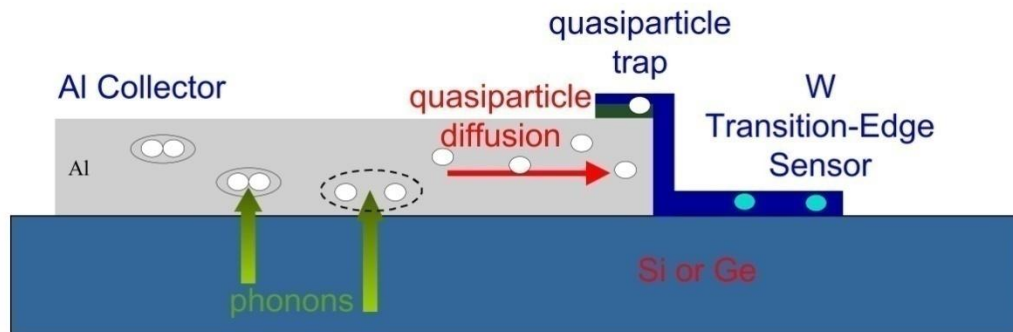
- 電極付近で起こる電子反跳イベント
- 電荷収集量が減り、シグナル領域に入ってくる。

(反跳エネルギーはフォノンエネルギーとイオン化エネルギーから導出できる)

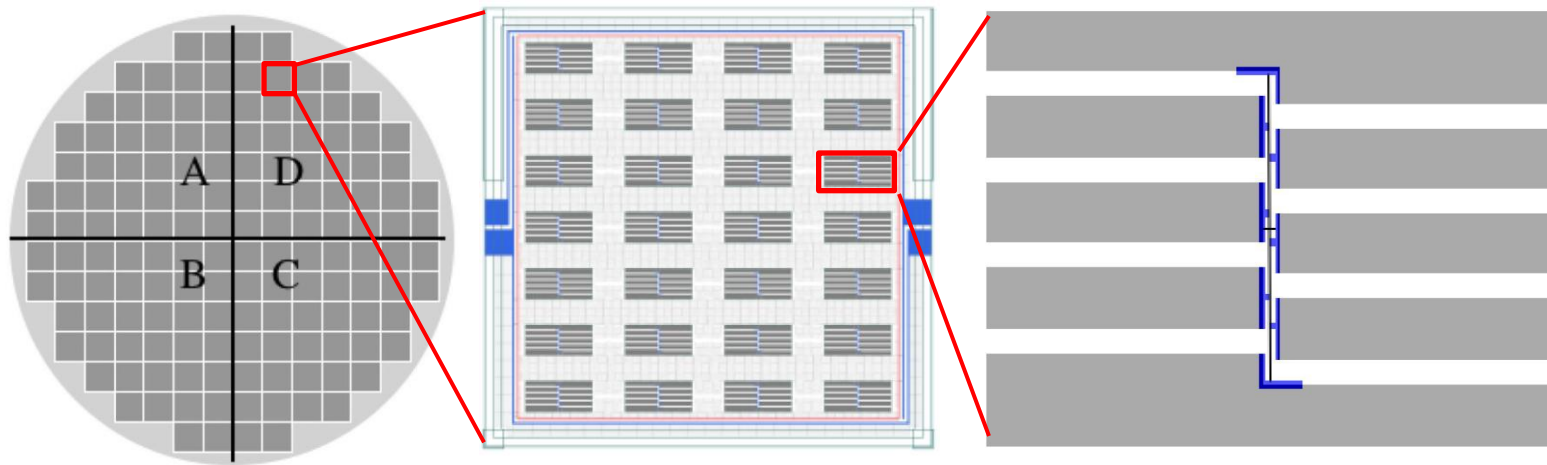
Phonon measurement (検出原理)

Wの超伝導/常電導転移を測定することで音(phonon)を検出する。

- 検出器は超伝導状態($T < 50$ mK)まで冷却されている。
 - 反跳反応で生じたSi or Ge中のフォノンがAlに衝突すると、Al中のクーパ対を分解してquasiparticleを生成する。
 - Quasiparticleが拡散してWに達すると、Wの温度上昇が起こる。
 - Wにはバイアスが掛けられており、超伝導状態から常電導状態に転移すると、電流量が変化する。
 - 超伝導量子干渉素子(SQUID)でWの電流をモニタしている。



Phonon measurement (検出器構造)



Quasiparticle-assisted
Electrothermal-feedback
Transition-edge
sensors

QETs

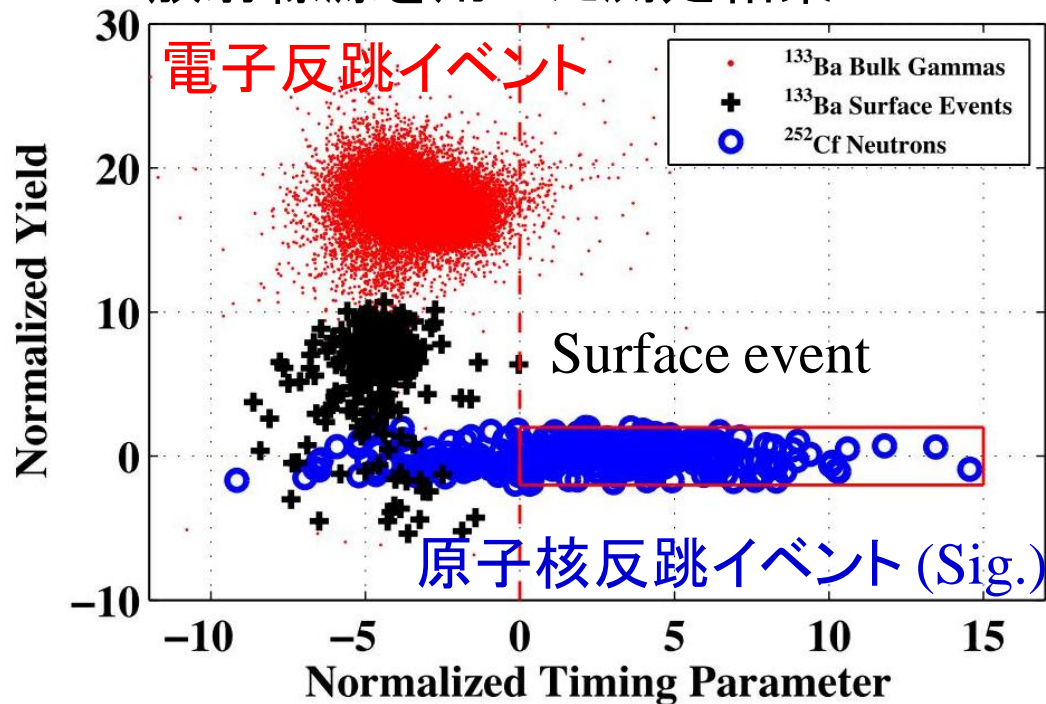
- 1 μm-wide strip of tungsten (35 nm thick)
- 8 個の superconducting aluminum collection fins
 - (300 nm thick, roughly 380 μm x 55 μm)
- Total : 4144 個

Phonon measurement (B.G. との分離方法)

フォノン波形の立ち上がり時間とタイミングから反跳のタイプを識別。

- フォノンの伝達速度の違いから差が生じる。

放射線源を用いた測定結果

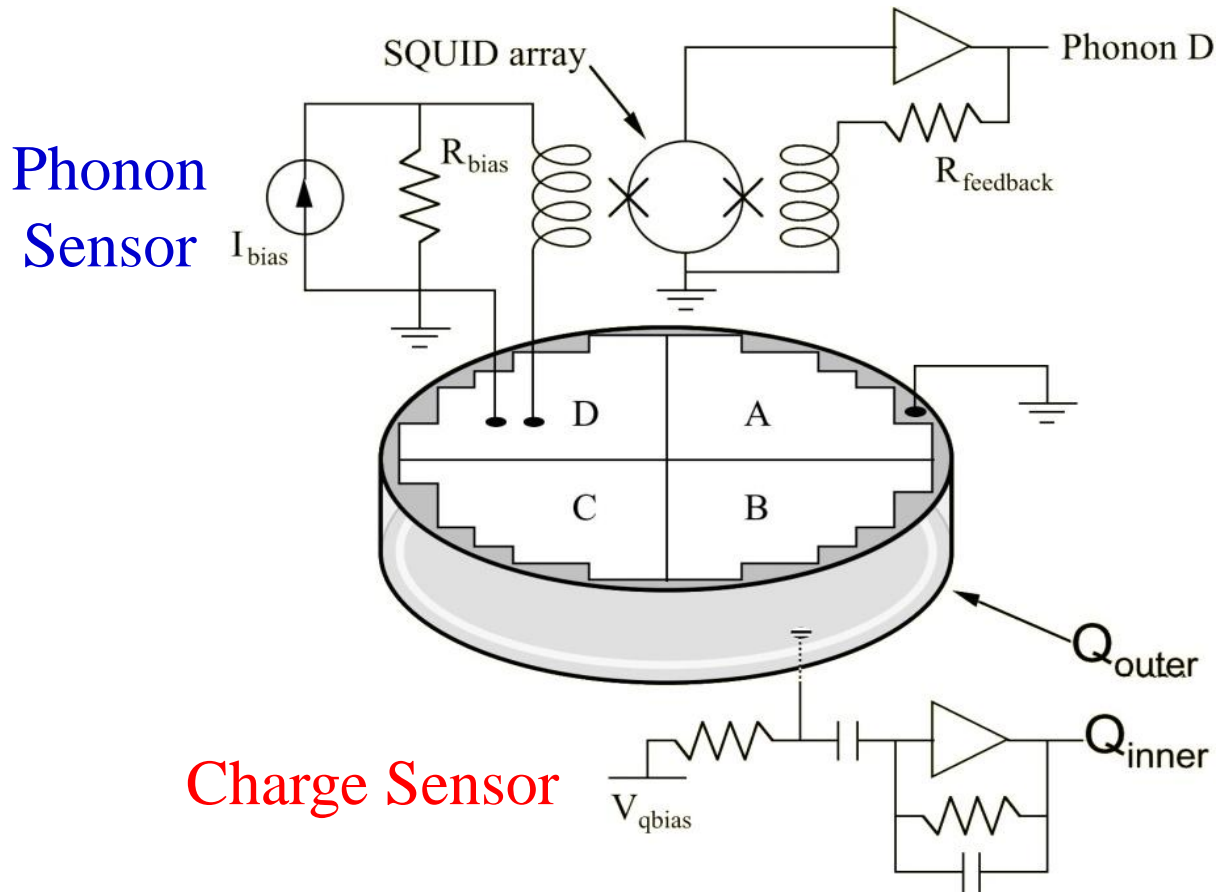


→ 電子反跳イベントの方が、早い

→ Surface event はさらに早い

→ Ionization Yield と合わせて、 $1 : 10^6$ で電子反跳イベントを分離。

検出器(まとめ)

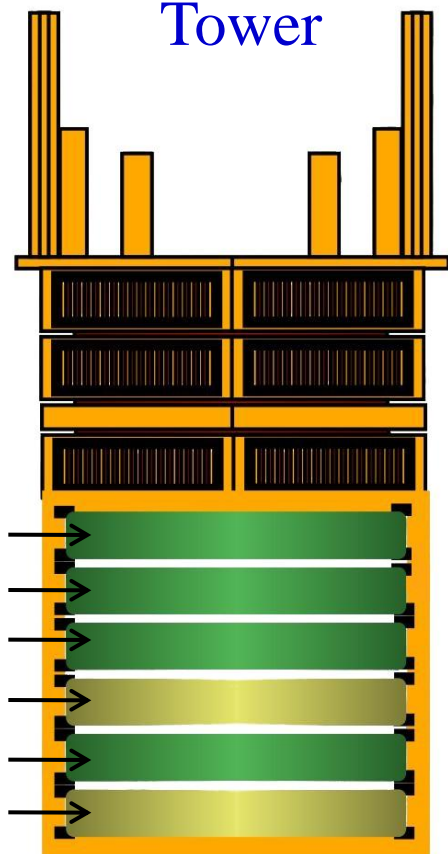


Towers Setup

- 6 ZIP detector/tower
- 5 tower
- 合計で30 個(19 Ge, 11 Si) のZIP detector

Tower

ZIP detector



Shielding

B.G. を抑制するために検出器をシールドしている。

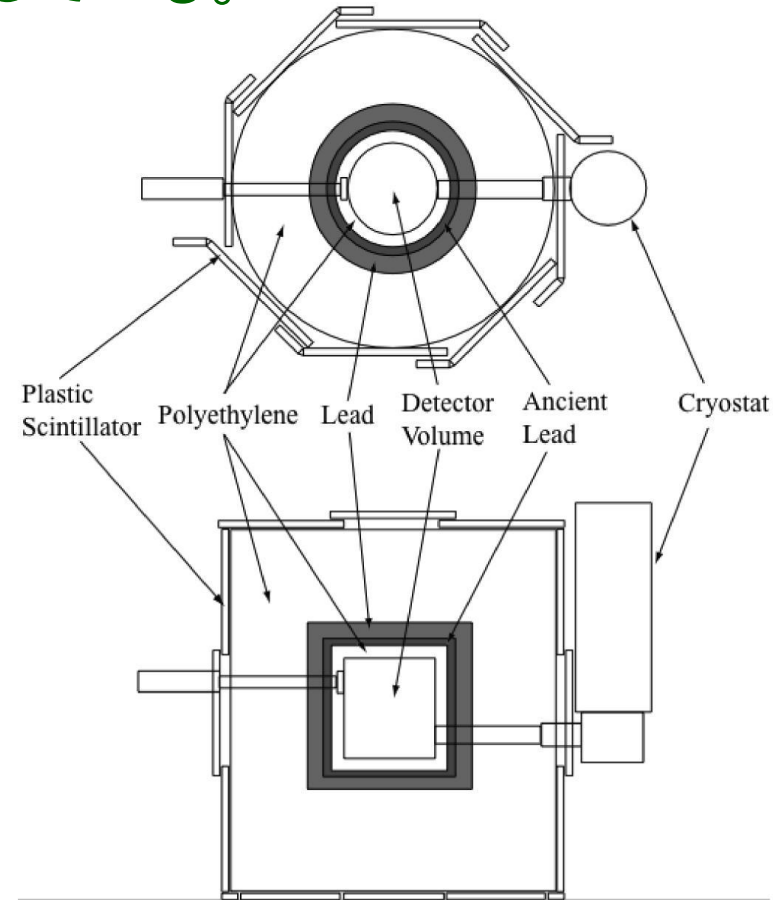
B.G. 源

- 宇宙線ミュオンから生じる中性子
- 周りの岩盤からの放射線
- シールド内の不純物からの放射線

シールド

- プラスチック・シンチレータ (muon veto)
 - ミュオンと光子を区別できる。
 - Muon : 10 MeV
 - High energy photon from radioactivity : 2.6 MeV
- ポリエチレン : 低エネルギーの中性子を抑制
- 鉛

→ B.G. 数の評価を行っている。

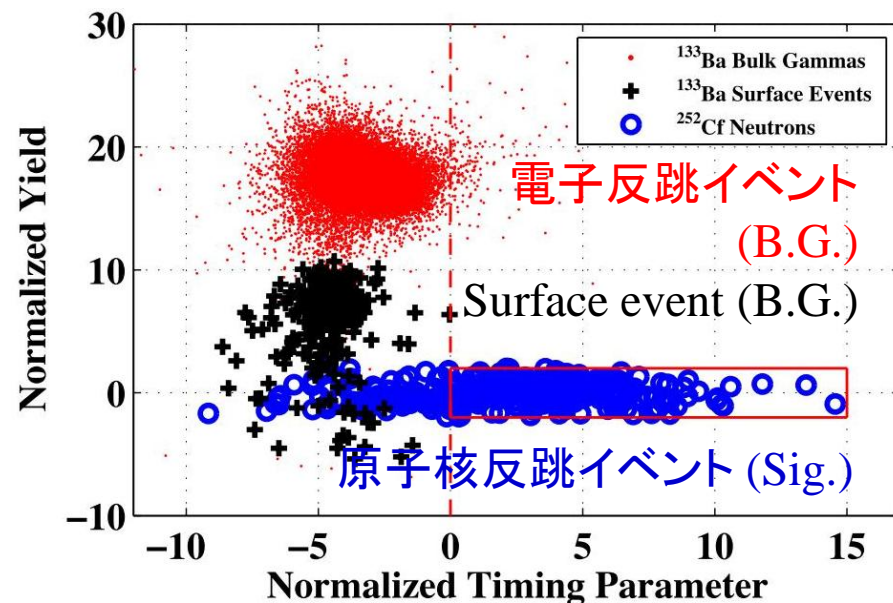
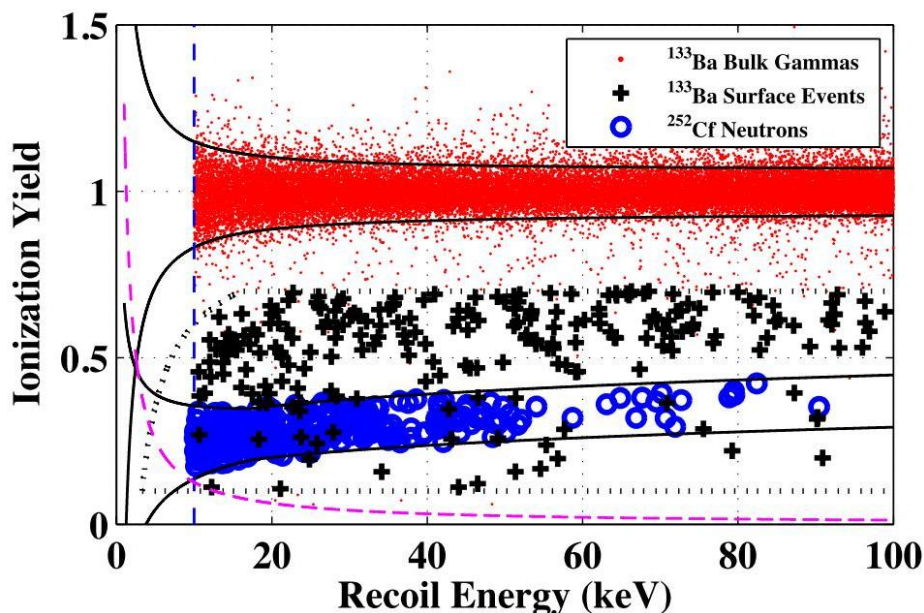


データ

- 2007年7月～2008年9月
- 4 period
- 30 detector (19 Ge, 11 Si)
- 5 tower
- WIMPs 探索にはGeのみ使用。
 - Lower sensitivity and coherent nuclear elastic scattering のため。
 - 反応を識別するのは全てのdetectorを使用。
- 5個のGeは不使用。
 - Poor performance or insufficient calibration data
- Total exposure : 612 kg-days

Event selection

- 原子核反跳イベントのIonization Yield から 2σ 以内。
- 電子反跳 イベントのIonization Yield から 3σ 以上離れている。
- 反跳エネルギーが10~100 keV。
- イオン化エネルギーがノイズの 4.5σ 以上。
- トリガーの $200\ \mu\text{s}$ 以内にシンチレータがなっていないこと。
- Surface event rejection cut (phonon pulse timing) を満たしていること。
- Multi-scatter event をveto
- In fiducial volume (Ionization でQouter に信号があるものをveto)



B.G. 評価 (中性子)

- 数MeV の中性子は(single-scatter) 原子核反跳イベントを生じさせるため、DM の反応と区別できない。
- 中性子の発生源
 - 宇宙線ミュオンが実験装置のそば(veto の外側)で反応する。
 - 放射汚染された物質、環境放射線
- 宇宙線ミュオンから生じるB.G. 数を評価した。

$$N_{\text{unvetoed, singleNR}}^{\text{data}} = \frac{N_{\text{unvetoed, singleNR}}^{\text{MC}}}{N_{\text{vetoed, singleNR}}^{\text{MC}}} \times N_{\text{vetoed, singleNR}}^{\text{data}} \times \varepsilon_{\text{neutron}}$$

MC Sim. (Geant 4 and FLUKA) で
Veto される割合を求めている。

→ $0.04_{-0.03}^{+0.04}(\text{stat})$

B.G. (RI contamination)

- シールド内の不純物からの放射線B.G.
(クライオスタット中のU が支配的)
→ 0.03 ~ 0.06
- 周りの岩盤からの放射線B.G.
→ 十分無視できる。

B.G. (Surface event)

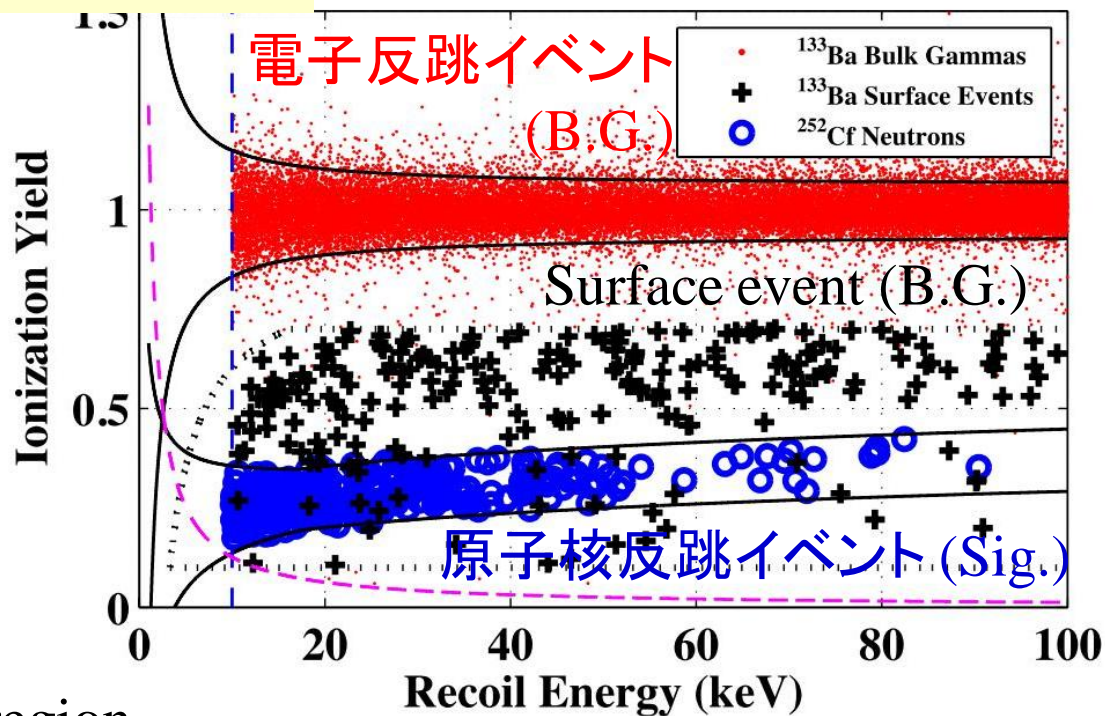
- シグナル領域に入ってくるSurface event の数を評価した。

$$N_{\text{passingcut}}^{\text{data}} = \frac{N_{\text{passingcut}}^{\text{sideband}}}{N_{\text{failingcut}}^{\text{sideband}}} \times N_{\text{failingcut}}^{\text{data}}$$

Side band でselection cut を通る割合を求めている。

Sideband

- multi-scatters
in NR band
- singles and multiples
just outside NR band
- singles and multiples
from Ba calibration in wide region

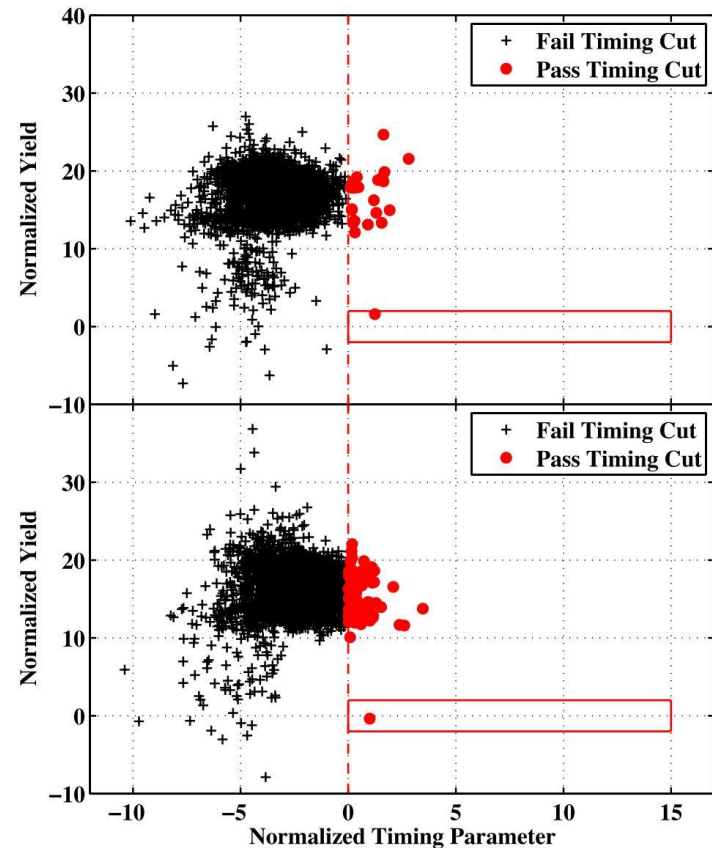
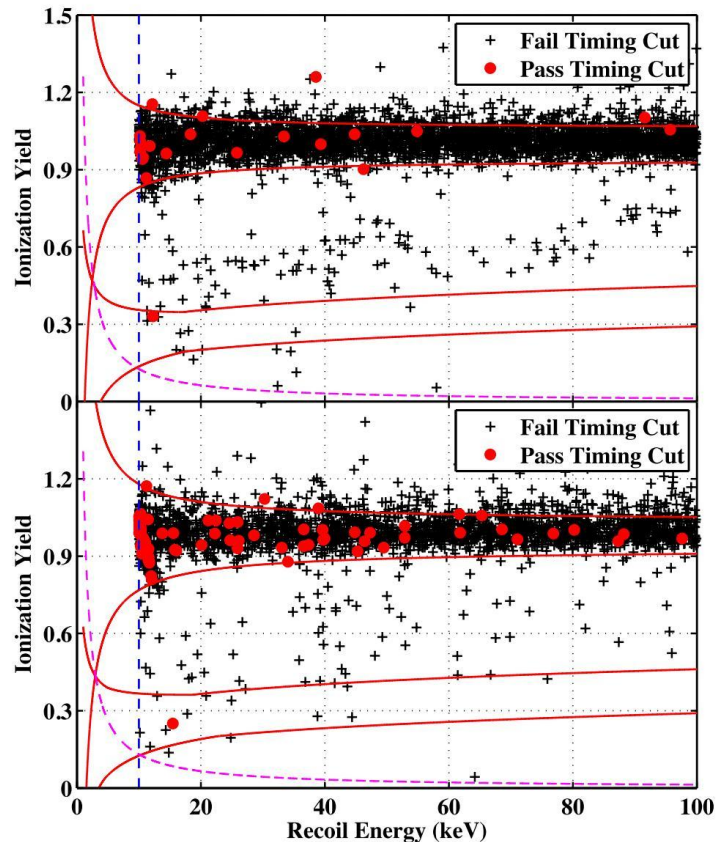


→ 0.6 ± 0.1 (stat)

- Revised estimation → 0.8 ± 0.1 (stat) ± 0.2 (syst)

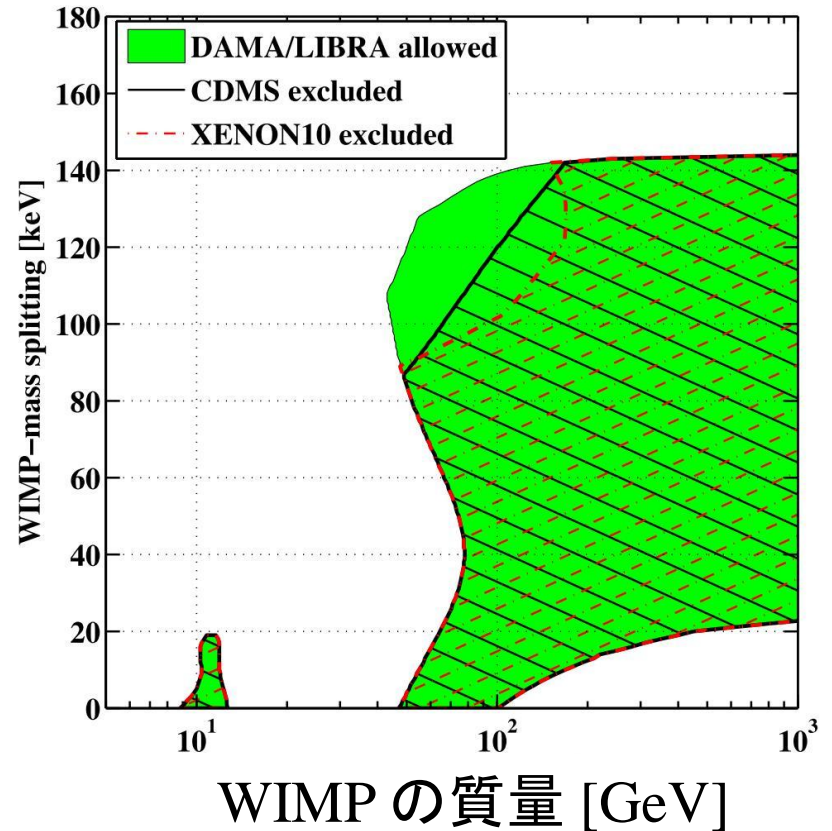
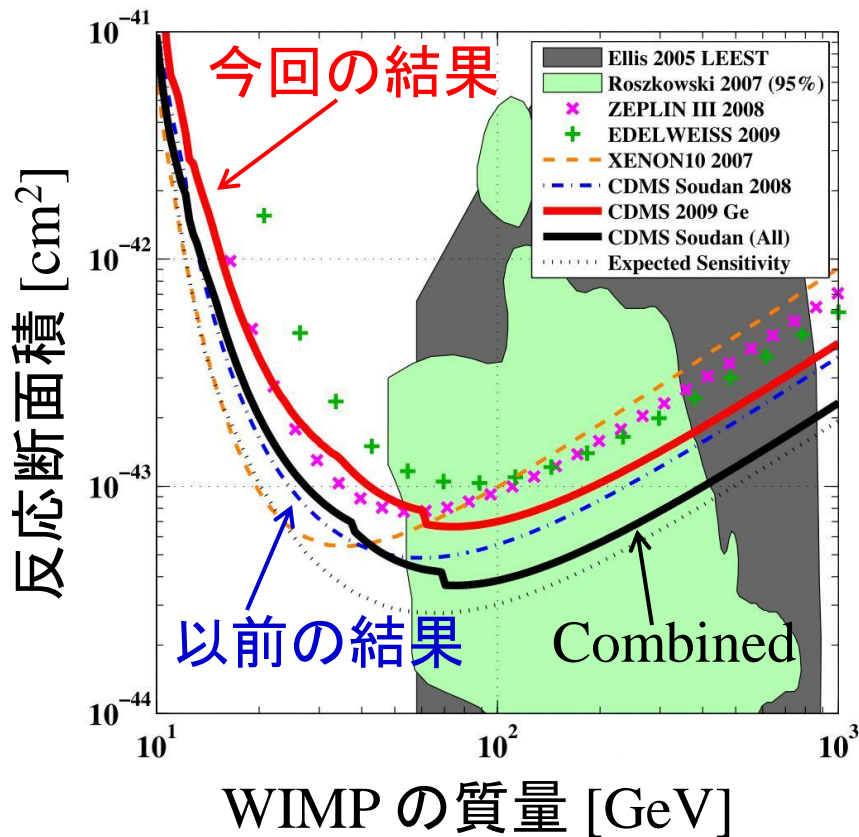
BOX open !

- シグナル領域に2 イベントを観測！
 - B.G. が2 イベント以上である確率は23 %
- WIMPs が反応した決定的な証拠とは言えない。
しかし、この2 イベントをカットすることもできない！



Upper limit

- スピンに依存しないWIMP-核子の反応断面積の上限值
 - $7.0 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ (WIMP の質量70 GeV を仮定)
 - $3.8 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ (今までのCDMS の結果と合わせて)



Backup

Ionization Measurement (back-up)

イオン化エネルギーを過小評価してしまう場合

- Poor space-charge neutralization within crystal
 - Flashing LED でneutralize しているが、それが不十分だと、そのimpurity cite でelectron or hole をtrap してしまう。
 - Flashing LED の光がelectron-hole pair を生成して、中性化する。
- Back diffusion (Electrode 周辺での反応)
 - 比較的弱い電場とinitial electron-hole cloud のself-shielding によって正しくないelectrode に流れてしまう。
 - Electrode とdetector surface の間にlightly doped amorphou silicon の層 (~40 nm) を作ることによって抑える。
 - Dead layer (10 um) 以内の反応がまだ残っており、これが問題となる。 → surface events

Phonon measurement (Back-up)

フォノンは2種類に分類される。

- 反跳によって生じるフォノン
 - High frequency
 - 音速の3分の1で伝わる。
- 電子・正孔のドリフトによって生じるフォノン
 - Low frequency
 - 音速で伝わる。
- 電子反跳イベントの方が多くの電子・正孔ペアが生成される。
→ 早く伝わるフォノンが多く生成されるので、早い立ち上がりになる。

反跳エネルギーの導出

$$E_{phonon} = E_{recoil} + V \frac{E_{ionization}}{\varepsilon}$$

ニュートラリーノと核子の相互作用

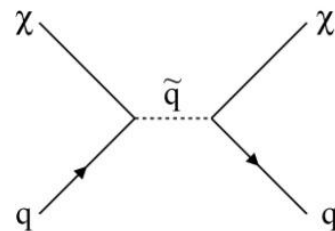
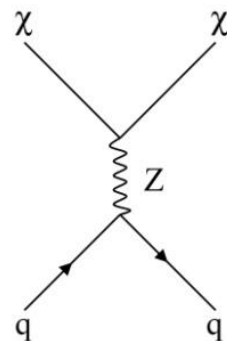
WIMP と原子核の散乱断面積はスピンの依存する項と依存しない項に分けられる。

Spin dependent (軸性ベクトル) 相互作用

- 原子核のスピンの結合した相互作用

$$\sigma_{SD} = 32 \frac{G_F^2 \mu^2}{\pi} (a_p \{S_{p(N)}\} + a_n \{S_{n(N)}\})^2 \frac{J+1}{J}$$

$$\mu \equiv \frac{M_\chi M_N}{M_\chi + M_N}$$

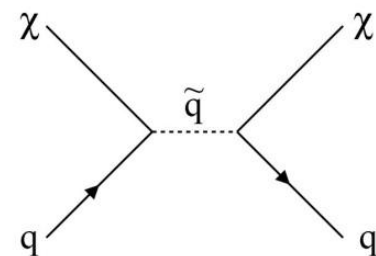
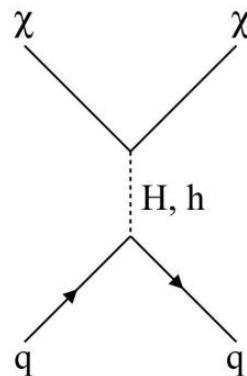


→ 対となっていない陽子・中性子の数が多い原子核が有利

Spin independent (スカラー) 相互作用

- 原子核の質量数に結合した相互作用

$$\sigma_{SI} = \frac{4\mu^2}{\pi} (Z f_p + (A - Z) f_n)^2 F^2(q)$$



→ 質量数が多い原子核が有利