

Search for Dark Matter from Galactic Halo with IceCube Neutrino Observatory

論文セミナー
2011年5月6日

東北大学 M2
釜井 大輔

もくじ

- ダークマター・WIMP
- Ice Cube ニュートリノ観測所
- 測定器・測定方法
- バックグラウンド
- シグナル期待値
- データセレクション
- 結果

ダークマターの存在

■ WMAPの観測

宇宙の96%は我々の知らない何か。

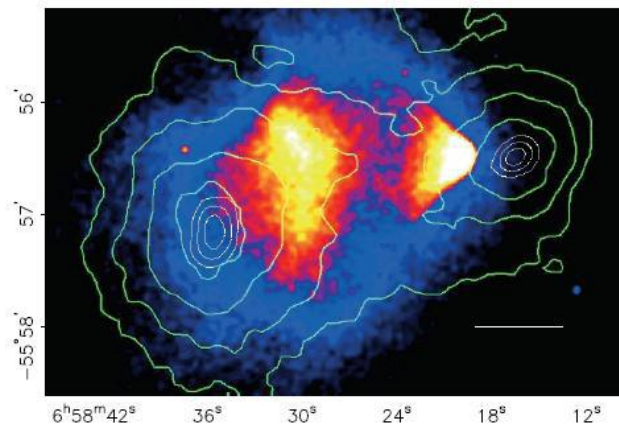
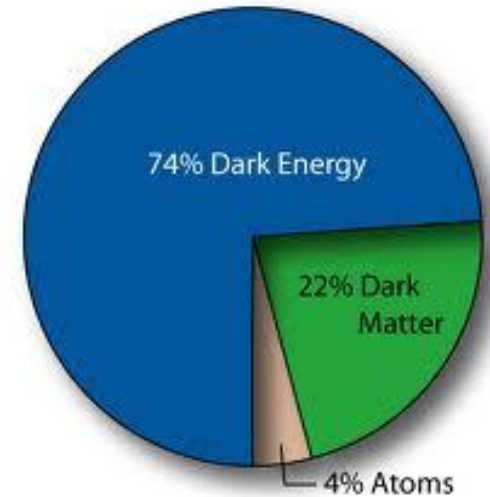
■ 銀河の回転速度

観測されている物質分布では、観測される銀河の回転が説明できない。

半径によらず回転速度が一定。

→ 銀河の端側に我々の知らない物質がある。

- 銀河クラスターの衝突の様子から、確かに通常の物質と違うほとんど重力しか感じない物質が存在するらしい証拠がある。



ダークマター候補

WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)

- 相互作用が弱い (弱い相互作用、重力のみと相互作用)
- 重い (数GeV ~ 数TeV)
- 候補
 - SUSY粒子 (最軽量のSUSY粒子(LSP))
 - Kaluza-Klein粒子
 - 最軽量のKK粒子(LKP)
 - 余剰次元モデル
 - Little Higgs (Heavy photon)

WIMPがダークマターの有力候補になっている

アクシオンなどの可能性もある。

WIMPの間接探索

- 重力レンズ・N体シミュレーションなどから天の川銀河でのダークマター分布は良く分かってきている。

銀河中に非一様な分布

- WIMPの自己消滅や崩壊によって高エネルギーニュートリノが生じると期待される。

自己消滅

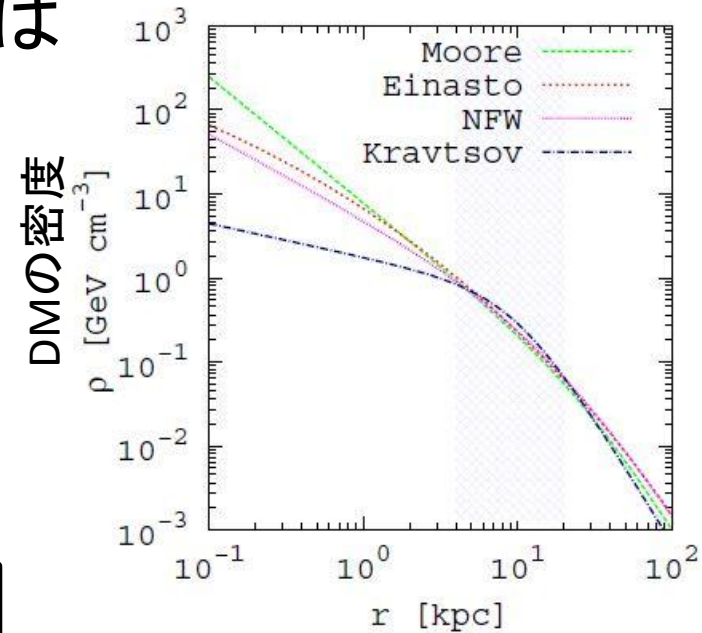
崩壊

$$\chi\chi \rightarrow qq, WW, \mu\mu \rightarrow \nu\nu$$

$$\chi\chi \rightarrow \nu\nu$$

$$\chi \rightarrow \mu\nu$$

- 宇宙からのニュートリノを観測すれば、観測量に異方性が生じると期待される。



銀河中心からの距離

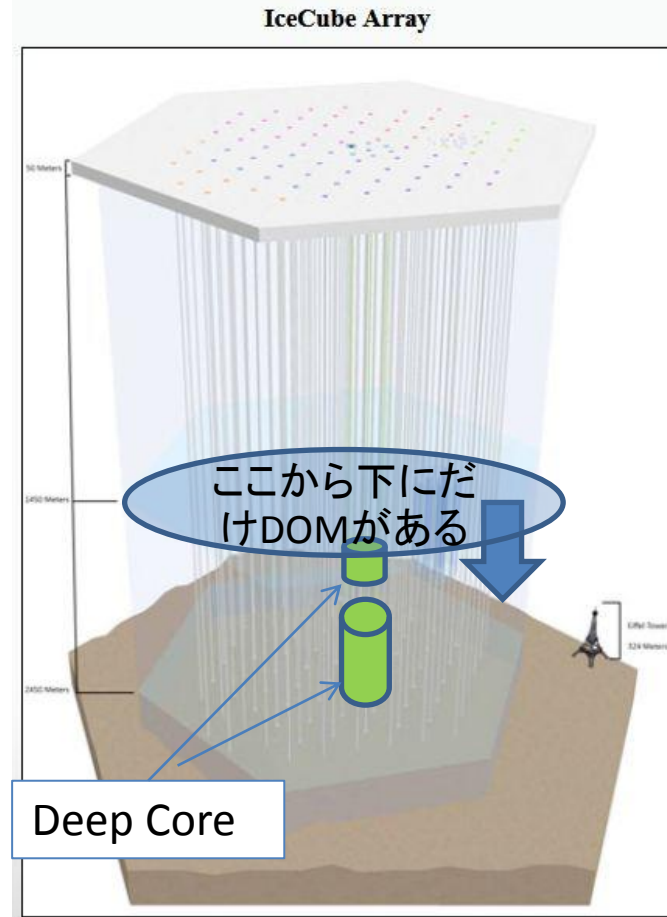
Ice Cube 観測所

Ice Cube ニュートリノ検出器

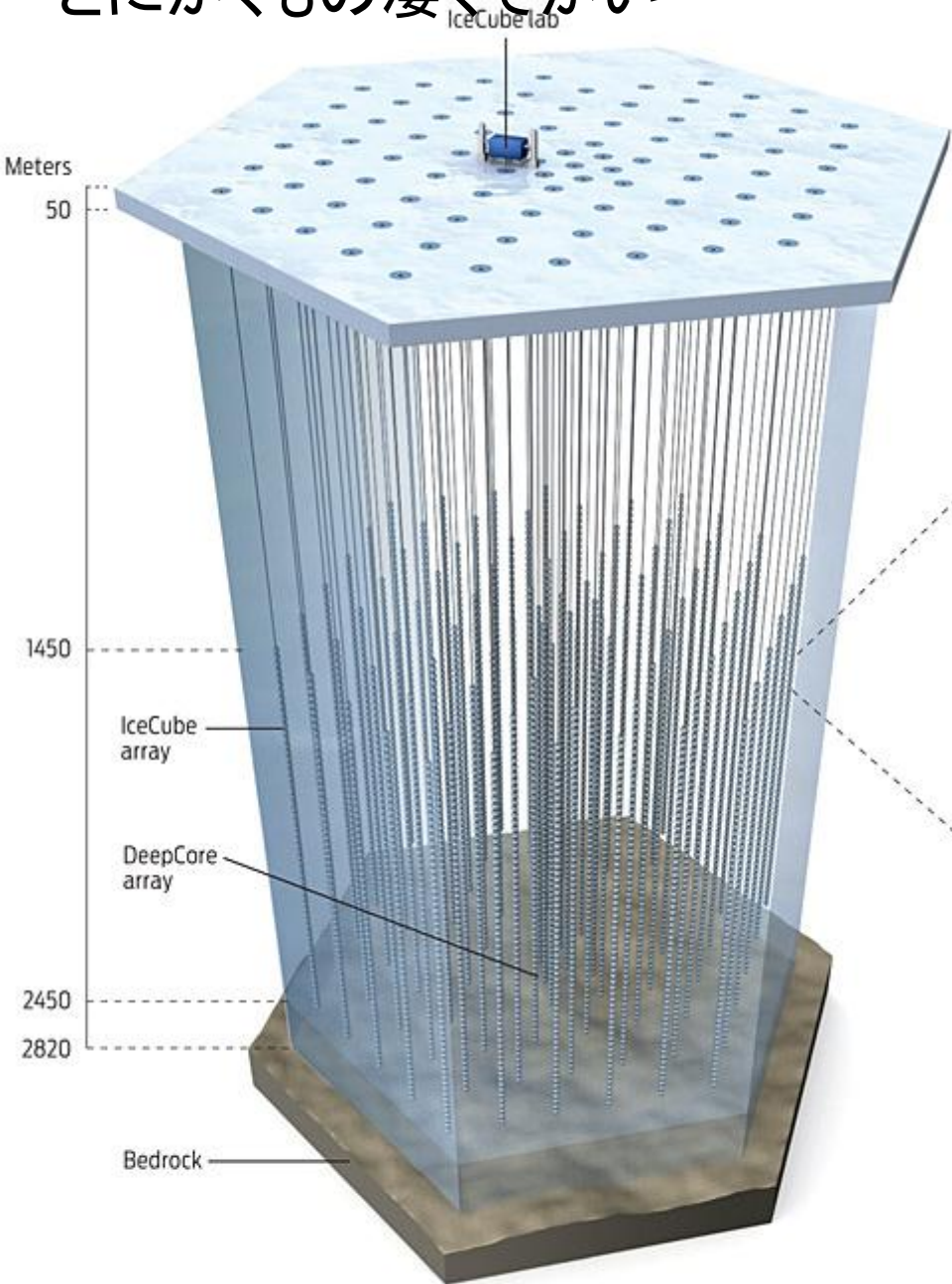
南極の氷を検出器として使った、世界最大(1km³)のニュートリノ観測施設

- 氷中でのチェレンコフ光を観測
- 86本のケーブルが地下2,450mまで伸びている。
- ケーブルの1,450m以下の部分にDOMが取り付けられる。(60DOM/String)
- 中心にケーブルの密度が高いところ(DeepCore)がある。

2010年12月に全ケーブルの設置が終了。

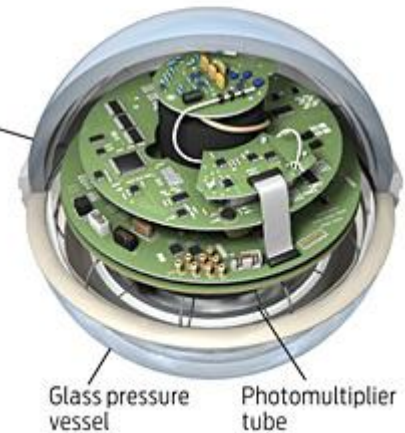
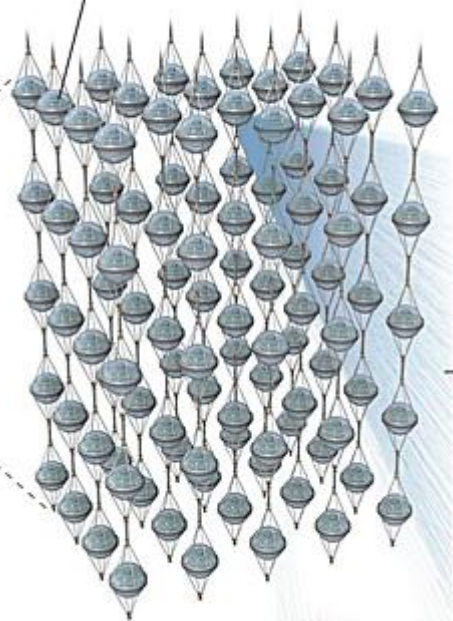


とにかくもの凄くでかい



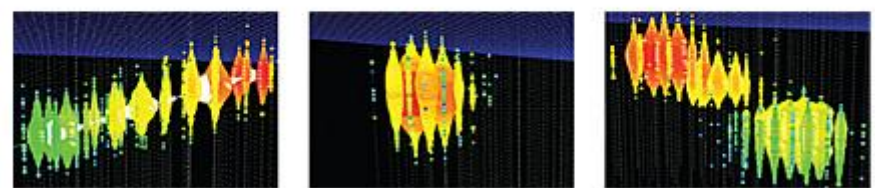
ELECTRONIC PEARLS: The digital optical modules used to sense the passage of neutrinos through the ice are encased in spherical pressure vessels made of borosilicate glass. They are attached to their suspending cables at 17-meter vertical intervals, from 1450 to 2450 meters' depth. After a string has been deployed and tested, the surrounding water (left over from drilling the hole) freezes the detectors in place.

Digital optical module



Cherenkov radiation

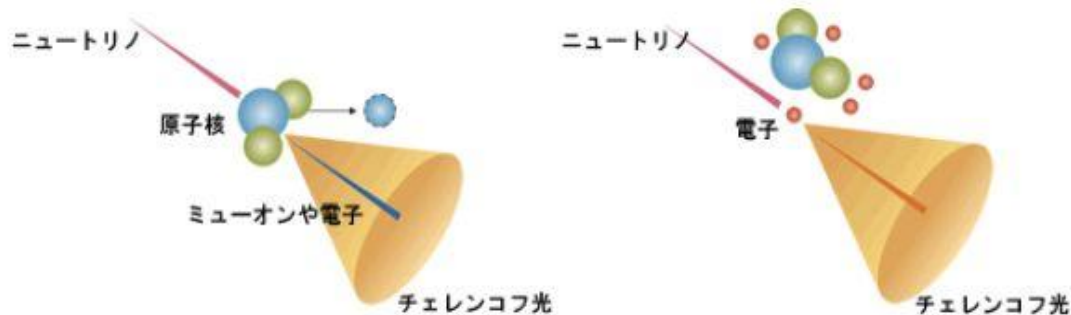
NEUTRINO FLAVORS: Simulations show that each of the three types of neutrinos will give rise to a distinctive optical signature when it passes through the IceCube array. The different colors shown here represent detections taking place at slightly different times.



検出器 (DOM)

DOM(Digital Optical Module)

- 浜松製のPMT
- 5ns の時間分解能
- PMTは下向きについている。
- 総数 5,160 個

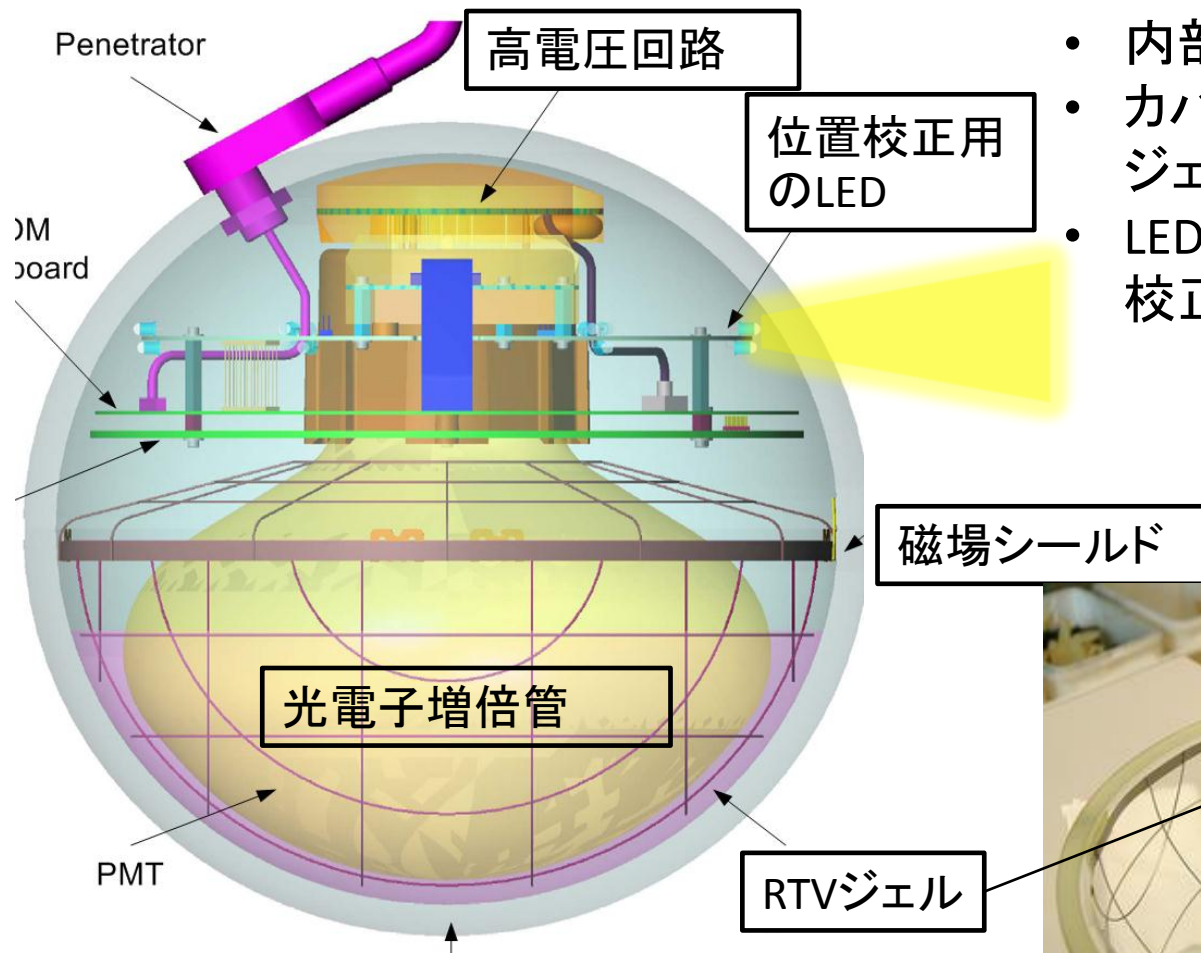


ニュートリノと氷との相互作用で生じた荷電粒子の出すチェレンコフ光をとらえる。

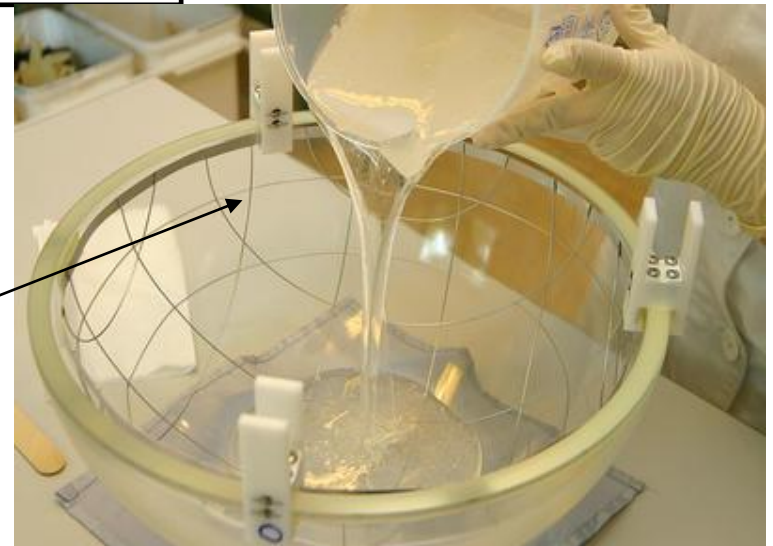


地上から降ろすのに半日かかる

検出器 (DOM) の中身



- 内部は真空
- カバーガラスとPMTの間はジェルで満たされている
- LED内臓で、各DOM同士位置校正が行える

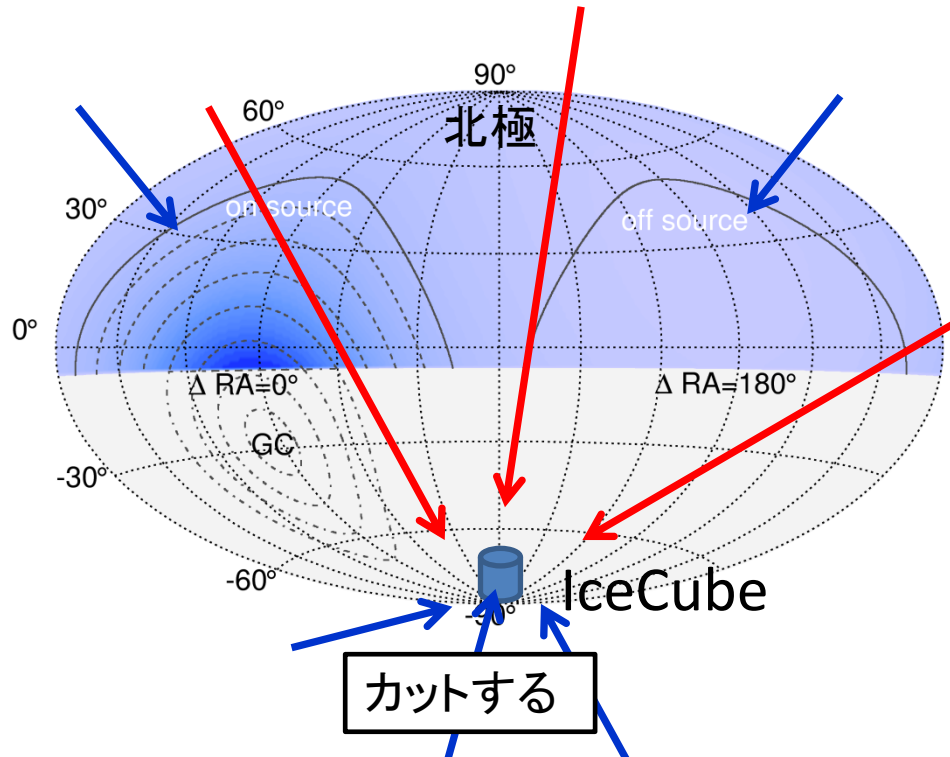


一つ一つ名前がついているらしい

バックグラウンド

宇宙線から生じる π , K などが崩壊してできる μ や ν_μ がバックグラウンドとなる。

これらを排除するため、
下方から来たニュートリノしか見ない

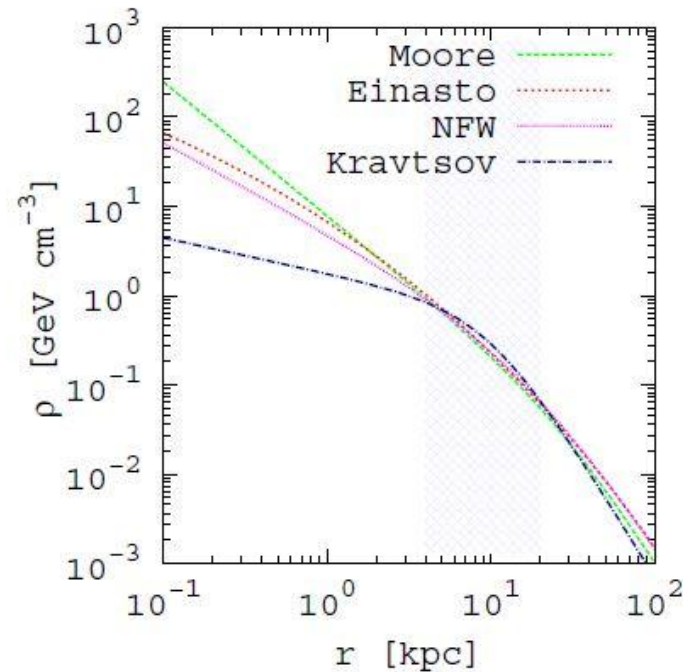


再構成したトラックが北緯85度～-5度を向いているもののみ選択する

シグナルの期待値(1)

■ DMハロープロフィール

銀河中心(GC)から数 kpc 以上はよくモデル化されている。
GC付近は直接観測できず、N体シミュレーションも解けない。



そのため各モデルでGC付近の分布が大きく違うが、北の空の一部(4kpc~20kpcあたり)しか解析に使わないので問題はない。

今回はEinastoとNFWモデルを使う。
(モデルで差が出そうなら他も考慮する)

シグナルの期待値(2)

■ 自己消滅からのニュートリノフラックス

– DMの密度の2乗を積分したものに比例

$$\phi_\nu \propto J(\psi) = \int_0^{l_{\max}} \frac{\rho^2(\sqrt{R_{\text{sc}}^2 - 2lR_{\text{sc}} \cos \psi + l^2})}{R_{\text{sc}} \rho_{\text{sc}}^2} dl$$

$$l_{\max} = \sqrt{(R_{\text{MW}}^2 - \sin^2 \psi R_{\text{sc}}^2)} + R_{\text{sc}} \cos \psi$$

R_{sc} : 14 kpc(GCからの太陽までの距離)

ψ : GCからの角距離

– 各チャンネルへの分岐比がそれぞれ100%と仮定して期待値を求めた。

– ニュートリノのエネルギースペクトルはDarkSUSYモデルで算出

自己消滅からの
ニュートリノフラックス
の期待値

$$\frac{d\phi_\nu}{dE} = \frac{\langle \sigma_A v \rangle}{2} J(\psi) \frac{R_{\text{sc}} \rho_{\text{sc}}^2}{4\pi m_\chi^2} \frac{dN_\nu}{dE}$$

シグナルの期待値(3)

■ 崩壊からのニュートリノフラックス

– DMの密度を積分したものに比例

$$\phi_\nu \propto J_d(\psi) = \int_0^{l_{\max}} \frac{\rho(\sqrt{R_{\text{sc}}^2 - 2lR_{\text{sc}} \cos \psi + l^2})}{R_{\text{sc}}\rho_{\text{sc}}} dl$$

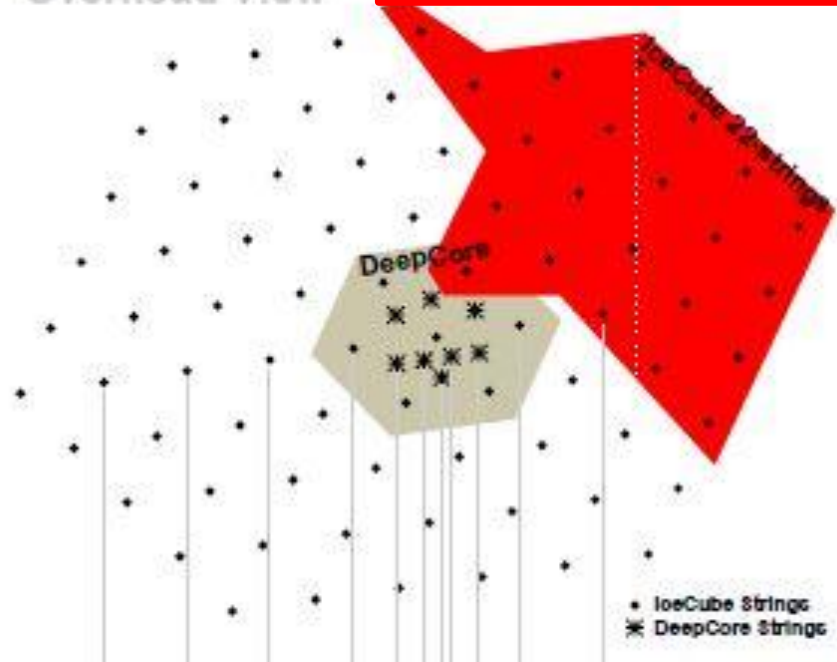
崩壊からの
ニュートリノフラックス
の期待値

$$\frac{d\phi_\nu}{dE} = \frac{1}{\tau} J_d(\psi) \frac{R_{\text{sc}}\rho_{\text{sc}}}{4\pi m_\chi} \frac{dN_\nu}{dE}$$

データ

- 2007年～2008年（275.7日）
- 22 – String のみ
- 1320 DOMs

Overhead View



赤い部分のデータのみ
使った

データセレクション

- 北緯85度～-5度からきたトラックのみ選択
- Likelihood functionによる選別
Purity ~90% で選別できる

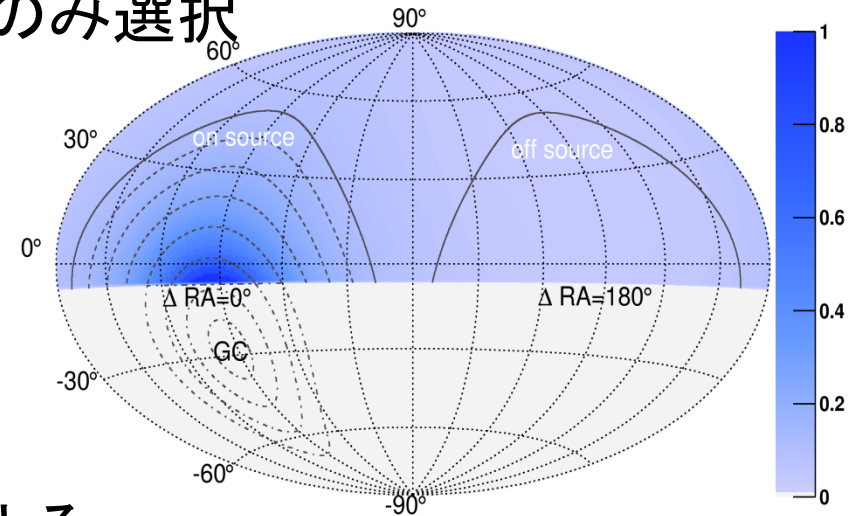
- 天球を2領域に分ける
 - 銀河中心 (GC) 側 (on-source)
 - 逆側 (off-source)

2方向からのイベント数の差をとる

$$\Delta N = (N_{\text{on}}^{\text{bkg}} + N_{\text{on}}^{\text{sig}}) - (N_{\text{off}}^{\text{bkg}} + N_{\text{off}}^{\text{sig}})$$

$$= N_{\text{on}}^{\text{sig}} - N_{\text{off}}^{\text{sig}} \quad \text{バックグラウンドは等方的}$$

$$= \Delta N^{\text{sig}} \quad \leftarrow \text{自己消滅断面積に比例する量}$$



シミュレーションからシグニフィカンスが最大となるように2領域の範囲を選択
→ GCから80度の領域をon-sourceとした

系統誤差

バックグラウンド数

1. 宇宙線由来の μ, ν の異方性
TIBET(北半球), IceCube(南半球)の観測から最大0.2 %
2. 検出器のアライメント
自転、公転の影響を考慮して、十分な時間のアライメントが必要
~0.1%

バックグラウンド数の系統誤差は0.3%

シグナル数

1. 氷の光学特性
2. シミュレーションにおける限界
あわせて30%の系統誤差

トラックの位置の誤差
トラック再構成効率
岩盤の影響
などはこれに比べて無視できる

統計誤差

- Monte Carloシミュレーションで見積もった各チャンネルの統計誤差
 - DM質量が数TeV
 - 3～6% (hard channel)
 - 4～16% (soft channel)
 - DM質量が200 GeV
 - 50% (hard channel)
 - 90% (soft channel)

観測結果

■ 観測されたニュートリノイベント

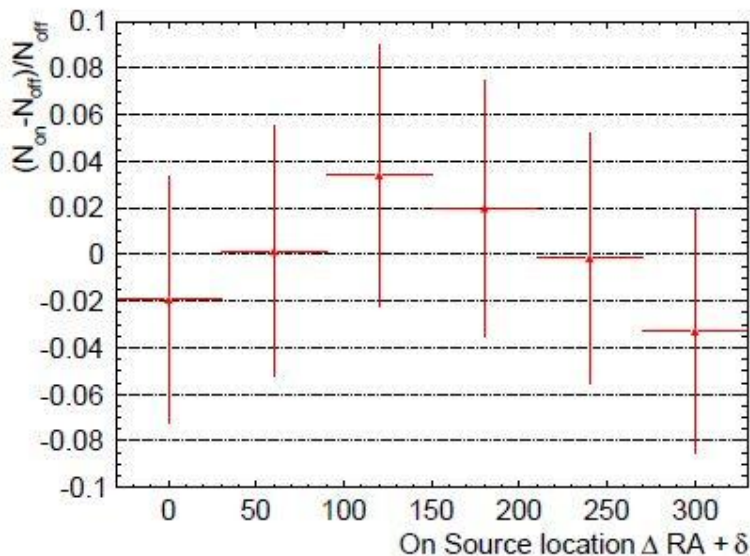
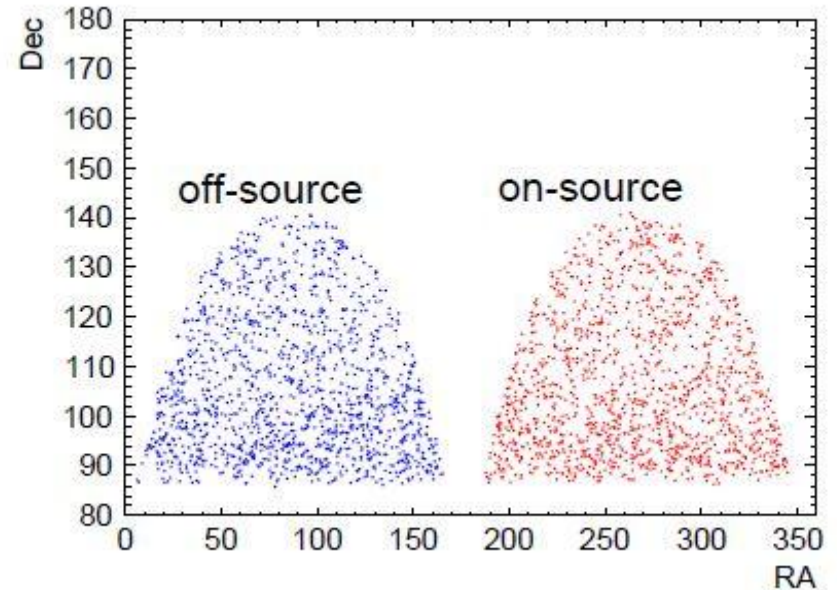
On-source : 1367イベント

Off-source : 1389イベント

$\pm 4(\text{sys}) \pm 37(\text{stat})$

異方性は全く見られない！

60度ずつ on-, off-sourceの位置
をずらして調べてみても

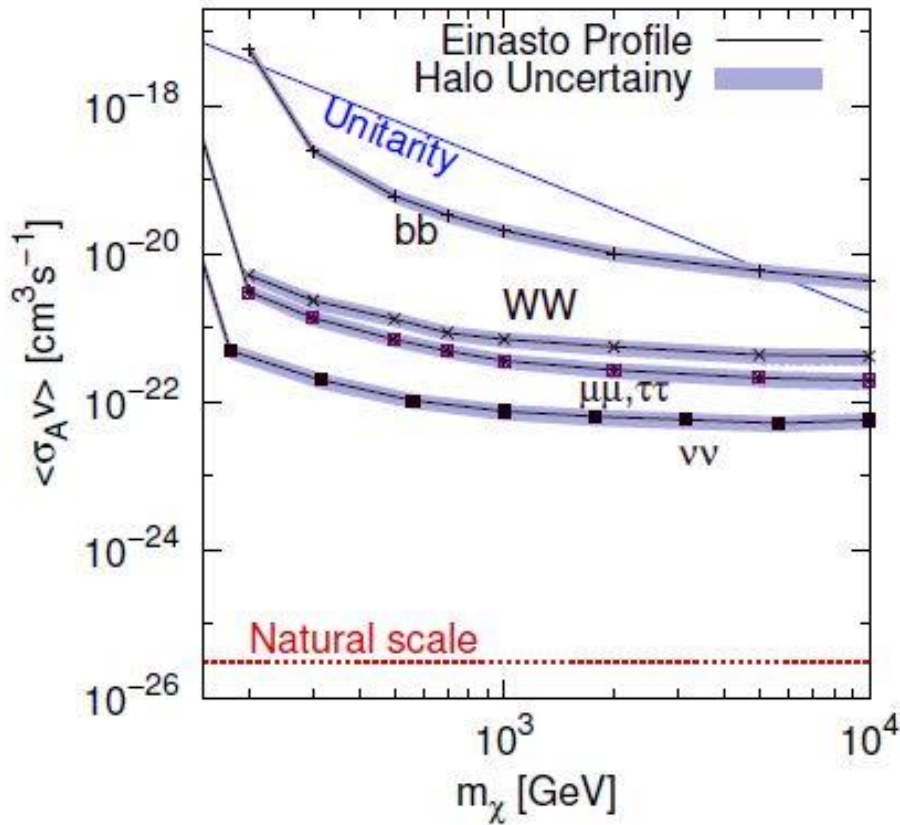


有意な異方性は
見られなかった...

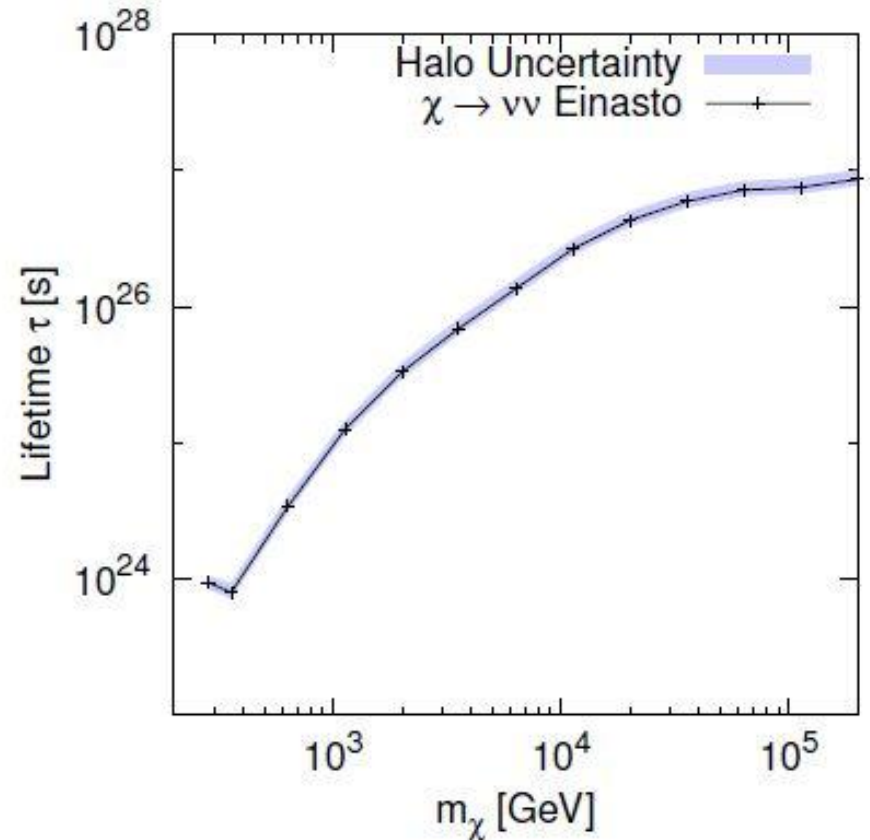
自己消滅断面積・寿命のリミット

以上の結果から、

WIMPの自己消滅断面積の上限

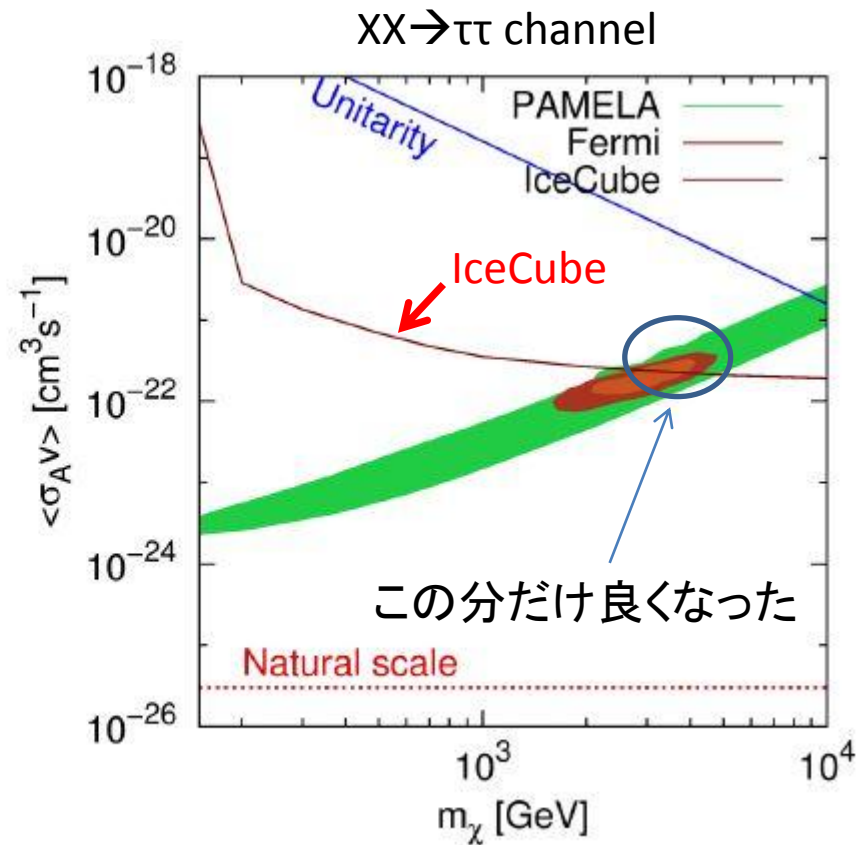
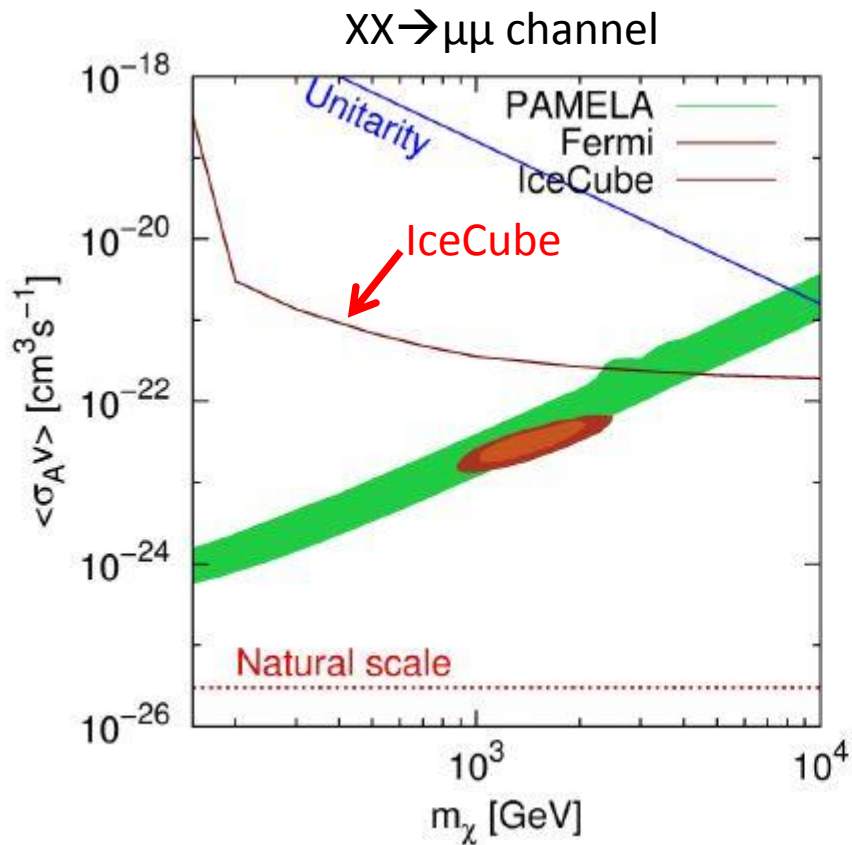


WIMPの寿命の下限



他の実験との比較

- PAMELA, Fermi での陽電子の測定によるリミットと比較
チャンネルごとの自己消滅断面積のリミット



22-string, 277日での少ないデータセットでも
今までのモデルに制限を与えることができた！