

WIMP対消滅からの ニュートリノ探索

名古屋大学太陽地球環境研究所/

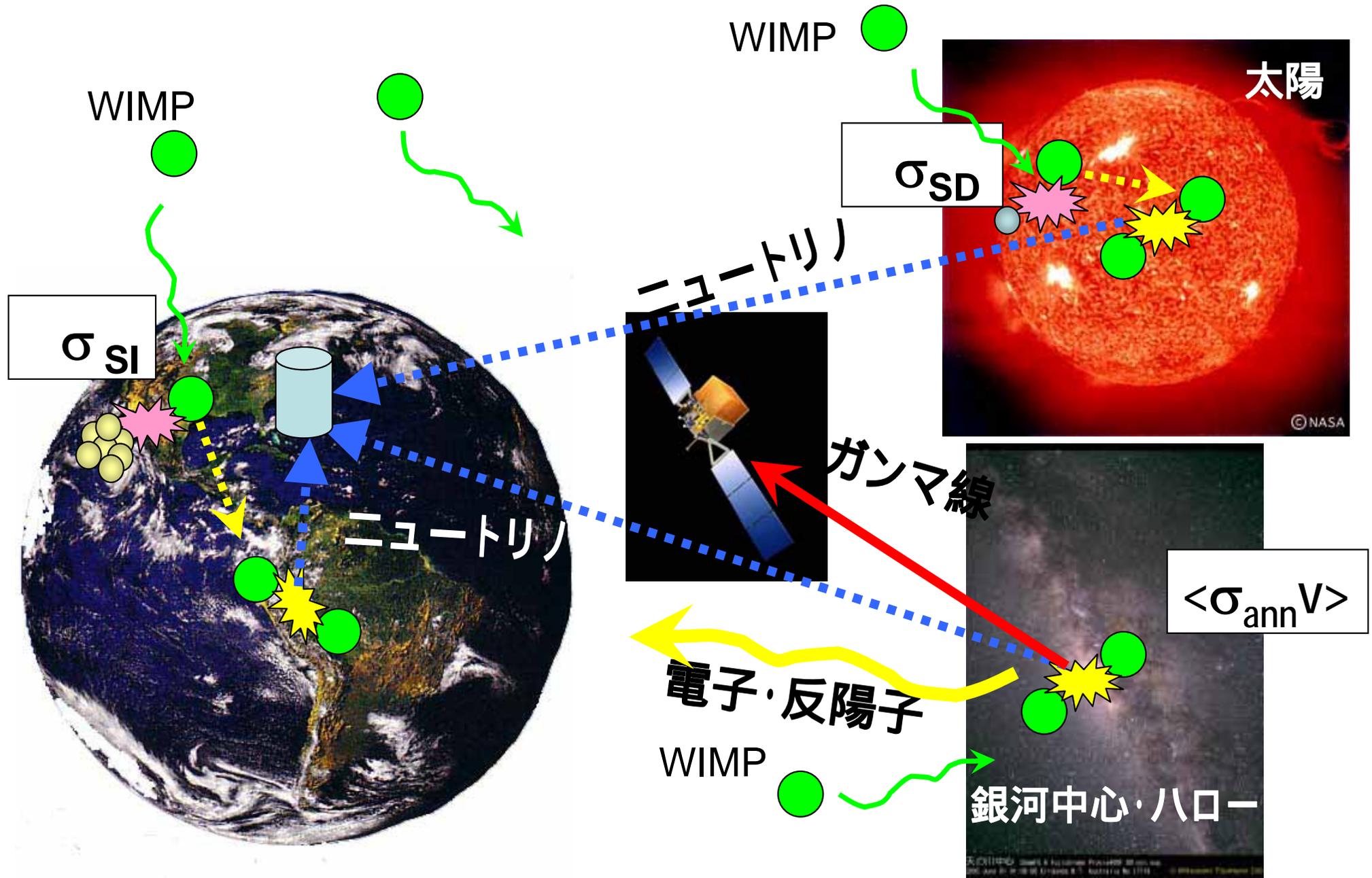
素粒子宇宙起源研究機構

伊藤好孝



太陽、地球、銀河に捕まった

● WIMP消滅からのニュートリノ探索



対消滅ニュートリノによるWIMP間接探索

- ニュートリノの生成と伝搬には不定性は少ない
 - 強い透過力(太陽コア ~100g/cc 以外)
 - ニュートリノ振動の影響は考慮($\nu_\mu:\nu_e:\nu_\tau=1:1:1$)
- バックグラウンドは大気ニュートリノのみ
 - 詳細に調べられている
- 太陽・地球に捕獲されたWIMP
 - WIMP - 核子散乱断面積に感度
- 問題: 検出が難しい、統計が少ない
 - 超大型検出器が必要、Neutrino telescopes

Galactic WIMP neutrinos

Measure Flux

$$\frac{d\Phi}{dE}(E, \phi, \theta)$$

=

Particle Physics

$$\frac{1}{4\pi} \frac{\langle \sigma_A v \rangle}{2m_\chi^2} \Sigma_f \frac{dN}{dE} B_f$$

Dark Matter Distribution

x

$$\int_{\Delta\Omega(\phi, \theta)} d\Omega' \int_{\text{los}} \rho^2(r(l, \phi')) dl(r, \phi')$$

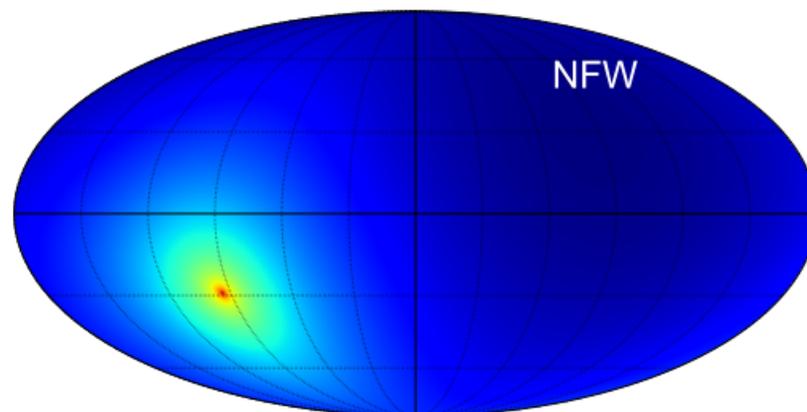
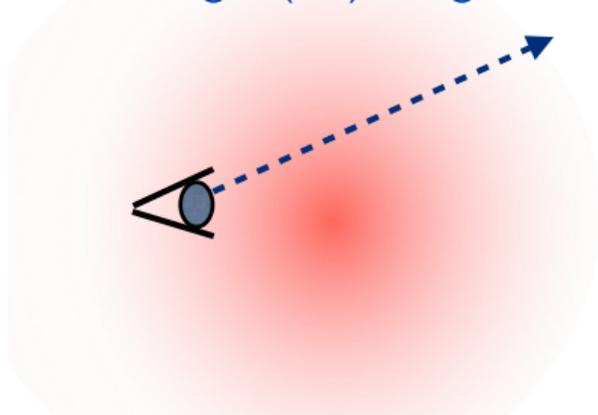
(equatorial coordinates)

up

NFW

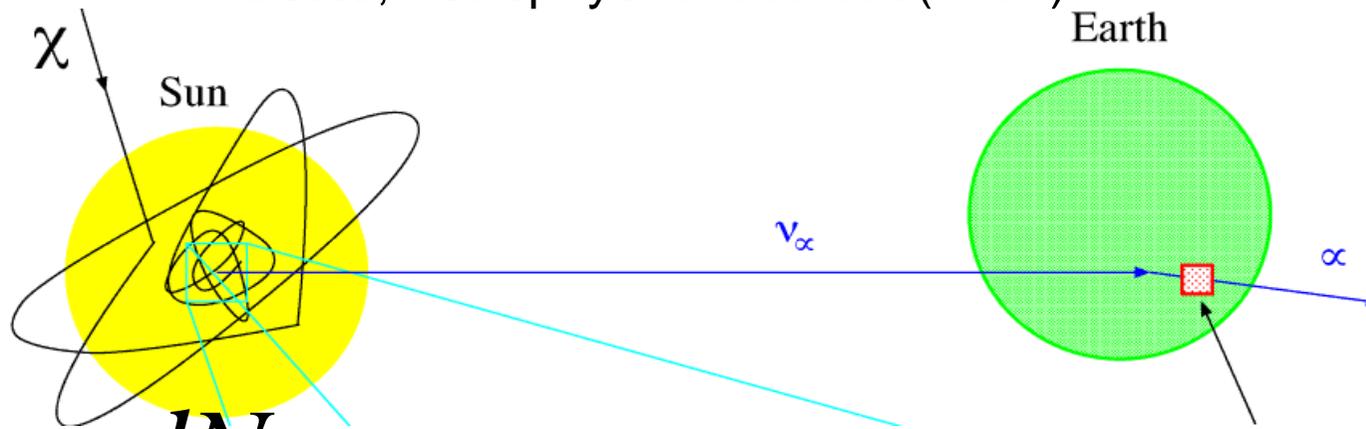
down

line of sight (los) integral



WIMP neutrino capture rate in Sun

A.Gould, Astrophys. J. 388 338(1992)



$$\frac{dN}{dt} = C - C_A N^2 - C_E N$$

capture

annihilation

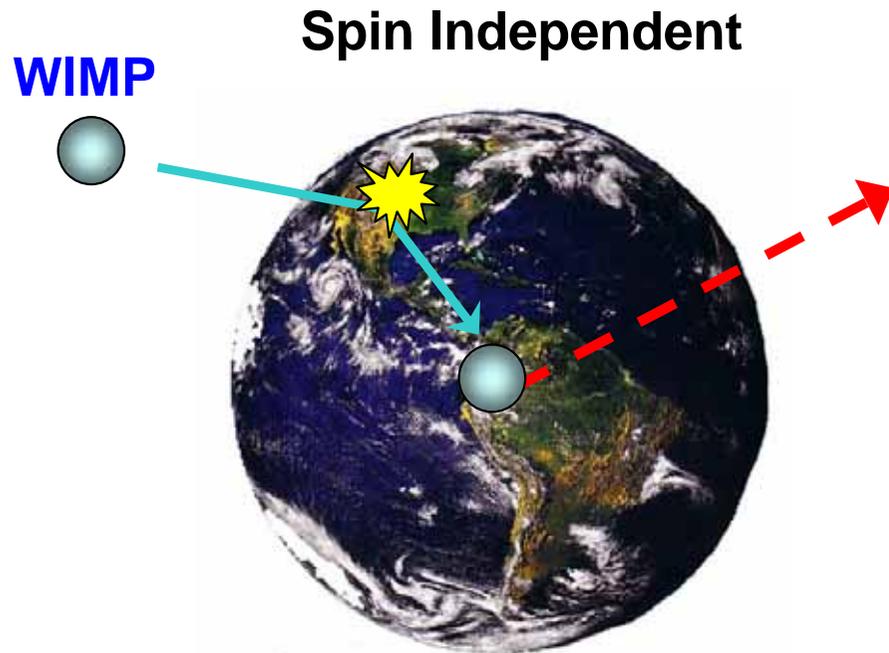
evaporation

太陽の場合、 C_E (evaporation)は軽いWIMP(<3GeV)以外は無視できる($C_E=0$)

$$\Gamma_A = \frac{1}{2} C \tanh^2 \frac{t}{\tau} \quad \tau = \frac{1}{\sqrt{CC_A}}$$

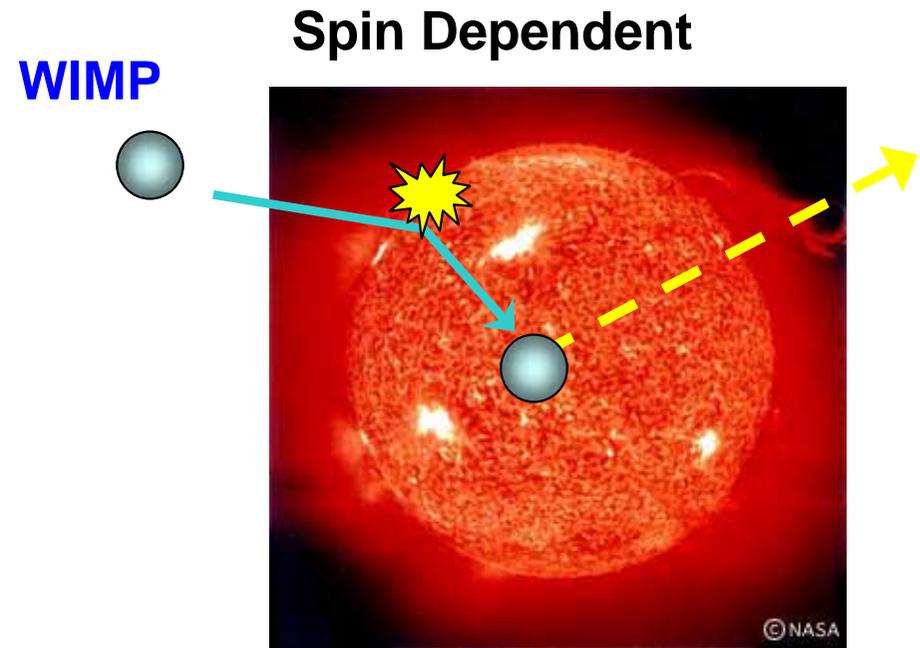
$t \gg \tau$ の時、対消滅頻度はC (捕獲頻度)だけで決まる

Spin Independent (SI) 散乱と Spin Dependent (SD) 散乱



標的原子核のスピンによらない
断面積 質量数の二乗
直接探索では

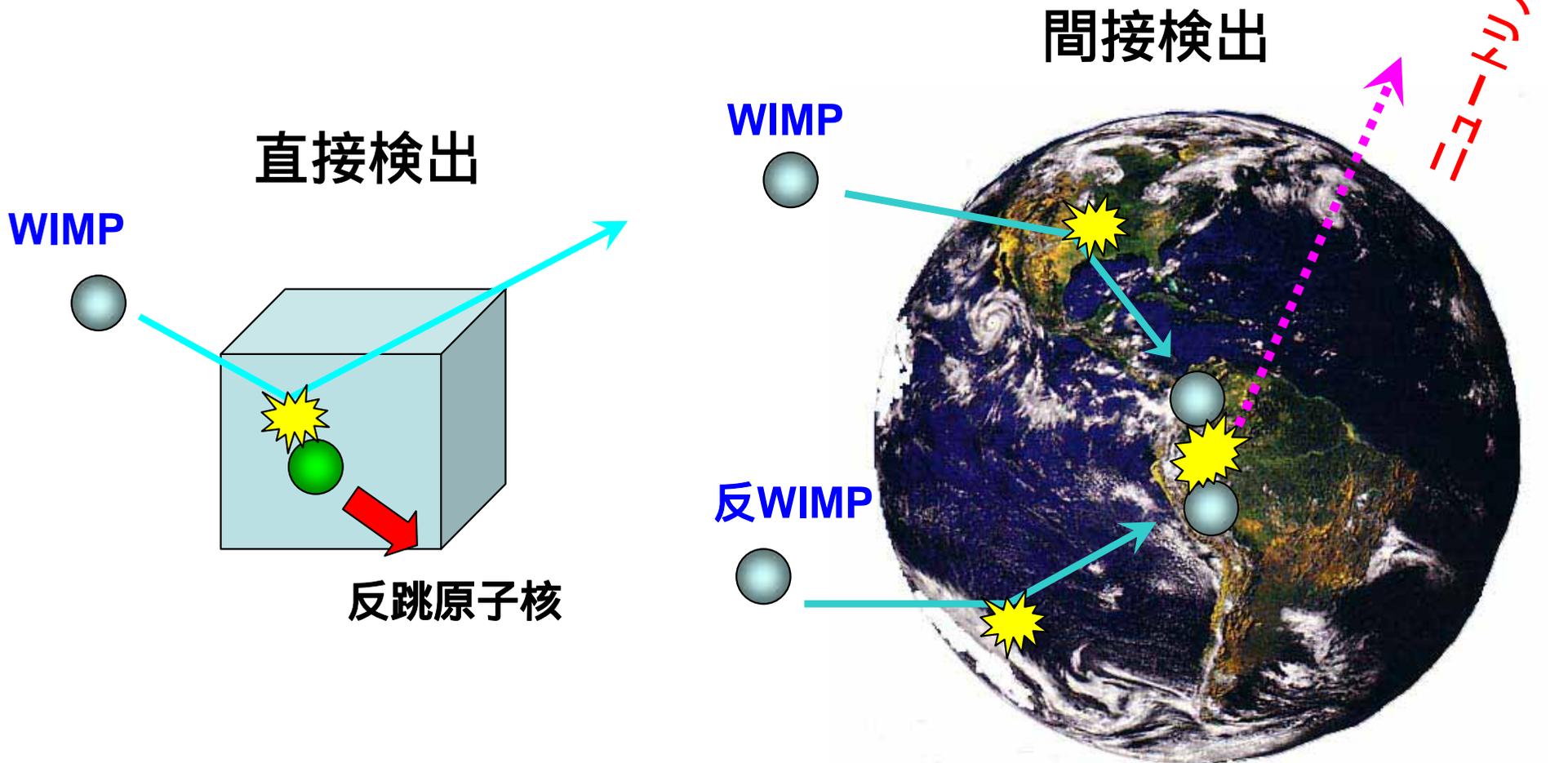
$$\sigma < 10^{-44} \sim 10^{-46} \text{ cm}^2$$



標的原子核のスピンに依存
陽子との散乱が有利
直接探索では

$$\sigma < 10^{-36} \sim 10^{-38} \text{ cm}^2$$

直接探索とニュートリノ間接探索



地球方向 (SI) 10^4 - 10^6 m² の ν 検出器 → 1kg Ge 検出器相当
太陽方向 (SD) 10 - 500 m² の ν 検出器 → 50g 水素検出器相当

WIMP annihilation mode ($\chi\chi \rightarrow ??$)

$\nu\nu$

• $b\bar{b}$

– b クォーク \rightarrow ハドロン + レプトン + ニュートリノ

$\tau\bar{\tau}$

– レプトン \rightarrow ハドロン + ニュートリノ、レプトン + ニュートリノ...

• $Z\bar{Z}$ ($M_\chi > 90\text{GeV}$)

– Z ボゾン \rightarrow ニュートリノ対、レプトン対、クォーク対
...

• W^+W^-

– W ボゾン \rightarrow レプトン + ニュートリノ、クォーク対

• $t\bar{t}$ ($M_\chi > 180\text{GeV}$)

– t クォーク \rightarrow ボトムクォーク + W ボゾン、...

• $H\bar{H}$

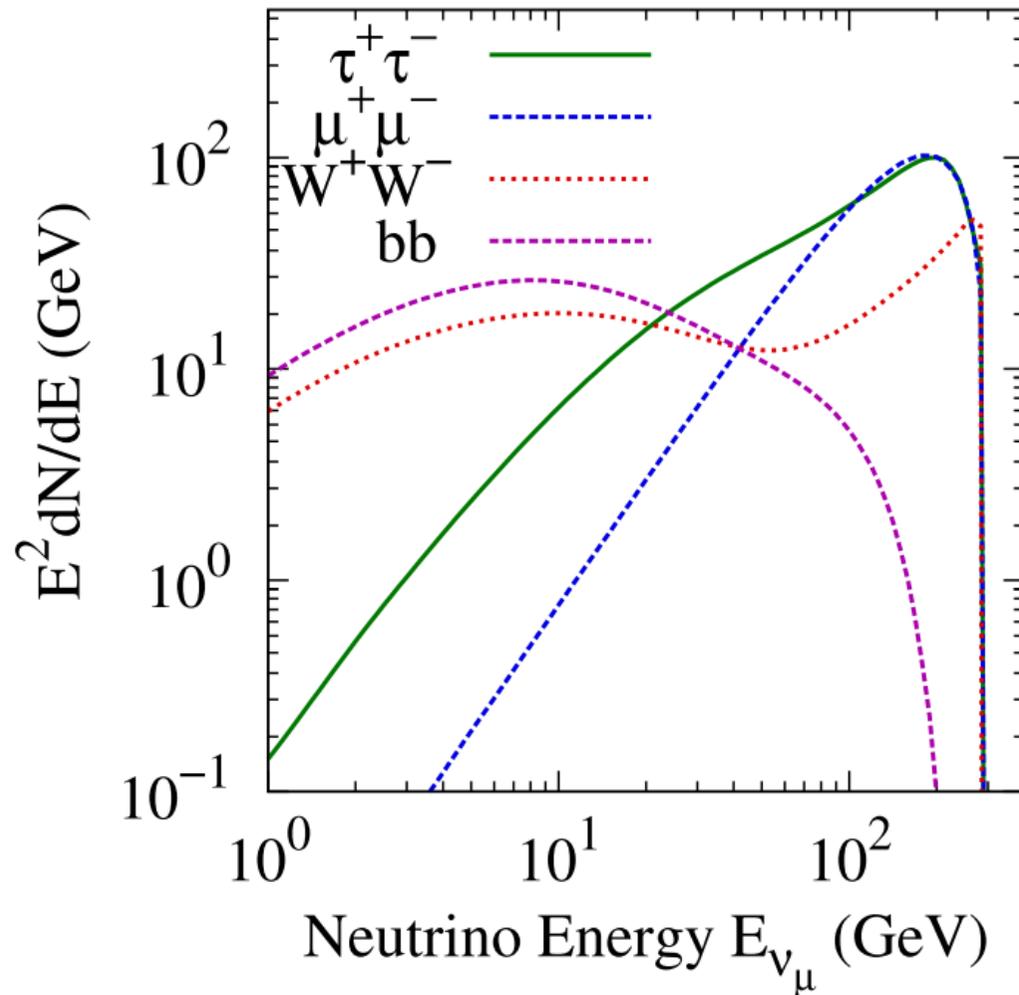
$\Rightarrow E_\nu = \text{WIMP質量}$

$$E_\nu = \frac{\text{WIMP質量}}{2 \sim 3}$$

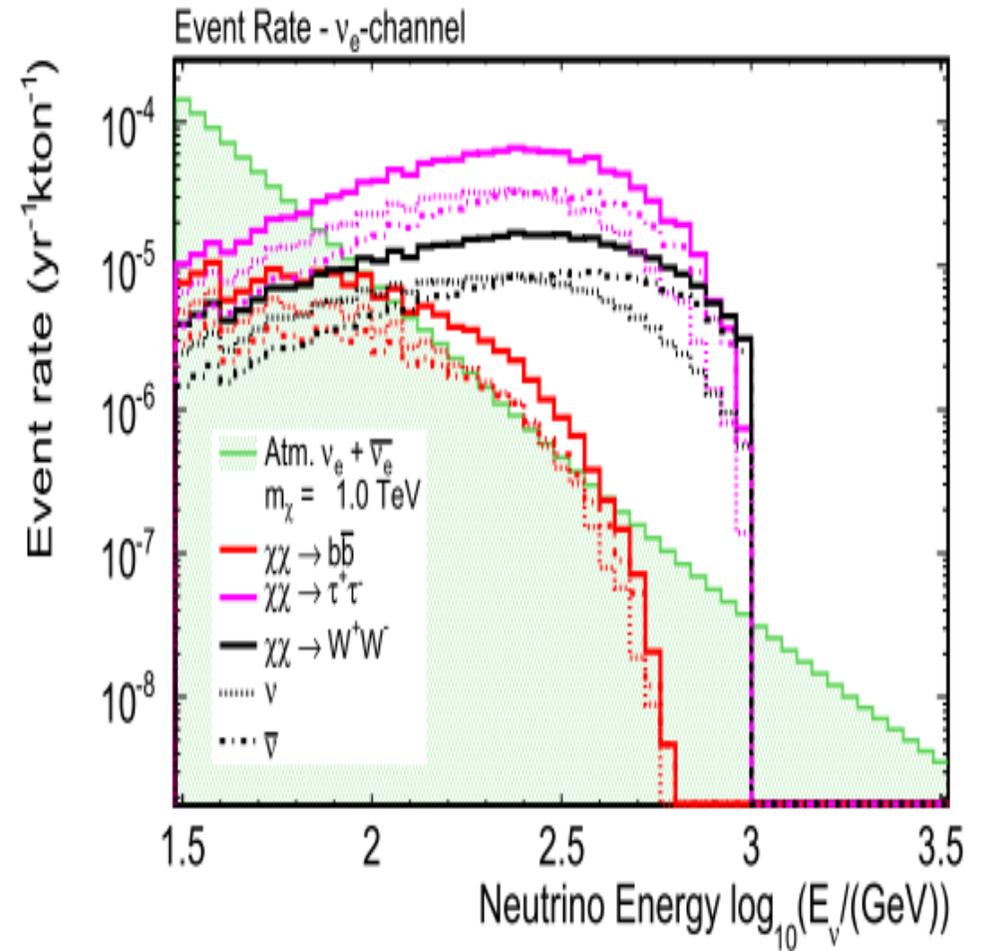
ニュートリノエネルギースペクトル

WIMPニュートリノ ($M_\chi=300\text{GeV}$)

Event rate ($M_\chi=1\text{TeV}$)

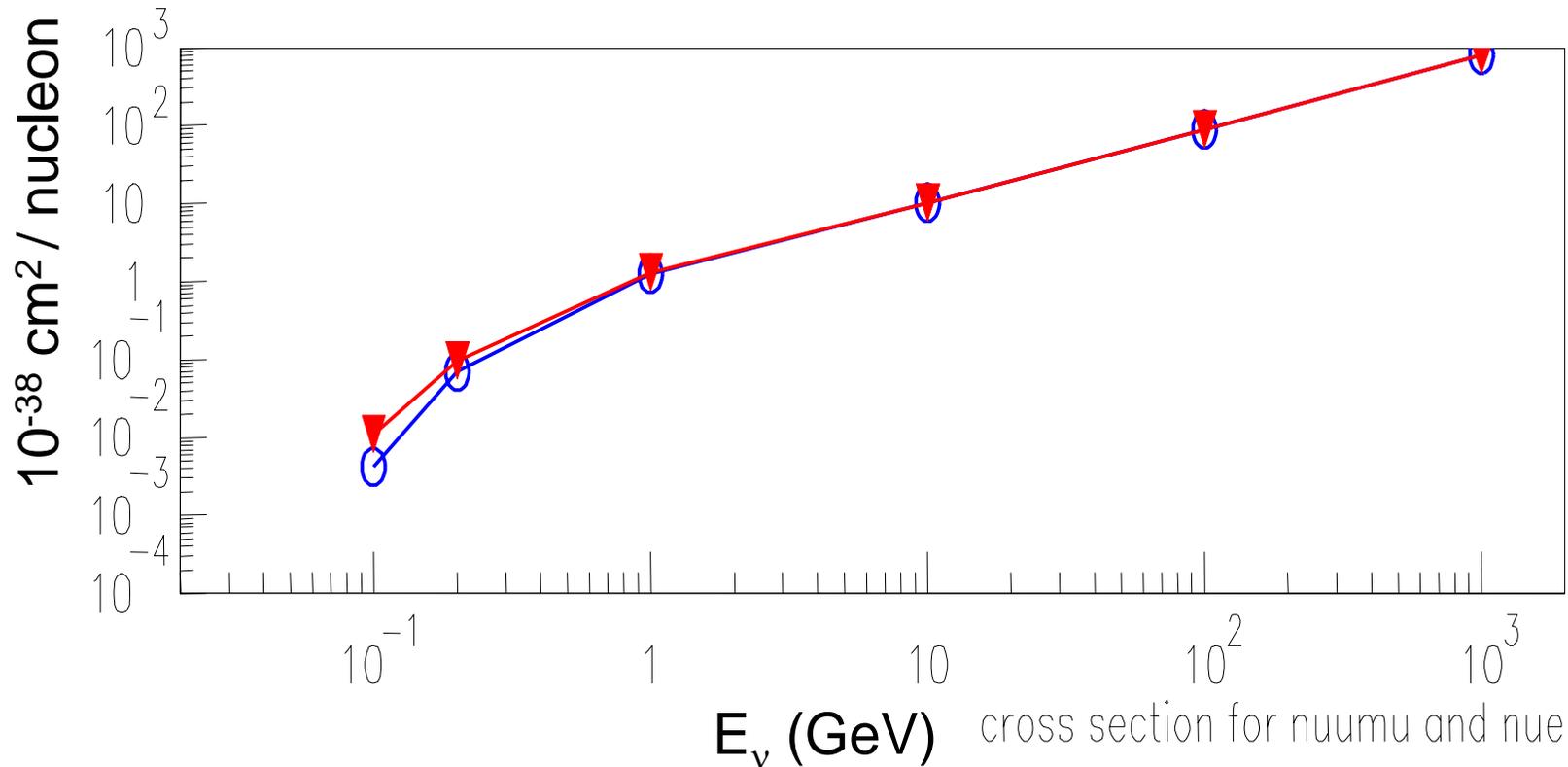


Phys.Rev. D84 (2011) 022004



Rott, Tanaka, Itow, JCAP 1109 (2011) 029

$\nu - N$ cross section



$$\sigma_{\text{tot}} = \sim 10^{-38} \text{ cm}^2 \times E_\nu / (\text{GeV})$$

反応数はニュートリノエネルギーに比例

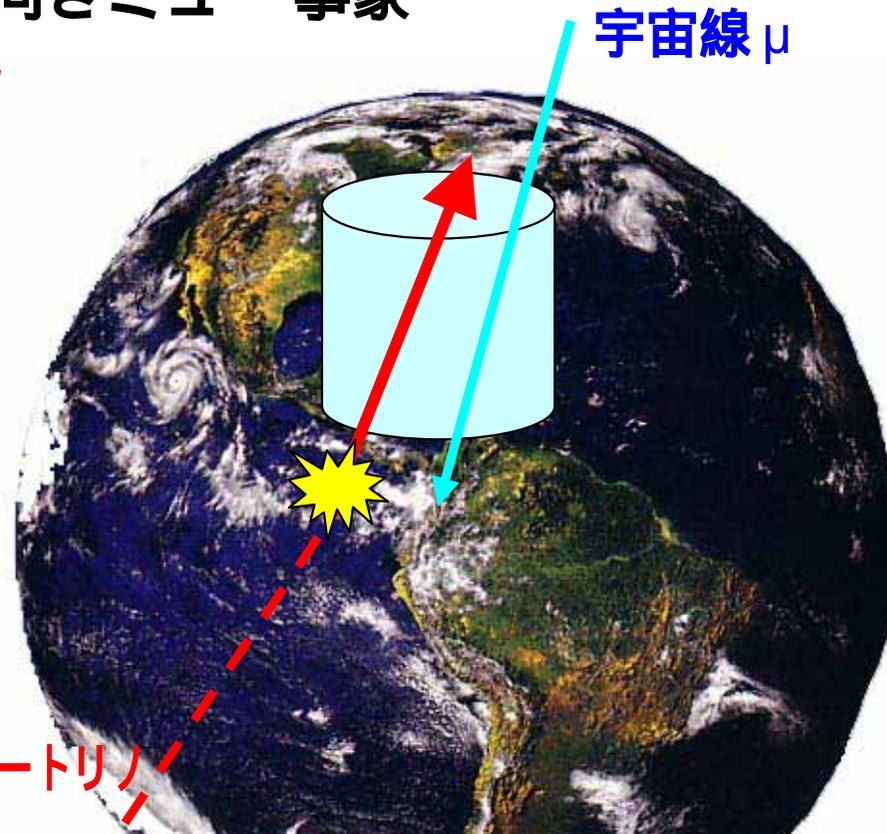
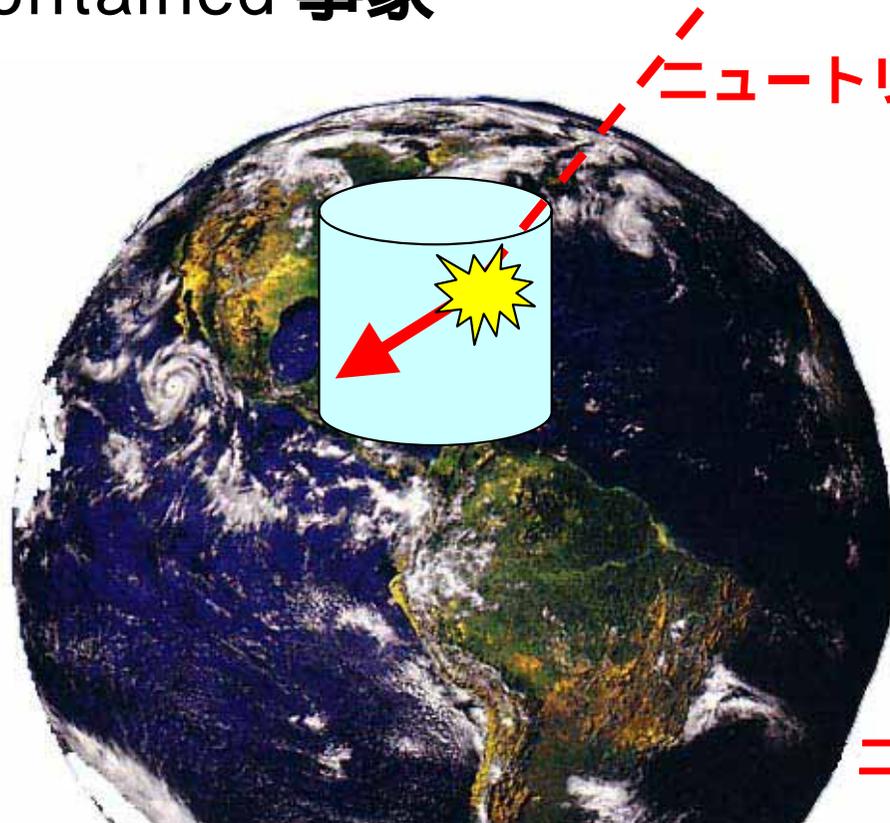
$$\frac{1 \nu (@1\text{GeV})}{\text{cm}^2\text{s}} \times \frac{1 \times 10^{-38} \text{ cm}^2}{\text{nucleon}} \times \frac{6 \times 10^{32} \text{ N}}{\text{kton}} \times \frac{3.15 \times 10^7 \text{ s}}{\text{year}} = \frac{190 \text{ int.}}{\text{kt yr}}$$

ν -lepton 角度: ~ ~30度 (@GeV))

ニュートリノ検出手法

Contained 事象

上向きミュオン 事象



- 検出器内で反応
- 有効体積 = 検出器体積
- エネルギー測定可

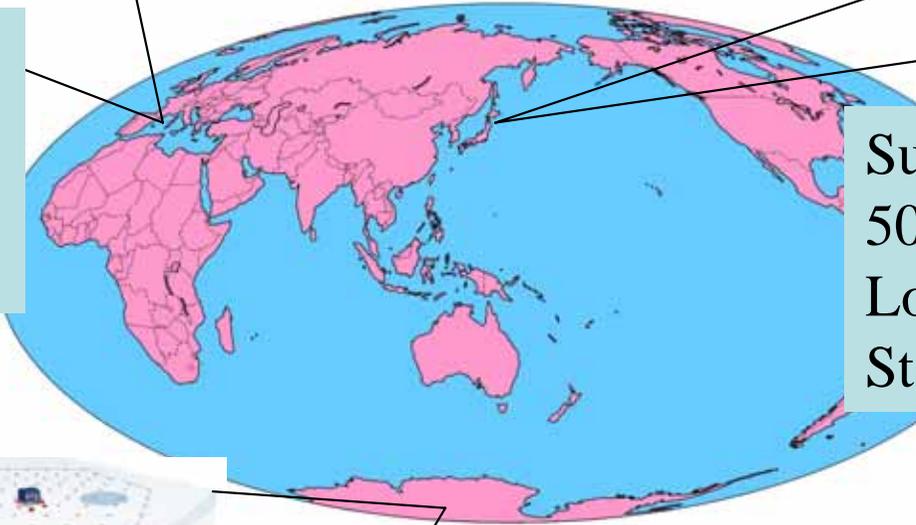
- 検出器外で反応
- 有効体積 > 検出器体積
- エネルギー測定不可
- μ ニュートリノのみ

観測の現状

今回はSKとIceCUBEについて



Super-Kamiokande (1996-)
50kt water Cherenkov
Low energy (> 4MeV)
State of art analysis



ANTARES(2007-)
Under the sea
0.1km² 12 strings
Eth > 20GeV



IceCube/DeepCore (2005- /2010-)
1Gt Ice / ~1Mt infill array
(>100GeV/ >10GeV)
Gigantic target volume

Galactic WIMP対消滅

- 銀河中心方向のexcess探索
- Energy spectrumの異常 (Super-K)
- 結果は $\langle\sigma v\rangle$
- 銀河中心はハローモデル(密度)に強く依存
- 矮小銀河方向のexcess探索も

IceCUBE Galactic WIMP

arXiv/1210.3557

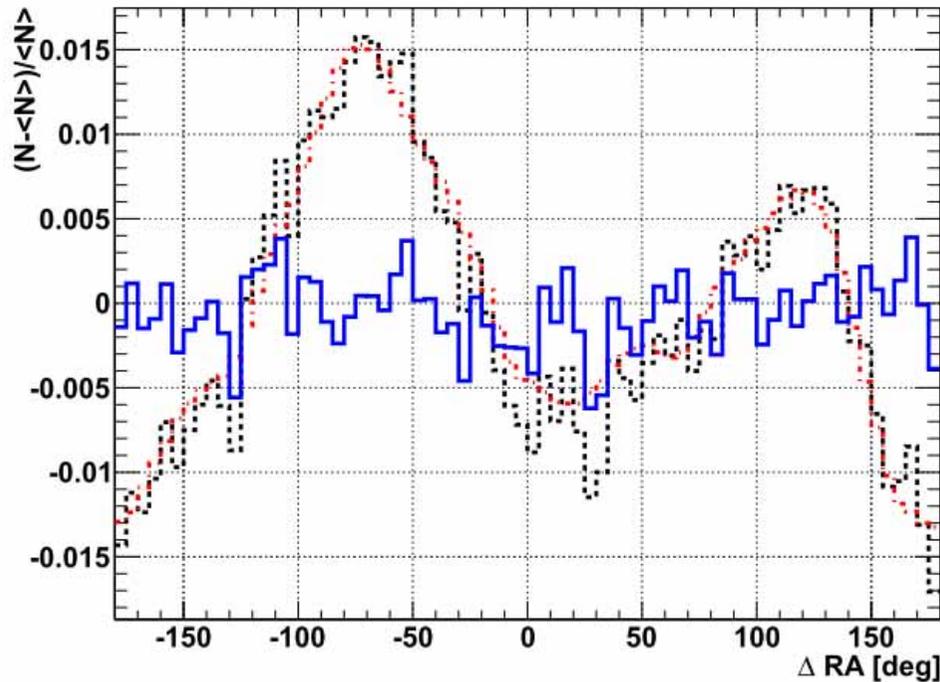
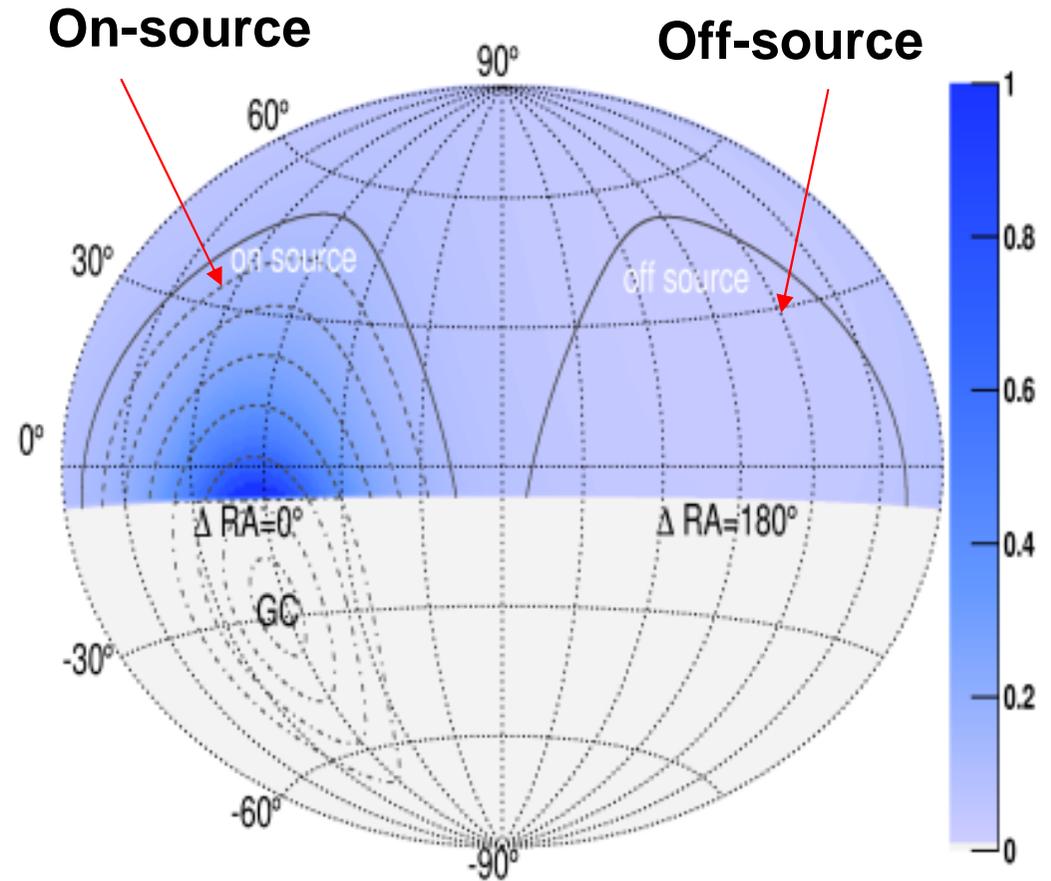


FIG. 7: Relative variation of the event distribution in RA (with respect to the Galactic Center, thus the x-axis is labeled ΔRA). N is the number of measured events per bin, $\langle N \rangle$ is the average number of events in all bins. The measured (black-dotted) and expected (red-dashed-dotted) distributions are shown, along with the deviation from expectation (blue).

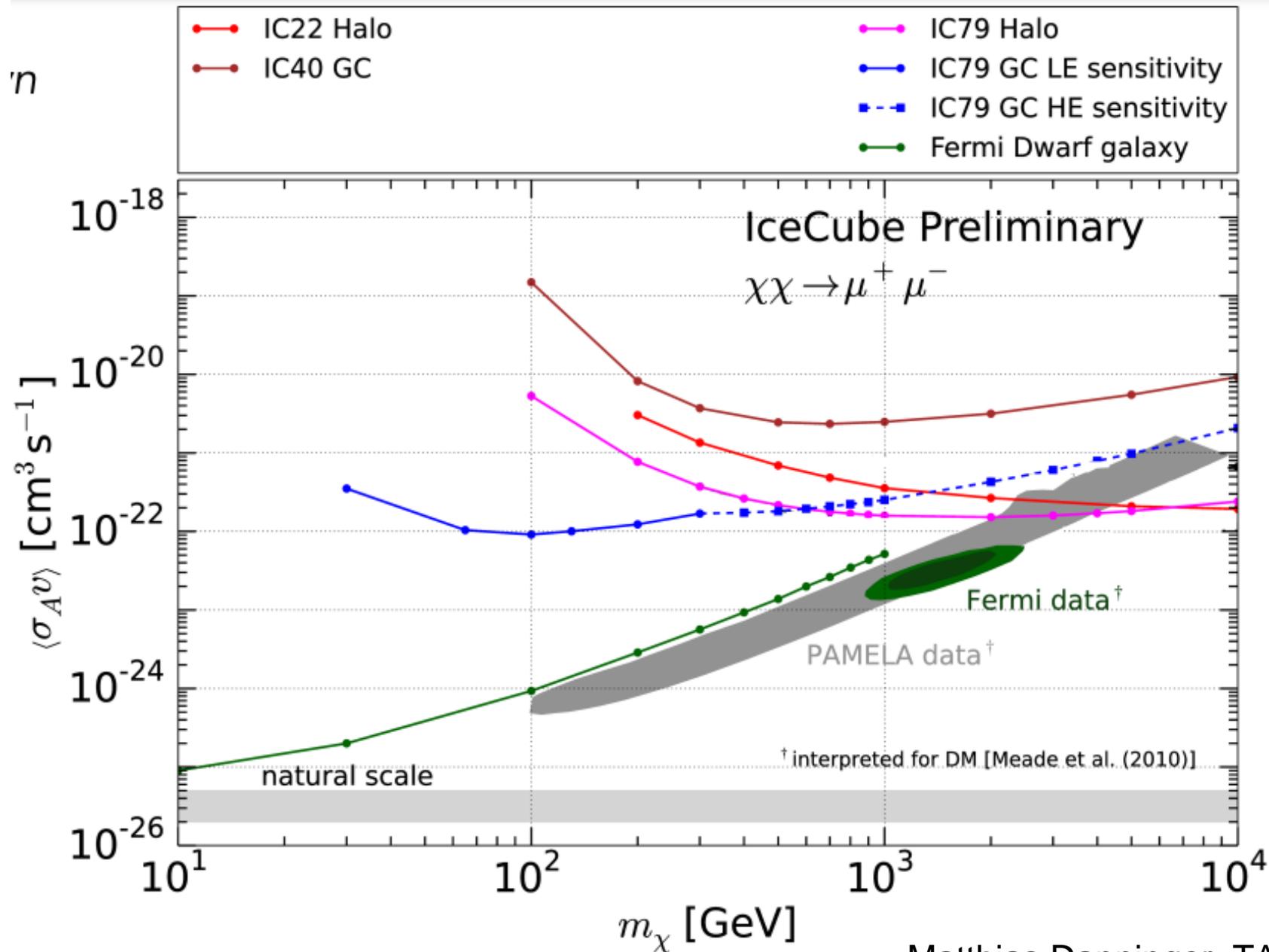
**Galactic Center WIMP
(IC-40)**



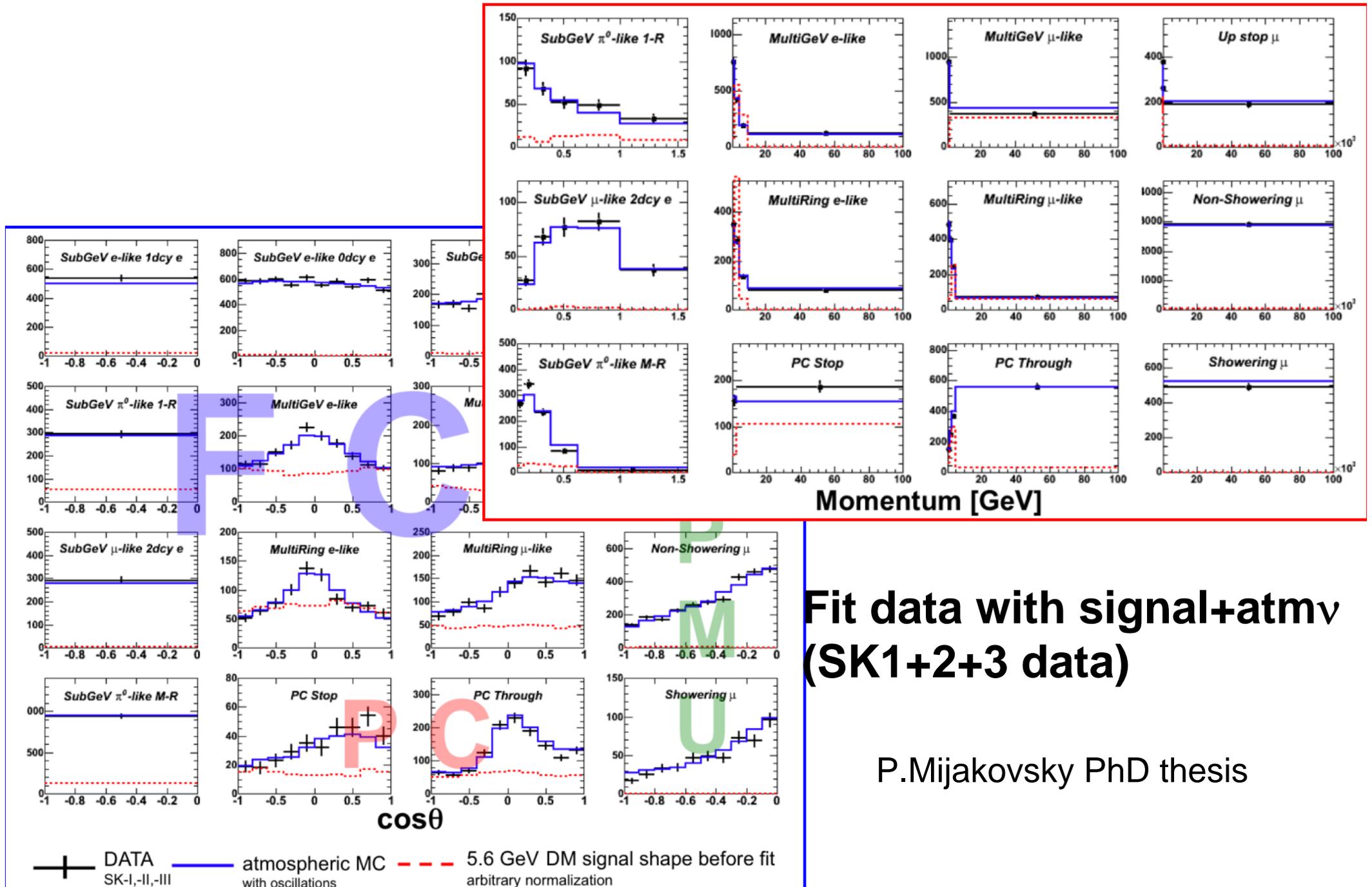
**Galactic Halo WIMP
(IC-22)**

Phys.Rev. D84 (2011) 022004

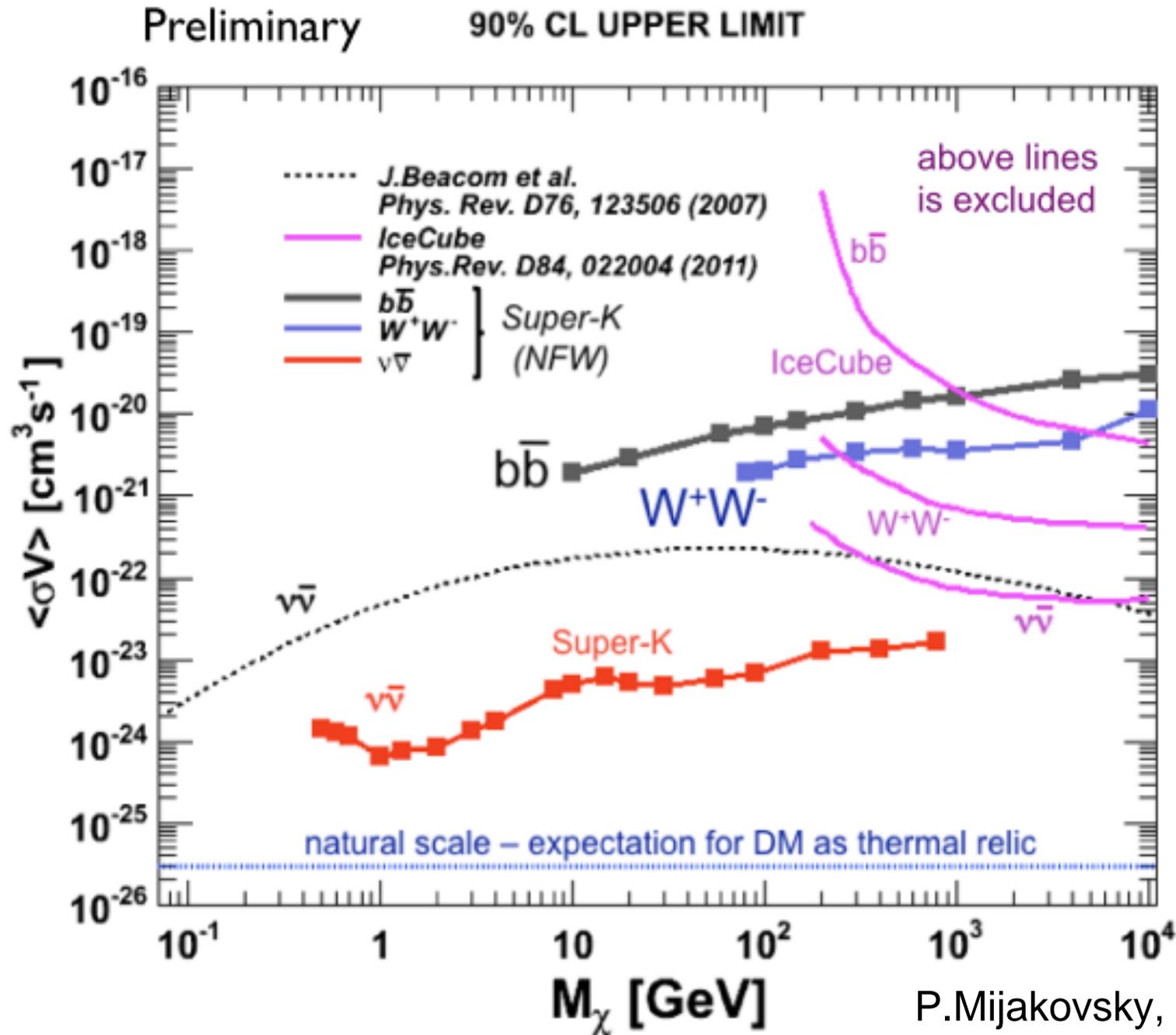
IceCUBE Galactic WIMP



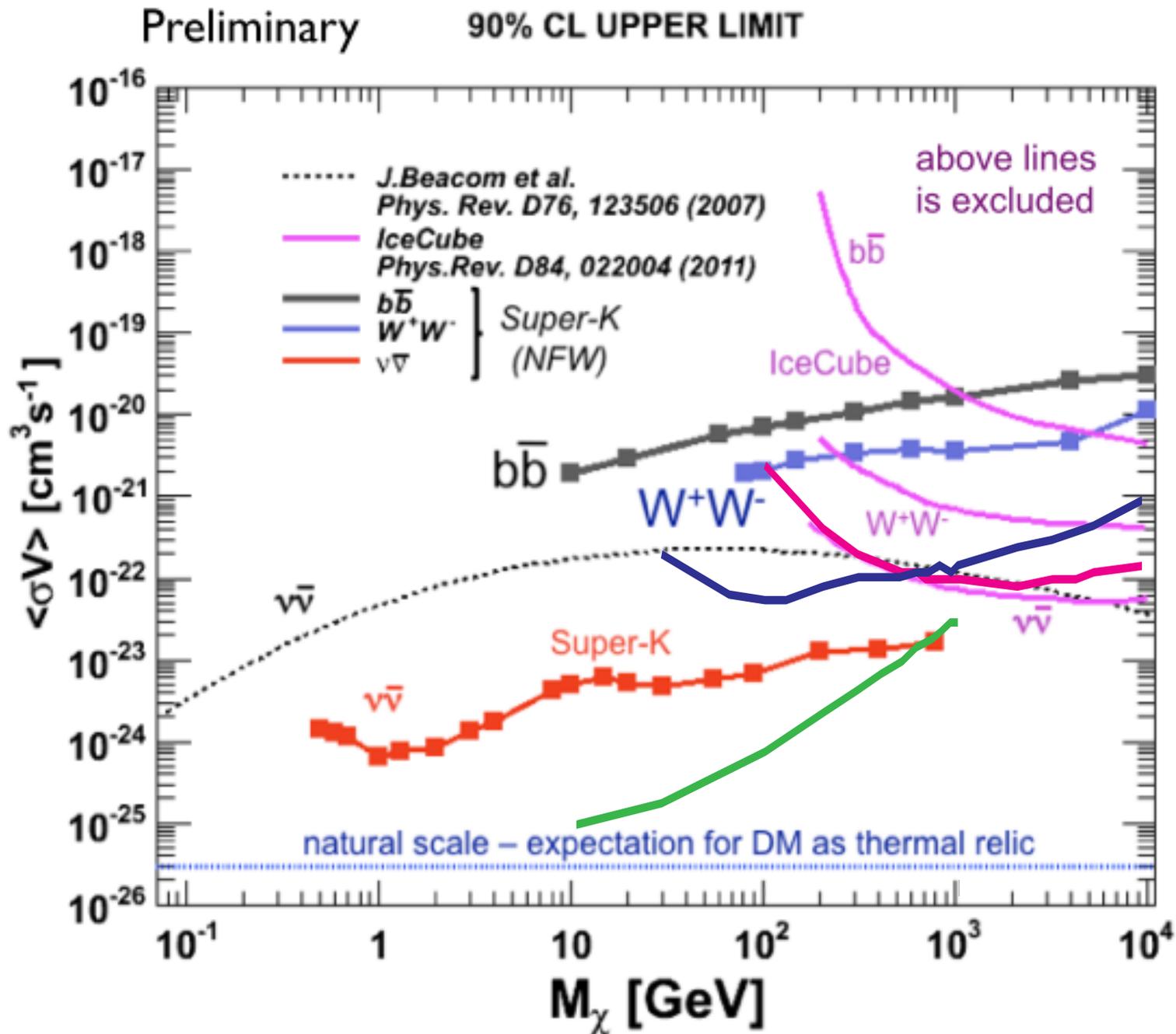
Super-K Galactic WIMP



Super-K Galactic WIMP



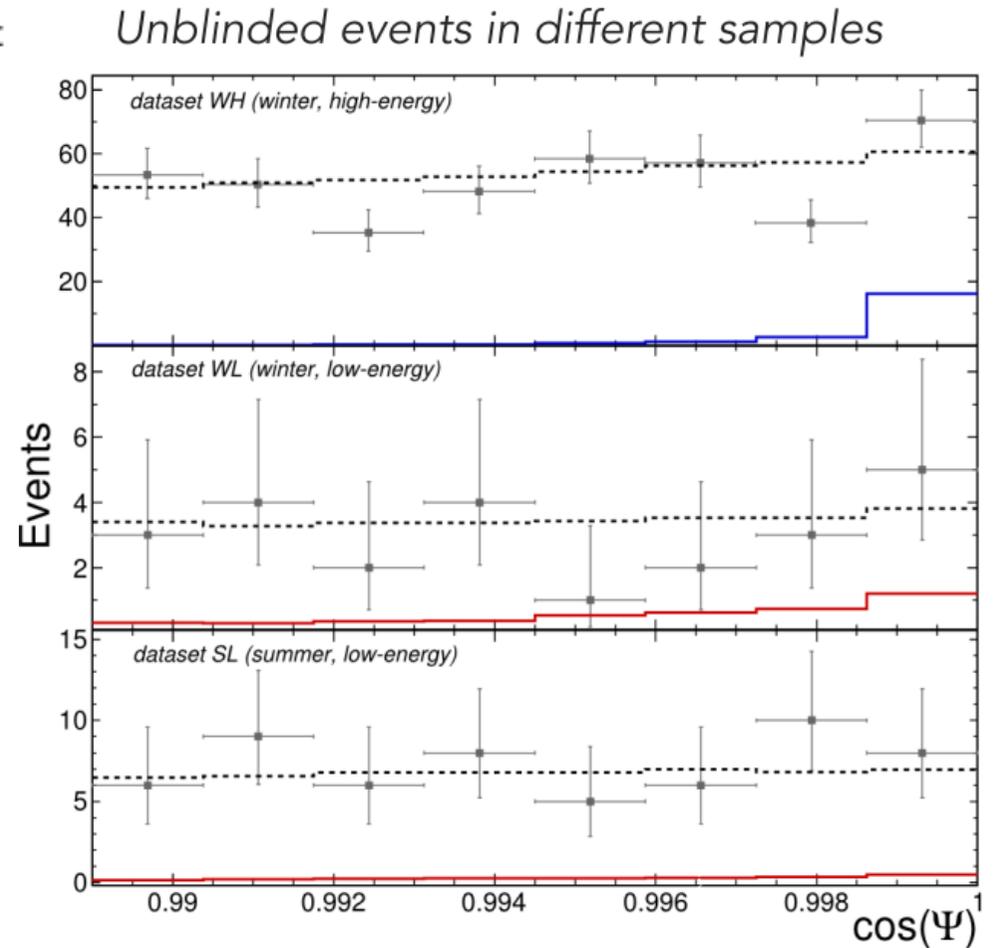
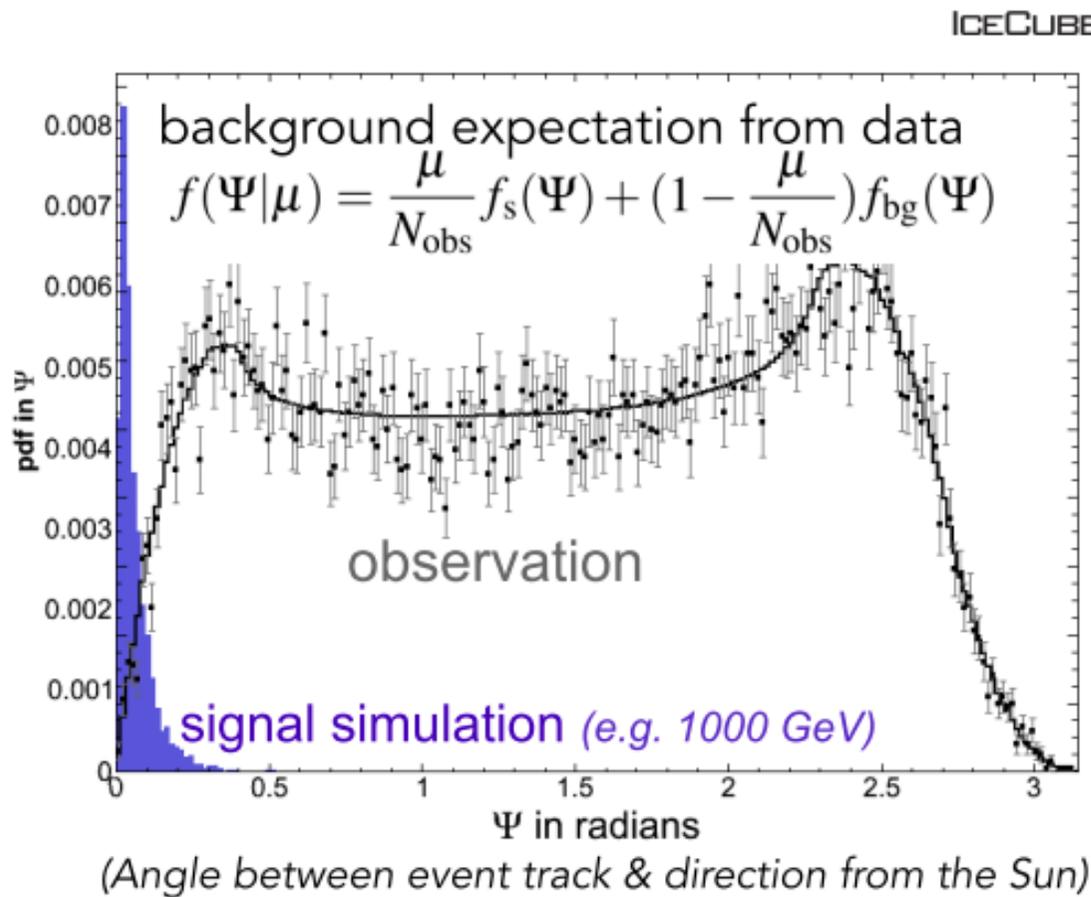
Super-K Galactic WIMP



Solar / Earth WIMP探索

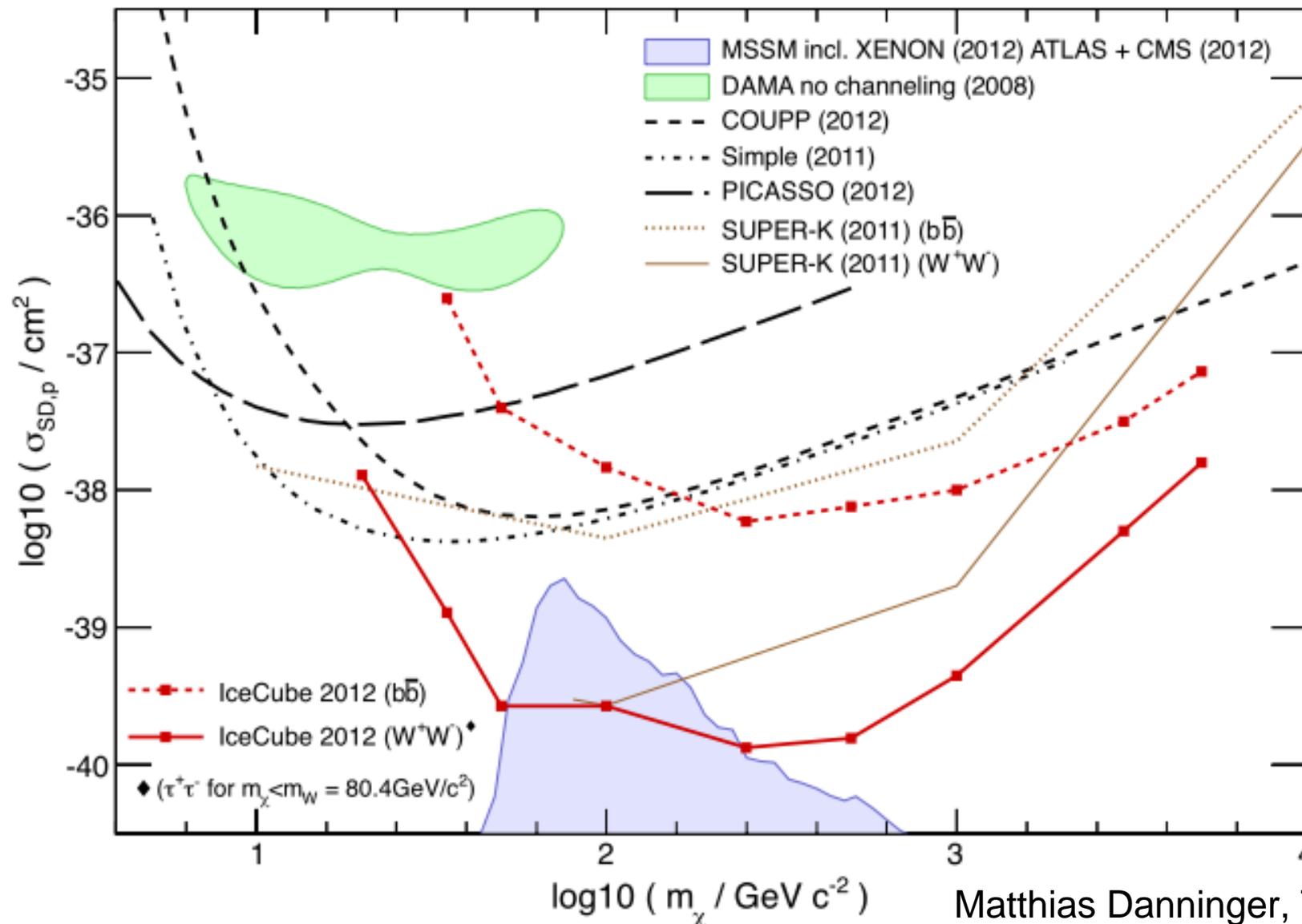
- 太陽(または地球中心)方向のExcess探索
- Super-Kではエネルギー、フレーバーも加味
- 結果は σ_{scat} , ハローモデル(速度)に依存
- 非常に軽いWIMP(<3GeV)は蒸発の影響
- 非常に重いWIMP(>10TeV)は木星の影響

IceCUBE Solar WIMP



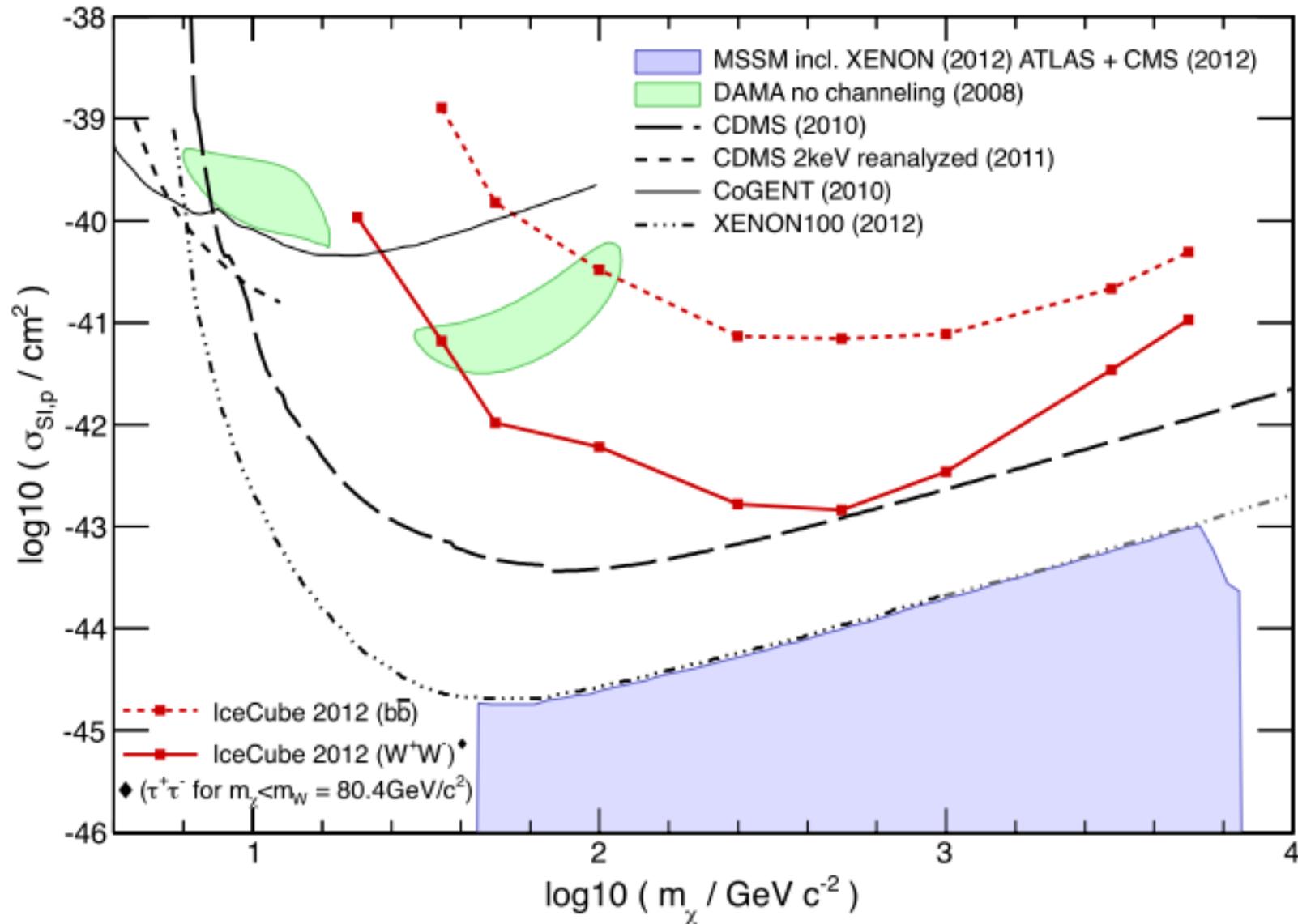
IceCUBE Solar WIMP result (SD)

SD WIMP-proton cross-section limit



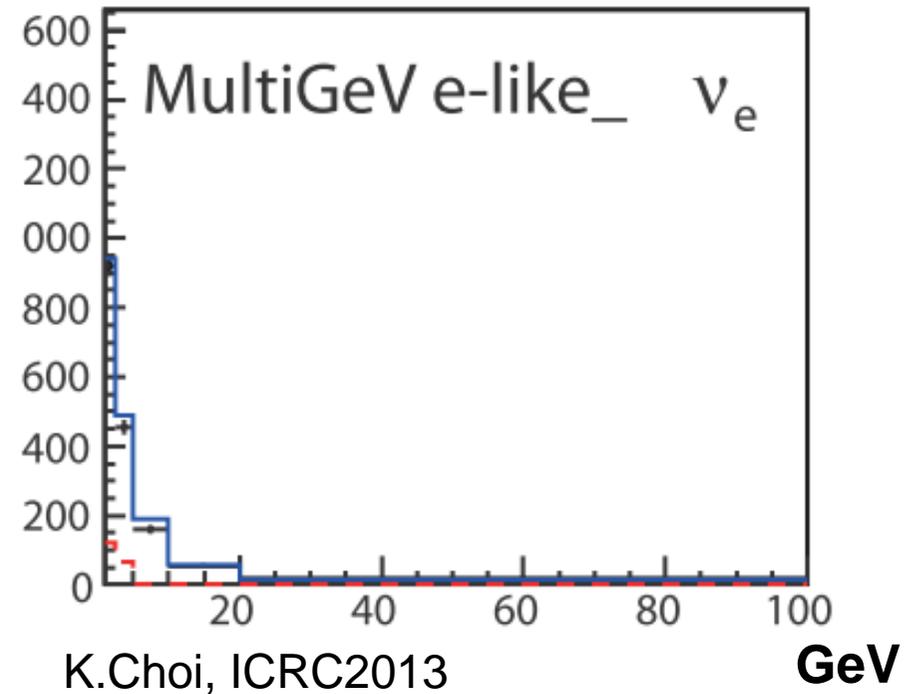
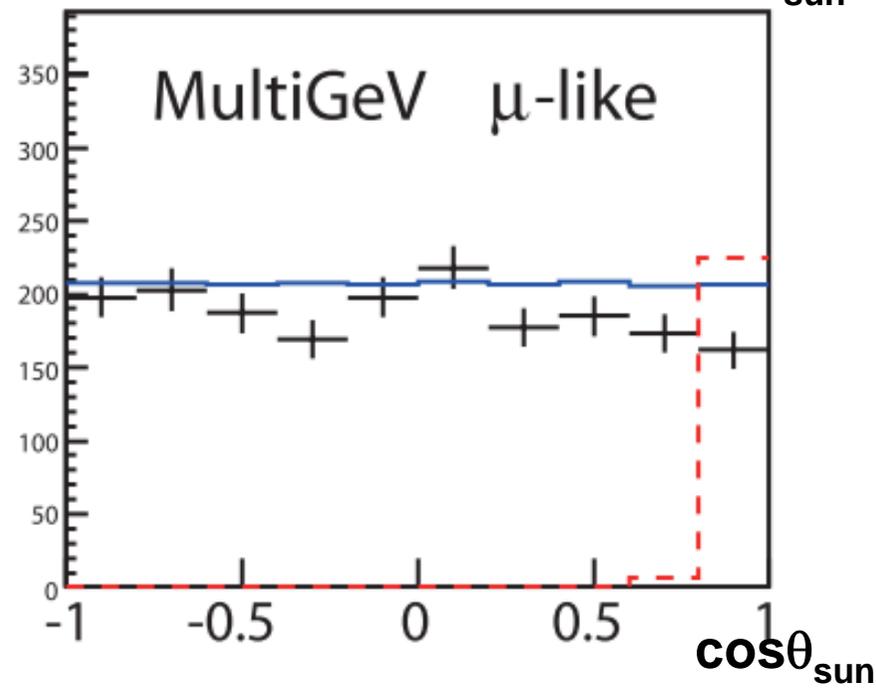
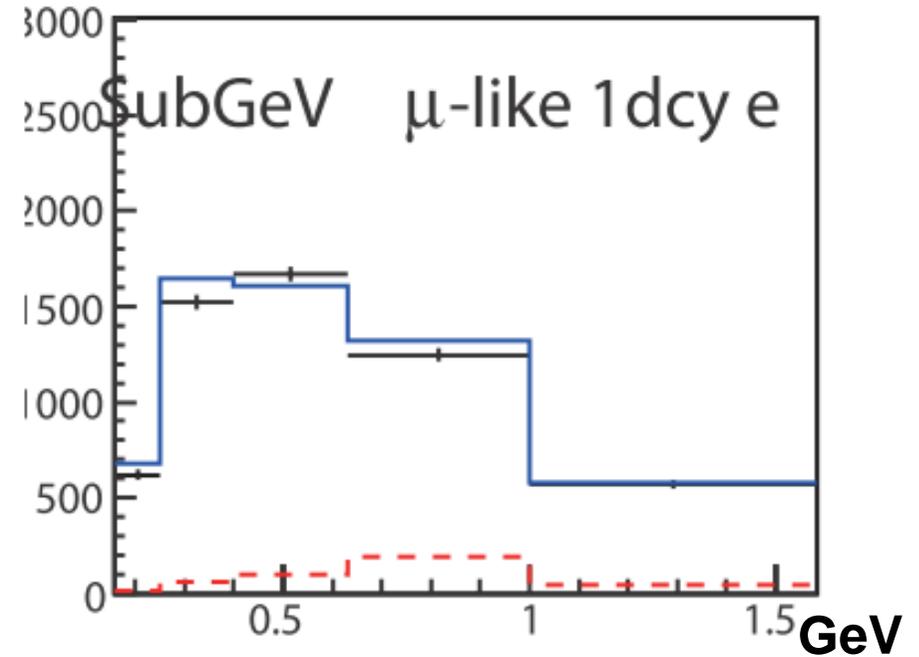
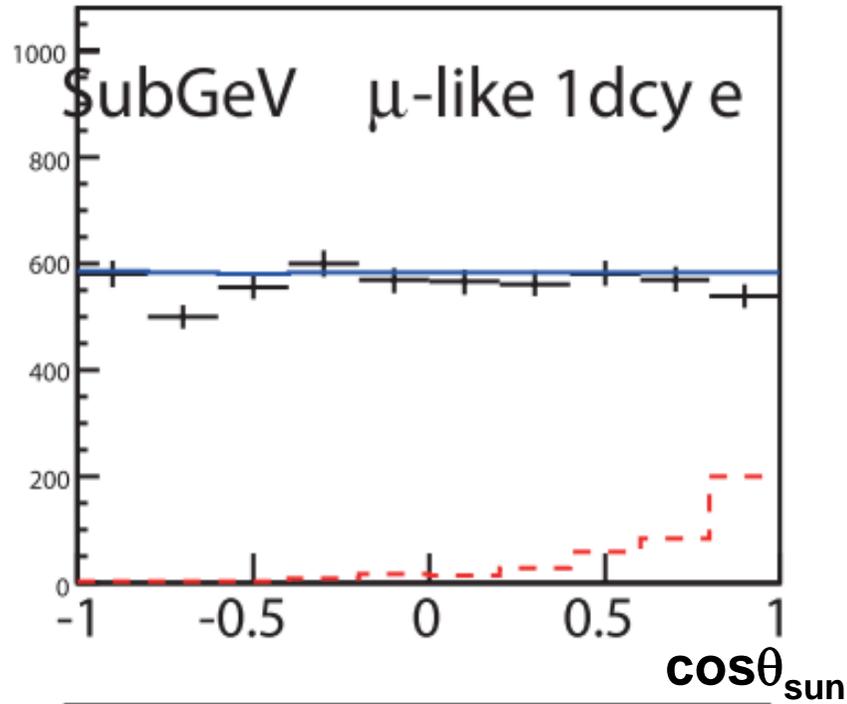
IceCUBE Solar WIMP result (SI)

SI WIMP-proton cross-section limit



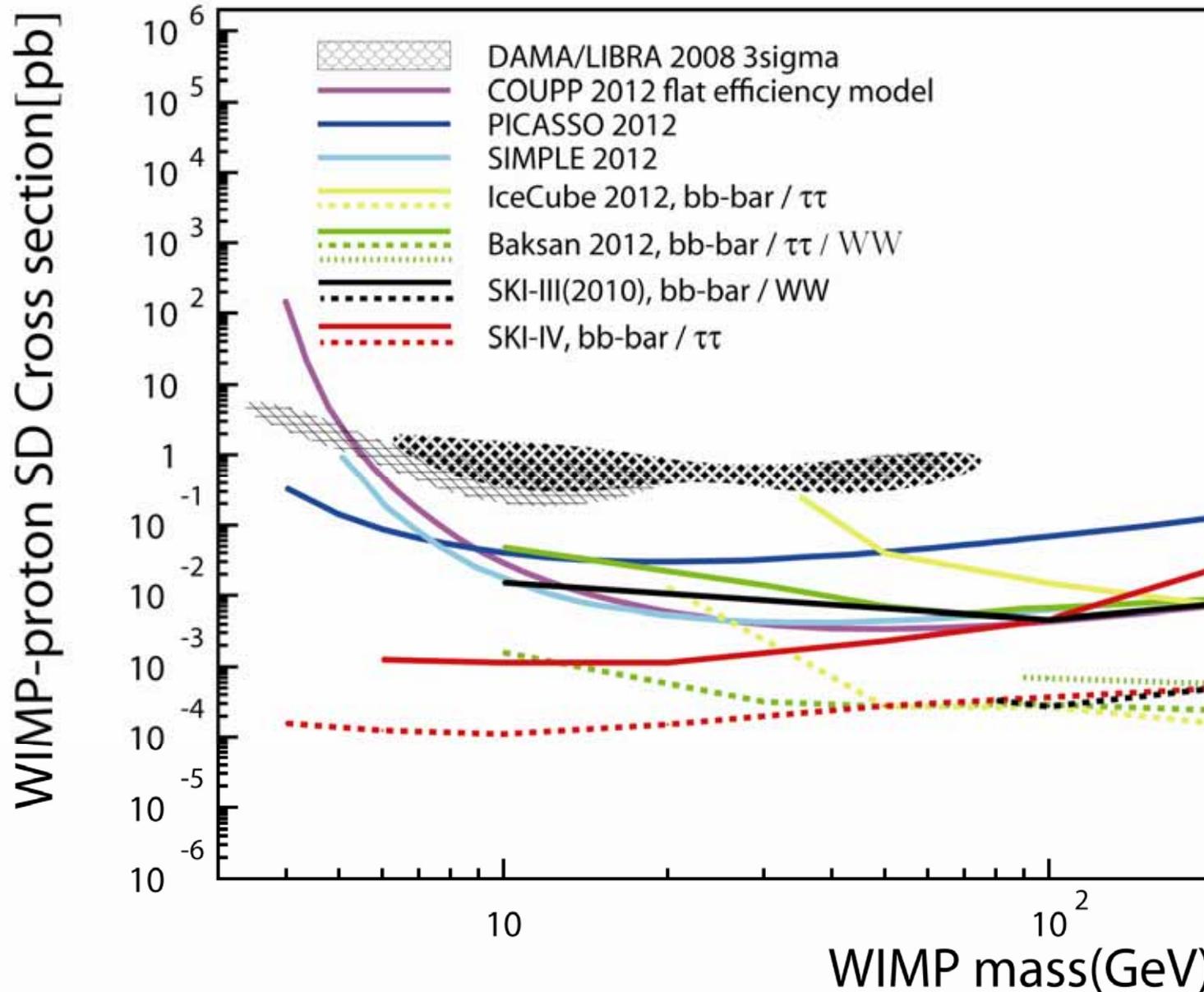
Super-K FC for solar WIMP

10GeV bb



Super-K Solar WIMP (SD) (FC+PC+Upmu)

K.Choi, ICRC2013



まとめ

- WIMP対消滅ニュートリノ
 - Unknown BGの少ないクリーンな手法
 - WIMP散乱断面積にも感度
- Galactic WIMP
 - 対消滅頻度 $\langle\sigma v\rangle$ について重いIWIMP ($> \text{TeV}$)で有利 (10^{-22})
 - 軽いIWIMP ($\sim \text{GeV}$)でSKがよい制限 (10^{-24})
- Solar-WIMP
 - スピン依存散乱に関しては直接探索よりよい感度 (10^{-40})
(Captureの不定性はある。。。)
 - スピン非依存散乱に関しては直接探索がよいが、DAMA領域を別の手法でカバー可能 ($\sim 10 \text{ GeV}, 10^{-40}$)
- 将来展望としては
 - より大きい検出器が必要だが、alternativeな探索として有望