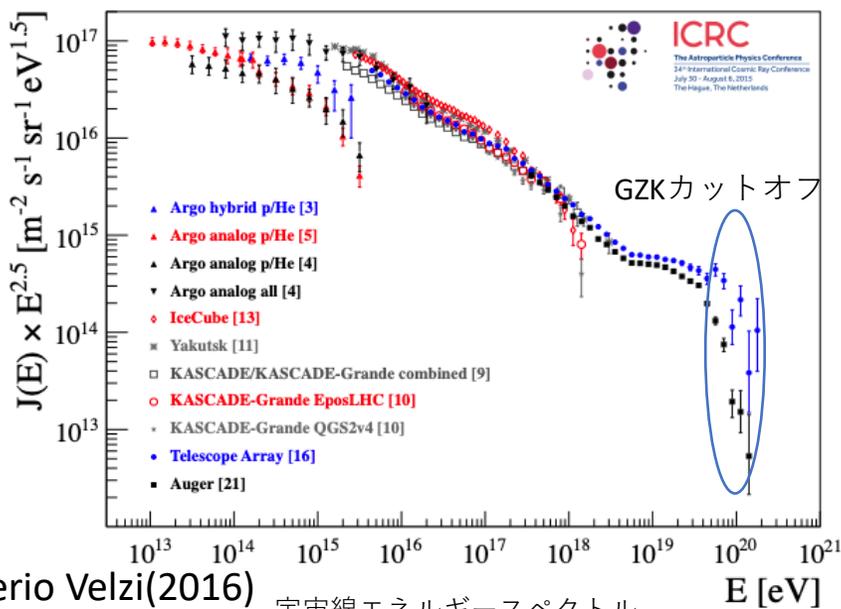


氷衛星エウロパにおける超高エネルギー ニュートリノ起源電波の検出可能性の評価

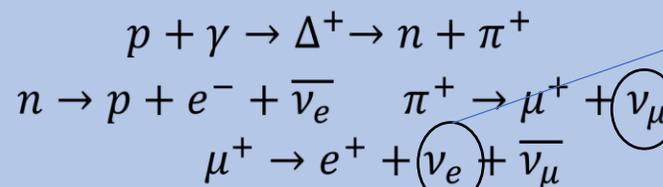
宮里優生

超高エネルギーニュートリノ探索



観測可能な遠方由来の宇宙線エネルギーには上限がある
(GZKカットオフ)

Δ^+ resonance

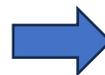


GZKニュートリノ： > 100 PeV

超高エネルギー宇宙線由来
まっすぐ飛んでくる
→宇宙線や宇宙線源の

謎解明のカギ

- フラックスが小さい ($< 1 \text{ event/year/km}^3$)
- 散乱断面積が小さい ($\sigma \sim 10^{-31} \text{ cm}^2$)



膨大な探索体積が必要

主な検出方法

- 可視光域Cherenkov光 (IceCube、カミオカンデなど)
- 電波域Cherenkov光 (ARA, ANITAなど)

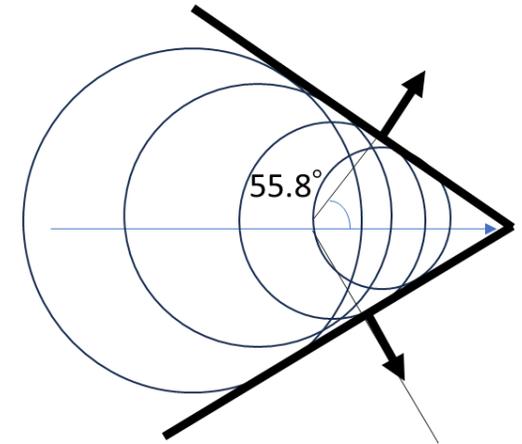
ニュートリノ検出原理

1. 媒質中でニュートリノが反応すると荷電粒子が得られ、荷電粒子がさらに荷電粒子を生み、次々と増えていく (電磁シャワー)



2. 荷電粒子が光速を超えて移動するとき、
それによってつくられた光子が干渉しあい、光が増幅される
(Cherenkov光)

低エネルギー：IceCubeなど

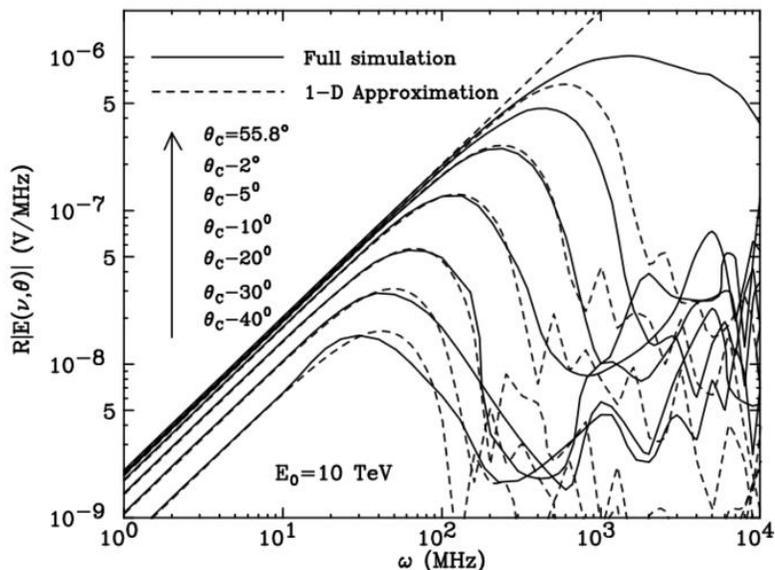


3. 氷中の電磁シャワーの幅は数センチと小さく、波長がそれよりも長い電波領域のCherenkov光は観測点で位相が合い放射強度が増幅される。(Askaryan効果)

電波強度は過剰電子数の2乗に比例する

高エネルギー：ANITAなど

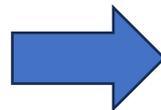
Askaryan電波とこれまでの実験



Alvarez+(2000)

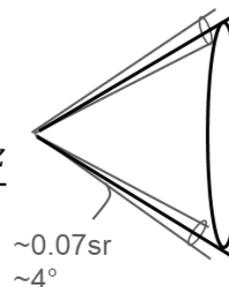
1D近似におけるAskaryan電波強度の周波数依存性

$$E(\theta) = E(\theta_c) \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta - \theta_c}{\Delta\theta}\right)^2\right]$$



Askaryan信号は0.1~1 GHzに分布している

$$\Delta\theta \sim 2.4^\circ \frac{1.15\text{GHz}}{\nu}$$



600MHzなら $\Delta\theta \sim 4^\circ$

ANITA実験

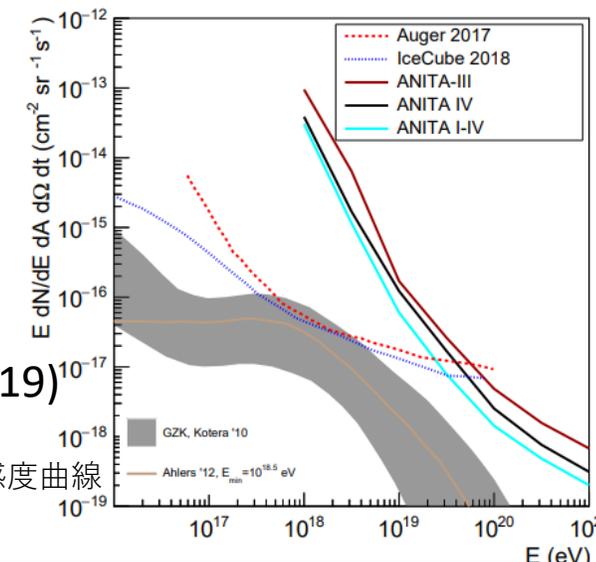
南極点上空38 kmに電波検出アンテナを搭載したバルーンを飛ばす

検知電波: 200~1200 MHz

稼働期間: 28日

ニュートリノ検出エリア: 約 $1.6 \times 10^6 \text{ km}^3$

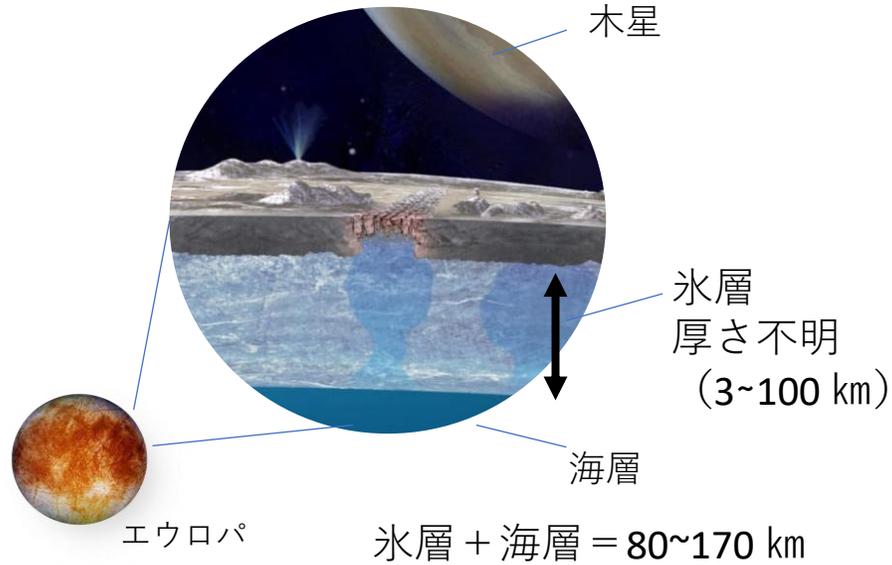
超高エネルギーニュートリノはいまだ検出できていない



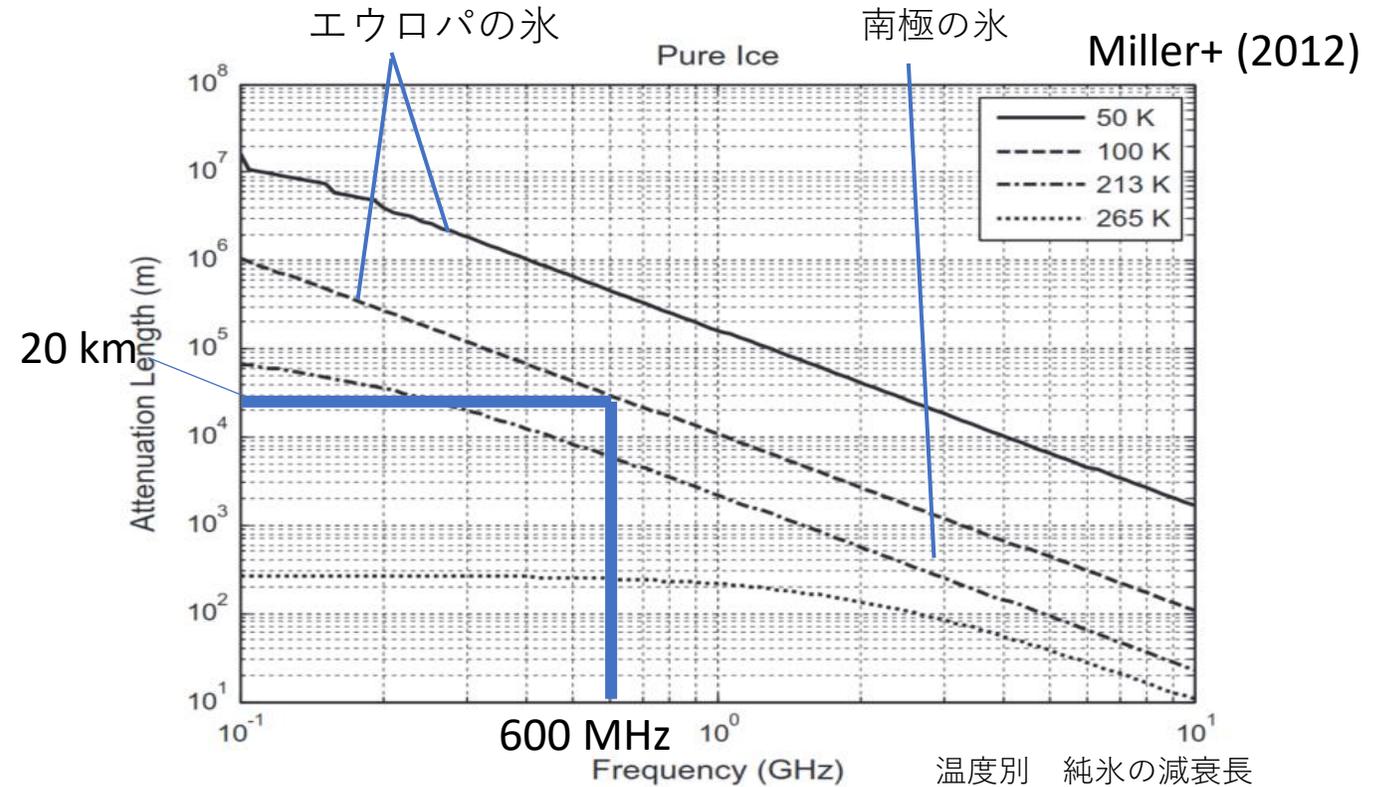
Gorham+(2019)

ニュートリノフラックス感度曲線

木星の氷衛星“エウロパ”



	エウロパ	南極
表面積	$3 \times 10^7 \text{ km}^2$	$1.4 \times 10^7 \text{ km}^2$
氷の厚さ	3~100 km	Avg. 2 km
氷の温度	50~100 K (表面)	213 K (for ANITA)
人工的ノイズ	なし	多い

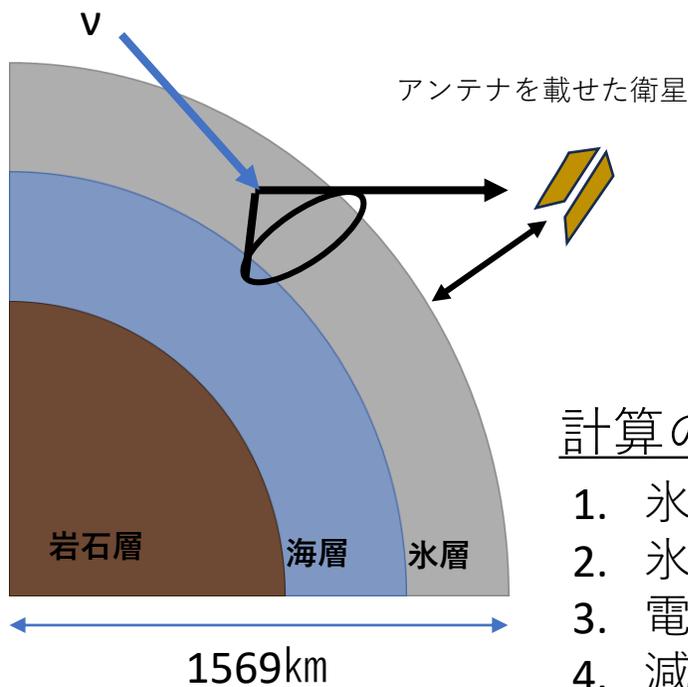


エウロパ：
 大量かつ高割合の低温氷 + 人口ノイズなし
 → 超高エネルギーニュートリノ探索の新候補

本研究の目的と設定

目的

モンテカルロシミュレーションを用いて、エウロパにおける超高エネルギーニュートリノ探索の可能性を定量的に評価する



設定

アンテナ	0.25 m ² CF, BW= 600 MHz	アンテナ高度	100, 300, 500 km
アスカリアン電波	CF, BW = 600 MHz timescale ~ns	氷厚さ	3, 60, 100 km
Signal to Noise Ratio	SNR > 10 (Noise 6×10^5 Jy)	減衰長	氷 20km, 1 km 地殻、海 0 km

計算の流れ

1. 氷中で反応するニュートリノの数を見積もる
2. 氷層に反応点を生成→上部の点のみ取り出す
3. 電波コーンがアンテナを向くものを取り出す
4. 減衰を考慮し、十分なシグナルを持つものを取り出して最終的な検知数とする

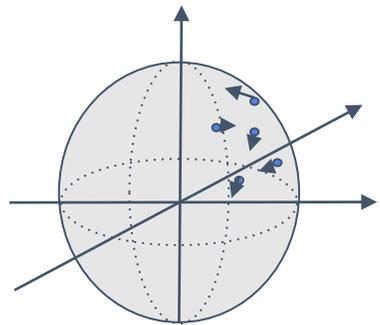
CF; Center Frequency
BW; Band Width

1 氷中で反応するニュートリノの数

ニュートリノのフラックス → Waxmann – Bahcall限界： $E^2 \frac{dN}{dE} \sim 10^{-8} (\text{Gev} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$

$10^{18.5} \sim 10^{19.5} \text{ eV} \rightarrow 10^{19} \text{ eV}$ などと対応させる。 $N = \int_{18.5}^{19.5} \frac{dN}{dE} dE$

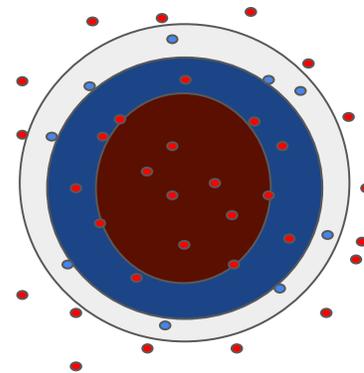
エウロパ表面に1時間あたりに入射する 10^{19} eV ニュートリノの数 → 約2万個



エウロパ表面に
2万個の粒子を生成する



各粒子を0.1 kmステップずつランダムに動かして、都度ニュートリノが反応するかどうかを調べる



氷層で反応した
ニュートリノの数を数える

ニュートリノ反応確率

The cross section of neutrinos' interaction

$$\sigma_{\nu} = 10^{-32} \left(\frac{E_{\nu} (\text{GeV})}{10^9} \right)^{0.4} \text{ cm}^2$$

Yoshida et al. 1997

角度 θ で入射したニュートリノが、媒質中を0.1km進む間に反応する確率 p

$$p = \sigma \cdot \rho \cdot 0.1 \text{ km} \cdot N_A \cdot \cos\theta$$

2. 反応点の生成と位置によるカット

結果

氷厚さ 60 km, 10^{19} eV \rightarrow 2000個 / hour

$$N = \int_{E^{-0.5}}^{E^{+0.5}} \frac{dN}{dE} dE \propto \frac{1}{E}$$

The cross section of neutrinos' interaction

$$\sigma_{\nu} = 10^{-32} \left(\frac{E_{\nu}(\text{GeV})}{10^9} \right)^{0.4} \text{ cm}^2$$

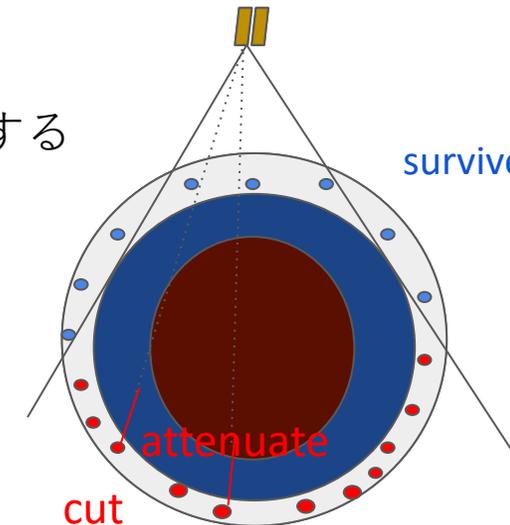
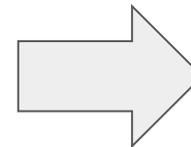
Yoshida et al. 1997

エネルギーが一桁上がれば、反応数は $10^{-0.6}$ 倍になる

Ex) 氷60 km

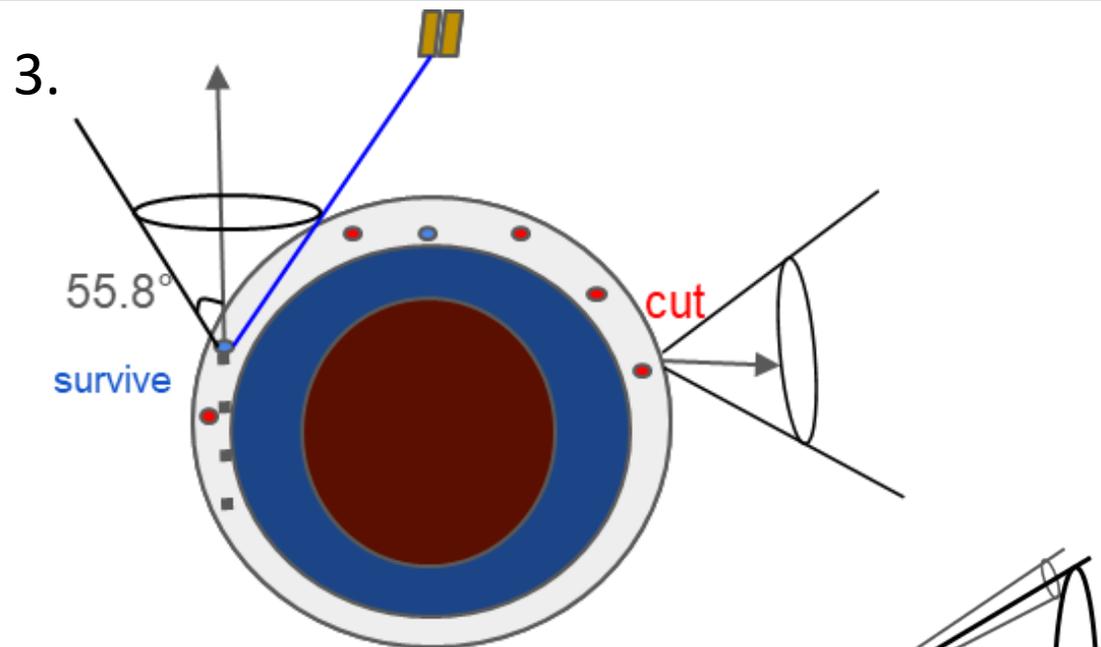
ν エネルギー (eV)	反応数/h	反応数/yr
$10^{18.5} \sim 10^{19.5}$	2×10^3	1.8×10^7
$10^{19} \sim 10^{20}$	$2 \times 10^{2.7}$	$1.8 \times 10^{6.7}$
$10^{19.5} \sim 10^{20.5}$	$2 \times 10^{2.4}$	$1.8 \times 10^{6.4}$
$10^{20.5} \sim 10^{21.5}$	$2 \times 10^{1.8}$	$1.8 \times 10^{5.8}$
$10^{21.5} \sim 10^{22.5}$	$2 \times 10^{1.2}$	$1.8 \times 10^{5.2}$
$10^{22.5} \sim 10^{23.5}$	$2 \times 10^{0.6}$	$1.8 \times 10^{4.6}$
$10^{23.5} \sim 10^{24.5}$	2	1.8×10^4

それぞれ氷層内に生成する

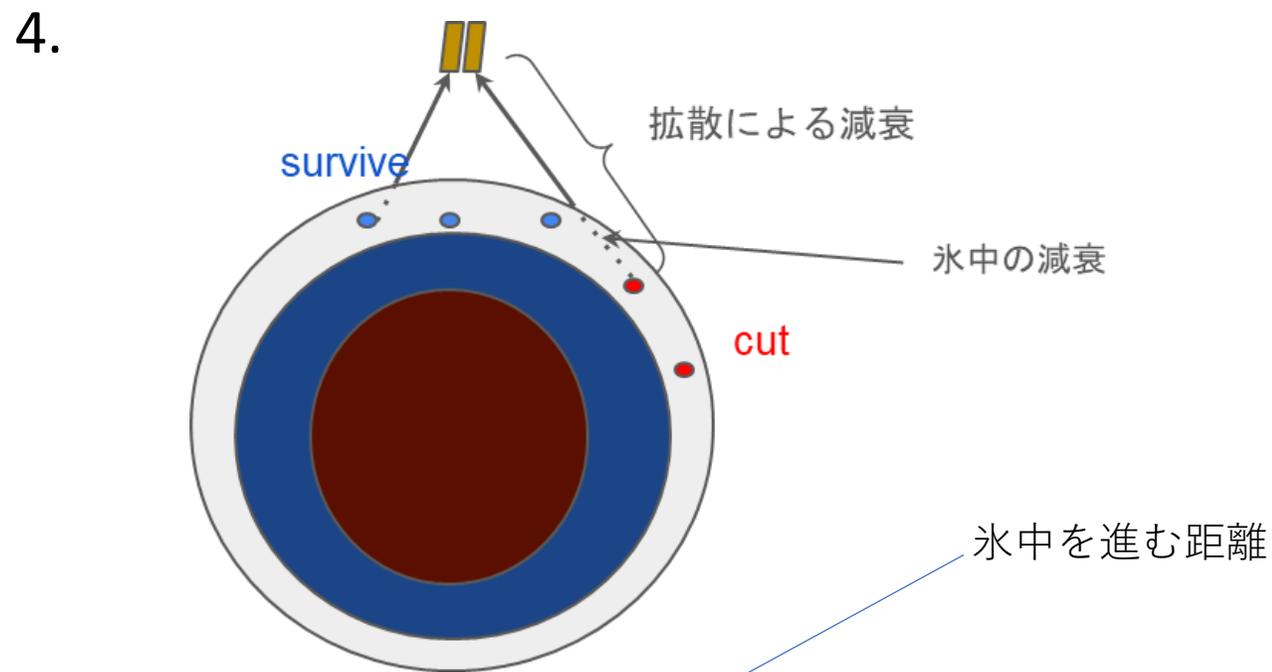
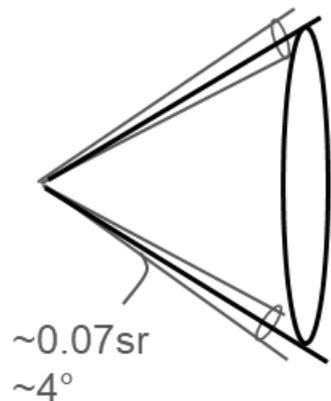


電波は地殻や海を伝搬しないので、下部の反応地点はカットする

3・4. コーン方向・減衰によるカット



各点にランダムに進行方向
 が与えられている
 →Cherenkovコーン方向が定まる
 →コーンがアンテナに向かうものを
 取り出す



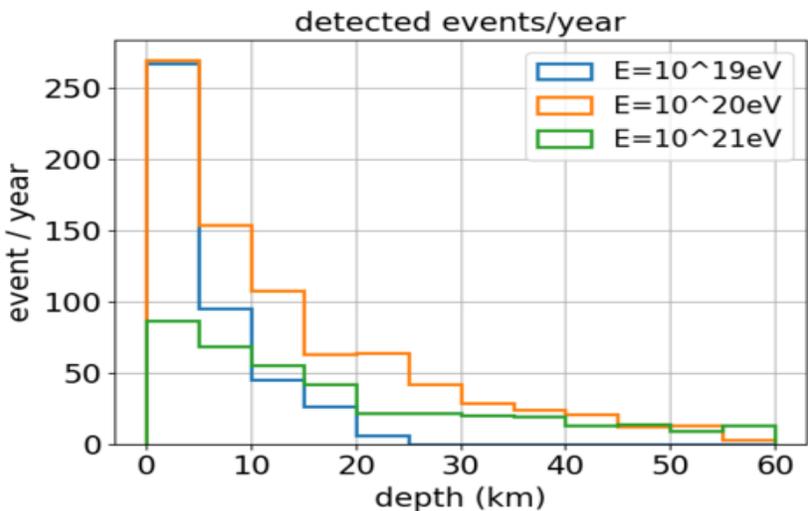
電波振幅 $\propto e^{-\frac{l_{ice}}{l}}$

シグナル強度 (Jy) $\propto e^{-\frac{2l_{ice}}{l}} / l_{P_to_A}^2$

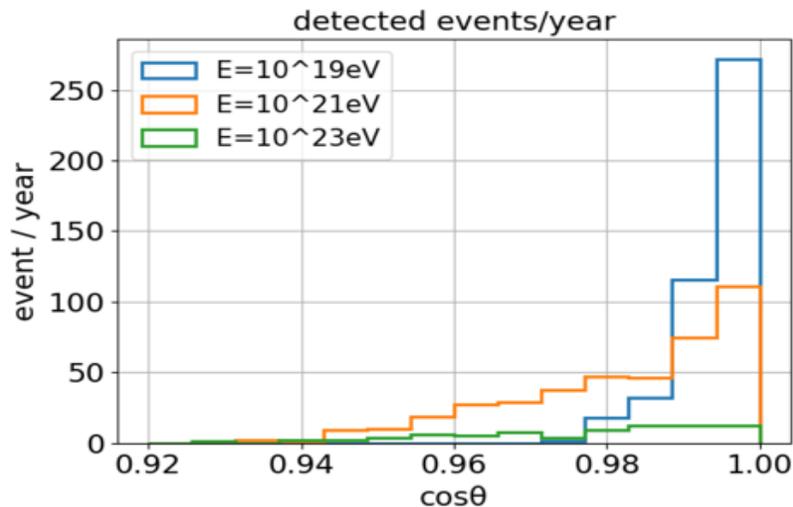
ポイントからアンテナまでの距離

取得データの確認

100 km ice, 100 km antenna altitude

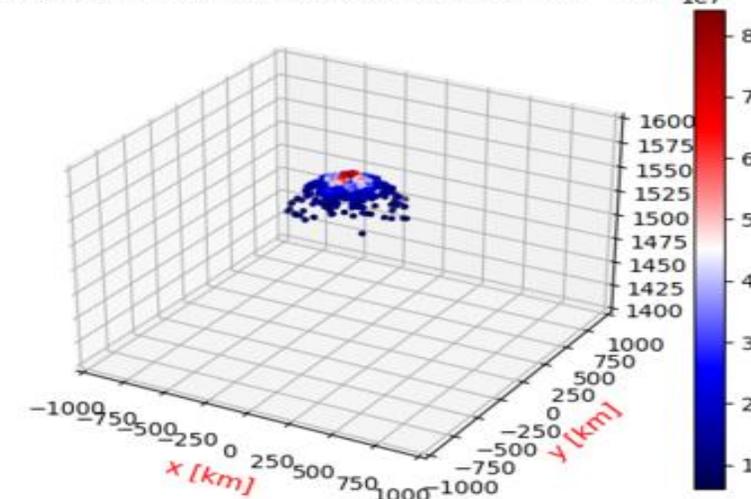


検出イベントのエネルギー別深さの分布

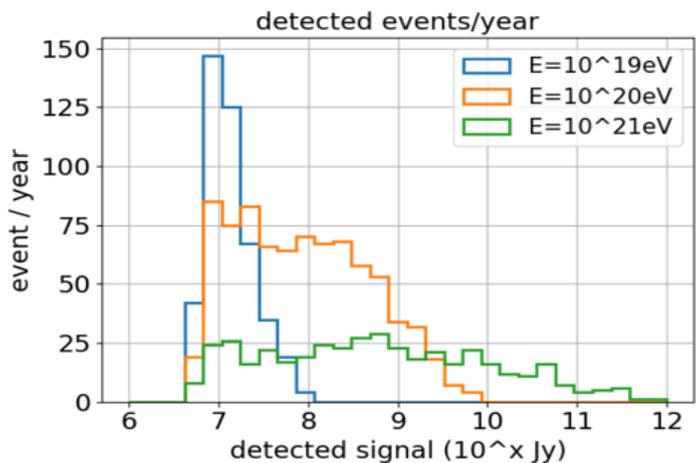


検出イベントのエネルギー別cosθの分布

location of detected events for 10^{19}eV



検出イベントの反応地点エネルギーカラープロット



検出signalのエネルギー分布

エネルギーが高くなれば、
より深い／遠い地点から
もシグナルが届いている

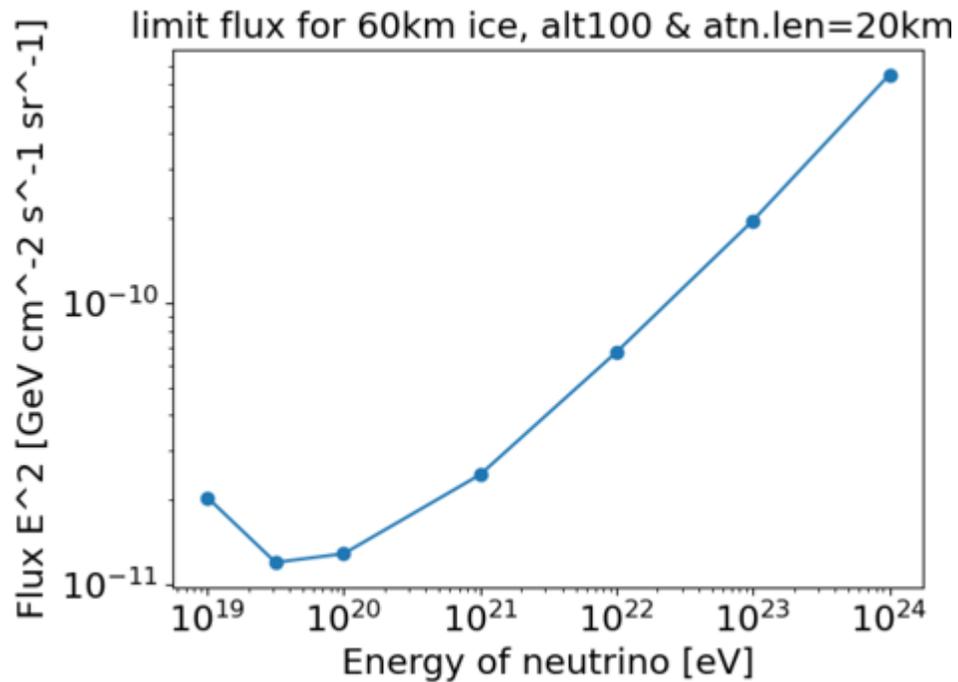


高いシグナル反応点はアンテナ
に近い表面付近に分布

感度曲線とパラメタ別の比較

感度曲線→エウロパで1年に1イベント以上観測する
ため必要なニュートリノフラックス

氷の厚さ60 km, 減衰長20 km, アンテナ高度100 kmのとき



エウロパは詳細が未解明
様々なモデルで実験感度を見積もる必要がある
狙うエネルギー帯によってアンテナの適正高度
も変化するかもしれない

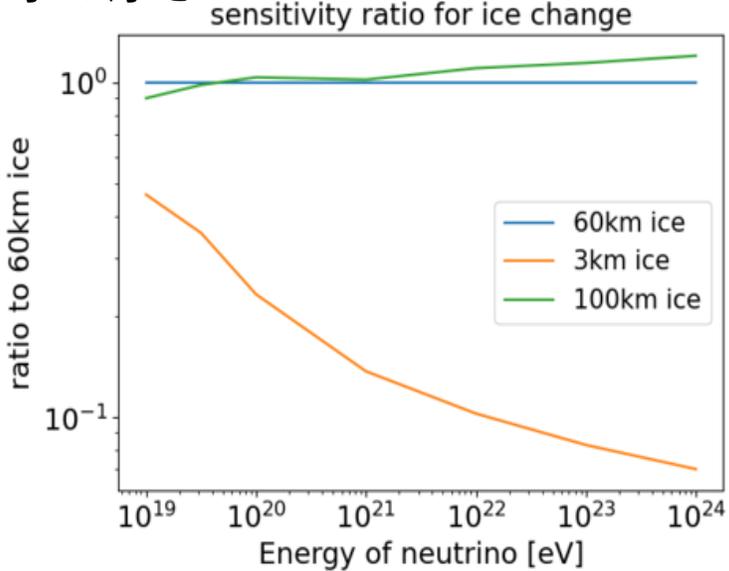
パラメタを変えて
比をとる



アンテナ高度	100, 300, 500 km
氷厚さ	3, 60, 100 km
減衰長	氷 20km, 1 km
海+氷	80 km, 150 km

感度曲線とパラメタ別の比較

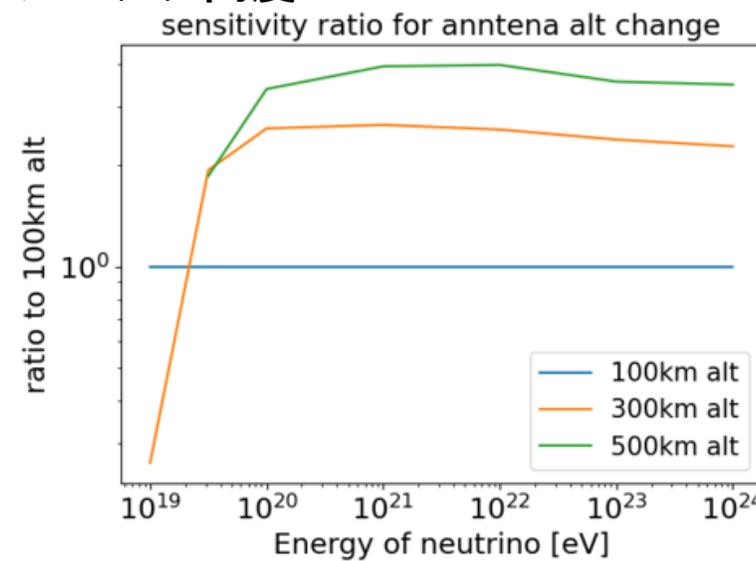
氷の厚さ



100 km : 差はない
 →60 km以深の反応点は検知にあまり寄与しない

3 km : 特に高エネルギー帯の検知で感度が下がる

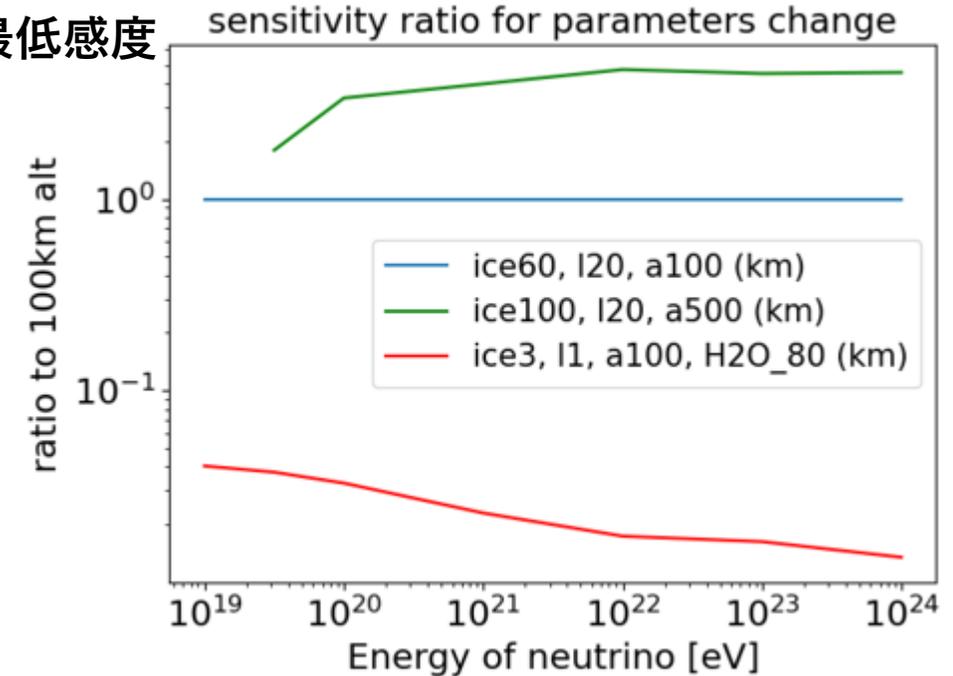
アンテナ高度



高度大 :
 高エネルギーで高感度
 →視野角の広がりによる
 搜索体積の拡大

低エネルギーで低感度
 →拡散減衰が効く

最高/最低感度



	高感度	感度差 約100倍	低感度
氷	100 km	↔	3 km
減衰長	20 km		1 km
アンテナ高度	500 km		100 km
氷+海	150 km		80 km

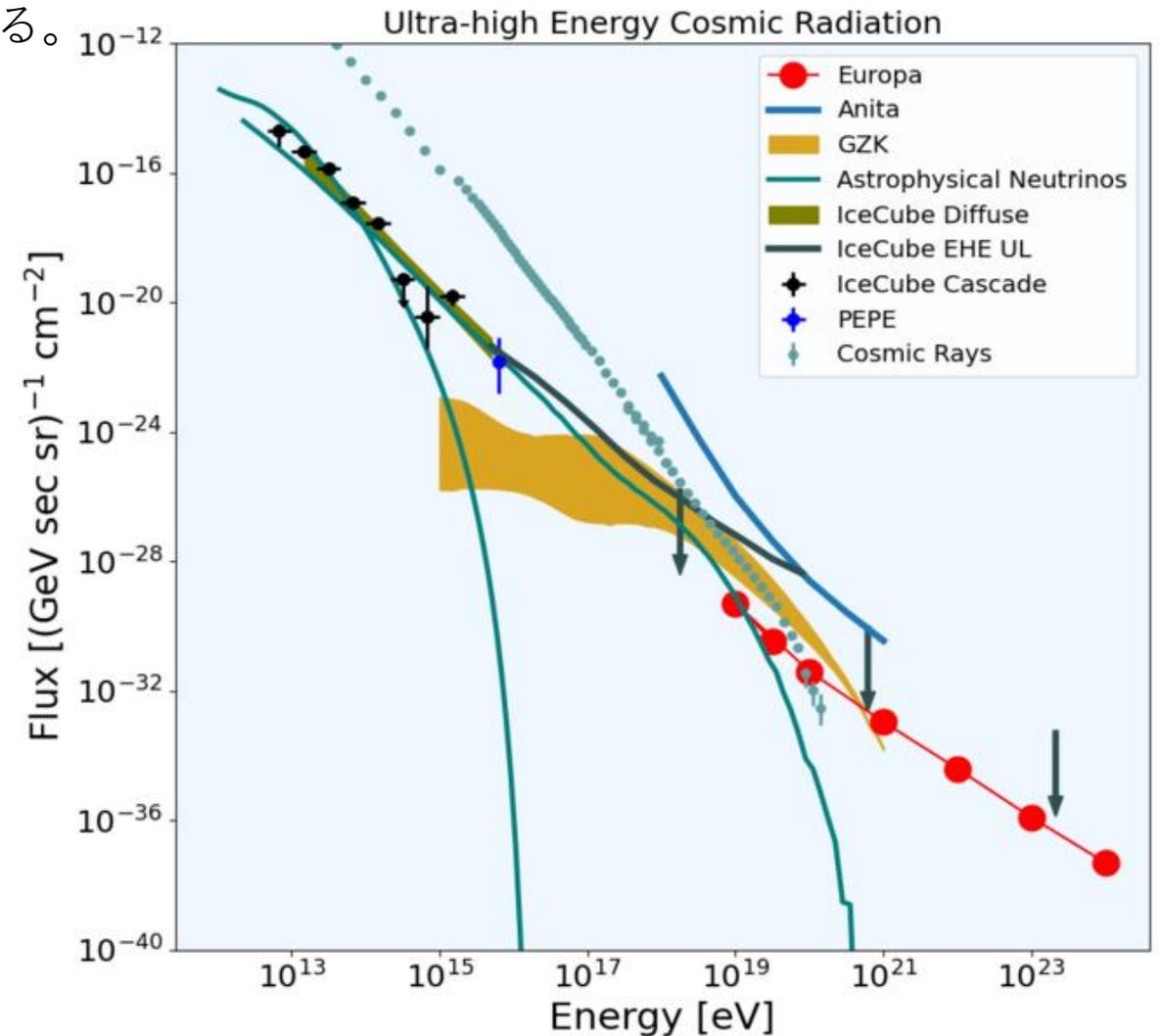
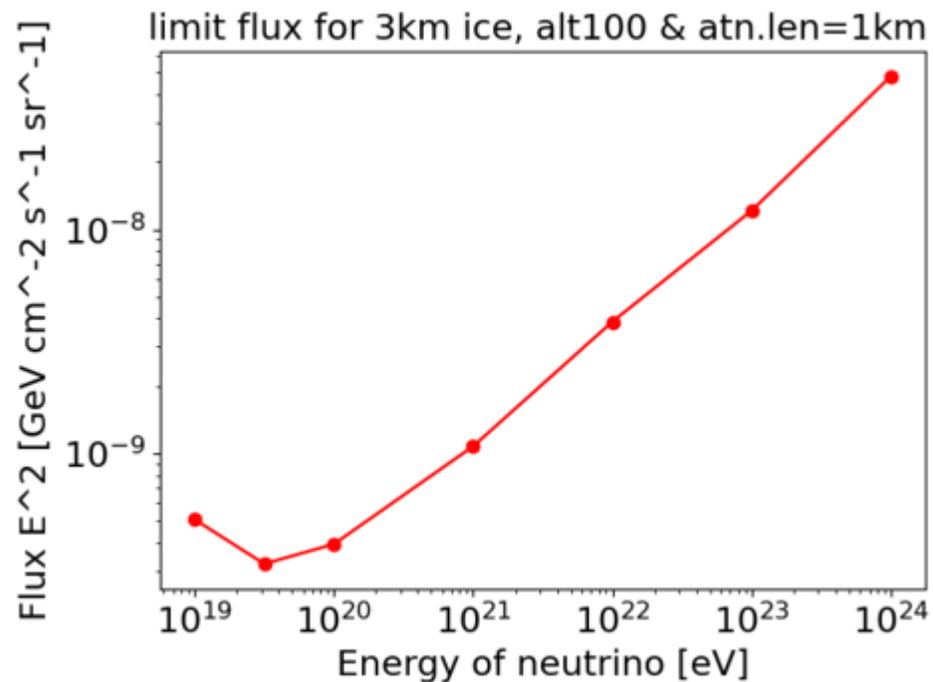
最低感度設定の下での結果

Moore(2000)らによって、氷の様々なモデルが提唱されている。
→ $l = 2$ km は十分現実的 (Shoji+ 2011)

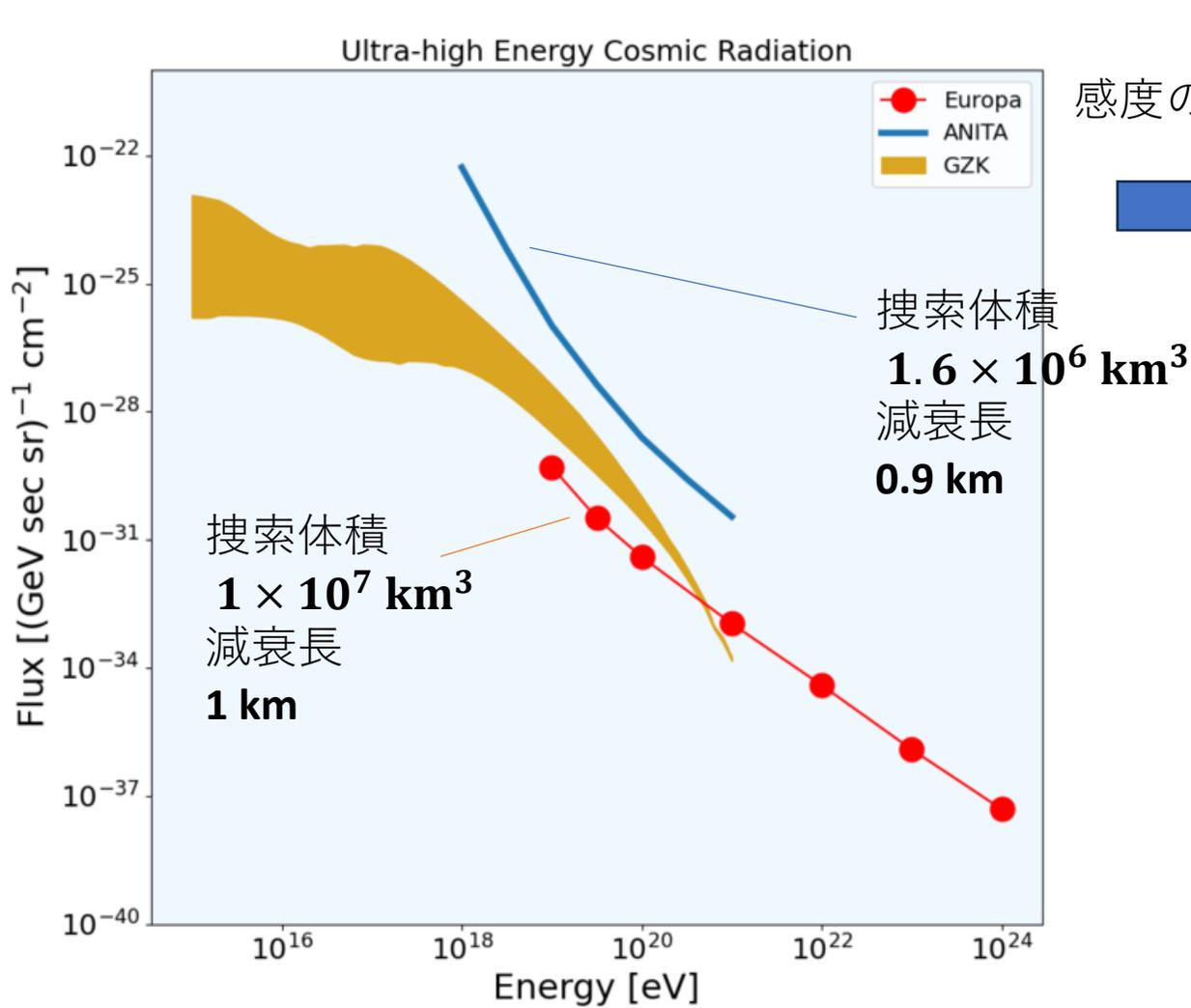
設定

- 電波減衰長 $l = 1$ km
- 氷層と海層の厚さ 80 km
- 岩殻の密度=地球の平均密度 $\sim 5g/cm^3$

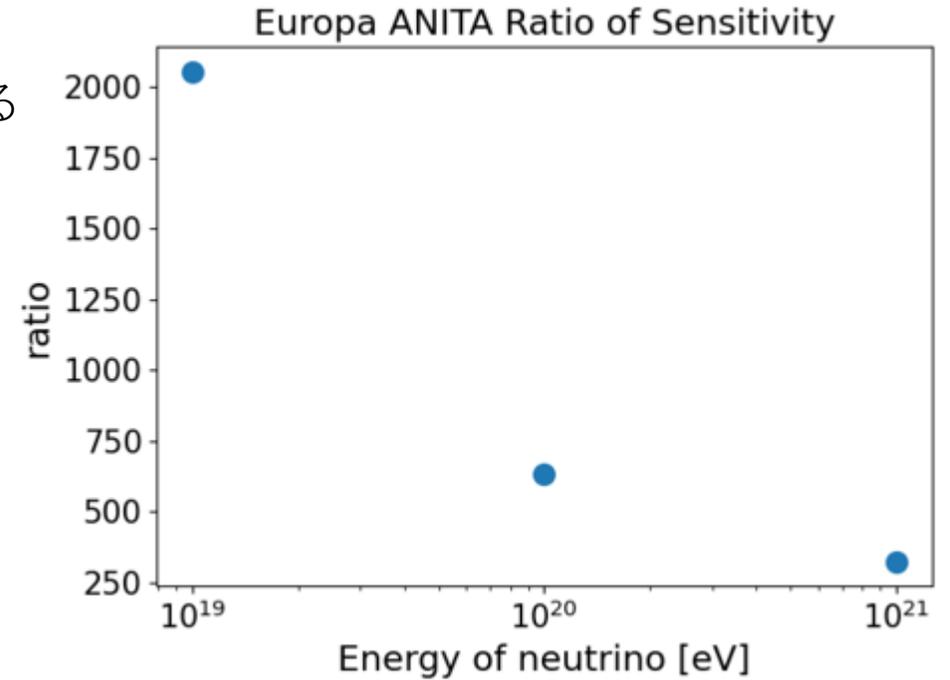
結果



最低感度設定の下での結果



感度の比をとる



- ANITAに比べて、250倍から2000倍の高感度
- GZKモデルを1~2桁程度以上下回る感度曲線

エウロパの性質

- 氷の温度が低く、電波のエネルギーが減衰しにくい
- 周りがすべて氷で覆われている（地表に海や陸がない）



アンテナの高度を上げることで視野角を増やすことができ、
搜索体積を広げることが可能

考慮しなかった要素

- アンテナのノイズ
- アンテナの感度の角度依存性
- ニュートリノフレーバーによる電波強度の違い
- 反射や屈折の効果

エウロパでのシミュレーションが超高エネルギーニュートリノ探索において既存の実験より格段に感度をもてた

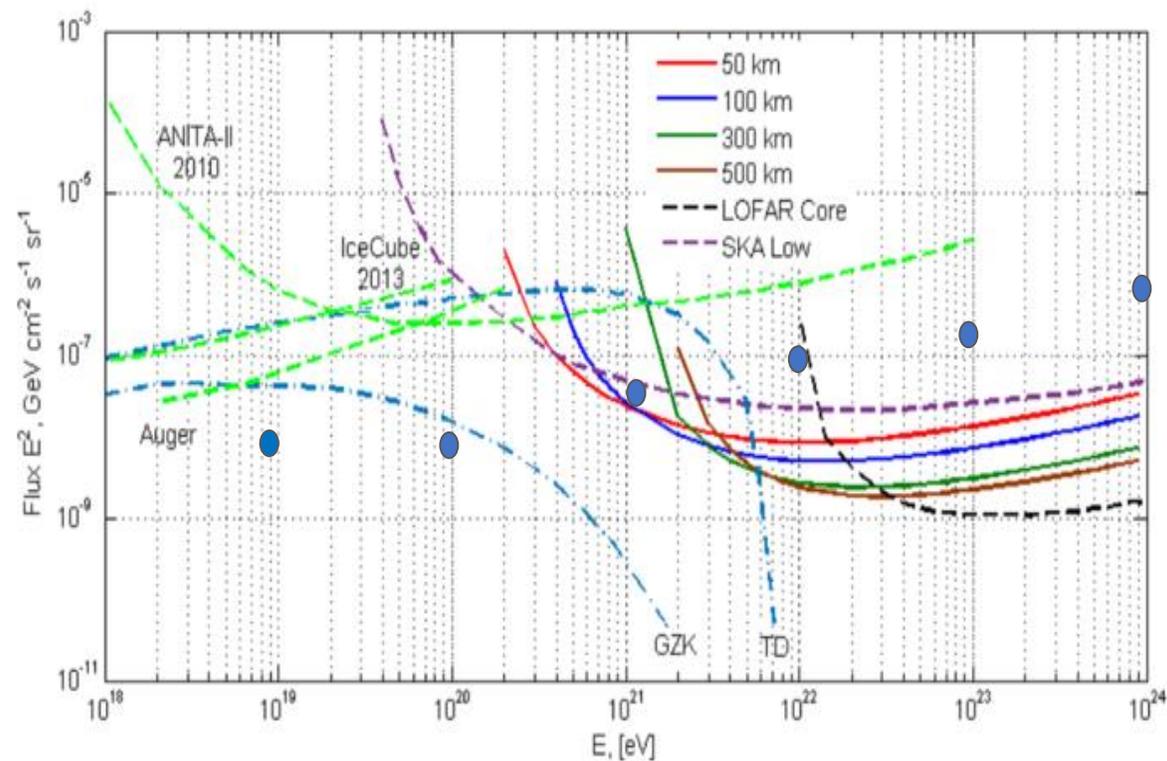
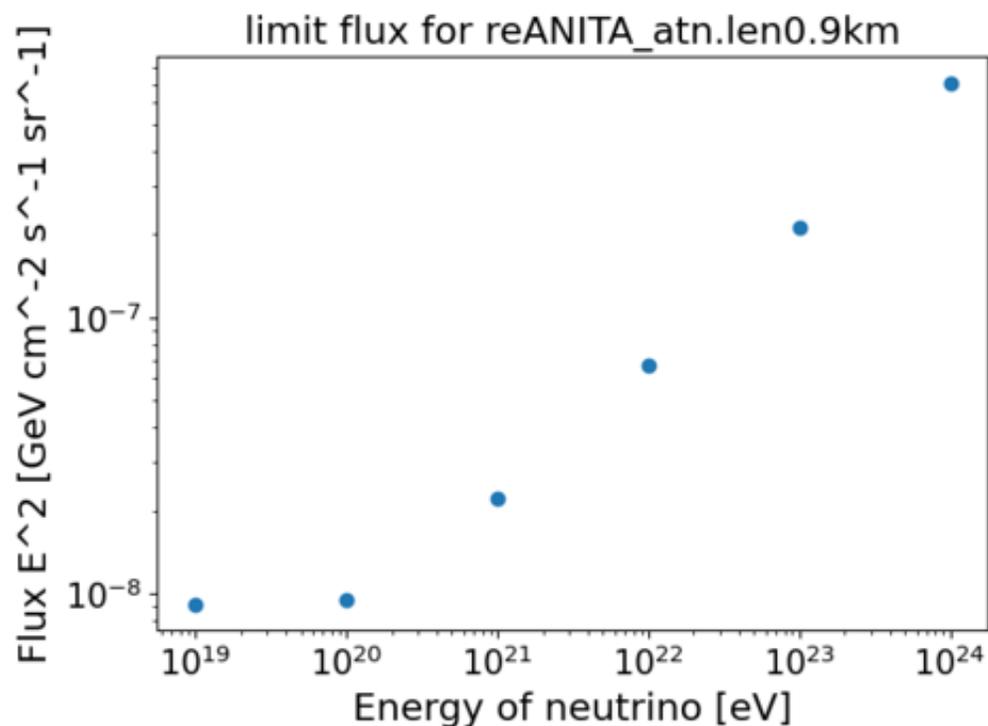
→今後、アンテナの詳細なつくりやニュートリノフレーバーの考慮により感度が1~2桁程度おちたとしても、エウロパでの超高エネルギーニュートリノ探索には希望が持てる

- 超高エネルギー宇宙線やその源を探るうえで、超高エネルギーニュートリノを捕まえることは重要なミッションである。
- 木星衛星エウロパは、いまだ見つかっていない超高エネルギーニュートリノの探索場所としてふさわしいのではないかと考え、エウロパ内でニュートリノの相互作用により発生する電波を衛星で探知する実験についてモンテカルロシミュレーションを行った。
- 本シミュレーションにおいては、氷が薄く減衰長が南極と同程度だった場合でも先行実験ANITAの1000倍程度の感度を持つことが分かり、理論的なニュートリノフラックスモデルのもとで十分な検出可能性が示唆された。特に $10^{19} \sim 10^{20}$ eVのニュートリノに対して高い感度を持つ。
- 今回考慮に入れなかったパラメタによって感度が数十倍落ちたとしても既存の実験より高感度であり、超高エネルギーニュートリノ探索について期待が持てる。
→他の計算方法、実験結果と比較してシミュレーションの妥当性を保ちつつこれを確かめることが次の課題である。

ANITA II との比較

南極を仮定して計算し、その結果を実際の電波観測実験ANITAと比較する。

設定



実験/シミュレーション別
超高エネルギーニュートリノ感度曲線

According to Miller et.al.,

SNR > 10

($\sigma=8 \rightarrow$ probability $\sim 10^{-16}$)

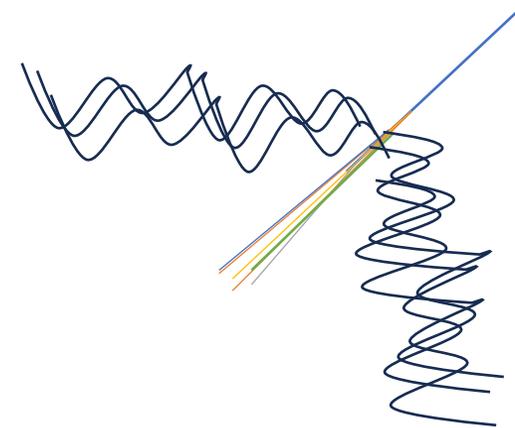
10ns/event $\rightarrow \sim 10^{15}$ events/ year)

Noise

- thermal noise of Europa
- receiver noise \leftarrow ignored for simplification
- radio frequency noises in the Jupiter environment
 - burst emission at lower frequency \leftarrow different range of frequency
 - thermal emission from the Jupiter \leftarrow different spectral characteristics
 - synchrotron emission in Jupiter's magnetosphere \leftarrow enter from off axis

Noise to be considered \rightarrow **thermal noise from Europa only**

$$kT/A = 6 \times 10^5 \text{ Jy} \quad (T = 100\text{K}, A = 0.25\text{m}^2)$$



主な検出方法

- {

可視光域Cherenkov光 (IceCube、カミオカンデ など)

電波域Cherenkov光 (ARA, ANITAなど)

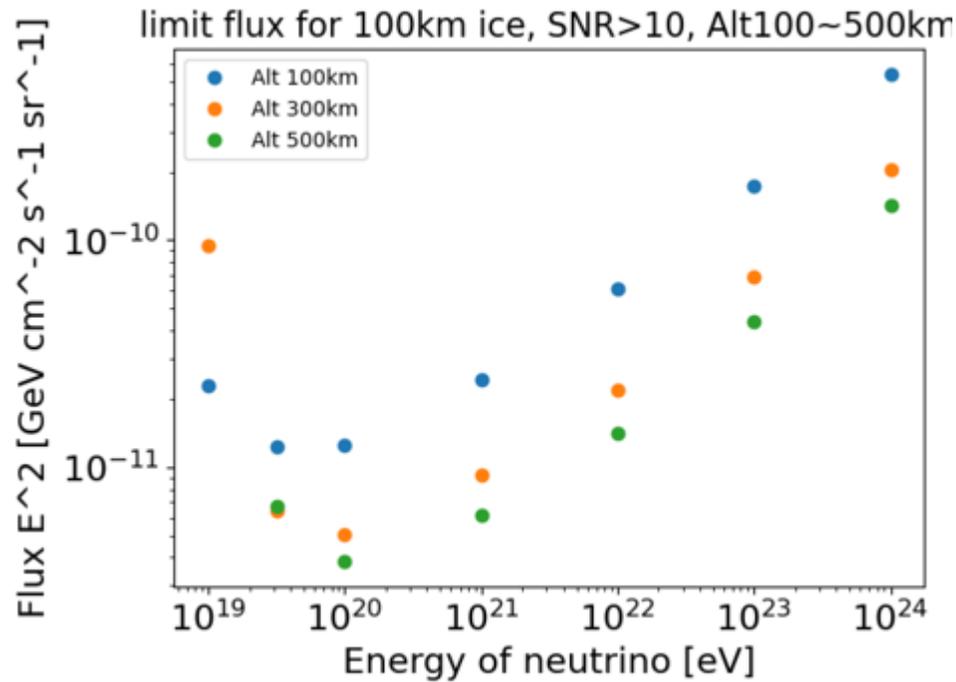
楽観的設定の下での結果

- 電波減衰長 $l = 20 \text{ km}$
- 氷層と海層の厚さ 150 km

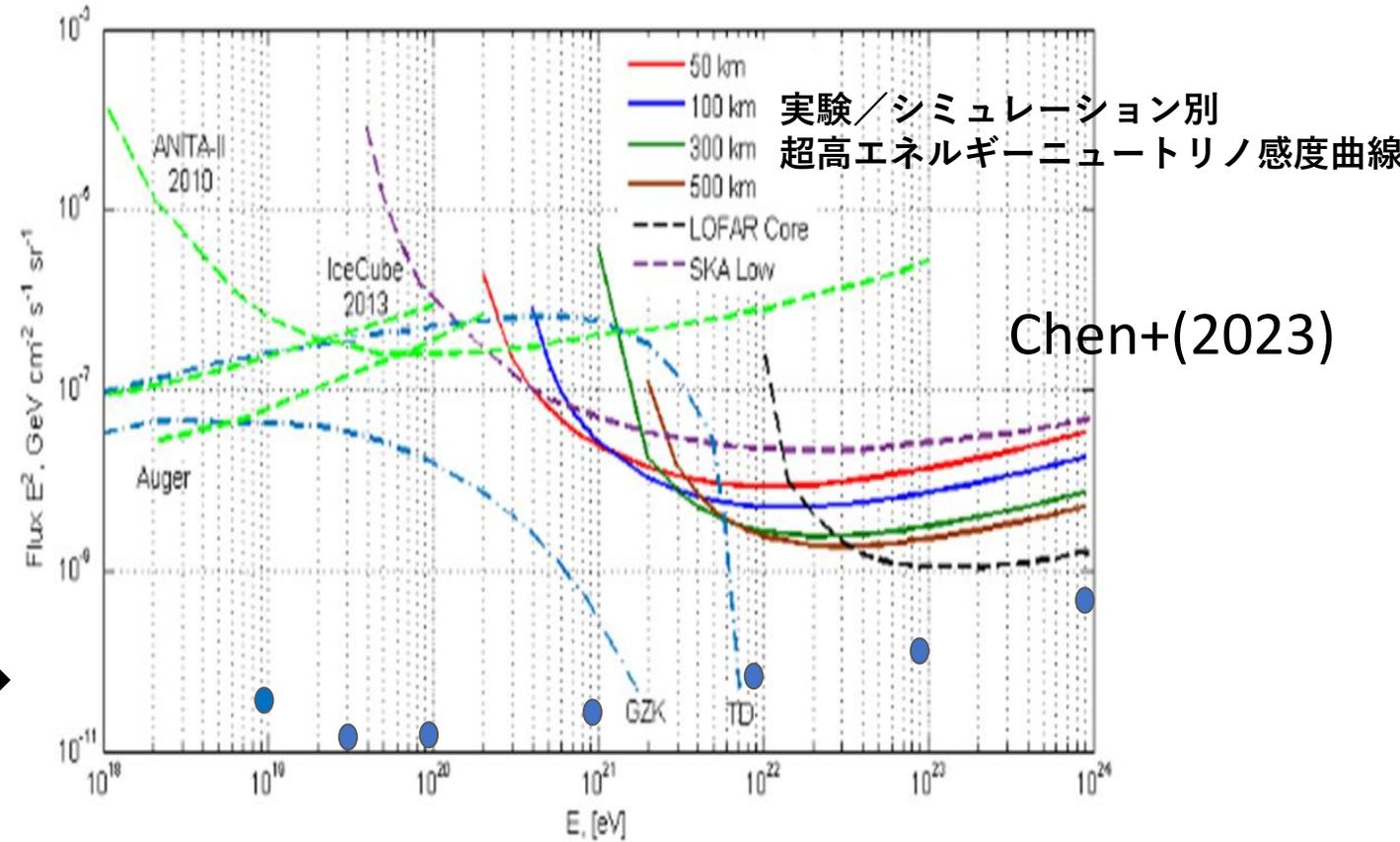


1年に1イベント以上観測する
 最低限必要なニュートリノフラックスの図
 (フラックスが小さければ実験の感度がいい)

結果



比較



既存実験や理論と比較して感度はかなりいいといえる
 アンテナ高度は高いほど視野角が増え感度がよくなるが、
 低エネルギー帯でSNRを超えられなくなり観測されない

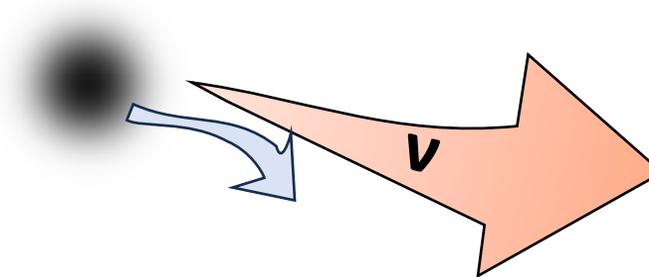
ニュートリノはX線や γ 線、宇宙線などと異なり電磁相互作用をしない

→遠方宇宙からも直接飛来することが可能なうえ、発生源の方向同定もしやすい

→ニュートリノ発生源の詳細な情報を得ることができる

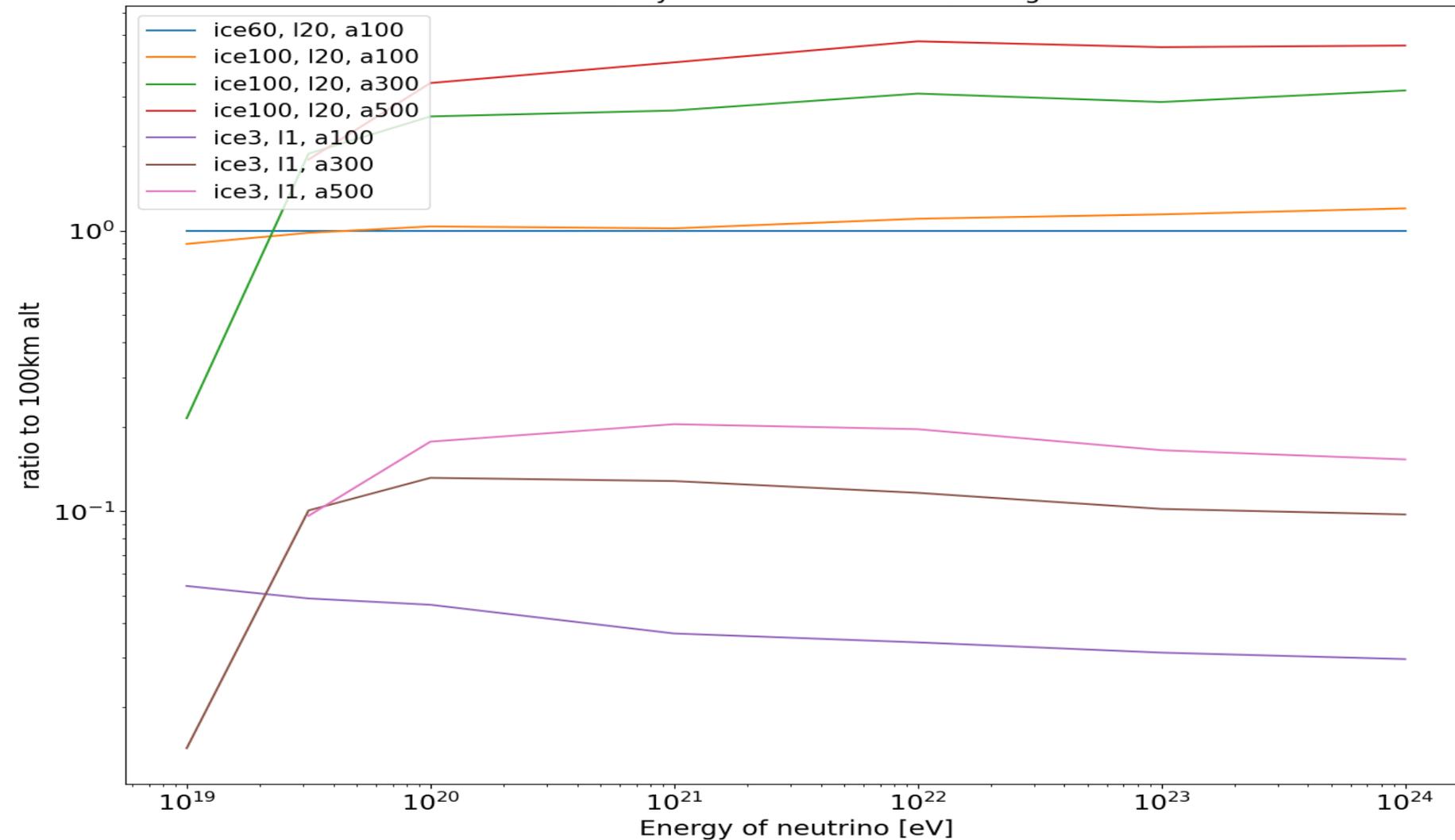
主な検出方法

- 可視光域Cherenkov光 (IceCube、カミオカンデなど)
- 電波域Cherenkov光 (ARA, ANITAなど)



感度曲線とパラメタ別の比較

sensitivity ratio for antenna alt change



パラメタの設定による感度の違い

最も高い設定

氷 100 km

減衰長 20 km

アンテナ高度 500 km



約100倍の感度差

最も低い設定

氷 3 km

減衰長 1 km

アンテナ高度 100 km

