

XMASS実験：季節変動による暗黒物質探索

山下雅樹

東京大学宇宙線研神岡宇宙素粒子研究施設

他 XMASS collaboration

2016/01/07 新学術「地下素核研究」第2回超新星ニュートリノ研究会

Contents

1.暗黒物質検出と季節変動

2.XMASS 実験

3.2013年-2015年データ取得状況

4.季節変動解析

5.XMASS実験季節変動初めての成果

- model dependent (WIMP)の結果

- model independentの結果

6.まとめ

暗黒物質観測の歴史



•1933

F. Zwicky

かみの毛座銀河団の質量をビリアル定理から見積も観測と大きな食い違い (400倍!) を指摘 → 質量欠損 (暗黒物質)

•1970年後半

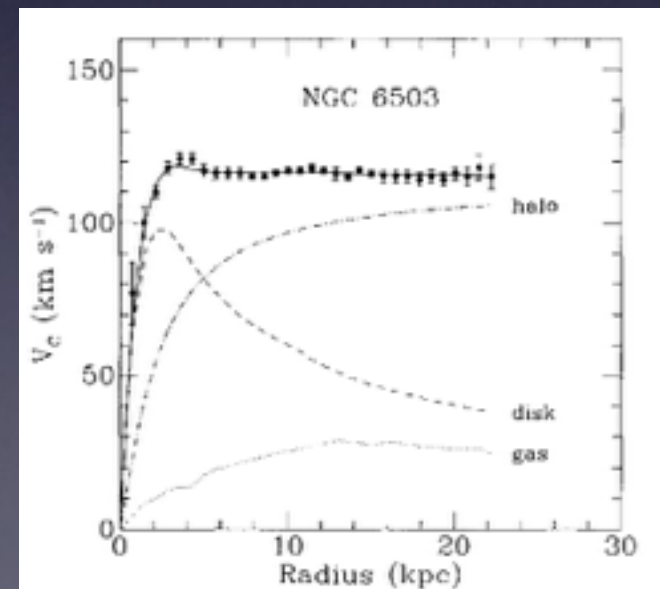
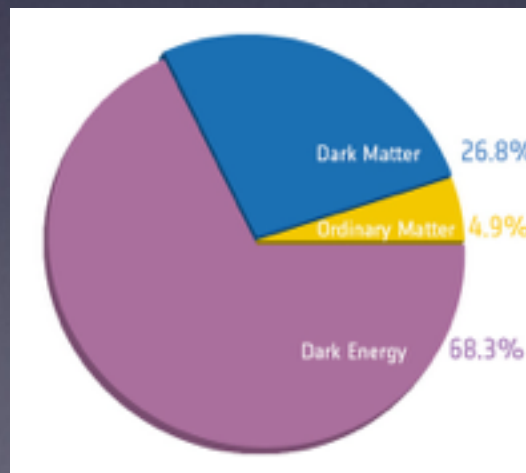
Vera Cooper Rubin 渦巻き銀河の回転速度

観測より大きな質量が存在しないと銀河の運動が説明できない。

•1989-現在

宇宙マイクロ波背景放射による観測

•(人工衛星:COBE, WMAP, Planck)

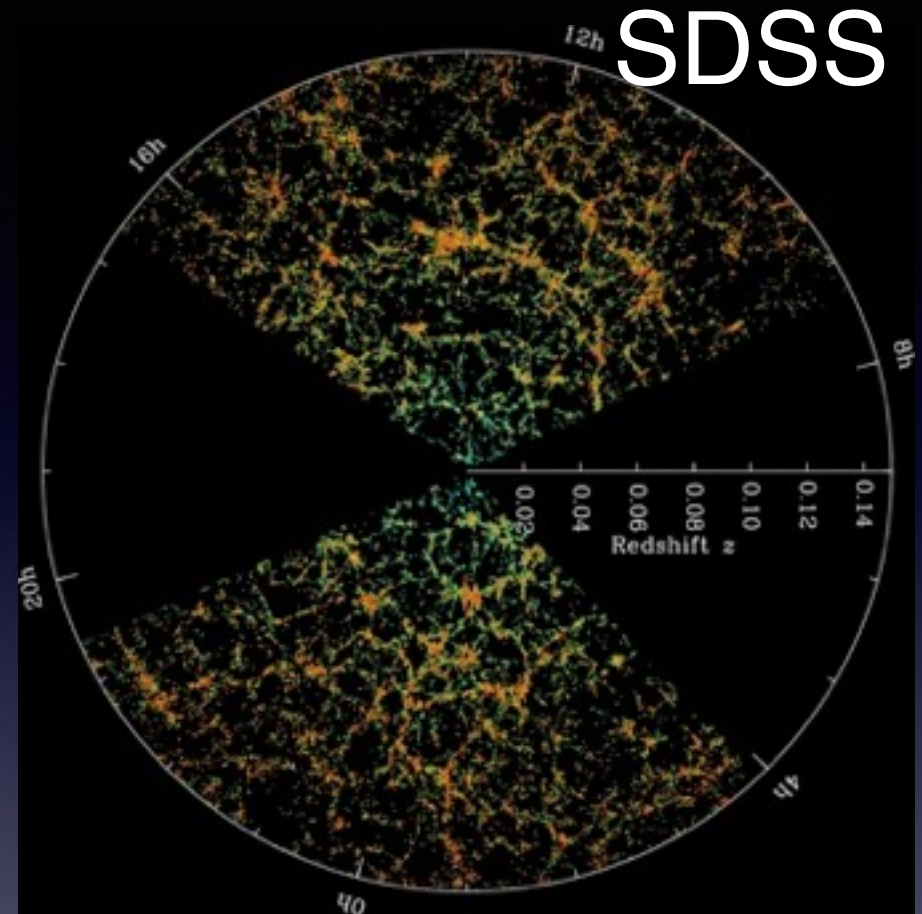


Masaki Yamashita

暗黒物質の証拠



弾丸銀河の衝突



大規模構造

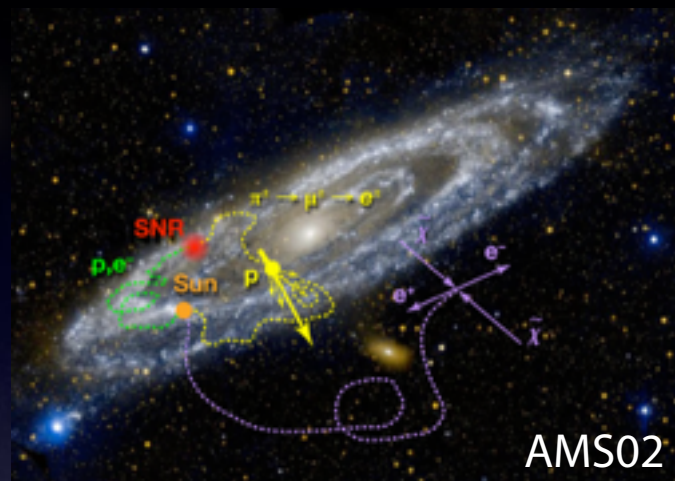
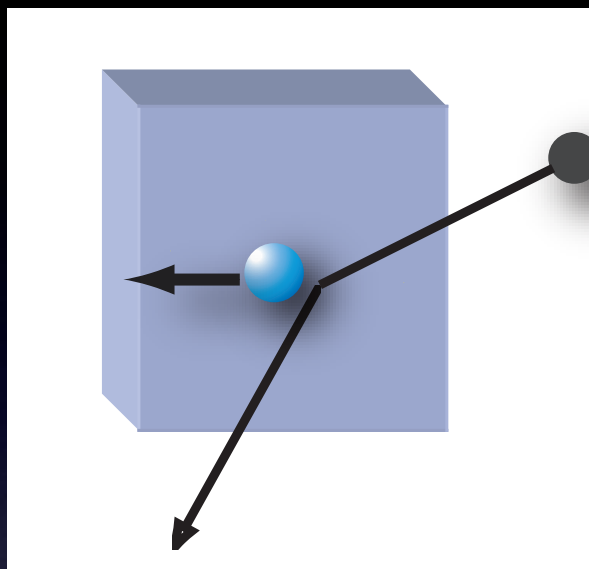
暗黒物質のおかげで星や銀河が形成
その正体は？
標準理論の粒子では説明できない。
新粒子の存在？

暗黒物質探索のアプローチ

直接探索

間接探索

加速器探索

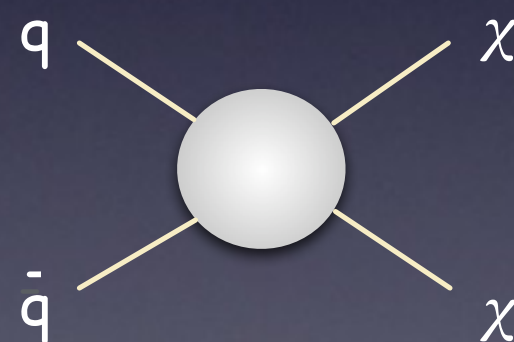
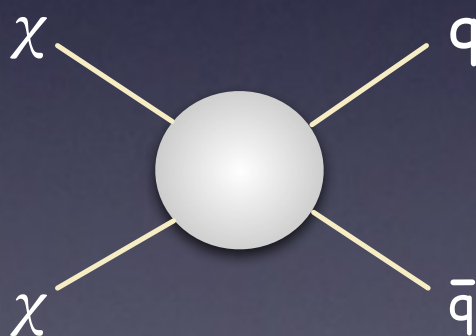
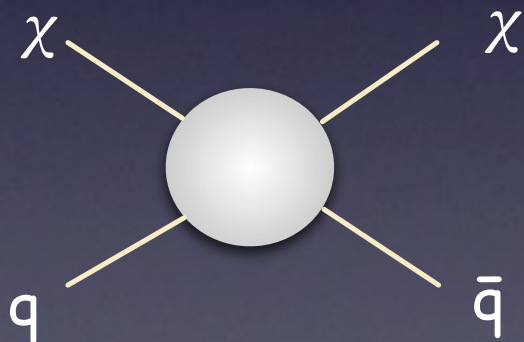


LHC/ILC

散乱

対消滅

生成

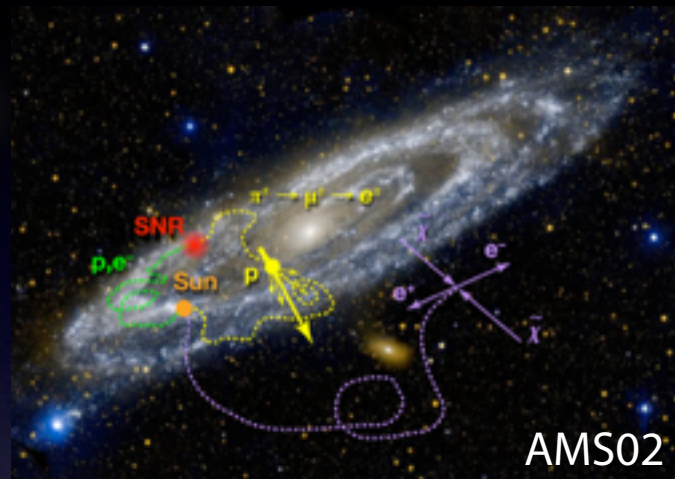
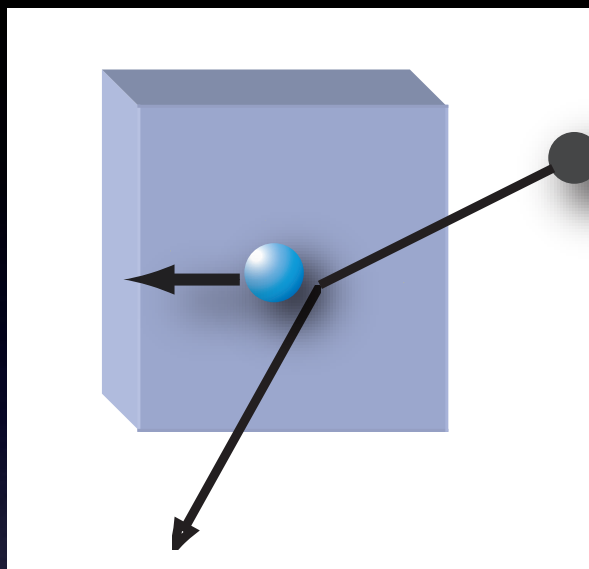


暗黒物質探索のアプローチ

直接探索

間接探索

加速器探索



LHC/ILC

散乱

対消滅

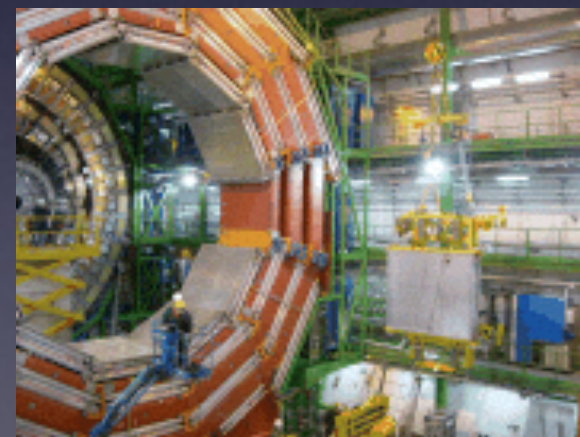
生成



地下実験室で
とらえる



衛星をつかって
痕跡を探すなど



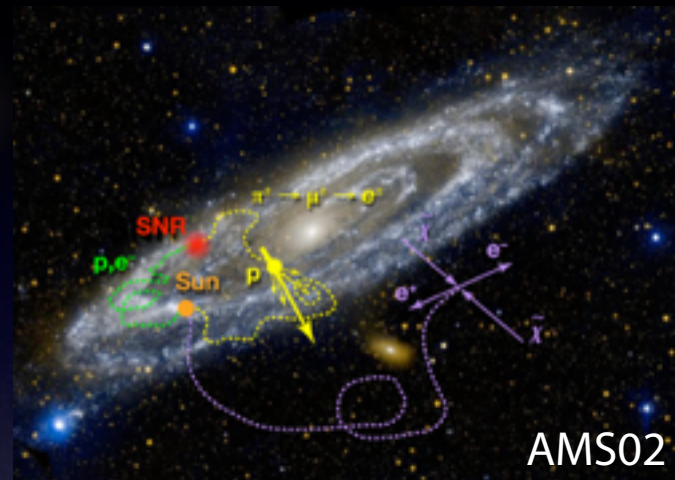
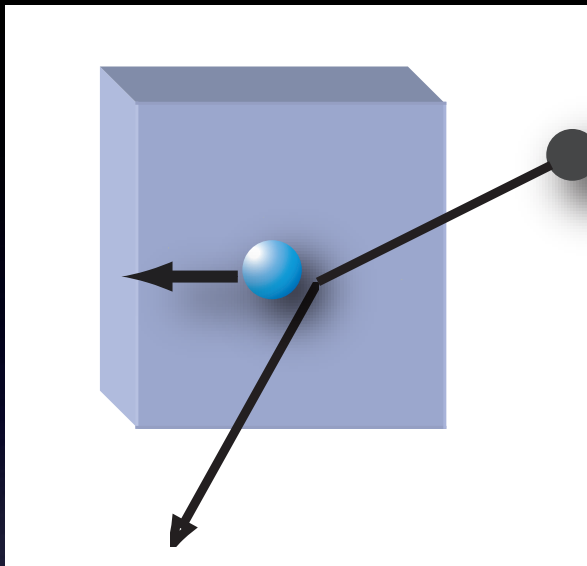
大きなエネルギーを
つくって無理やりつくる

暗黒物質探索のアプローチ

直接探索

間接探索

加速器探索



LHC/ILC

散乱

対消滅

生成



地下実験室でとらえる



衛星をつかって
痕跡を探すなど



大きなエネルギーを
つくって無理やりつくる

Direct Detection Principle

WIMPs elastically scatter off nuclei in targets, producing nuclear recoils.

Dark Matter
(WIMP)



Deposit Energy
 $E_{\text{recoil}} \sim < 100 \text{ keV}$

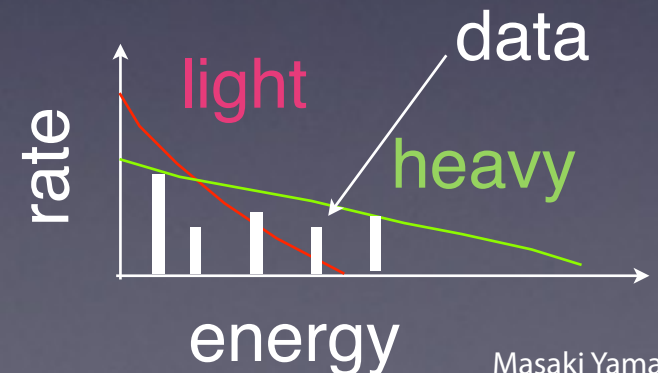
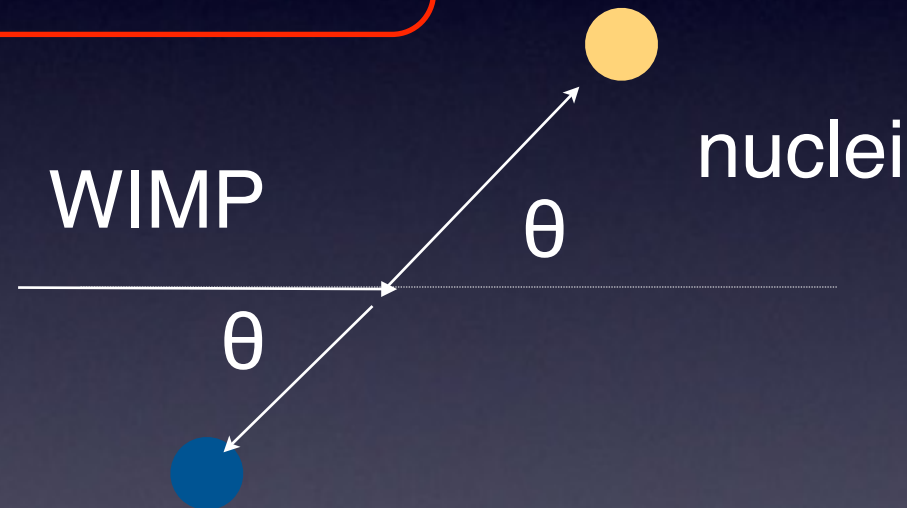


For example, assuming

$M_W = 100 \text{ GeV}/c^2$, $M_T = 100 \text{ GeV}/c^2$, $r = 1$

WIMP velocity: $v \sim 220 \text{ km/sec}$

$$E_R = \frac{1}{2} M_W \beta^2 c^2$$
$$= 30 \text{ keV}$$



観測される頻度

Measuring the deposited energy due to elastic scattered nuclei by WIMP.

Expected spectrum:

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{R_0 F^2(E_R)}{E_0 r} \frac{k_0}{k} \frac{1}{2\pi v_0} \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{1}{v} f(\mathbf{v}, \mathbf{v}_E) d^3\mathbf{v}$$

検出器

暗黒物質や
地球の運動力学

motion dynamics

Maxwellian distribution for DM velocity is assumed.

v : velocity onto target,

v_E : Earth's motion around the Sun

R_0 : Event rate

F : Form Factor
(depends on atomic nuclei)

暗黒物質の密度や断面積

$$R_0 = \frac{377}{M_\chi M_N} \left(\frac{\sigma_0}{1\text{pb}} \right) \left(\frac{\rho_D}{0.3\text{GeVc}^{-2}\text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{v_0}{230\text{km s}^{-1}} \right) \text{kg d}^{-1}$$

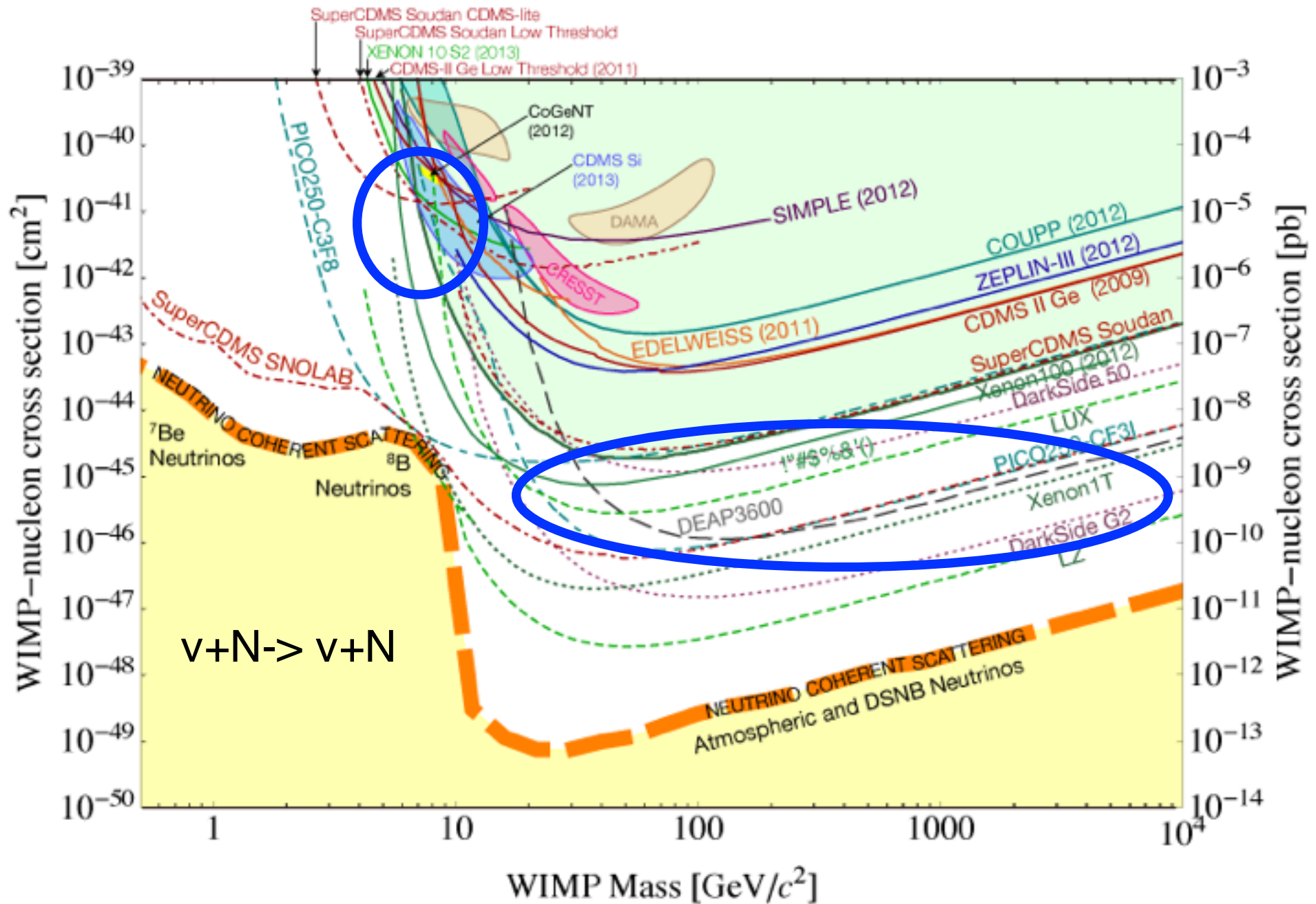
Spin independent

$$\sigma_0 = A^2 \frac{\mu_T^2}{\mu_p^2} \sigma_{\chi-p}$$

Spin dependent

$$\sigma_0 = \frac{(\lambda_{N,Z}^2 J(J+1))^{\text{Nuclear}}}{(\lambda_{p,Z}^2 J(J+1))^{\text{proton}}} \frac{\mu_T^2}{\mu_p^2} \sigma_{\chi-p}$$

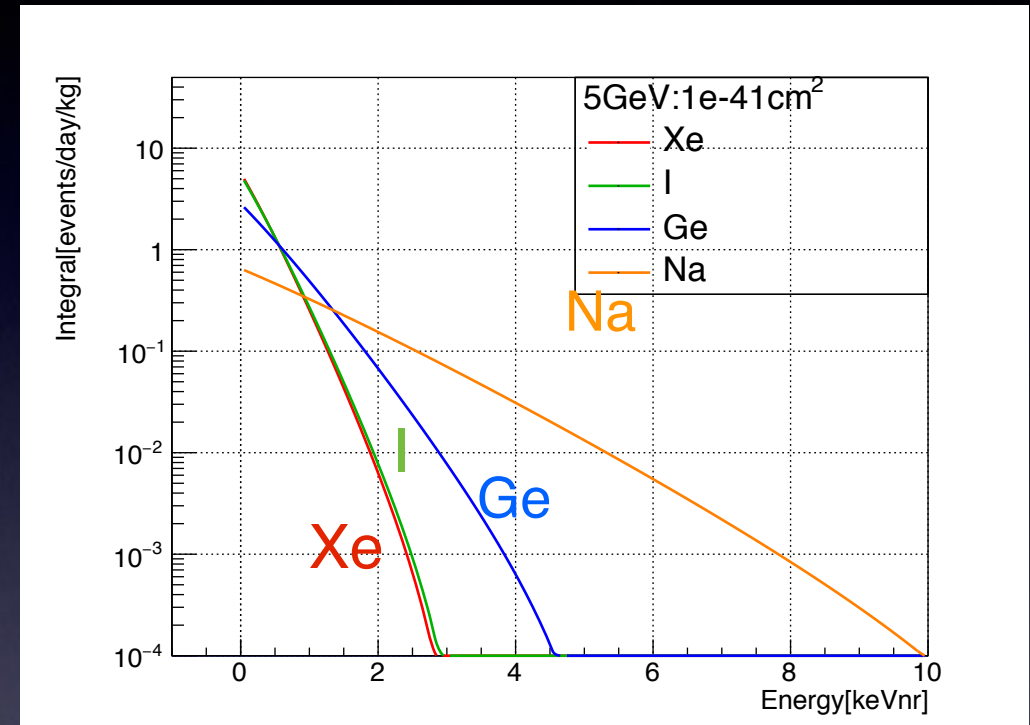
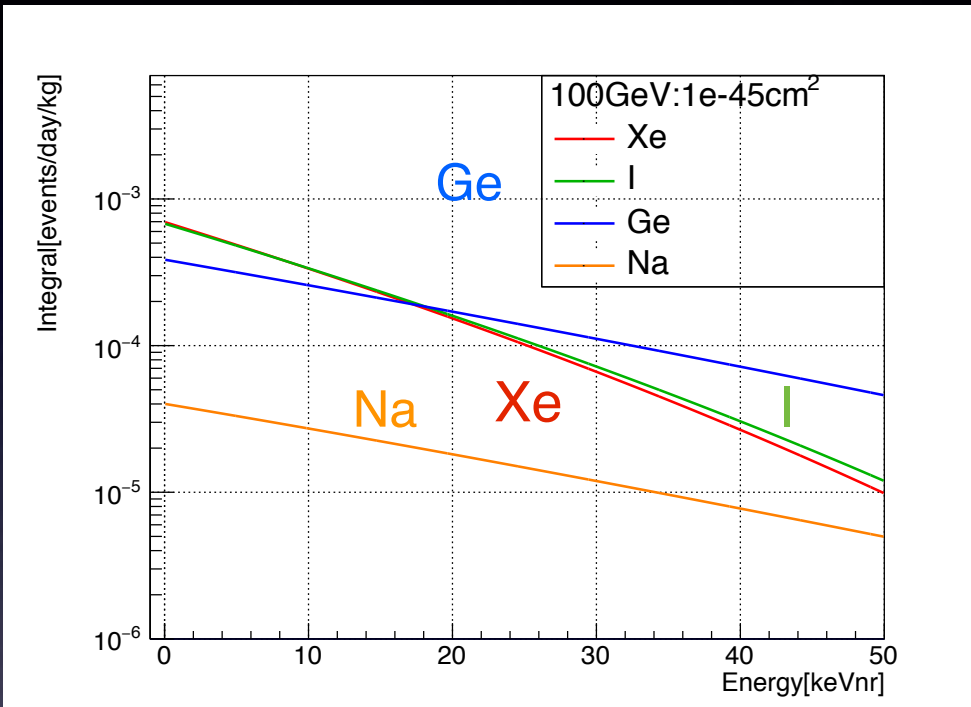
直接探索の現状と将来



Energy spectrum

100GeV Spin independent case

5GeV Spin independent case



イベントをかせぐために大型検出が有利
(> 100 kg)

エネルギー閾値が重要
反跳エネルギー $<$ 数keV

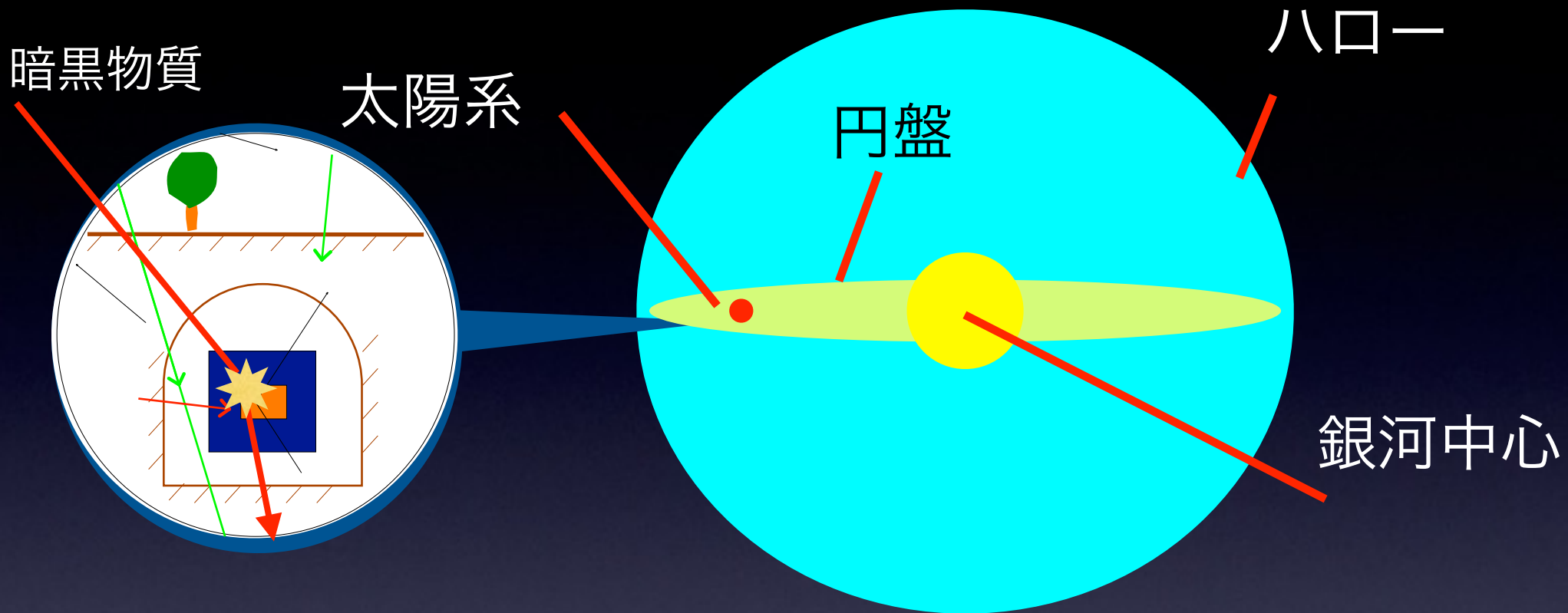
暗黒物質直接探索証拠にむけて

暗黒物質の

- 信号を数える。
- 季節変動を見る (DAMA/LIBRA) 数%
- ターゲット (核種) による違いを見る。 数倍
スピンに依存しない場合(coherent) $\sigma \propto A^2$
(複数の実験またはターゲットの入れ替え。)
- 到来方向を見る (NEWAGE, DMTPC, NITなど) 数倍 - 10倍
(白鳥座の方向に対して検出頻度の非対称性)

将来 (チャレンジ)

暗黒物質の検出原理



$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{R_0 F^2(E_R)}{E_0 r} \frac{k_0}{k} \frac{1}{2\pi v_0} \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{1}{v} f(\mathbf{v}, \mathbf{v}_E) d^3\mathbf{v}$$

R0: イベントレート
断面積やlocal DM density など

F: Form Factor
(ターゲット原子核によって異なる)

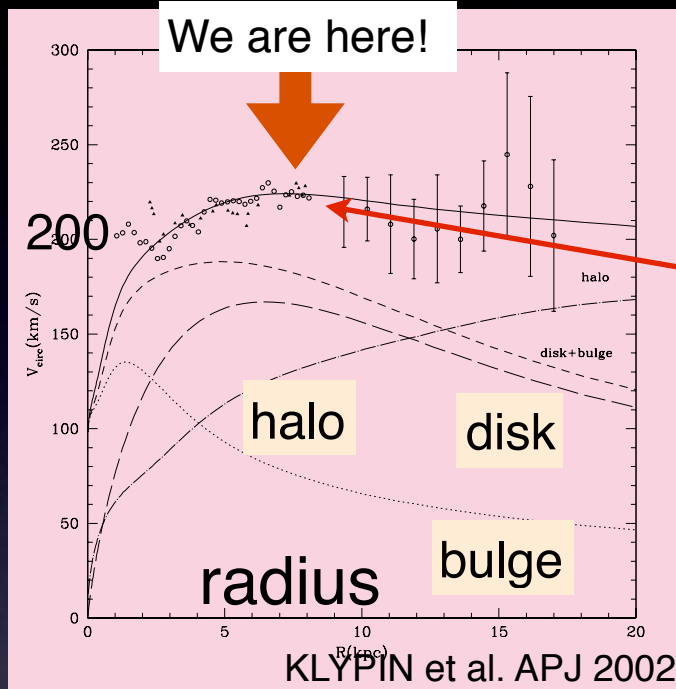
運動力学
地球の公転速度や
暗黒物質の速度分布

V: velocity onto target,
vE: Earth's motion around the Sun

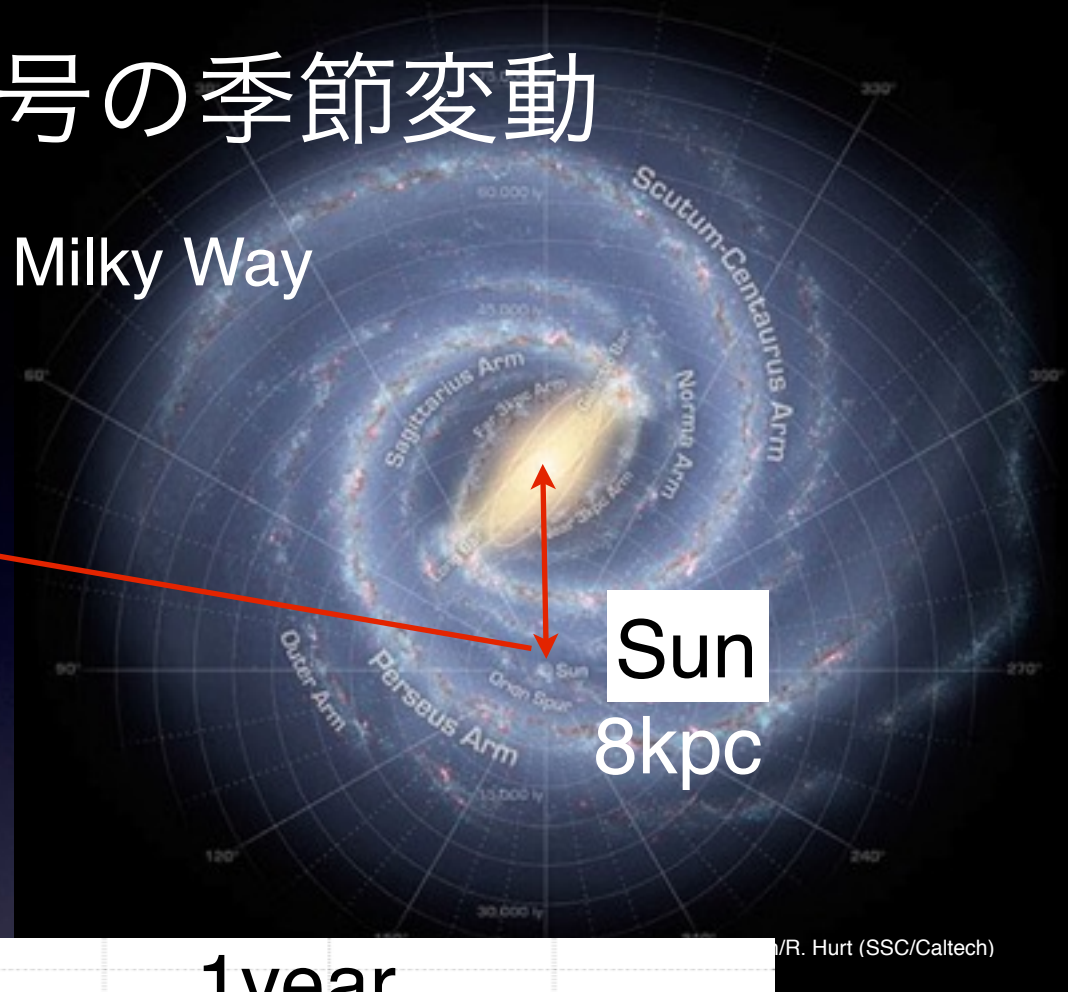
季節変動

暗黒物質信号の季節変動

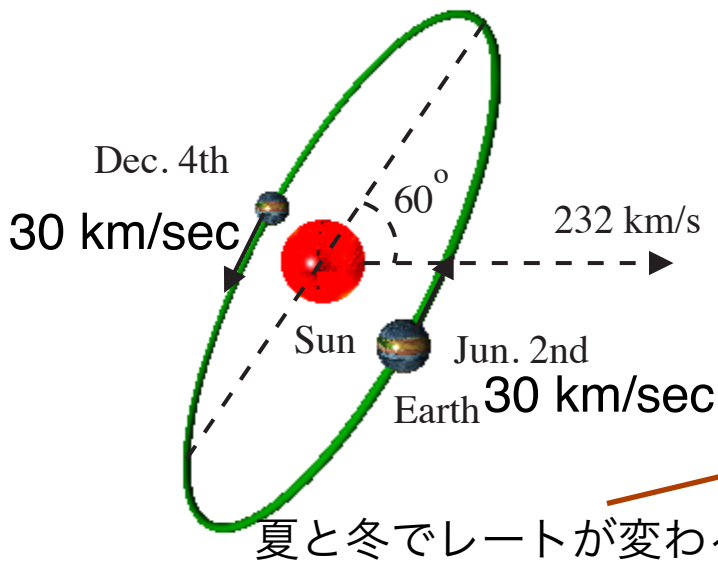
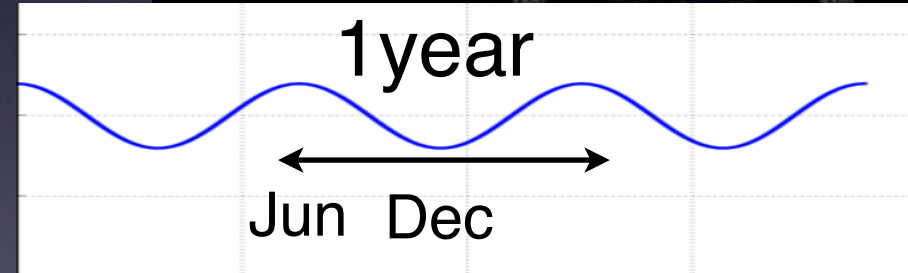
銀河の回転速度



Milky Way



velocity[km/s]



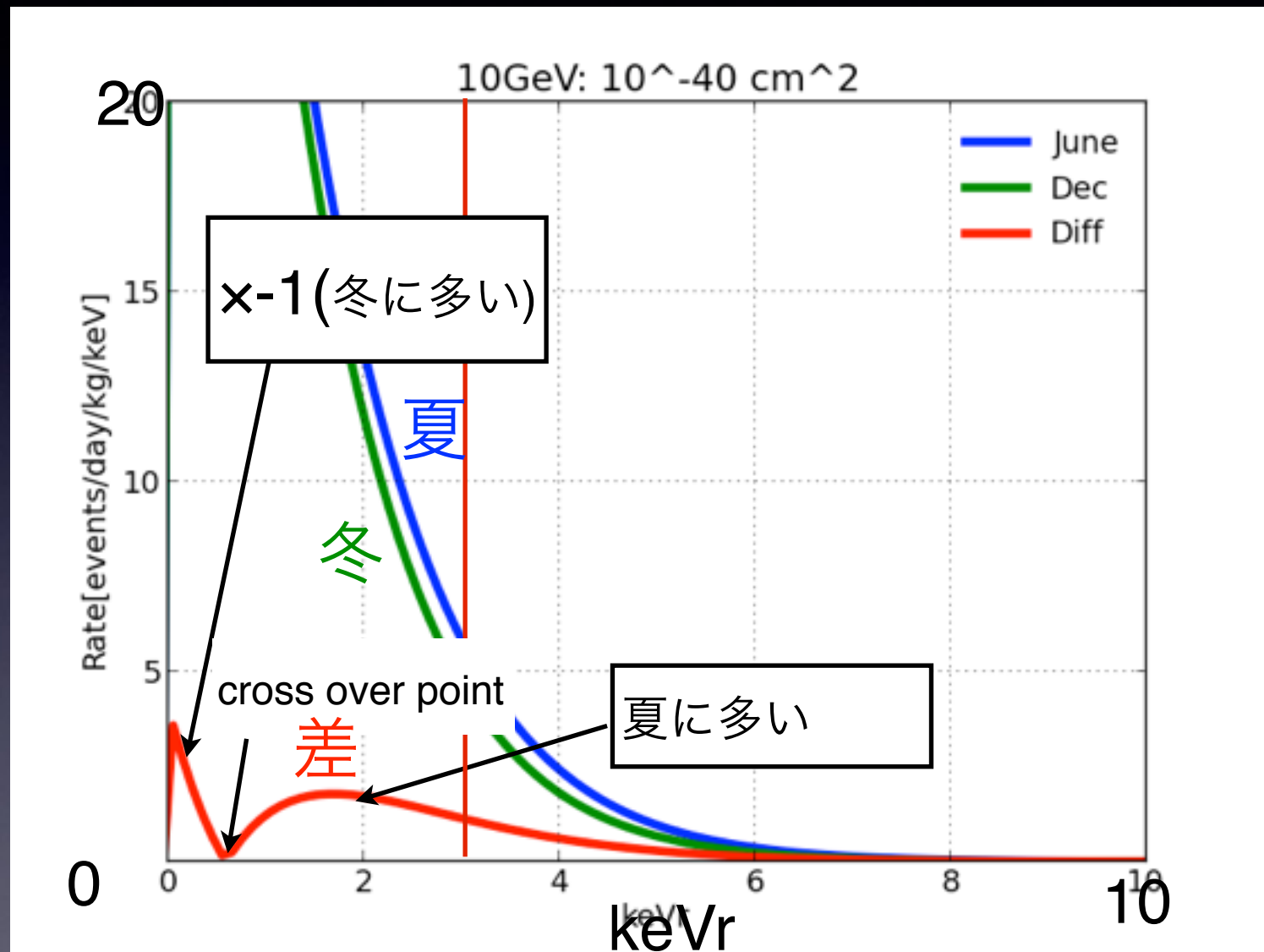
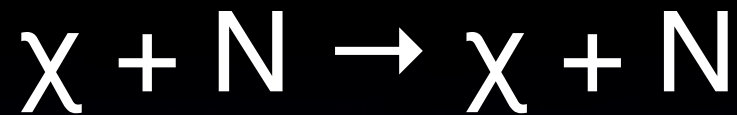
$$\frac{dR}{dE}(E, t) \approx S_0(E) + S_m(E) \cos \omega(t - t_c)$$

$$S_m(E) = \frac{1}{2} \left[\frac{dR}{dE}(E, \text{June } 1) - \frac{dR}{dE}(E, \text{Dec } 1) \right]$$

M.R. Hurt (SSC/Caltech)

Masaki Yamashita

暗黒物質直接検出

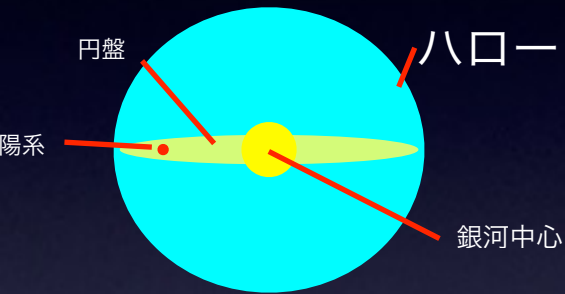


例えば $E_{th} = 3 \text{ keV}$
recoil
10GeVでは約
20%rateが異なる。
#100GeVでは約4%

季節変動観測による展開

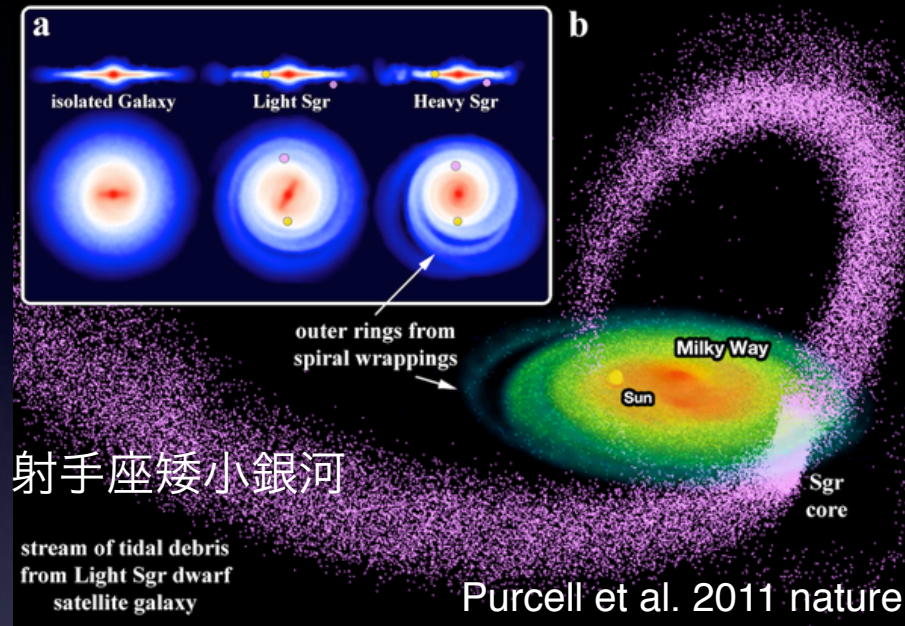
- Standard Halo Model

- 重力的に安定
- 等温球体
- maxwellian分布



- 銀河の合流による局所的な構造

- cold streams
- debris flow ...



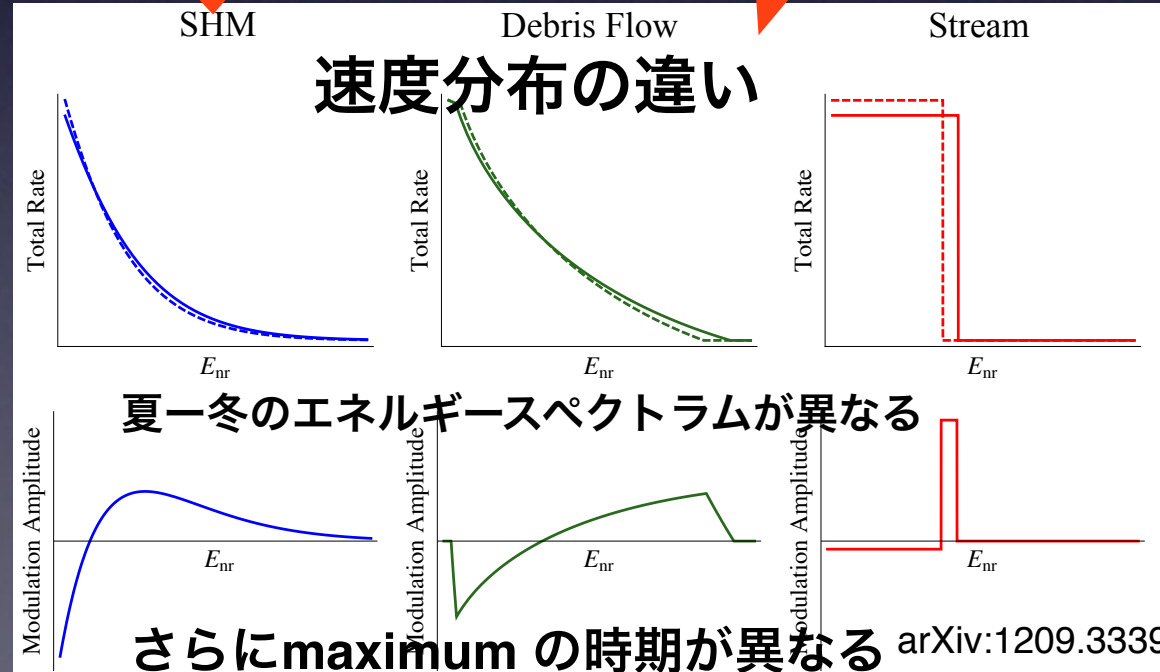
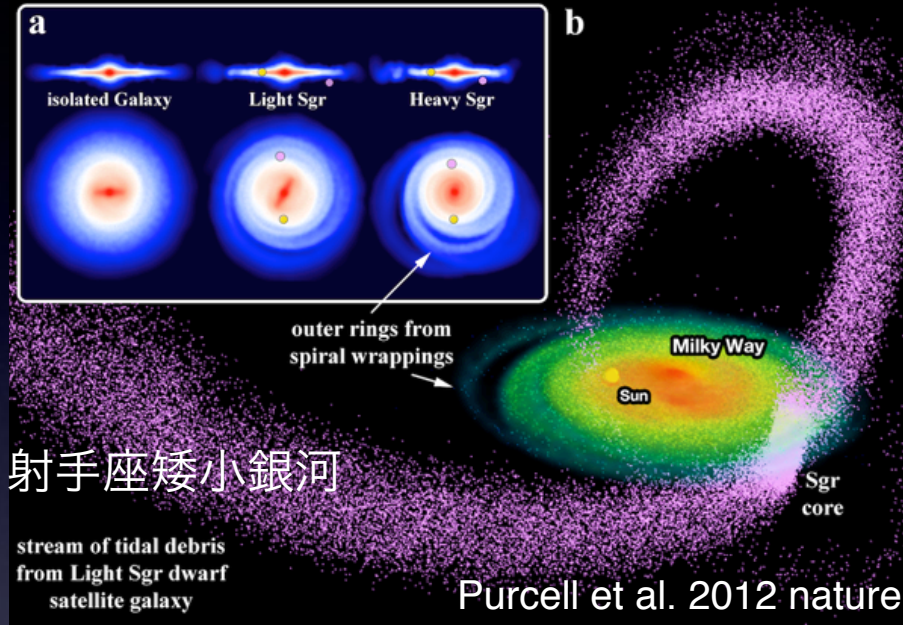
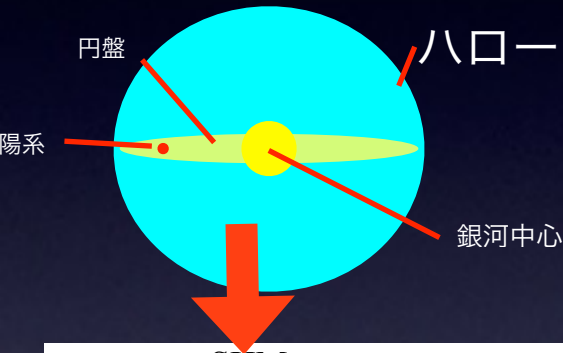
季節変動観測による展開

- Standard Halo Model

- 重力的に安定
- 等温球体
- maxwellian分布

- 銀河の合流による局所的な構造

- cold streams
- debris flow ...



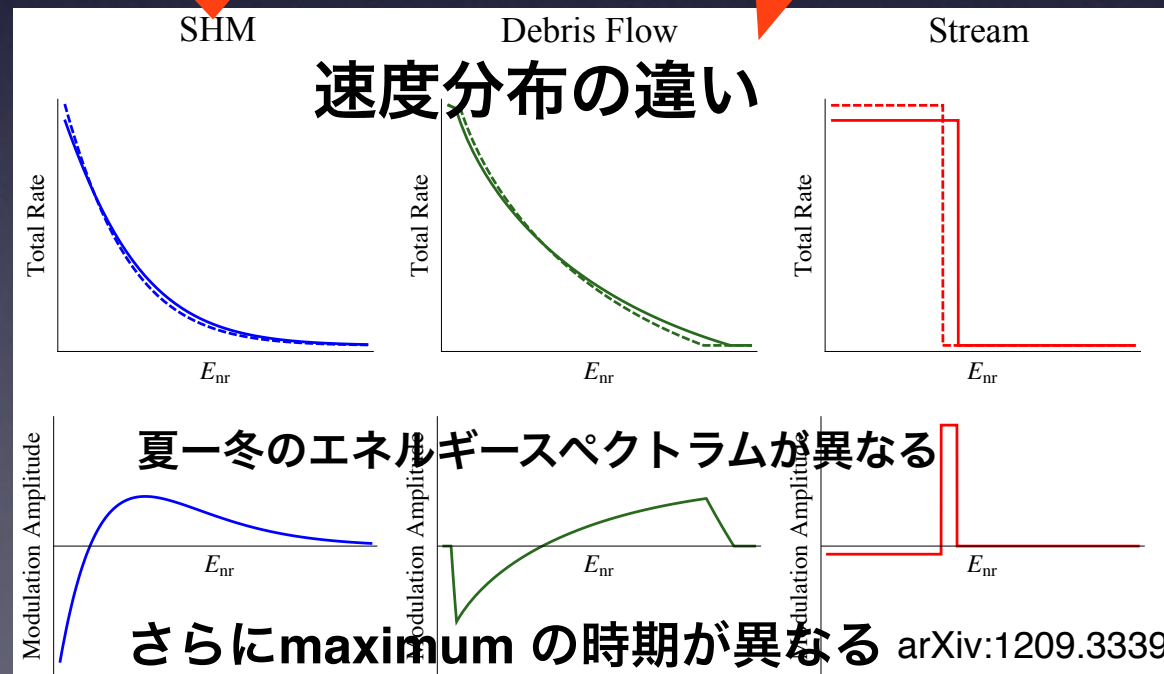
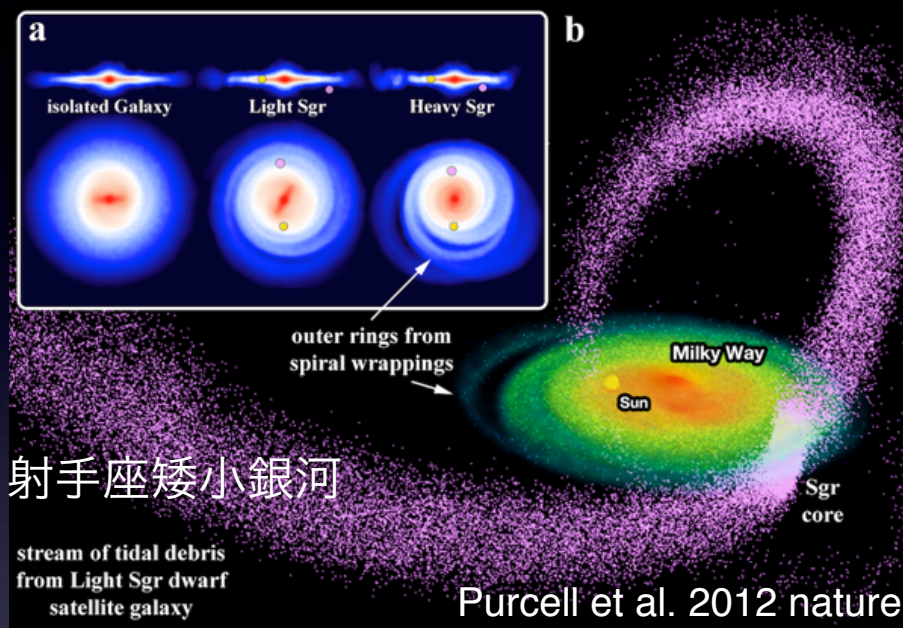
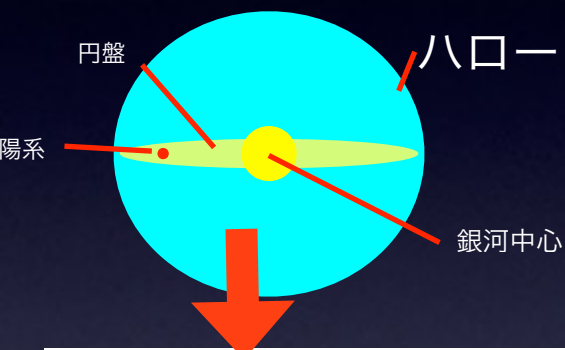
暗黒物質の速度分布が分かると

- Standard Halo Model

- 重力的に安定
- 等温球体
- maxwellian分布

- 銀河の合流による局所的な構造

- cold streams
- debris flow ...



季節変動をとらえることで

=> バックグラウンドでは考えにくい変動

-> 暗黒物質の強い証拠

=> 銀河結合の歴史の標本

-> 太陽系近傍のhaloの理解

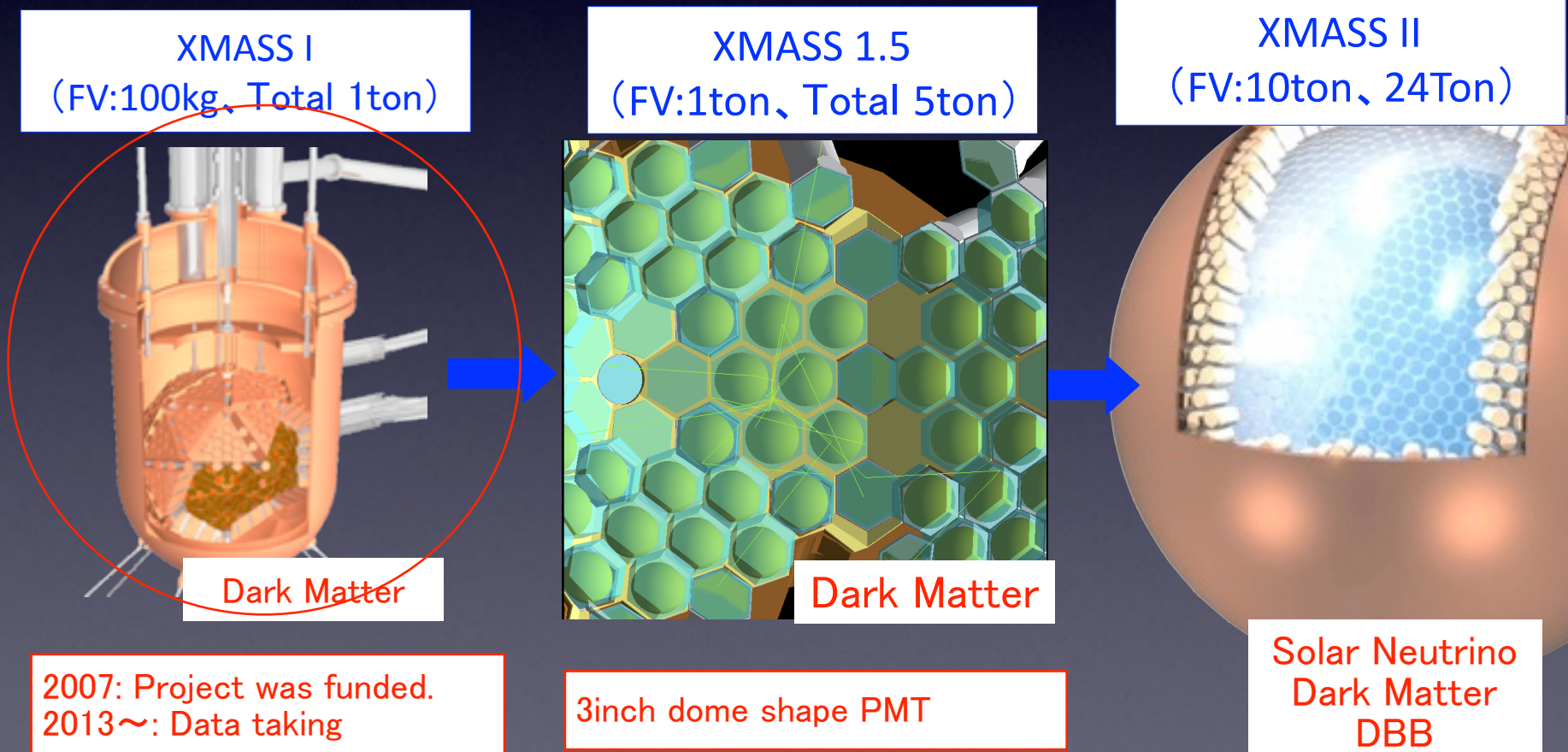
へつながる可能性

XMASS実験

XMASS Experiment

Multi purpose low-background experiment with LXe.

- Xenon **MASS**ive detector for Solar neutrino (pp/ ^7Be)
- Xenon neutrino **MASS** detector (double beta decay)
- Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles (DM)



The XMASS collaboration:

Kamioka Observatory, ICRR, the University of Tokyo: K. Abe, K. Hiraide, K. Ichimura, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, M. Kobayashi, S. Moriyama, M. Nakahata, T. Norita, H. Ogawa, H. Sekiya, O. Takachio, A. Takeda, M. Yamashita, B. Yang

Kavli IPMU, the University of Tokyo: J.Liu, K.Martens, Y. Suzuki, X. Benda

Kobe University: R. Fujita, K. Hosokawa, K. Miuchi, Y. Ohnishi, N. Oka, Y. Takeuchi

Tokai University: K. Nishijima

Gifu University: S. Tasaka

Yokohama National University: S. Nakamura

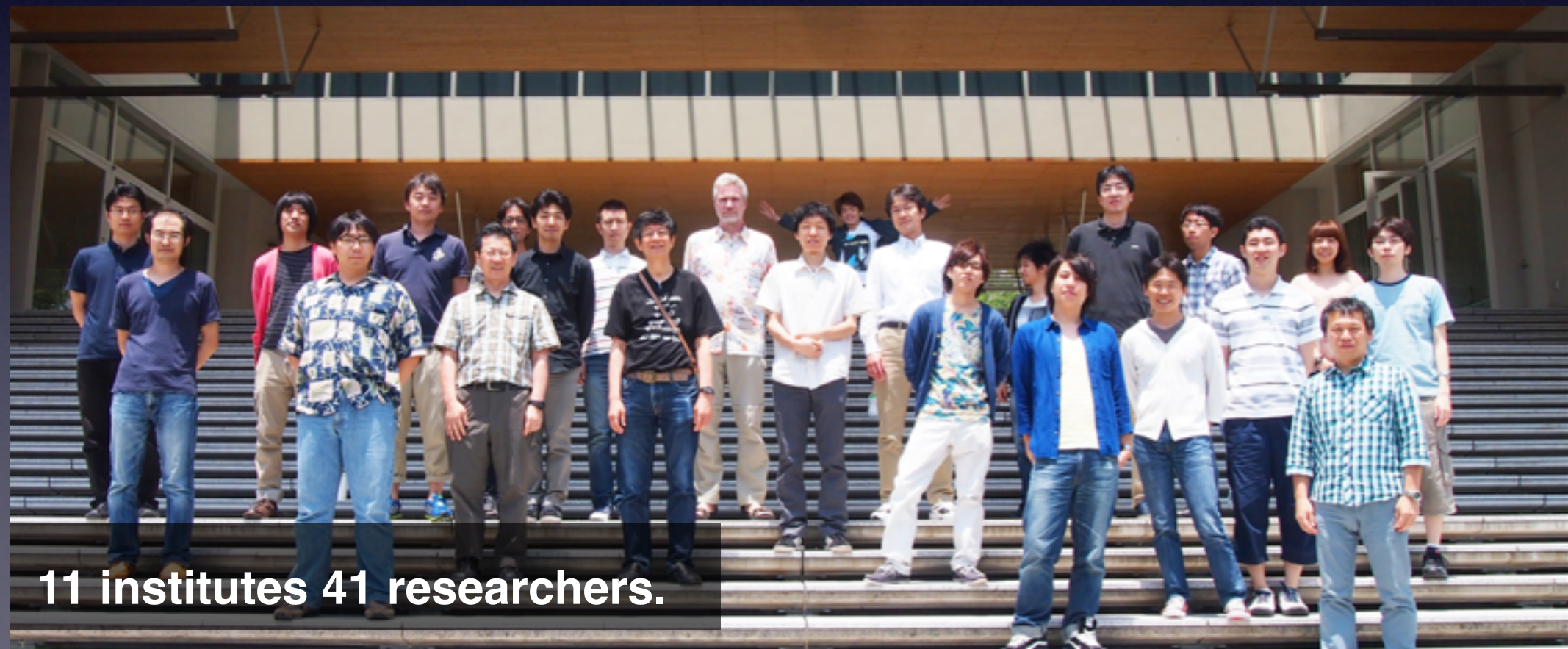
Miyagi University of Education: Y. Fukuda

STEL, Nagoya University: Y. Itow, R. Kegasa, K. Kobayashi, K. Masuda, H. Takiya

Sejong University: N. Y. Kim, Y. D. Kim

KRISS: Y. H. Kim, M. K. Lee, K. B. Lee, J. S. Lee

Tokushima University: K.Fushimi

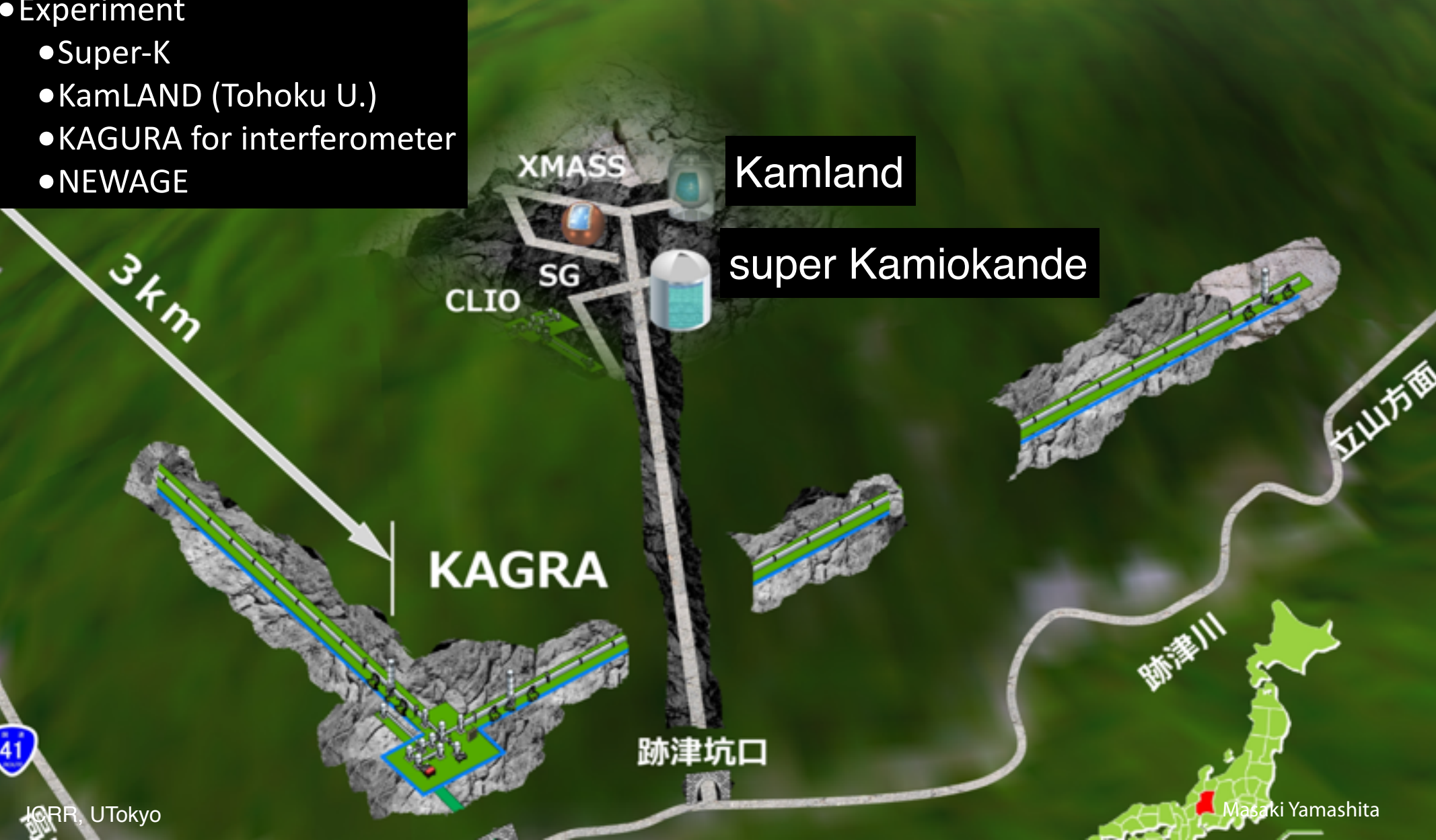


11 institutes 41 researchers.

- 1000m under a mountain = 2700m water equiv.
- 360m above the sea
- Horizontal access
- Experiment
 - Super-K
 - KamLAND (Tohoku U.)
 - KAGURA for interferometer
 - NEWAGE

Kamioka mine

Gifu, Hida city, Ikenoyama



Kamland

super Kamiokande

KAGRA

跡津坑口

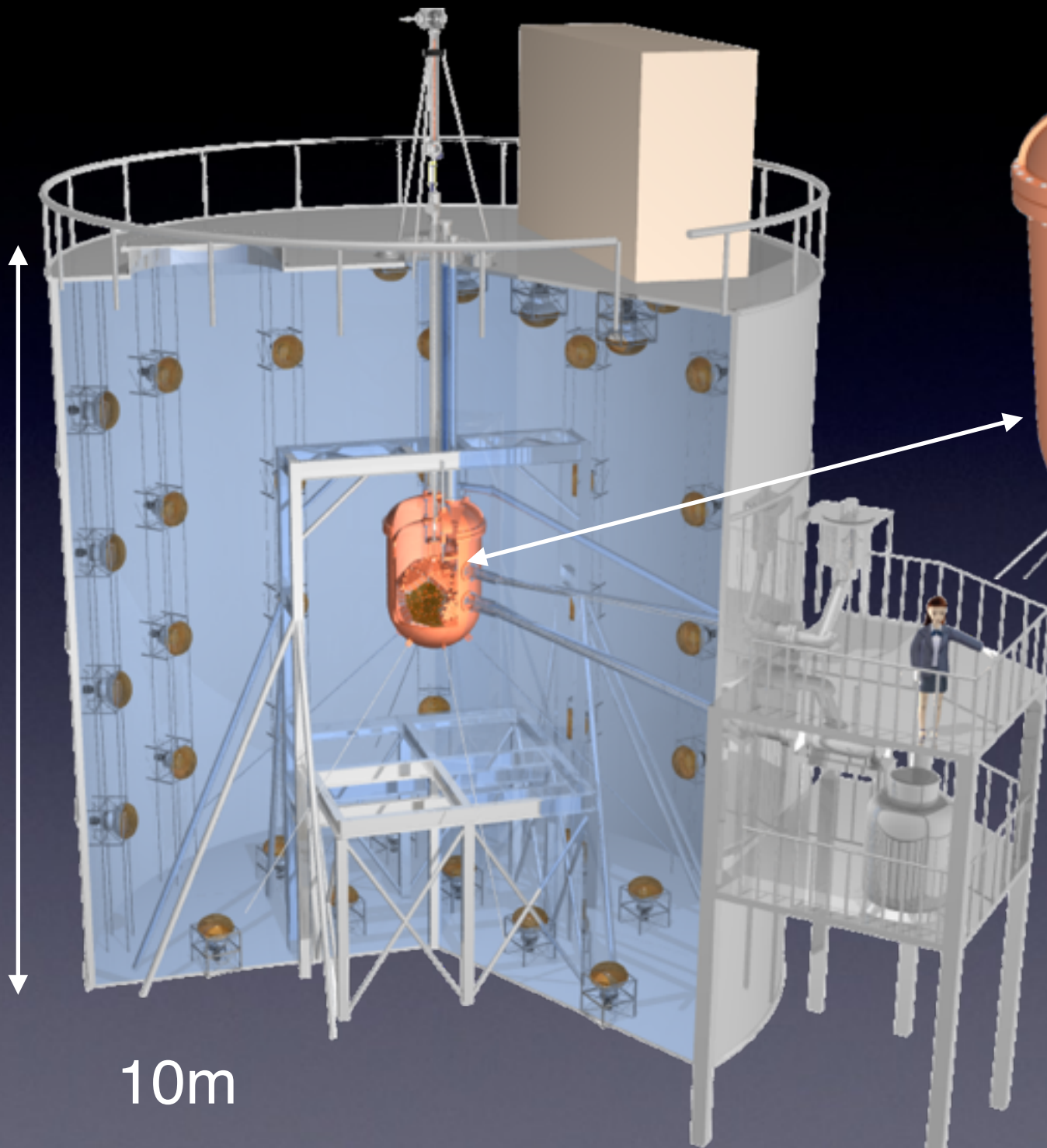
跡津川

立山方面

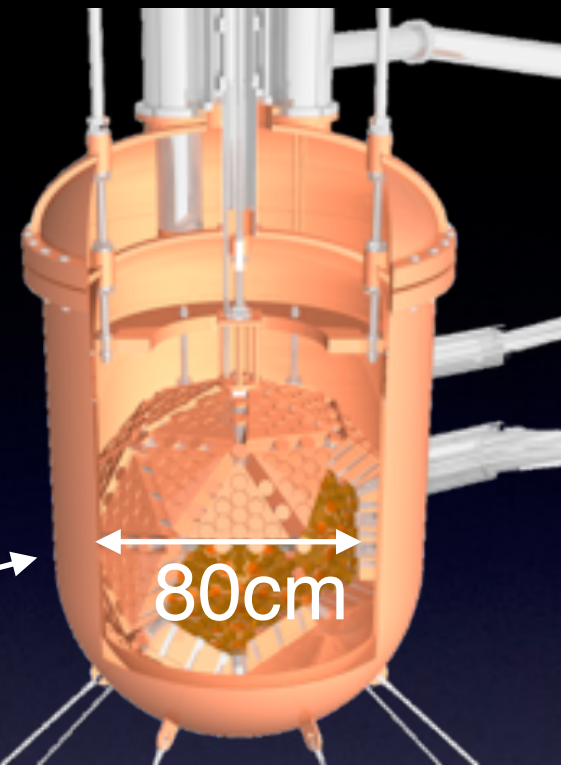
3 km



10m



10m



80cm

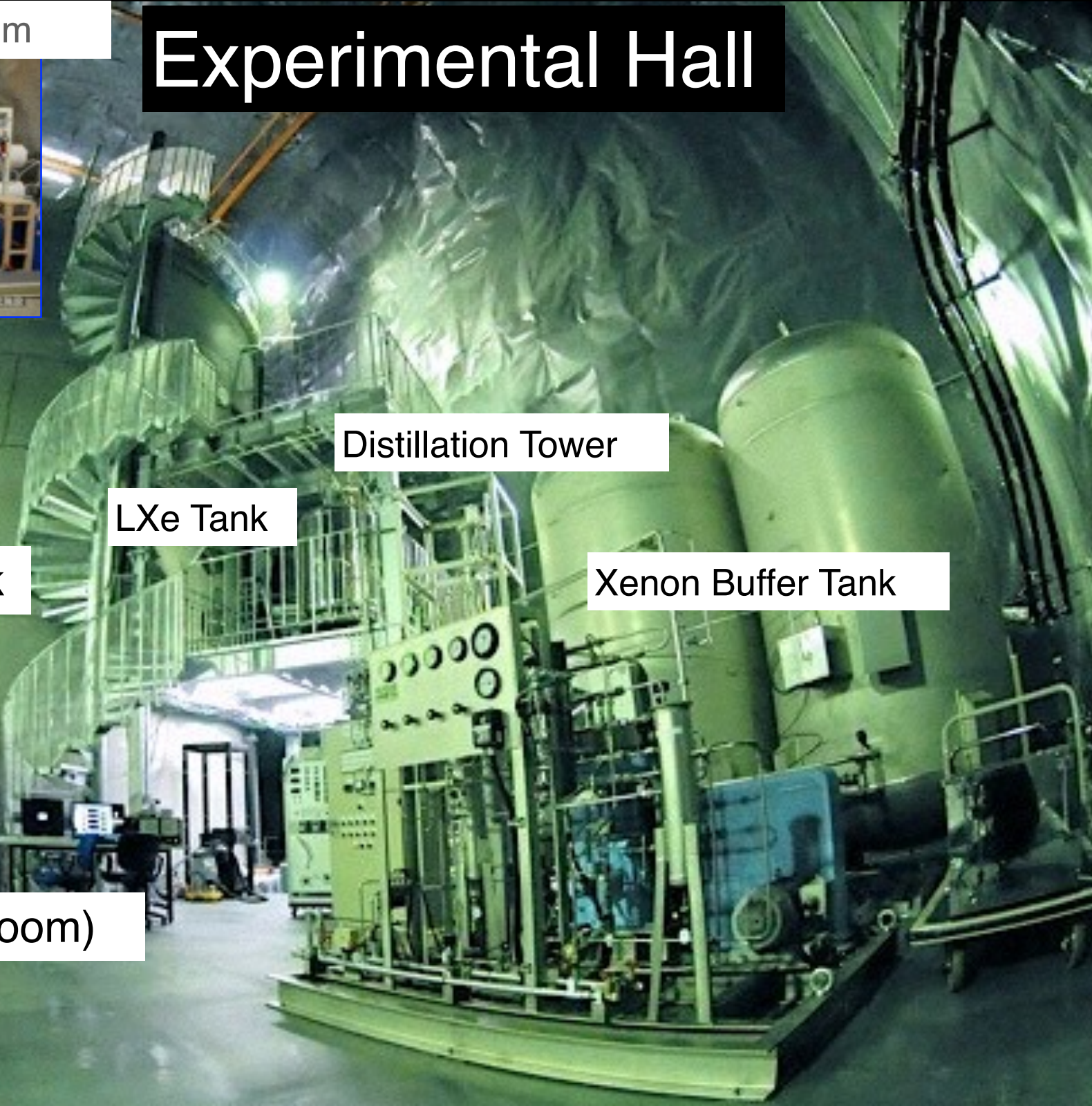
無酸素銅の断熱真空容器
-100度の液体キセノンシン
チレータで満たされる。

water purification system



Experimental Hall

Rn: $\sim 1\text{mBq/m}^3$
5ton/hour



Distillation Tower

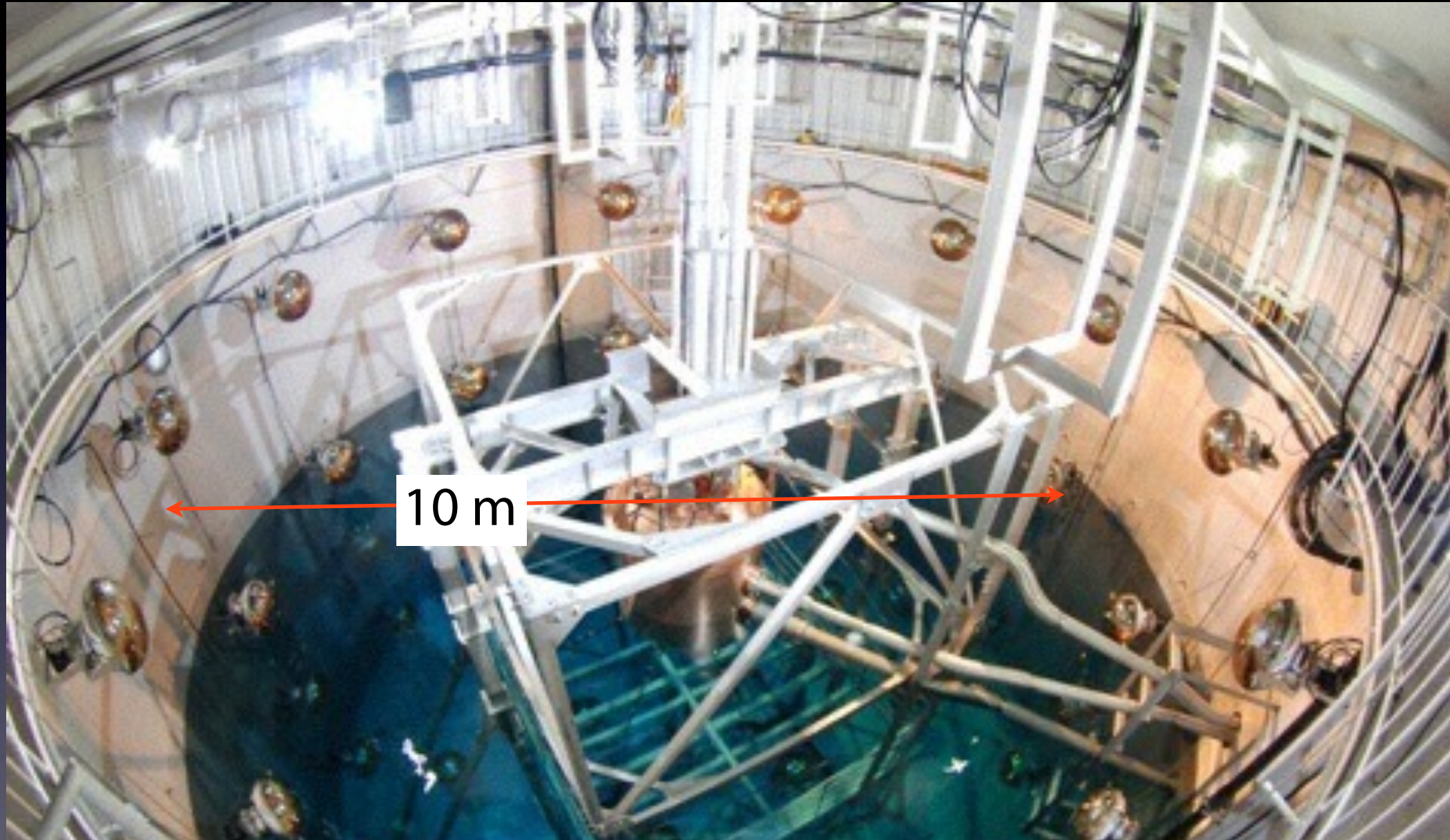
LXe Tank

Water Tank

Xenon Buffer Tank

entrance (clean room)

Water Shield



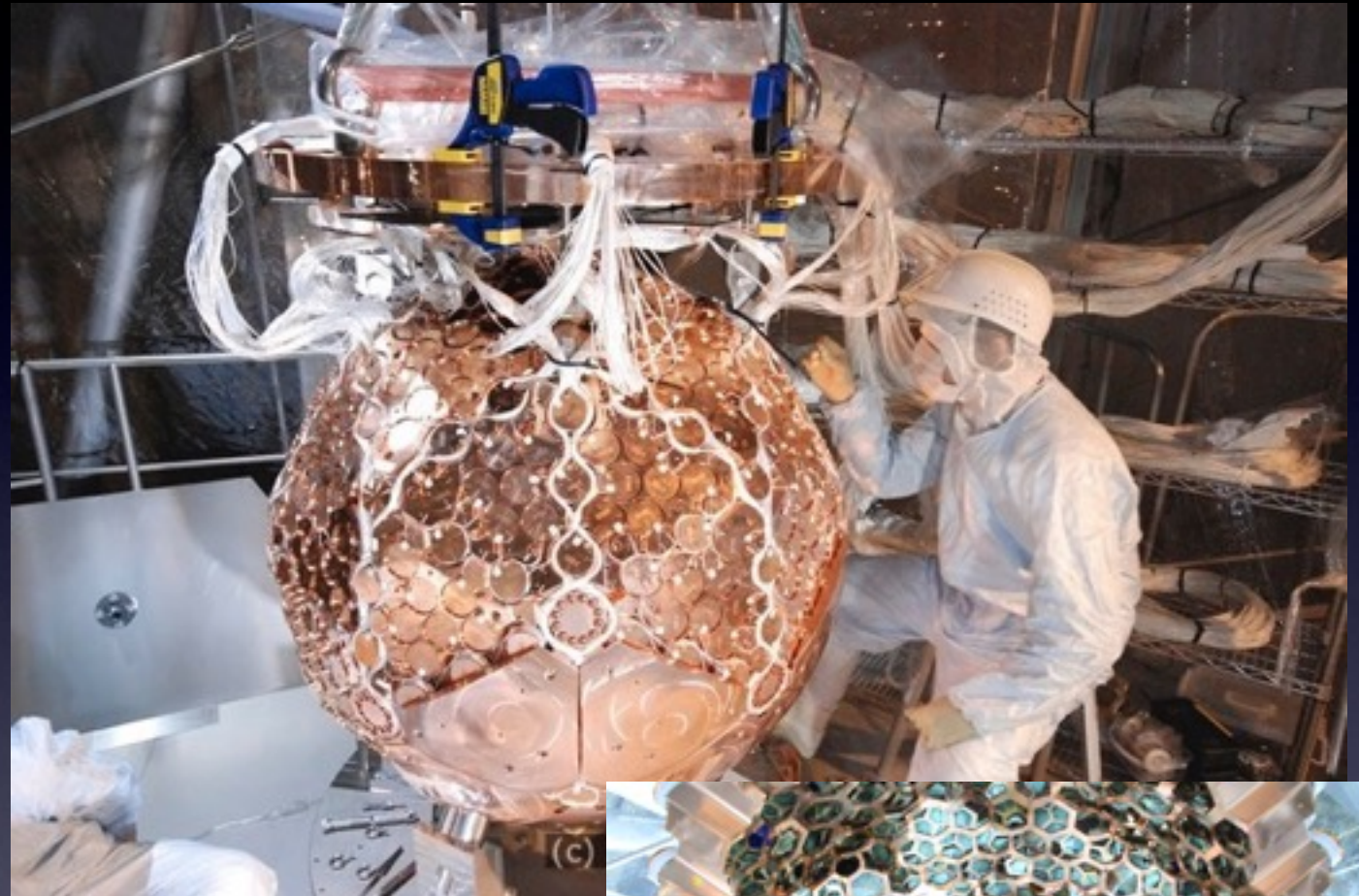
- $\phi 10\text{m} \times 10\text{m}$ ultra pure water shield with 20 inch x 70 PMTs for muon veto

XMASS Detector

R10789



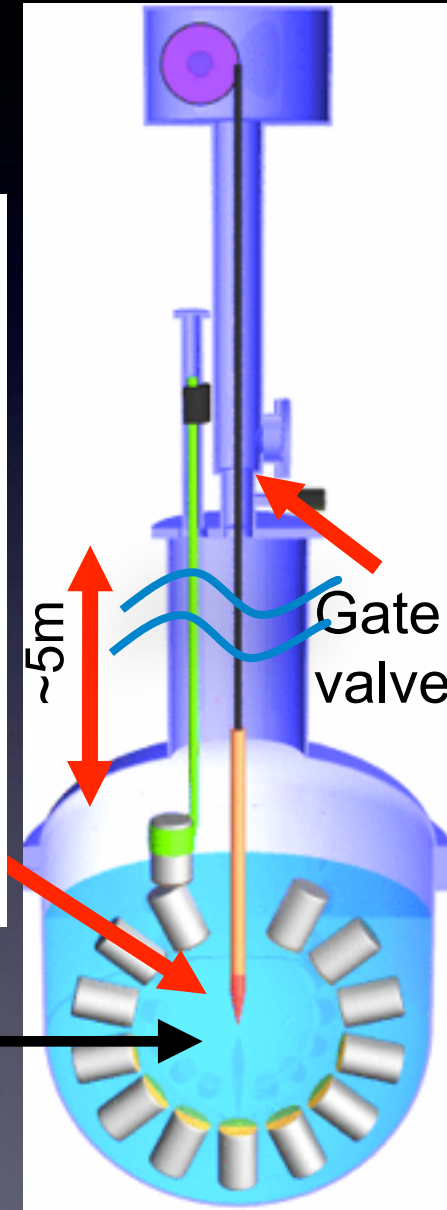
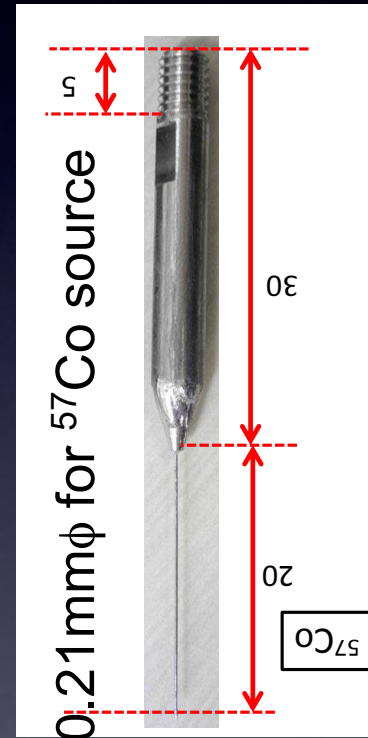
RI in PMT	Activity per 1PMT(mBq/PMT)
238U-chain	0.70+/-0.28
232Th-chain	1.51+/-0.31
40K	<5.1
60Co	2.92+/-0.16



- 642 ultra low background 2 inch PMTs
- Largest detector: 832 kg of LXe for sensitive volume.

energy calibration

-Inner calibration is for energy calibration.

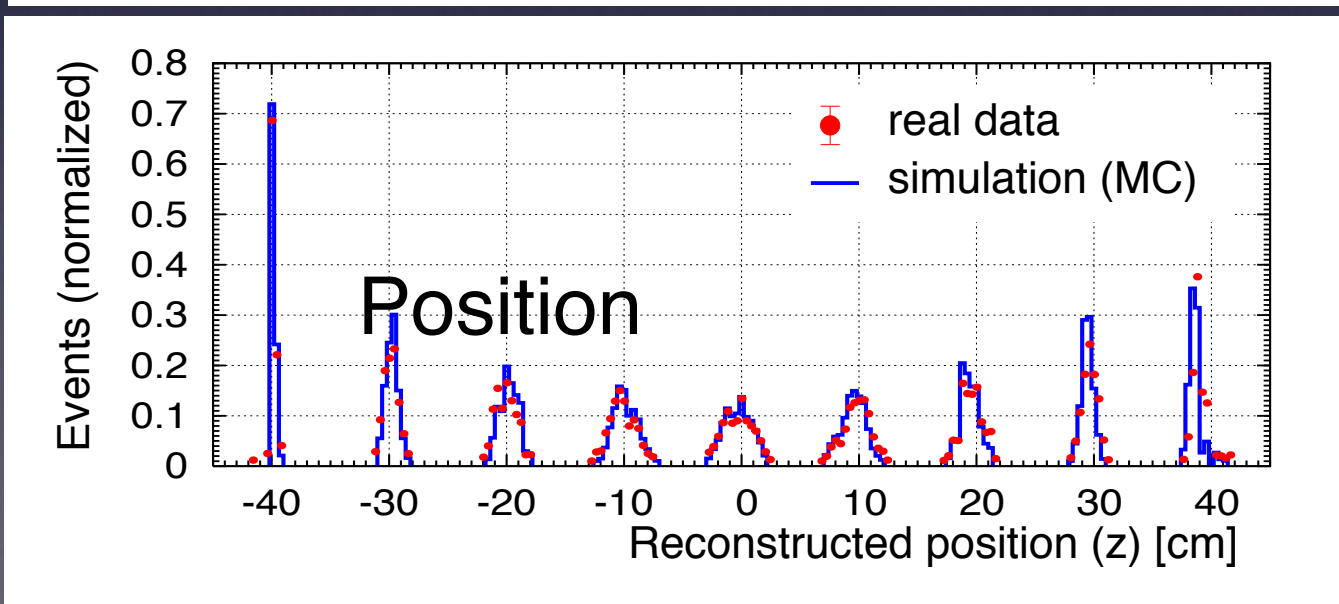
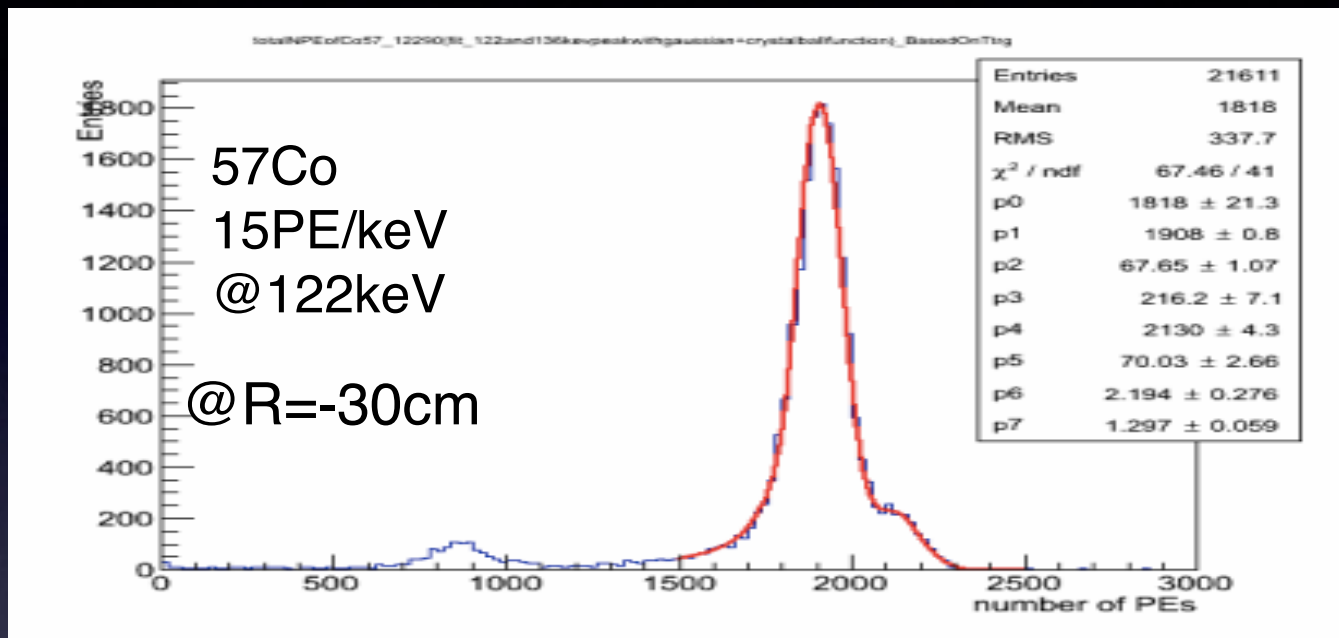


Isotopes	Energy [keV]	Shape
^{55}Fe	5.9	cylinder
^{109}Cd	8(*1), 22, 58, 88	cylinder
^{241}Am	17.8, 59.5	thin cylinder
^{57}Co	59.3(*2), 122	thin cylinder
^{137}Cs	662	cylinder

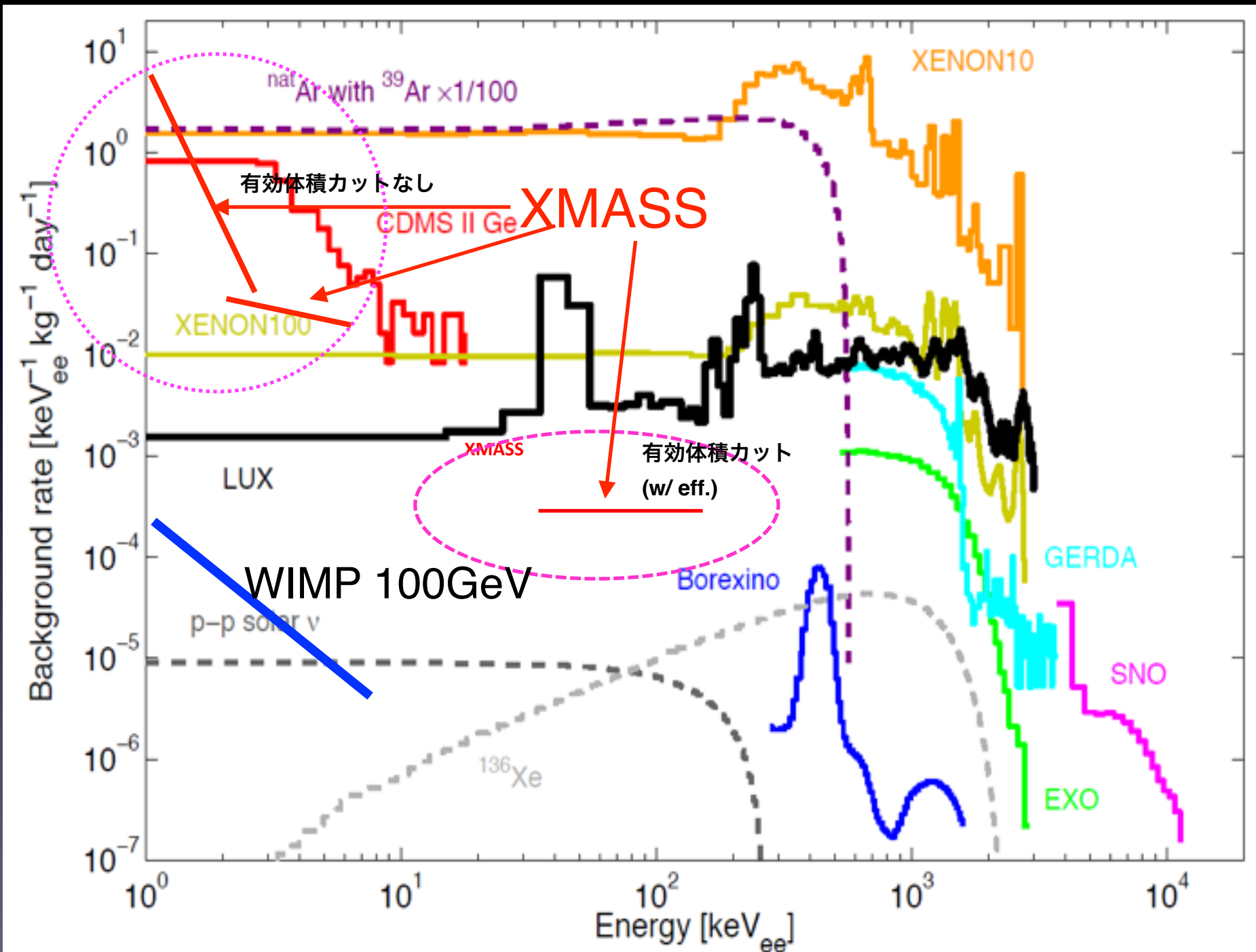
液体キセノン

energy calibration

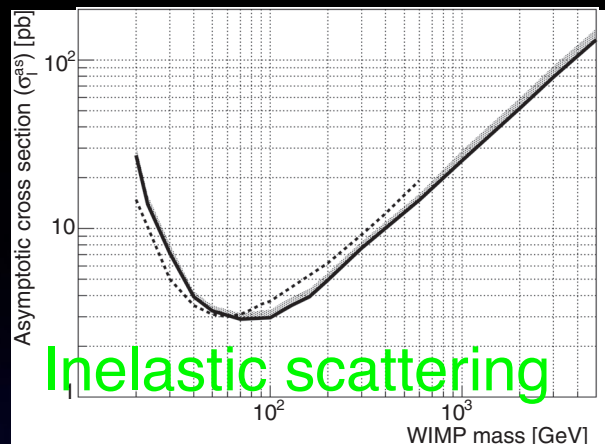
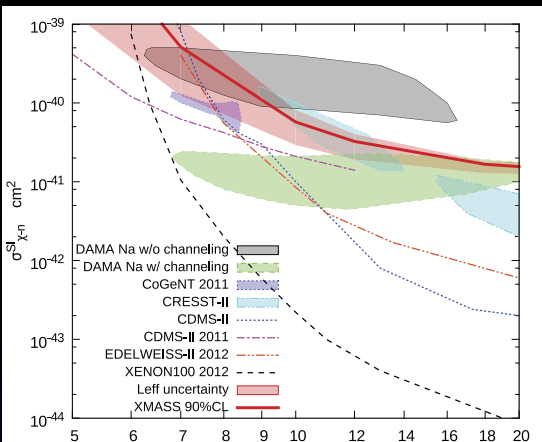
- High Photoelectron Yield $\sim 15 \text{ PE/keV}$
- Good agreement between data and Monte Carlo



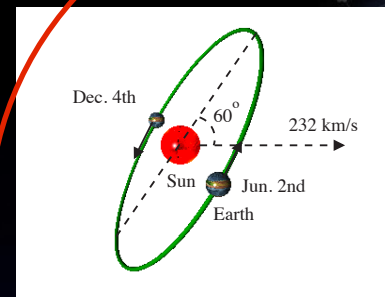
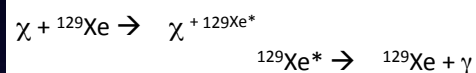
バックグラウンド



XMASS実験による観測

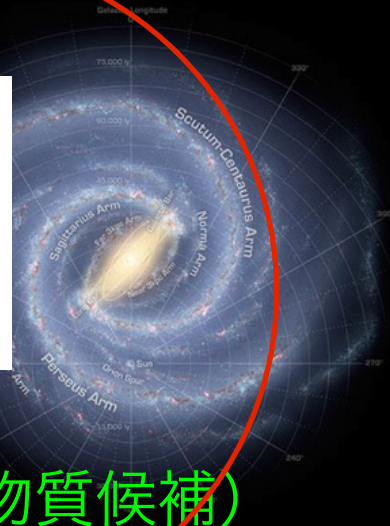


Inelastic scattering



季節変動

(様々な暗黒物質候補)



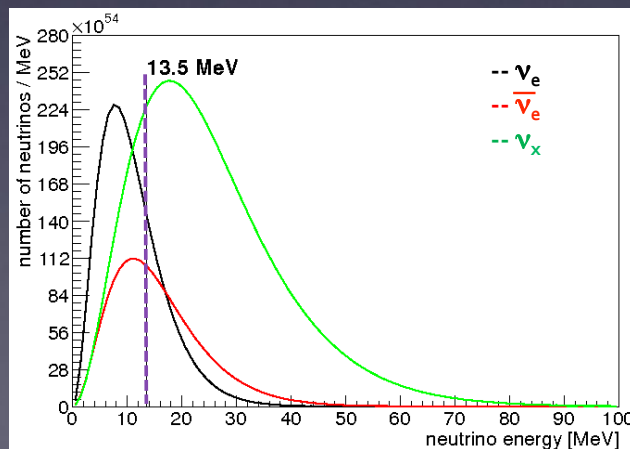
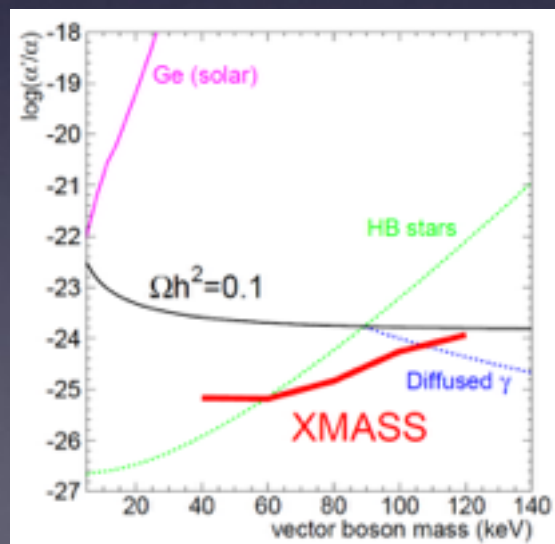
light mass WIMP

super-WIMPs(ALPs)

Solar axion



超新星ニュートリノ



XMASS検出器の特徴

XENON100 62kg

LUX 250kg

DAMA 250kg

XMASS:832kg

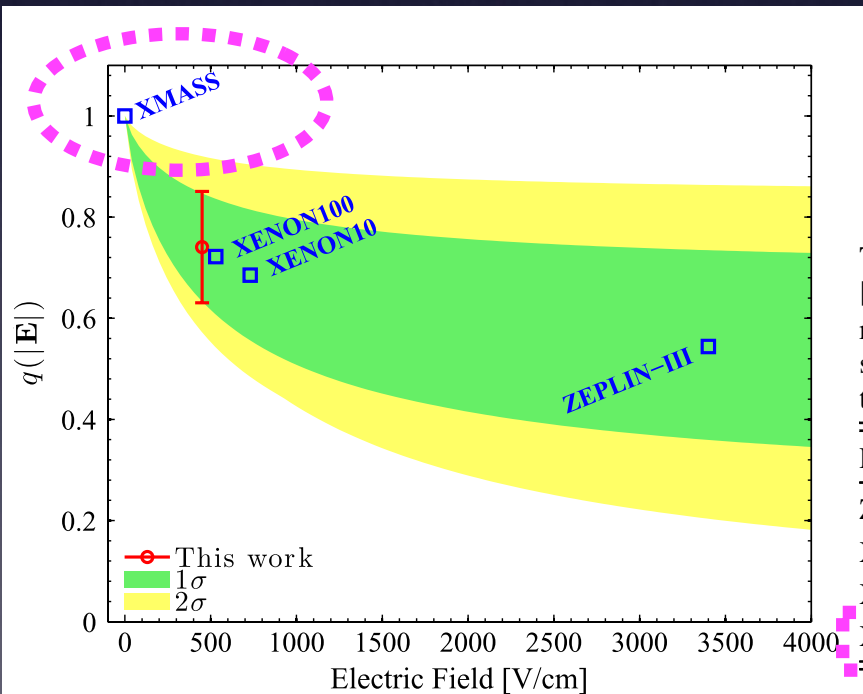
Target Mass

—例えば電子反跳ではDAMA/LIBRAの $E_{th}=2keV$ をカバーできているのはXMASSのみ。

— 4π photocavarage, 電場による消光がない。

—Target 質量ではXMASSが一番大きい。

電場による消光



電場

TABLE II. Four recent dark-matter searches using LXe: the second science run of ZEPLIN-III [49], results of XENON10 [3], the recent 225 live days reported from XENON100 [50], and the results of XMASS [7]. Shown are the applied electric fields used by each ($|\vec{E}|$), their quoted scintillation thresholds ($S1_{thr}$), their ^{57}Co light yield (LY_{Co}), and their electronic-recoil energy thresholds using this work (E_{thr}).

Experiment	$ \vec{E} $ (V/cm)	$S1_{thr}$ (PE)	LY_{Co} ($\frac{PE}{keV}$)	E_{thr} (keV)
ZEPLIN-III	3400	2.6	1.3	$2.8^{+0.5}_{-0.5}$
XENON10	730	4.4	3.0	$2.5^{+0.4}_{-0.3}$
XENON100	530	3.0	2.3	$2.3^{+0.4}_{-0.3}$
XMASS	0	4.0	14.7	$1.1^{+0.4}_{-0.2}$

XMASS実験による季節変動探索

1. XMASS検出器は**暗黒物質直接探索検出器として質量が一番大きく、発光量も最も大きい。**

高統計を必要とする季節変動解析を有利に進めることができる。(数一数十%の変動)

2. どうしてDAMA実験は主張し続けているのか？

反跳核だけでなく**電子反跳を含めたある意味model independentな方法。**粒子弁別をせずあらゆる物理に対応 (DM, Mirror DM, Axion ...)

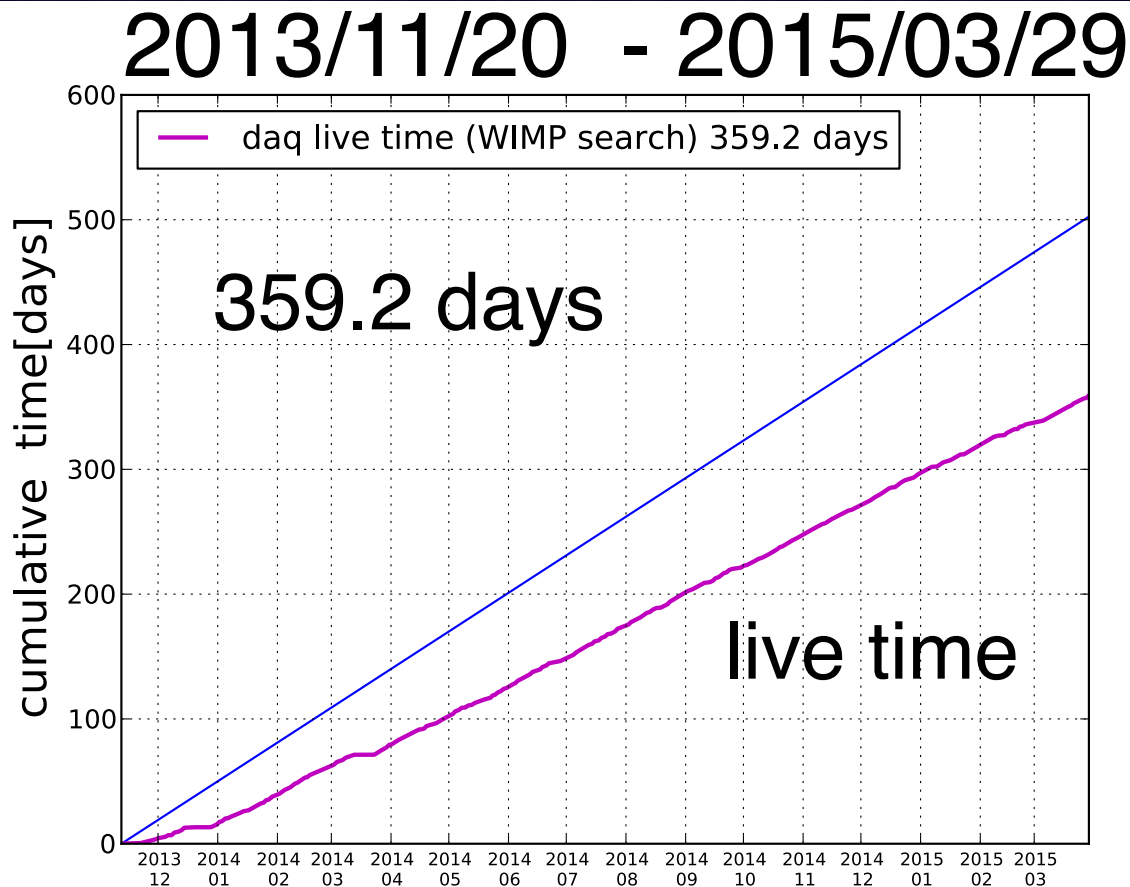
3. 季節変動を用いた方法では十分な統計精度で追認されていない。(CoGent 2.2 σ , KIMS (Csl)などが探索)

4. XMASSでの大質量および、エネルギー閾値の低い特徴を活かし**十分な感度をもって探索を進める。**

現在のところLHCでSUSYも見つかっていない
いろんな可能性を網羅すべき

データ取得状況

- 2013年11月から2015年3月までのデータ(359.2日のlive time)
- 2013年12月中性子キャリブレーション
- 2014年 3月中性子キャリブレーション
- 2015年 3月までデータ
- ほぼ毎週 ^{57}Co 線源による内部
- 毎週 ^{60}Co 線源による外部からの較正



DAMA/LIBRA 1.33ton · year

(14 サイクル)

vs

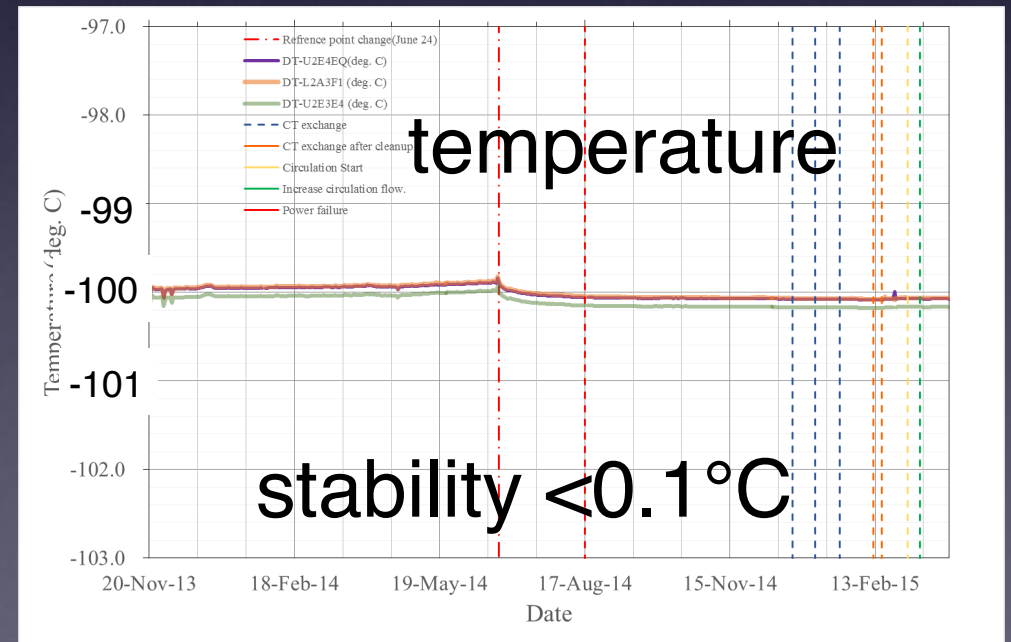
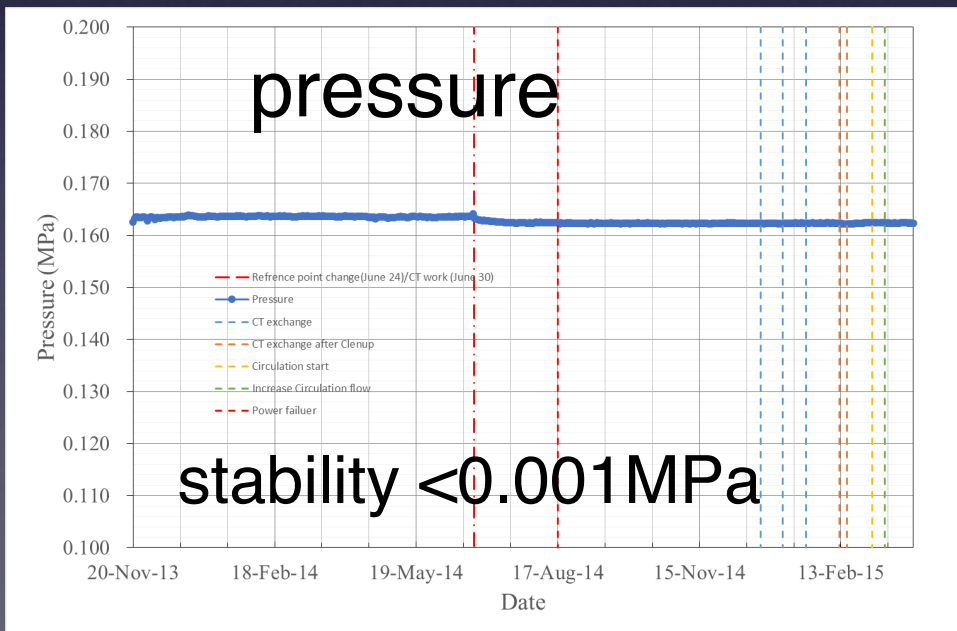
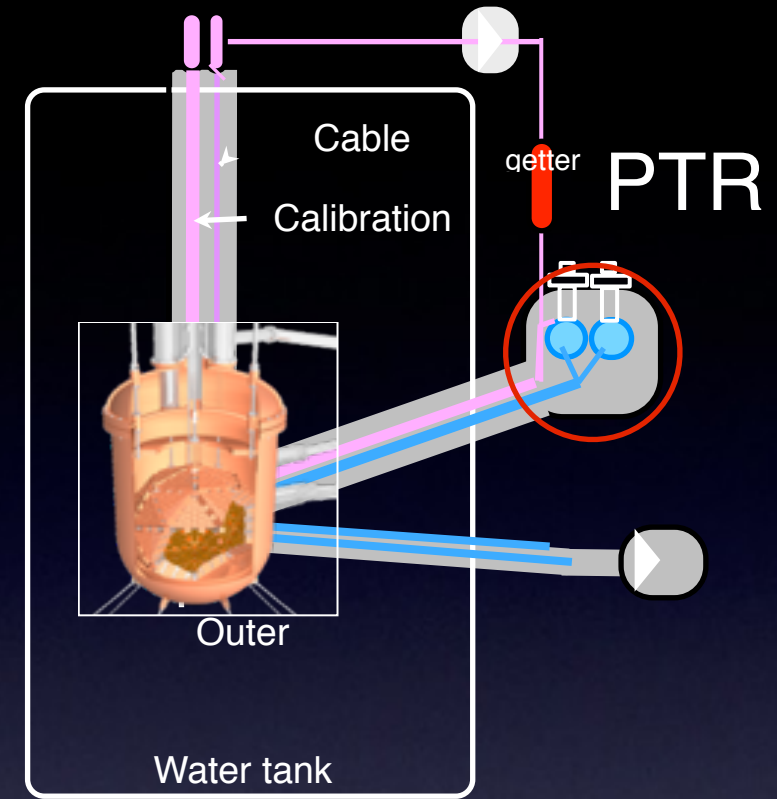
XMASS 0.82 ton · year

(1.4サイクル)

現在も順調にデータを取
り得している。

液体キセノンの安定性

- ・ 検出器の温度は水タンク外にあるKEK・Iwataniで開発されたパルス管冷凍機(PTR, PC150, ~180W@160K)で維持される。(PID制御)
- ・ 検出機は現在2年以上連続運転。(2台のPTR交互に使用)



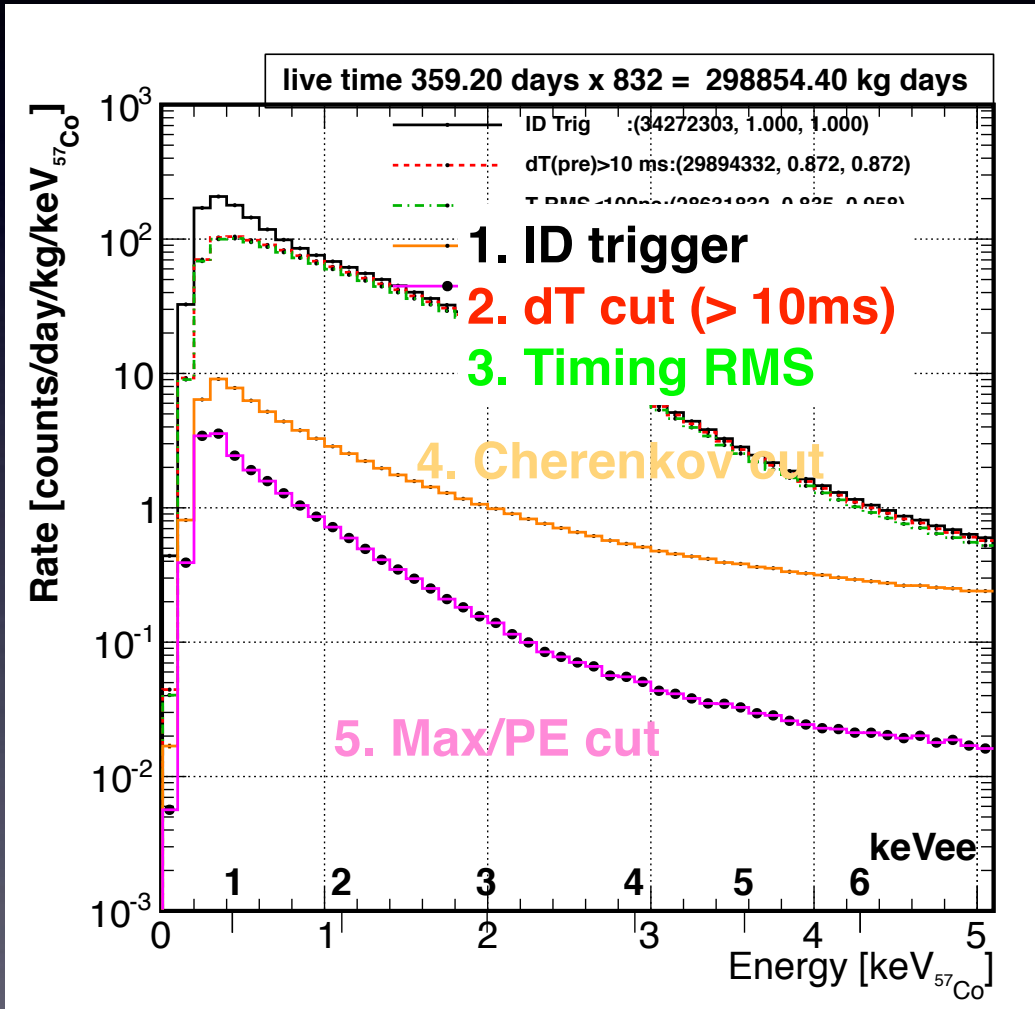
解析

- 粒子弁別をせずあらゆる物理に対応 (DM, ALPs, Mirror DM, Luminous DM ...)

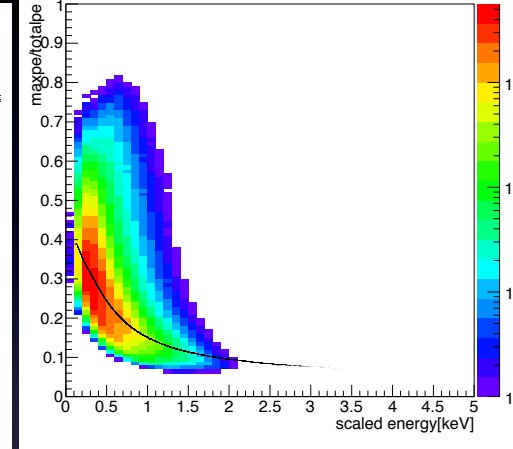
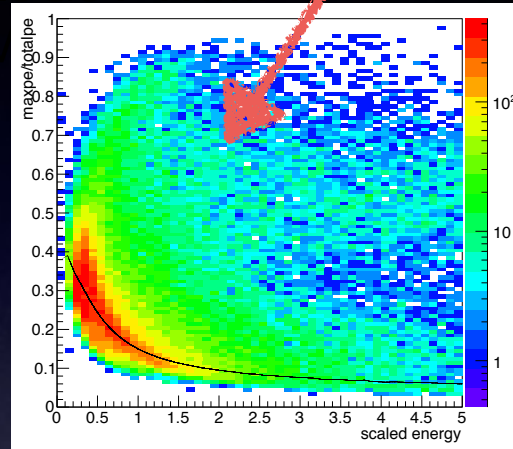
PMT前事象

data

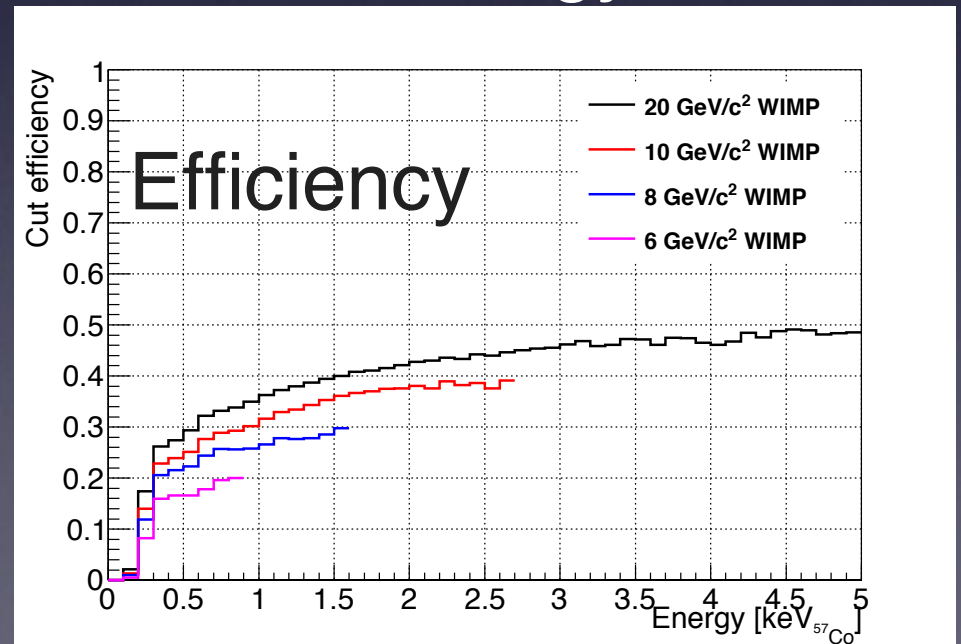
Uniform signal
(10 GeV WIMP)



Max/ Total PE

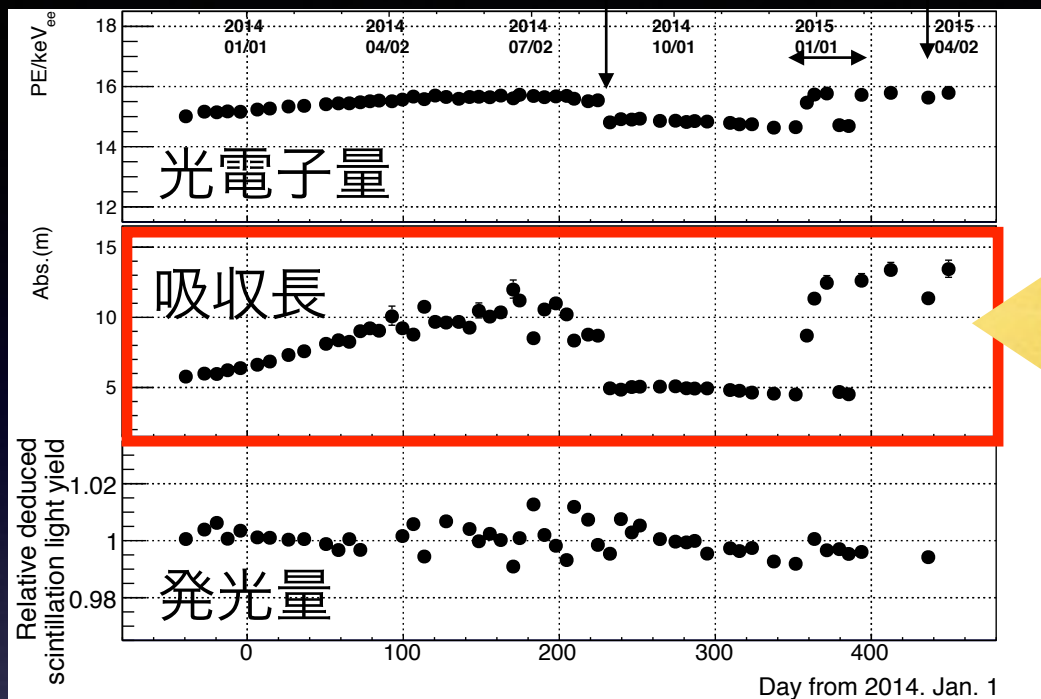


Energy



系統誤差

(1) (2) (3)

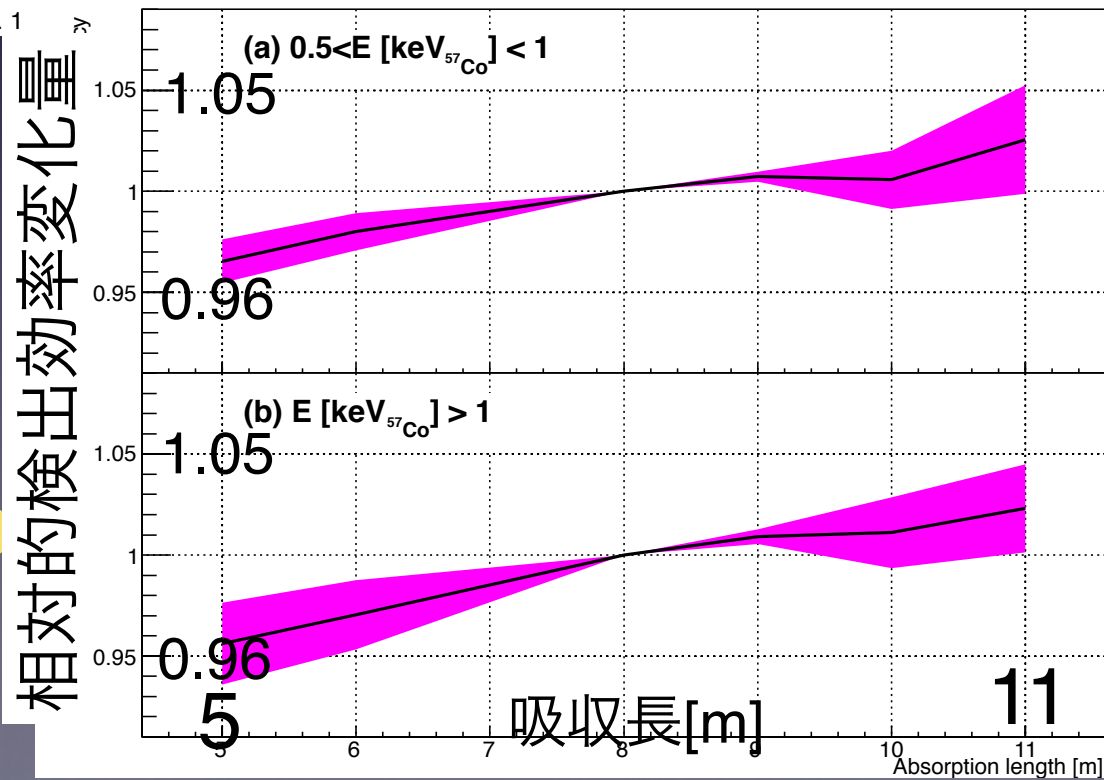


Yangのトークにあったように
122keVの光量変化はシンチ
レーション光の吸収長で説明で
きることが示された。(不純物)

吸収長による系統誤差

吸収長の変化

検出器の位置依存性やエネ
ルギースペクトルによって検
出効率に変化
この効果に系統誤差を解析
に考慮に入れる。
(最も大き系統誤差)



解析方法

吸収長による系統誤差を取り入れるために2つの独立した解析を行った。

method1: Pull method

系統誤差をpenalty term α を導入して取り扱う。

$$\chi_{\text{method1}}^2 = \sum_i^{E_{\text{bins}}} \sum_j^{t_{\text{bins}}} \frac{(R_{i,j}^{\text{data}} - R_{i,j}^{\text{ex}} - \alpha_i K_{i,j})^2}{\sigma(\text{stat})_j^2} + \alpha_i^2$$

method2: Covariance Matrix

系統誤差をcovariance matrixを用いて評価する。

$$\chi_{\text{method2}}^2 = \sum_{i,j}^{N_{\text{bins}}} (R_i^{\text{data}} - R_i^{\text{ex}}) (V_{\text{stat}} + V_{\text{sys}})_{ij}^{-1} (R_j^{\text{data}} - R_j^{\text{ex}})$$

R^{data} : observed data

R^{ex} : expected rate

N_{bins} : $E_{\text{bins}} \times t_{\text{bins}}$

systematic error 1 σ

季節変動解析

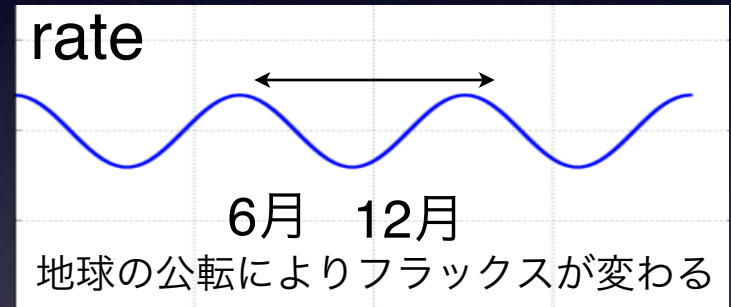
modulationにおける振幅を得るため解析：

1. 16ヶ月にわたるデータを40 time bins x 45 Energy binsに分ける。
(1 periodは約10日、Energy bin 幅は0.1 keV_{57Co})
2. すべてのEnergy/time binに対して同時にFitを行った。
3. Model IndependentとModel Dependentの両方に対して解析

Model Independent case.

$$R_i^{\text{ex}}(E_i, t_j) = C_i + A_i \cos 2\pi(t_j - t_0)/T$$

振幅



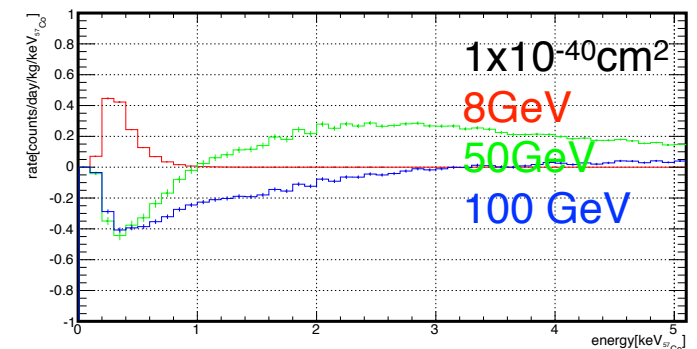
Model Dependent case (WIMP case).

$$R_i^{\text{ex}}(E_i, t_j) = C_i + \sigma_{\chi n} \times A_i(m_\chi, E_i) \cos 2\pi(t_n - t_0)/T$$

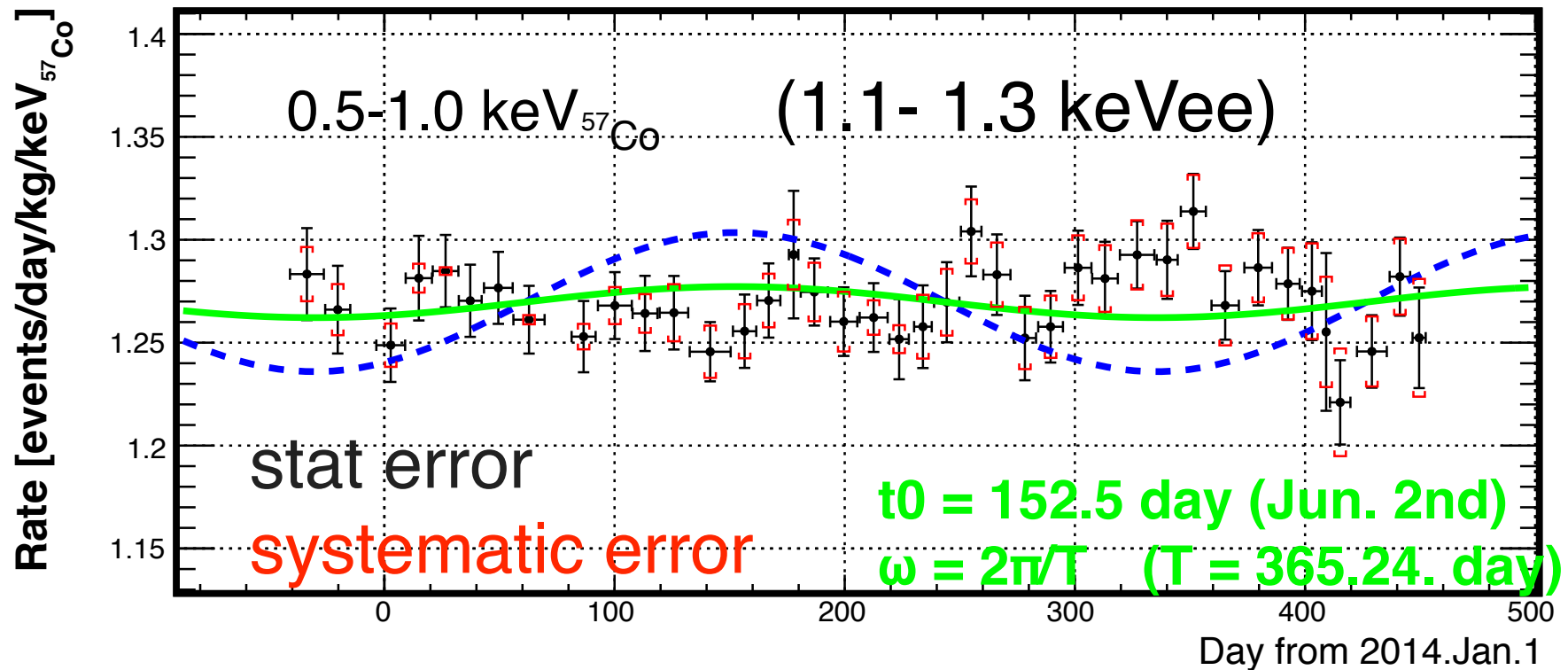
WIMP-核子断面積

振幅(WIMPのspectrum)

(summer - winter), energy spectrum



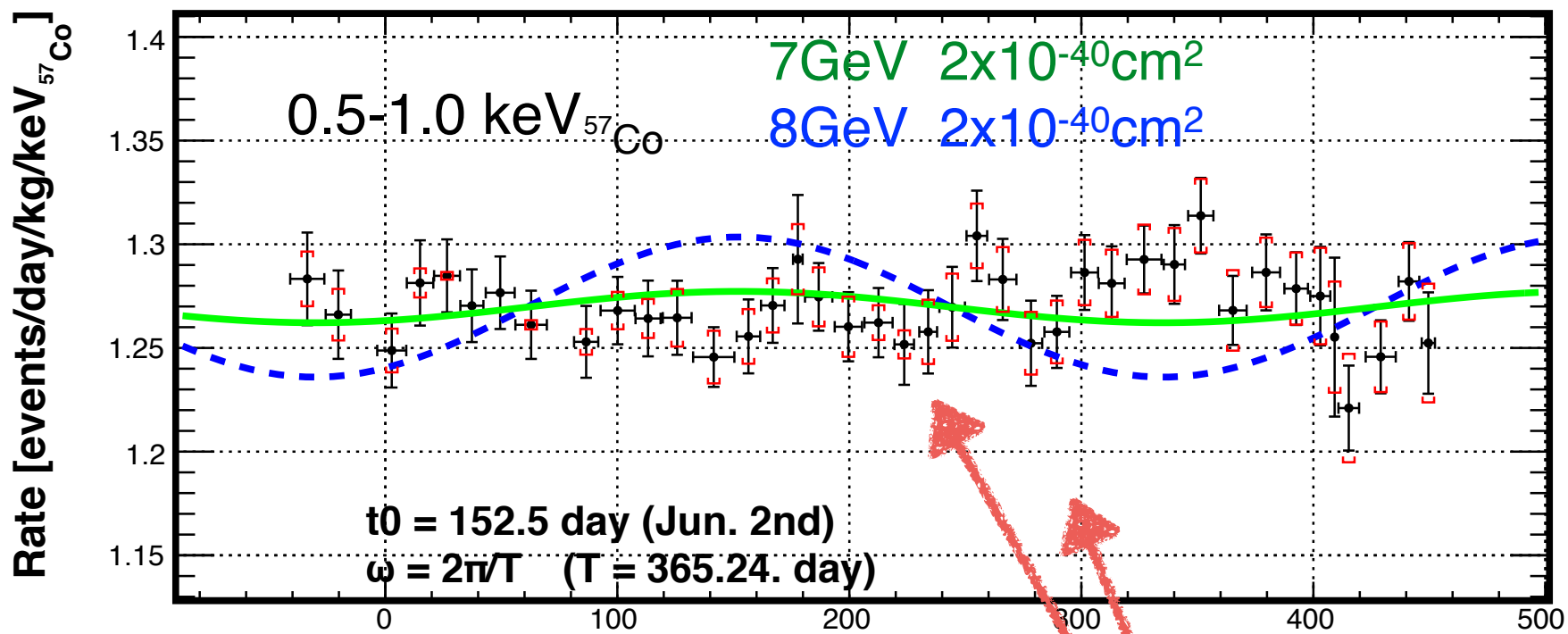
Model independent time variation (pull term)



date from 2014.1.1

phase と periodを固定し、2D fit. 振幅は各エネルギーごとにfree parameter。

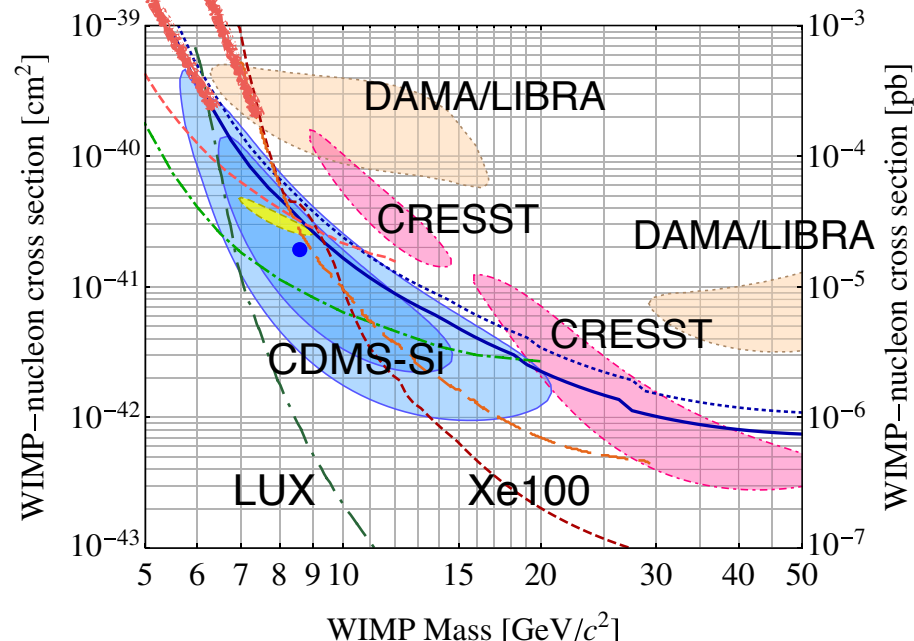
model dependent (WIMP)



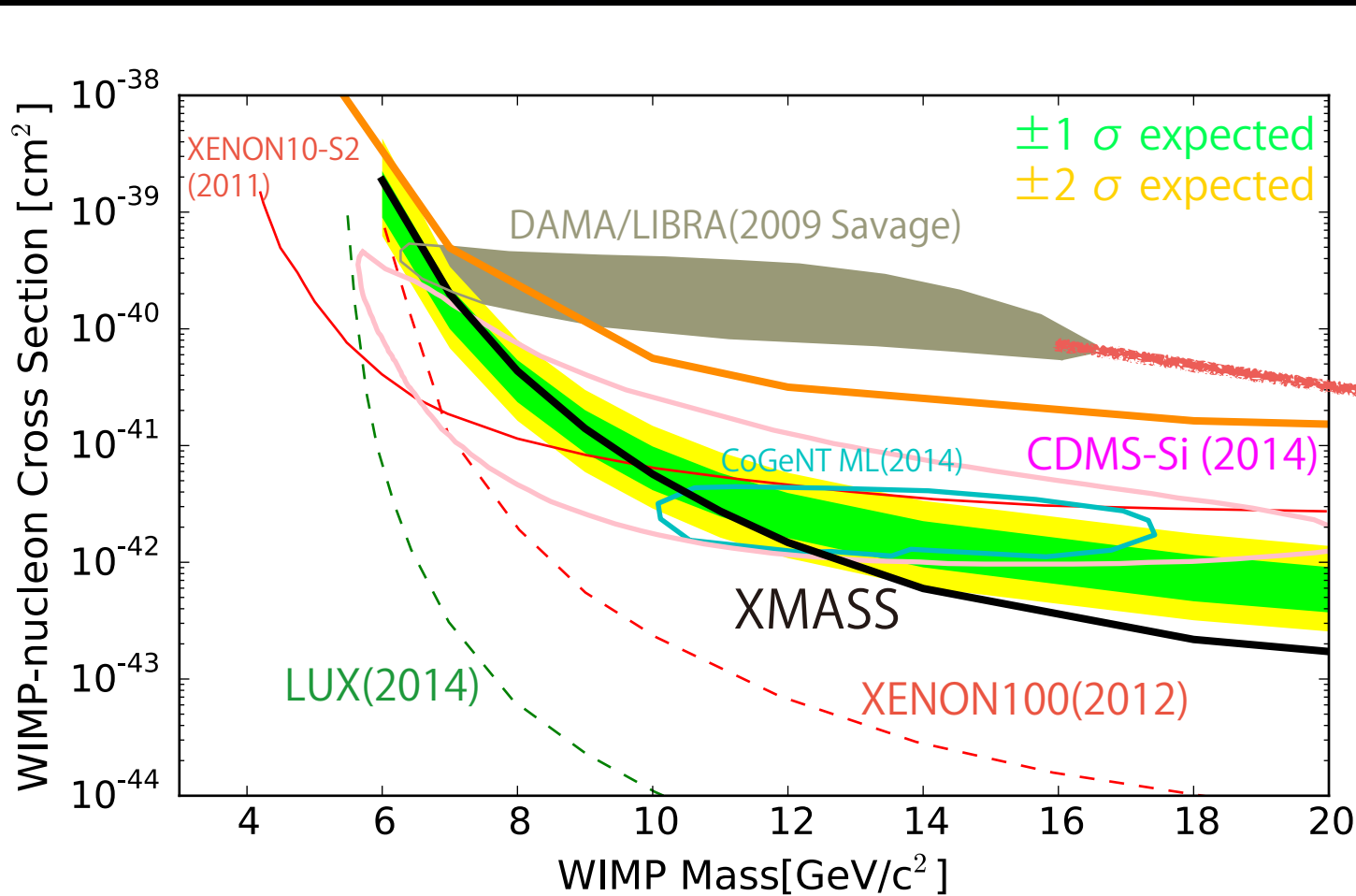
$$R_i^{\text{ex}}(E_i, t_j) = C_i + \sigma_{\chi n} \times A_i(m_{\chi}, E_i) \cos 2\pi(t_n - t_0)/T$$

WIMPを仮定

原子核反跳ではDAMAの断面積を仮定すると十分感度があることがわかる。



WIMP-nucleon Cross Section



V_0 220.0 km/s
 V_{esc} 650.0 km/s
 ρ_{dm} 0.3 GeV/cm³
 Lewin, Smith (1996)
 L_{eff} -1σ of
 Aprile PRL (2011).

煙

原子核依存？

DM-ICE (南極)

KIMs-NaI,
PICOLON など

-季節変動により初めてDAMA/LIBRAの領域をほぼカバー

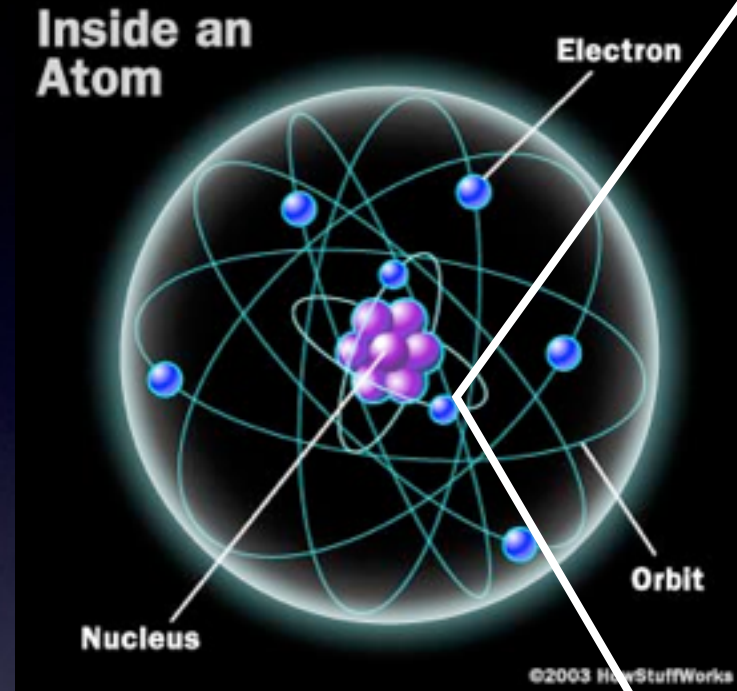
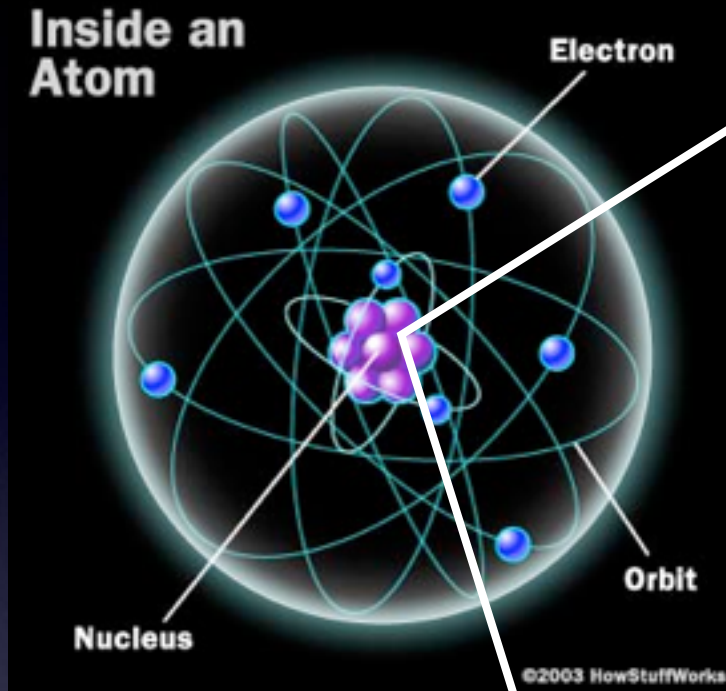
-今後のデータではCoGeNT, CDMS-Siもカバーできると期待される。

(=>本研究会ポスター 小林雅俊)

暗黒物質との相互作用

nuclear recoil

electronic recoil



fast neutron

WIMP

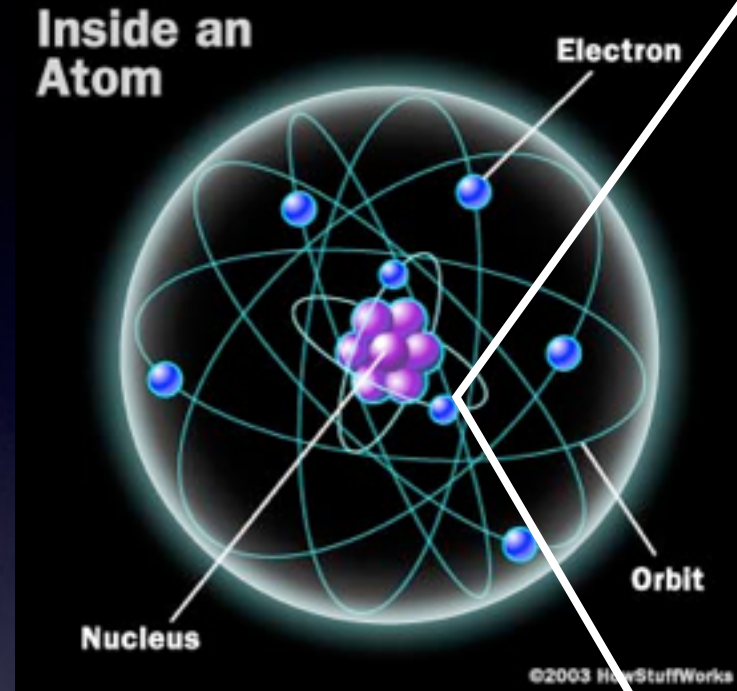
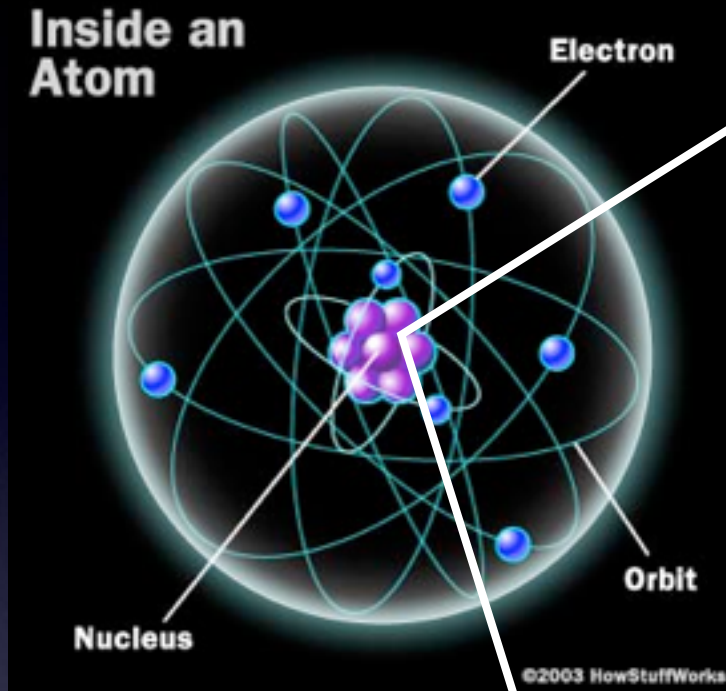
(SUSY, KK ...)

-U/Th/⁴⁰K etc background

暗黒物質との相互作用

nuclear recoil

electronic recoil



fast neutron

WIMP
(SUSY, KK ...)

-U/Th/⁴⁰K etc background

-WIMP-electron

-inelastic scattering ($\chi+N \rightarrow \chi+N^*$)

-Super WIMP (bosonic)

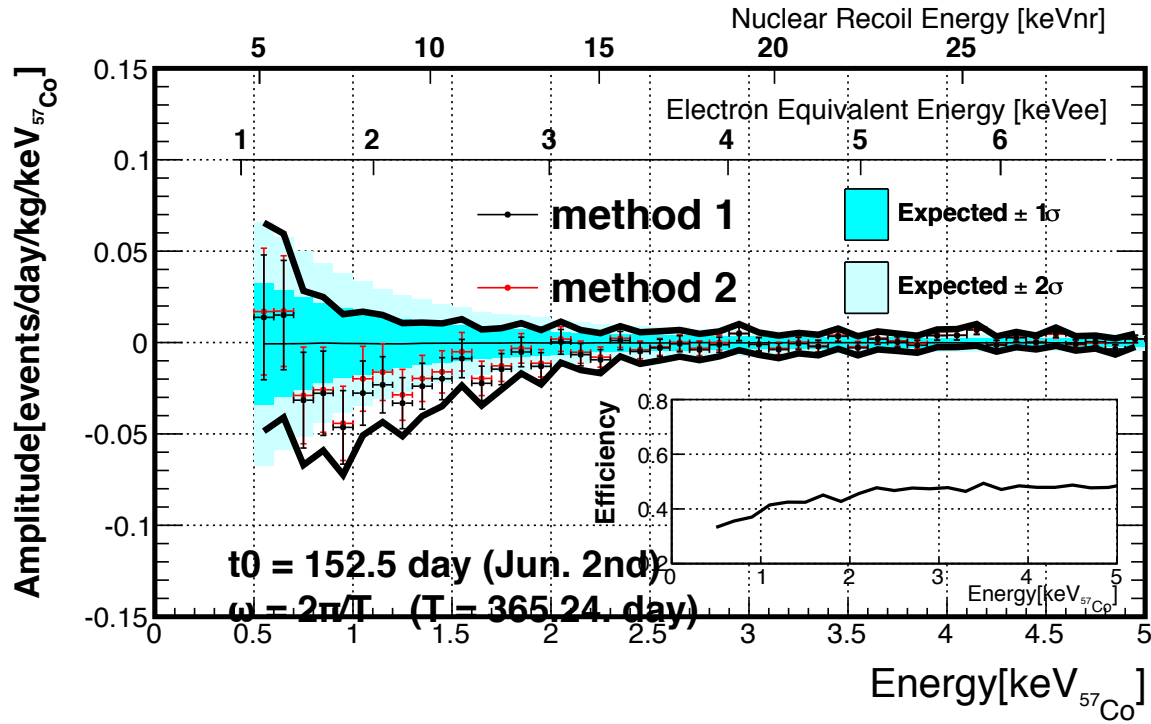
-Axion/Axion like particle

-Mirror DM

-Luminous DM ...

The signal is in electronic recoil ?

Model Independent Analysis



- 各エネルギーの 振幅を求めた結果。
- 二つの独立した解析は 良く一致している。
- 統計、系統誤差から予想される分布を10,000 dummy sample を作り求める。
- この分布から両方の解析で振幅の優位性はなく、1.8, 1.4 σ であった。
- XeやIなど原子による違いを含んだモデルを評価していくが **amplitudeは DAMA/LIBRAを排除している。**

method1

pull method

ndf=1709
 $\chi^2(\text{min})=1845.0$ p-val=0.0199
 $\chi^2(\text{no mod.})=1912.3$ p-val=0.013
 $\chi^2(\text{no mod.})-\chi^2(\text{min})=67.3$
 p-value=0.0675 (1.8 σ)

method2

covariance

ndf=1710
 $\chi^2(\text{min})=1901.73$ p-val=0.028
 $\chi^2(\text{no mod.})=1961.84$ p-val=0.022
 $\chi^2(\text{no mod.})-\chi^2(\text{min})=60.11$
 p-value=0.169 (1.4 σ)

- 2keV以下ではnegativeな振幅が現れている。統計的に優位ではないが、例えばXeではWIMP ~50 GeV以上でこのような振幅を持つ。
- 今後、系統誤差を減らした観測で明らかにして行く。

summary

- XMASS-I実験による初めての季節変動による観測。
 - 2013/11-2015/3までの359.2日のlive time
 - 二つの独立な解析が行われた。(pull method, Covariance matrix)
- model independent
 - 振幅の優位性はそれぞれ 1.8σ 、 1.4σ
 - negativeな振幅は興味深く、系統誤差を減らしてさらなる探索を行う。
- model dependent (WIMP search)
 - 季節変動を用いて初めてDAMA/LIBRAの領域をほぼ排除された。
 - 今後のデータではCoGeNT, CDMS-Siの領域もすべてカバーされることが期待されている。