



第7回高エネルギー物理春の学校

暗黒物質探索

2017/5/20

東京大学宇宙線研神岡宇宙素粒子研究施設

山下雅樹

目次

- **ダークマター（暗黒物質）について**
 - **宇宙の歴史**
 - **暗黒物質とは？**
 - **暗黒物質がわたしたちをつくった？**
- **暗黒物質を探す**
 - **身近にもある（はず）ダークマター**
 - **暗黒物質直接探索実験**

見えない暗黒物質の歴史



F. Zwicky



Vera Cooper Rubin

•1933

F. Zwicky

髪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。

•1989-1993

COBEによるCMBの観測 (人工衛星)

•2001-2010

WMAPによるCMBの観測 (人工衛星)

•2009-2013

PlanckによるCMBの観測 (人工衛星)

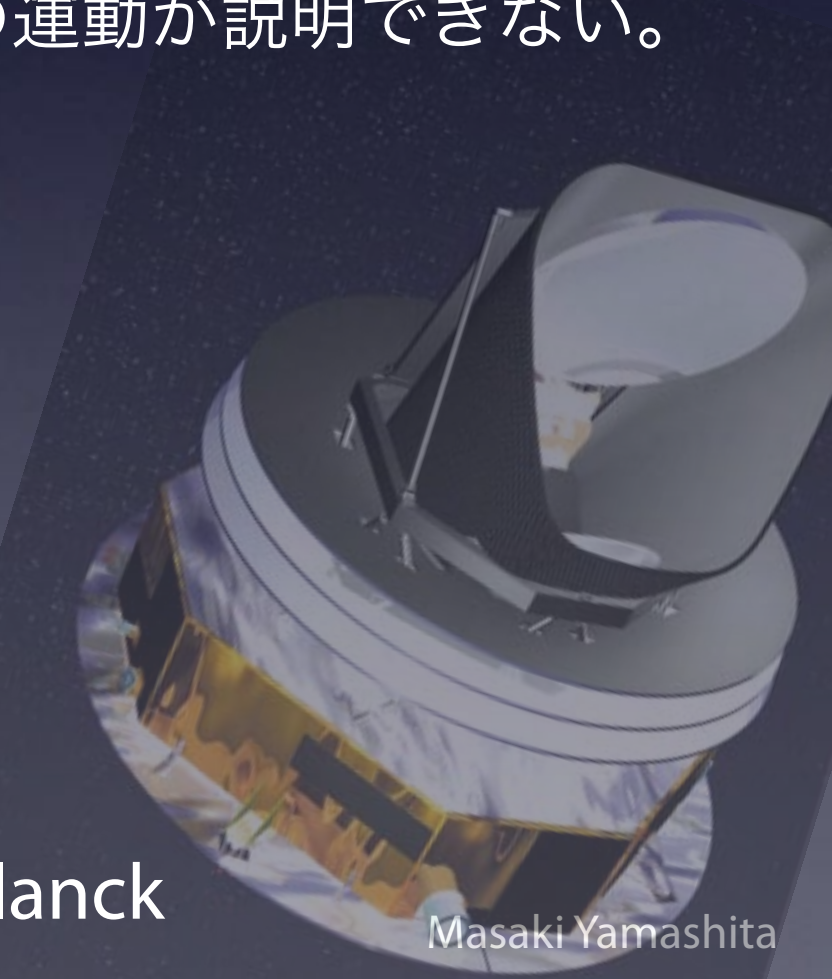
CMB => Cosmic Microwave Background
宇宙マイクロ波背景放射

138億年前の光の痕跡

NASA/WMAP

ESA/Planck

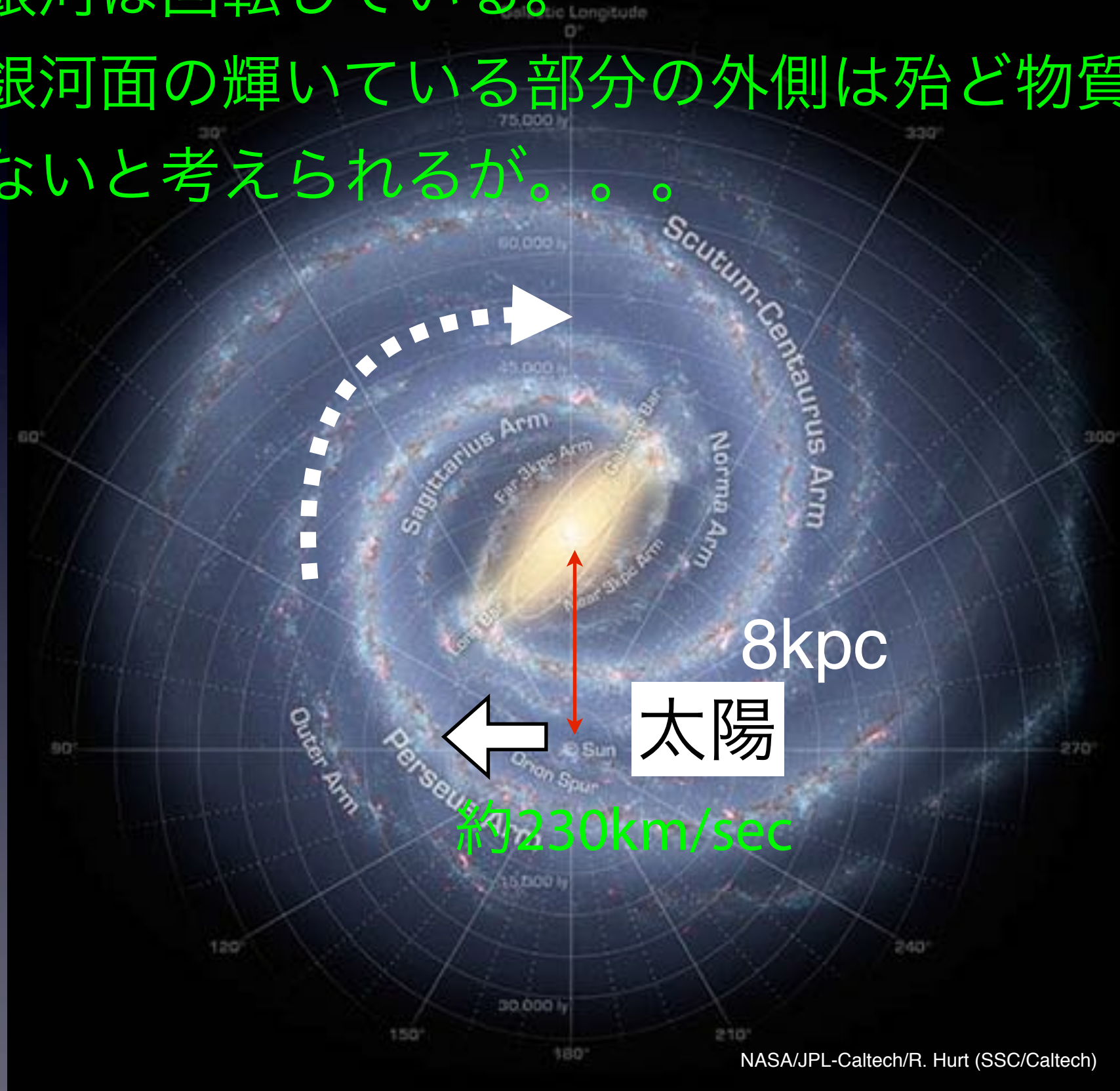
Masaki Yamashita



渦巻き銀河の回転速度

銀河は回転している。

銀河面の輝いている部分の外側は殆ど物質がないと考えられるが。。。



観測による暗黒物質の示唆

渦巻き銀河の回転速度

ケプラーの法則から軌道の速度は計算できる

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

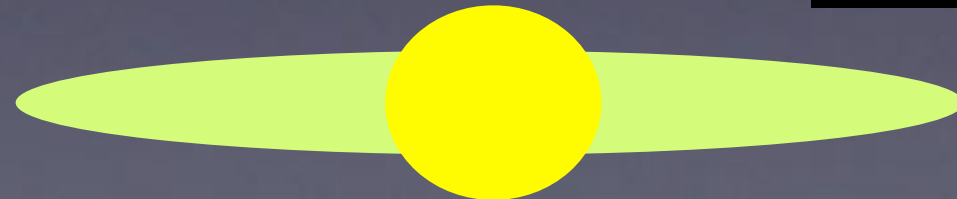
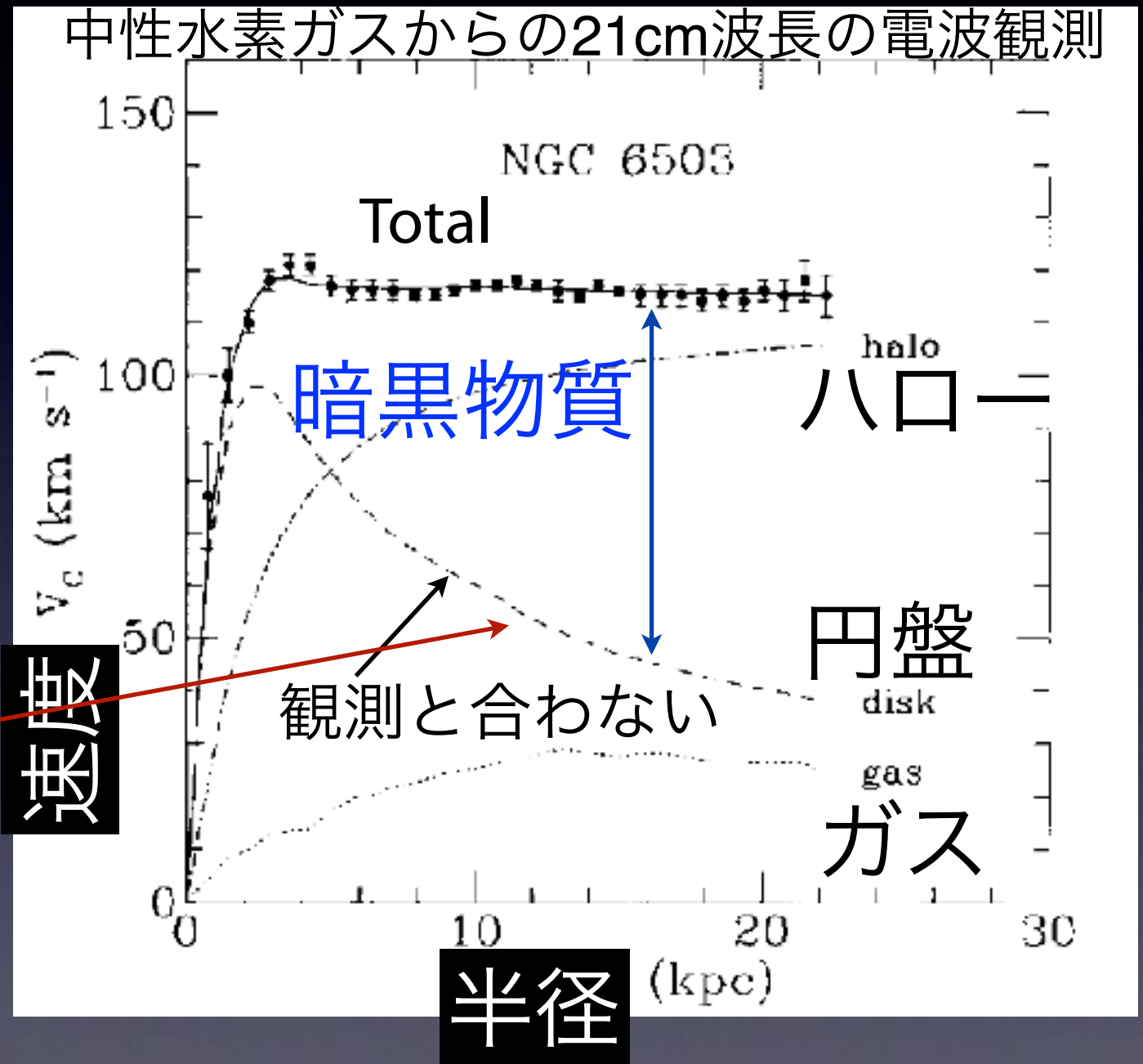
G: 重力定数

M(r): 半径r内の全質量

$$M(r) \propto r$$

であると説明できる

しかし、M(r)半径に比例して増加何かある



CMBによる最新の観測

いろんなことが分かった

宇宙初期の姿のスナップショット

宇宙の年齢

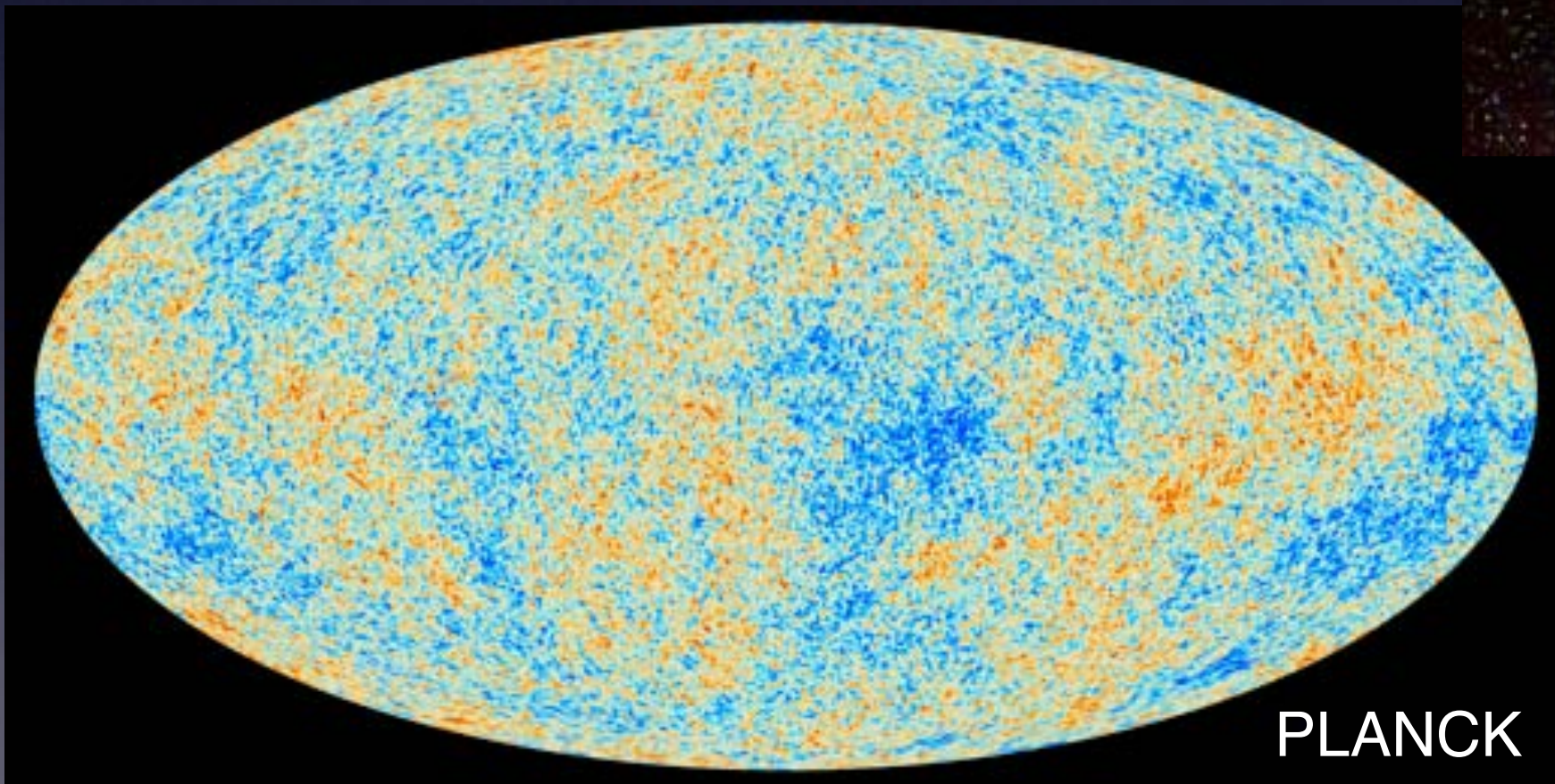
138億年

宇宙の曲率はゼロ (に近い) ($\Omega \sim 1$)

などなど



PLANCK



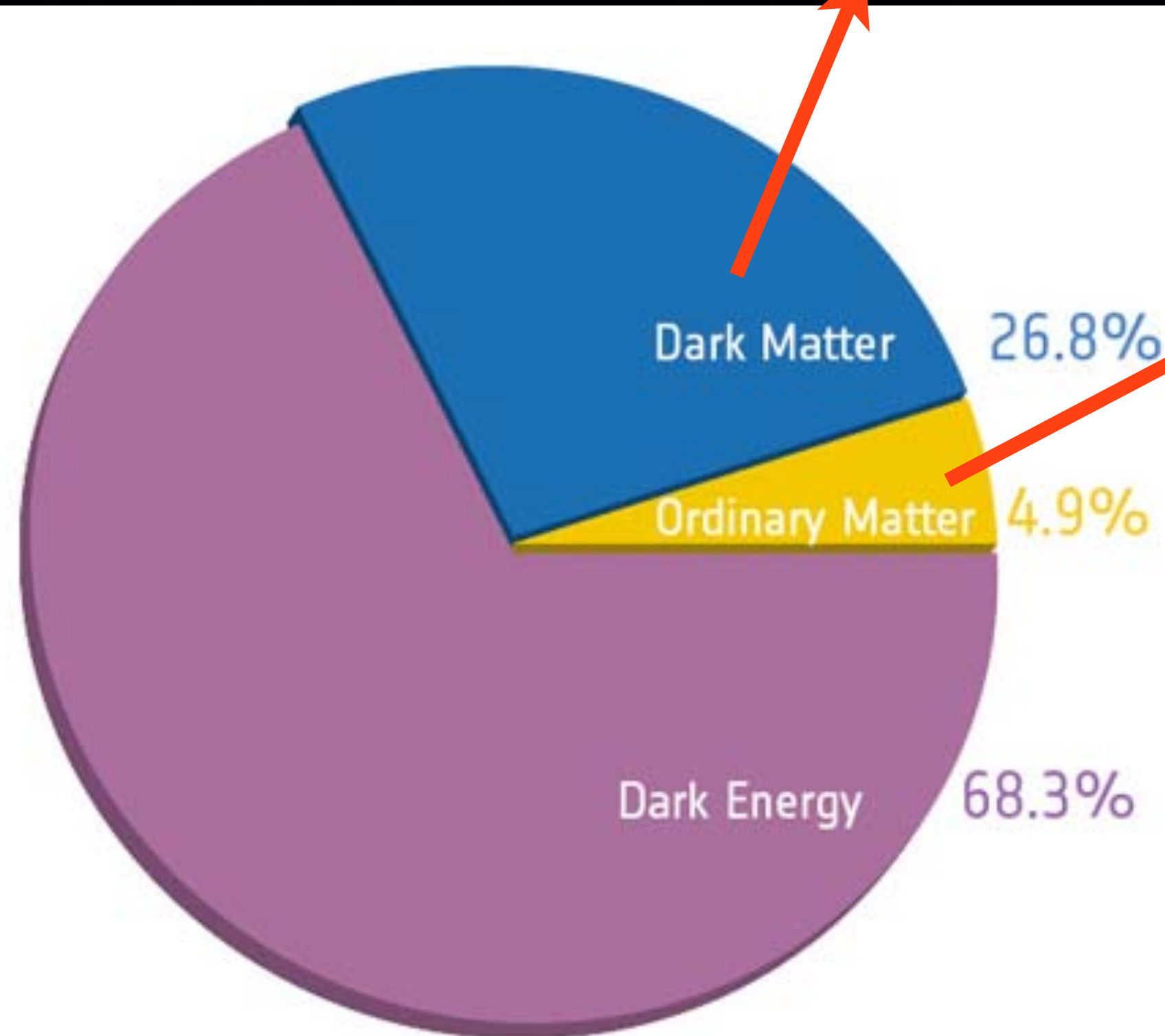
PLANCK

138億年前の宇宙の温度ゆらぎ(宇宙のしわ)

宇宙のレシピ

我々の知らない物質

星や銀河、
我々など



宇宙のレシピ

結論：

我々の知っている物質はたった5%

暗黒物質+暗黒エネルギー 95%

我々は宇宙のほとんどを知らないことを知った。。。。

暗黒物質、暗黒エネルギーを解明しようと世界中で研究が盛んに行われている。

Dark Energy

68.3%

宇宙のテスト

氏名

地球人

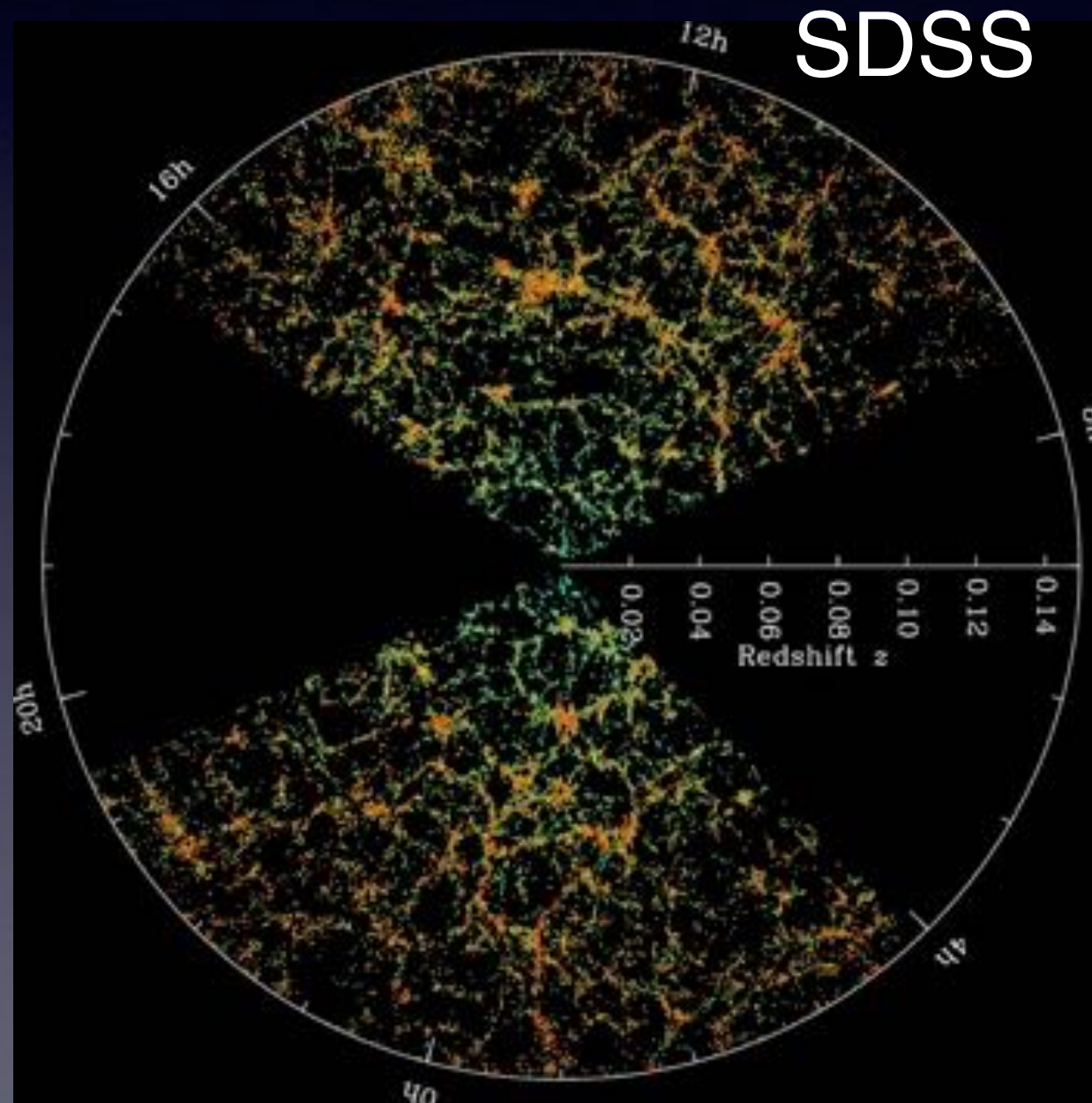
5/10

どうして地球ができたのか？

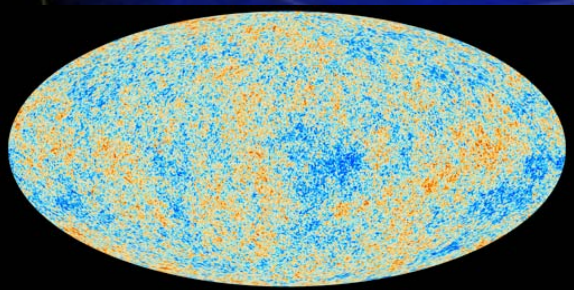
そもそも星や銀河はどうしてできたのか？

宇宙の大規模構造

銀河の分布にはたくさん集まっている所と空洞部分があることが観測から分かっている。
どうしてこの様な姿になったのか？



暗黒物質が宇宙の構造をつくる



青：ダークマター

白：銀河

シミュレーション

最初にちょっと密度がゆらいでいた

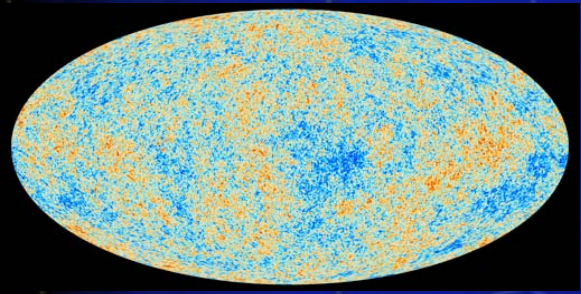
0.001%のオーダー

130億年前



現在

暗黒物質が宇宙の構造をつくる



青：ダークマター

白：銀河

シミュレーション

最初にちょっと密度がゆらいでいた

0.001%のオーダー 130億年前

暗黒物質の密度の揺らぎ

->ダークマターが集まる

->塵やガスが集まり、星、銀河ができる

->我々が誕生

->宇宙の歴史に欠かせない存在

現在

暗黒物質の考えられる性質

- 中性である
 - 電磁相互作用しない（見えない）
- バリオン（陽子や中性子）ではない
 - 弱い相互作用
- 冷たい（非相対論的粒子＝ゆっくり動いている。）
 - 大規模構造
- 予言された新粒子？

宇宙物理だけでなく素粒子物理にとっても重要

暗黒物質の候補

● ~~ニュートリノ~~

- 軽すぎる、速度が速い(Hot)→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)

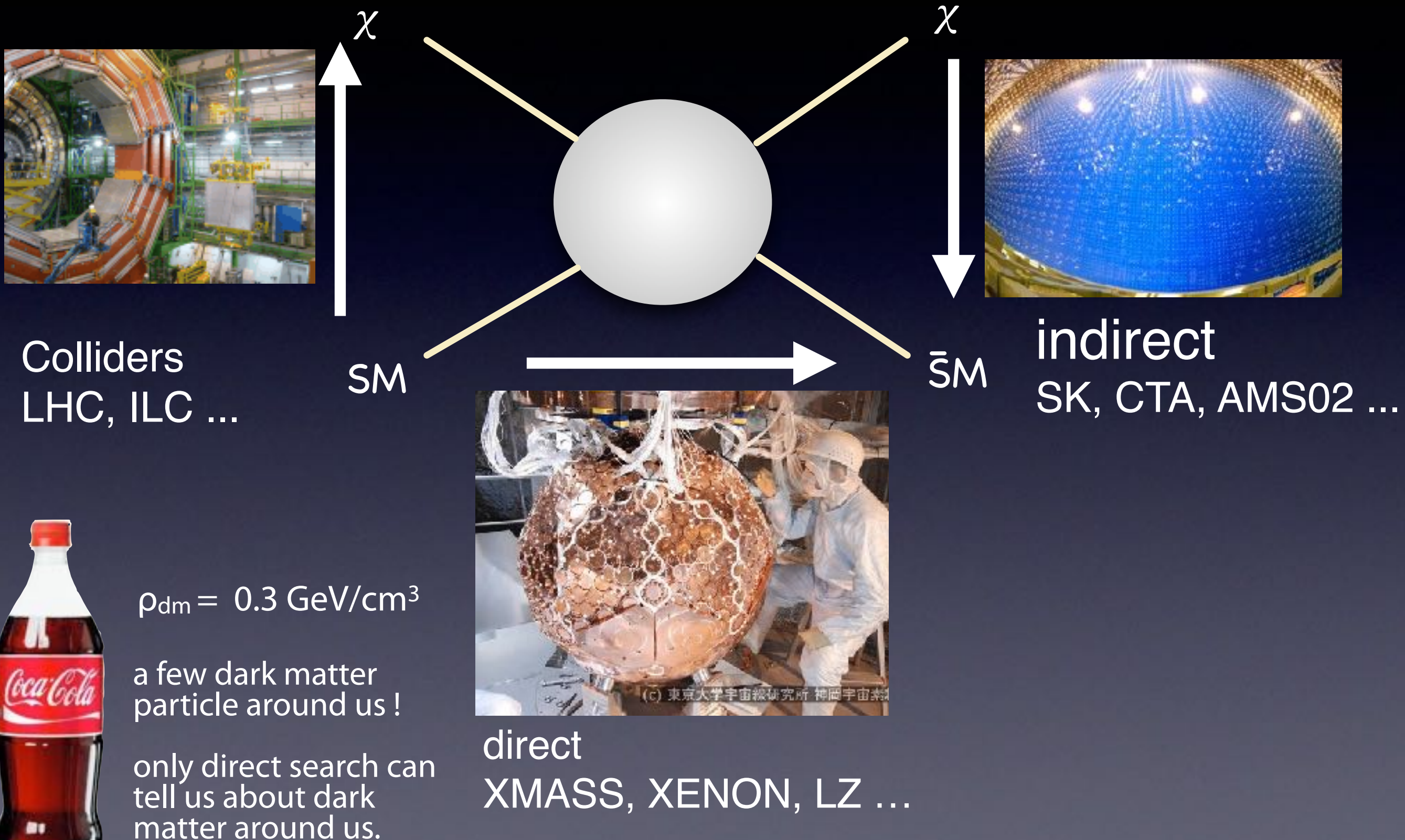
- アクシオン
- その他たくさん標準理論を超えたモデルで予言される粒子

ここまでのまとめ

- 最新の観測によると宇宙の質量・エネルギーの約20%暗黒物質（通常の物質の5倍程）
- 暗黒物質のおかげで星や銀河、そして我々が生まれたらしい。
- 正体は不明。新粒子????

暗黒物質探索

Approaches to look for dark matter

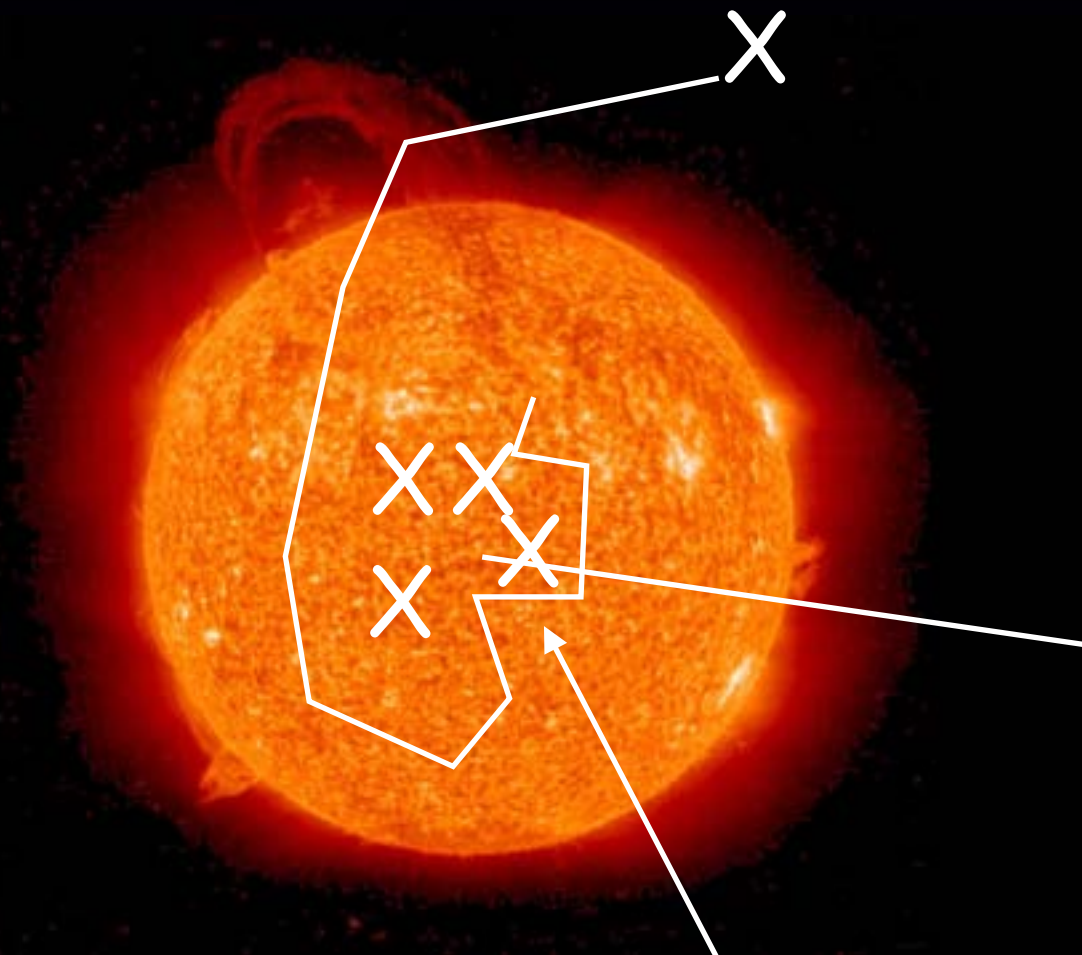


$$\rho_{dm} = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$$

a few dark matter particle around us!

only direct search can tell us about dark matter around us.

間接探索



スーパーカミオカンデ
ICE cubeなど

ν



X: dark matter
 ν : neutrino

太陽の重力に引き寄せられる
水素と衝突し速度を落とし集まる

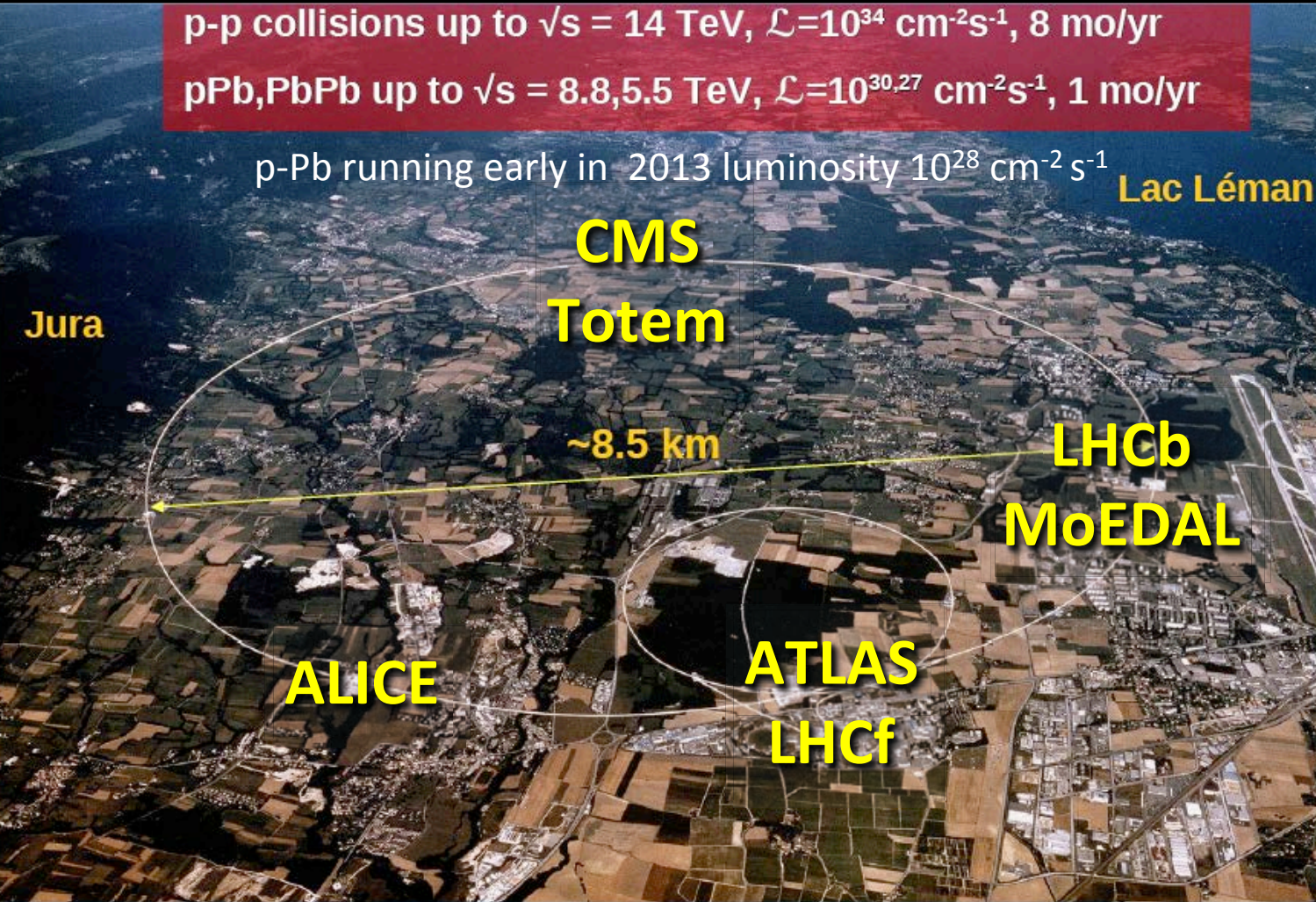
加速器 (LHC)

CERN Large Hadron Collider (LHC)

p-p collisions up to $\sqrt{s} = 14$ TeV, $\mathcal{L} = 10^{34}$ cm⁻²s⁻¹, 8 mo/yr
pPb, PbPb up to $\sqrt{s} = 8.8, 5.5$ TeV, $\mathcal{L} = 10^{30,27}$ cm⁻²s⁻¹, 1 mo/yr

p-Pb running early in 2013 luminosity 10^{28} cm⁻² s⁻¹

Lac Léman

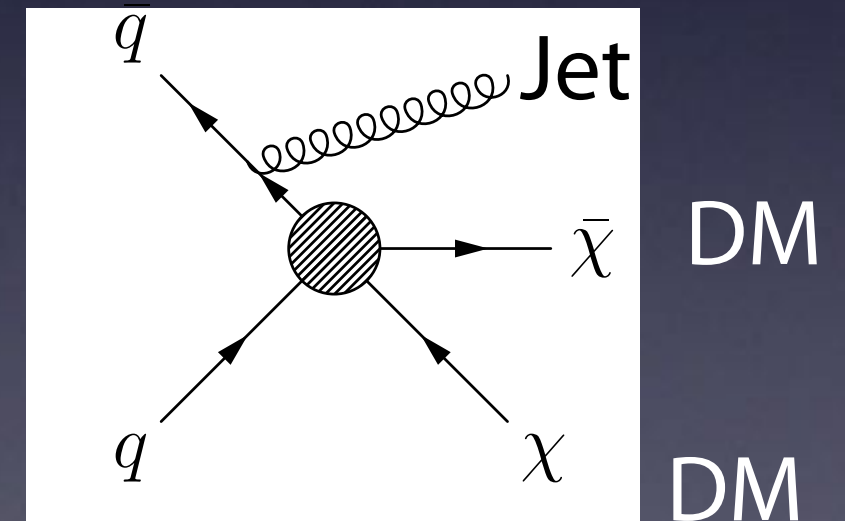


James L. Pinfold ICRC 2013 Rio de Janeiro

3

dark matter production
in association with single jet
in hadron collider.

暗黒物質候補の超対称性粒子
が生成した場合検出器をす
り抜ける。
->失ったエネルギーを探す。



他にもいるんなモードがある

arXiv:1109.4398v1 P.J. Fox et al.

Masaki Yamashita

直接探索

暗黒物質直接探索は激しい国際競争

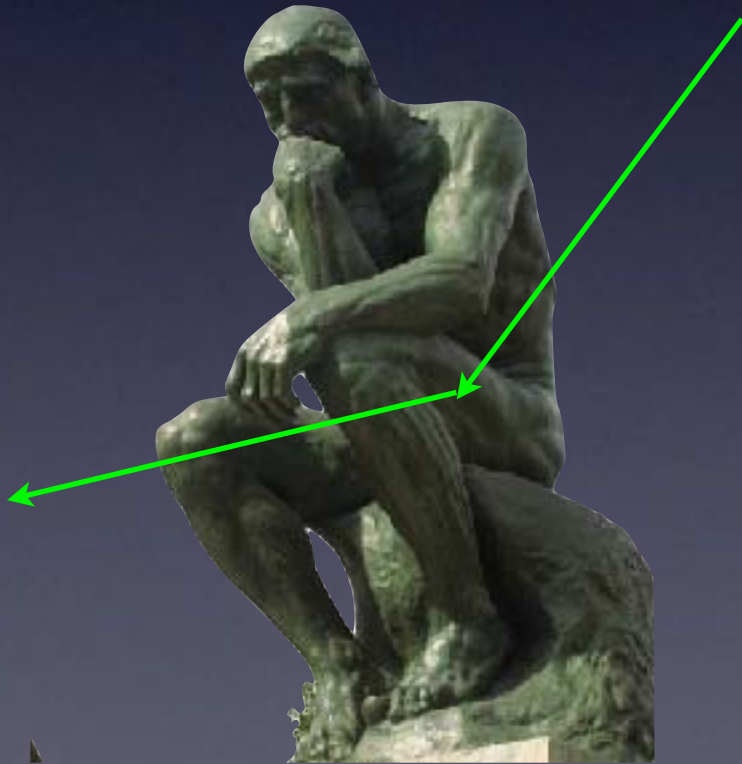


身の回りの暗黒物質



- 1Lに数個存在するくらいの密度

- 我々の気づかない間に体を**毎秒1000兆(10^{15})個**ほど通過しているが、**一年に1回も反応しない。**

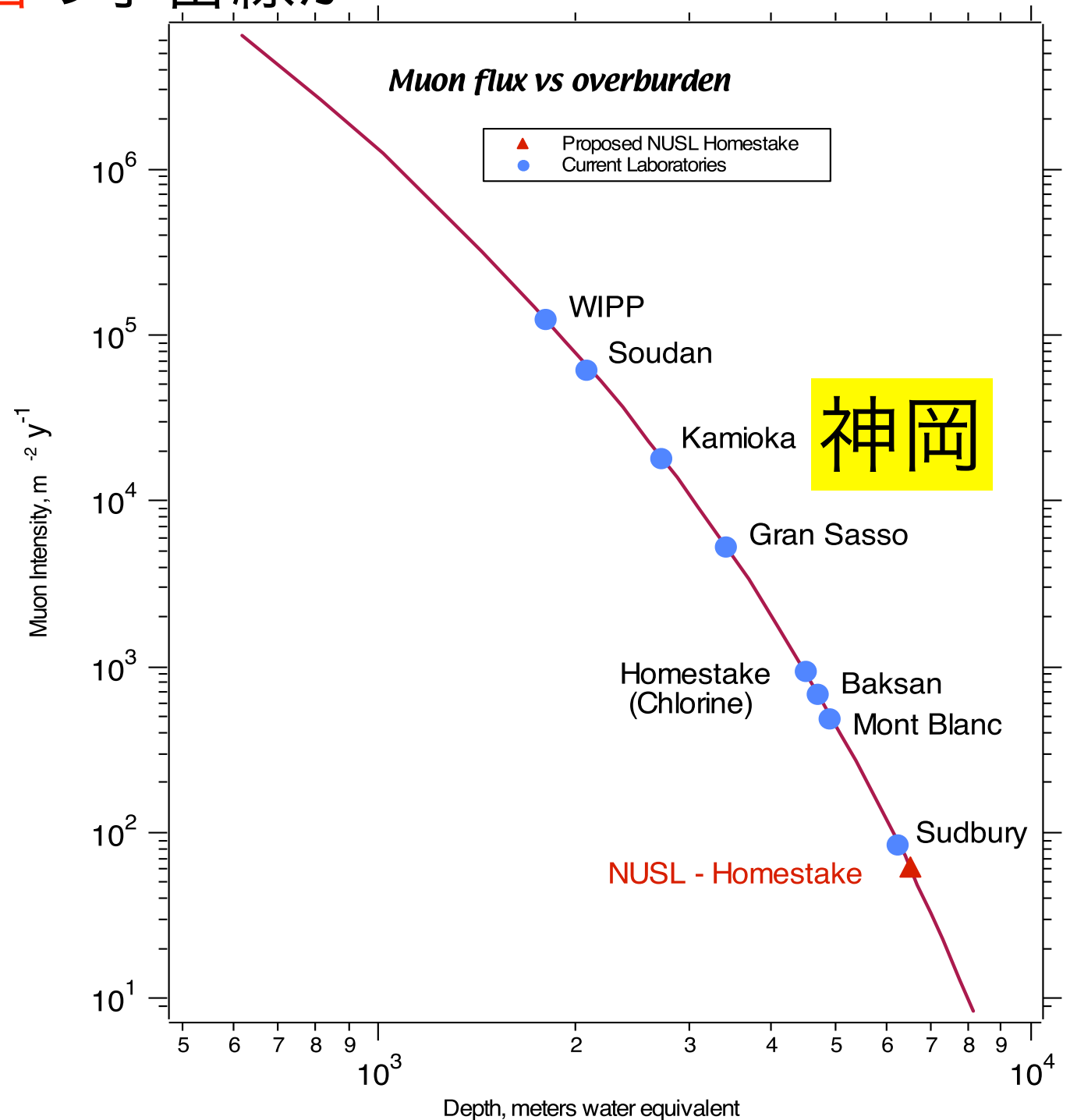
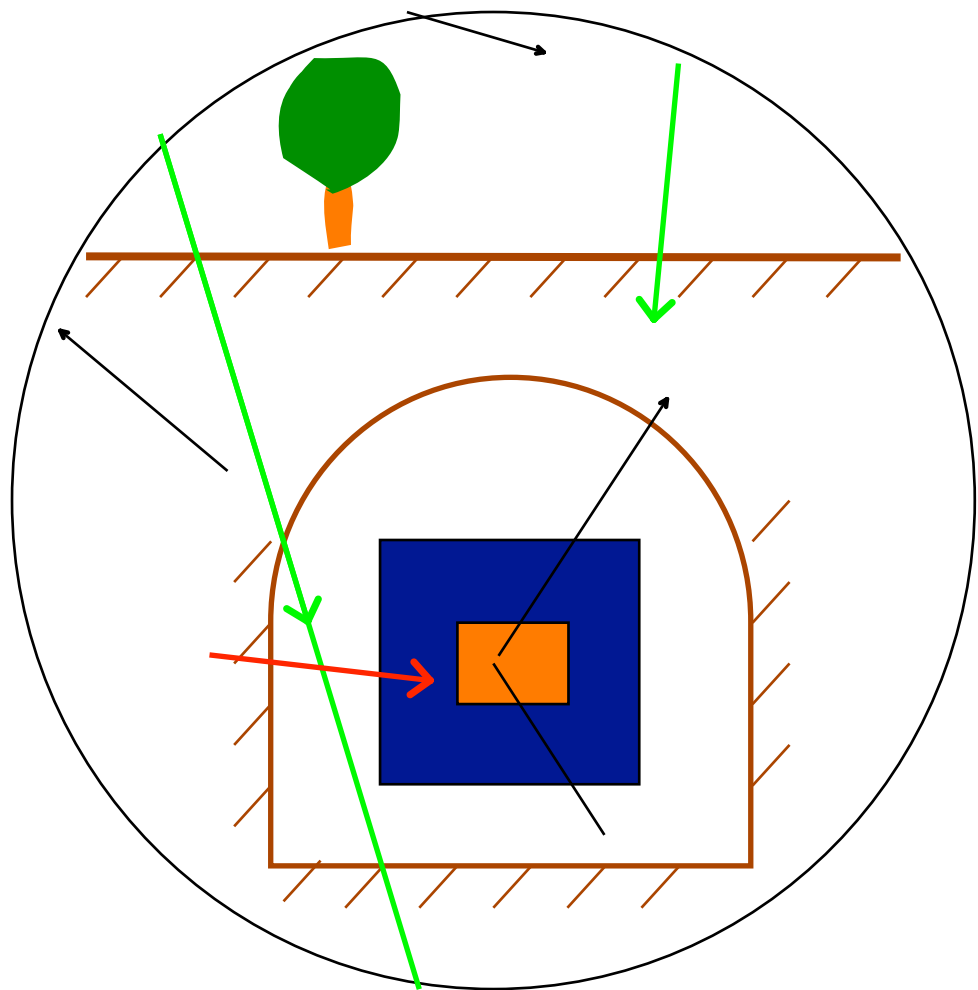


稀にしか反応しない暗黒物質をどうやってとらえるか？

なぜ、地下実験施設か？

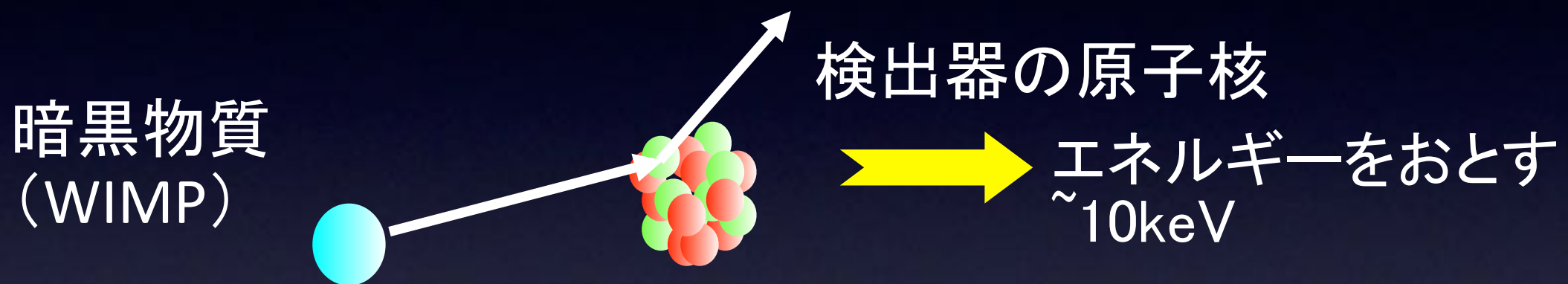
地上では手のひらに**毎秒数個**の宇宙線が降り注いでいる。

神岡地下では約**1/10⁵**に減る



暗黒物質直接探索原理

暗黒物質による原子核反跳によって落とされるエネルギーを捕らえる。(Goodman and Witten PRD(1985))



- 反跳核のエネルギー ~ 10 keV と小さい
- 検出頻度は非常に稀

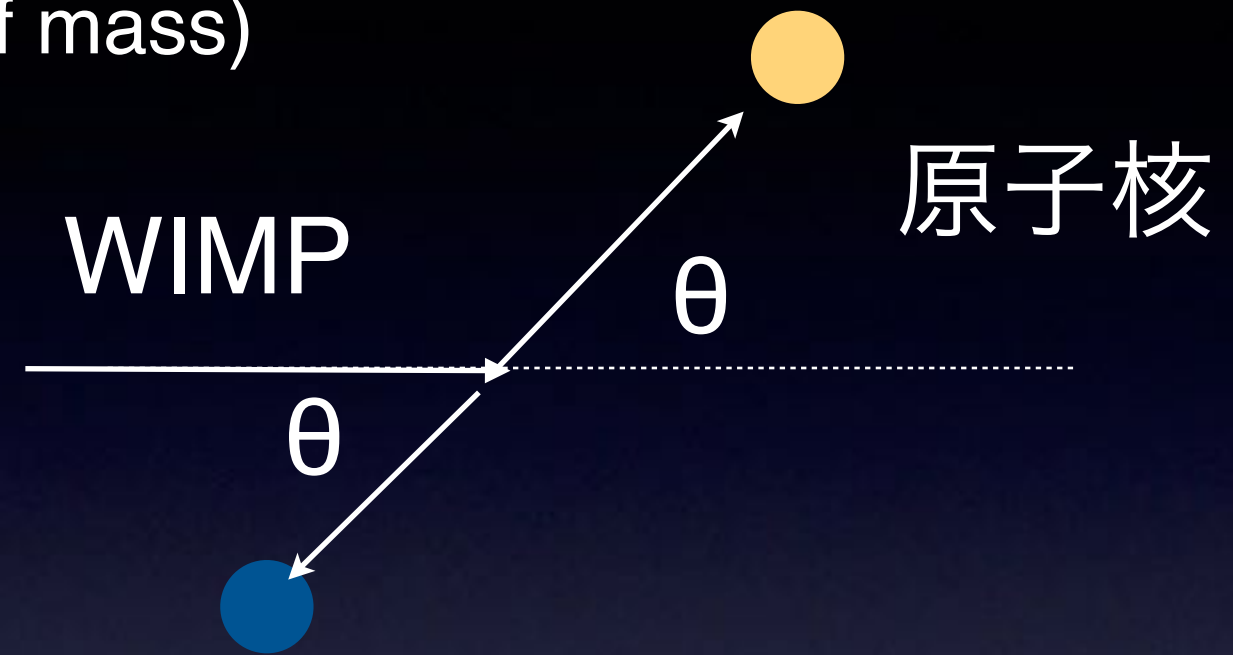
eV: 電子ボルト、真空中で1Vの電位差から電子1個が得るエネルギー

137Cs 662keV, 電子の質量511 keVなど

検出器に落とすエネルギー

$$E_R = r \frac{(1 - \cos\theta)}{2} E_W \quad (\text{center of mass})$$

$$r = \frac{4 M_W M_N}{(M_W + M_N)^2}$$



簡単のために

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

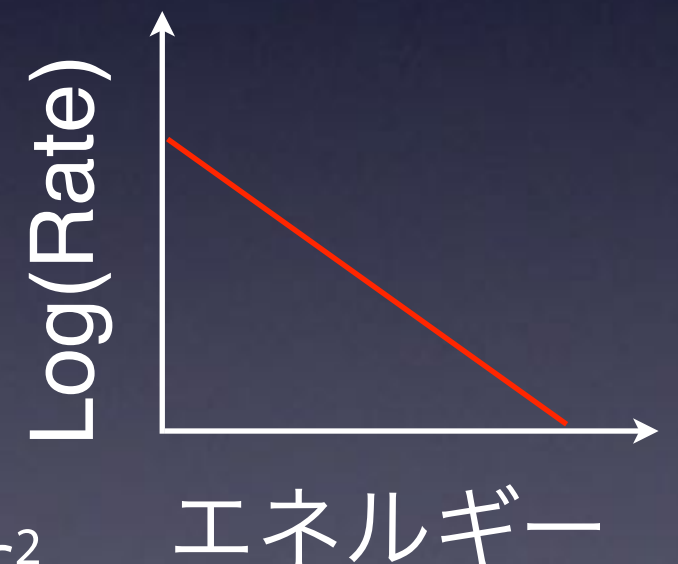
とすると

$$\text{WIMP velocity: } v \sim 0.75 \times 10^{-3} = 220 \text{ km/sec}$$

$$E_R = \frac{1}{2} M_W \beta^2 c^2 = \frac{1}{2} \times 100 \times \text{GeV}/c^2 (0.75 \times 10^{-3})^2 c^2 = 30 \text{ keV}$$

eV: 電子ボルト、真空中で1Vの電位差から電子1個が得るエネルギー

137Cs 662keV, 電子の質量511 keVなど



観測される頻度

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

Expected spectrum:

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

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

検出器

F: Form Factor
(depends on atomic nuclei)

R_0 : Event rate

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

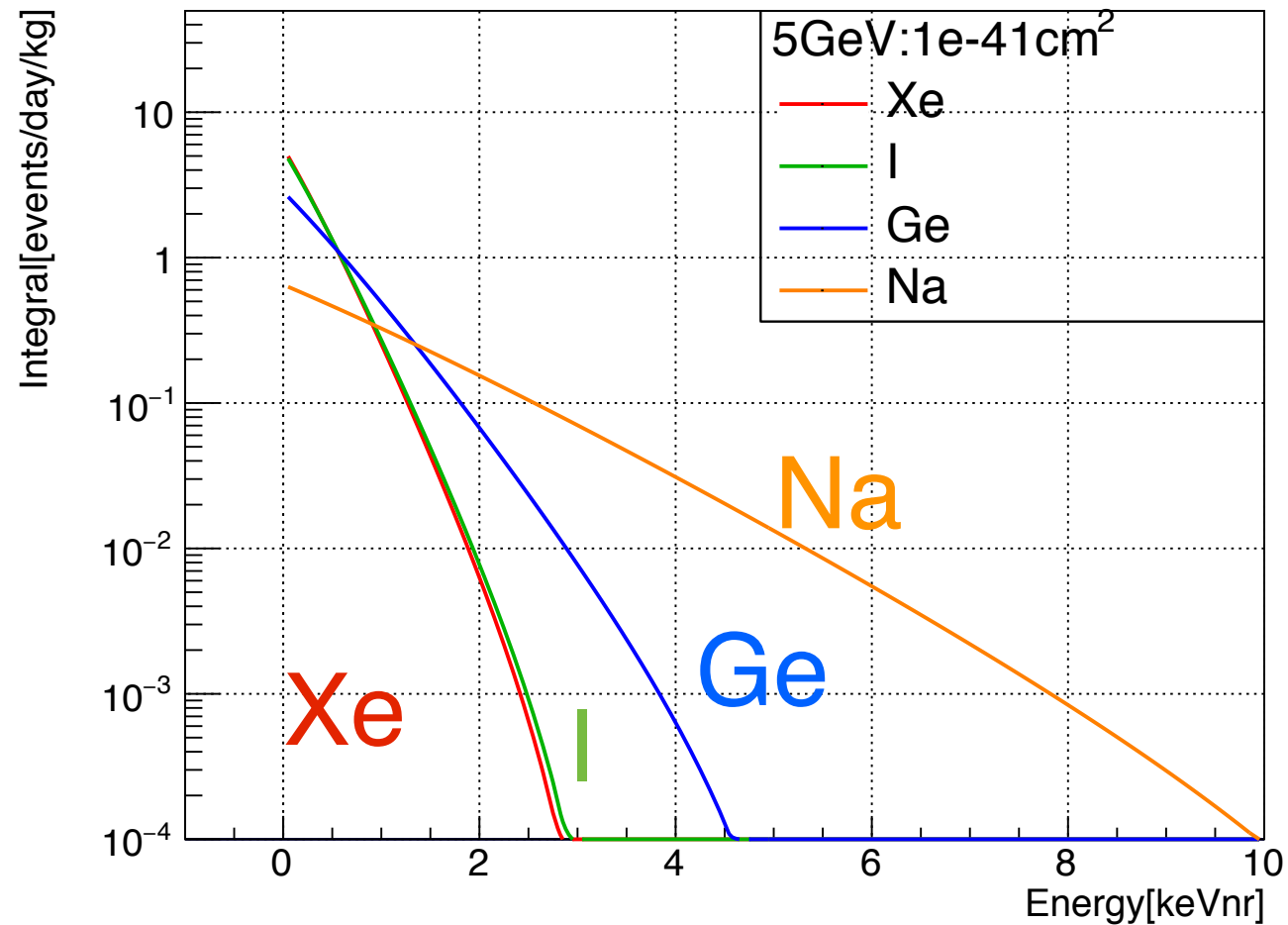
$$\sigma_0 = \boxed{A^2} \frac{\mu_T^2}{\mu_p^2} \sigma_{\chi-p}$$

Spin dependent

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

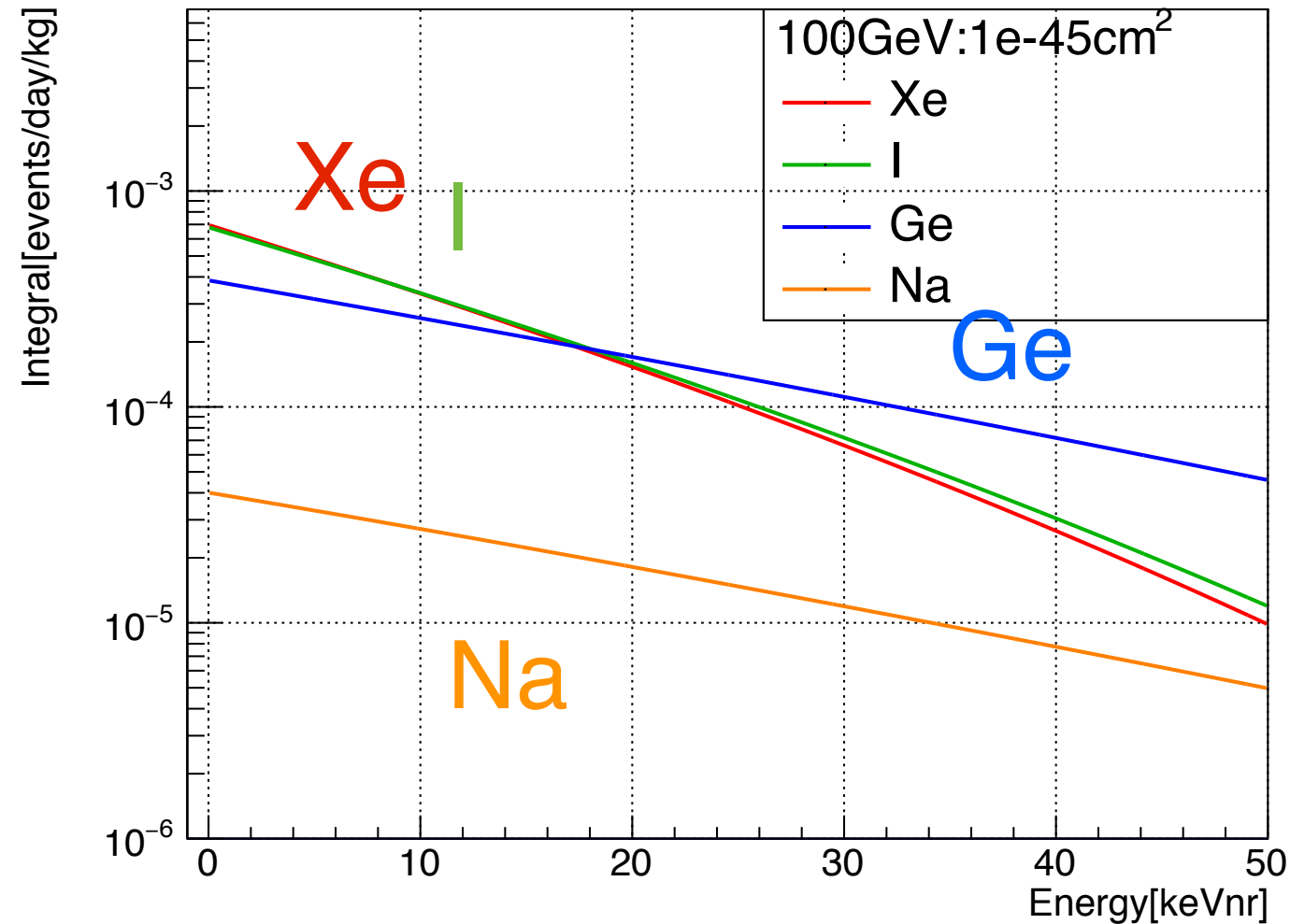
Differential spectrum

5GeV Mass



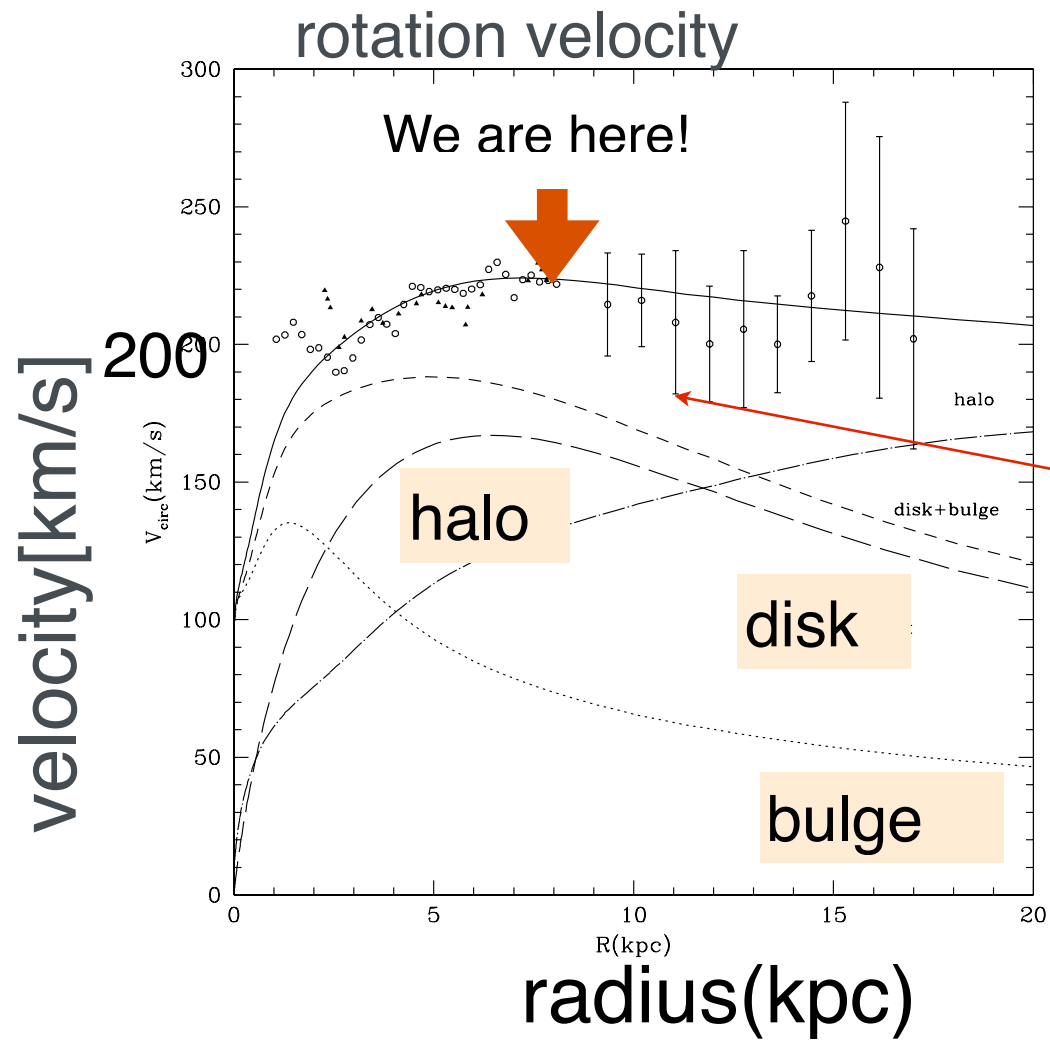
Energy threshold is important for low mass WIMPs.

100GeV Mass



Detector mass is important for high mass WIMPs.

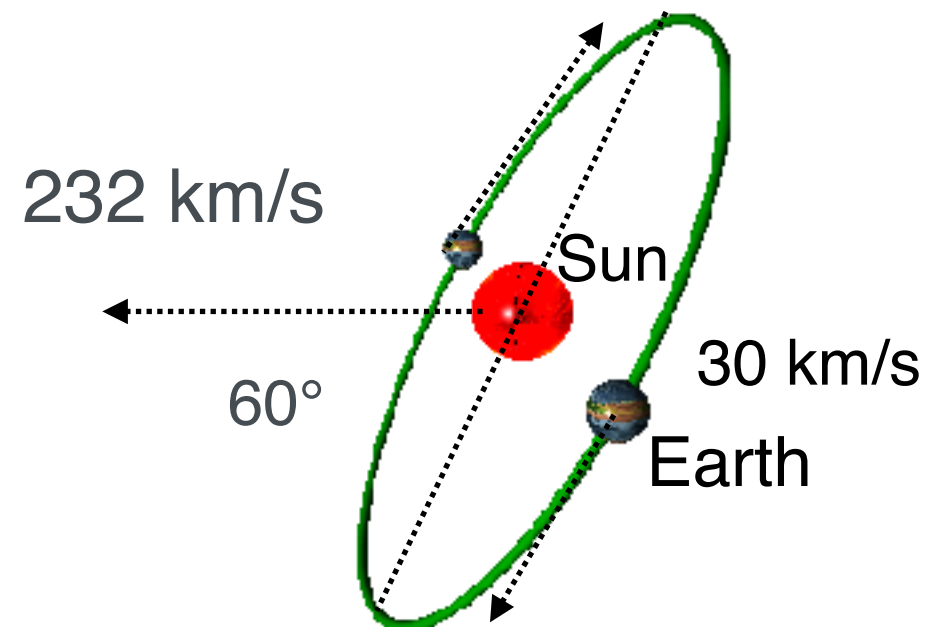
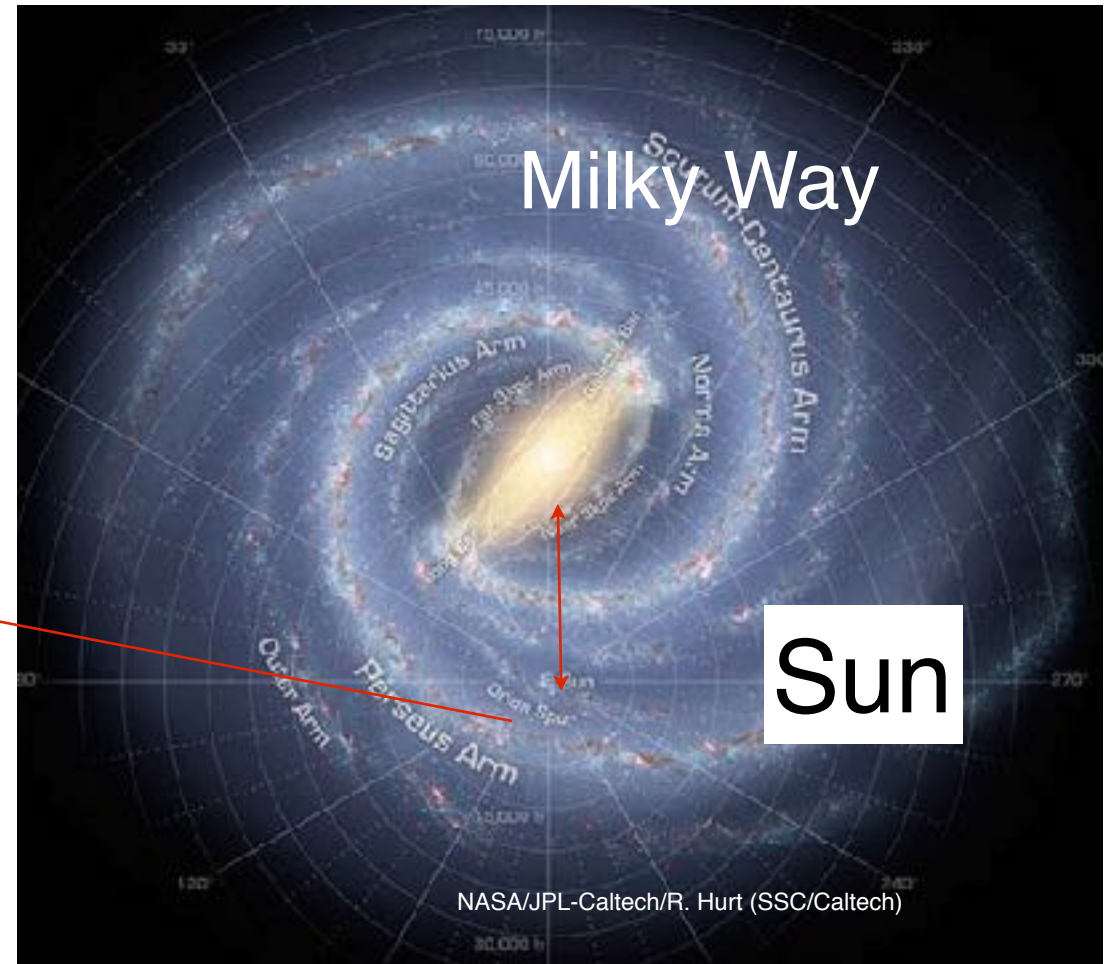
Annual modulation signal



KLYPIN et al. APJ 2002

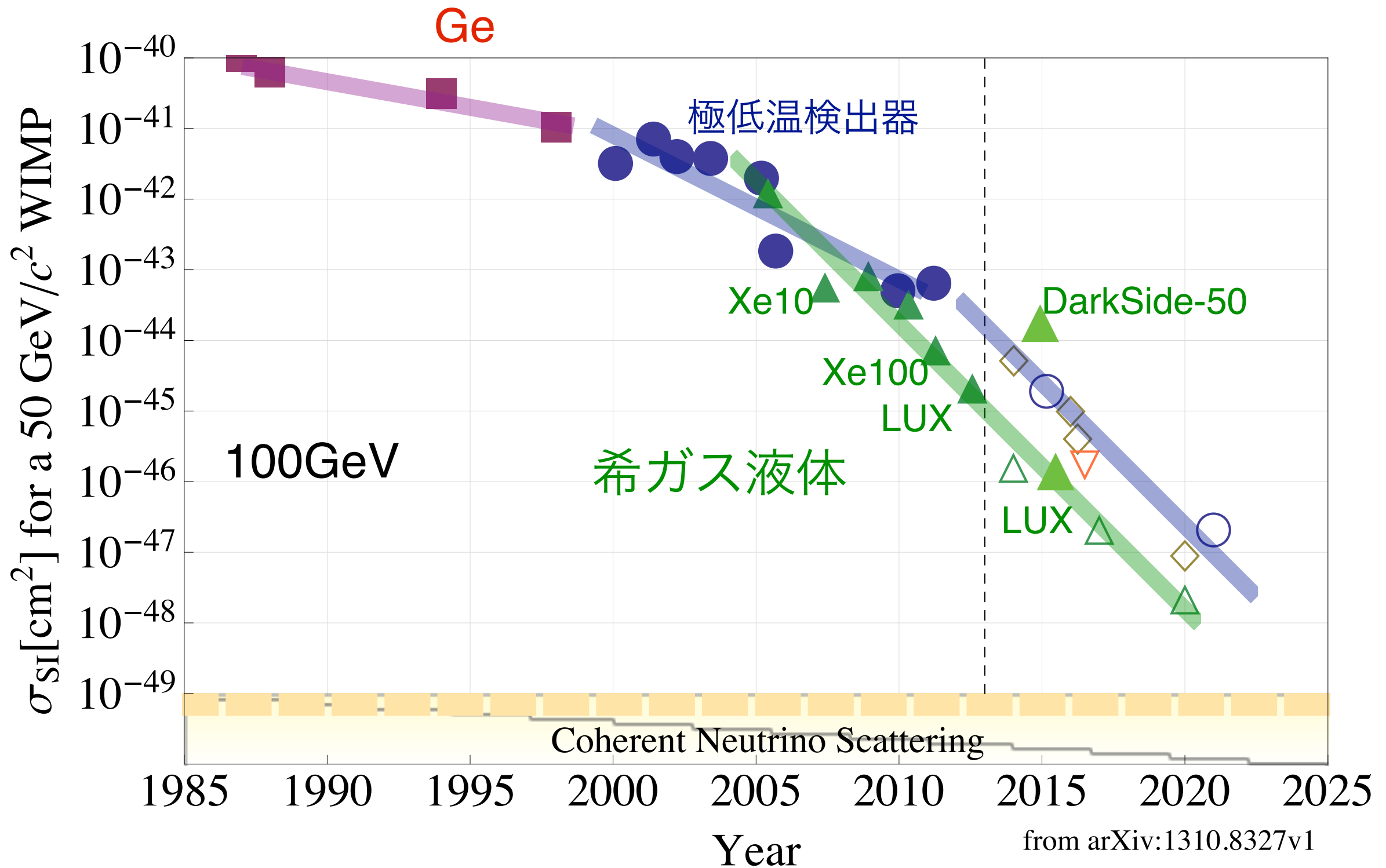
$$\frac{dR}{dE}(E, t) \approx S_0(E) + S_m(E) \cos \omega(t - t_c)$$

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



30年に及ぶ暗黒物質探索

Evolution of the WIMP–Nucleon σ_{SI}



from arXiv:1310.8327v1

ここまでのまとめ

- 暗黒物質探索にはいろんなアプローチの仕方がある。地下にもぐったり、宇宙に出たり、加速器で生成しようとしたり。
- 我々の身の回りにも暗黒物質物質が飛んでるはず。
- 暗黒物質直接探索では暗黒物質と通常物質の反応頻度が極めて小さいため大型な検出器が有効で、その競争が世界中で激しく行われている。

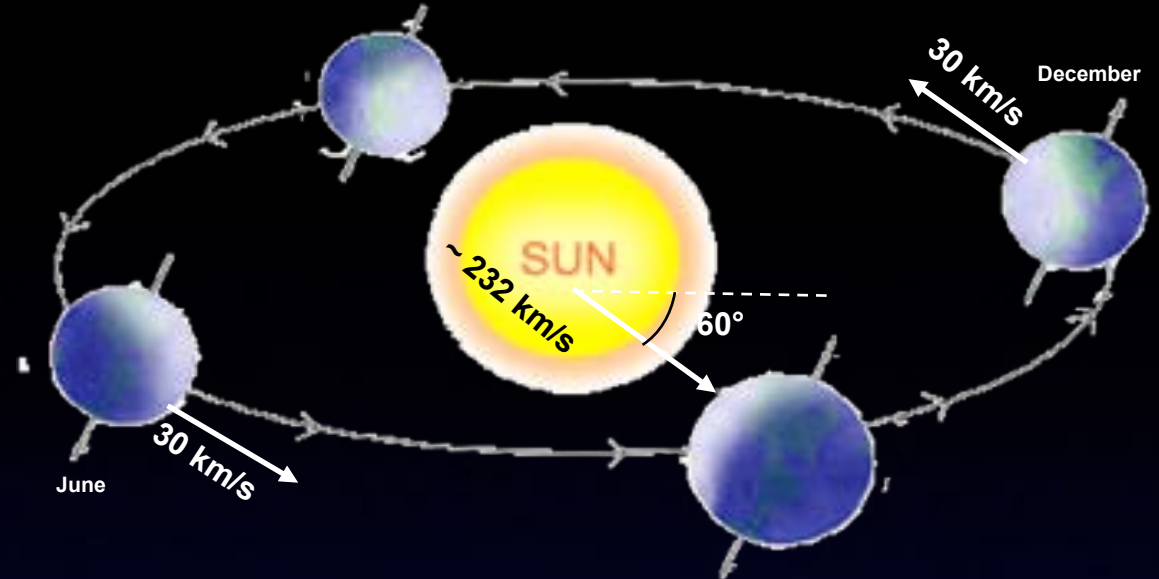
直接探索に使われる検出器

- エネルギー閾値 < 10 keV
- 大きな質量(トンサイズ)
- 放射性バックグラウンド

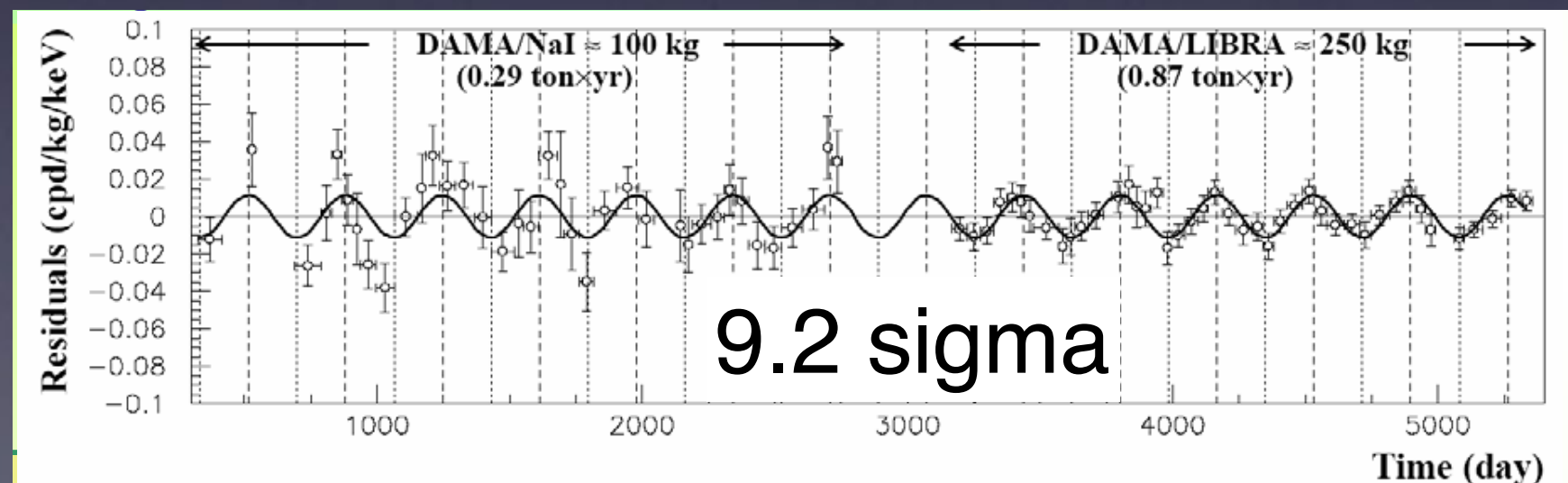
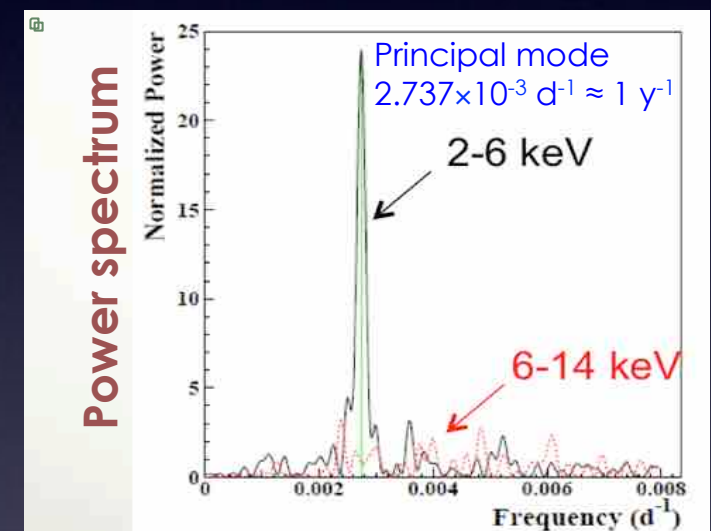


DAMA/LIBRA in Gran Sasso

- DAMA (~100 kg) + LIBRA (~250 kg) of NaI(Tl)
- Annual Modulation **9.2 σ**
 - (14 cycle \rightarrow 1.33 ton x yr)
- Upgrade in 2010
 - high QE 35% at 420nm
 - Energy threshold
 - **2keV \rightarrow 1keV**
 - a better energy resolution
 - a better noise/scintillation discrimination
 - less radioactivity



今年7年間のデータを発表すると聞いている。
XMASSもアップデートの予定

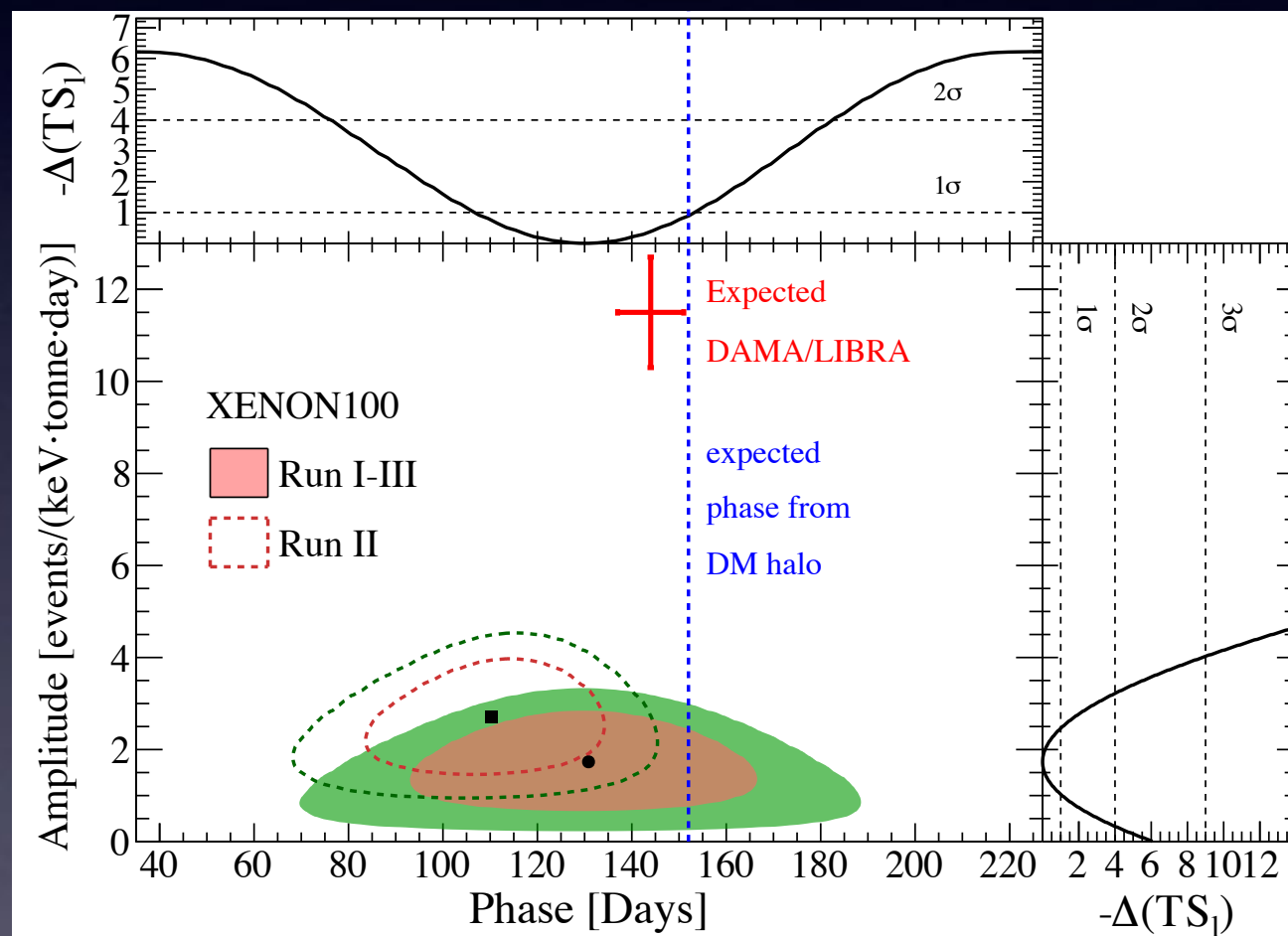


他の実験では？

Nuclear recoilではすでに否定されている。

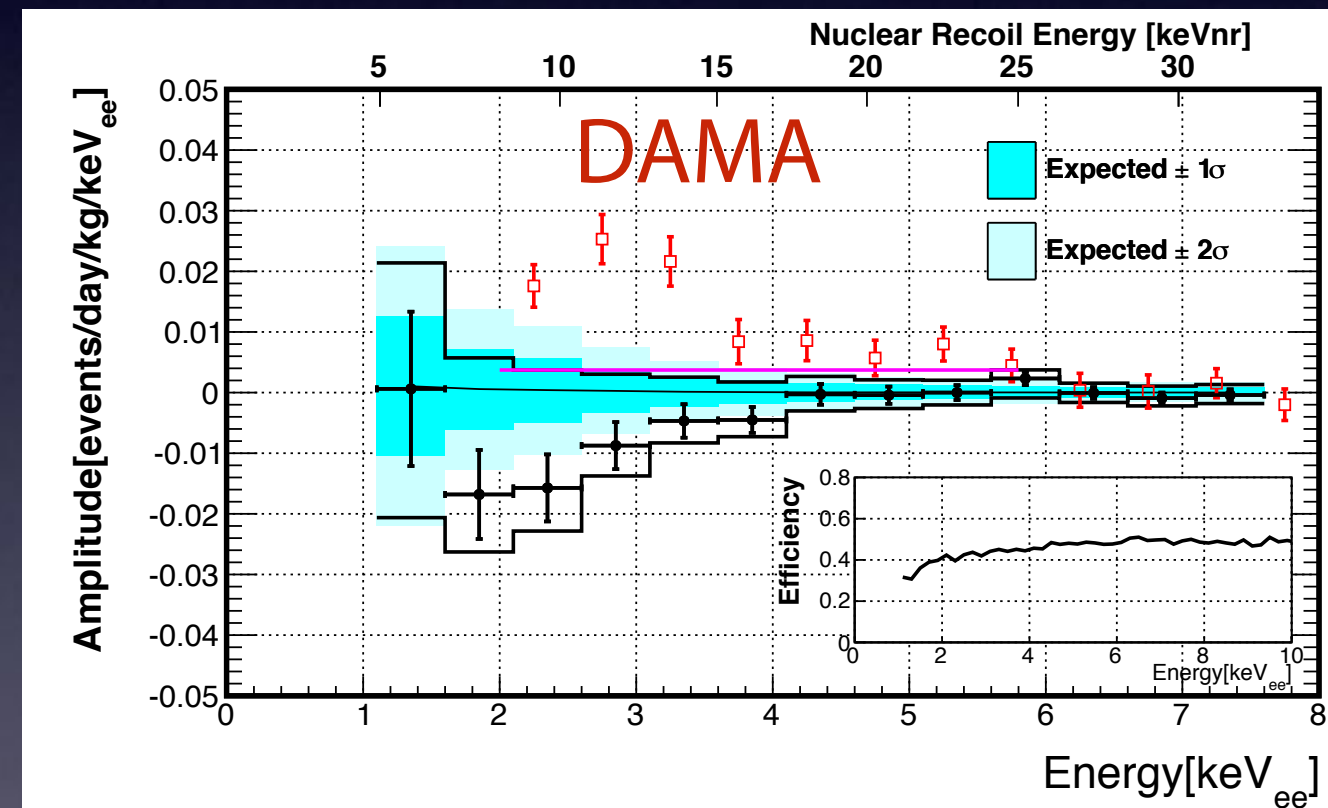
DM-electronなどは？

XENON100



arXiv:1701.00769v1

XMASS



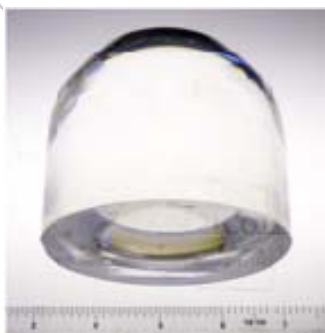
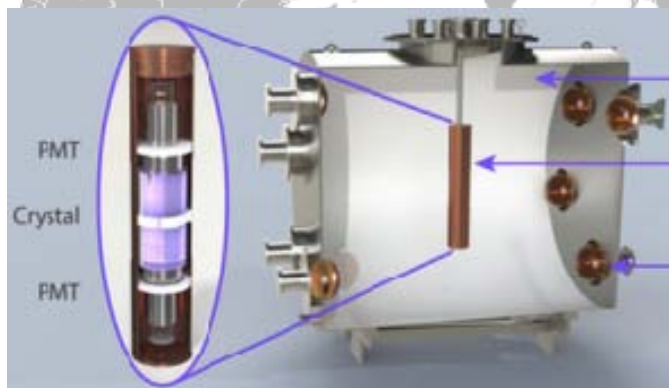
Phys. Lett. B759 (2016) 272-276

いずれも否定

Current & Planned NaI(Tl) Experiments

SABRE

★ Gran Sasso + Australia

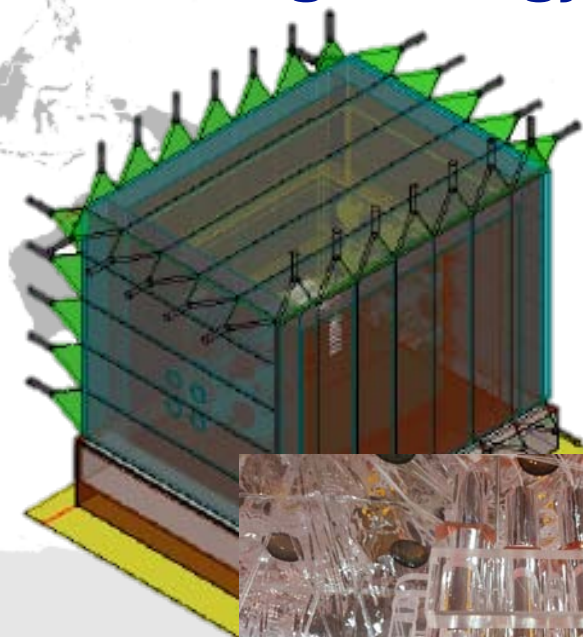


DM-Ice + KIMS

★ Yangyang

COSINE-100

107 kg at Yangyang

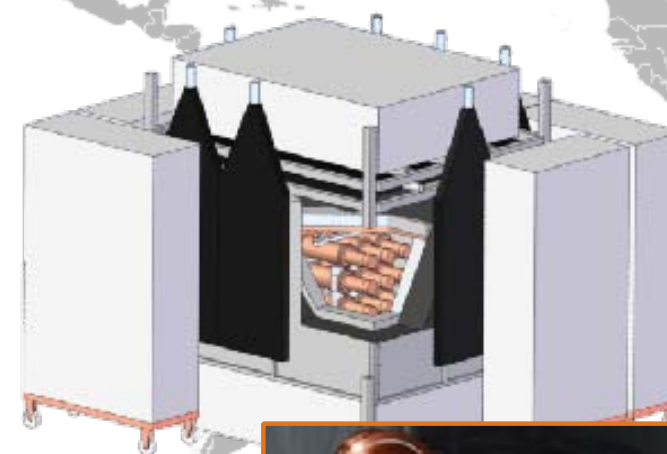


ANAIS

113 kg array

★ Boulby

★ Canfranc



from Reina Maruyama

特に、南半球でもちゃんと信号がでるか？

First Dark Matter Search Results from the XENON1T Experiment

E. Aprile,¹ J. Aalbers,^{2,*} F. Agostini,^{3,4} M. Alfonsi,⁵ F. D. Amaro,⁶ M. Anthony,¹ F. Arneodo,⁷ P. Barrow,⁸ L. Baudis,⁸ B. Bauermeister,⁹ M. L. Benabderrahmane,⁷ T. Berger,¹⁰ P. A. Breur,² A. Brown,² A. Brown,⁸ E. Brown,¹⁰ S. Bruenner,¹¹ G. Bruno,³ R. Budnik,¹² L. Büttikofer,^{13,†} J. Calvén,⁹ J. M. R. Cardoso,⁶ M. Cervantes,¹⁴ D. Cichon,¹¹ D. Coderre,¹³ A. P. Colijn,² J. Conrad,^{9,‡} J. P. Cussonneau,¹⁵ M. P. Decowski,² P. de Perio,¹ P. Di Gangi,⁴ A. Di Giovanni,⁷ S. Diglio,¹⁵ G. Eurin,¹¹ J. Fei,¹⁶ A. D. Ferella,⁹ A. Fieguth,¹⁷ W. Fulgione,^{3,18} A. Gallo Rosso,³ M. Galloway,⁸ F. Gao,¹ M. Garbini,⁴ R. Gardner,¹⁹ C. Geis,⁵ L. W. Goetzke,¹ L. Grandi,¹⁹ Z. Greene,¹ C. Grignon,⁵ C. Hasterok,¹¹ E. Hogenbirk,² J. Howlett,¹ R. Itay,¹² B. Kaminsky,^{13,†} S. Kazama,⁸ G. Kessler,⁸ A. Kish,⁸ H. Landsman,¹² R. F. Lang,¹⁴ D. Lellouch,¹² L. Levinson,¹² Q. Lin,¹ S. Lindemann,^{11,13} M. Lindner,¹¹ F. Lombardi,¹⁶ J. A. M. Lopes,^{6,8} A. Manfredini,¹² I. Mariş,⁷ T. Marrodán Undagoitia,¹¹ J. Masbou,¹⁵ F. V. Massoli,⁴ D. Masson,¹⁴ D. Mayani,⁸ M. Messina,¹ K. Micheneau,¹⁵ A. Molinario,³ K. Morå,⁹ M. Murra,¹⁷ J. Naganoma,²⁰ K. Ni,¹⁶ U. Oberlack,¹² B. Pelssers,⁹ R. Persiani,¹⁵ F. Piastra,⁸ J. Pienaar,¹⁴ V. Pizzella,¹¹ M.-C. Piro,¹⁰ G. N. Priel,¹² L. Rauch,¹¹ S. Reichard,^{8,14} C. Reuter,¹⁴ B. Riedel,¹⁹ A. Rizzo,¹ S. Rosenthal,¹² R. Saldanha,¹⁹ J. M. F. dos Santos,⁶ G. Sartorelli,⁴ M. Scheibelhut,⁵ S. Schindler,⁵ J. M. Schumann,¹³ L. Scotto Lavina,²¹ M. Selvi,⁴ P. Shagin,²⁰ E. Shockley,¹⁹ M. Silva,⁶ M. v. Sivers,^{13,†} A. Stein,²² S. Thapa,¹⁹ D. Thers,¹⁵ A. Tiseni,² G. Trincherio,¹⁸ C. Tunnell,¹² N. Upole,¹⁹ H. Wang,²² Z. Wang,³ Y. Wei,⁸ C. Weinheimer,¹⁷ J. Wulf,⁸ J. Ye,¹⁶ Y. Zhan,¹² (XENON Collaboration),^{††}

¹Physics Department, Columbia University, New York, NY 10027, USA

²Nikhef and the University of Amsterdam, Science Park, 1098XG Amsterdam, Neth

³INFN-Laboratori Nazionali del Gran Sasso and Gran Sasso Science Institute, 67100 L'A

⁴Department of Physics and Astrophysics, University of Bologna and INFN-Bologna, 40126

⁵Institut für Physik & Exzellenzcluster PRISMA, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099

⁶LIBPhys, Department of Physics, University of Coimbra, 3004-516 Coimbra, Por

⁷New York University Abu Dhabi, Abu Dhabi, United Arab Emirates

⁸Physik-Institut, University of Zurich, 8057 Zurich, Switzerland

⁹Oskar Klein Centre, Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova, Stockholm SE-

¹⁰Department of Physics, Applied Physics and Astronomy, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy

¹¹Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69117 Heidelberg, Germany

¹²Department of Particle Physics and Astrophysics, Weizmann Institute of Science, Rehovot

¹³Physikalisches Institut, Universität Freiburg, 79104 Freiburg, Germany

¹⁴Department of Physics and Astronomy, Purdue University, West Lafayette, IN 4790

¹⁵SUBATECH, IMT Atlantique, CNRS/IN2P3, Université de Nantes, Nantes 44307,

¹⁶Department of Physics, University of California, San Diego, CA 92093, US

¹⁷Institut für Kernphysik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 48149 Münster,

¹⁸INFN-Torino and Osservatorio Astrofisico di Torino, 10125 Torino, Italy

¹⁹Department of Physics & Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chica

²⁰Department of Physics and Astronomy, Rice University, Houston, TX 77005, U

²¹LPNHE, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris Diderot, CNRS/IN2P3, Paris

²²Physics & Astronomy Department, University of California, Los Angeles, CA 9009

(Dated: May 19, 2017)

We report the first dark matter search results from XENON1T, a ~ 2000 -kg-target-n phase (liquid-gas) xenon time projection chamber in operation at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso in Italy and the first ton-scale detector of this kind. The blinded search used 34.2 ton-years of data acquired between November 2016 and January 2017. Inside the (1042 ± 12) kg fiducial volume and in the $[5, 40]$ keV_{nr} energy range of interest for WIMP dark matter searches, the recoil background was $(1.93 \pm 0.25) \times 10^{-4}$ events/(kg \times day \times keV_{ee}), the lowest ever achieved in a dark matter detector. A profile likelihood analysis shows that the data is consistent with the background-only hypothesis. We derive the most stringent exclusion limits on the spin-independent WIMP-nucleon interaction cross section for WIMP masses above 10 GeV/c², with a minimum cross section of 7.7×10^{-47} cm² for 35-GeV/c² WIMPs at 90% confidence level.

PACS numbers: 95.35.+d, 14.80.Ly, 29.40.-n, 95.55.Vj

Keywords: Dark Matter, Direct Detection, Xenon

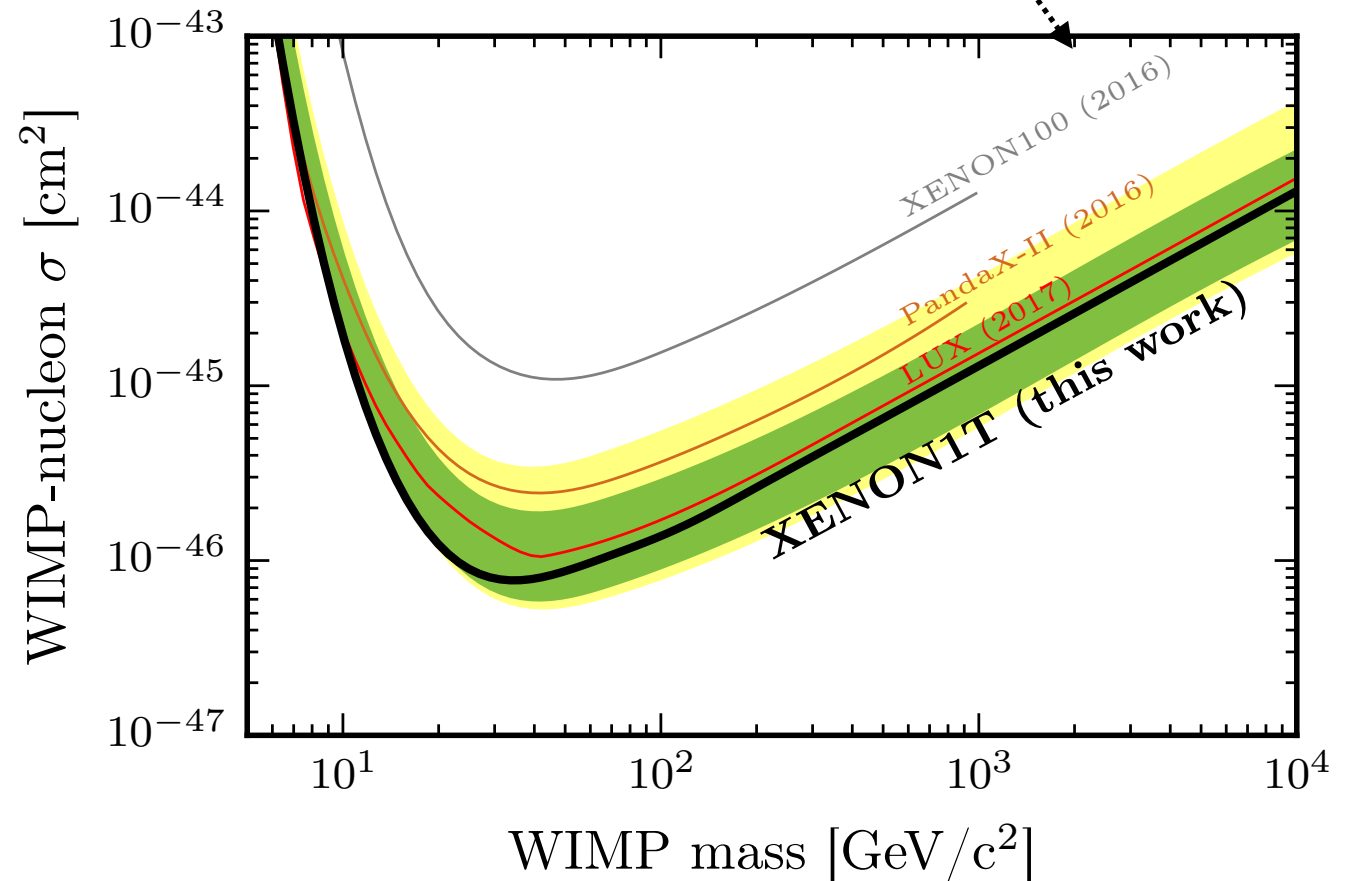
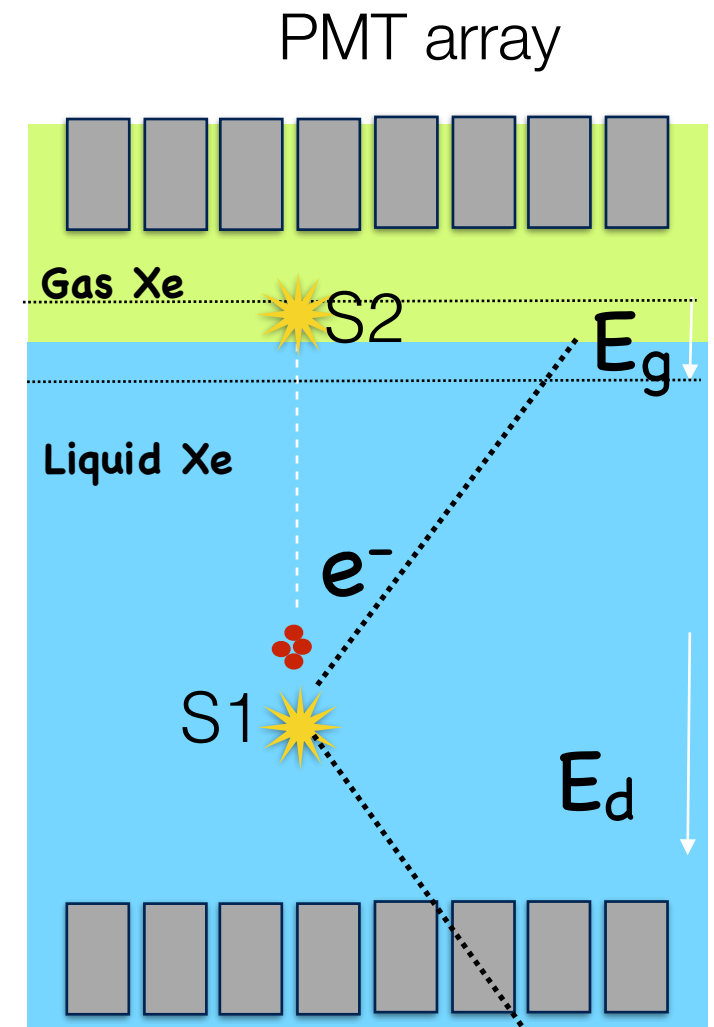
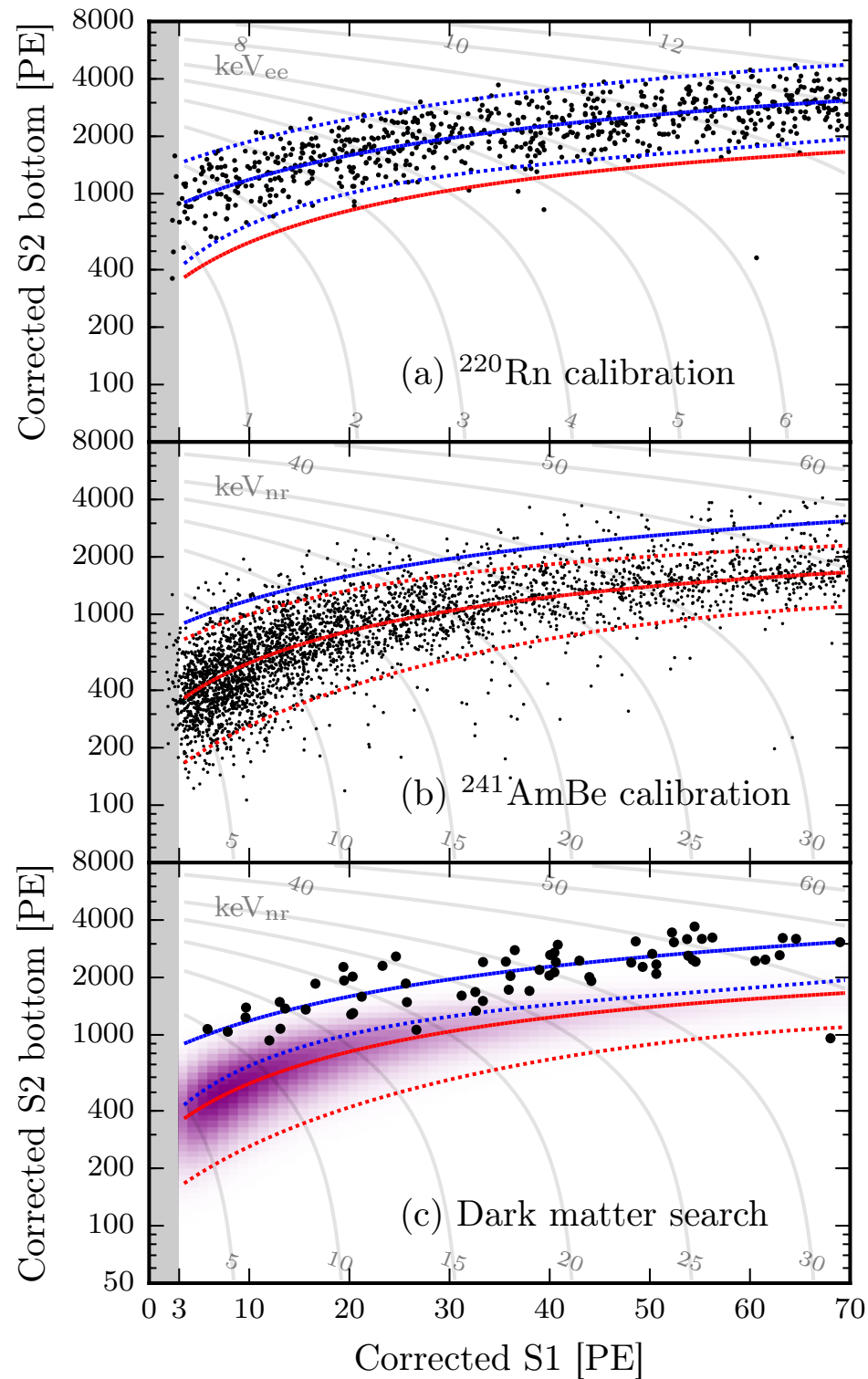


arXiv:1705.06655v1 [astro-ph.CO] 18 May 2017

昨日

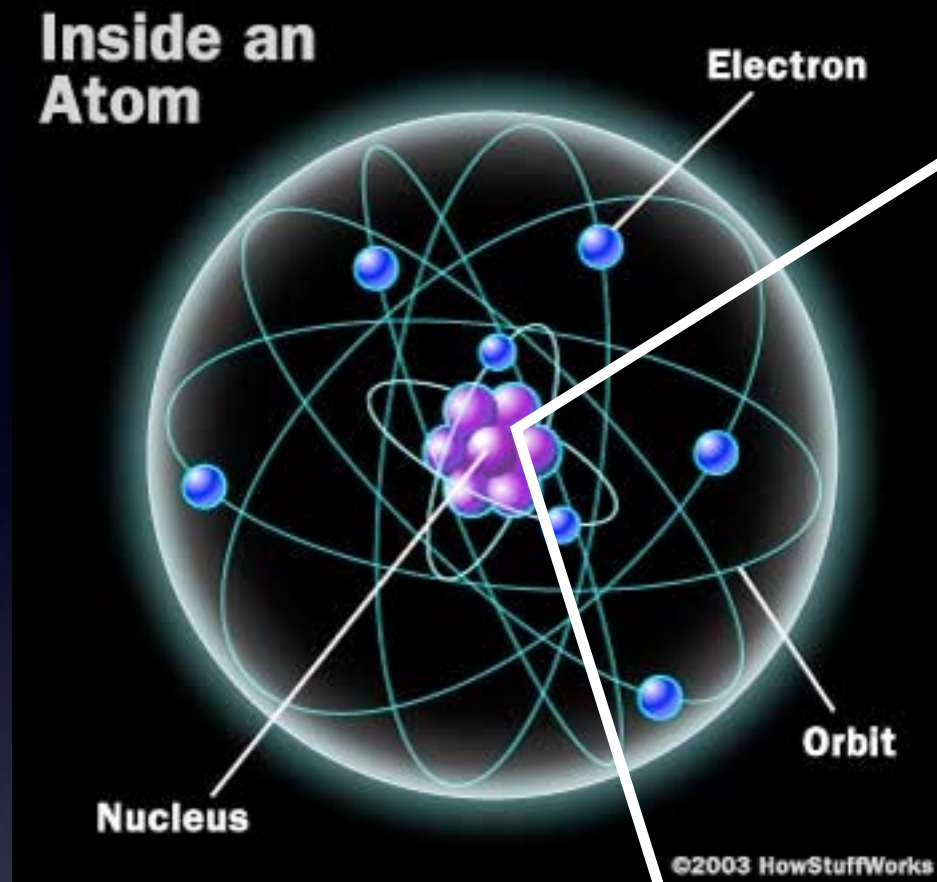
XENON 1T (Gran Sasso)

- 二相型キセノン検出器
- 2 ton 液体キセノン (1ton fiducial)
- 30日のデータ



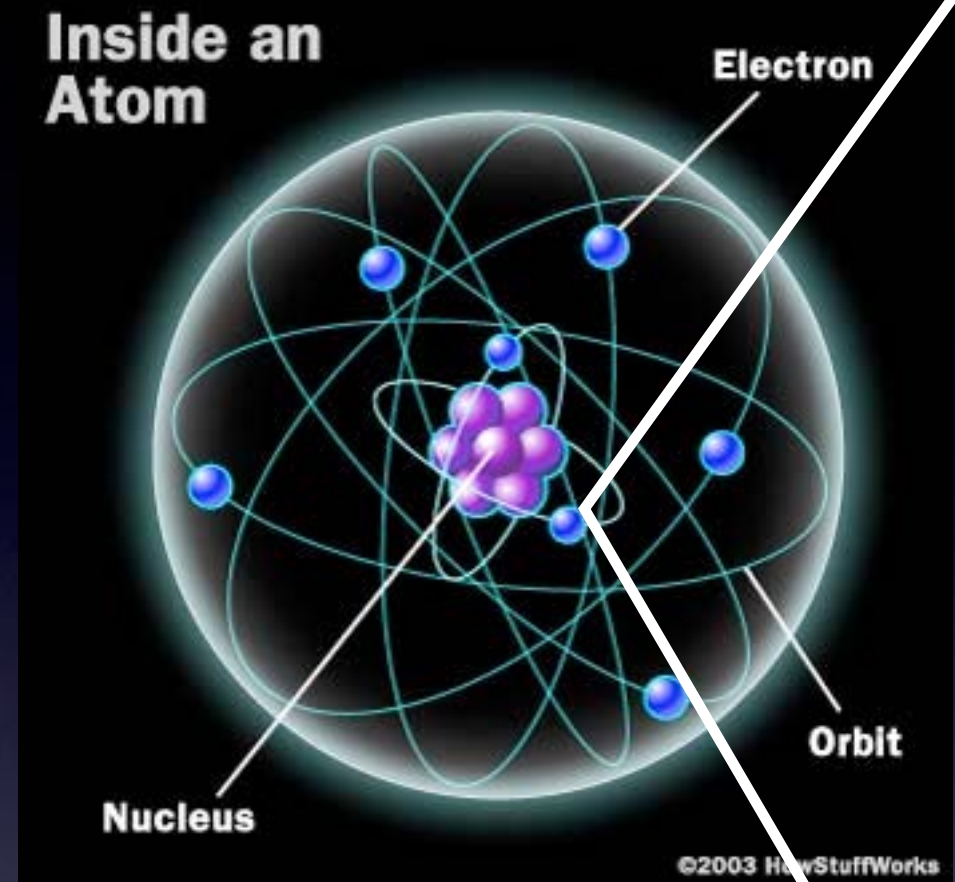
Interaction with dark matter

nuclear recoil



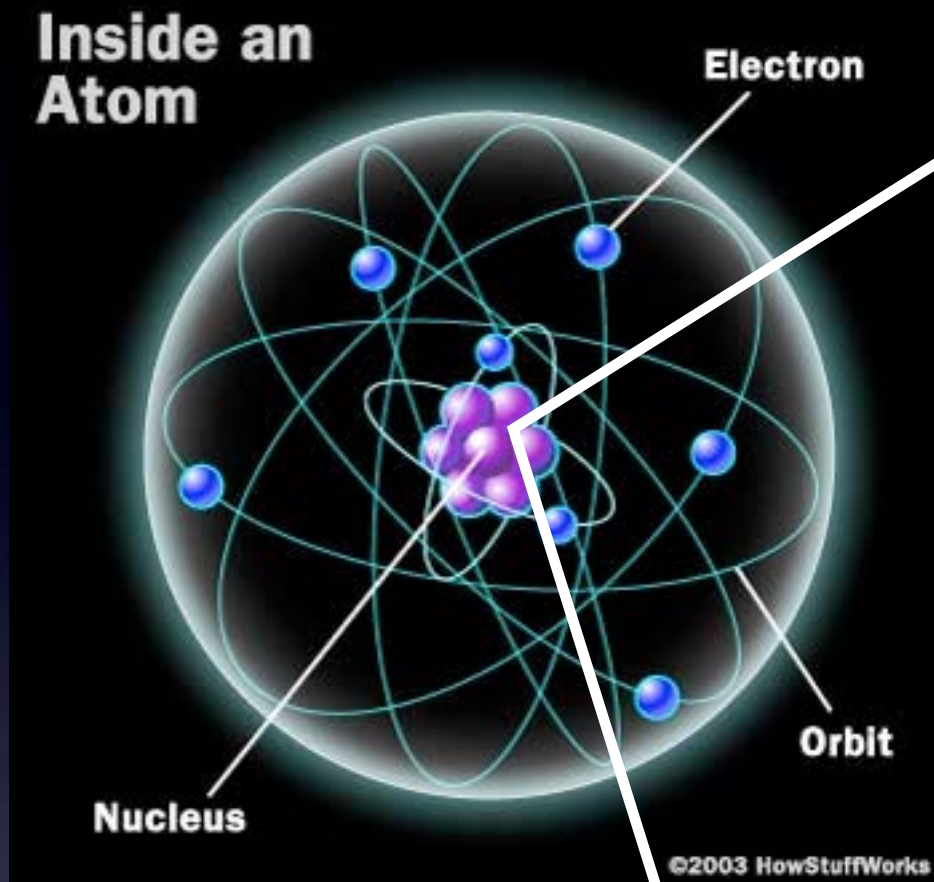
fast neutron
WIMP
(SUSY, KK ...)

electronic recoil



-U/Th/⁴⁰K etc background

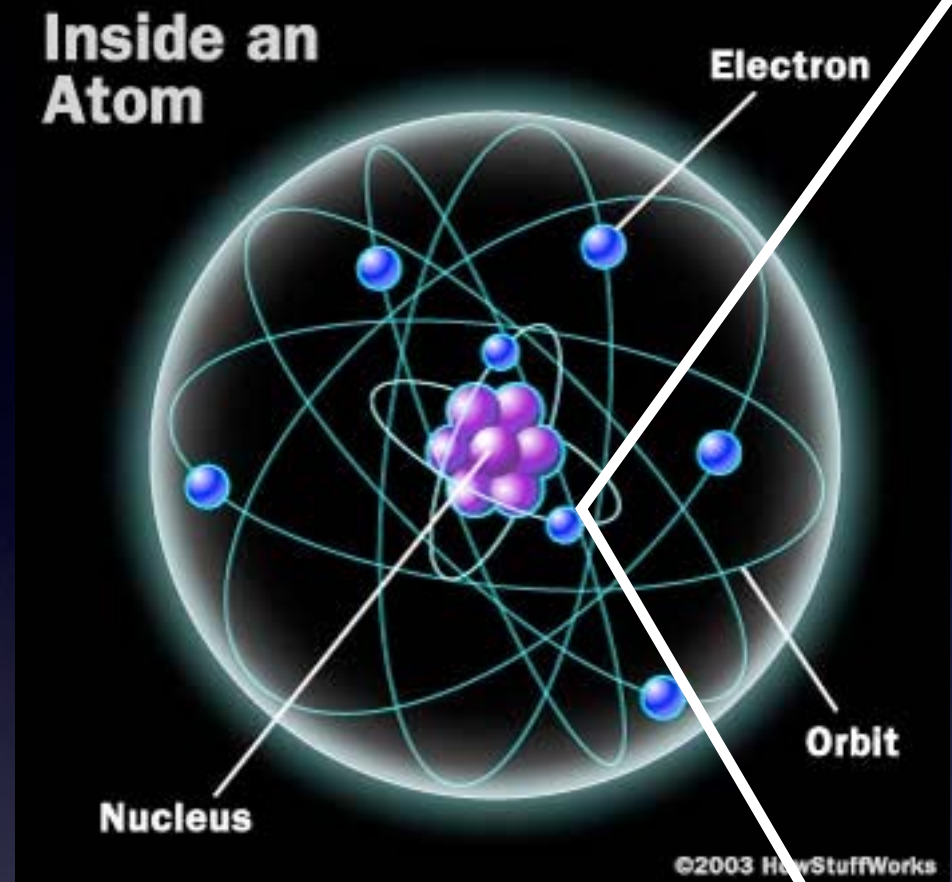
nuclear recoil



fast neutron
WIMP
(SUSY, KK ...)

The signal is in electron recoil ?

electronic recoil

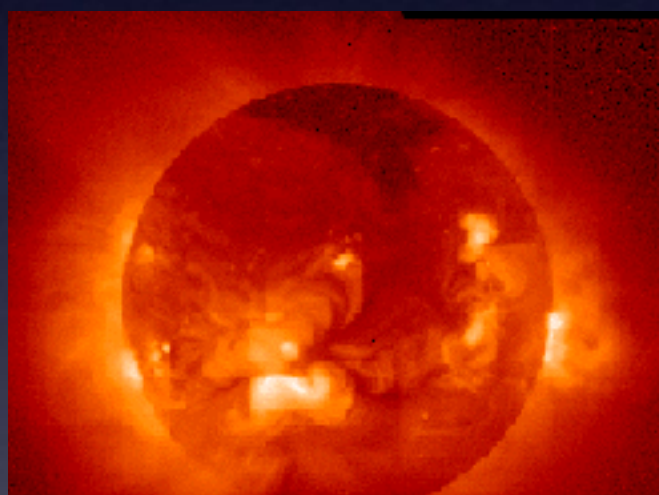


- U/Th/ ^{40}K etc background
- WIMP-electron**
- Super WIMP (bosonic)**
- Axion/Axion like particle**
- Mirror DM**
- Luminous DM ...**

XMASS実験とは

液体キセノンを用いた多目的実験

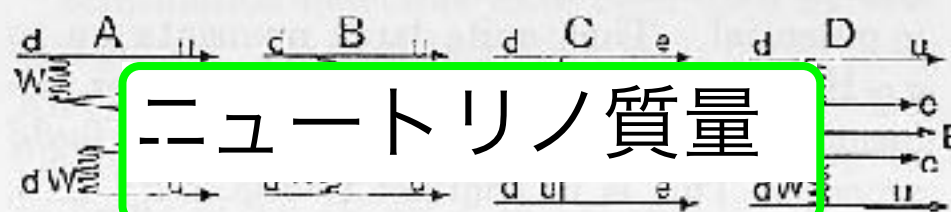
- Xenon **MASS**ive detector for Solar neutrino (太陽ニュートリノ)
- Xenon neutrino **MASS** detector (ニュートリノ質量の測定)
- Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles (暗黒物質)



太陽ニュートリノ



暗黒物質





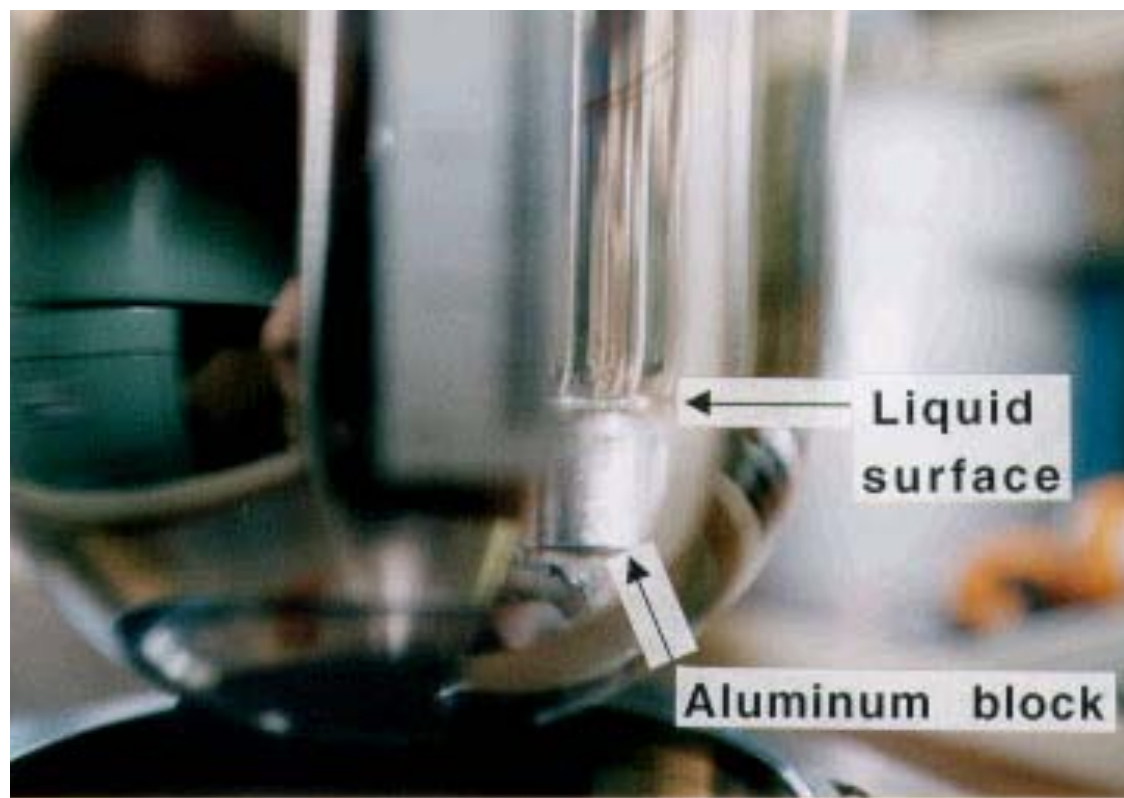
<http://www-sk1.icrr.u-tokyo.ac.jp/library/video.html>

液体キセノンの利点

- 大きい質量数 Xe ($A \sim 131$)
 - 暗黒物質が反応しやすい。
- 大きい原子番号 ($Z=54$) とその密度 ($\rho=3\text{g/cc}$):
 - \rightarrow コンパクトに大質量の検出器
- 大きな発光量
 - 暗黒物質がわずかに落とすエネルギーをとらえる。
- 液体であるがゆえに自由な形状と取り扱い
- 液体（ガス）での純化、測定中でも循環できる
- Ge半導体などにくらべ、コストが安い

液体キセノンを用いた検出器

Aluminum block floating in liquid xenon (picture)



Atomic Number	54
Mass Number	131.29
Density	3.06g/cm ³
Boiling point	165K
Melting point	161K
Radiation length	27.7mm
Scintillation wave length	178nm
Refractive Index	1.61[48]
Energy per scintillation photon	21.6±2.8eV [49]
Decay time(recombination)	45ns
Decay time(Fast Components)	4.2ns
Decay time(Slow Components)	22ns
Scintillation absorption length	≥ 100cm
Rayleigh scattering length	29cm [52]
	30cm (calculated)[53]

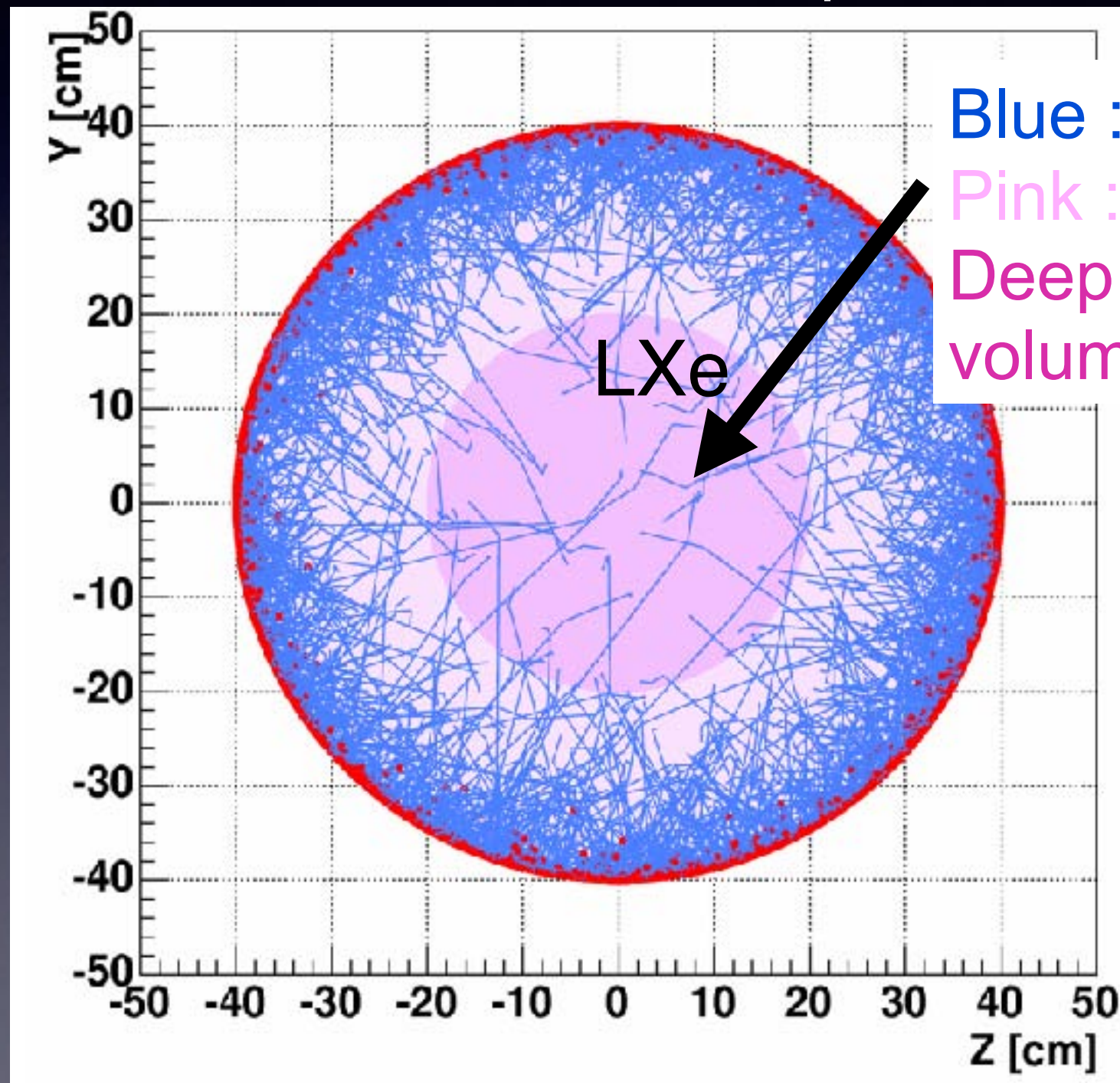
Picture by Tom Haruyama, KEK

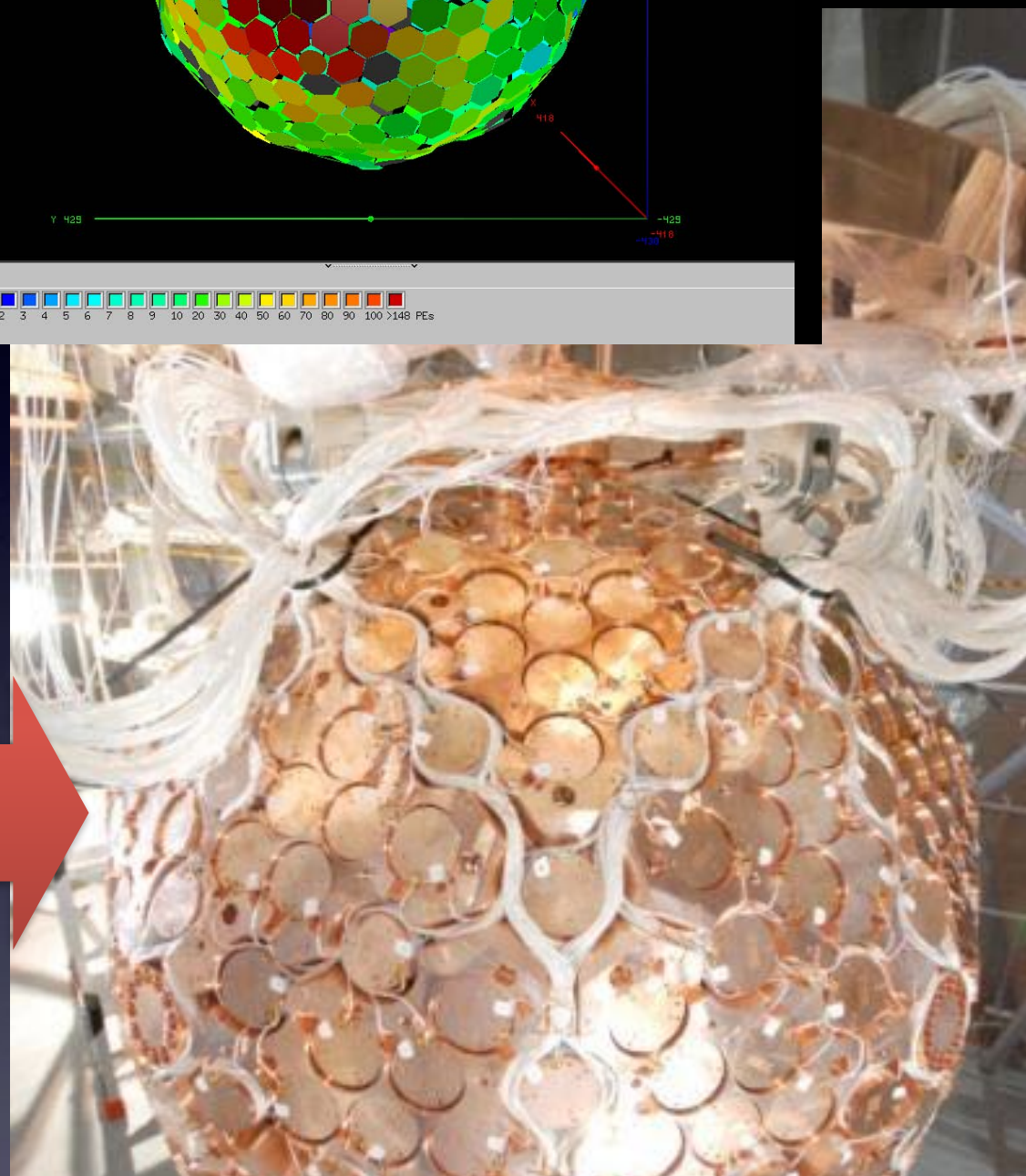
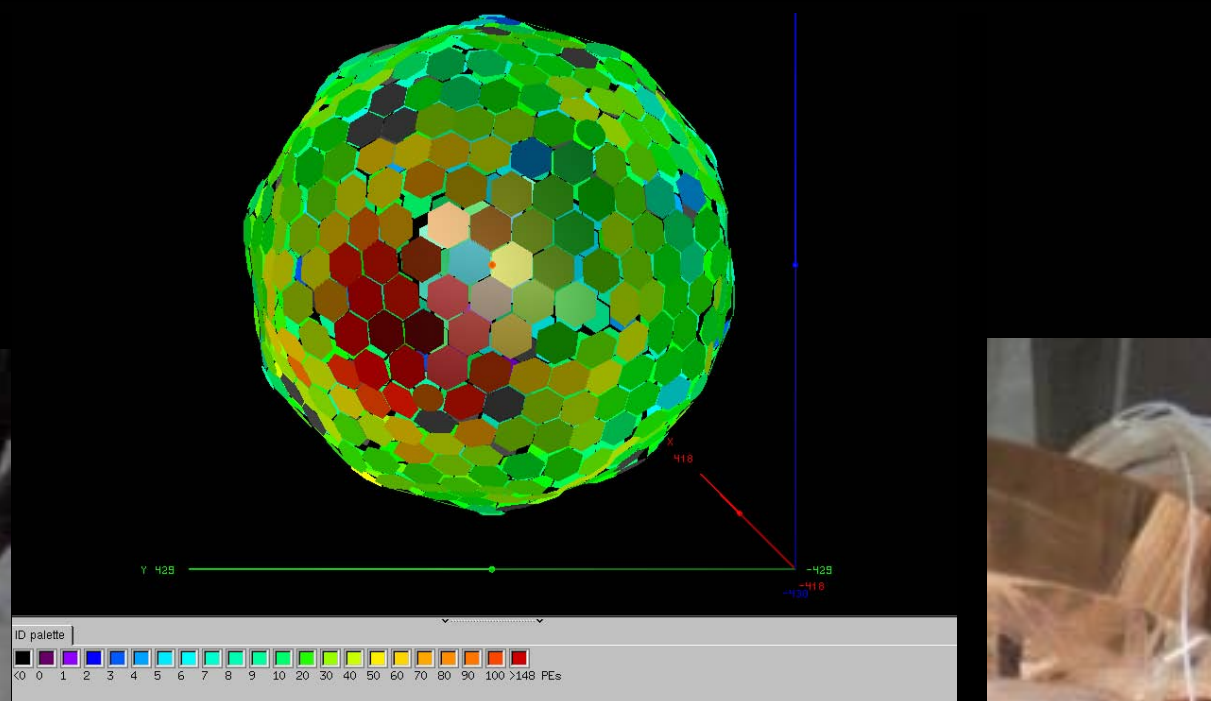
アルミ(2.7g/cc)などは浮いてしまう

質量の大きい検出器を用いて稀な現象をたくさん捕らえる。

放射線バックグラウンドを減らす方法2 ガンマ線に対する自己遮蔽 (シミュレーション)

液体キセノンは密度が高く γ 線をよく止める





低バックグラウンドの642本PMTでわずかな光をとらえる。

この光電子増倍管はどのくらい 低放射能なのか？

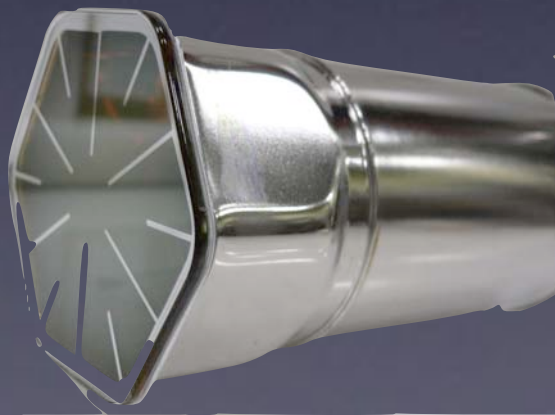
e.g. ^{40}K case



4000 ベクレル/人



15 ベクレル/バナナ



0.01 Bq/PMT

6.42 Bq/642 PMTs

Detector calibration

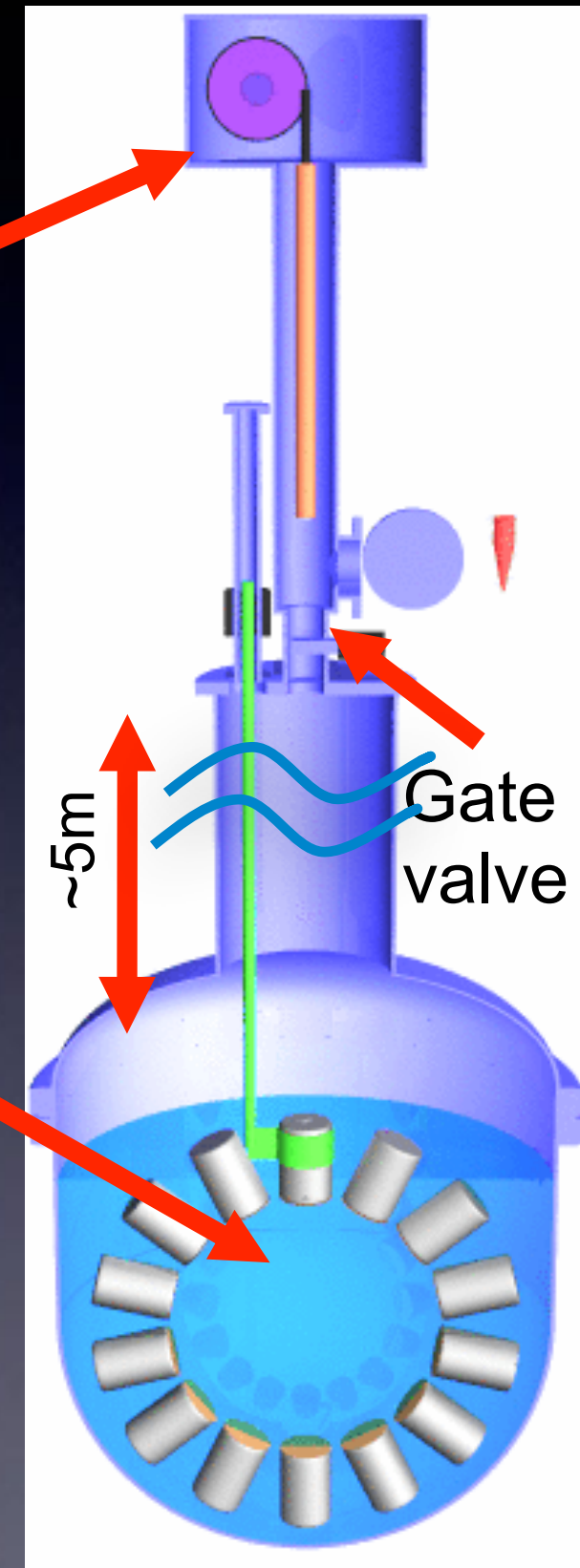
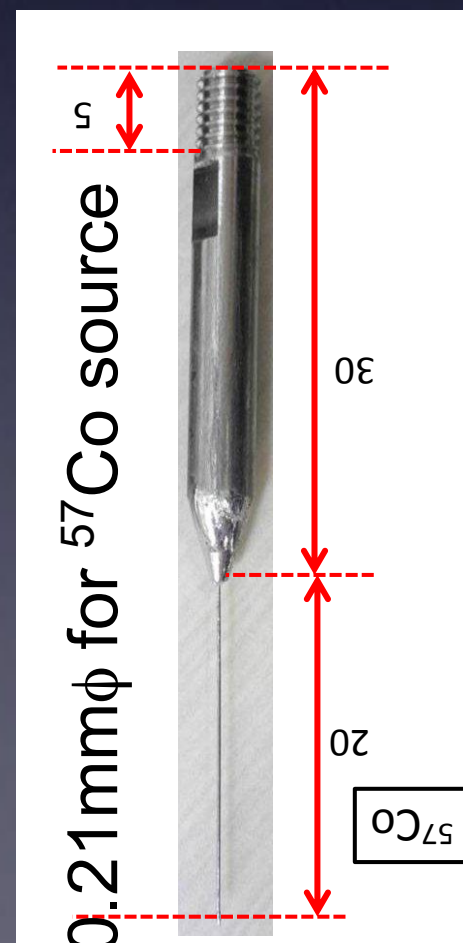
-Inner calibration is for energy calibration.

Injection for XMASS



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

sources by Korean collaborator

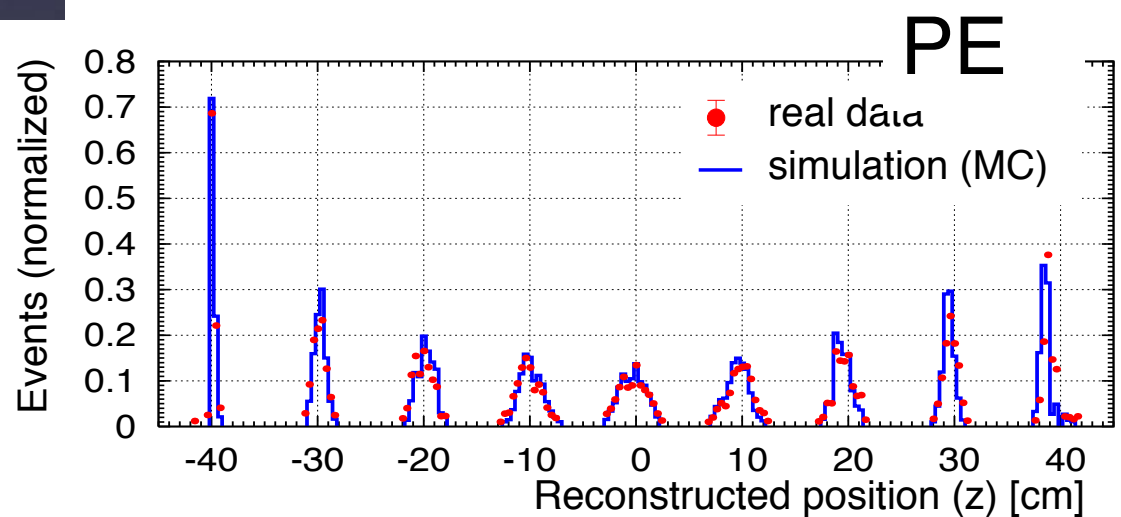
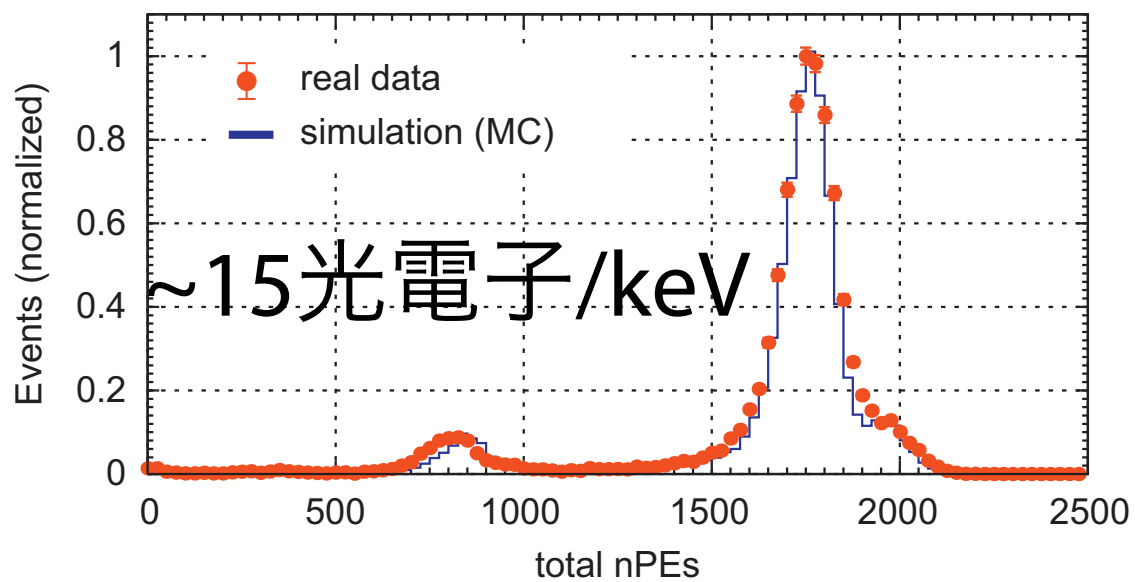


Masaki Yamashita

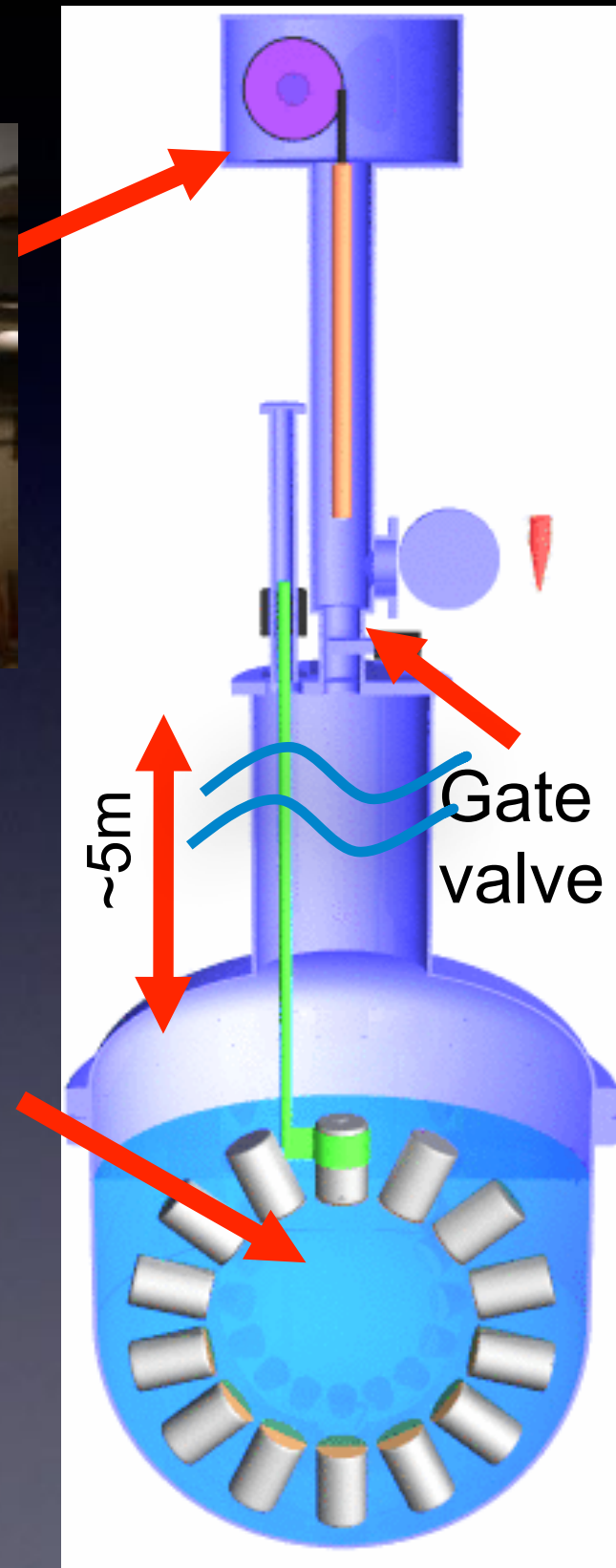
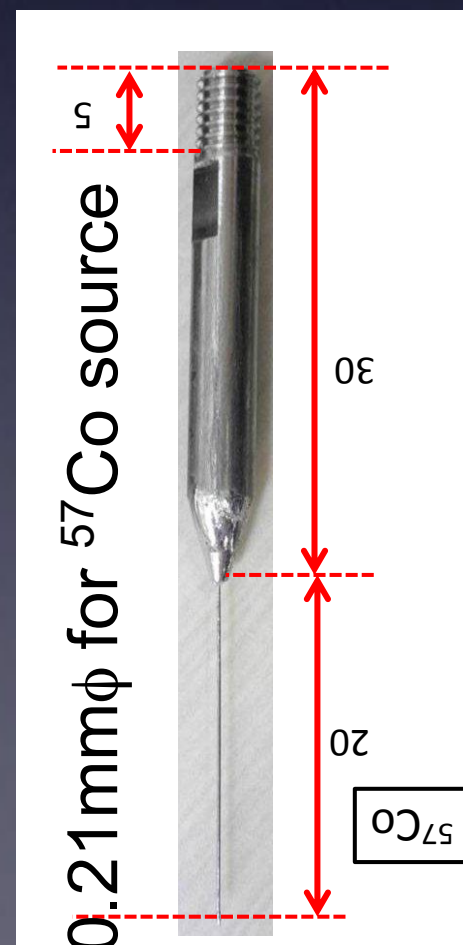
Detector calibration

-Inner calibration is for energy calibration.

Injection for XMASS



sources by Korean collaborator



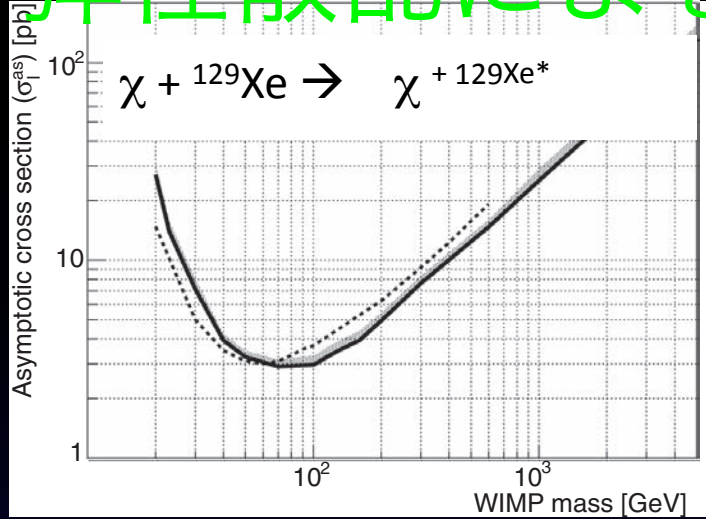
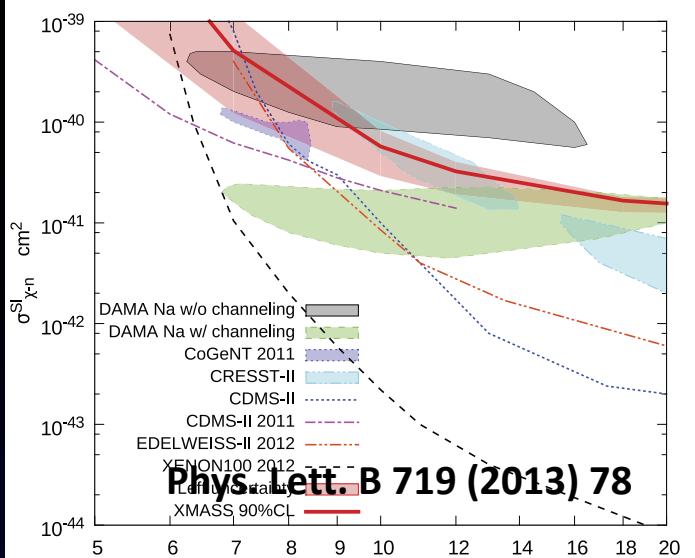
Masaki Yamashita

XMASS experiment@Kamioka

軽い暗黒物質探索

非弾性散乱による探索

太陽アクシオン

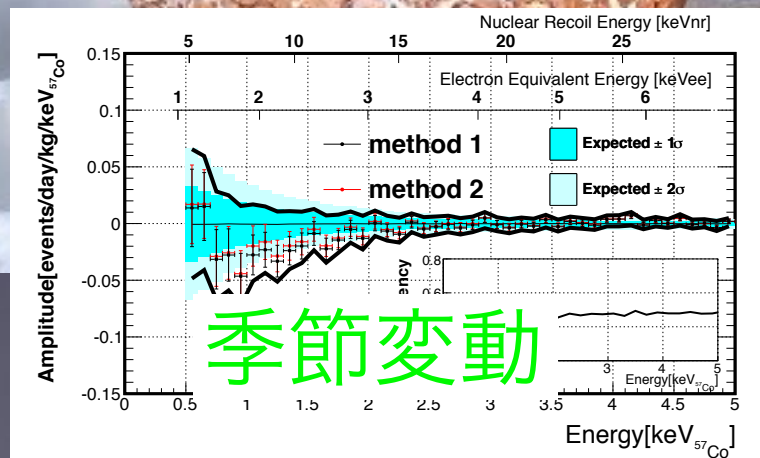
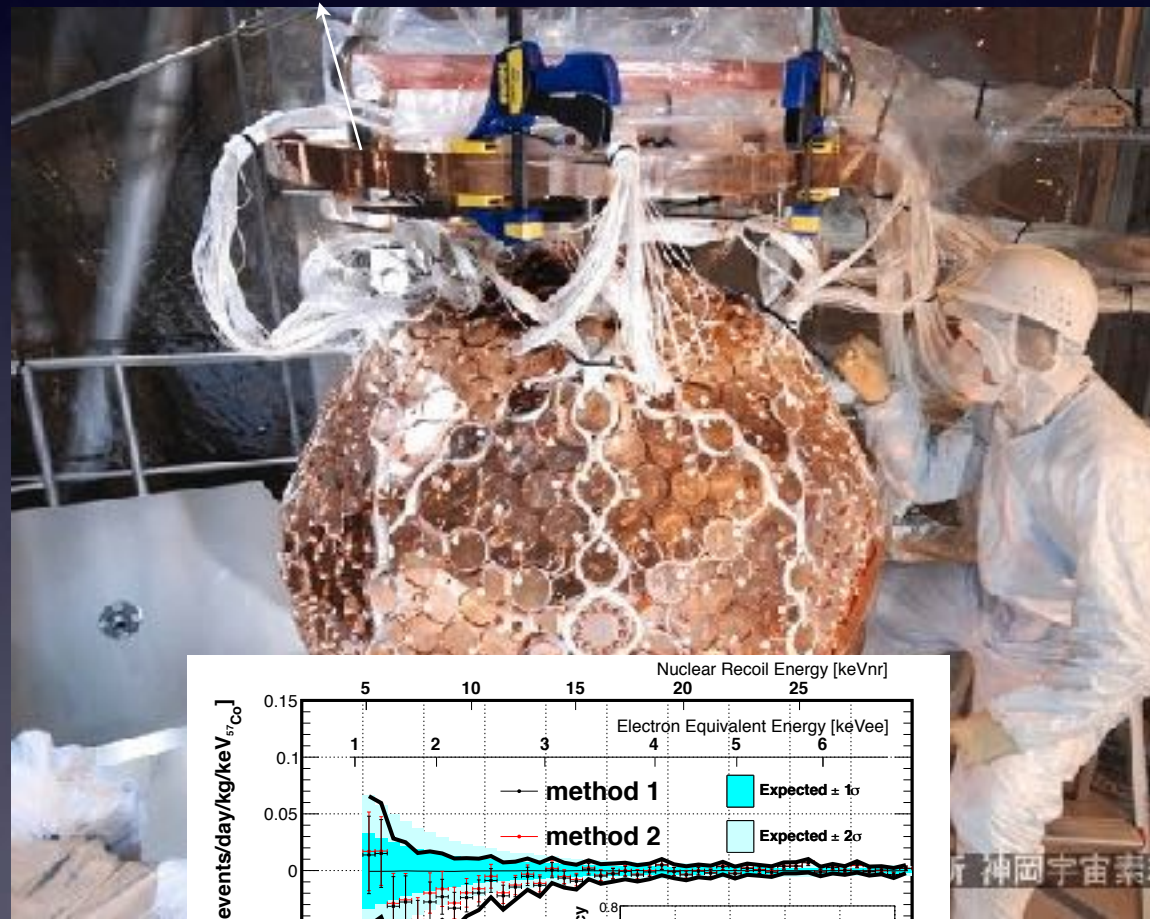
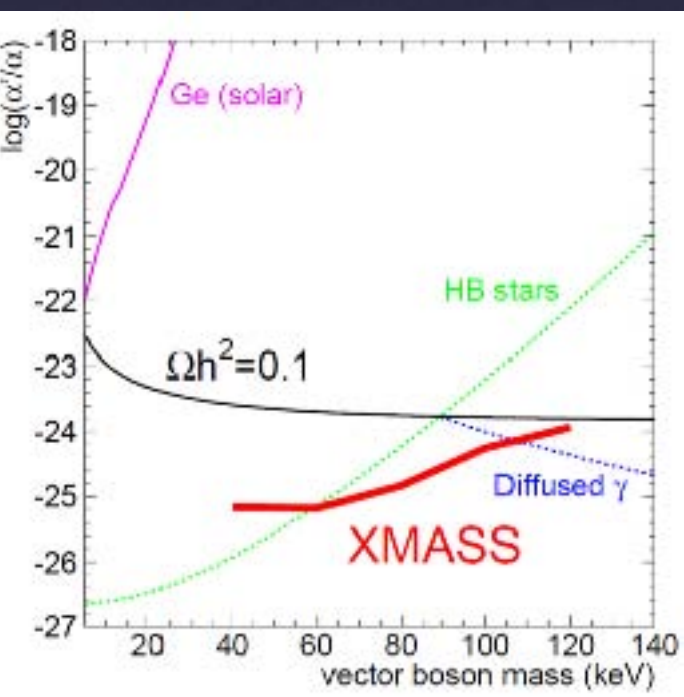


Phys. Lett. B 724 (2013) 46

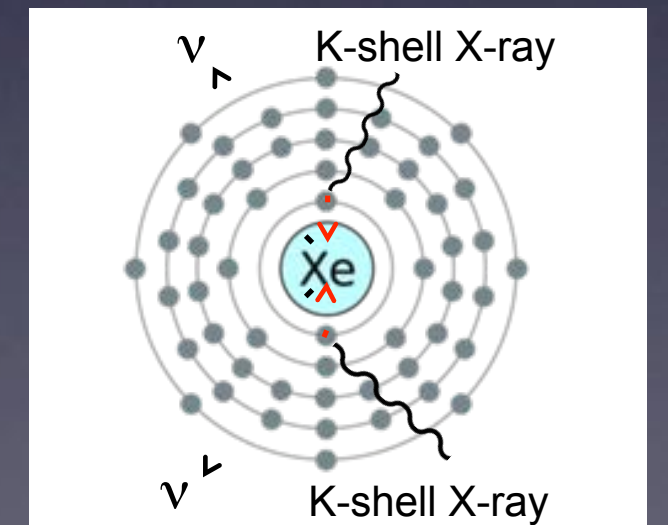


Astroparticle Physics 89 (2017) 51

super-WIMPs(ALPs)



Rare decay search
Double electron capture



Phys. Lett. B 759 (2016) 64-68

XMASS annual modulation

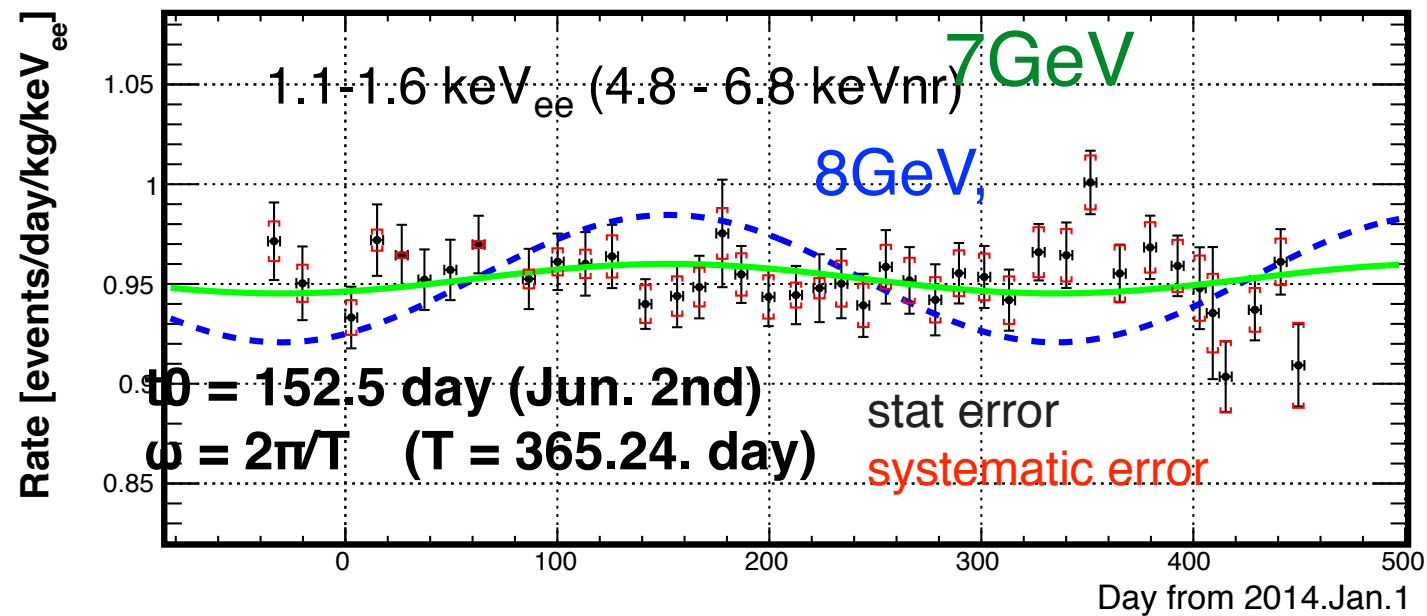
Abe et al. (XMASS collaboration) Phys Lett. B (2016)272

- 2013 Nov - 2015 March
(359.2 live days)
- assuming WIMP spectrum
- 2D fitting (time and energy bin)

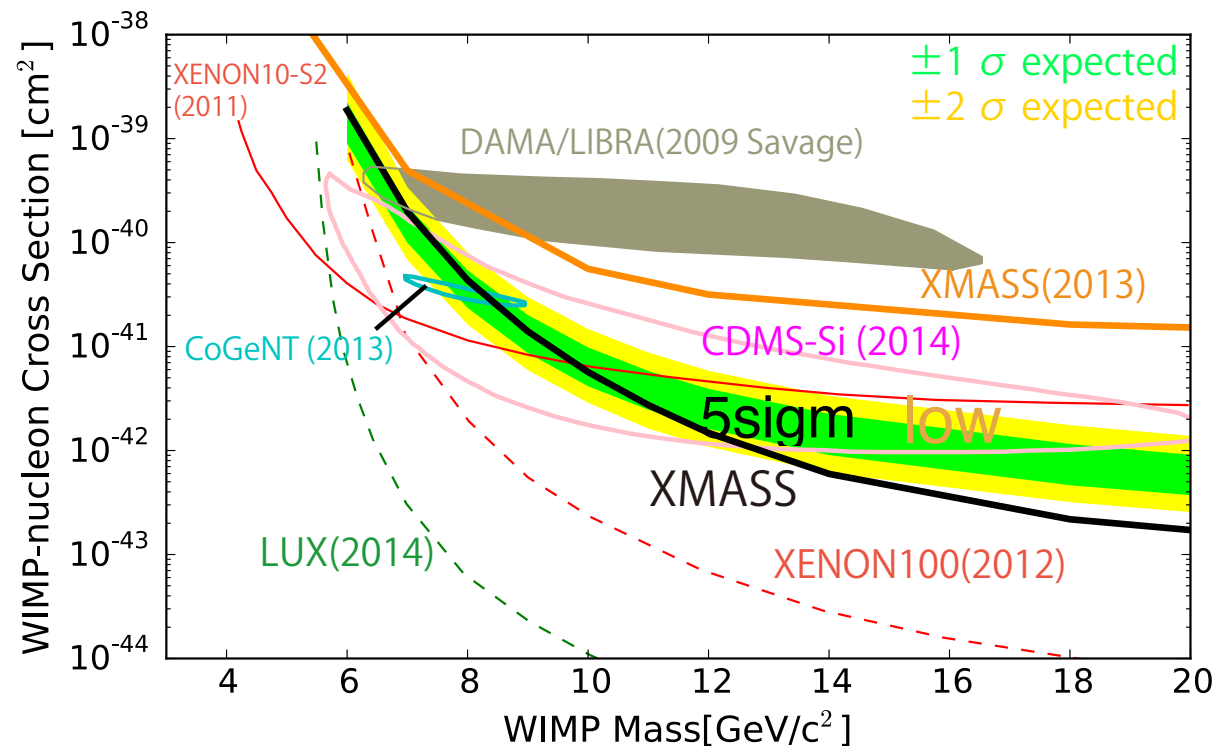
1 year data of XMASS (0.82 ton x year)

vs.

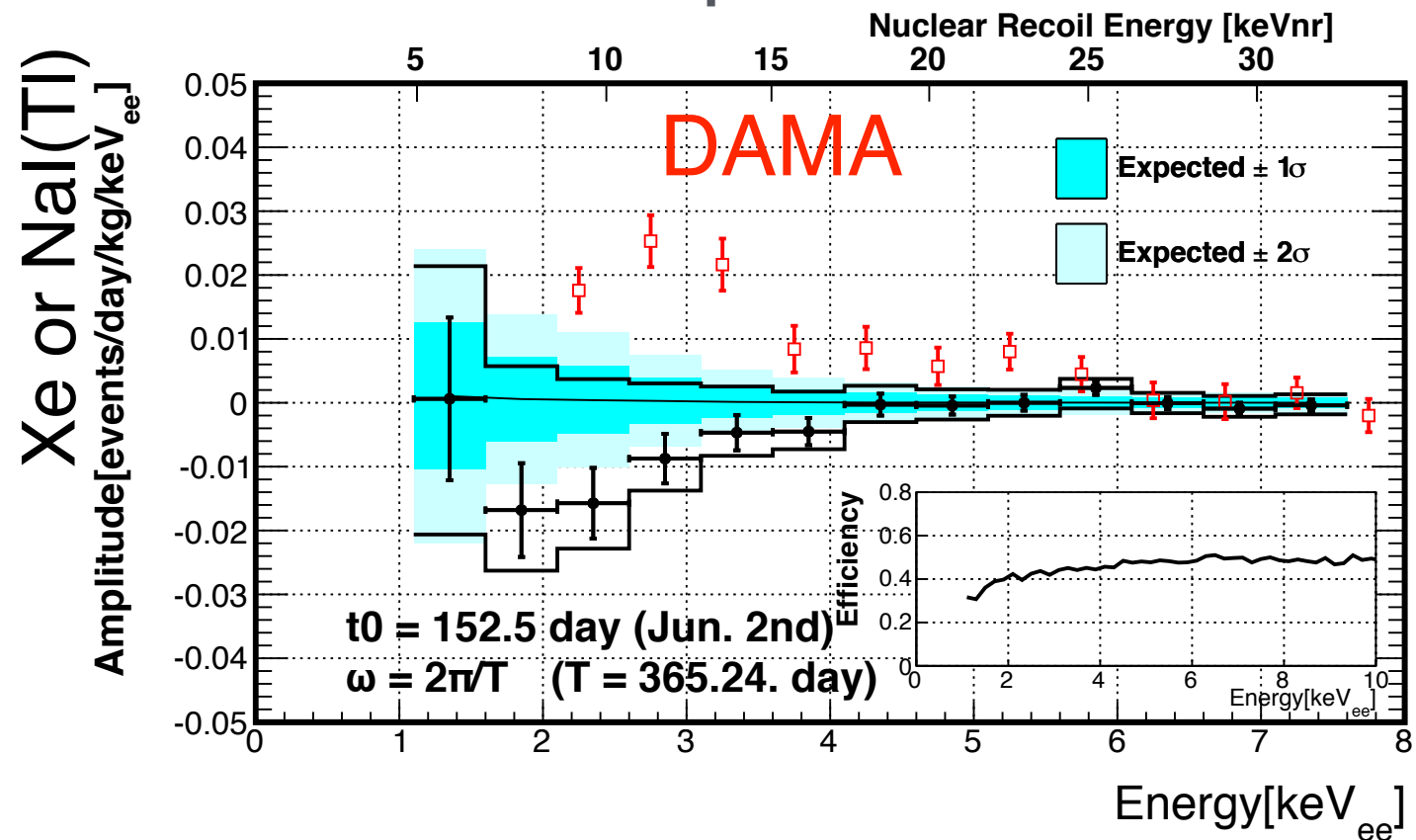
14 years data of DAMA/LIBRA (1.33 ton x year)



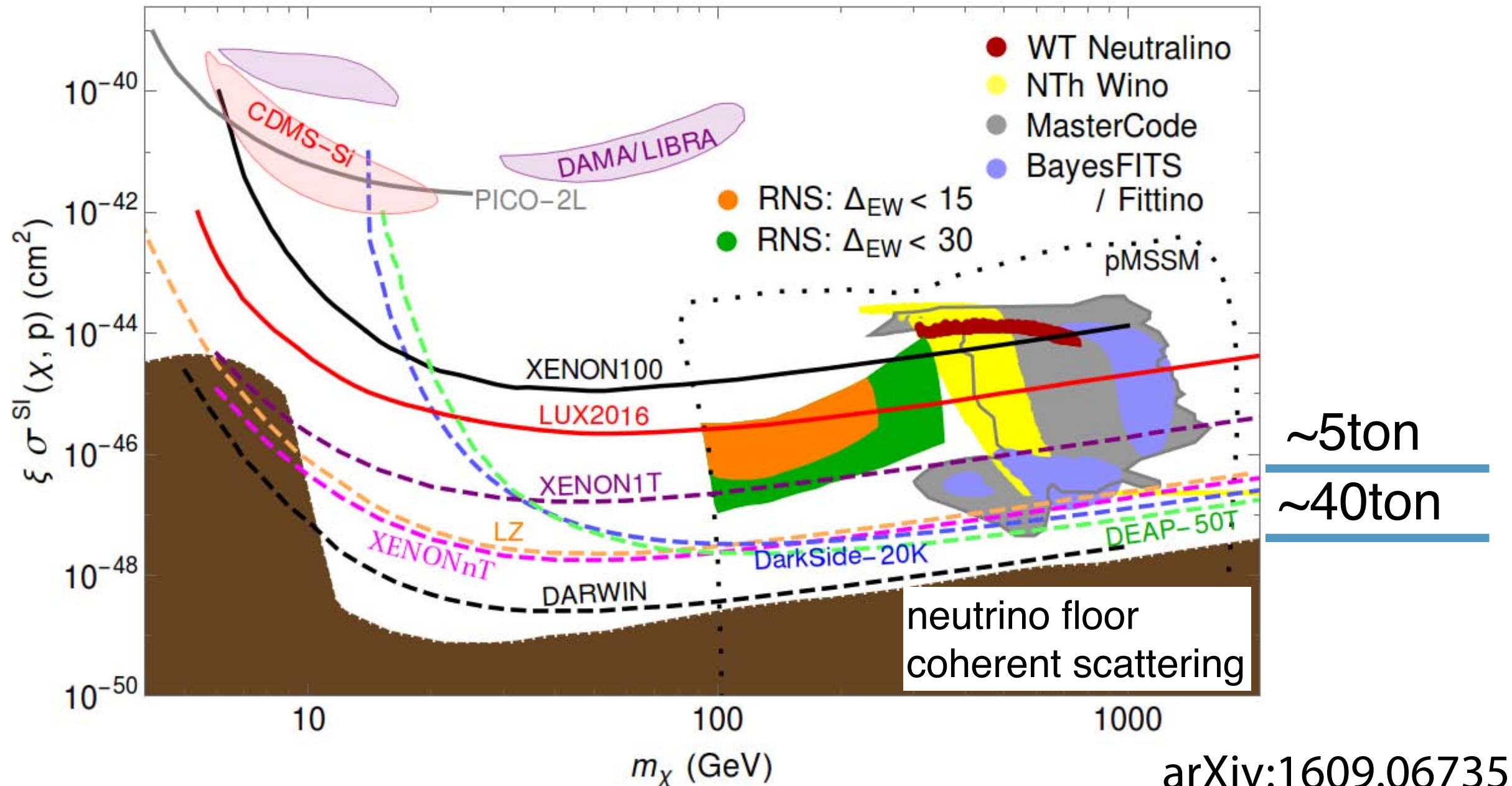
WIMP



Model independent



展望



WIMP mass [GeV/c²]

Figure 1: Plot of rescaled spin-independent WIMP detection rate $\xi\sigma^{SI}(\chi, p)$ versus m_χ from several published results versus current and future reach (dashed) of direct WIMP detection experiments. $\xi = 1$ (*i.e.* it is assumed WIMPs comprise the totality of DM) for the experimental projections and for all models *except* RNS and pMSSM.

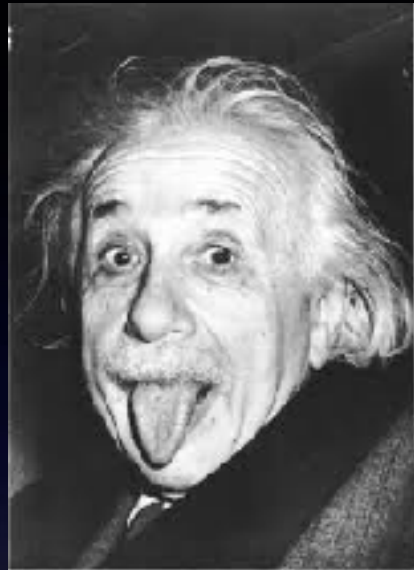
最後に

ヒッグス



50年

重力波



100年

暗黒物質



80年



40年

暗黒物質にはまだ謎が多い。暗黒物質が解明されることで、これからニュートリノ天文学のように暗黒物質天文学が発展していくかもしれない。

暗黒物質探索は宇宙物理、素粒子物にとって重要な実験

実験は世界中で多数行われており、激しい競争。

5-15年かけてSUSYの重要なパラメータ領域を探索

WIMP以外の探索にも目を向ける必要がある