

暗黒物質 見えないものを直接とらえる究極の実験の話

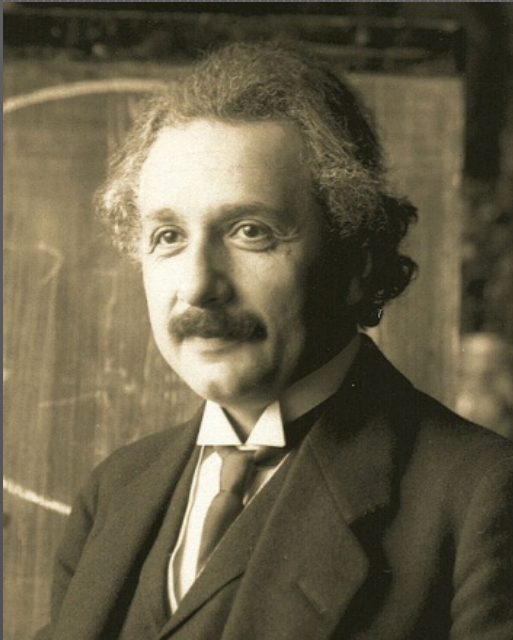
関谷洋之

宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設
カブリ数物連携宇宙研究機構神岡分室
次世代ニュートリノ科学研究連携機構

2019年3月6日

大学3年生のための宇宙・素粒子スプリングスクール
宇宙の謎を解き明かす2019

アインシュタイン方程式(一般相対論)



- 1916年 宇宙の方程式の発見

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

宇宙の入れ物
時空間

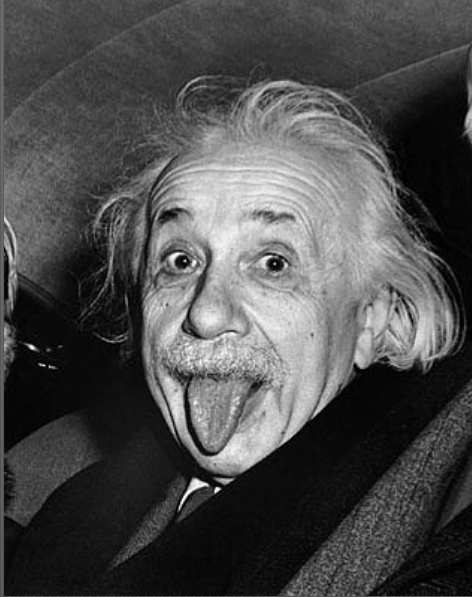
中身
物質、エネルギー



どんどん膨張するか収縮する宇宙しか出てこない

当時、アインシュタインは、宇宙は一定であるべきだと思った。

アインシュタイン方程式(一般相対論)



- 1917年 方程式に“つっかえ棒”導入

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

宇宙の入れ物につっかえ棒: 宇宙定数

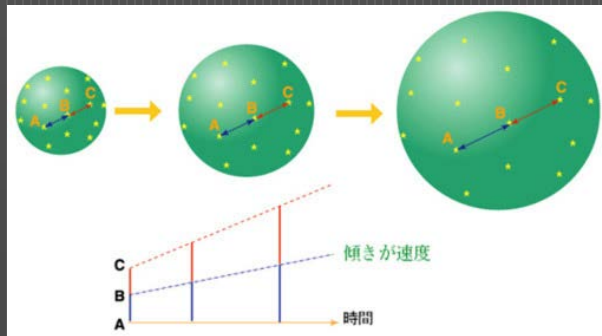
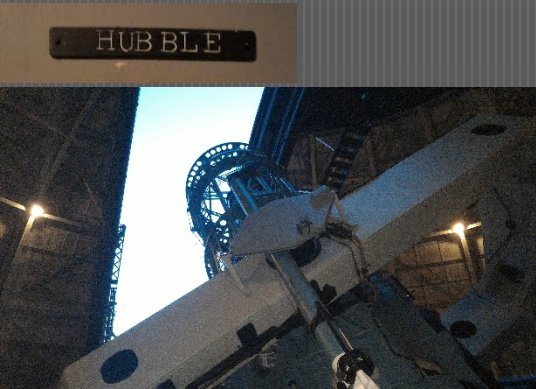


無理矢理宇宙を安定にした！

加速膨張する宇宙

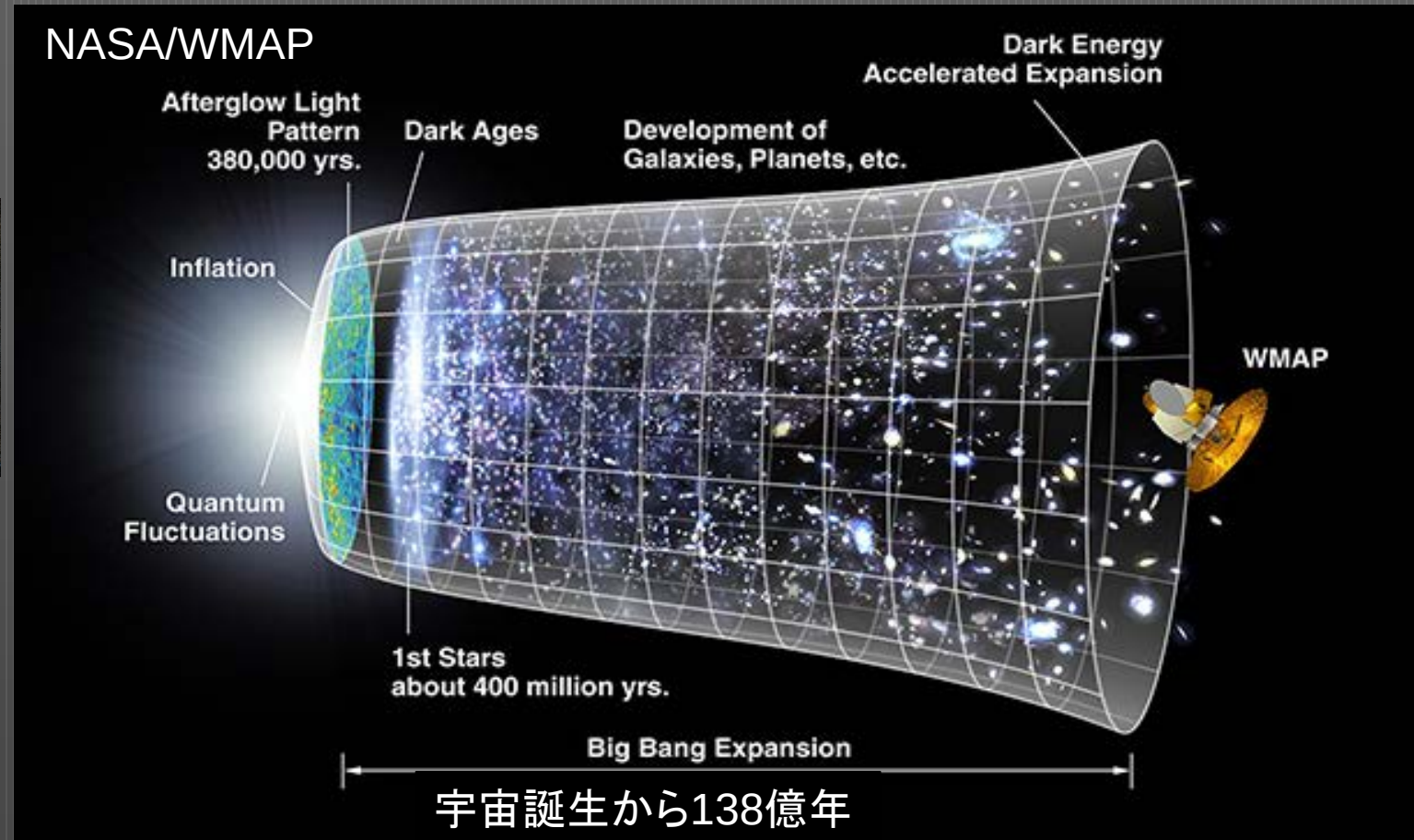
- 1929年 エドウィン ハッブル
われわれの銀河以外にも銀河を発見した人

ウィルソン天文台
@カリフォルニア



遠くの銀河ほど早く遠ざかっている！

最近の宇宙観測から

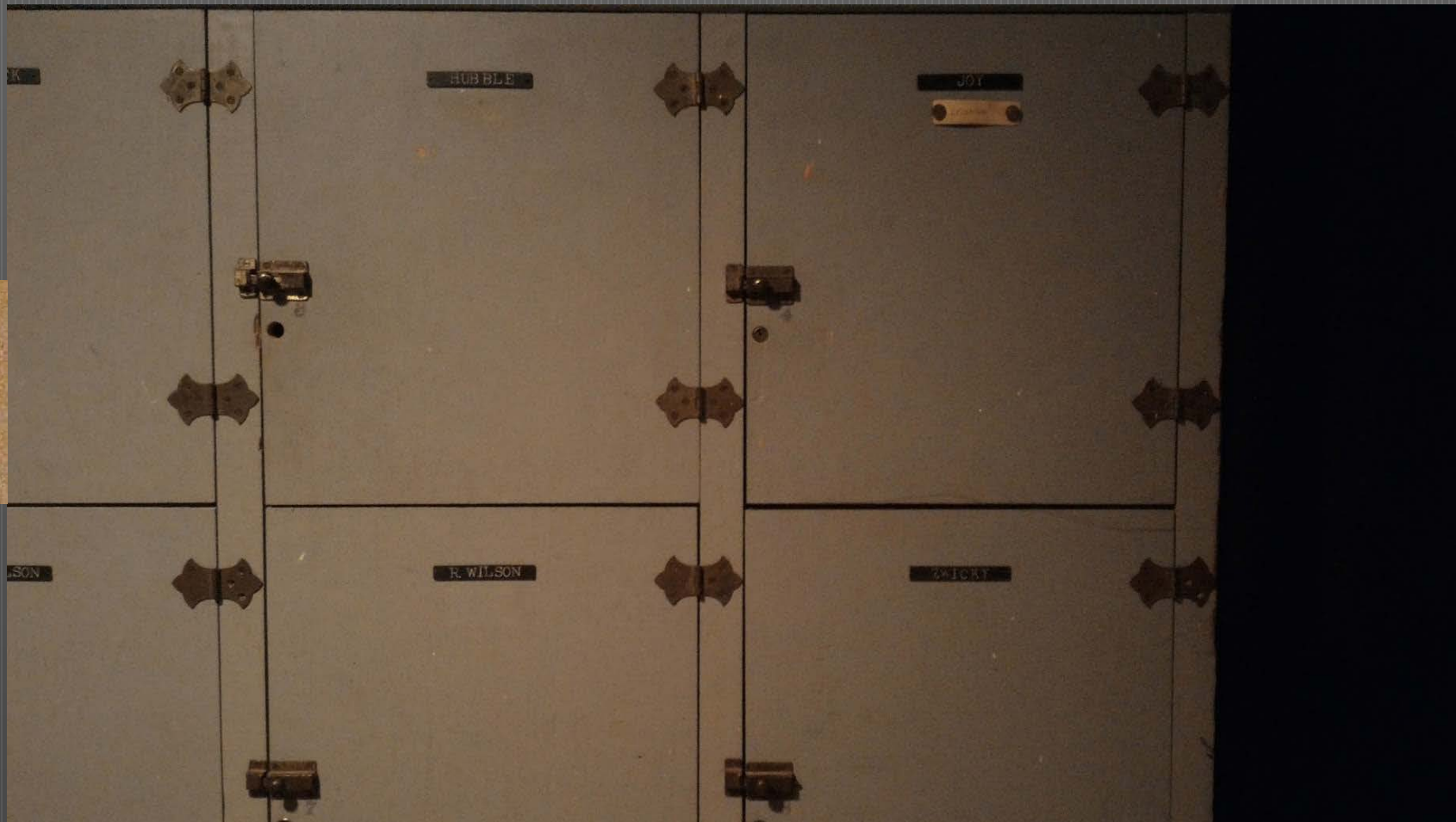


いまの「すばる」みたいな最先端望遠鏡だった

HUBBLE

ZWICKY

MINKOWSKI



暗黒エネルギーか？ ちがうか？

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \overset{\text{宇宙定数}}{\Lambda}g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

時空の世界

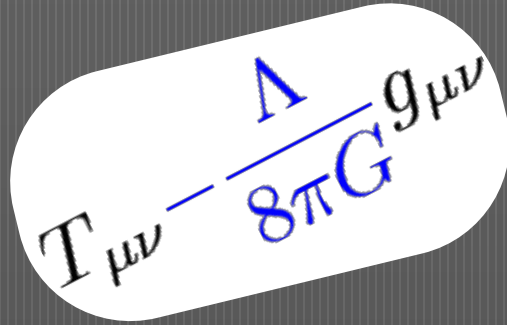
物質の世界

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G}g_{\mu\nu} \right)$$

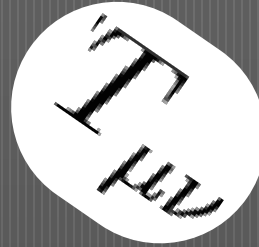
万有斥力？真空のエネルギー？

暗黒エネルギーが宇宙膨張を加速させている!?
でも時間変動しているようで定数ではありえない？

研究したいこと


$$T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu}$$

?


$$T_{\mu\nu}$$

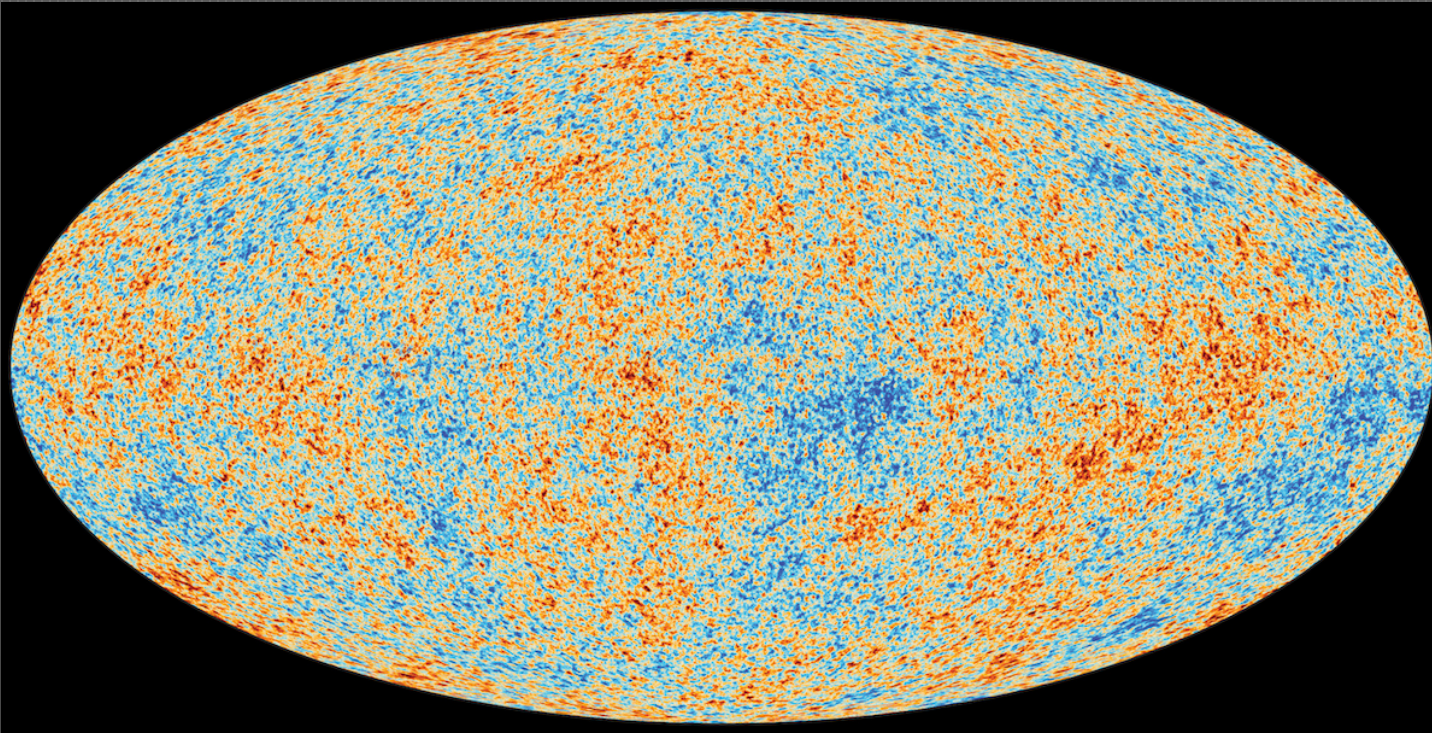
?

?

- 宇宙はなにからできているのか？
- 物質はなにからできているのか？

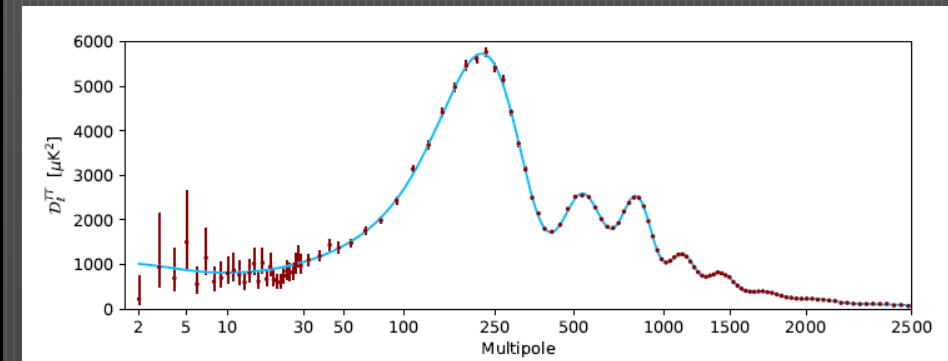
Standard Model of the Universe

- Cosmic Microwave Background
 - Planck satellite 2018 results



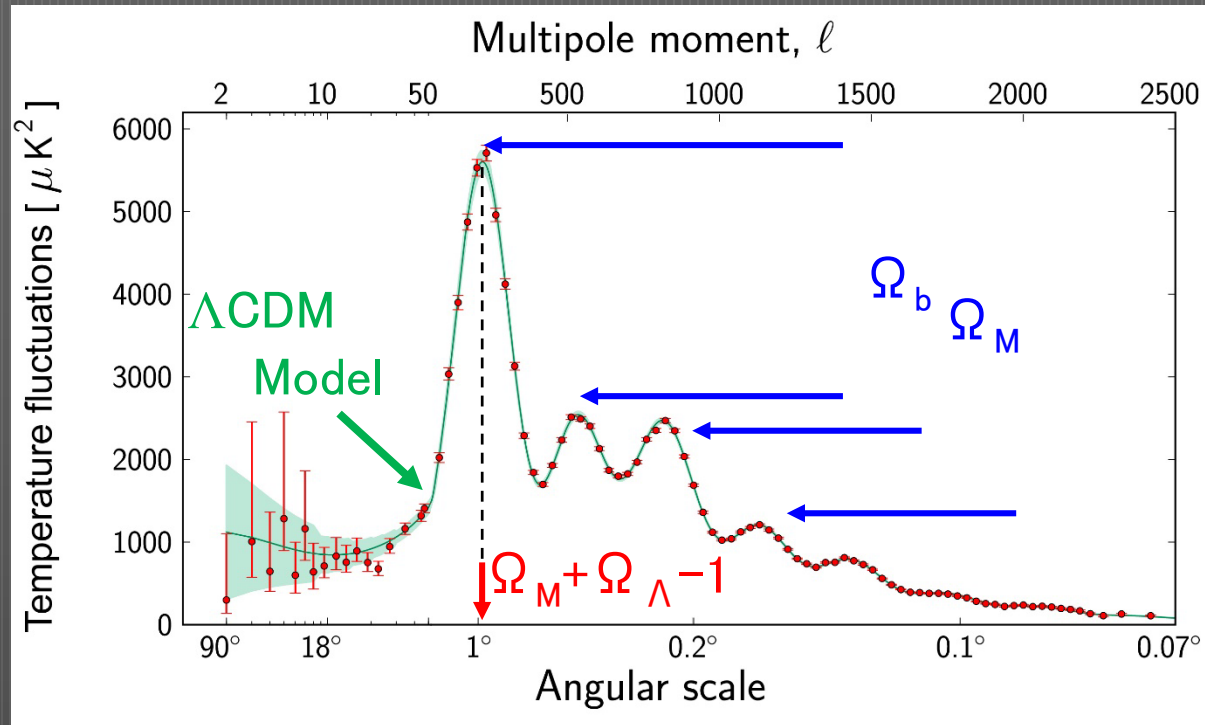
ゆらぎのpower spectrum

$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

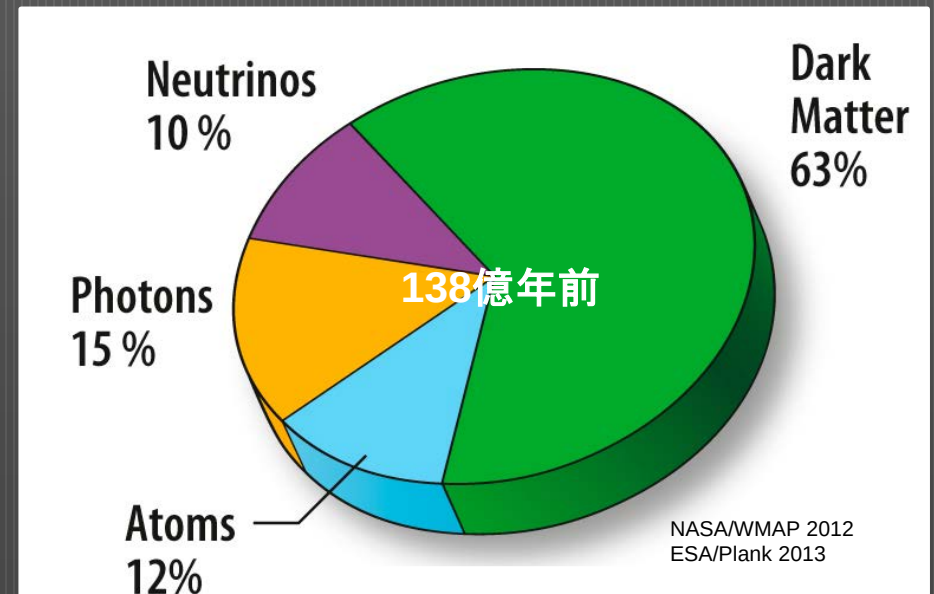
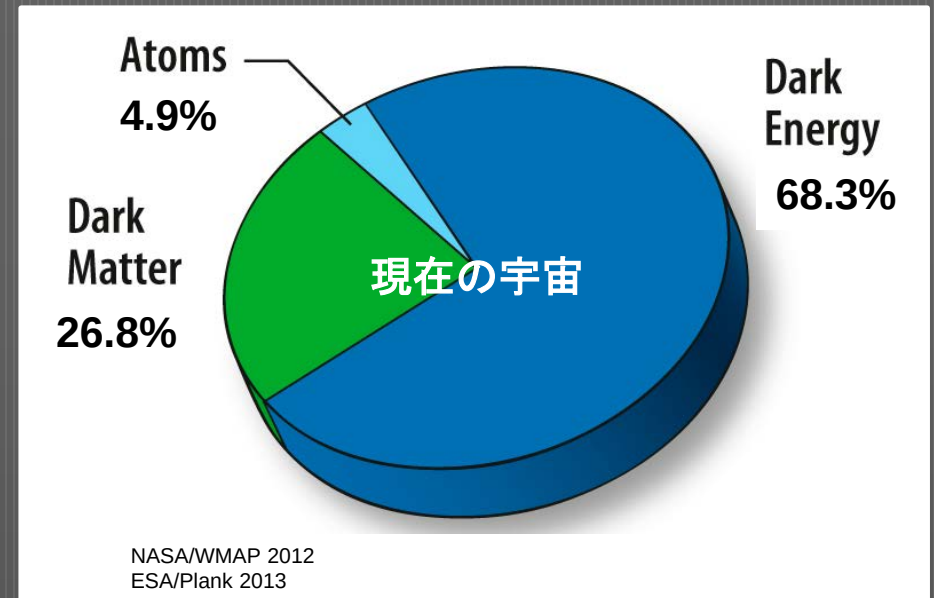


Λ CDM Model

よくわからないものからできている



- よくわからないものの量はよくわかっている
- Dark MatterとNeutrinoが宇宙理解に必須
 - Neutrino まだまだわかっていない
 - Dark Matter はほとんどわかっていない
 - Dark Energyは全くわかっていない

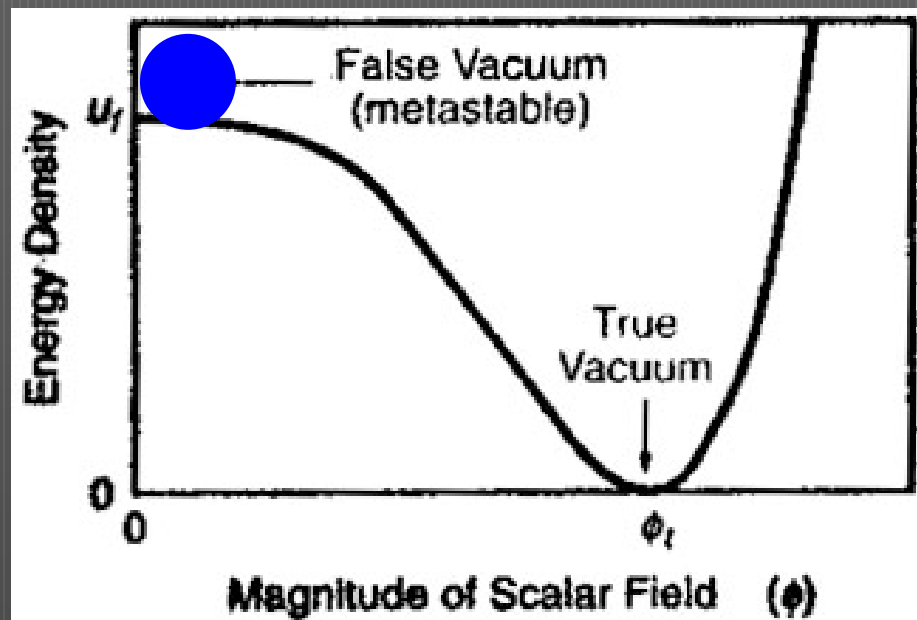


研究戦略

- ニュートリノを詳しく調べる
 - ローリスク、ハイリターン。まだまだニュートリノでノーベル賞を取れるネタがある！
 - 世界で協力して行う
- 暗黒物質が何であるのかの発見を目指す
 - ハイリスク、ハイリターン
 - 世界で競争して行う
- 暗黒エネルギー
 - 「観測」はできるけど、直接「実験」の対象にするには早すぎる

ゆらぎが構造をつくる：暗黒物質の重要な役割

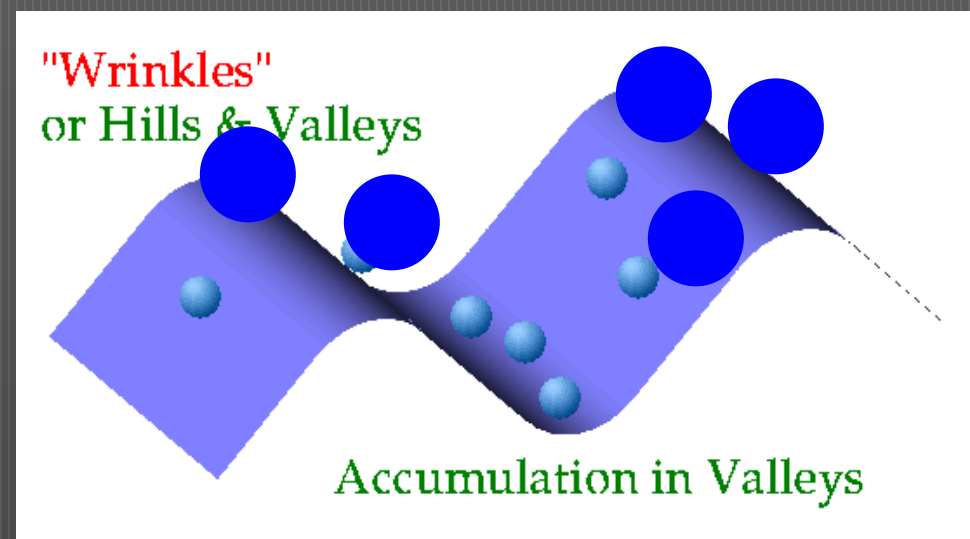
～ $1/10^5$ オーダーの小さな
初期の量子ゆらぎ



→マクロな密度ゆらぎとなる。

Gravitational instability:

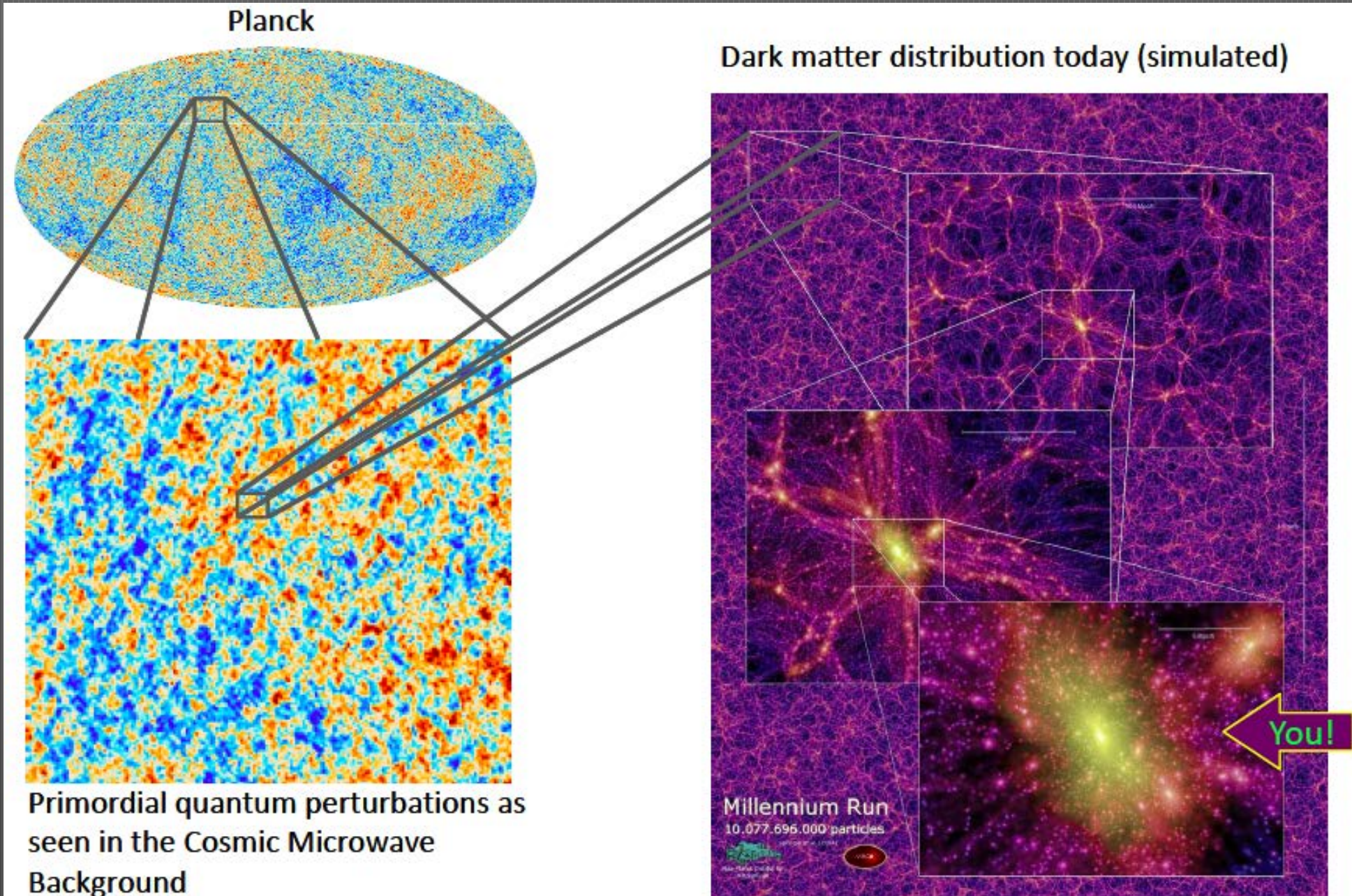
- Dark matter falls into the gravitational potential wells, visible matter follows



→宇宙の構造となる。

宇宙の (大規模) 構造の起源

- 多体
simulation



暗黒物質 初出@銀河団 in 1933

- Fritz Zwicky

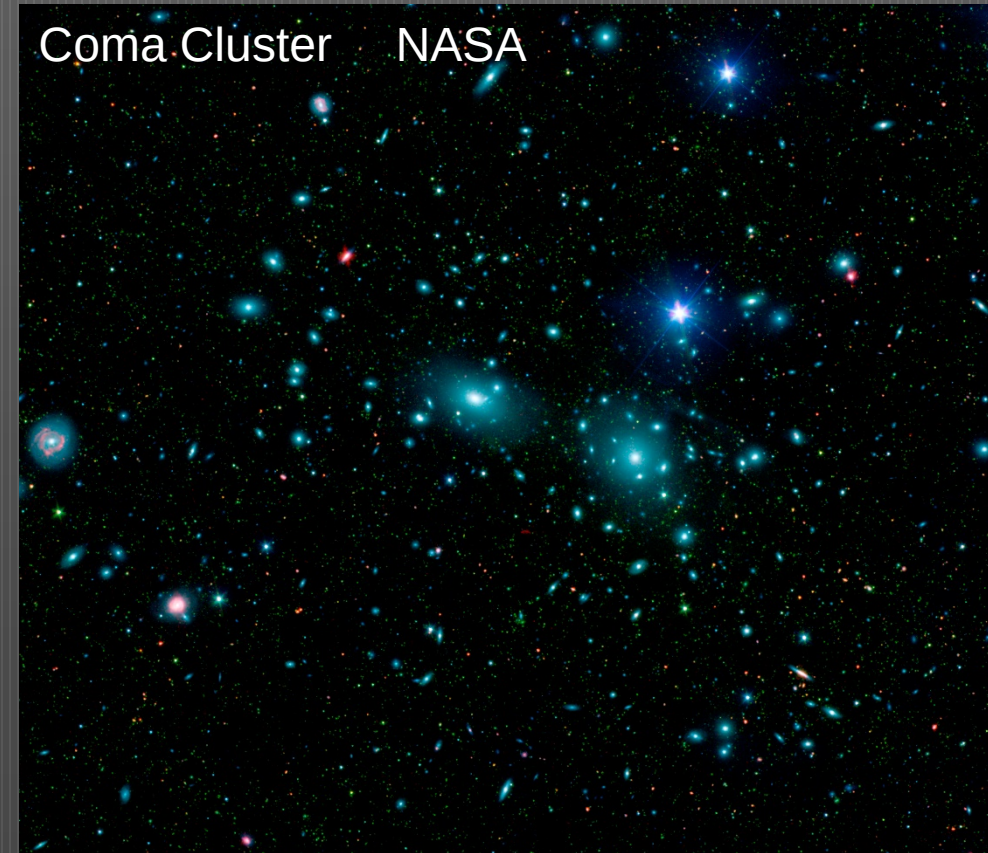
- 超新星爆発で中性子星ができること、宇宙線のソースであることを言った人、超新星研究のパイオニア
- かみのけ座銀河団(3.21億光年)の観測
 - 銀河の動きが早すぎることに気づいた



ビリアル定理

$$\langle K \rangle = -\frac{1}{2} \langle V \rangle$$

もっとポテンシャルが必要
→ 暗黒物質



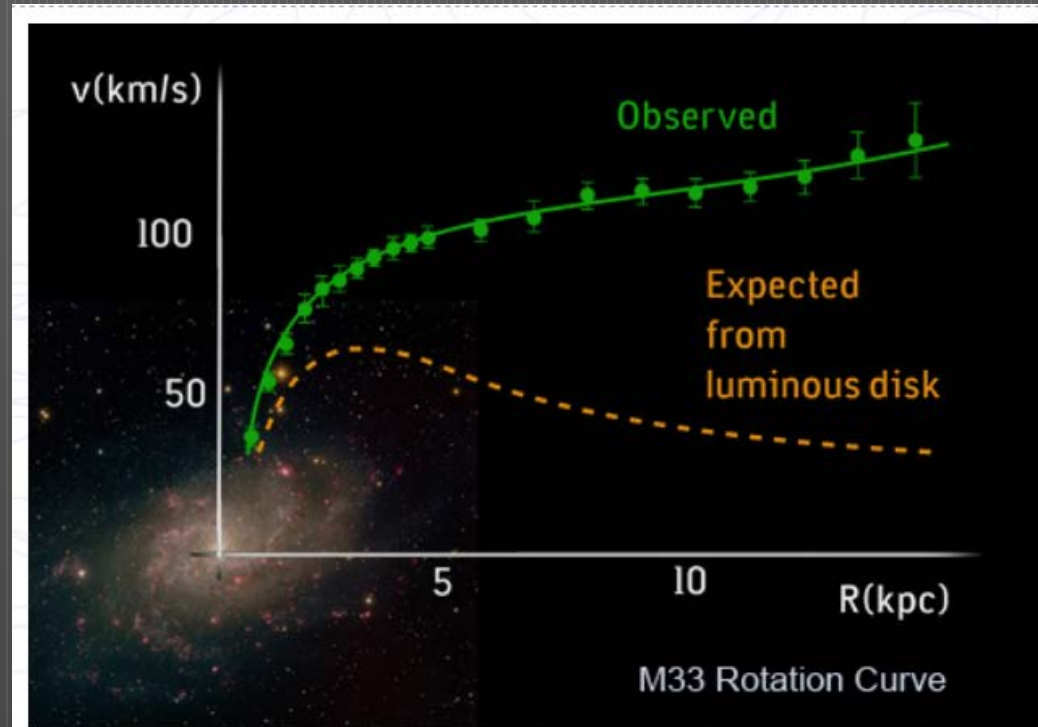
暗黒物質 @銀河 in 1970

- Vera Cooper Rubin

- M31 アンドロメダ銀河の水素21cm線のドップラー効果から回転速度を求めたが、光る星の質量だけでは説明できない →暗黒物質



Vera Cooper Rubin at the Lowell Observatory. Kent Ford has his back to us. © Bob Rubin.



© M33 Image: NOAO, AURA, NSF, T.A.Rector.

1kpc(キロパーセク)
=3260光年

「見えて」きた暗黒物質 in 1990s

- 重力レンズ効果

- ハッブル望遠鏡による遠方銀河観測；暗黒物質の重力で空間がゆがんでいる

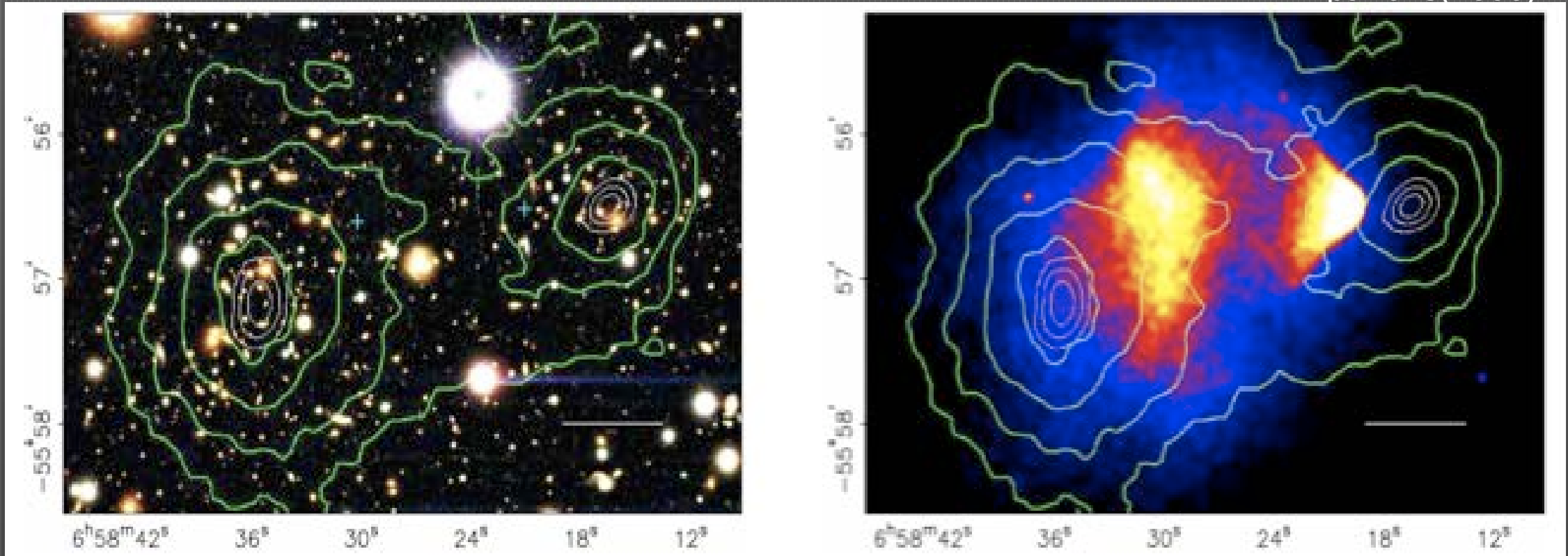


「見えて」きた暗黒物質 in 2000s

• 弾丸銀河団の衝突

- 色: X線で観測される通常の物質(プラズマ)は中心にのこってるけど
- 等高線: 重力レンズ効果から予想される暗黒物質分布は素通りに見える

ApJ 648(2006)L109



暗黒物質

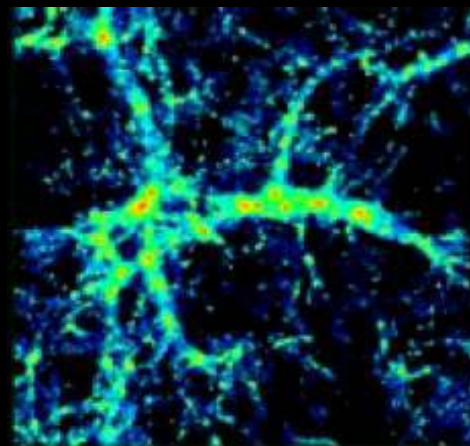
銀河



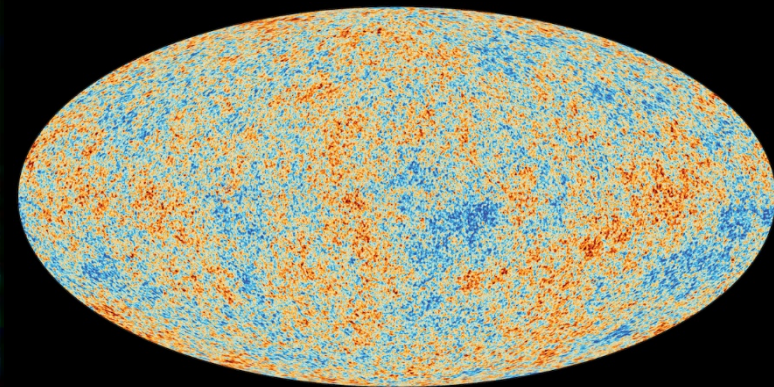
銀河団



大規模構造



宇宙まるごと



スケール 小  大

- 暗黒物質を仮定すると宇宙の様々なスケールで観測される「謎」を一発で説明できる。
- しかもそれがたった一つの未知の素粒子だったら美しい！

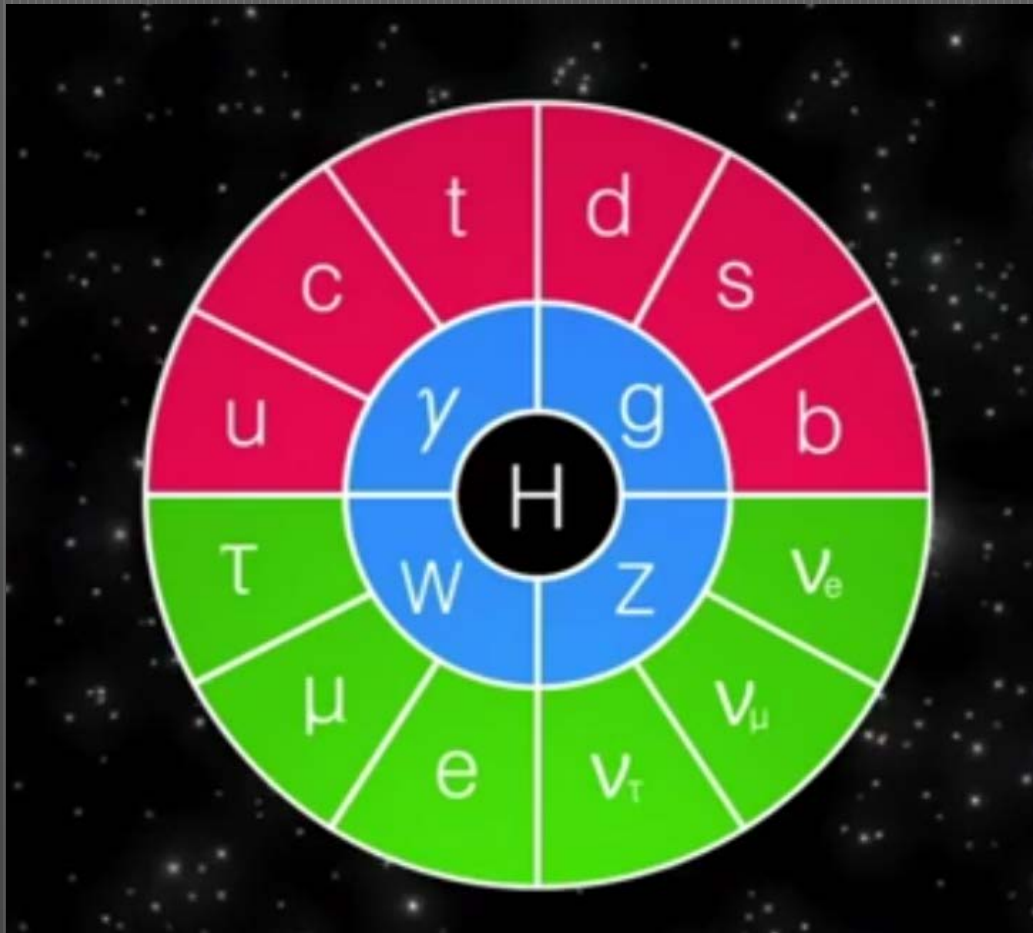
「物理学の希望」

暗黒物質のわかっている性質

- 安定である
- 電荷を持っていない
 - 見えていないのだから
- 既知の物質とはとても弱く相互作用する
 - 宇宙の初期に作られたのなら、相互作用はする
 - でもこれまで検出できていないのだから、とても弱い
 - 直接検出、天文的・間接的検出でも
- 軽すぎない質量を持つ
 - 宇宙の大規模構造、銀河団、銀河を形成したのだから

素粒子物理のStandard Model

- 分かっている素粒子



Particles and $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
quantum numbers

L_L	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$	$(1, 2, -1)$
E_R	$\bar{e}_R, \bar{\mu}_R, \bar{\tau}_R$	$(1, 1, -2)$
Q_L	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$	$(3, 2, +1/3)$
U_R	u_R, c_R, t_R	$(3, 1, +4/3)$
D_R	d_R, s_R, b_R	$(3, 1, -2/3)$

Lagrangian

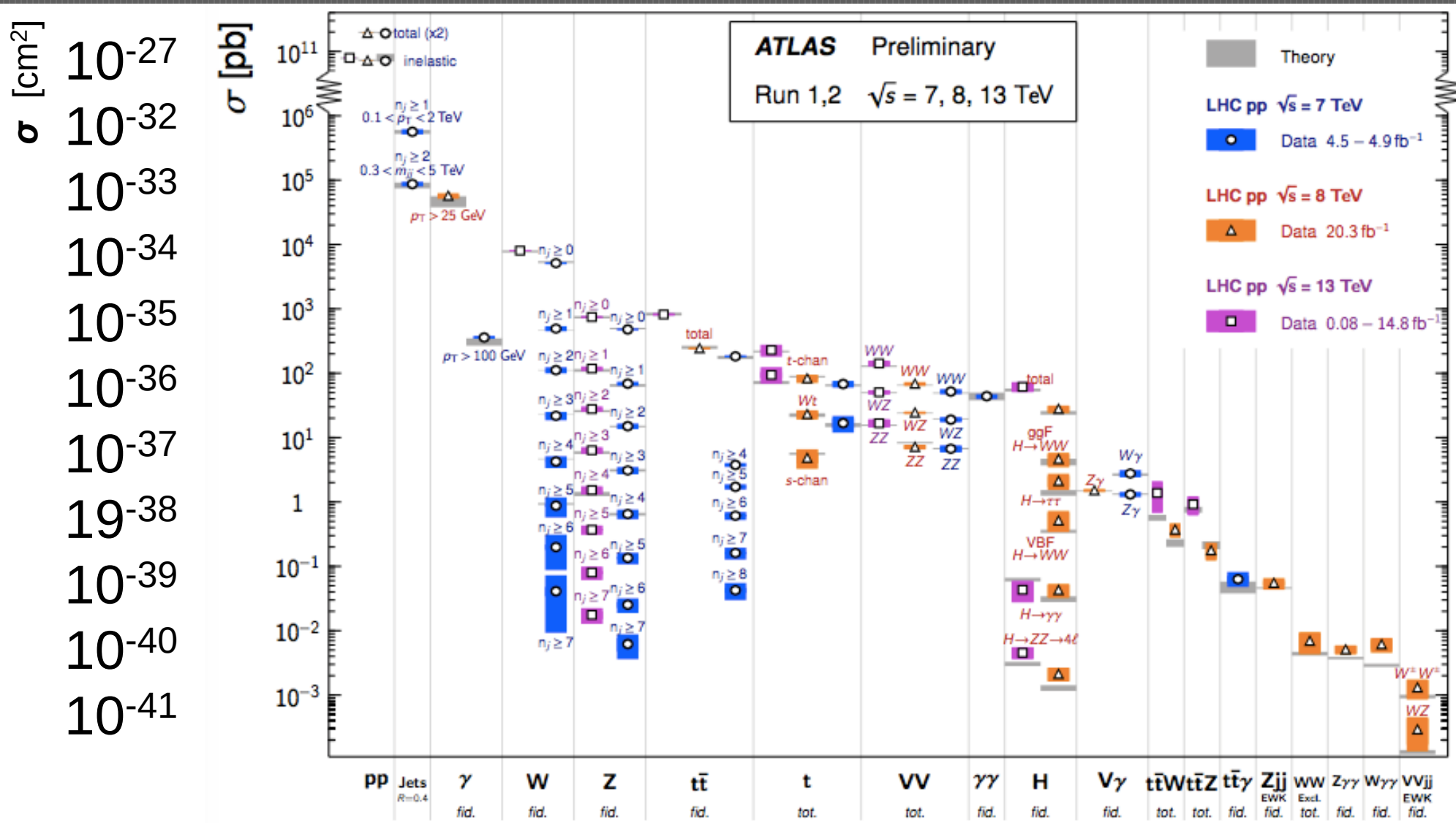
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} \\
 & + i\bar{\psi} \not{D}\psi + h.c. \\
 & + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\
 & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)
 \end{aligned}$$

gauge interaction
matter fermions
Yukawa interactions
Higgs potential

Particle fever

Standard Modelの相互作用の大きさ@LHC

これより断面積小↓

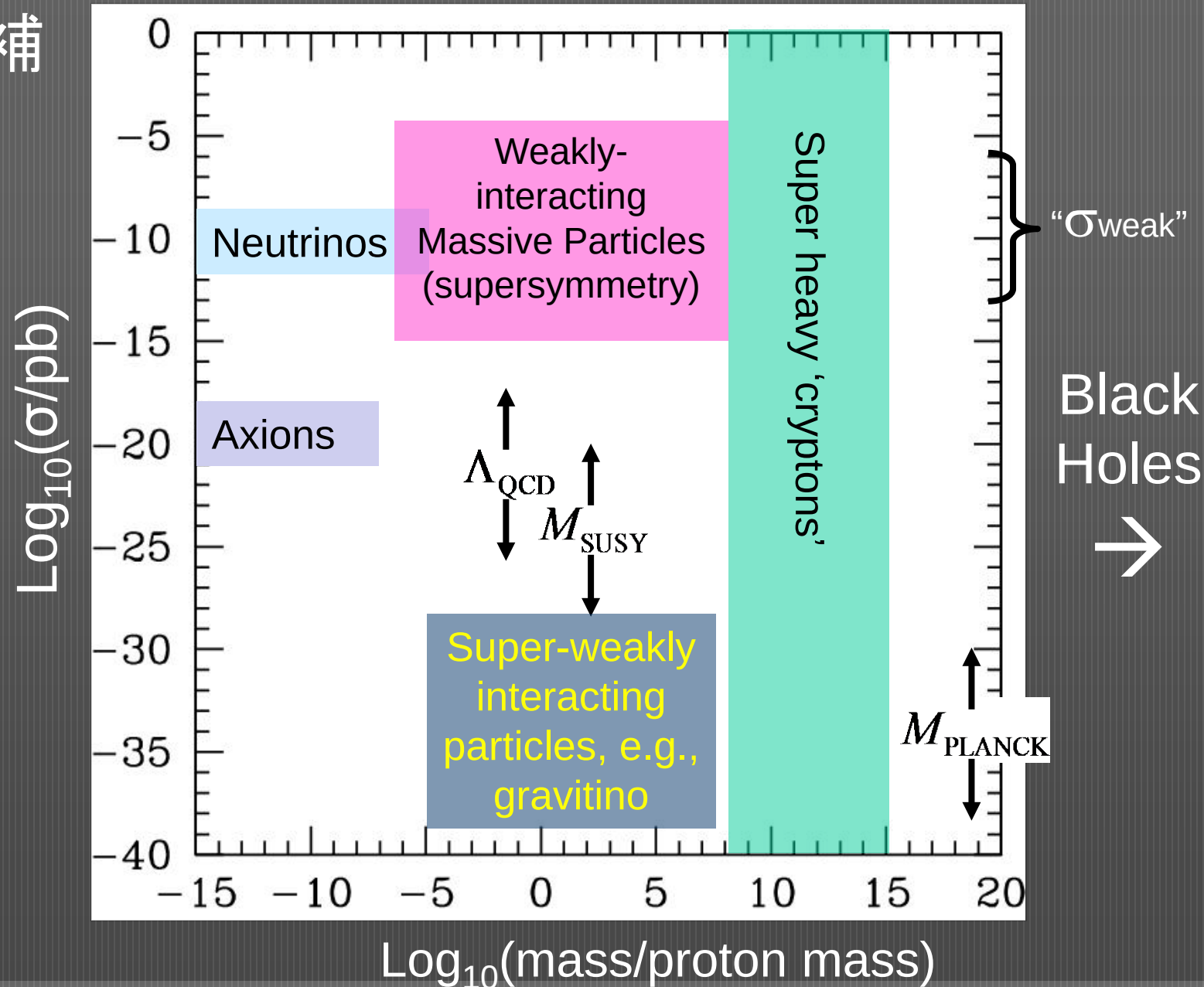


素粒子的暗黒物質の候補

- WIMPs
- Neutrinos
 - Sterile neutrino
- Axions

あたりの探索実験が現在行われている

注)あまりに断面積が小さいとどうしようもない。



単なる一つの希望だが、SUSY WIMPs

- Minimal Supersymmetric Extension of the Standard Model
– 素粒子標準理論の問題も解決できる美しすぎる話

Nuclear Physics B238 (1984) 453–476
© North-Holland Publishing Company

SUPERSYMMETRIC RELICS FROM THE BIG BANG*

John ELLIS and J. S. HAGELIN

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305, USA

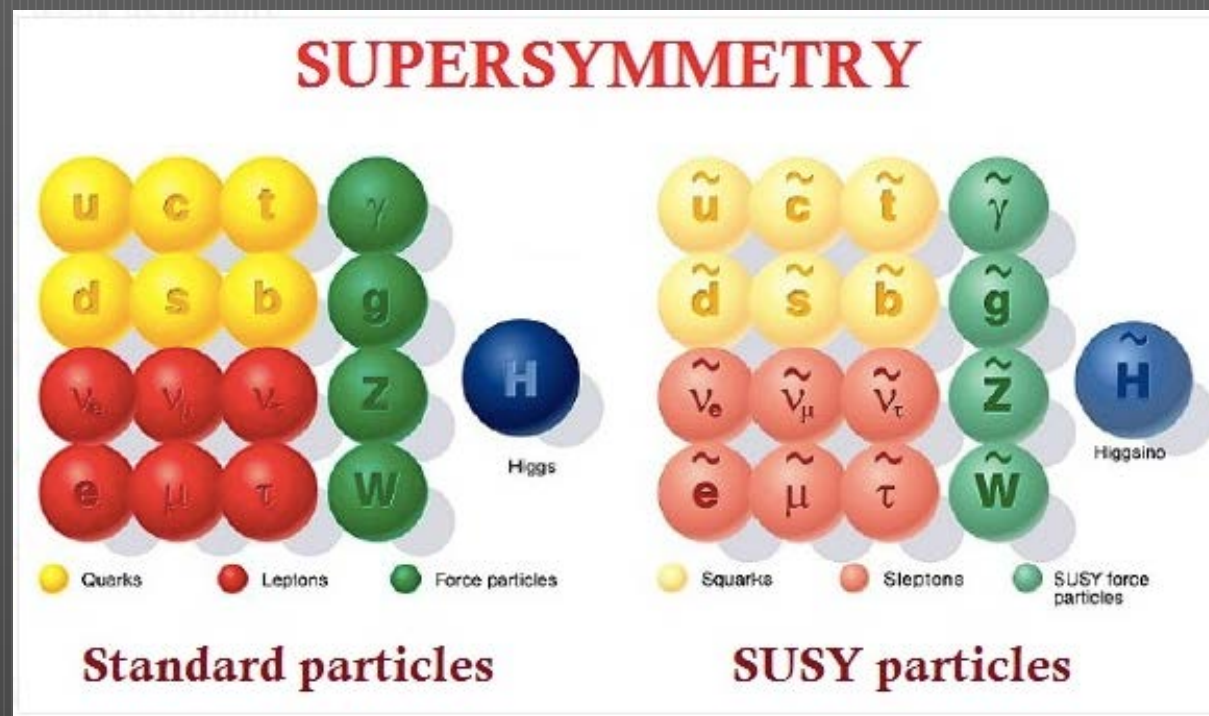
D. V. NANOPOULOS, K. OLIVE[†], and M. SREDNICKI[‡]

CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

Received 16 September 1983

(Revised 15 December 1983)

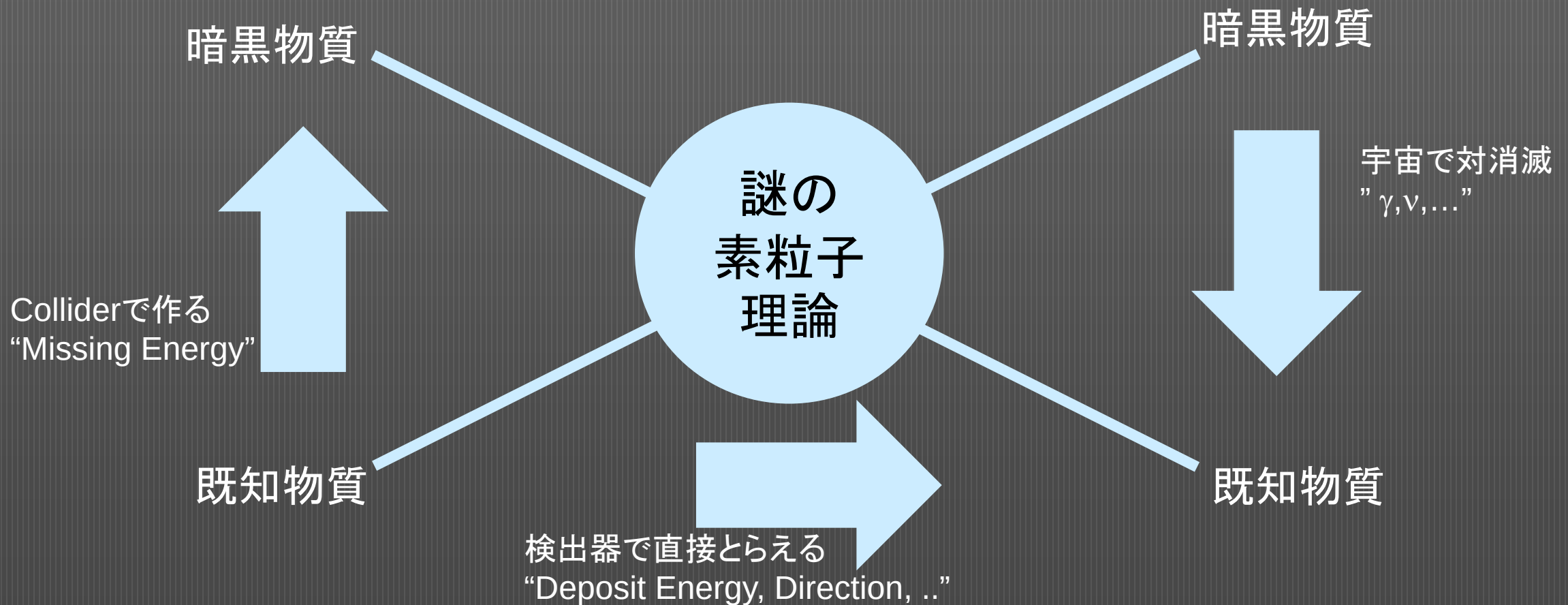
We consider the cosmological constraints on supersymmetric theories with a new, stable particle. Circumstantial evidence points to a neutral gauge/Higgs fermion as the best candidate for this particle, and we derive bounds on the parameters in the lagrangian which govern its mass and couplings. One favored possibility is that the lightest neutral supersymmetric particle is predominantly a photino $\tilde{\gamma}$ with mass above $\frac{1}{2}$ GeV, while another is that the lightest neutral supersymmetric particle is a Higgs fermion with mass above 5 GeV or less than $O(100)$ eV. We also point out that a gravitino mass of 10 to 100 GeV implies that the temperature after completion of an inflationary phase cannot be above 10^{14} GeV, and probably not above 3×10^{12} GeV. This imposes constraints on mechanisms for generating the baryon number of the universe.



$$\chi = a_1 \tilde{B} + a_2 \tilde{W}_3 + a_3 \tilde{H}_1 + a_4 \tilde{H}_2$$

とにかく実験！探索方法？

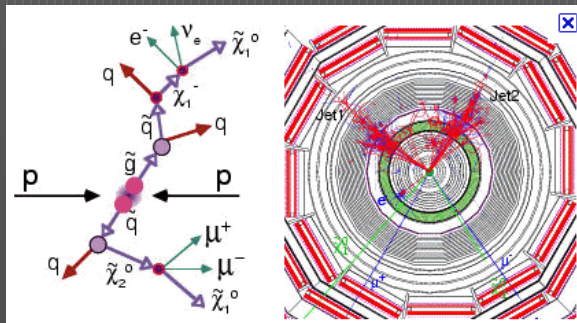
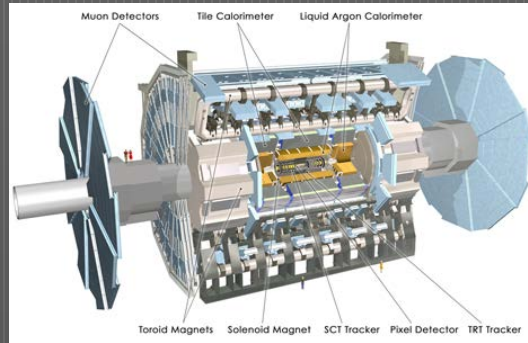
- 暗黒物質と既知の物質の相互作用のパターンは3つ



具体的には

Collider

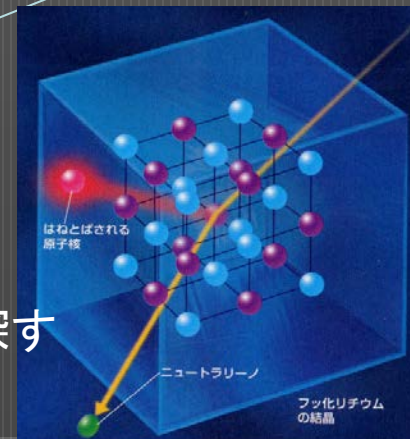
例 LHC ATLAS検出器



暗黒物質
生成によって
持ち逃げ
される
Missing Transverse Energy
を探す

実験室で普通の物質との反応を探す

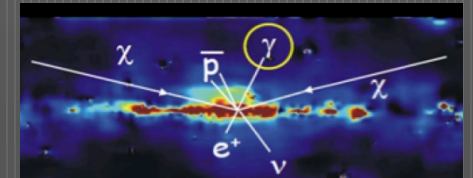
Direct search



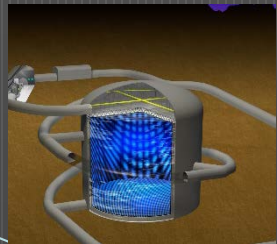
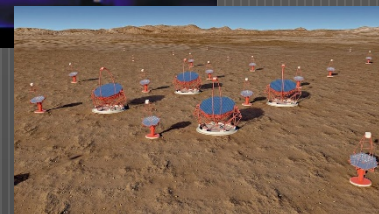
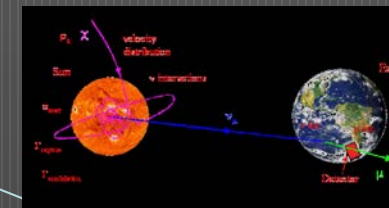
Indirect search

宇宙の暗黒物質があつまる
と思われる場所で対生成
され、飛んでくる粒子を探す

例1 銀河中心からの γ
Fermi衛星, CTA,..



例2 太陽からの ν
Super-K, Hyper-K, IceCube,..



例 液体キセノン中の
キセノン原子核の弾性散乱
XENONnT, LZ,..

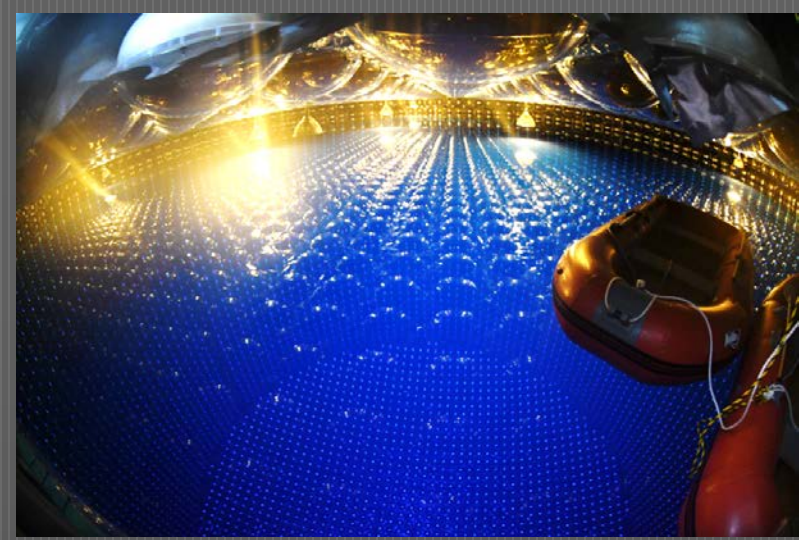
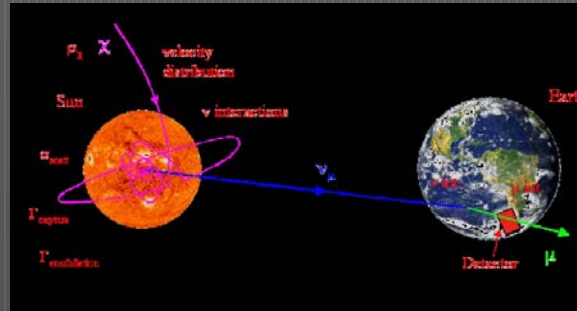
Super-Kamiokande

- 50ktonの水によるニュートリノ方向感度検出器
- 世界最高感度の暗黒物質検出器でもある

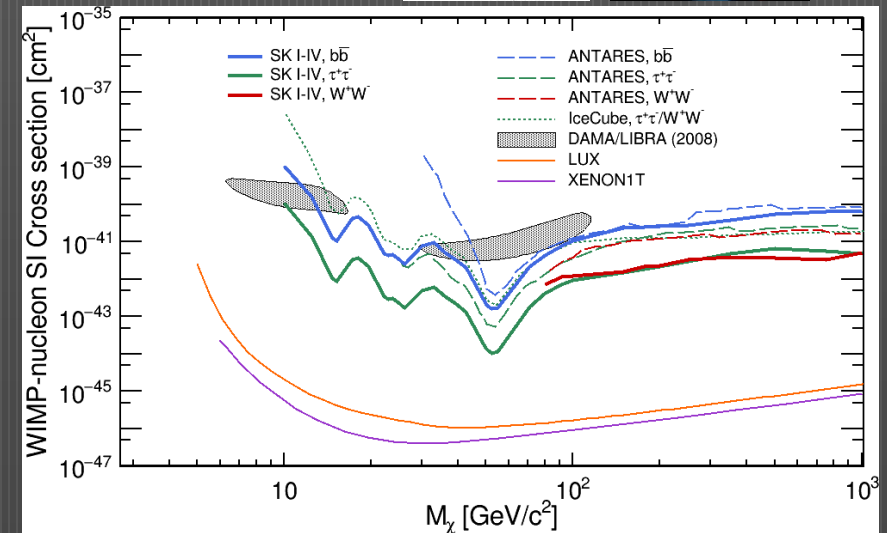
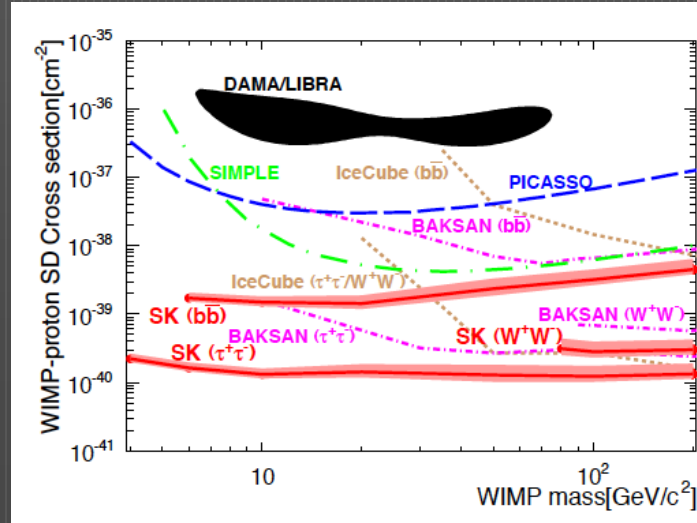
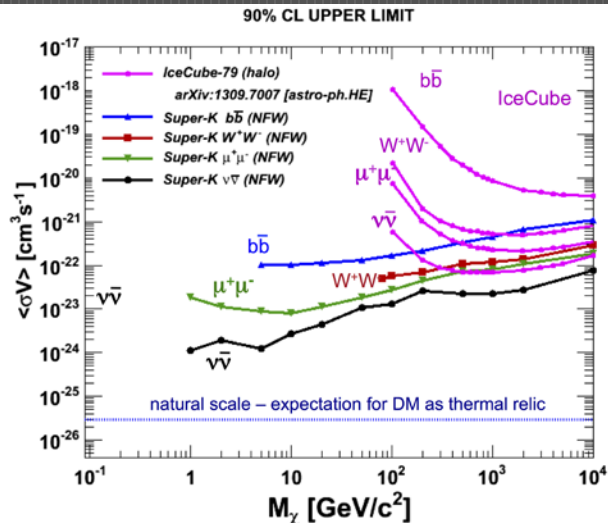
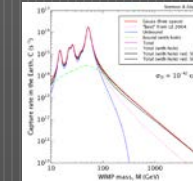
Galactic WIMPs search



Solar WIMPs search

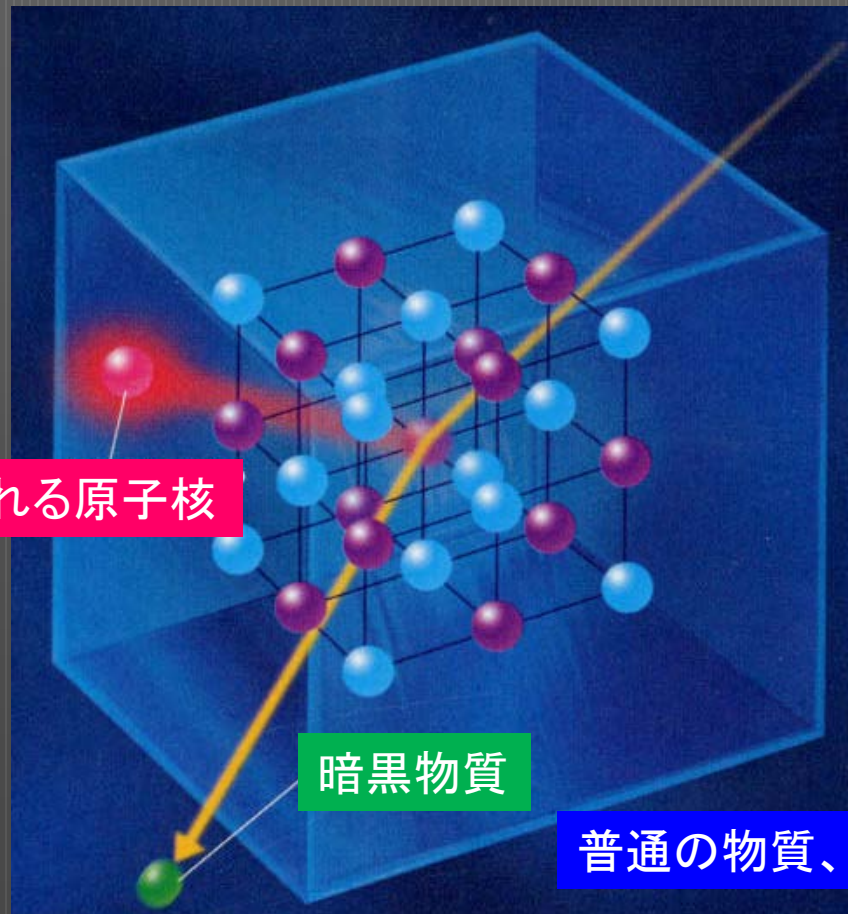


Earth WIMPs search



直接検出による探索

- やってきた暗黒物質と普通の物質(原子核)と散乱して残す痕跡を捉える
 - エネルギー
 - 飛跡？
- といっても落とすエネルギーはごくわずか
～10keV
結晶中では”ほぼ”動かない



直接探索

- なんか怪しくない？
- エネルギー落とすバックグラウンド事象なんていくらでもあるし
そもそも、それが暗黒物質による信号かどうかなんてわからないじゃないか。。。

直接探索

- なんか怪しくない？
- エネルギー落とすバックグラウンド事象なんていくらでもあるし
そもそも、それが暗黒物質による信号かどうかなんてわからないじゃないか。。。

その通り！

- アイデアと技術で未知の素粒子を掴む究極の実験！

例えば、何をつかうか？

- 「既知の物質」 どの原子核が有利か？

周期\族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 Hydrogen 1.00798																	2 He ヘリウム Helium 4.0026
2	3 Li リチウム Lithium 6.968	4 Be ベリリウム Beryllium 9.01218											5 B 硼(ホウ)素 Boron 10.814	6 C 炭素 Carbon 12.0106	7 N 窒素 Nitrogen 14.0069	8 O 酸素 Oxygen 15.9994	9 F 弗(フッ)素 Fluorine 18.9984	10 Ne ネオン Neon 20.1797
3	11 Na ナトリウム Sodium 22.9898	12 Mg マグネシウム Magnesium 24.306											13 Al アルミニウム Aluminum 26.9815	14 Si 珪(ケイ)素 Silicon 28.085	15 P 磷(リン) Phosphorus 30.9738	16 S 硫黄 Sulfur 32.068	17 Cl 塩素 Chlorine 35.452	18 Ar アルゴン Argon 39.948
4	19 K カリウム Potassium 39.0983	20 Ca カルシウム Calcium 40.078	21 Sc スカンジウム Scandium 44.9559	22 Ti チタン Titanium 47.867	23 V バナジウム Vanadium 50.9415	24 Cr クロム Chromium 51.9961	25 Mn マンガン Manganese 54.938	26 Fe 鉄 Iron 55.845	27 Co コバルト Cobalt 58.9332	28 Ni ニッケル Nickel 58.6934	29 Cu 銅 Copper 63.546	30 Zn 亜鉛 Zinc 65.38	31 Ga ガリウム Gallium 69.723	32 Ge ゲルマニウム Germanium 72.630	33 As 砒(ヒ)素 Arsenic 74.9216	34 Se セレン Selenium 78.971	35 Br 臭素 Bromine 79.904	36 Kr クリプトン Krypton 83.798
5	37 Rb ルビジウム Rubidium 85.4678	38 Sr ストロンチウム Strontium 87.62	39 Y イットリウム Yttrium 88.9058	40 Zr ジルコニウム Zirconium 91.224	41 Nb ニオブ Niobium 92.9064	42 Mo モリブデン Molybdenum 95.95	43 Tc テクネチウム Technetium [99]	44 Ru ルテニウム Ruthenium 101.07	45 Rh ロジウム Rhodium 102.906	46 Pd パラジウム Palladium 106.42	47 Ag 銀 Silver 107.868	48 Cd カドミウム Cadmium 112.414	49 In インジウム Indium 114.818	50 Sn 錫(スズ) Tin 118.710	51 Sb アンチモン Antimony 121.760	52 Te テルル Tellurium 127.60	53 I 沃(ヨウ)素 Iodine 126.904	54 Xe キセノン Xenon 131.293
6	55 Cs セシウム Cesium 132.905	56 Ba バリウム Barium 137.327	※1	72 Hf ハフニウム Hafnium 178.49	73 Ta タンタル Tantalum 180.948	74 W タングステン Tungsten 183.84	75 Re レニウム Rhenium 186.207	76 Os オスミウム Osmium 190.23	77 Ir イリジウム Iridium 192.217	78 Pt 白金(プラチナ) Platinum 195.084	79 Au 金 Gold 196.967	80 Hg 水銀 Mercury 200.592	81 Tl タリウム Thallium 204.384	82 Pb 鉛 Lead 207.2	83 Bi ビスマス Bismuth 208.980	84 Po ポロニウム Polonium [210]	85 At アスタチン Astatine [210]	86 Rn ラドン Radon [222]
7	87 Fr フランシウム Francium [223]	88 Ra ラジウム Radium [226]	※2	104 Rf ラザホーギウム Rutherfordium [267]	105 Db ドブニウム Dubnium [268]	106 Sg シーボーギウム Seaborgium [271]	107 Bh ボーリウム Bohrium [272]	108 Hs ハッシウム Hassium [277]	109 Mt マイトネリウム Meitnerium [276]	110 Ds ダームスタチウム Darmstadtium [281]	111 Rg レントゲニウム Roentgenium [280]	112 Cn コペルニシウム Copernicium [285]	113 Nh ニホニウム Nihonium [278]	114 Fl フレロビウム Flerovium [289]	115 Mc モスコビウム Moscovium [289]	116 Lv リバモリウム Livermorium [293]	117 Ts テネシン Tennessine [293]	118 Og オガネソン Oganesson [294]
※1 ランタノイド系	57 La ランタン Lanthanum 138.905	58 Ce セリウム Cerium 140.116	59 Pr プラセオジウム Praseodymium 140.908	60 Nd ネオジウム Neodymium 144.242	61 Pm プロメチウム Promethium [145]	62 Sm サマリウム Samarium 150.36	63 Eu ユウロビウム Europium 151.964	64 Gd ガドリニウム Gadolinium 157.25	65 Tb テルビウム Terbium 158.925	66 Dy ジスプロシウム Dysprosium 162.500	67 Ho ホルミウム Holmium 164.930	68 Er エルビウム Erbium 167.259	69 Tm ツリウム Thulium 168.934	70 Yb イッテルビウム Ytterbium 173.045	71 Lu ルテチウム Lutetium 174.967			
※2 アクチノイド系	89 Ac アクチニウム Actinium [227]	90 Th トリウム Thorium 232.038	91 Pa プロトアクチニウム Protactinium 231.036	92 U ウラン Uranium 238.029	93 Np ネプツニウム Neptunium [237]	94 Pu プルトニウム Plutonium [239]	95 Am アメリシウム Americium [243]	96 Cm キュリウム Curium [247]	97 Bk バーケリウム Berkelium [247]	98 Cf カリホルニウム Californium [252]	99 Es アインスタイニウム Einsteinium [252]	100 Fm フェルミウム Fermium [257]	101 Md ノーベリウム Mendelevium [258]	102 No ローレンシウム Nobelium [259]	103 Lr ローレンシウム Lawrencium [262]			

直接検出の原理: 反応レート

- 素粒子物理学 × 天体物理学
(断面積 cm^{-2}) (flux 個 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

$$\begin{aligned}\text{反応レート } R &= \sigma_{\chi-N} \times n\langle v \rangle \\ &= \sigma_{\chi-N} \times \rho \int \vec{v} f(\vec{v}) d\vec{v}\end{aligned}$$

$\sigma_{\chi-N}$: 暗黒物質と原子核の断面積

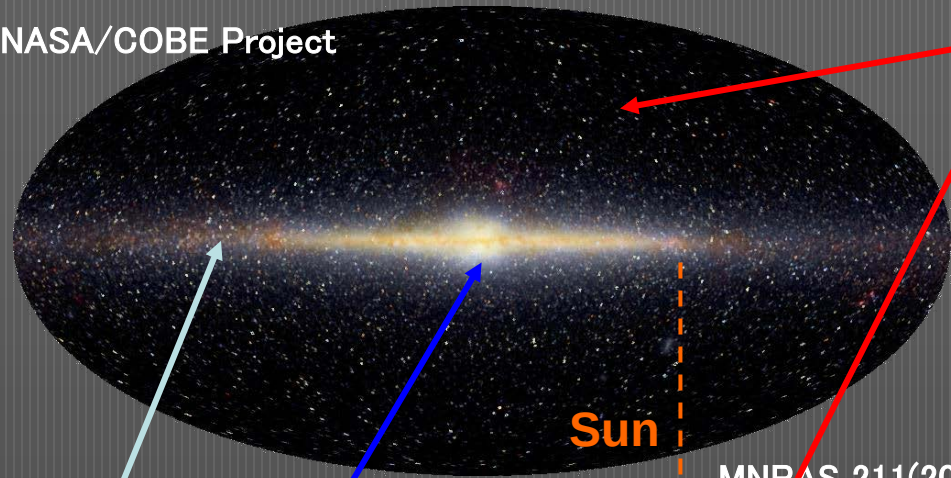
ρ : 暗黒物質の密度

$f(\vec{v})$: 暗黒物質の速度分布

ハローモデル

- Standard Halo model

NASA/COBE Project



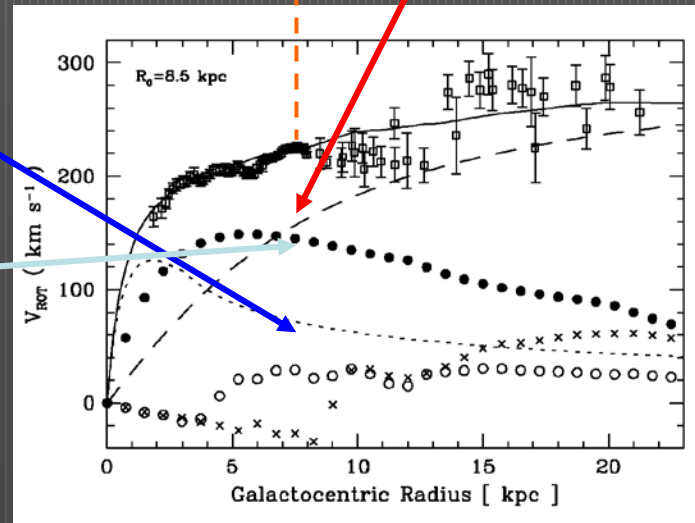
Sun

MNRAS 211(2000) 361

Bulge

Disc

我々の銀河の回転曲線は
観測が難しい! 太陽の位置も!



Dark Halo $\rho(r) \propto \frac{1}{r^2}$

$$\rho(r_{\text{Sun}}) = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$$



Collision-less Boltzmann equation



Maxwell distribution

$$f(\vec{v}) = \frac{1}{\pi^{3/2} \sigma^3} e^{-|\vec{v}|^2 / \sigma^2}$$

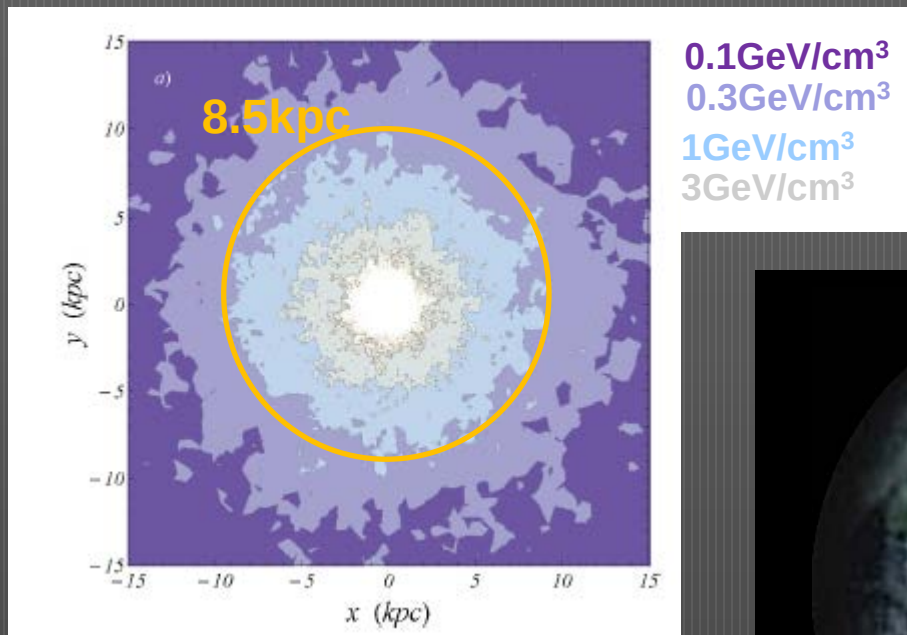
$$\sigma = \sqrt{3/2} v_{\text{ROT}}$$

$$v_{\text{ROT}} = 220 \text{ km/s}$$

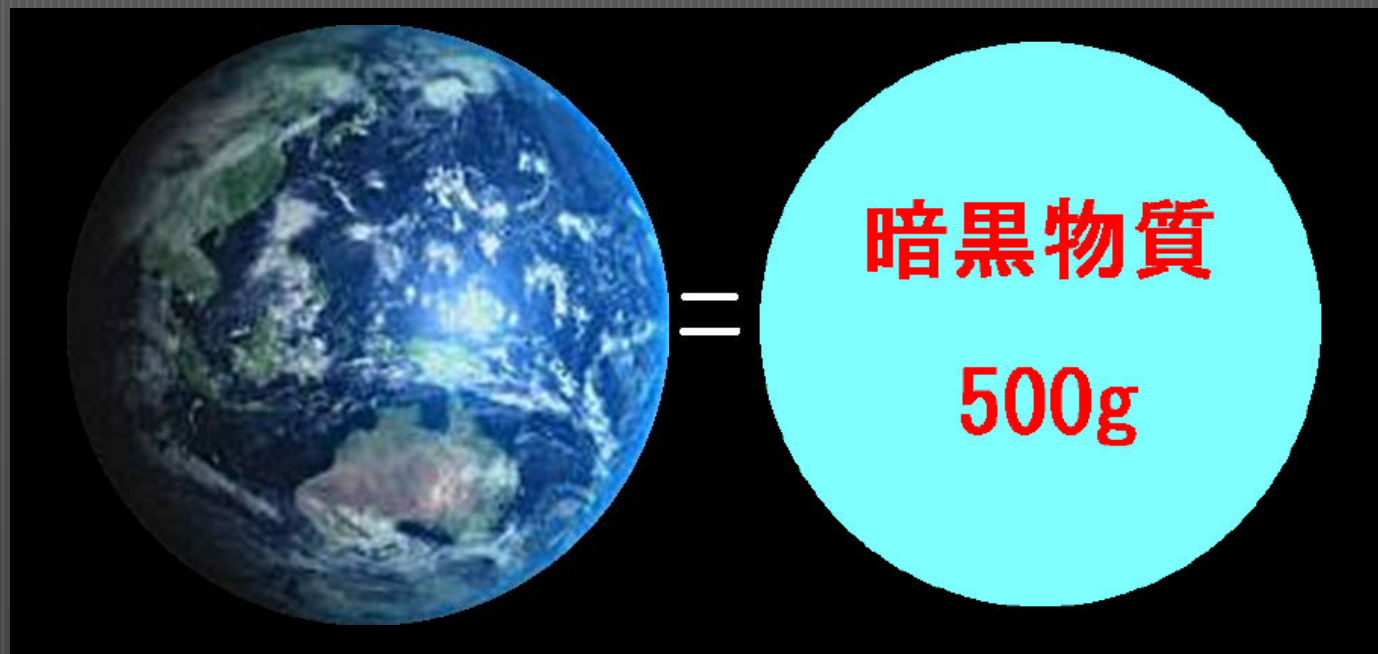
$$v_{\text{esc}} = 544 \text{ km/s}$$

地球にある暗黒物質の量は？

- 主に回転曲線観測から、太陽付近の密度は $0.3\sim 0.4\text{GeV}/\text{cm}^3$



銀河面での密度分布 JCAP 1002(2010) 012



Kinematicsと断面積

- 反跳エネルギー

- 単なる二体の弾性散乱

$$E_R = \frac{M_N M_\chi^2}{(M_N + M_\chi)^2} v^2 (1 - \cos \eta)$$

η : scattering angle in CM

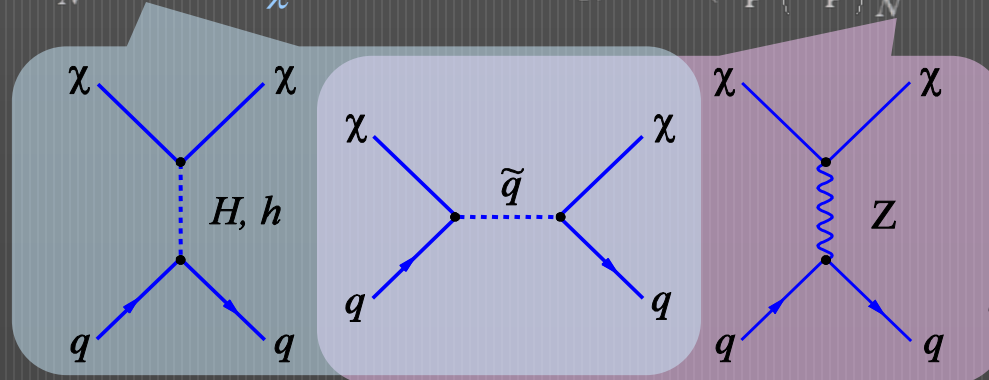
- 断面積

- スピンに依存する項としない項

$$\sigma_{\chi-N} = 4G_F^2 \left(\frac{M_\chi M_N}{M_\chi + M_N} \right)^2 (C_N^{\text{SI}} + C_N^{\text{SD}})$$

SUSY WIMPsの場合

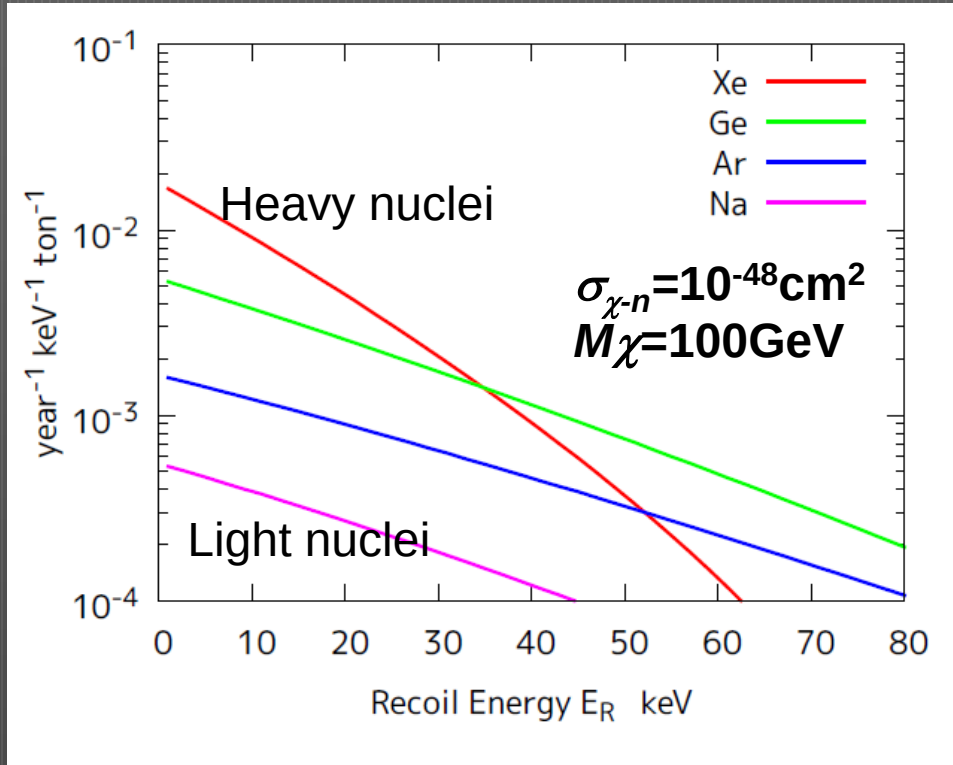
$$C_N^{\text{SI}} \propto A^2 \sigma_{\chi-n} \qquad C_N^{\text{SD}} \propto \left(a_p \langle S_p \rangle_N + a_n \langle S_n \rangle_N \right)^2 \frac{J+1}{J}$$



どの原子核が有利か

- SIに着目すると

$$C_N^{SI} \propto A^2$$



放射性同位元素のない重い原子核が有利
例えば キセノン

- SDに着目すると

$$C_N^{SD} \propto \left(a_p \langle S_p \rangle_N + a_n \langle S_n \rangle_N \right)^2 \frac{J+1}{J}$$

$\langle S_p \rangle_N$ nucleon spin
 $\langle S_n \rangle_N$ in the nucleus

Isotope	J	$\langle S_p \rangle_N$	$\langle S_n \rangle_N$
^{19}F	1/2	0.441	-0.109
^7Li	3/2	0.497	0.004
^{23}Na	3/2	0.248	0.020
^{73}Ge	9/2	0.009	0.372
^{127}I	5/2	0.309	0.075
^{129}Xe	1/2	0.028	0.359
^{131}Xe	3/2	-0.009	-0.227

スピンの大きい原子核が有利
たとえば フッ素

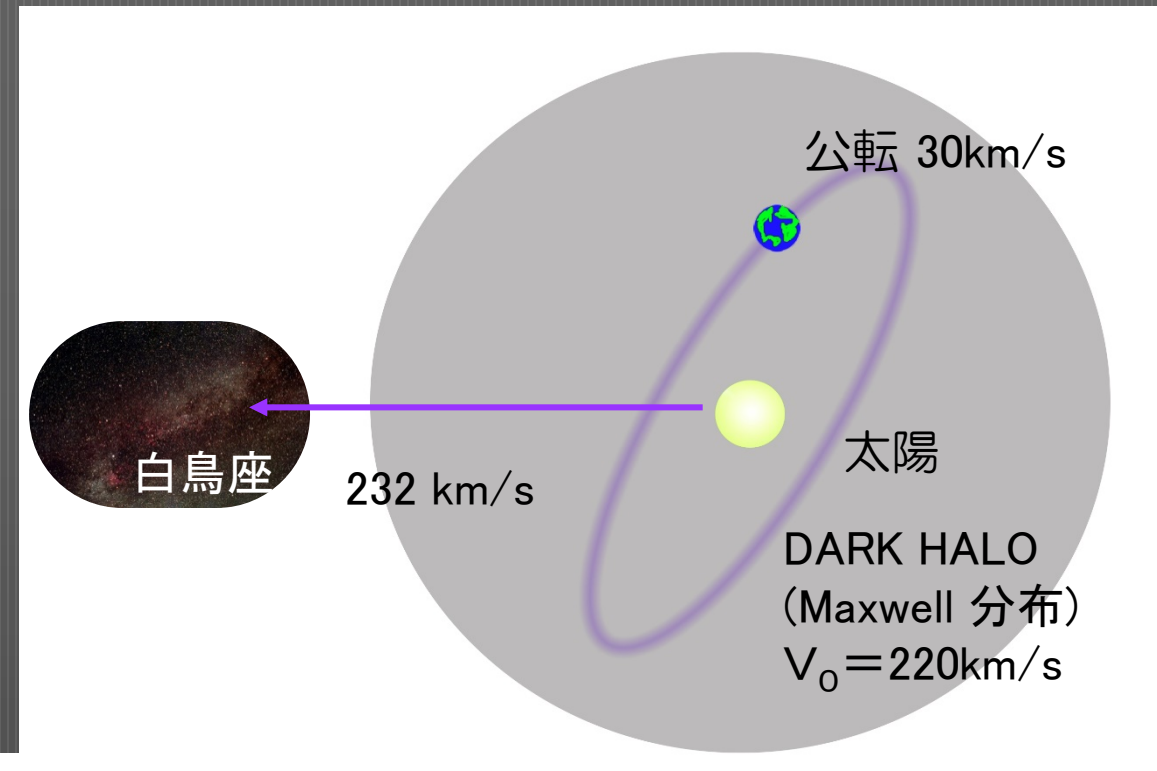
Ref:水素:太陽:SK

暗黒物質検出器

- 地球上での暗黒物質による原子核反跳は
 - 極低レート (<1 events/ton/year)
 - わずかなエネルギーしか得られない (<10 keV)
 - エネルギースペクトルの形も他のバックグラウンド似ている
- 暗黒物質検出器に必須の性能
 - 極低バックグラウンド: U/Th/ ^{40}K といった放射性不純物を極限まで取りのぞく
 - 低閾値
 - 大質量
- あるとよい性能
 - 位置感度があると、バックグラウンドを下げやすい
 - 粒子識別能力があると、バックグラウンドを下げやすい
 - 方向感度があると、バックグラウンドを下げやすい上、より確実な信号を得られる

怪しくない、暗黒物質の信号は？

- 怪しさの原因：バックグラウンド
 - バックグラウンドがなければ「何個捕まえた」とか「スペクトルが予想通り」でよいのだが。バックグラウンドがゼロというのはあり得ない！
- やはり確実なのは銀河の回転！



$$\vec{v}_E = \vec{v}_{\text{SUN}} + \vec{v}_{\text{ES}}$$

白鳥座の方向 232 km/s 公転 30 km/s

→ $f(\vec{v} + \vec{v}_E)$ の変化

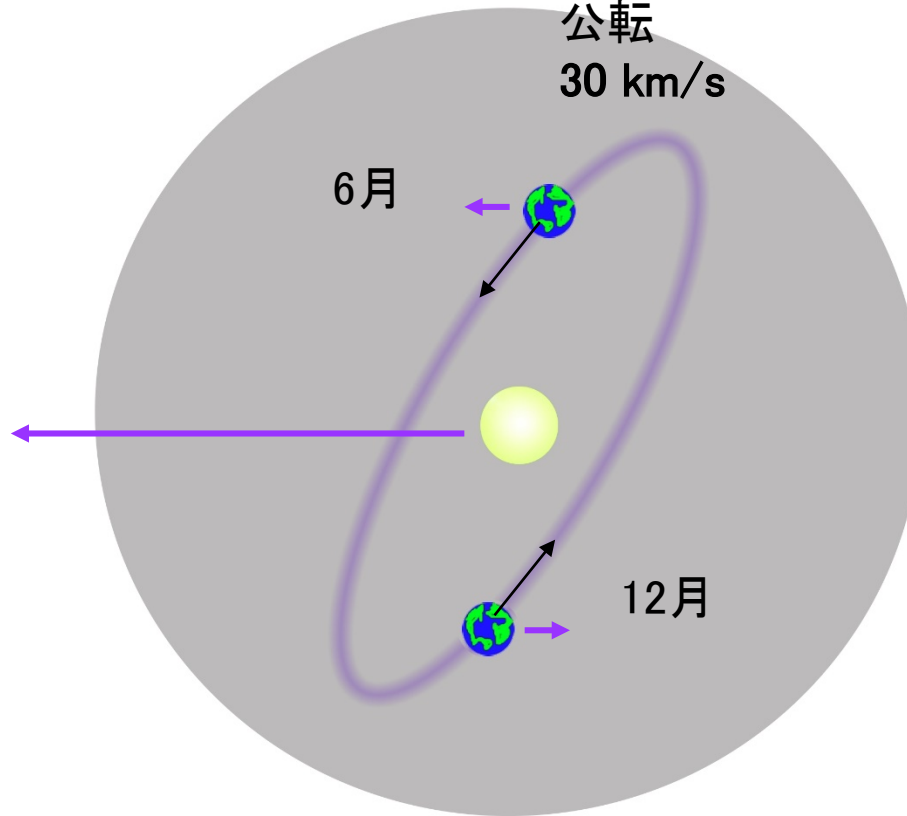
→ イベントレート R の変化

地球の動きが暗黒物質のシグナルを生む

Annual Modulation

$$\vec{v}_E = \vec{v}_{\text{SUN}} + \vec{v}_{\text{ES}}$$

公転
30 km/s

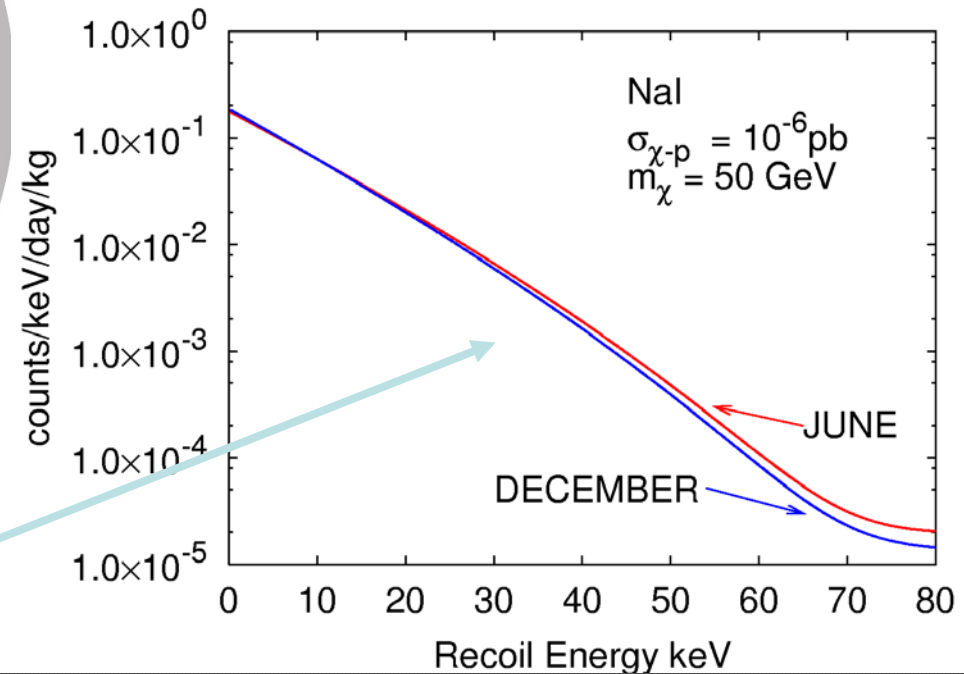


NaIによる季節変動

反跳エネルギー E_R を測定すると

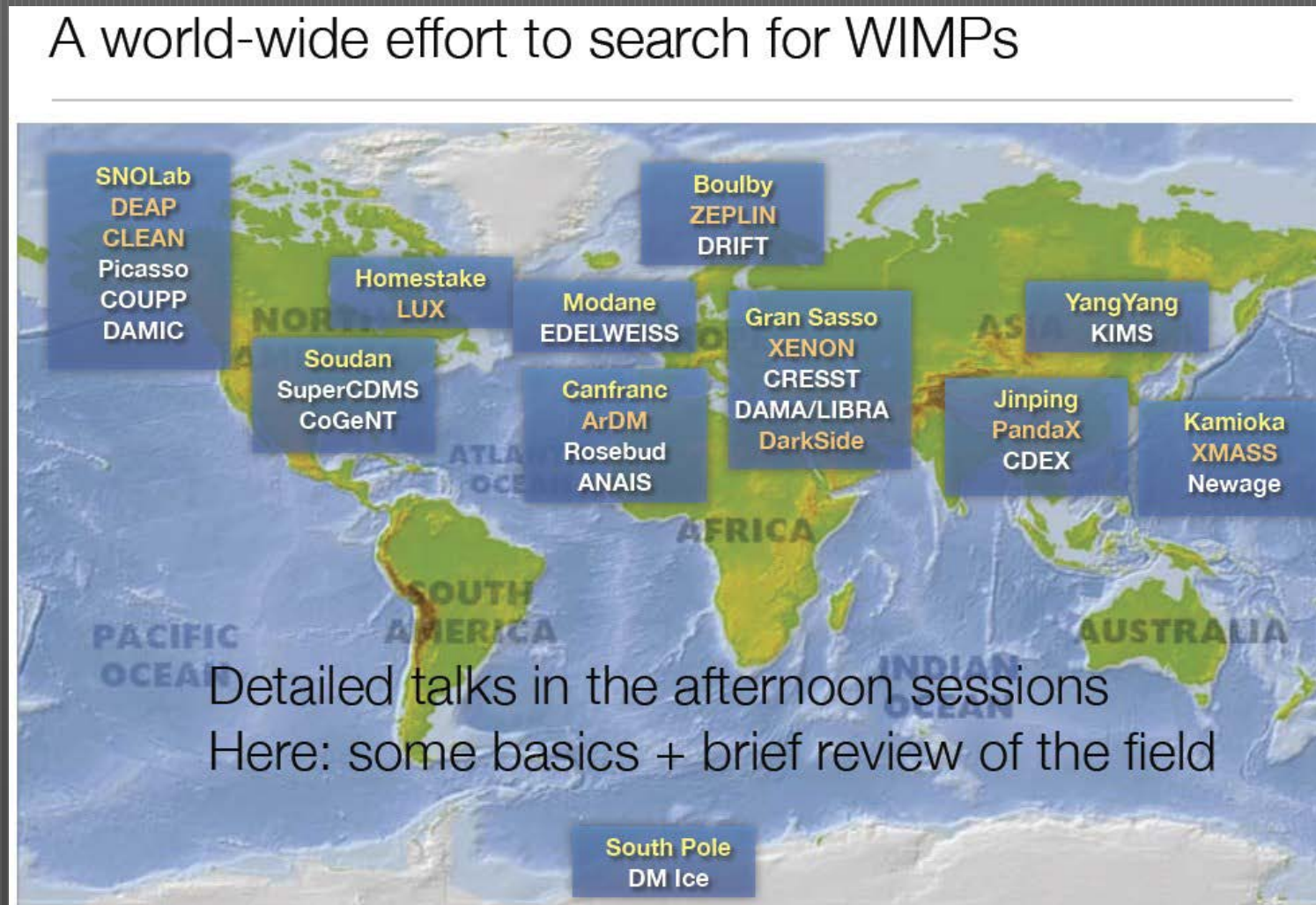
$\vec{v}_{\text{ES}}$ の $\vec{v}_{\text{SUN}}$ 成分が年変化

$\frac{dR}{dE_R}$ の年変化をみる



実験をするべきところ

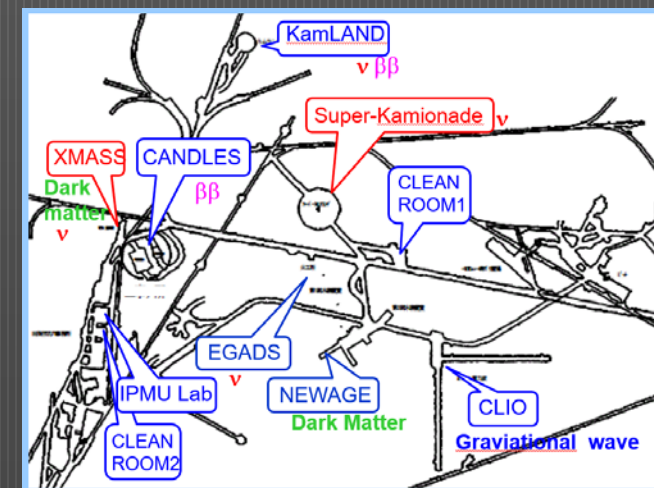
- 世界の地下実験室
 - 宇宙線研究所だけど宇宙線が邪魔！



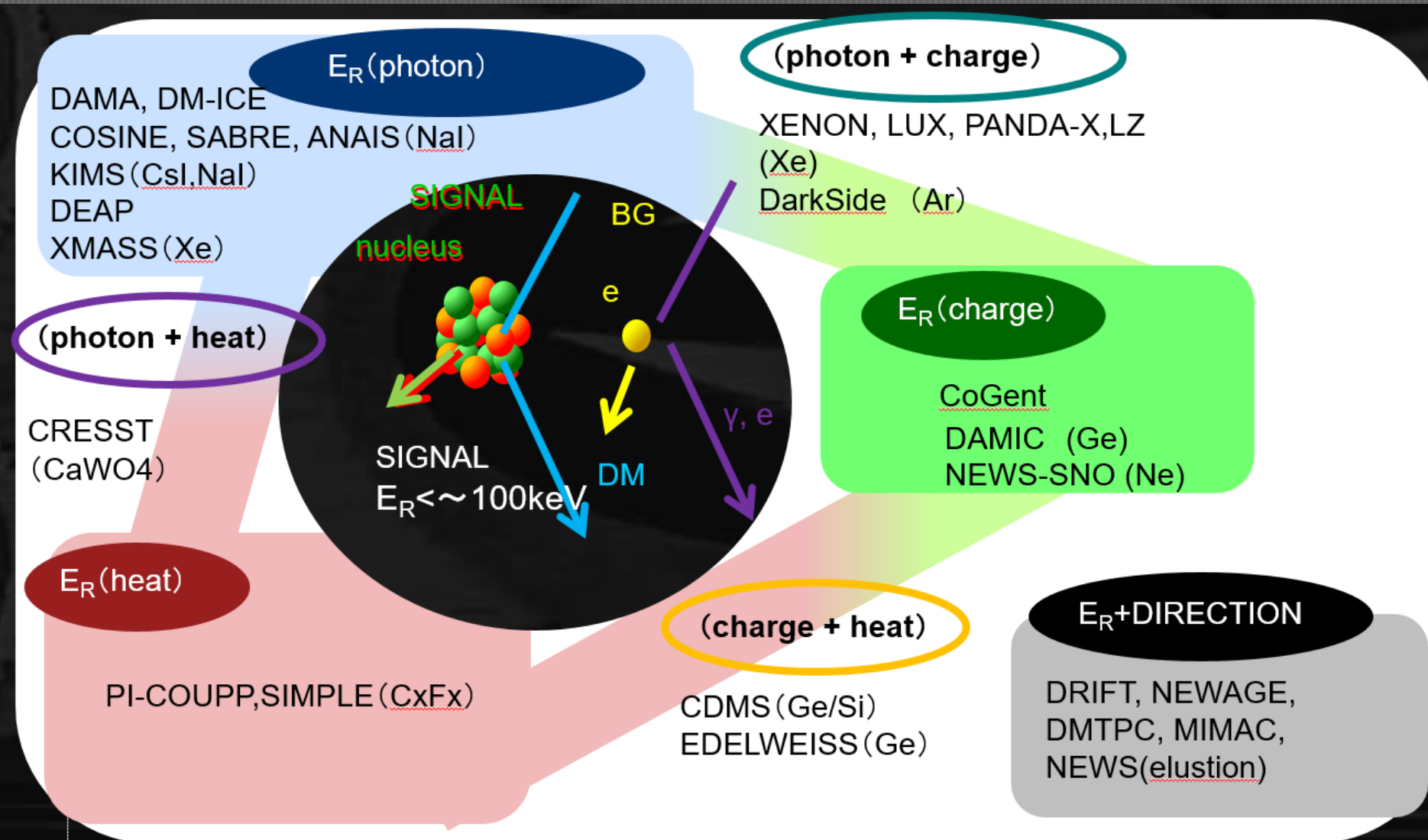
神岡宇宙素粒子研究施設



SKやKAGRAだけでなく
実験数、規模でも世界1位2位を
争う地下実験施設



どんな検出器があるか



工夫のしどころ

- 位置感度
- 粒子識別
- 方向感度

複数の物理量を取り出せると粒子識別可能

- 電子か原子核かの区別ができる

DAMA/LIBRA(イタリア)

- 250kgの超高純度NaIシンチレーター

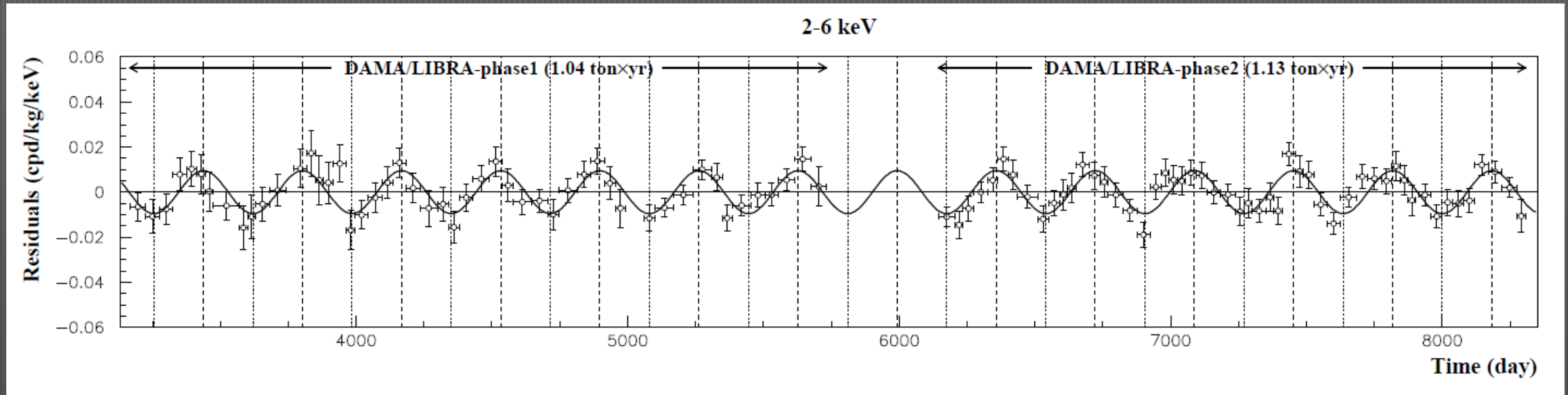


1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogen 1.00794	2 He Helium 4.00260	3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218	5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.0064	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984	10 Ne Neon 20.1798	11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.304	13 Al Aluminum 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855836	15 P Phosphorus 30.973761998	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933194	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.9216	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90584	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.90625	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.905451963	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.90471	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium 144.9127	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50019	67 Ho Holmium 164.930329	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934865	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	72 Hf Hafnium 178.49
73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.083	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.9804	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 210	86 Rn Radon 222	87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89 Ac Actinium 227	90 Th Thorium 232.0377
91 Pa Protactinium 231.036889	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium 237.048173	94 Pu Plutonium 244.0642	95 Am Americium 243.061361	96 Cm Curium 247.070351	97 Bk Berkelium 247.070351	98 Cf Californium 251.083288	99 Es Einsteinium 252.083288	100 Fm Fermium 257.105285	101 Md Mendelevium 258.105285	102 No Nobelium 259.105285	103 Lr Lawrencium 262.105285	104 Rf Rutherfordium 261.105285	105 Db Dubnium 262.105285	106 Sg Seaborgium 266.105285	107 Bh Bohrium 264.105285	108 Hs Hassium 277.105285



20年にわたる季節変動を報告

- 2018年 12.9σ の有意度でannual modulation
 - 6月2日が最大、12月3日最小という位相も一致



- 他の実験で再現せず、批判もあるがいまのところ誰も完全に否定できていない
- 引き続き様々な可能性が世界中で検討されている

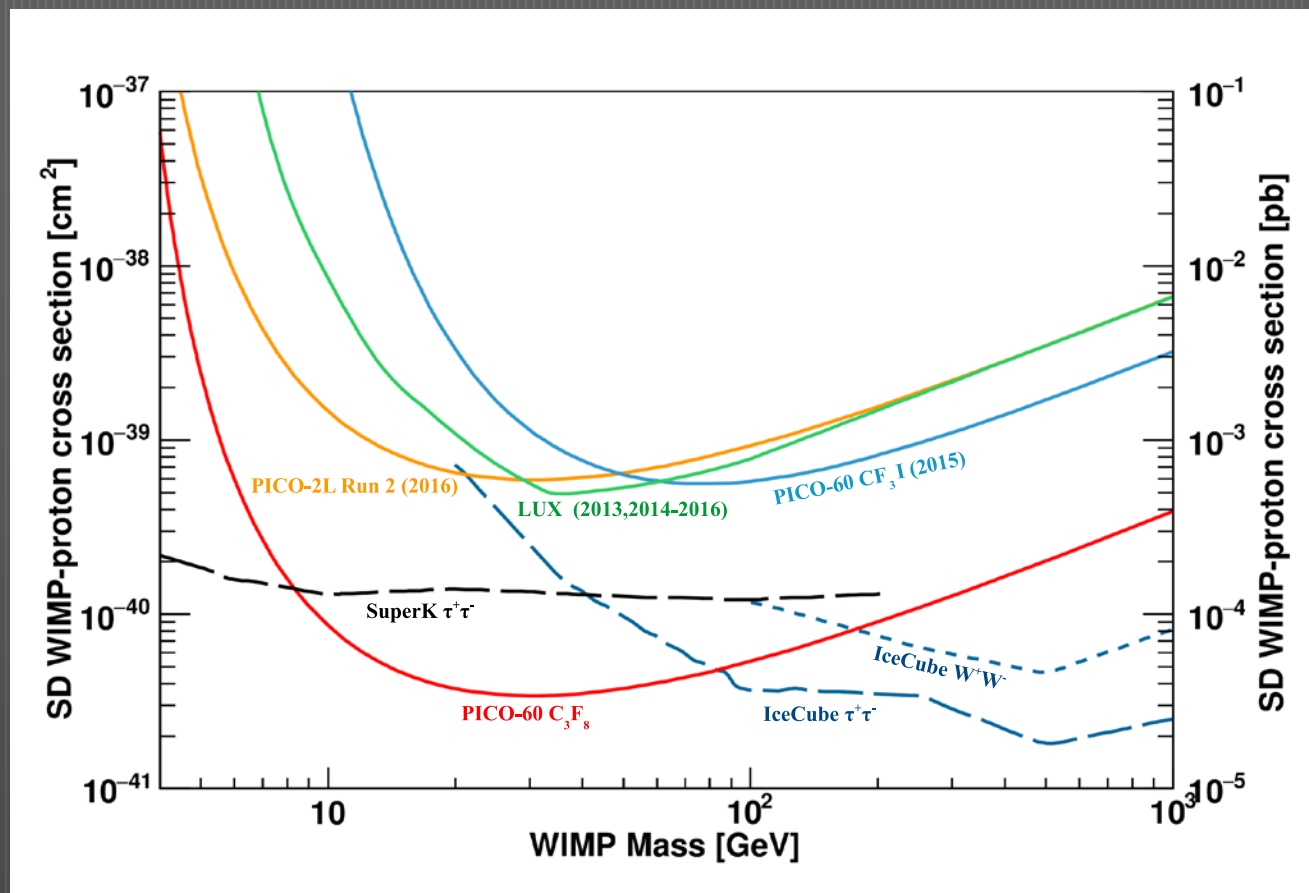
PICO60 (カナダ)

- 53Lの C_3F_8 bubble chamber
– 過熱状態の液体に粒子が入射して
できる泡をカメラで見る

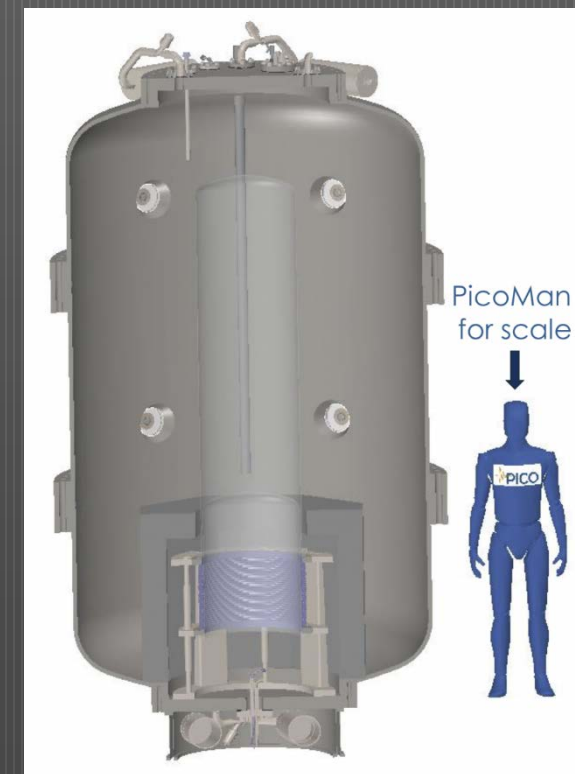
原子番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 1.00794																	2 He ヘリウム 4.0026
2	3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.01218												5 B ボロン 10.811	6 C 炭素 12.011	7 N 窒素 14.0064	8 O 酸素 15.9994	9 F フッ素 18.9984
3	11 Na ナトリウム 22.98976928	12 Mg マグネシウム 24.304											13 Al アルミニウム 26.9815386	14 Si シリコン 28.0855836	15 P リン 30.973762	16 S 硫黄 32.06	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.948
4	19 K カリウム 39.0983	20 Ca カルシウム 40.078	21 Sc スカンジウム 44.955912	22 Ti チタン 47.88	23 V バナジウム 50.9415	24 Cr クロム 51.9961	25 Mn マンガン 54.938	26 Fe 鉄 55.845	27 Co コバルト 58.933194	28 Ni ニッケル 58.6934	29 Cu 銅 63.546	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.723	32 Ge ゲルマニウム 72.630	33 As アセニウム 74.9216	34 Se セレン 78.96	35 Br 臭素 79.904	36 Kr クリプトン 83.798
5	37 Rb ルビジウム 85.4678	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.90584	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb タンタル 92.90638	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム [98]	44 Ru ルビジウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.9055	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.8682	48 Cd カドミウム 112.411	49 In インジウム 114.818	50 Sn スズ 118.710	51 Sb アンチモン 121.757	52 Te テルル 127.60	53 I ヨウ素 126.905	54 Xe キセノン 131.29
6	55 Cs セシウム 132.90545196	56 Ba バリウム 137.327	57 La ランタン 138.90473	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr プラセチウム 140.90765	60 Nd ネオジム 144.242	61 Pm プロメチウム [145]	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユークリウム 151.964	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.92534	66 Dy ジスプロシウム 162.50087	67 Ho ホウメイト 164.92932	68 Er エルビウム 167.259	69 Yb ytterbium 173.045	70 Yb ytterbium 173.045	71 Lu lutetium 174.967	72 Hf hafnium 178.49
7	73 Ta タンタル 180.94788	74 W タングステン 183.84	75 Re ロジウム 186.207	76 Os オスミウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.222	78 Pt プラチナ 195.083	79 Au 金 196.966569	80 Hg 水銀 200.5958	81 Tl タリウム 204.3833	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマuth 208.9804	84 Po ポロニウム [209]	85 At アスタチン [210]	86 Rn ラドン [222]	87 Fr フランシウム [223]	88 Ra ラジウム [226]	89 Ac アクチン [227]	90 Th タリウム 232.0377
8	91 Pa プロセチウム 231.036889	92 U ウラン 238.02891	93 Np ネプツニウム 237.048173	94 Pu プルトニウム 244.06422	95 Am アメリシウム 243.061381	96 Cm カリフォルニウム 247.070353	97 Bk バークリウム 247.070353	98 Cf カリフォルニウム 251.083288	99 Es エールビウム 252.083288	100 Fm フェルミウム 257.105285	101 Md メンデルシウム 258.105285	102 No ノボリウム 259.105285	103 Lr ローレンシウム 260.105285	104 Rf ローレンシウム 261.105285	105 Db ドブニウム 262.105285	106 Sg シグマ 263.105285	107 Bh ブハリウム 264.105285	108 Hs ハセニウム 265.105285
9	101 La ランタン 138.90473	102 Ce セリウム 140.12	103 Pr プラセチウム 140.90765	104 Nd ネオジム 144.242	105 Pm プロメチウム [145]	106 Sm サマリウム 150.36	107 Eu ユークリウム 151.964	108 Gd ガドリウム 157.25	109 Tb テルビウム 158.92534	110 Dy ジスプロシウム 162.50087	111 Ho ホウメイト 164.92932	112 Er エルビウム 167.259	113 Yb ytterbium 173.045	114 Lu lutetium 174.967	115 Hf hafnium 178.49	116 Ta タンタル 180.94788	117 W タングステン 183.84	118 Re ロジウム 186.207
10	111 La ランタン 138.90473	112 Ce セリウム 140.12	113 Pr プラセチウム 140.90765	114 Nd ネオジム 144.242	115 Pm プロメチウム [145]	116 Sm サマリウム 150.36	117 Eu ユークリウム 151.964	118 Gd ガドリウム 157.25	119 Tb テルビウム 158.92534	120 Dy ジスプロシウム 162.50087	121 Ho ホウメイト 164.92932	122 Er エルビウム 167.259	123 Yb ytterbium 173.045	124 Lu lutetium 174.967	125 Hf hafnium 178.49	126 Ta タンタル 180.94788	127 W タングステン 183.84	128 Re ロジウム 186.207



直接探索のSDで世界最高感度

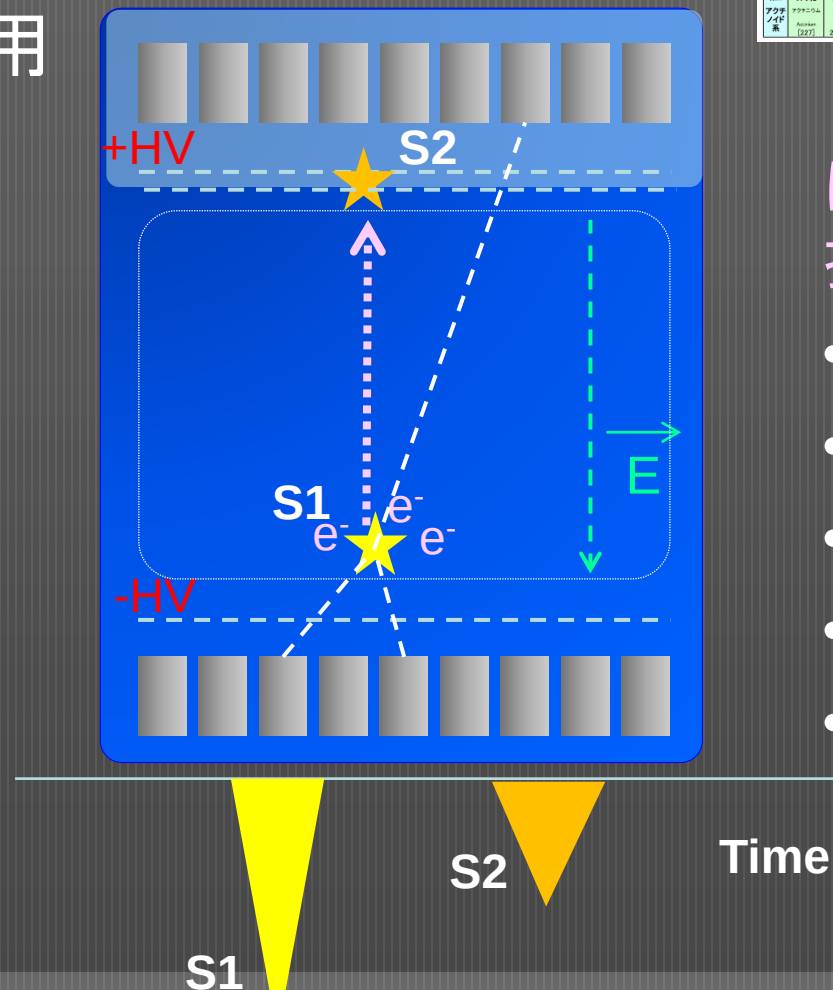
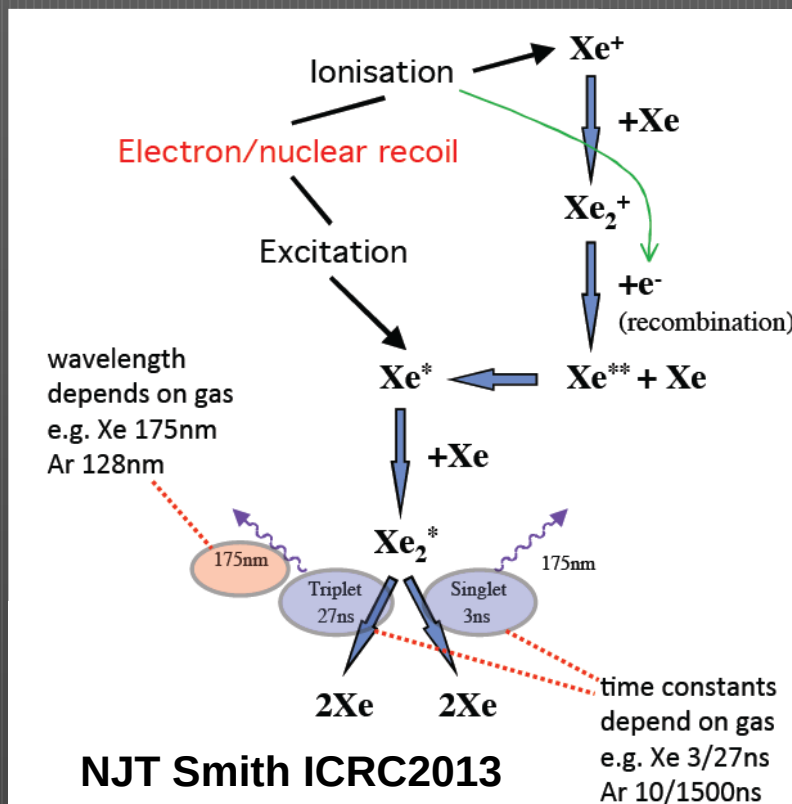


- 次世代
PICO500



XENON1T (イタリア)

- 最先端の2相式XeTPC “1T”だけど2ton
- 希ガスの特徴を最大限利用



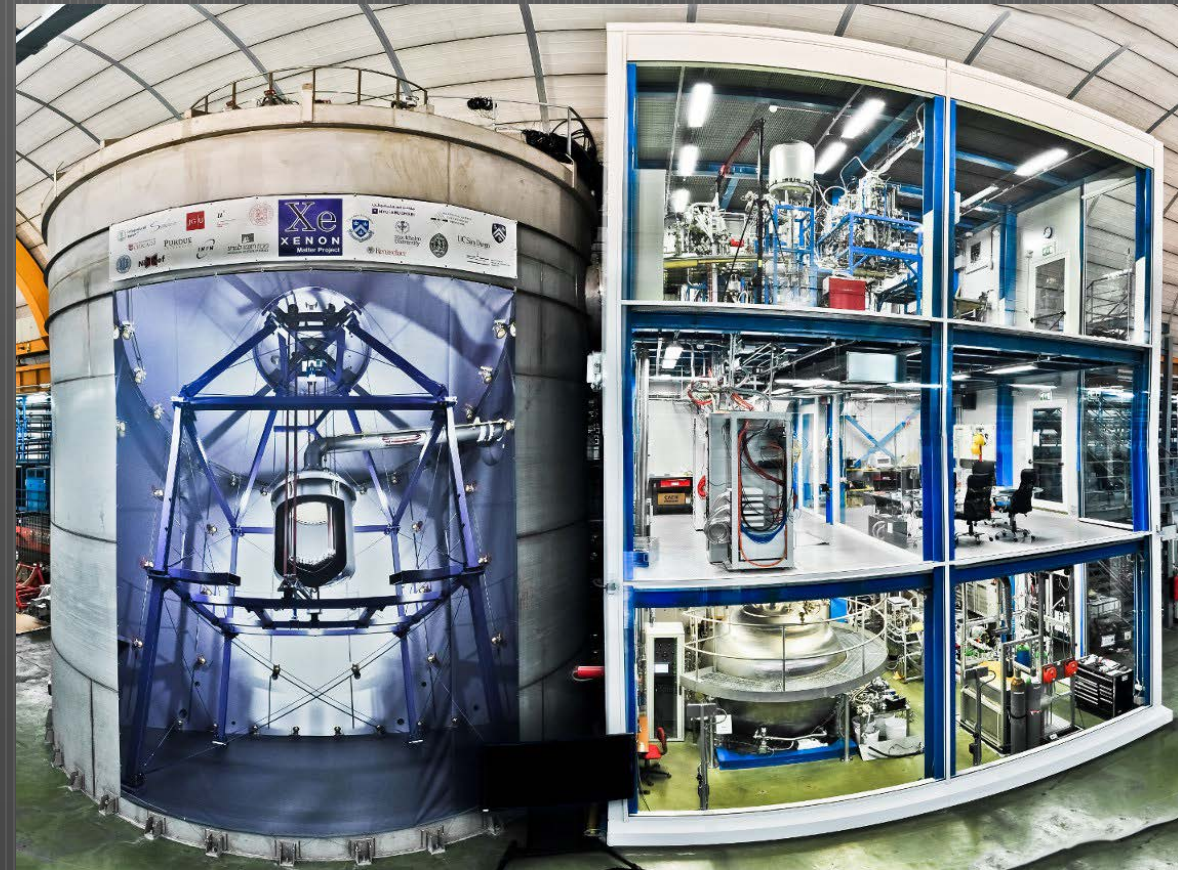
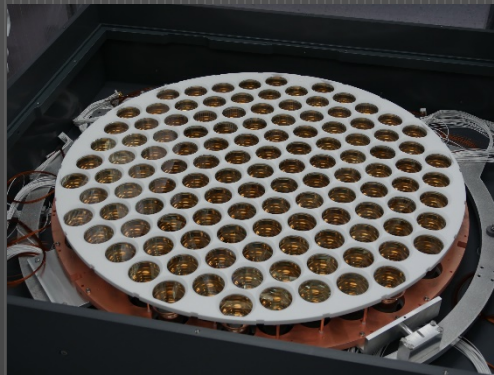
原子番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 1.00794	4 He ヘリウム 4.00260																2 Ne ネオン 20.1797
2	3 Li リチウム 6.941	6 Be ベリリウム 9.01218												9 B 硼素 10.81108	10 C 炭素 12.01098	11 N 窒素 14.00643	12 O 酸素 15.99904	13 F フッ素 18.99841
3	11 Na ナトリウム 22.98976	12 Mg マグネシウム 24.304											14 Al アルミニウム 26.98153	15 Si シリコン 28.08558	16 P リン 30.97376	17 S 硫黄 32.06	18 Cl 塩素 35.453	19 Ar アルゴン 39.948
4	19 K カリウム 39.0983	20 Ca カルシウム 40.078	21 Sc スカンジウム 44.9559	22 Ti チタン 47.88	23 V バナジウム 50.9415	24 Cr クロム 51.9961	25 Mn マンガン 54.938	26 Fe 鉄 55.845	27 Co コバルト 58.9332	28 Ni ニッケル 58.6934	29 Cu 銅 63.546	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.723	32 Ge ゲルマニウム 72.63	33 As アセニウム 74.9216	34 Se セレン 78.96	35 Br 臭素 79.904	36 Kr クリプトン 83.798
5	37 Rb ルビジウム 85.4678	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.9058	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb タンタル 92.9064	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム 98	44 Ru ルビジウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.9055	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.8682	48 Cd カドミウム 112.411	49 In インジウム 114.818	50 Sn スズ 118.710	51 Sb アンチモン 121.757	52 Te テルル 127.60	53 I ヨード 126.905	54 Xe キセノン 131.29
6	55 Cs セシウム 132.905	56 Ba バリウム 137.327	57 La ランタニウム 138.905	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr プラセチウム 140.907	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム 145	62 Sm セミウム 150.36	63 Eu ユークリウム 151.964	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.925	66 Dy ジスプロシウム 162.50	67 Ho ホウメチウム 164.930	68 Er エルビウム 167.259	69 Tm テュリウム 168.934	70 Yb ytterbium 173.054	71 Lu ルテチウム 174.967	72 Hf ハフニウム 178.49
7	73 Ta タンタル 180.948	74 W モリブデン 183.84	75 Re ロジウム 186.207	76 Os オスミウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.222	78 Pt プラチナ 195.084	79 Au 金 196.967	80 Hg 水銀 200.596	81 Tl タリウム 204.384	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 208.980	84 Po ポロニウム 209	85 At アスタチン 210	86 Rn ラドン 222	87 Fr フランシウム 223	88 Ra ラジウム 226	89 Ac アクチン 227	90 Th タリウム 232.038

ほぼすべての性能を持つ最強検出器

- 低BG
- 低閾値
- 大質量化容易
- 位置感度
- 粒子識別

XENON1T

- 全3.2tのキセノン



最新結果

- 世界最低BGLレベル ~82 event/tone/year/keV

WIMP Search: Results

Component	Events
ER	627
Neutron	1.43
AC	0.47
Surface	106
WIMP	3.56

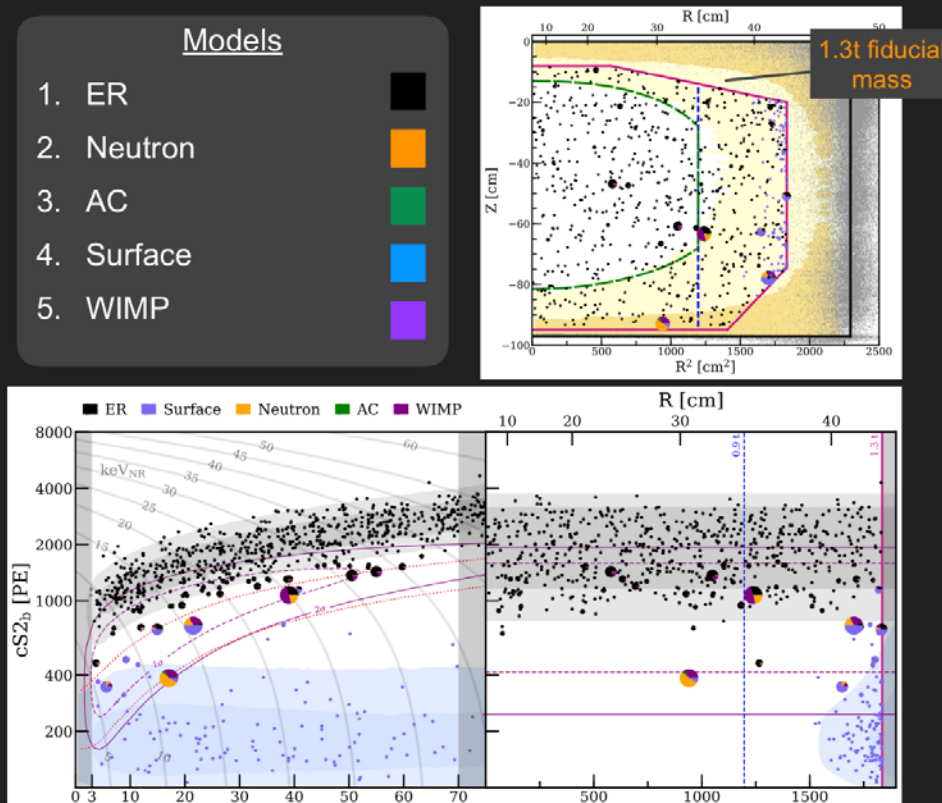
Models

- ER
- Neutron
- AC
- Surface
- WIMP

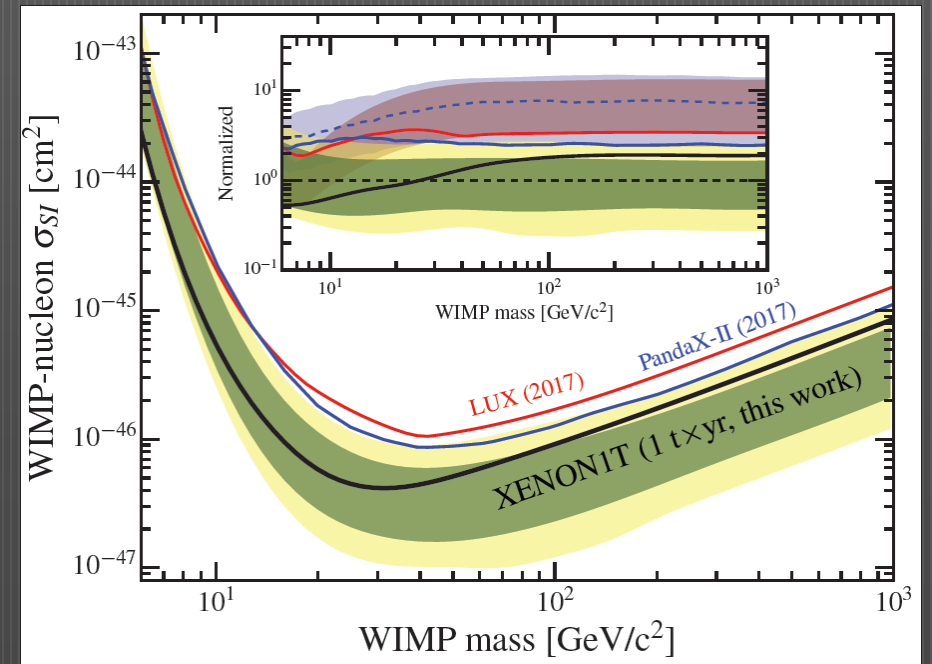
Best-fit values for 200 GeV WIMP. Does not mean we detected 3.5 WIMPs

Inference

- Unbinned extended profile likelihood
- "Probabilities" assigned to each event for each model

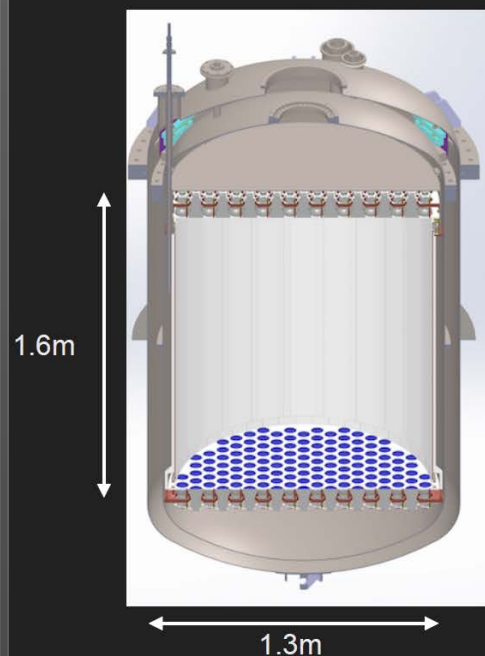


- Best fitは3.56 個のWIMPだが発見は主張していない(出来ない)
- SIで世界最高感度



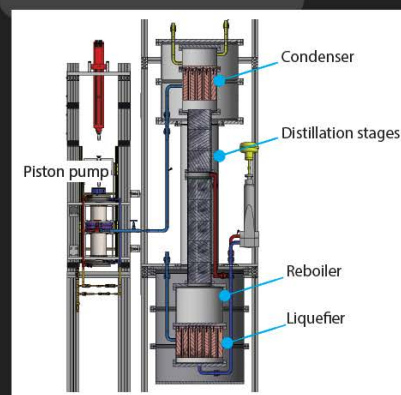
アップグレード計画 XENONnT

- 2017年12月より宇宙線研の教員も参加
– 2019年中に開始予定



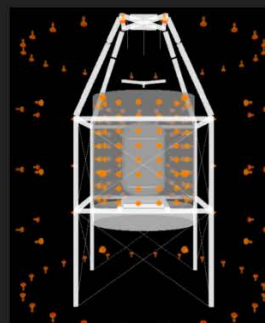
- 5.9t active mass
- 494 PMTs
- 200 V/cm drift field
- 8kV/cm extraction field

Radon distillation column
– Already tested successfully in 1T

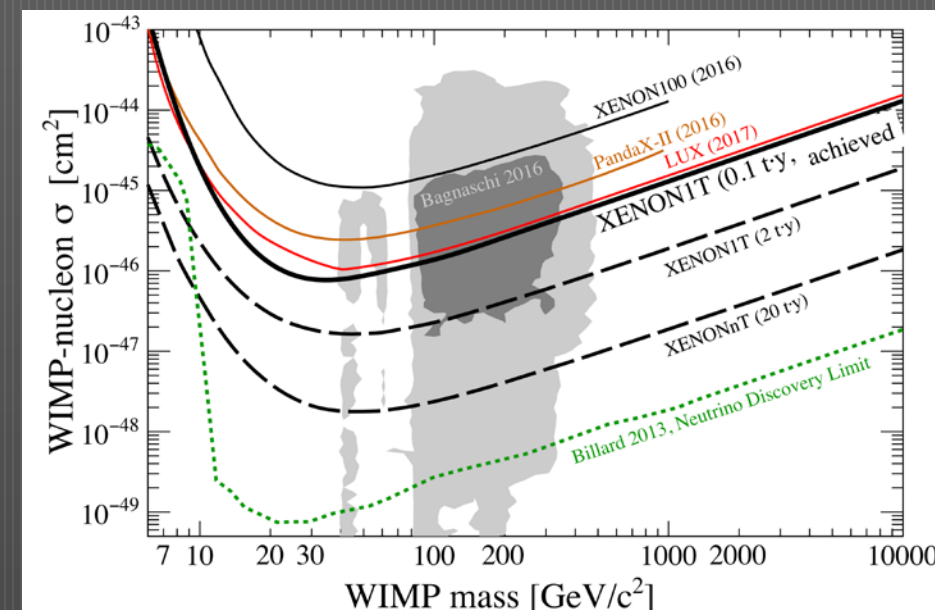


XENONnT Upgrades

1. Larger TPC
2. Further x10 reduction in background
 - ▶ Rn distillation column for Pb214
 - ▶ Neutron veto



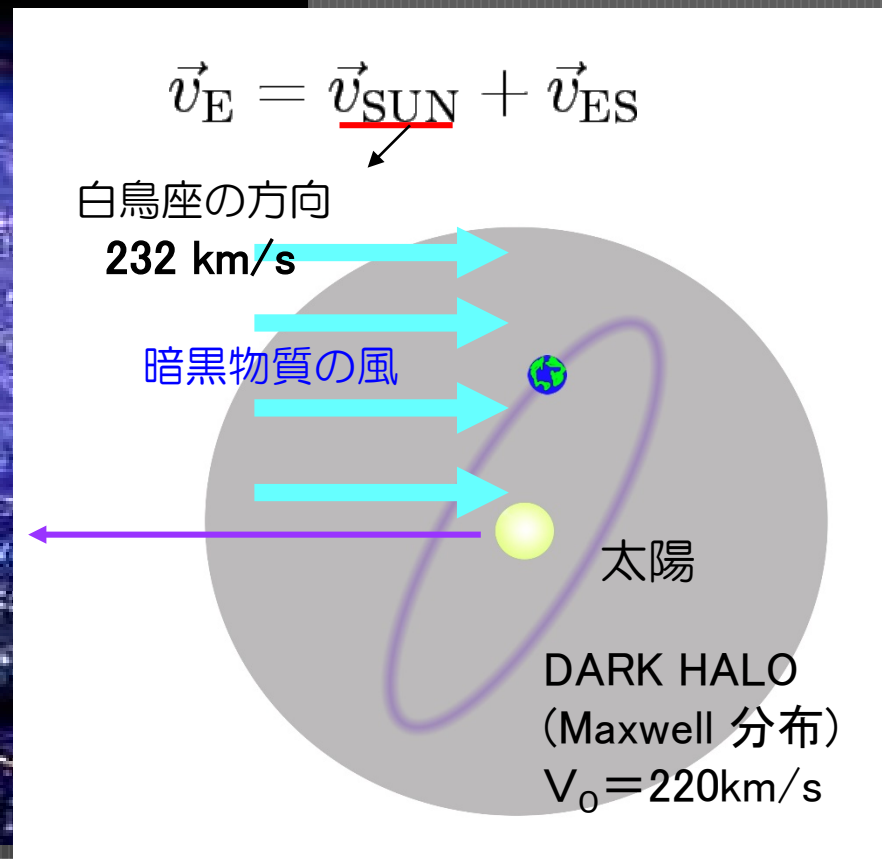
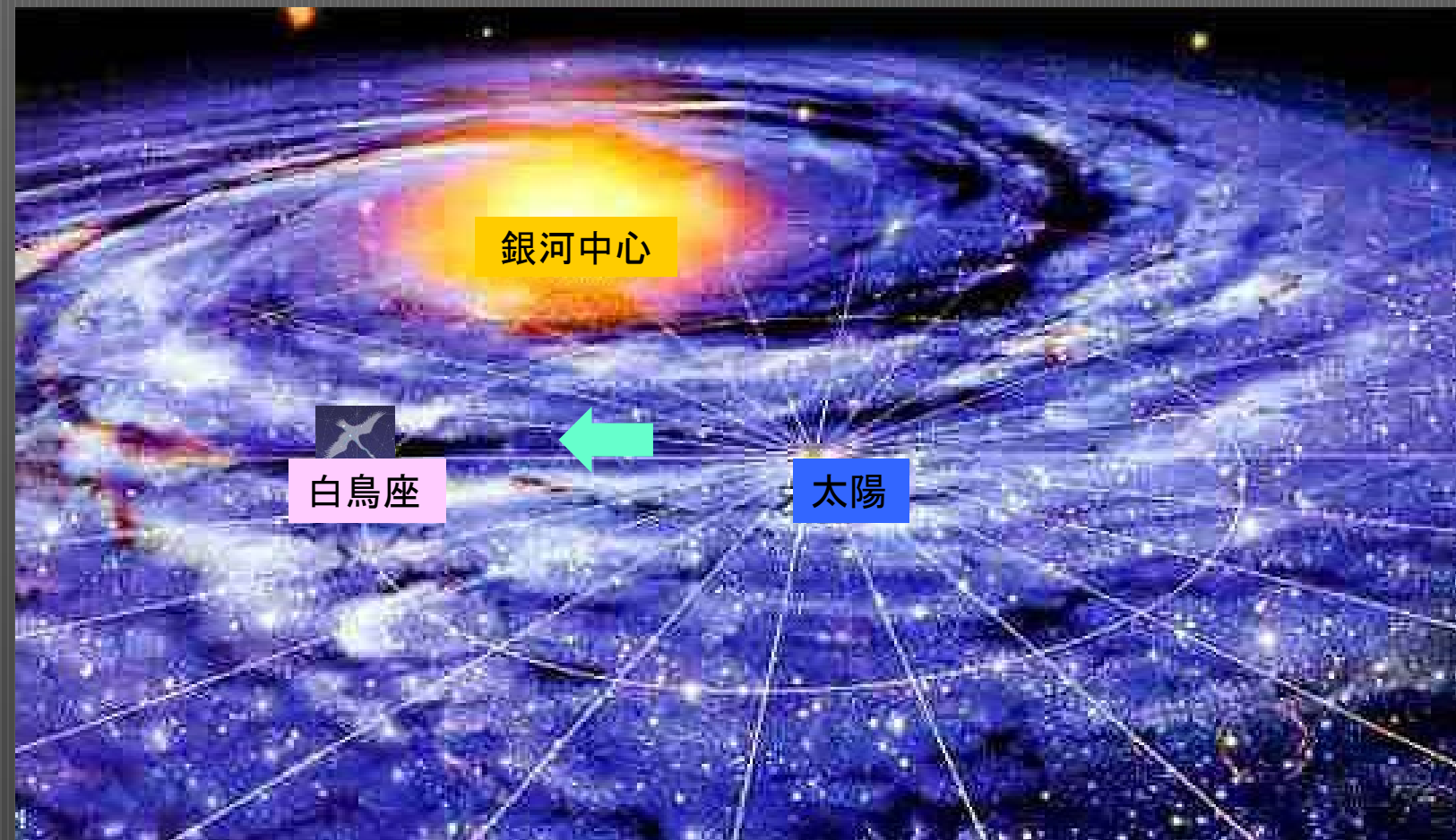
- 0.2% Gd-doped water
- < 1 neutron per 20 t*yr exposure



ライバルのLZ(アメリカ)は10tonキセノンで
2020年開始予定

暗黒物質の風を直接とらえたい

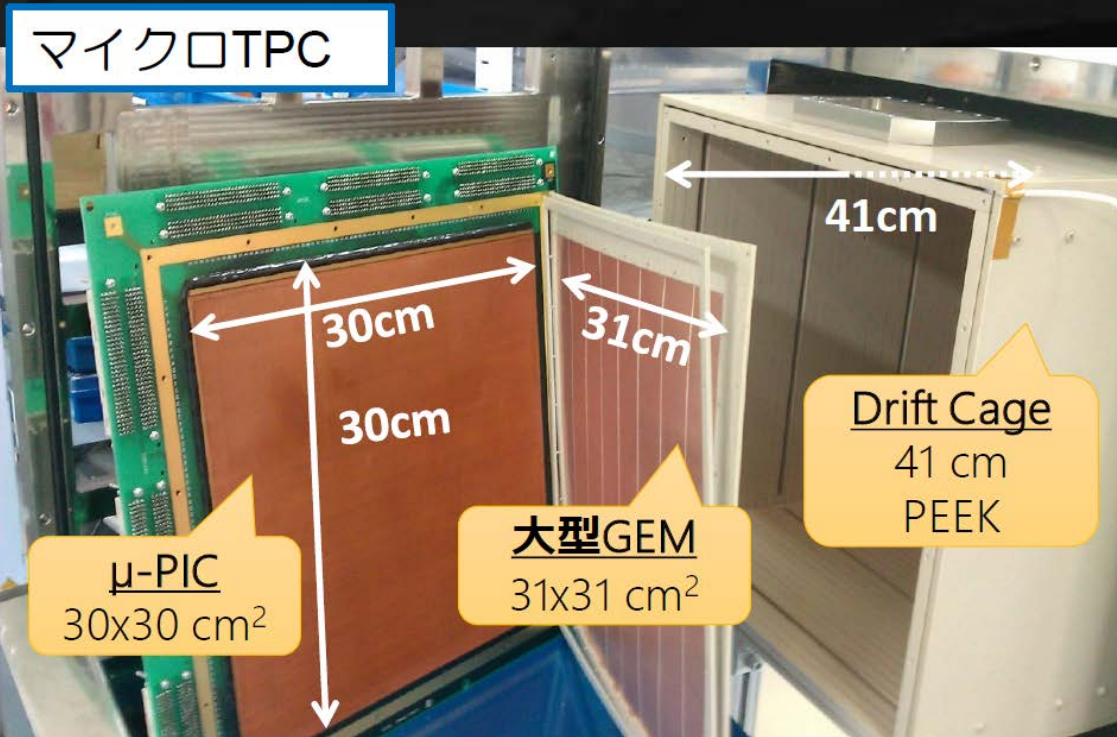
- より確実な信号である「方向」測定を目指すR&D



NEWAGE(日本)

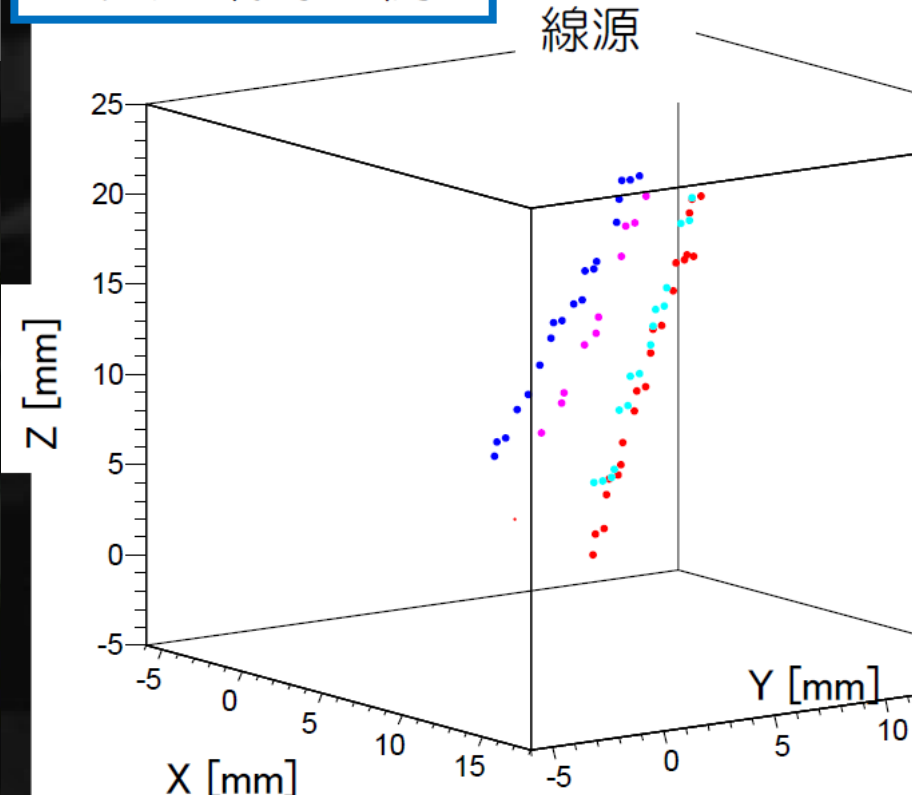
- SF_6 ガスを用いた3次元飛跡検出器:電子霧箱
 - 神戸大(+京大、宇宙線研)
 - 400mmピッチでの読み出し

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogen 1.00794	2 He Helium 4.00260																
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218																
5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.0064	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984	10 Ne Neon 20.1798												
11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.304	13 Al Aluminum 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855836	15 P Phosphorus 30.973761998	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.948										
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933194	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.9216	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90584	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.90545196	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.9047	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium 144.9127	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50014	67 Ho Holmium 164.930329	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93048	70 Yb Ytterbium 173.054688	71 Lu Lutetium 174.967	
72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.083	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.9804	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon [222]	87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium [226]	89 Ac Actinium [227]
89 Th Thorium 232.0377	90 Pa Protactinium 231.036888	91 U Uranium 238.02891	92 Np Neptunium 237.048173	93 Pu Plutonium 244.0642	94 Am Americium [243]	95 Cm Curium [247]	96 Bk Berkelium [247]	97 Cf Californium [251]	98 Es Einsteinium [252]	99 Fm Fermium [257]	100 Md Mendelevium [258]	101 No Nobelium [259]	102 Lr Lawrencium [260]				

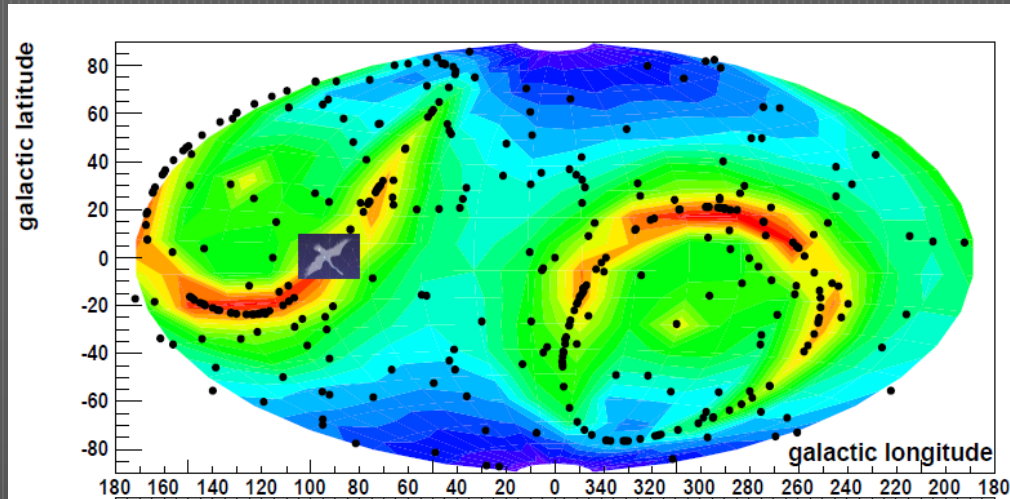


位置感度検出器
の極限

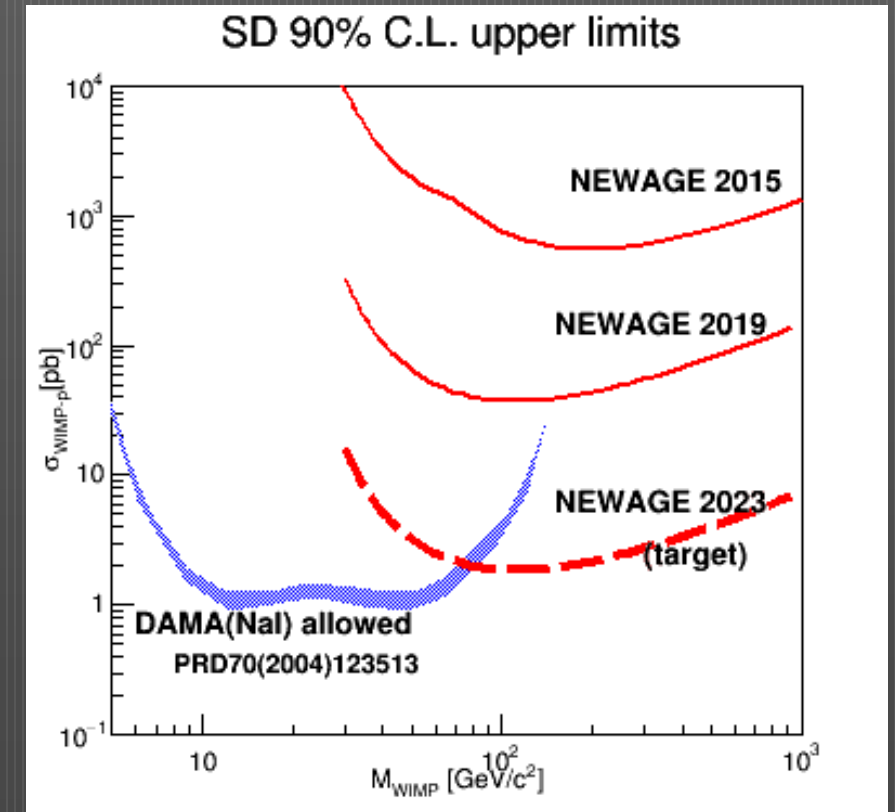
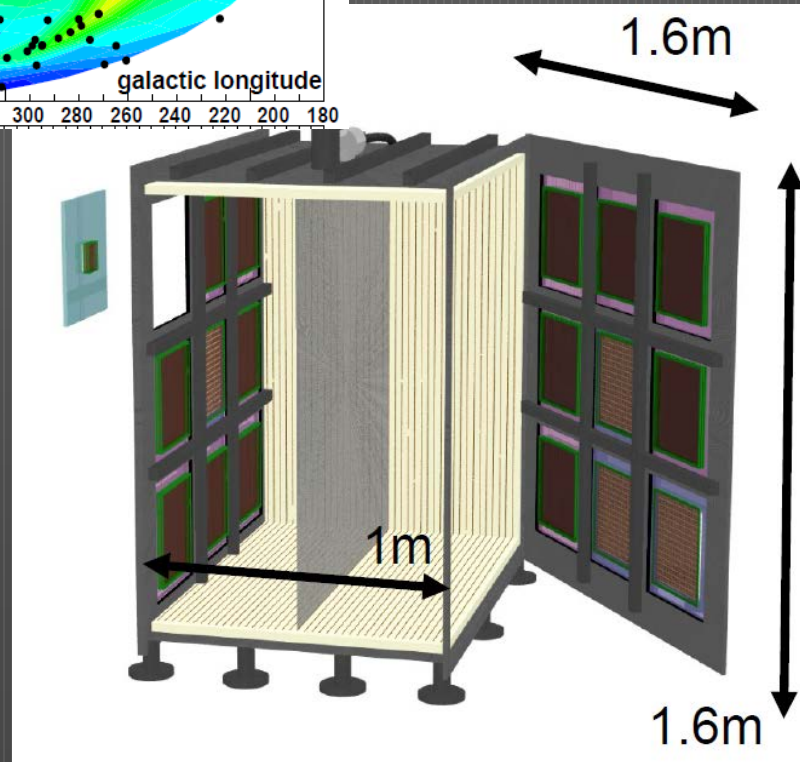
三次元飛跡の例



方向感度でDAMA/LIBRAを検証



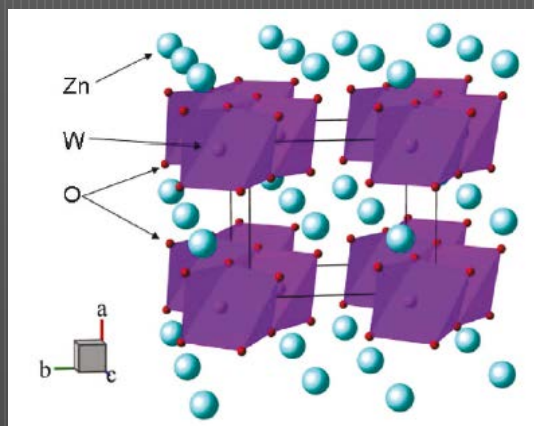
- イベントのSky mapが得られる!
- 1m3サイズの検出器を立ち上げ中



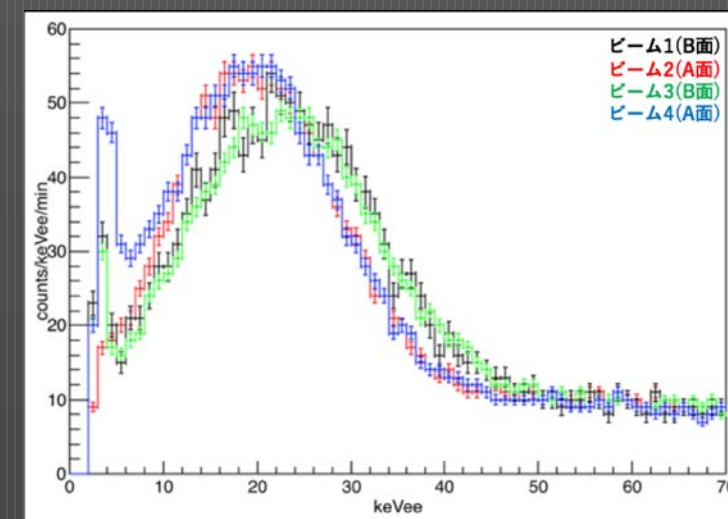
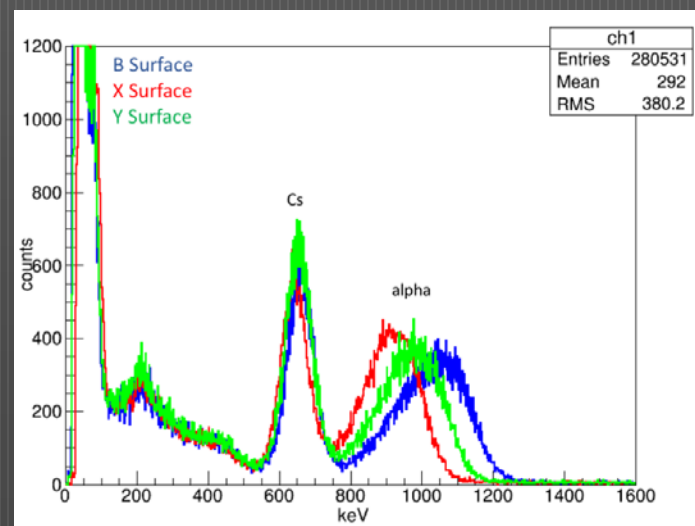
ZnWO₄(最近の私)

- 発光量が粒子の入射方向で変化する結晶
 - 宇宙線研、東北大、韓国IBS
 - 単斜晶系のシンチレーター

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogen 1.00794	2 He Helium 4.00260																
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218																
5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.0064	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984	10 Ne Neon 20.1798												
11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.304																
13 Al Aluminum 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855836	15 P Phosphorus 30.973761998	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.948												
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955912	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.9332	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.63	33 As Arsenic 74.9216	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90584	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium [98]	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.9076	47 Ag Silver 107.8642	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.90545196	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.9047	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50087	67 Ho Holmium 164.92732	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93486	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	72 Hf Hafnium 178.49
73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.083	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.5958	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.9804	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon [222]	87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium [226]	89 Ac Actinium [227]	90 Th Thorium 232.0377
91 Pa Protactinium 231.036888	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium 237.048173	94 Pu Plutonium 244.0642	95 Am Americium [243]	96 Cm Curium [247]	97 Bk Berkelium [247]	98 Cf Californium [251]	99 Es Einsteinium [252]	100 Fm Fermium [257]	101 Md Mendelevium [258]	102 No Nobelium [259]	103 Lr Lawrencium [260]	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [277]
109 Me Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [271]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [284]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [288]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]								



α線や中性子に対して入射方向によって発光量が異なることを確認
 ~8%程度
 γ線とα線に対する応答
 中性子に対する応答



どう使うか 工夫次第!

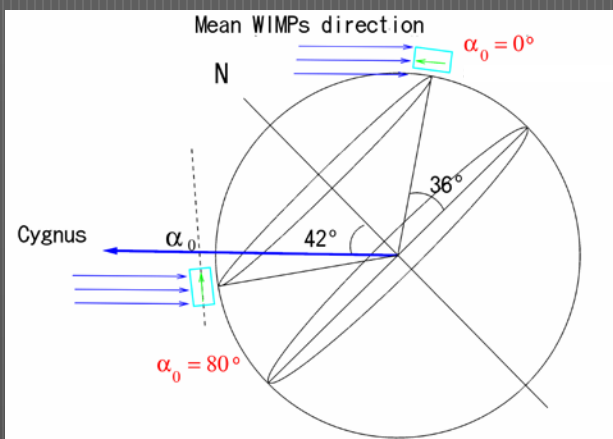
1.ただ置いておく

2.冷やす

極低温熱量計型検出器

photonとphononの同時測定

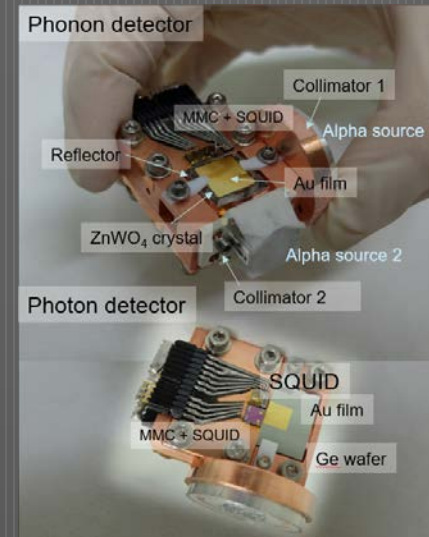
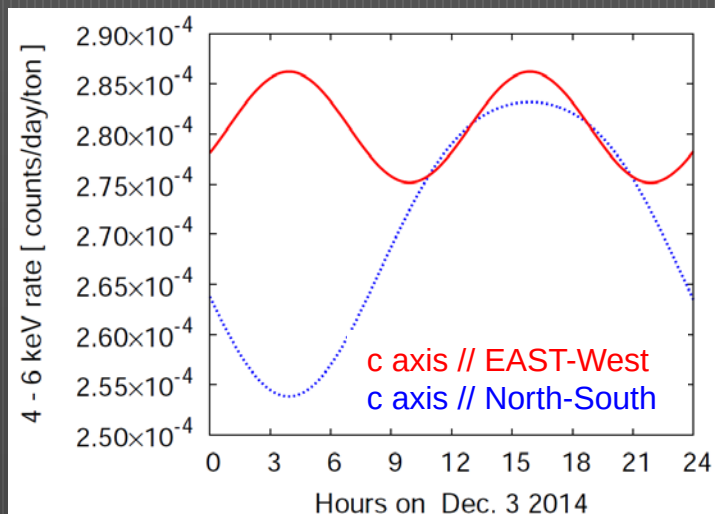
熱として全エネルギーを測定し、発光量も測定できれば入射方向情報得られる



10ton位あれば日変動が見れる

>> 季節変動

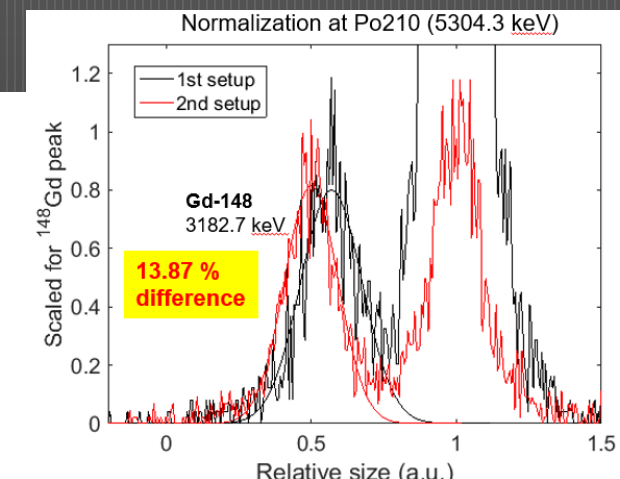
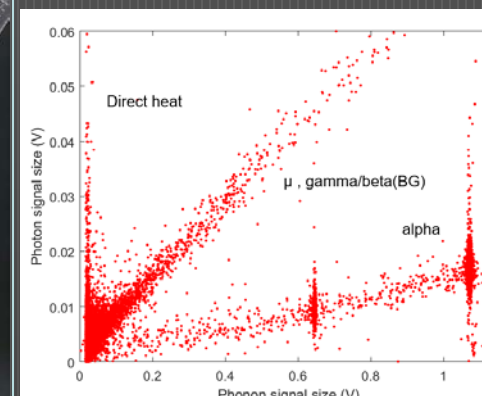
~1kgの高純度結晶用意済



核断熱消磁により40mKに冷やす

粒子識別能力

発光量も増え、異方性も増す?



暗黒物質の直接検出をめざす実験

- 暗黒物質があることは確実
- それが何であるかは全く不明
 - 暗黒物質がSUSY WIMPだと思っている人がまだ多いが、それにとられず、様々な可能性が議論されるようになってきている。
- 発見を目指す熾烈な実験の競争がなされている。
 - だんだん大型化してきて、10年後には世界で協力して実験を行わざるを得ないかもしれない(高エネルギー物理・加速器スタイル)
- しかしまだまだ、アイデアや工夫が必要で、大型化だけでなくR&Dが活発に行われている。

暗黒物質直接探索実験

大切な見えないものを探して
つかまえる
究極の実験