



暗黒物質をつかまえる 究極の実験の話

関谷洋之

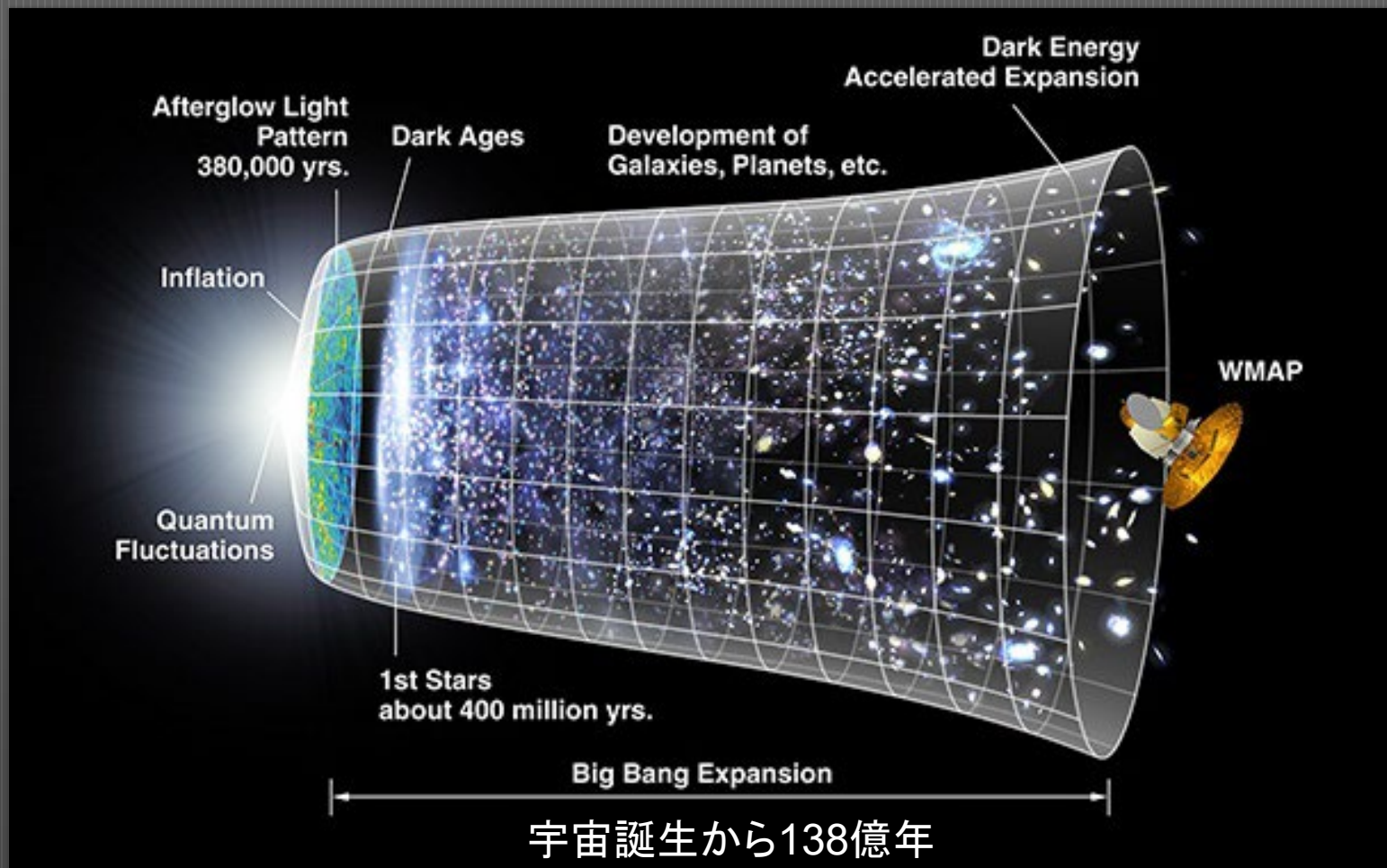
宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設
カブリ数物連携宇宙研究機構神岡分室

2024年3月7日

宇宙・素粒子スプリングスクール

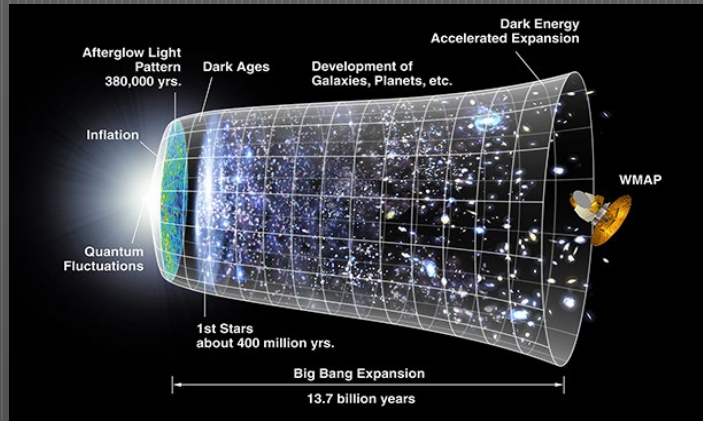
宇宙物理学の標準理論

- 138億年前のBig Bangで始まり、いまでも膨張をつづけている



ものがあるのに膨張し続ける？

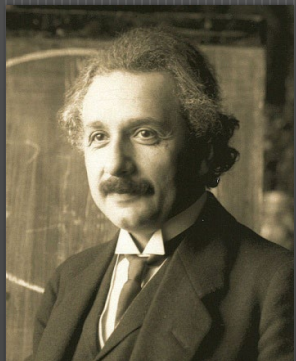
- アインシュタイン方程式(一般相対論) 安定か縮む、解しかない



万有引力定数

すべての物質

$$E=mc^2$$



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

宇宙の入れ物
時空間

中身
物質、エネルギー

修正された方程式

- “つかえ棒”宇宙定数を入れた

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

時空の世界

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

万有斥力？真空のエネルギー？

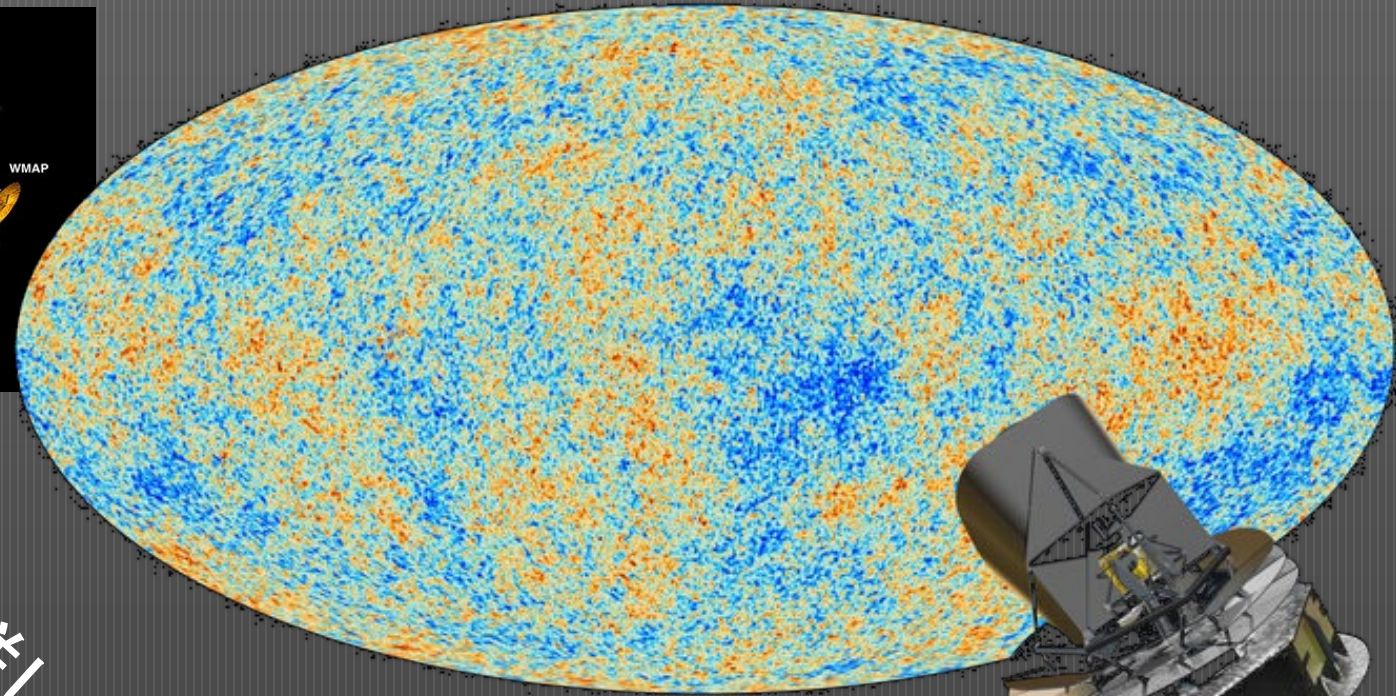
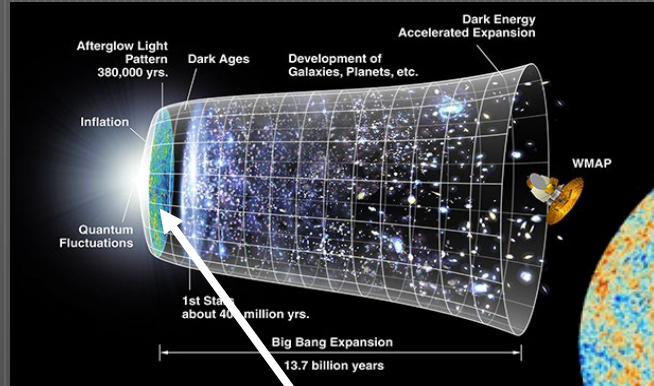
物質の世界

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？

宇宙物理学の標準理論

- Cosmic Microwave Backgroundのゆらぎ
 - どんな性質のものがどれくらいの割合あるかが分かる

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



ゆらぎのpower spectrum

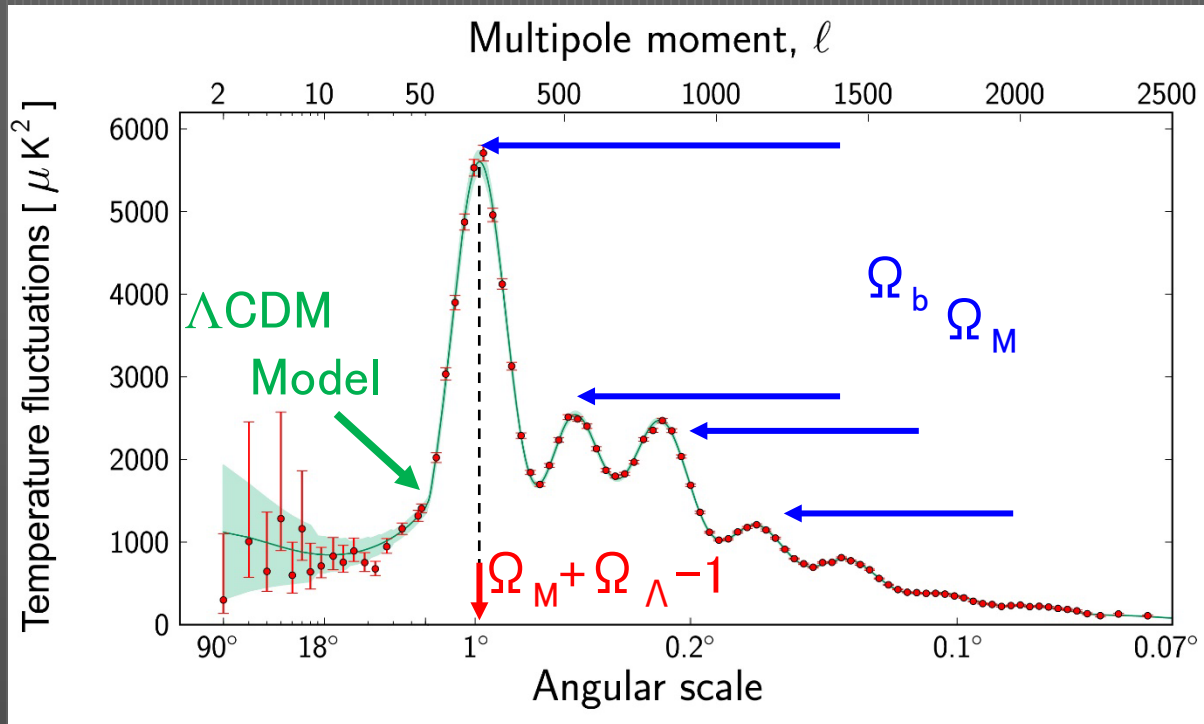
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

ここを詳しく見る

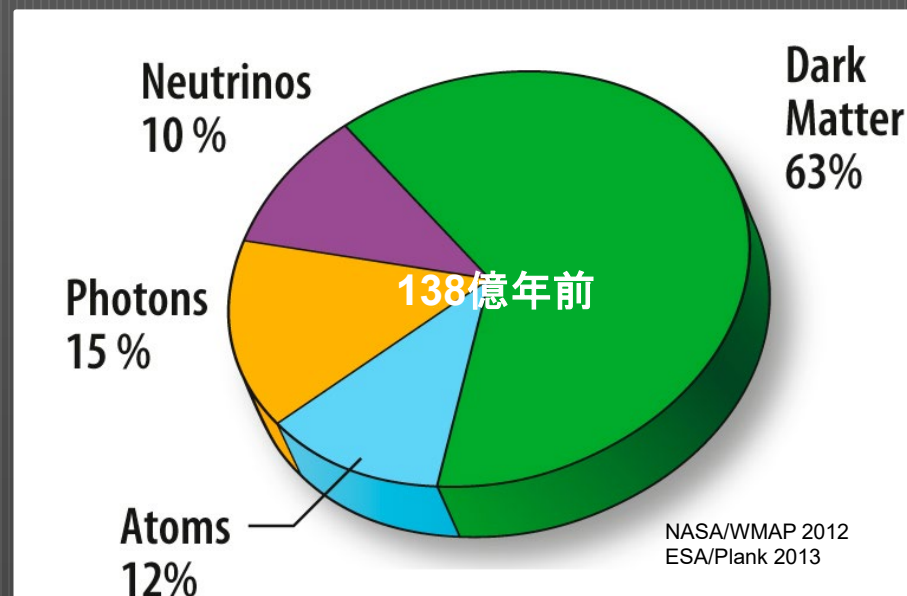
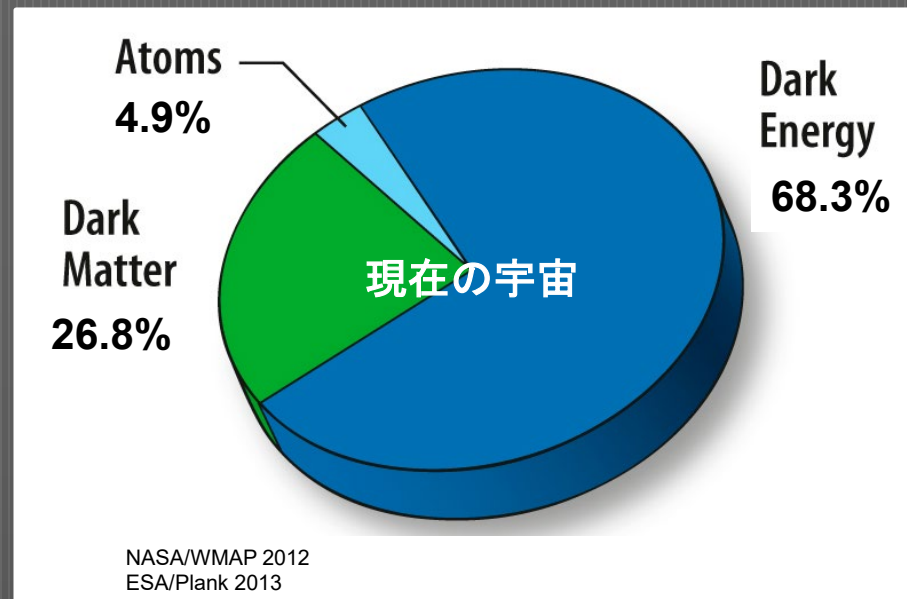
欧州宇宙機関 プランク衛星

Λ CDM Model

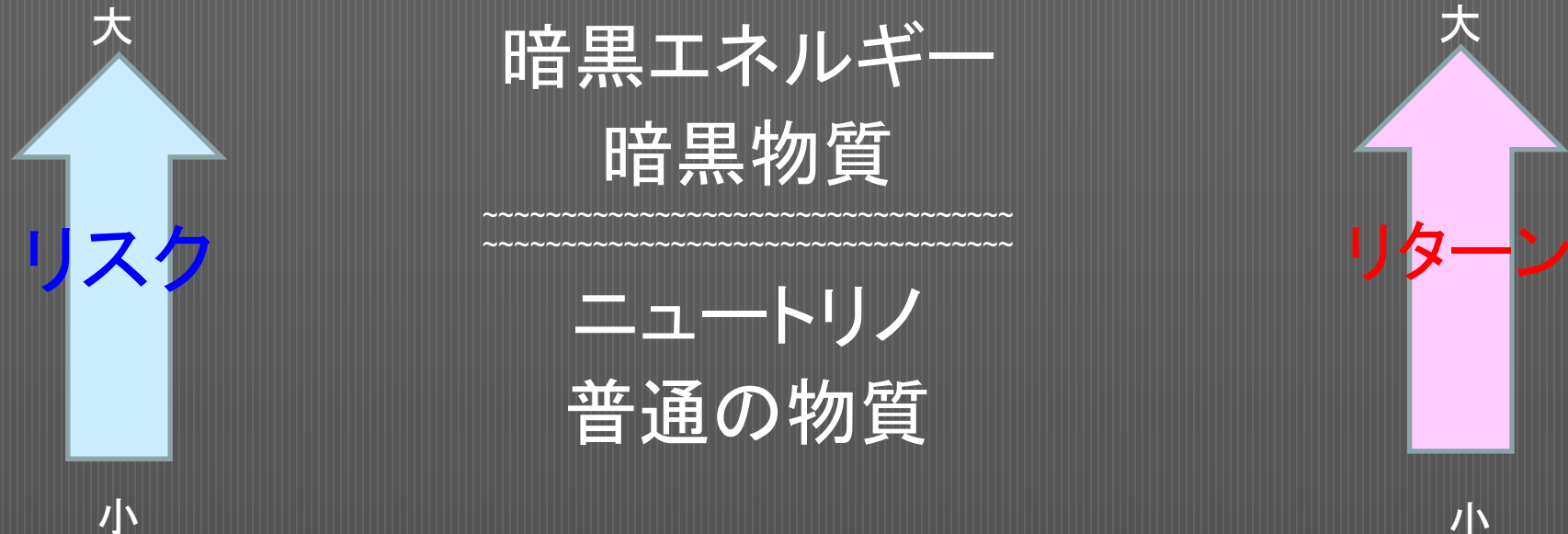
よくわからないものからできている



- 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



研究スタイル 理想と現実



※リスク大でもみんな存在することは信じている

※リターン小でもノーベル賞位ならまだ(むしろ、すぐ)いける

- **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

現在「カミオカンデ」が何に挑戦しているのか

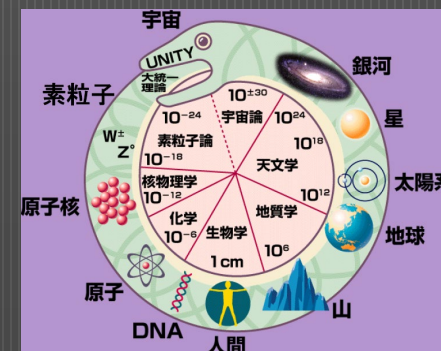
水をためて、光センサーで覆うだけでニュートリノを観測できる検出器
さらに素粒子と宇宙の理解を深めたい

カミオカンデだけでなく、巨大加速器や大型望遠鏡による観測などさまざまなアプローチあるし、
これまで「カミオカンデ」が具体的に立てた目標とこれまで得られた成果も一致していませんが、

- 「物質(素粒子)」がどうして存在しているのか ハイパーカミオカンデ(HK)
- 「元素(原子)」がどうして存在しているのか スーパーカミオカンデ(SK)

→ なぜ宇宙ができて存在しているのか

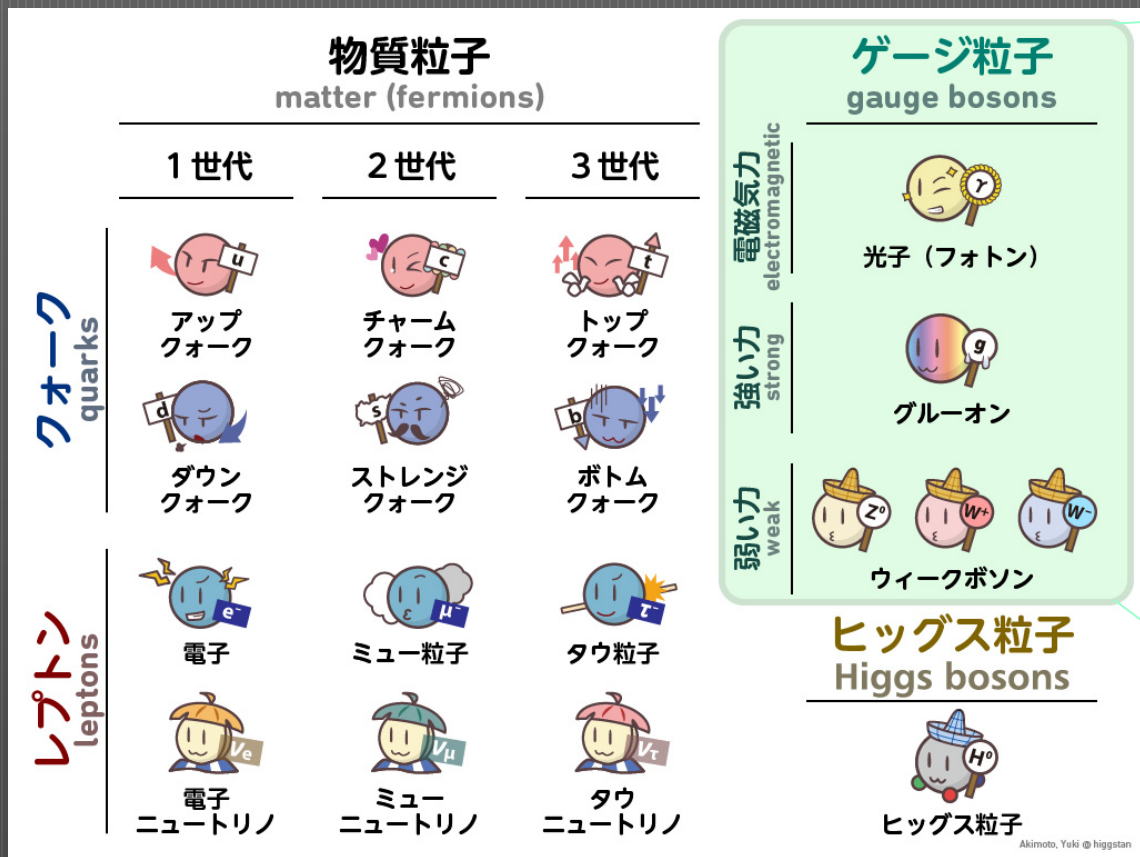
暗黒物質探索と最終目標は一緒
宇宙線研のプロジェクトも全部一緒だ！



素粒子物理学の標準理論 未完成のパズル

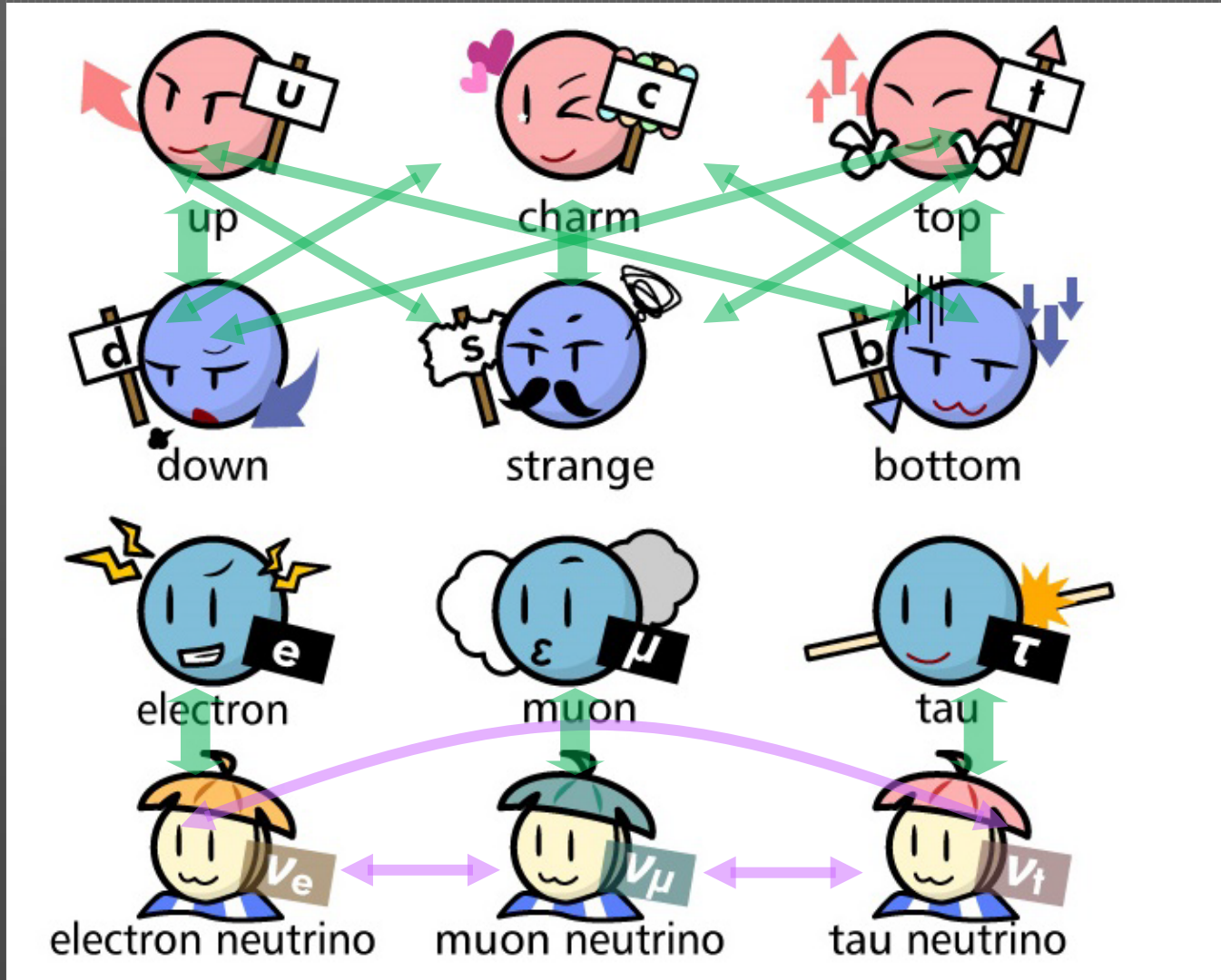
世の中すべてが粒子

「力」の伝達も粒子



- ◇ 量子力学や相対性理論を取り込み、ほとんどすべての現象が説明できる優れた理論だが、説明できないことも分かっている
- ◇ 究極の理論を目指すのが素粒子物理学

素粒子の変換のルール(弱い力が主役)

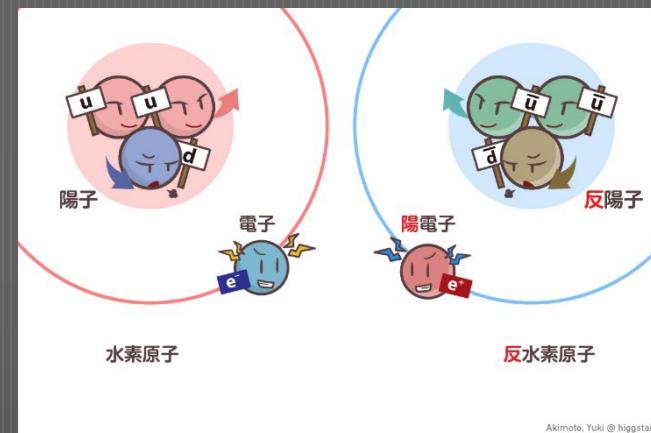


標準理論で説明できないもの
(標準理論の限界を示す)
スーパーカミオカンデの発見
「ニュートリノ振動」
→ノーベル賞



反物質について

- ◇ 電荷が逆なだけで重さとか他は全く一緒
- ◇ 全部逆の反物質の宇宙ができてよかったはず



	電荷 Charge	世代 Generation		
		I	II	III
クォーク Quarks	スピ Spin			
	$+2/3$			
	$-1/3$			
レプトン Leptons	-1			
	0			
	$1/2$			
	$1/2$			

『物質』

	電荷 Charge	世代 Generation		
		I	II	III
反クォーク Quarks	スピ Spin			
	$-2/3$			
	$1/3$			
反レプトン Leptons	1			
	0			
	$1/2$			
	$1/2$			

『反物質』

ミューニュートリノと反ミューニュートリノを作って 茨城県東海村からSKまで295km飛ばしてニュートリノ振動を比べると



2020年4月16日のNature



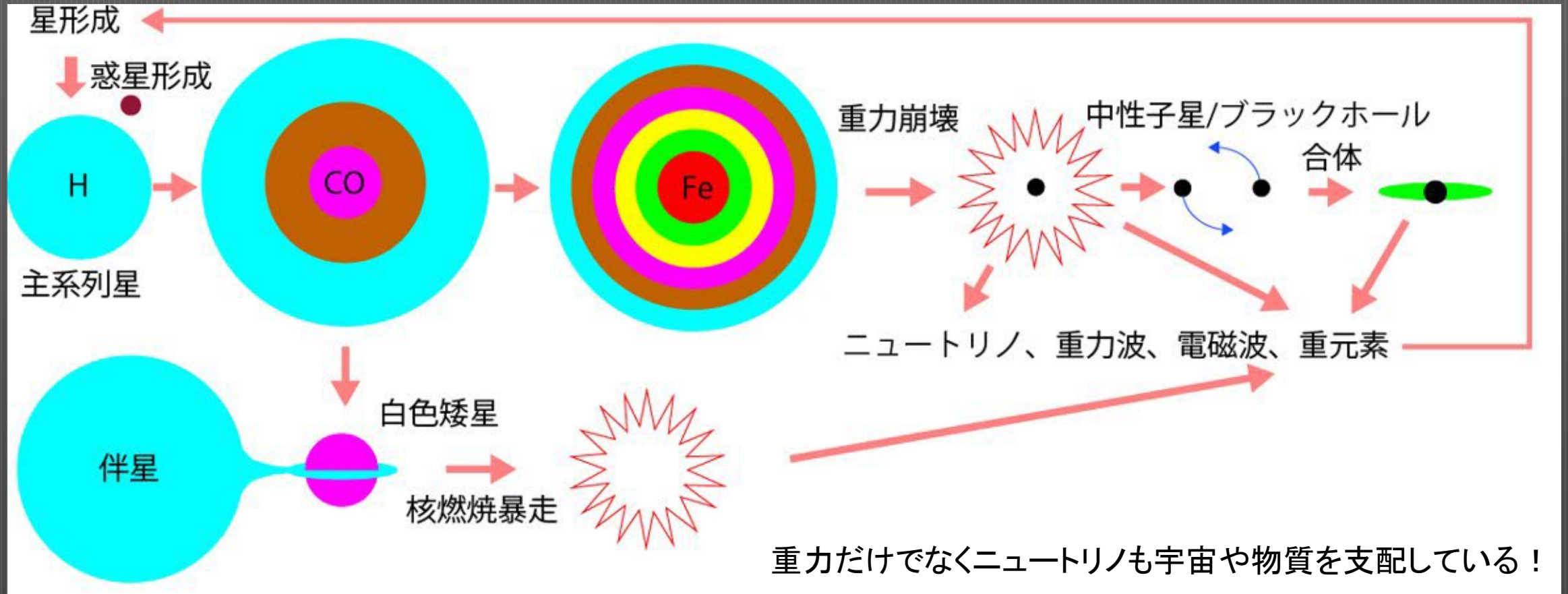
- CP対称性が破れていないとした場合の予想には合わない！
- ニュートリノ変わりやすくて、反ニュートリノは変わりにくいようだ。
- 物質と反物質の違いが詳しくみえてきたのかもしれない。
- もっと数多く調べないと。。。
スーパーカミオカンデでは小さすぎる

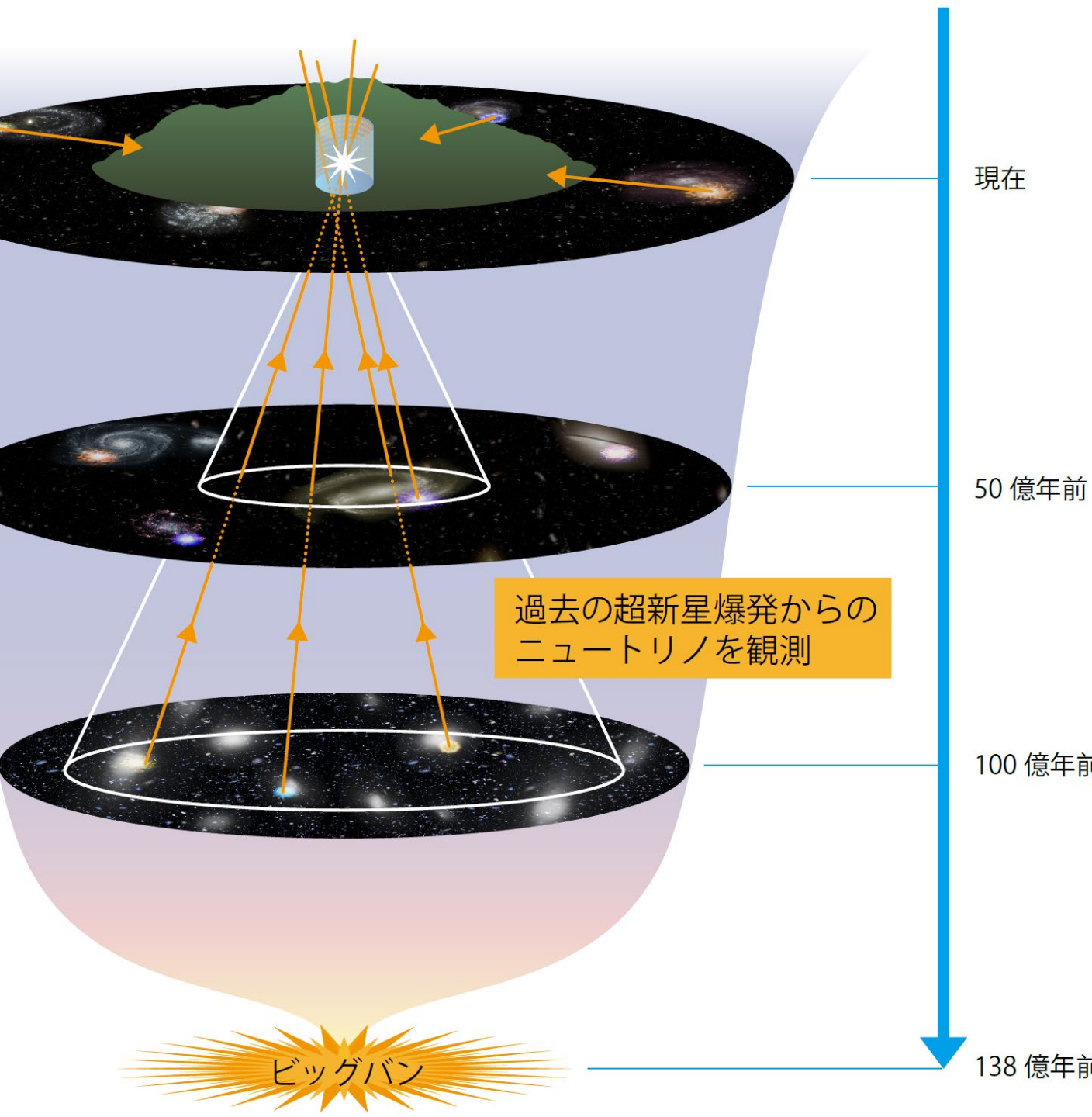
→ハイパーカミオカンデ

ブラックホールや中性子星連星だってもとは超新星

- とにかく重力崩壊型超新星爆発が先に起きないと始まらない！
 - 超新星爆発(重力+ニュートリノが引き起こす)の歴史を調べる重要性
 - 爆発エネルギーの99%はニュートリノが持ち出す

H.Suzuki





超新星背景ニュートリノ

- 宇宙には 10^{22-23} 個の恒星があって、そのうち現時点では 10^{17} 個の超新星爆発からのニュートリノが蓄積していると考えられている
- このニュートリノは、身の回りを 1000 個/cm³/sで通り抜けているでも見つからないそして見つからないとよい
- 太陽ニュートリノ(電子ニュートリノ)は 1 兆個/cm³/s
- 反電子ニュートリノを探すとよい。
- SK(水)では電子ニュートリノと反電子ニュートリノが区別つかない
- 超新星背景ニュートリノを観測すれば宇宙の初めからの元素合成の歴史を探ることが出来る！

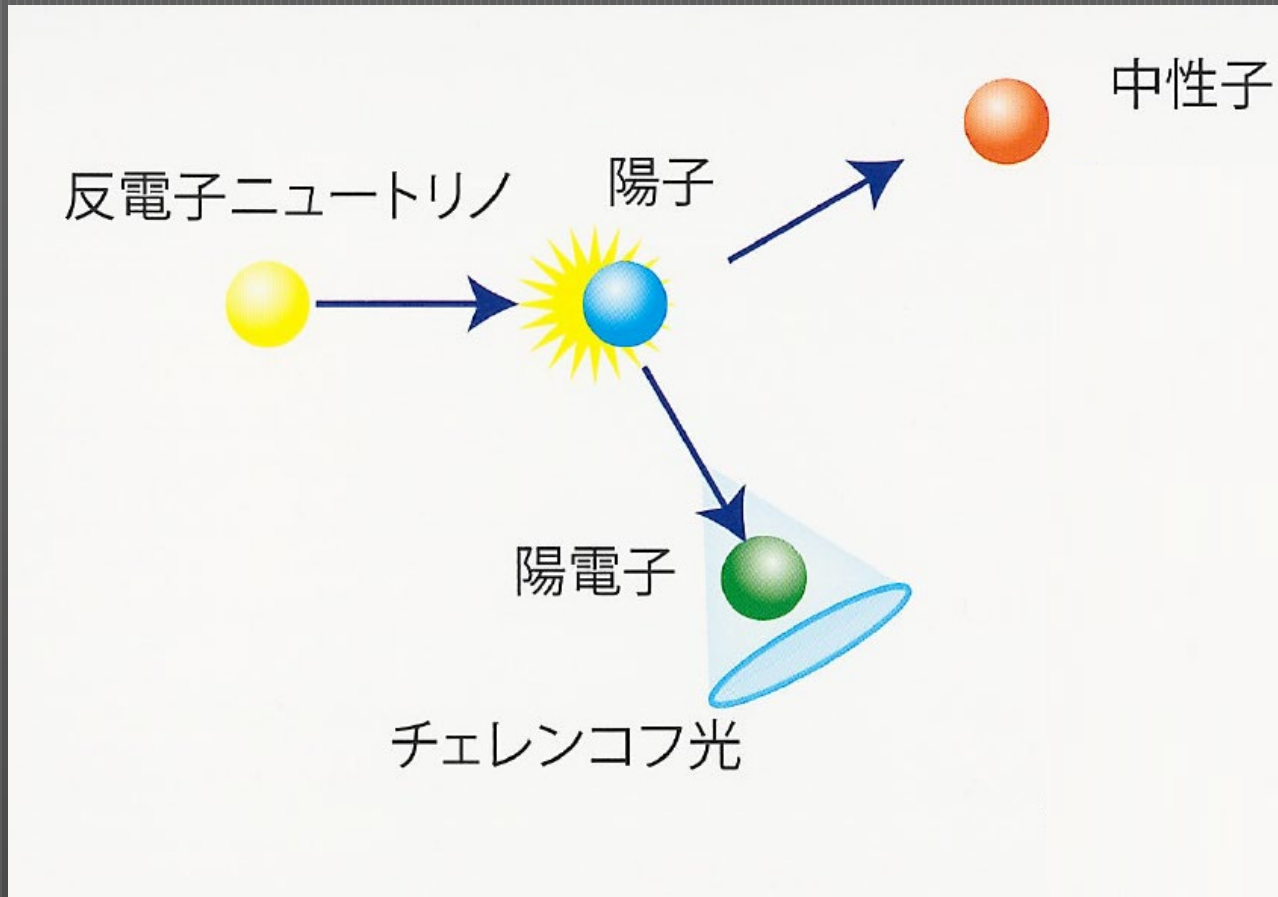
現在

50 億年前

100 億年前

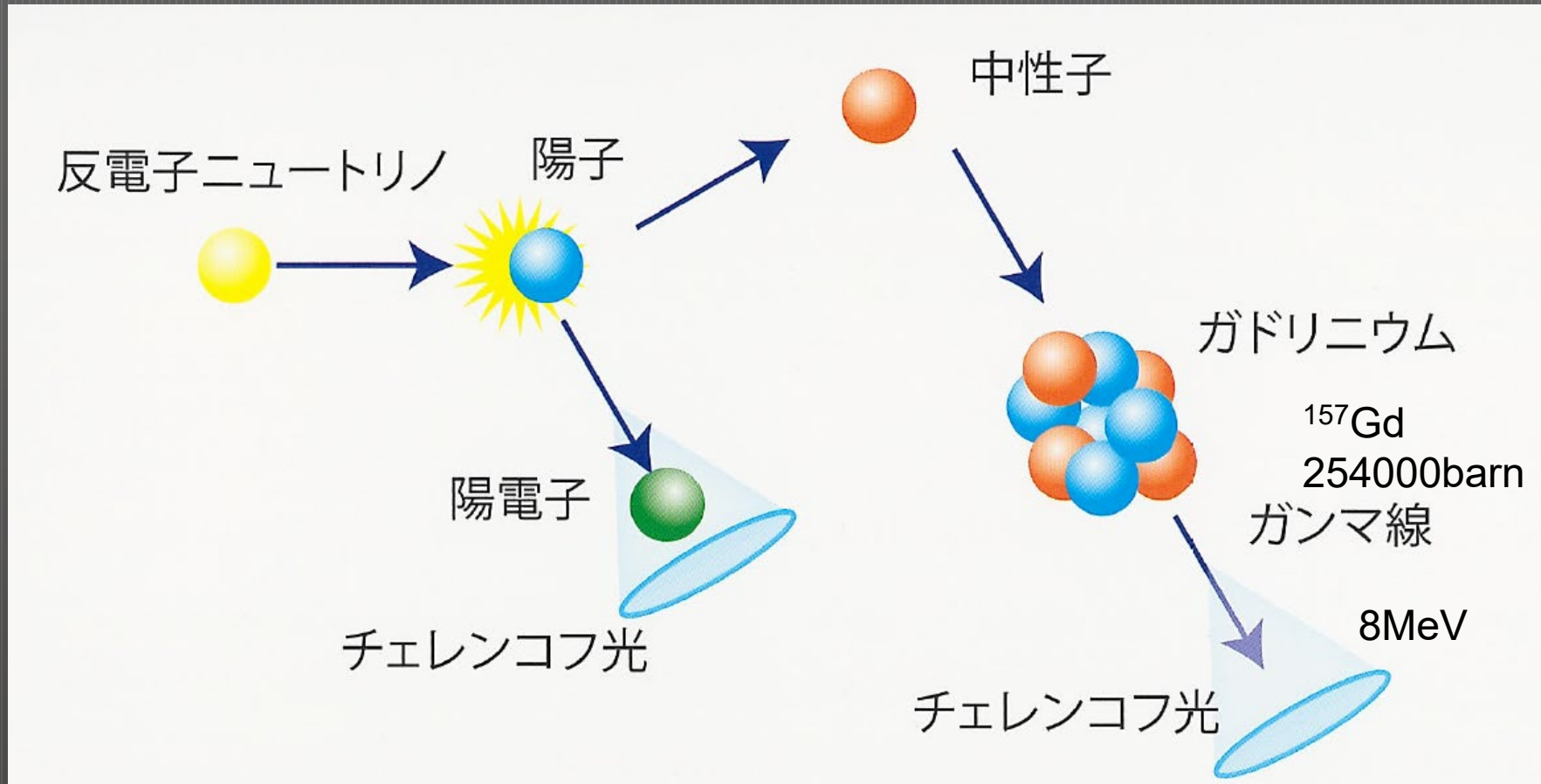
138 億年前

これまでのSuper-Kamiokande



- 陽電子(反電子)の出すチェレンコフ光を観測しているが、電子ニュートリノや電子が来た場合と区別ができない

Super-Kamiokande Gd



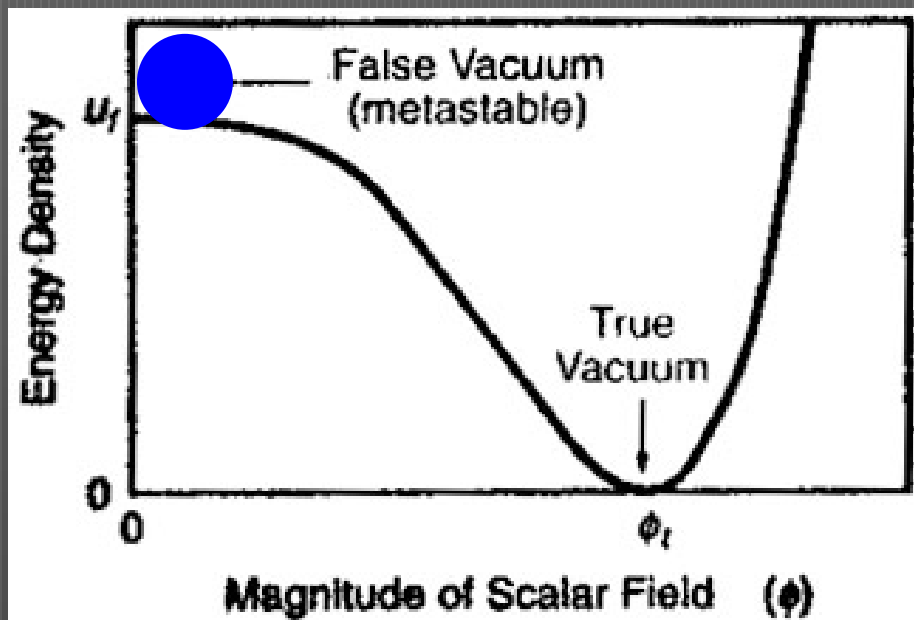
- ◇ ガドリニウムを入れることで反電子ニュートリノは2つ目のチェレンコフ光を出す
- ◇ ガドリニウムの中性子捕獲反応は大きく、0.03%濃度で75%の効率 SK-VII(2022~)

暗黒物質の話

- そもそも暗黒物質がないと超新星爆発も起きないしね。

ゆらぎが構造をつくる：暗黒物質の重要な役割

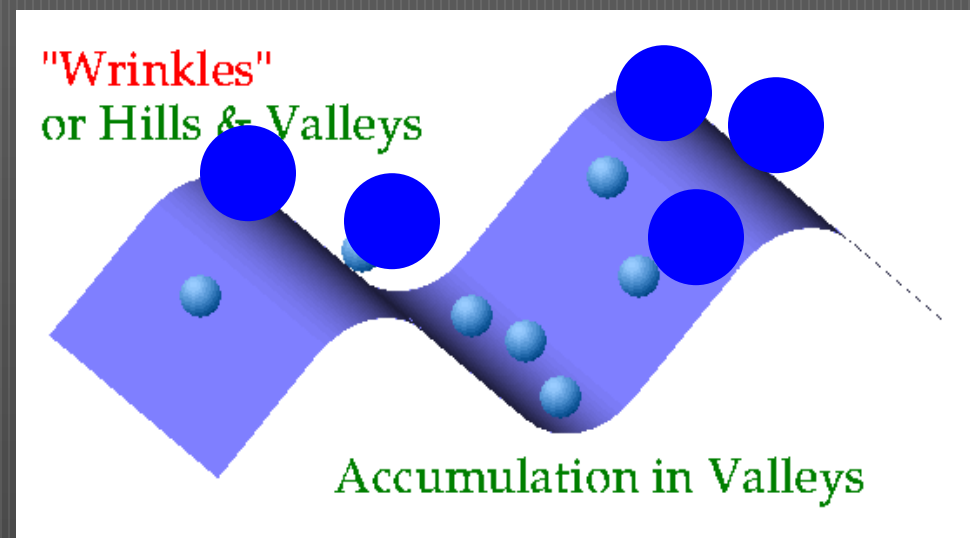
~ $1/10^5$ オーダーの小さな
初期の量子ゆらぎ



→マクロな密度ゆらぎとなる。

Gravitational instability:

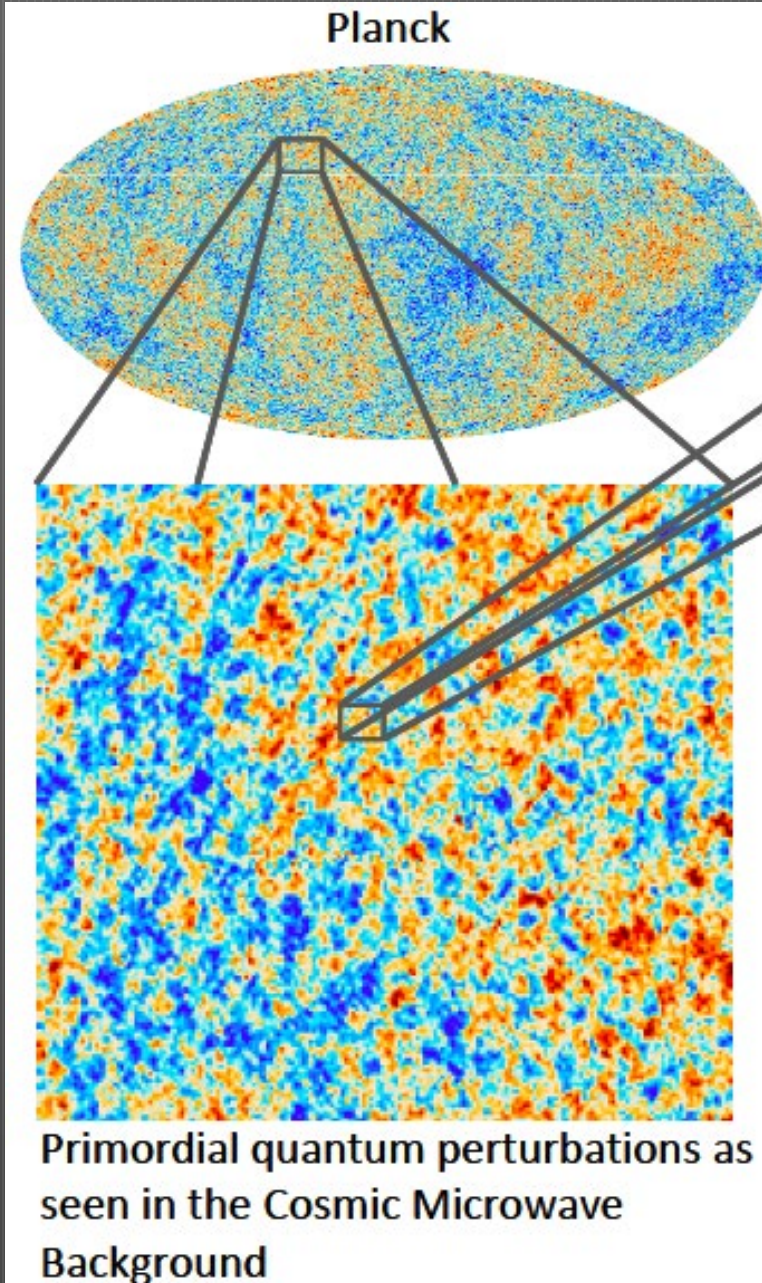
- Dark matter falls into the gravitational potential wells, visible matter follows



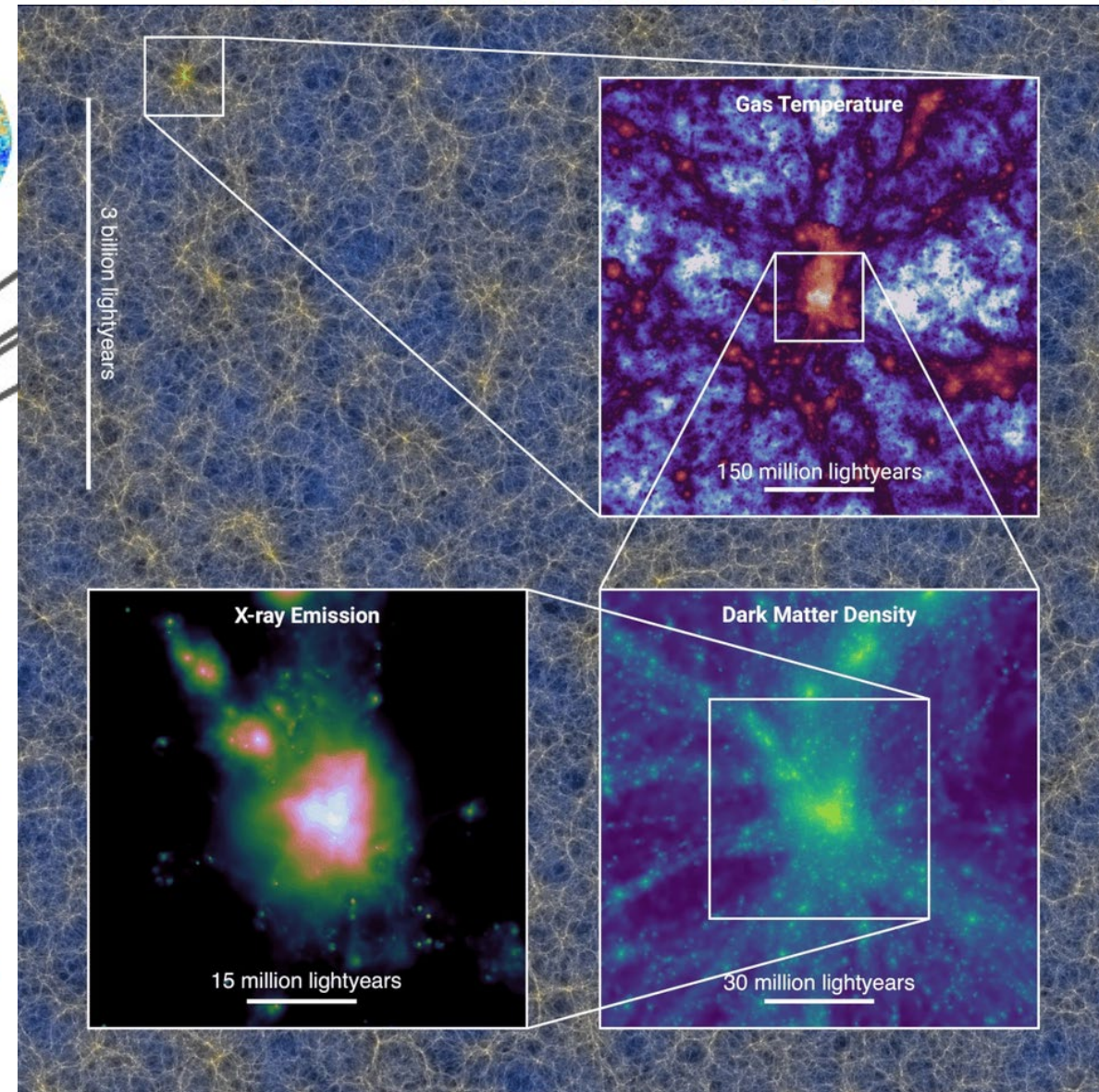
→宇宙の構造となる。

宇宙の (大規模) 構造の起源

最新の
ダークマターだけでなくバリオンや
ニュートリノも考慮した多体シミュ
レーションによる大規模な構造形成
再現プロジェクト「FLAMINGO」



MNRAS 526, 4978–5020 (2023)
Dark matter distribution today (simulated)



詳細SN2024 長峯さんトーク

暗黒物質 初出@銀河団 in 1933

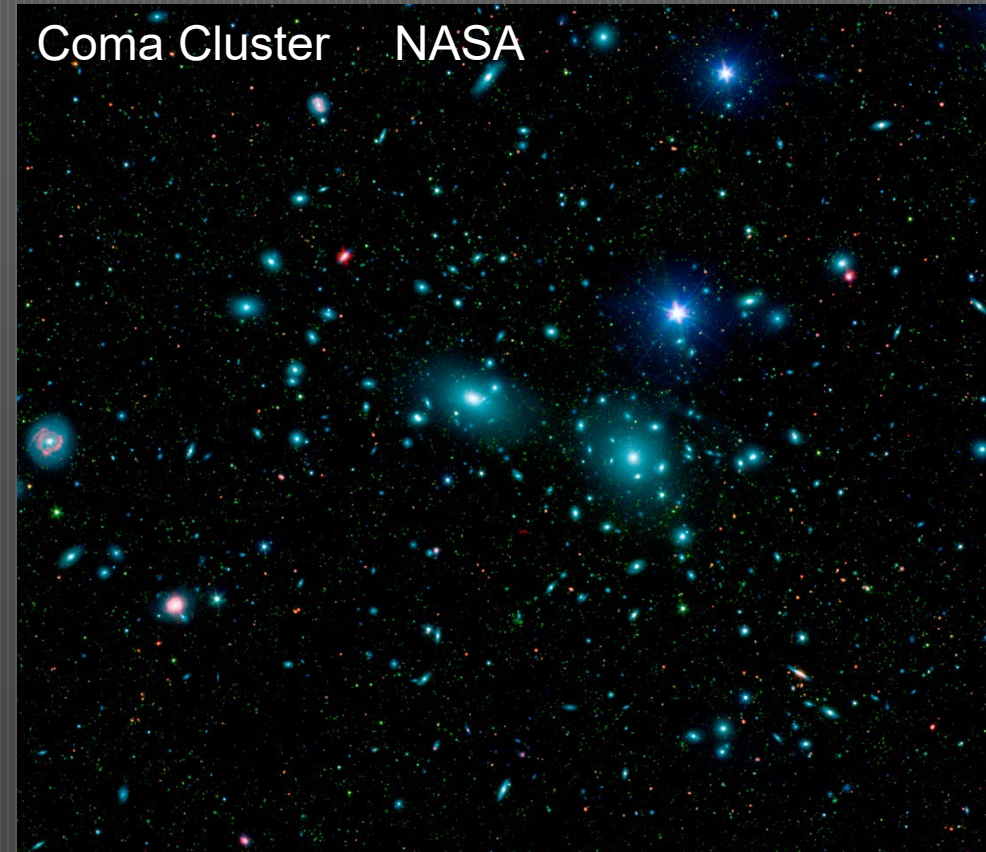
- Fritz Zwicky

- 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



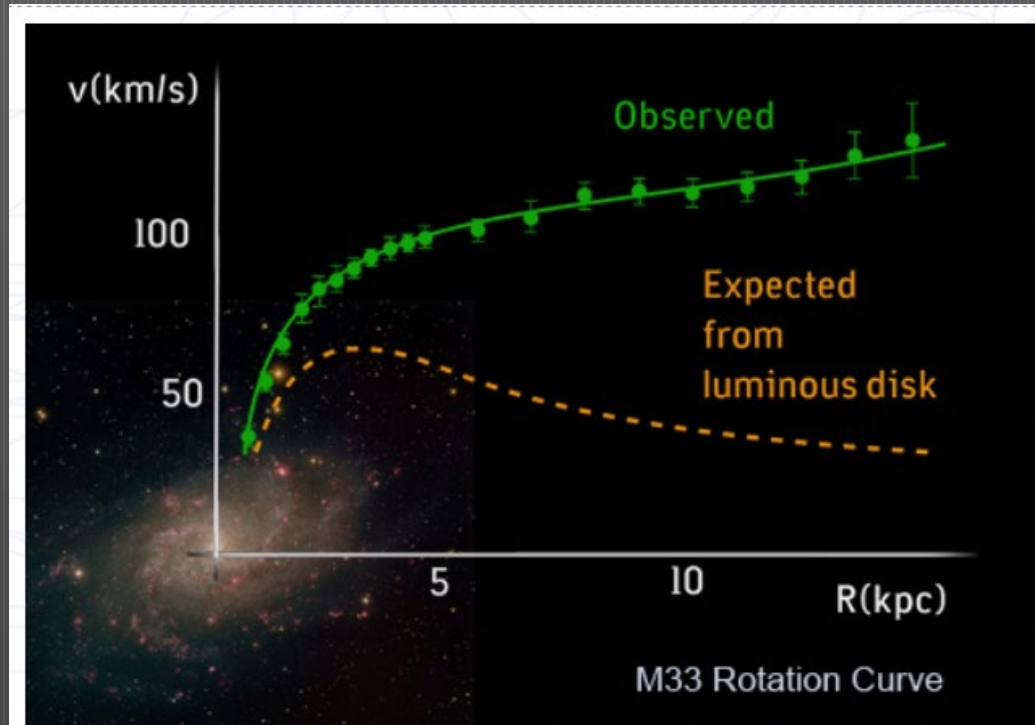
暗黒物質 @銀河 in 1970

- 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

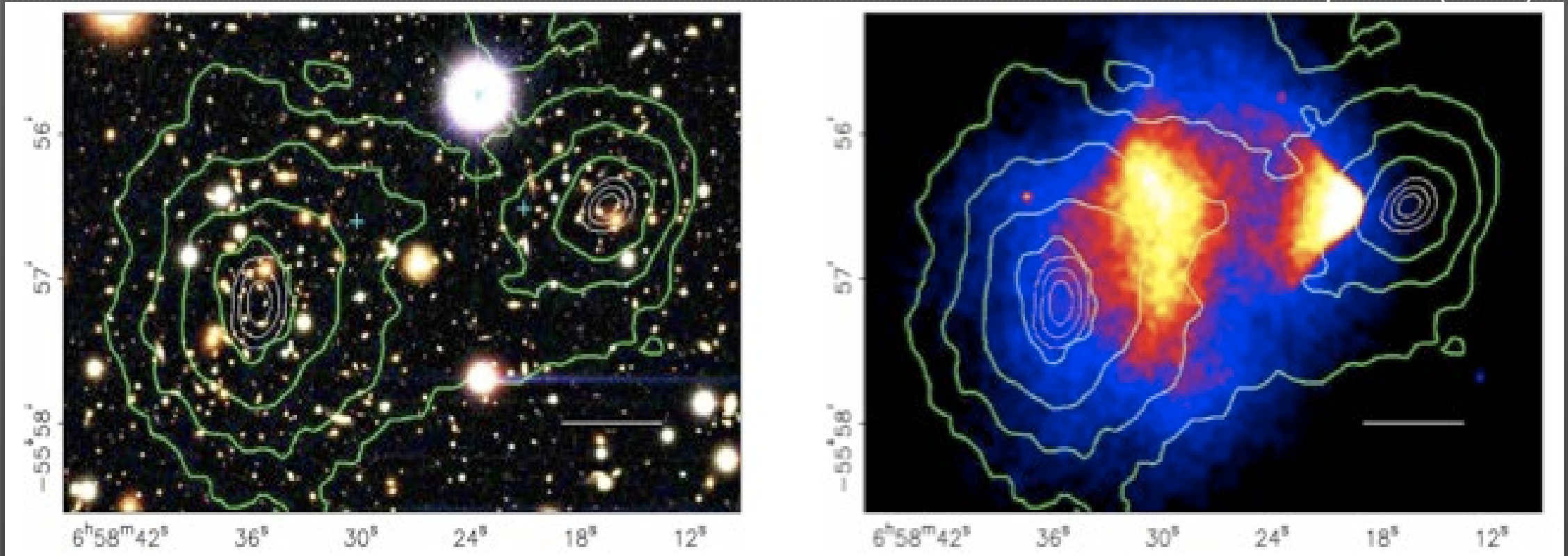


「見えて」きた暗黒物質 in 2000s

• 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



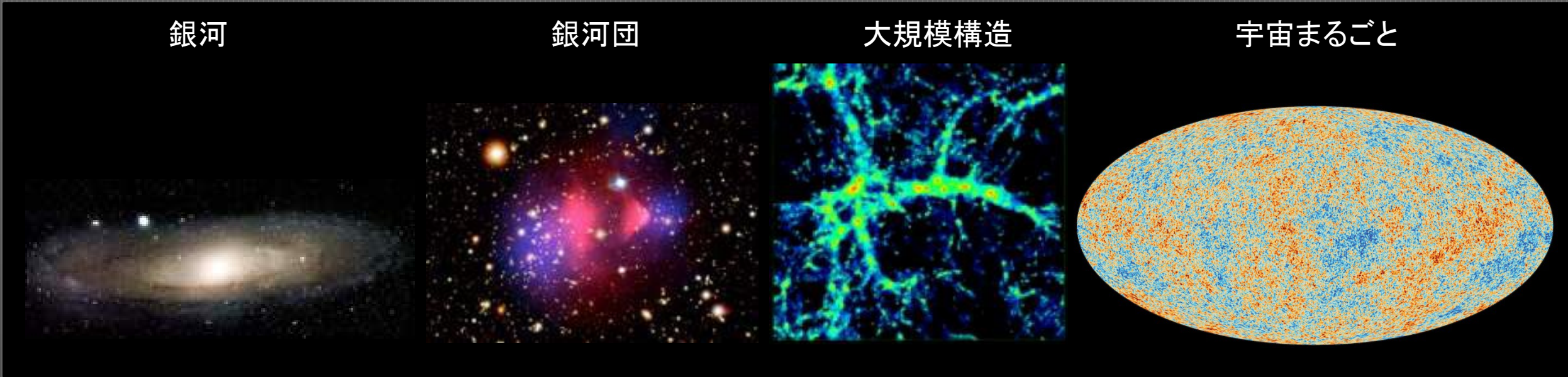
暗黒物質

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！

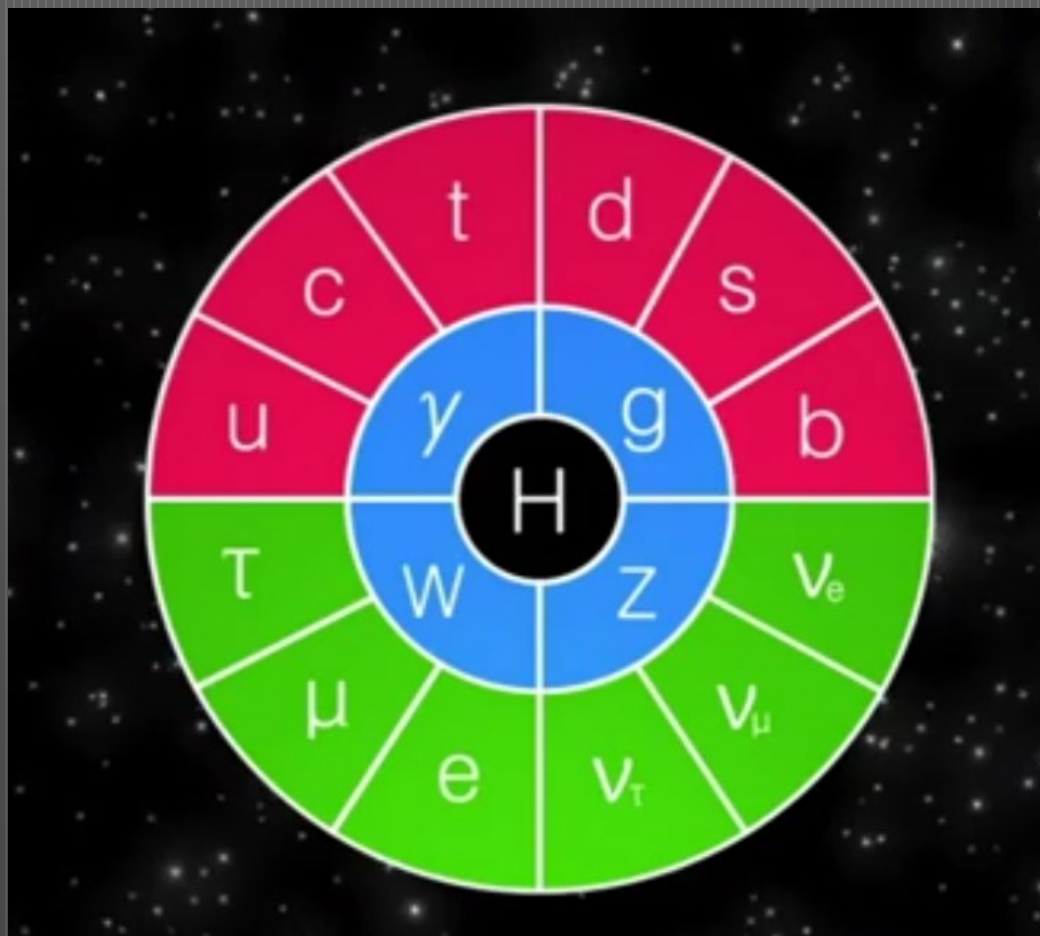
「物理学の理想」 きっと現実は。。。

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

- 分かれている素粒子



Particle fever

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

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

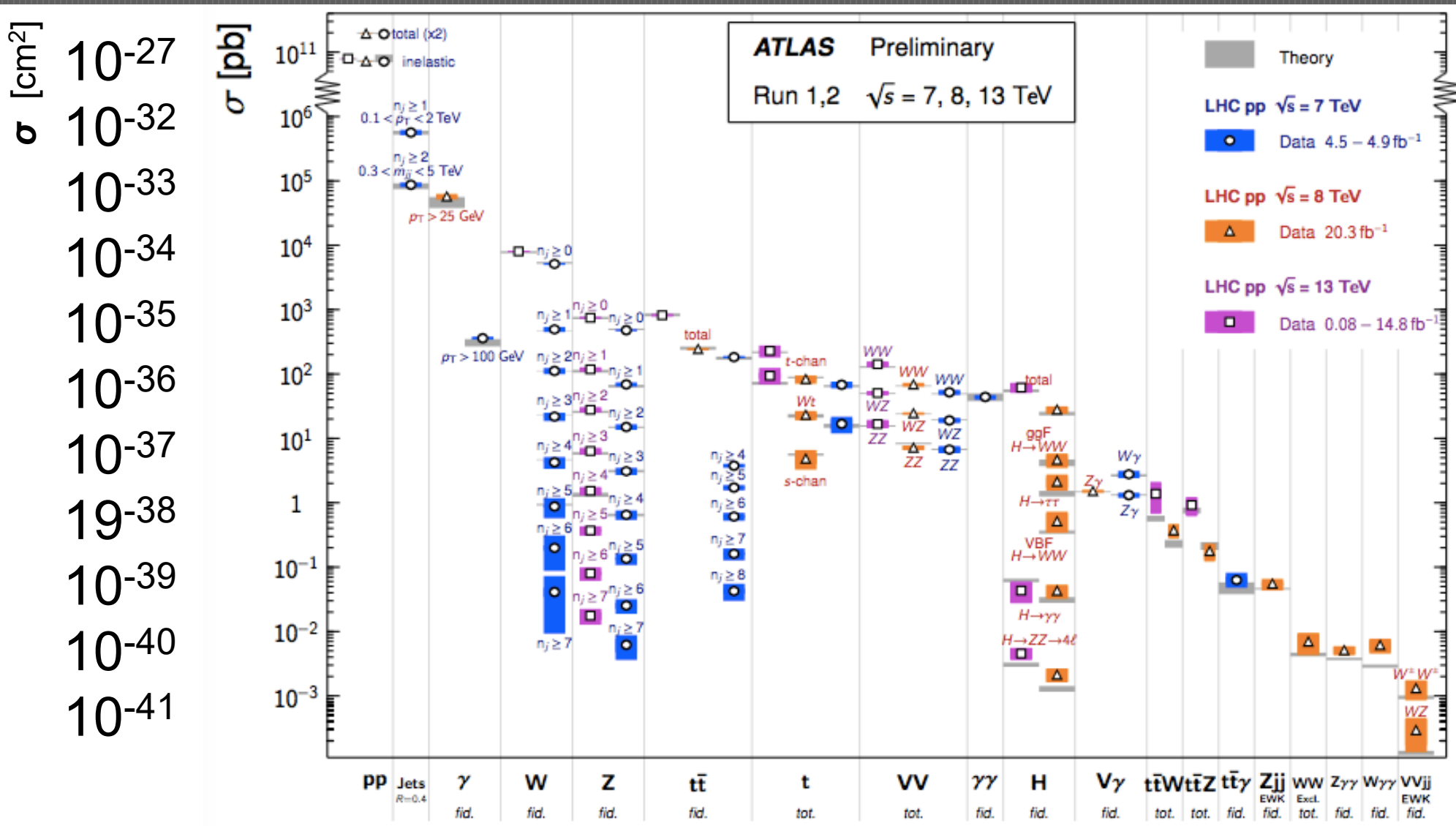
Lagrangian

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

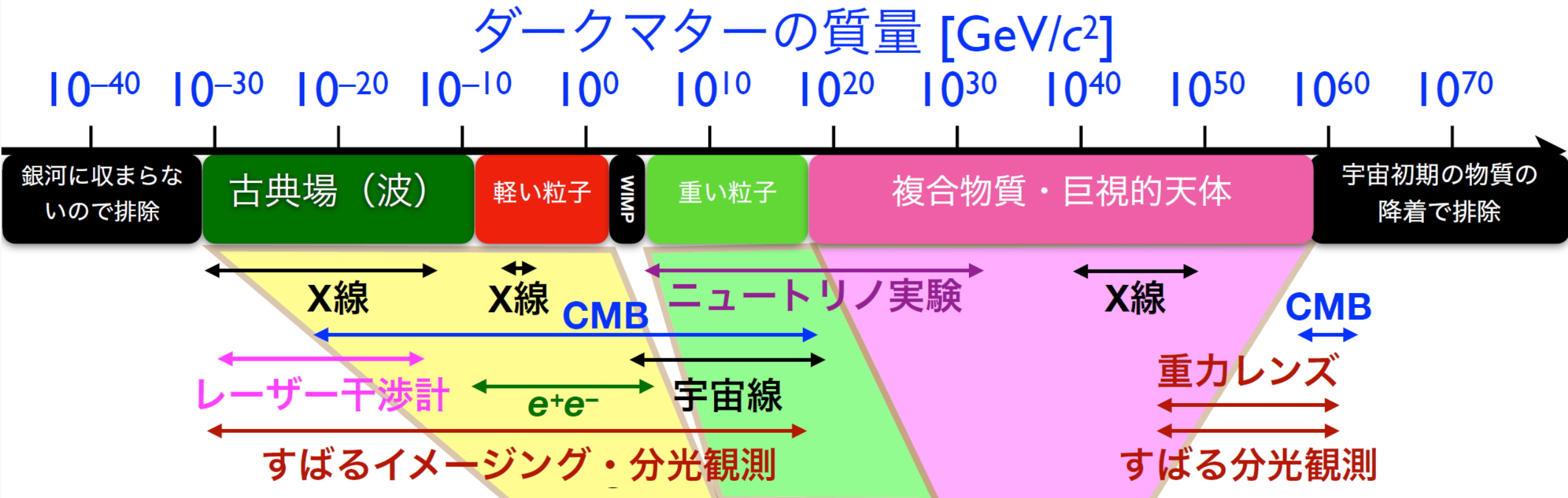
gauge interaction
matter fermions
Yukawa interactions
Higgs potential

Standard Modelの相互作用の大きさ@LHC

これより断面積小↓



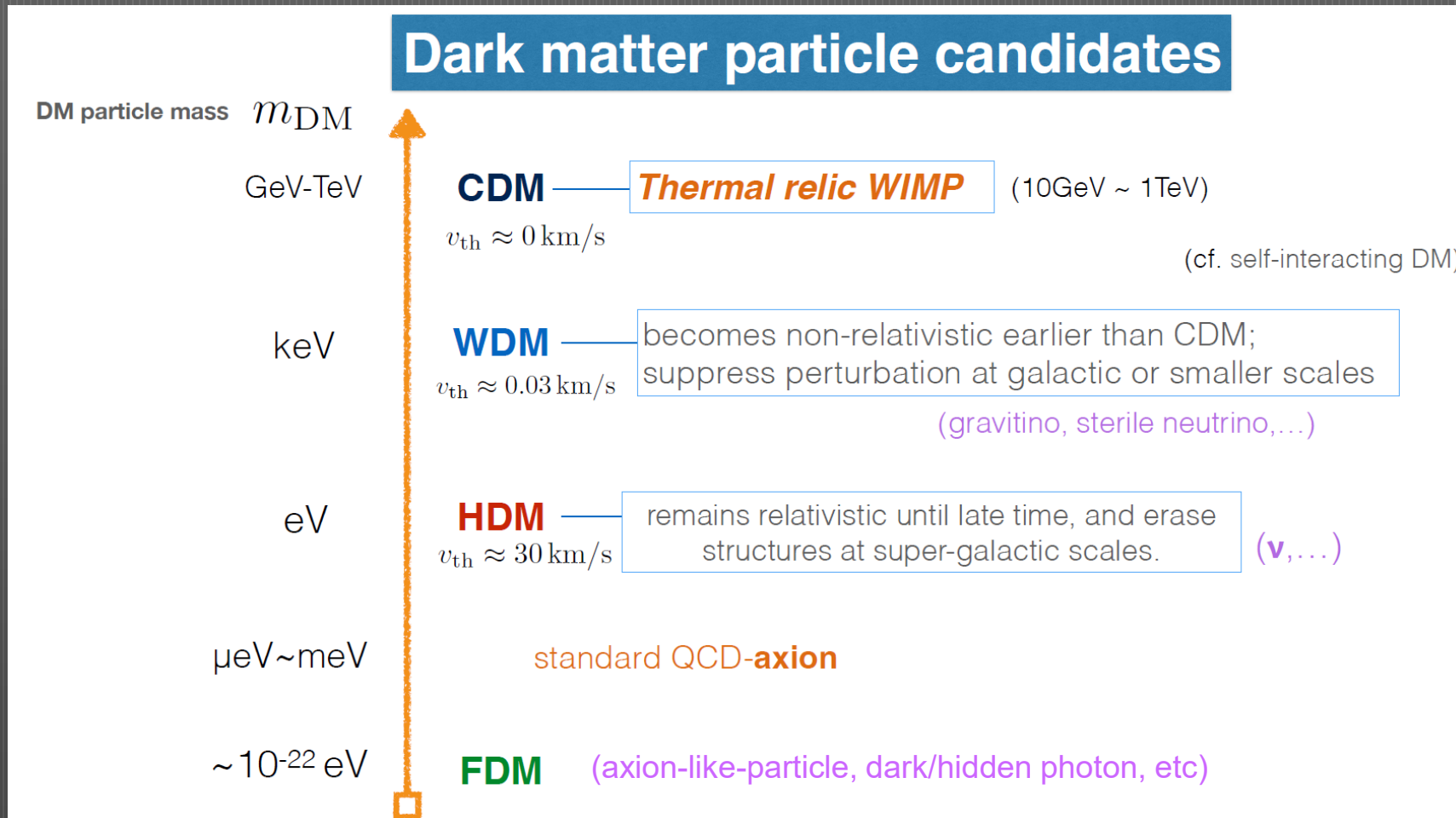
暗黒物質として探すべき質量領域



科研費 学術変革 ダークマターの正体はなにか？ HPより

<https://member.ipmu.jp/DarkMatter/>

暗黒物質の分類



一つの希望(まだ有力候補)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

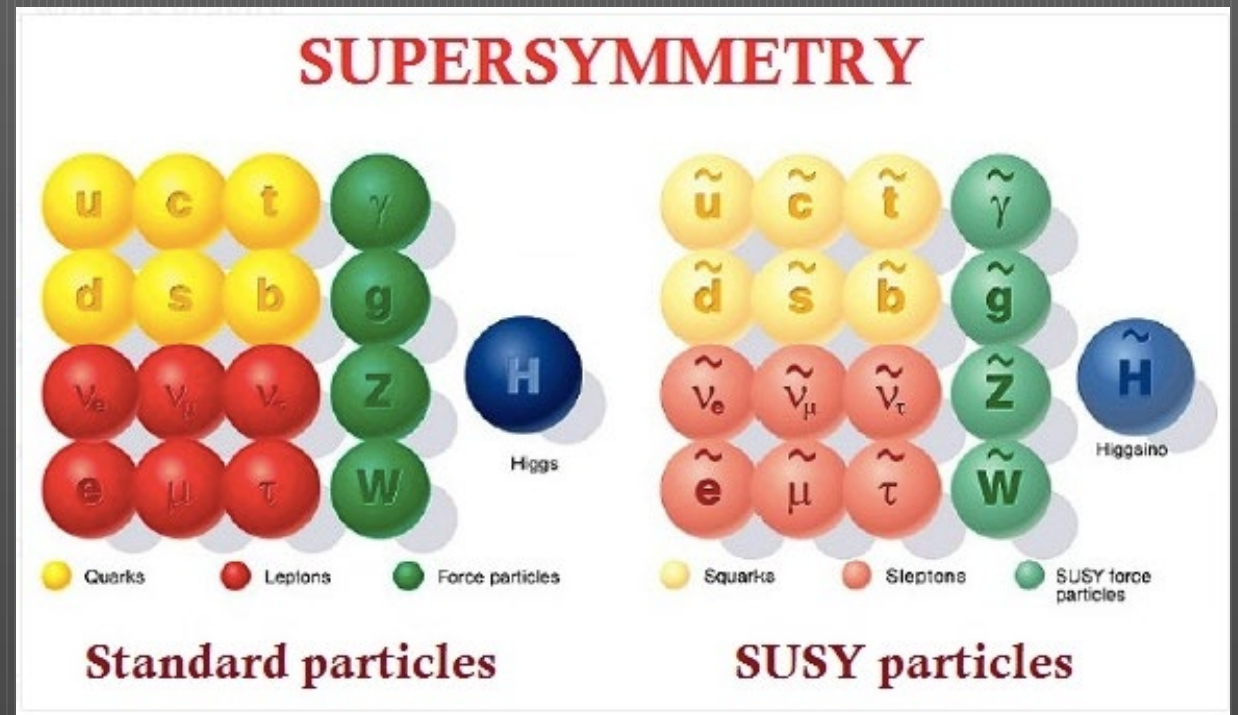
Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305, USA

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？

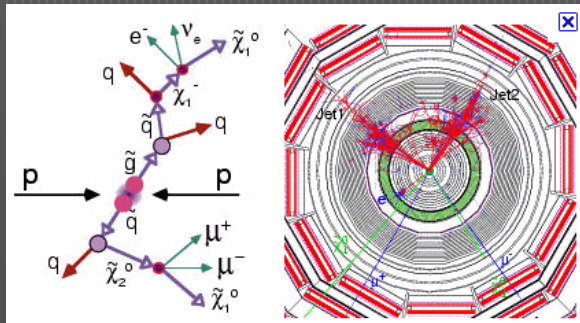
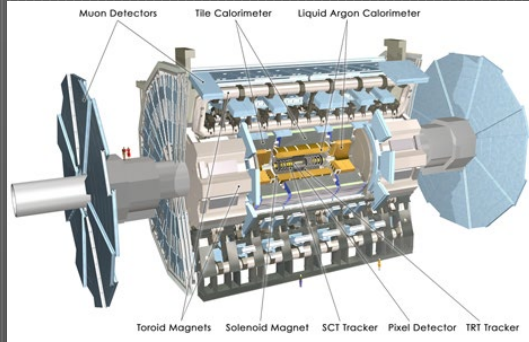
- 暗黒物質と既知の物質の相互作用のパターンは3つ



具体的には

Collider

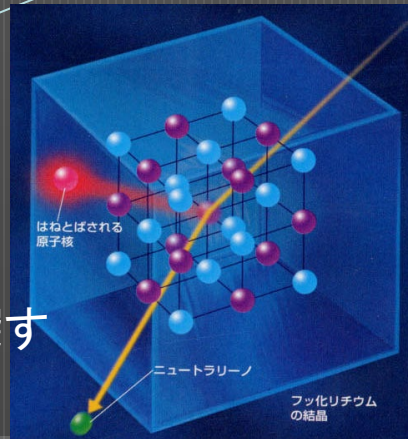
例 LHC ATLAS検出器



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

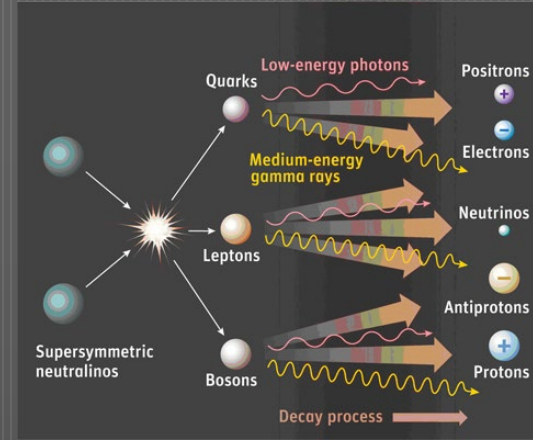
実験室で普通の物質との反応を探す

Direct search

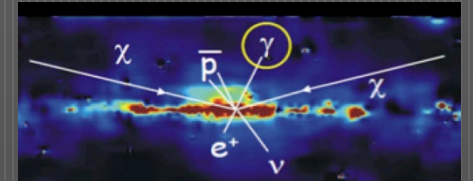


Indirect search

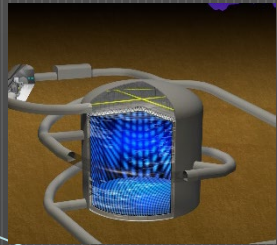
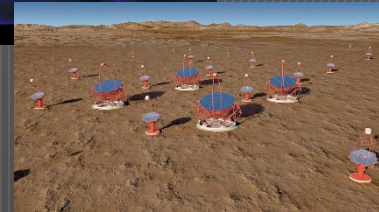
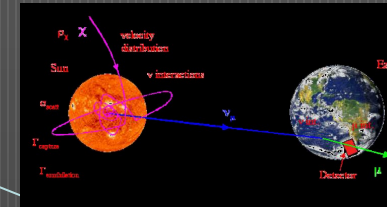
宇宙の暗黒物質があつまる
と思われるところで対生成
され、飛んでくる粒子を探す



例1 銀河中心からの γ
Fermi衛星, CTA,..



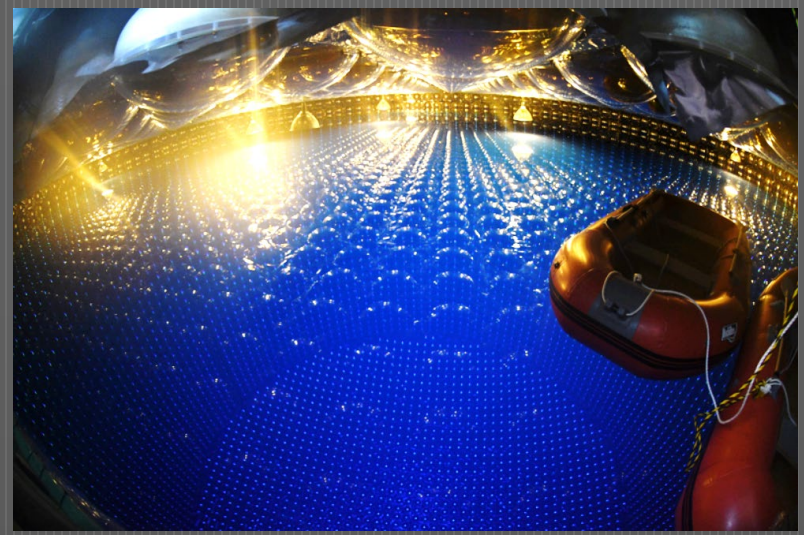
例2 太陽からの ν
Super-K, Hyper-K, IceCube,..



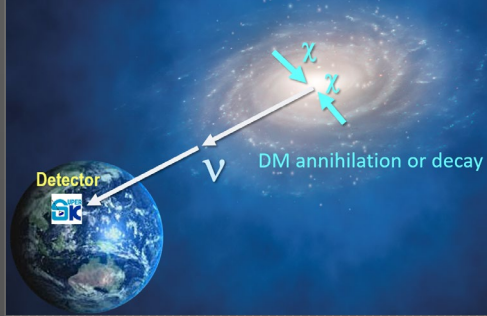
例 液体キセノン中の
キセノン原子核の弾性散乱
XENONnT, LZ,..

Super-Kamiokande

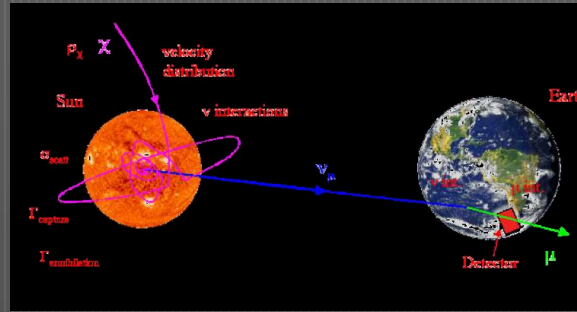
- 50ktonの水によるニュートリノ方向感度検出器
- 世界最高感度の暗黒物質検出器でもある



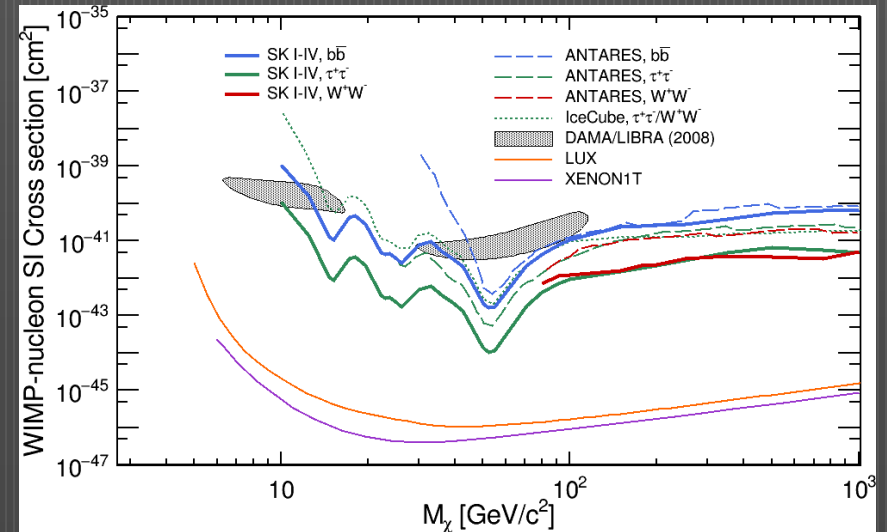
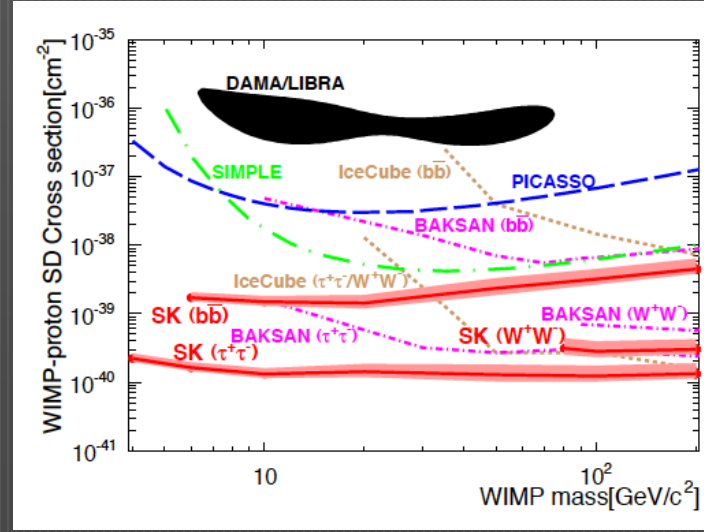
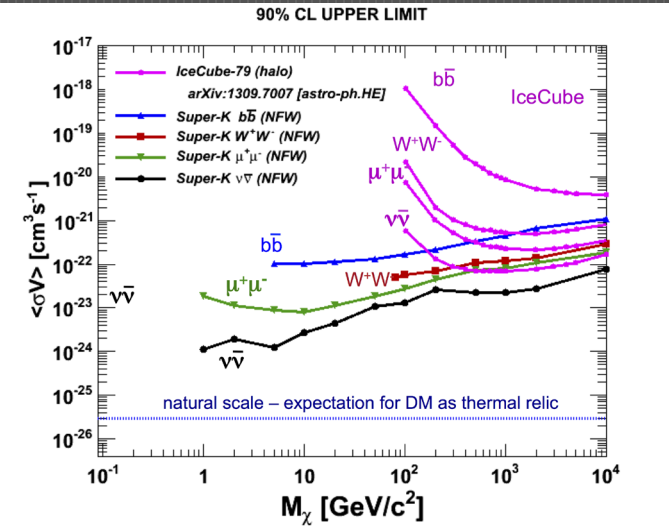
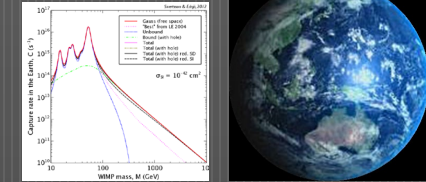
Galactic WIMPs search



Solar WIMPs search

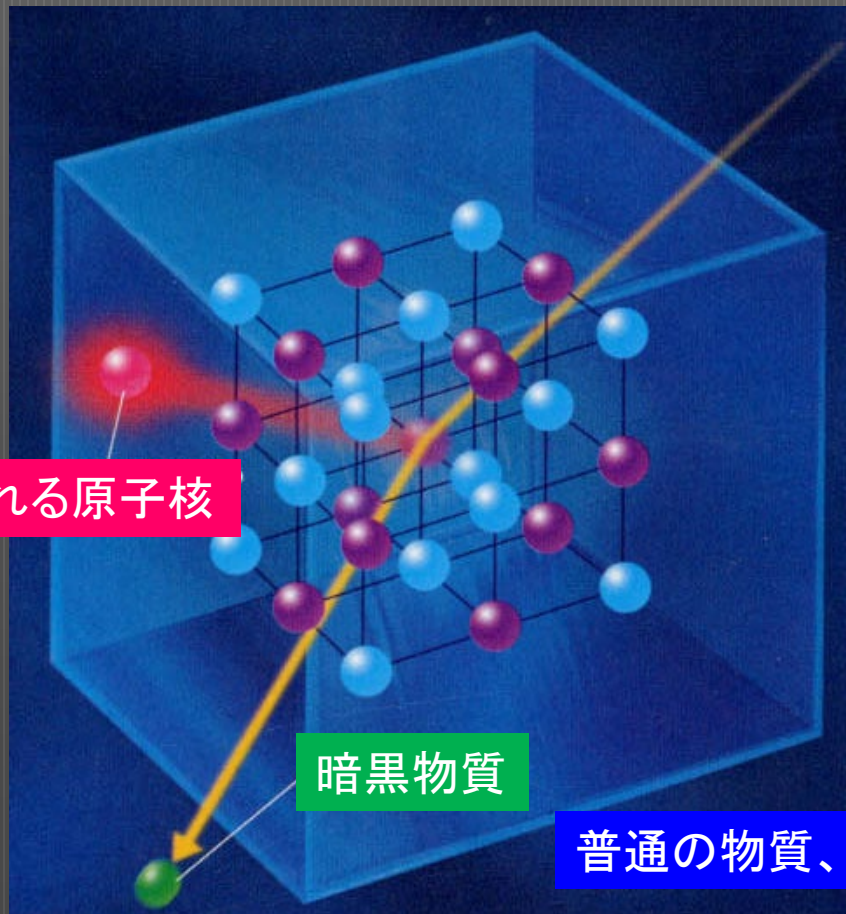


Earth WIMPs search



直接検出による探索

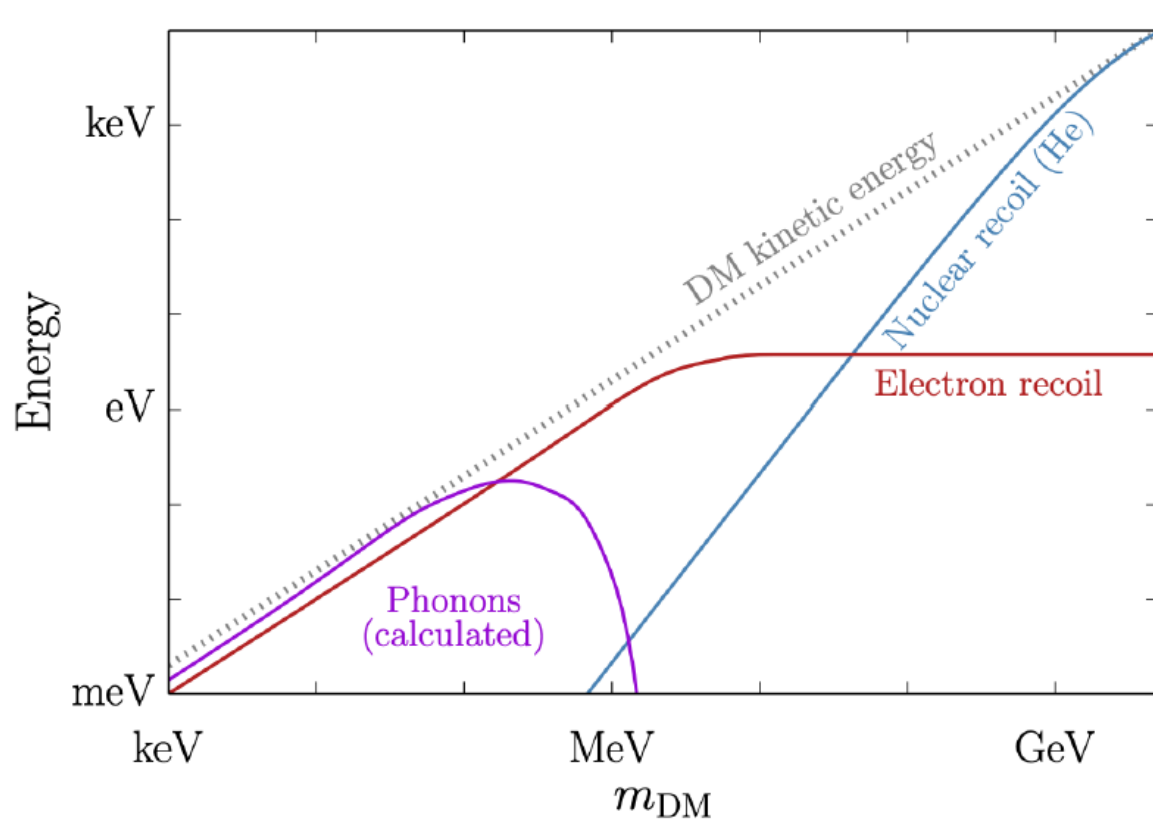
- やってきた暗黒物質と普通の物質(原子核,電子,光子)とが散乱して残す痕跡を捉える
 - エネルギー
 - 飛跡?
- といっても落とすエネルギーはごくわずか
~10keV
結晶中では”ほぼ”動かない



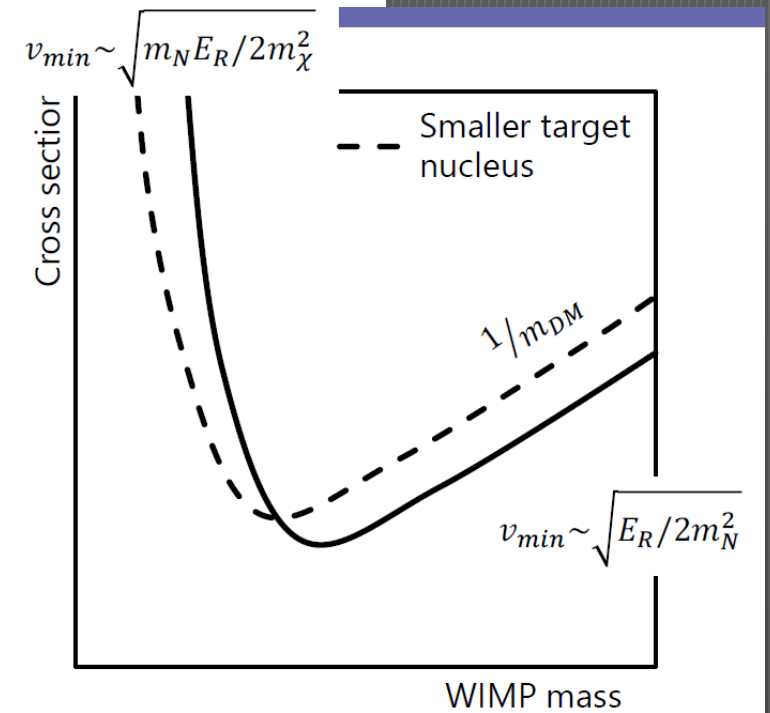
例)
原子核ターゲット

普通物質、たとえば何かの結晶とか

狙う暗黒物質の質量によりターゲットを選ぶ



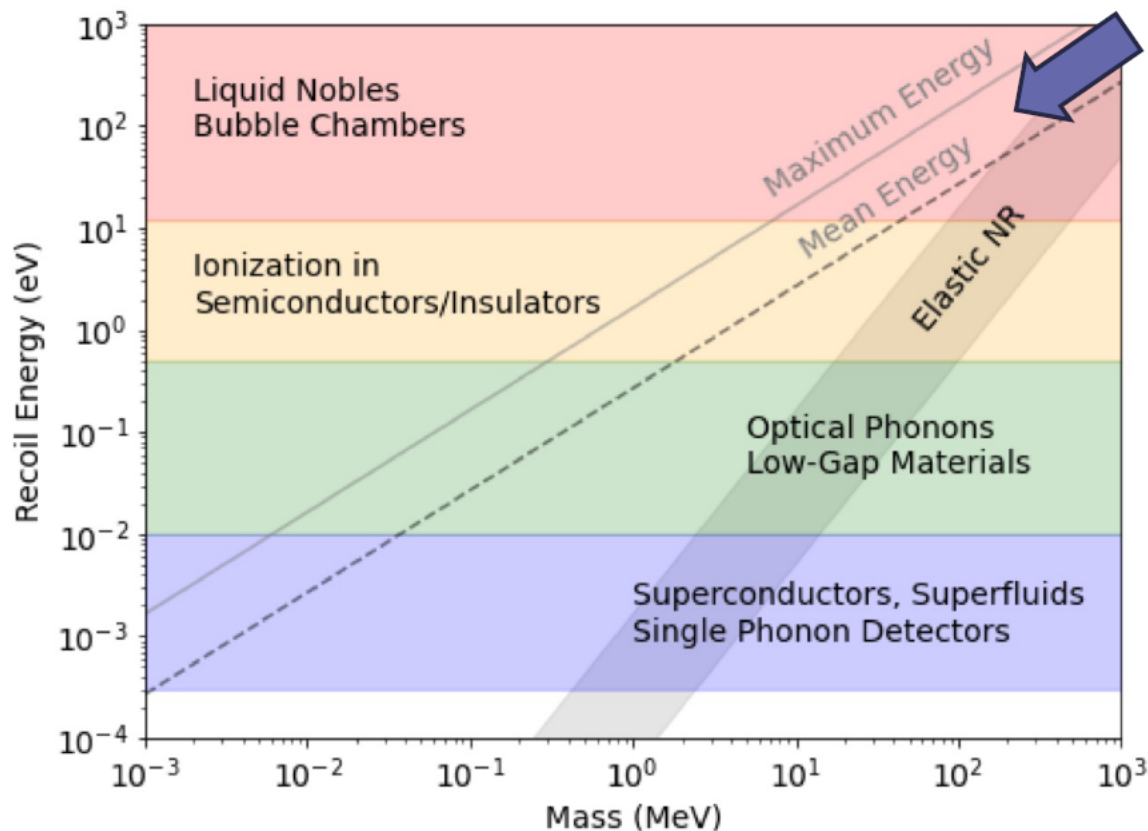
$$DM \text{ kinetic energy} = \frac{1}{2} m_{\chi} v^2$$



TASI lectures on DM (Tongyan Lin) <https://arxiv.org/pdf/1904.07915.pdf>

実際にはターゲットを検出器にしないといけないので

あと、弾性散乱か非弾性散乱か使いやすい方をえらんだり



Inelastic interactions:

- DM – electron scattering
- DM – nucleus scattering with Migdal
- DM scattering with collective modes

それぞれ狙ったところで最適な技術を選ぶ

シンチレータ、
半導体検出器、
量子検出器、
レーザー干渉計、、、

<https://arxiv.org/pdf/2203.08297.pdf>

14

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！
- 少しは原理の説明をします。

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 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

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

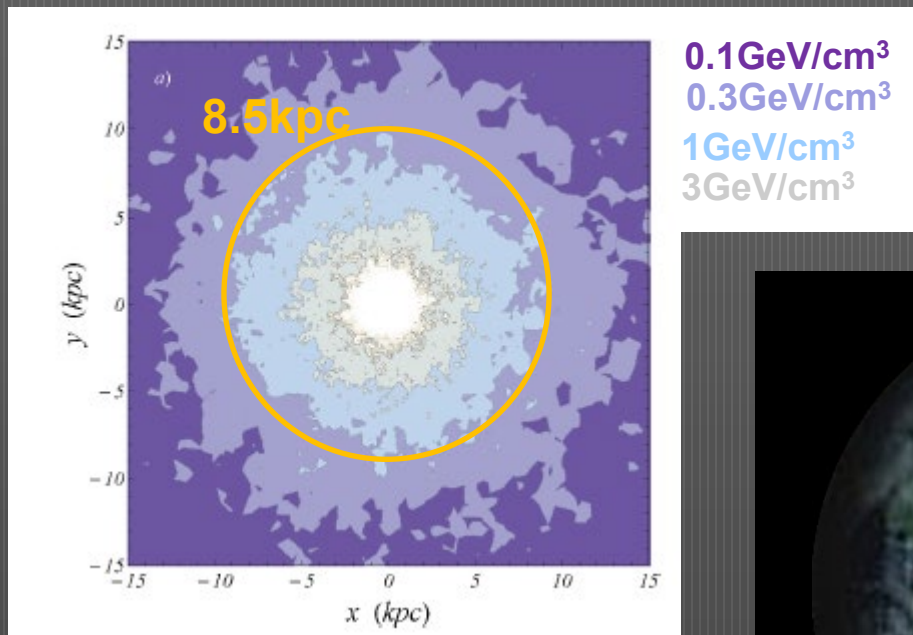
$\sigma_{\chi-N}$: 暗黒物質と原子核の断面積

ρ : 暗黒物質の密度

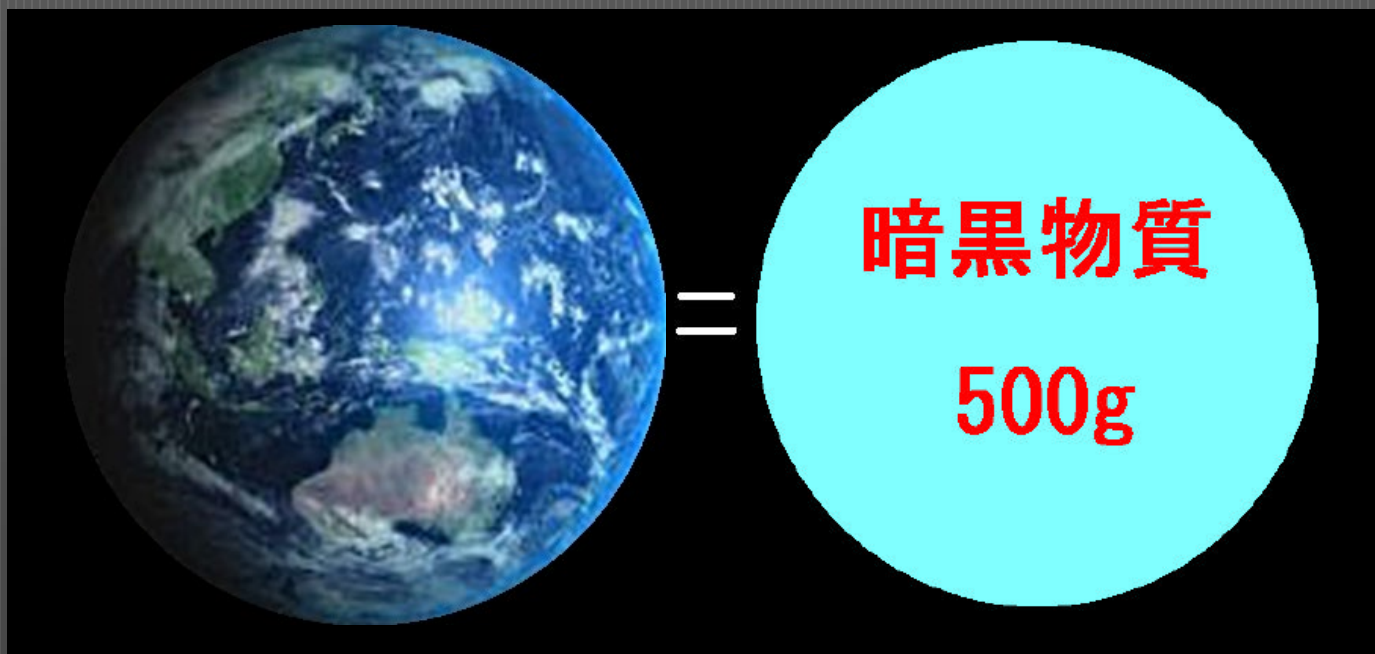
$f(\vec{v})$: 暗黒物質の速度分布

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 $0.3\sim 0.4\text{GeV}/\text{cm}^3$



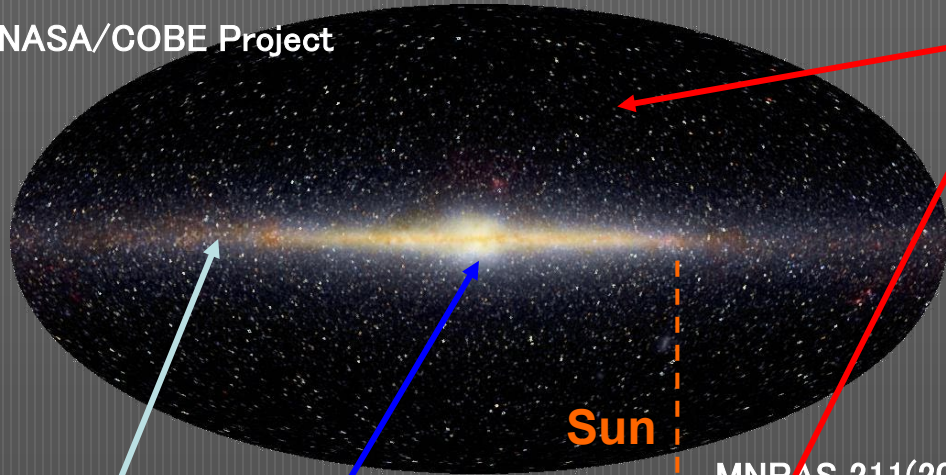
銀河面での密度分布 JCAP 1002(2010) 012



ハローモデル

- Standard Halo model

NASA/COBE Project



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

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

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

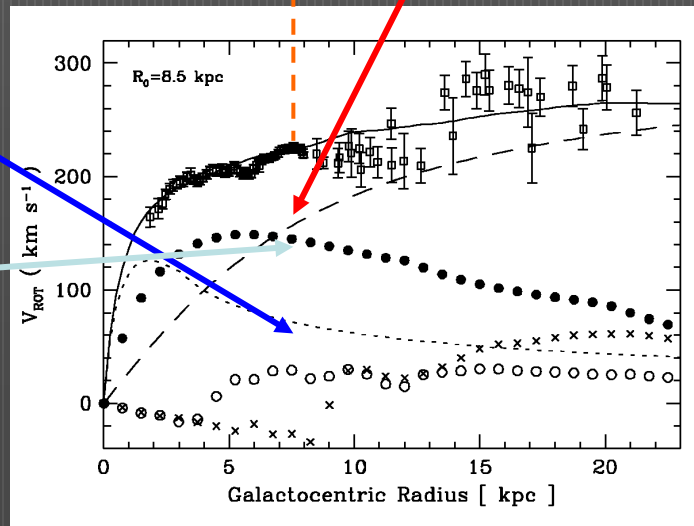
$$v_{\text{ROT}} = 220 \text{ km/s}$$

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

Bulge

Disc

MNRAS 211(2000) 361



我々の銀河の回転曲線は観測が難しい! 太陽の位置も!

例えばCDM::WIMPを狙うなら何をつかうか？

- 武器は118個から選ぶしかない： どの原子核が有利か？
 - 基本軽いWIMPなら軽い原子核、重いWIMPなら重い原子核ではあるが

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 燐(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mium 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 ラザホージウム 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 ダームスタニウム Darmstadtium [281]	111 Rg レントゲニウム Roentgenium [280]	112 Cn コベルクニシウム 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 プラセオジム Praseodymium 140.908	60 Nd ネオジム 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 ユロピウム 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 イットルビウム 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 バークリウム 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 メンデレビウム Mendelevium [258]	102 No ノーベリウム Nobelium [259]	103 Lr ローレンシウム Lawrencium [262]			

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

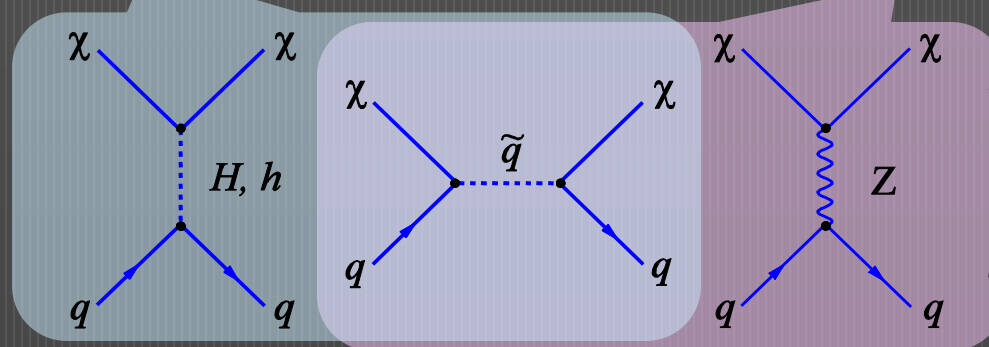
- スピンに依存する項としない項

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

質量の二乗

SUSY WIMPsの場合

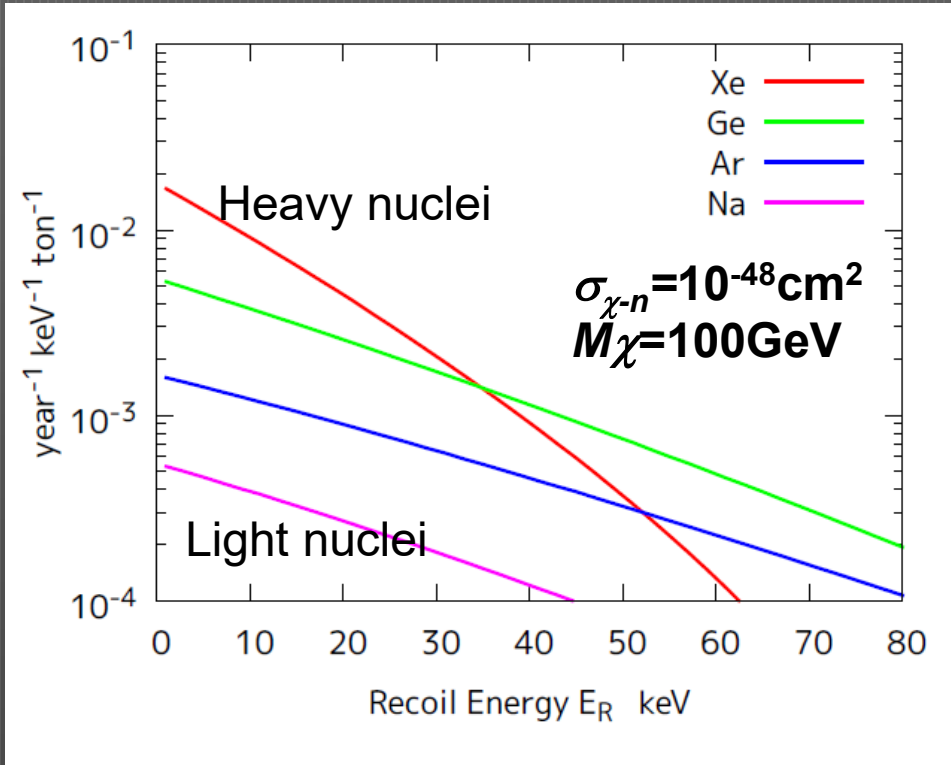
$$C_N^{SI} \propto A^2 \sigma_{\chi-n} \quad C_N^{SD} \propto (a_p \langle S_p \rangle_N + a_n \langle S_n \rangle_N)^2 \frac{J+1}{J}$$



どの原子核が有利かをより検討する

- 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イベントは
 - 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)
 - シグナルの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

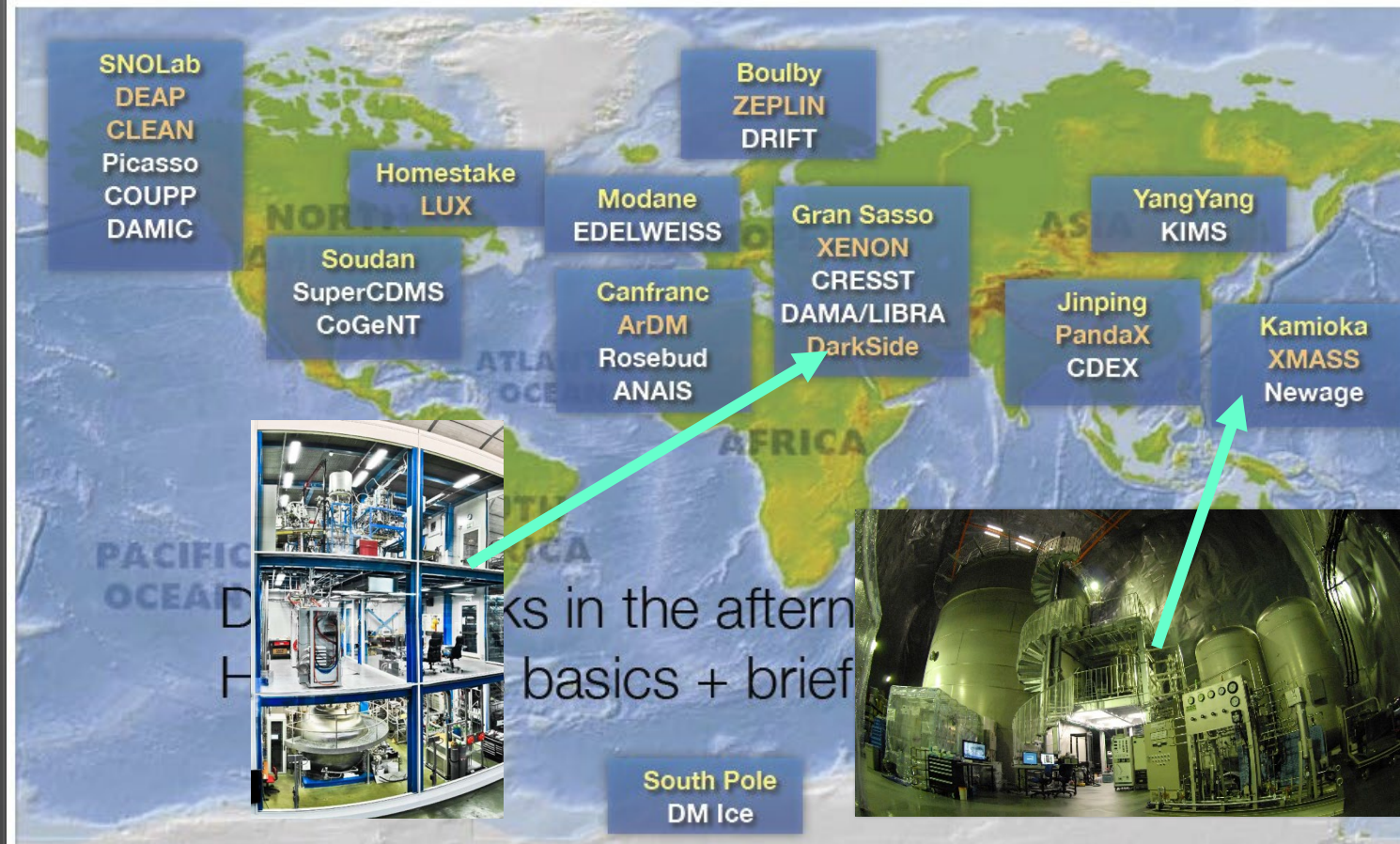
実験をするべきところ

- 世界の地下実験室
 - 宇宙線研究所だけど宇宙線が邪魔！



地下深くのクリーンルーム

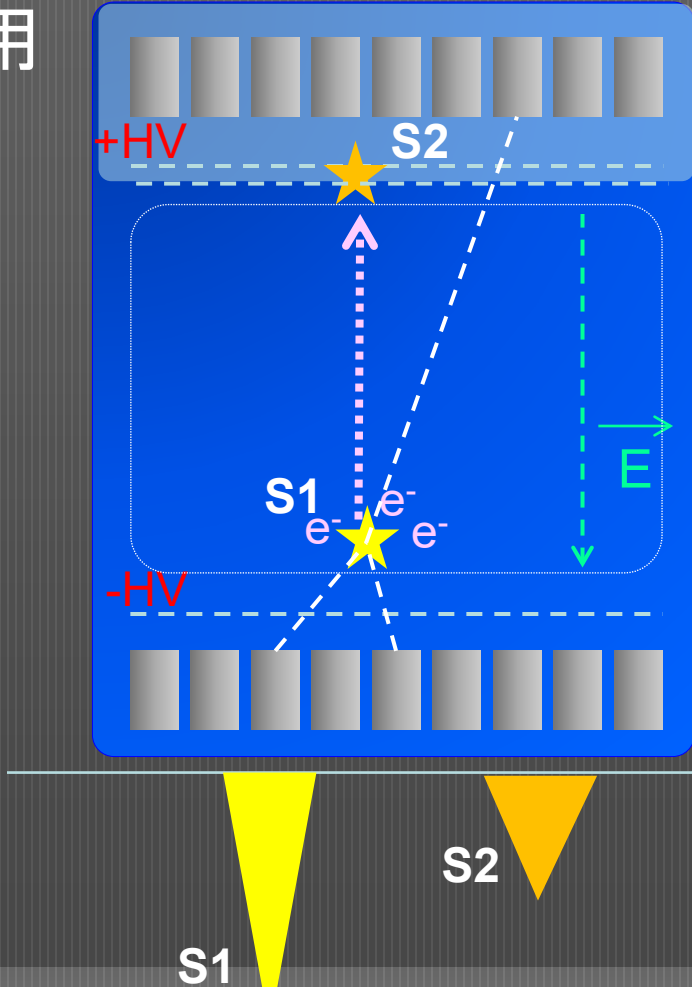
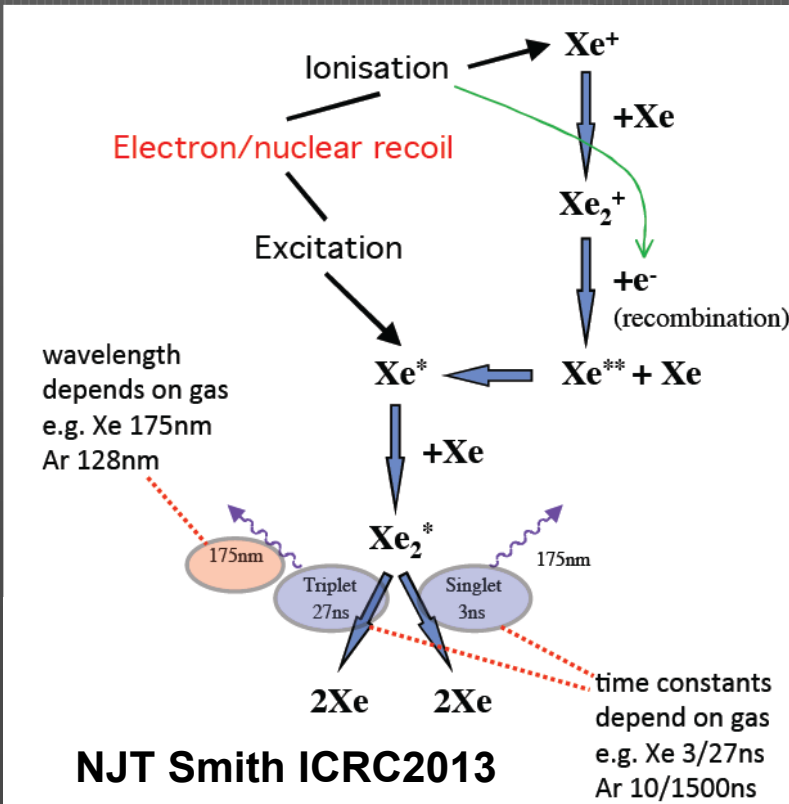
A world-wide effort to search for WIMPs



最先端WIMP検出器

- 2相式キセノンTPC
 - 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	1H 水素 1.00794																	2He ヘリウム 4.0026		
2	3Li リチウム 6.941	4Be ベリリウム 9.01218												5B ボロン 10.811	6C 炭素 12.0107	7N 窒素 14.0064	8O 酸素 15.9994	9F フッ素 18.9984	10Ne ネオン 20.1797	
3	11Na ナトリウム 22.98976928	12Mg マグネシウム 24.304												13Al アルミニウム 26.9815386	14Si シリコン 28.0855836	15P リン 30.973761998	16S 硫黄 32.06	17Cl 塩素 35.45	18Ar アルゴン 39.948	
4	19K カリウム 39.0983	20Ca カルシウム 40.078	21Sc スカンジウム 44.95591224	22Ti チタン 47.88	23V バナジウム 50.9415	24Cr クロム 51.9961	25Mn マンガン 54.938045	26Fe 鉄 55.845	27Co コバルト 58.933194	28Ni ニッケル 58.6934	29Cu 銅 63.546	30Zn 亜鉛 65.38	31Ga ガリウム 69.723	32Ge ゲルマニウム 72.630	33As 亜鉛 74.9216	34Se セレン 78.9718	35Br 臭素 79.904	36Kr クリプトン 83.797		
5	37Rb ルビジウム 85.4678	38Sr ストロンチウム 87.62	39Y イットリウム 88.905848	40Zr ジルコニウム 91.224	41Nb タンタル 92.90638	42Mo モリブデン 95.94	43Tc テクネチウム 98.90625	44Ru ルビジウム 101.07	45Rh ロジウム 102.9055	46Pd パラジウム 106.42	47Ag 銀 107.8682	48Cd カドミウム 112.411	49In インジウム 114.818	50Sn スズ 118.710	51Sb アンチモン 121.757	52Te テルル 127.60	53I ヨウ素 126.905	54Xe キセノン 131.29		
6	55Cs セシウム 132.90545196	56Ba バリウム 137.327	57La ランタニウム 138.9049	58Ce セリウム 140.1258	59Pr プラセチウム 140.90765	60Nd ネオジム 144.242	61Pm プロメチウム 144.912878	62Sm セミウム 150.36	63Eu ユウロピウム 151.964	64Gd ガドリウム 157.25	65Tb タービウム 158.92535	66Dy ジロジウム 162.500145	67Ho ホルミウム 164.930329	68Er エルビウム 167.259	69Tm タリウム 168.934	70Yb ytterbium 173.054	71Lu ルテチウム 174.967			
7	71Lu ルテチウム 174.967	72Hf ハフニウム 178.49	73Ta タンタル 180.94788	74W タングステン 183.84	75Re ロジウム 186.207	76Os オスミウム 190.23	77Ir イリジウム 192.222	78Pt プラチナ 195.084	79Au 金 196.966569	80Hg 水銀 200.59	81Tl タリウム 204.3833	82Pb 鉛 207.2	83Bi ビスマuth 208.980389	84Po ポロニウム 209	85At アスタチン 210	86Rn ラドン 222	87Fr フランシウム 223	88Ra ラジウム 226	89Ac アクチン 227	
ラウレンス																				
アクチン																				

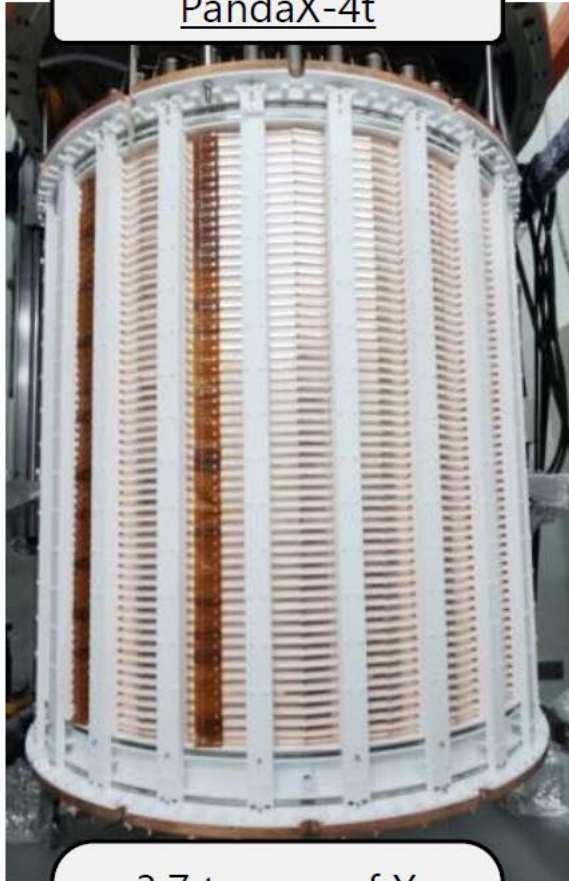


ほぼすべての性能を持つ最強WIMP検出器

- 低BG
- 低閾値
- 大質量化容易
- 位置感度
- 粒子識別

世界のキセノン検出器 熾烈な競争

PandaX-4t



- 3.7 tonnes of Xe (active volume)
- 368 PMTs
- Status: running

XENONnT



- 5.9 tonnes of Xe (active volume)
- 494 PMTs
- Status: running

LZ



- 7 tonnes of Xe (active volume)
- 494 PMTs
- Status: running

Xenon-nT



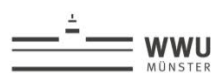
Columbia



RPI



Nikhef



Muenster



Stockholm



Mainz



MPIK, Heidelberg



Freiburg



University of Zurich

Zurich



Chicago



UCLA

UC San Diego

UCSD



Rice



Purdue



Coimbra



Subatech



LPNHE



LAL



Bologna LNSG Torino Napoli



Weizmann



Tokyo



NAGOYA UNIVERSITY

Nagoya



Kobe

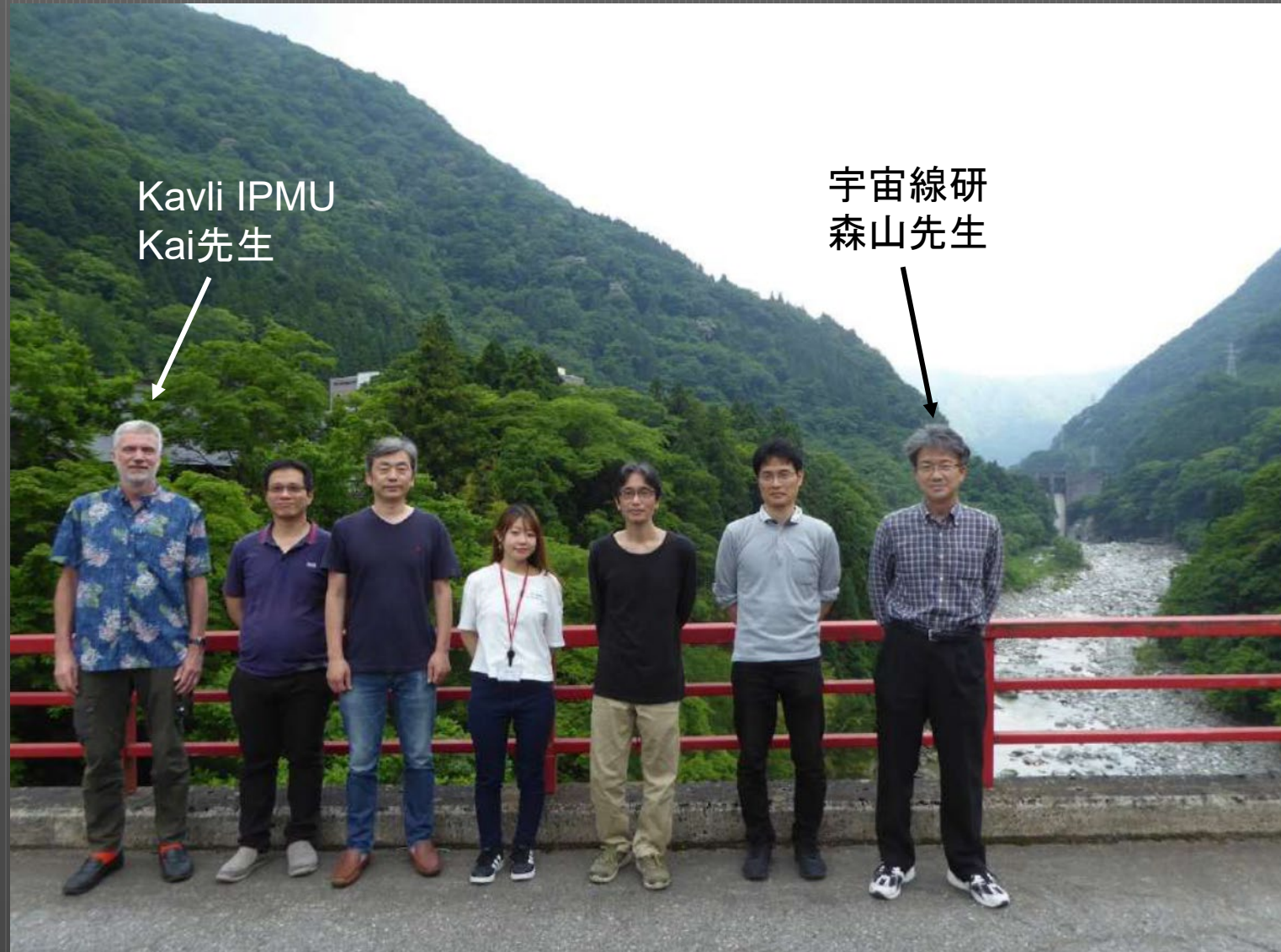


جامعة نيويورك أبوظبي
NYU | ABU DHABI

NYUAD

イタリア グランサッソ研究所
180人 27研究機関からなるコラボレーション

神岡のXenon-nTメンバー



Kavli IPMU
Kai先生

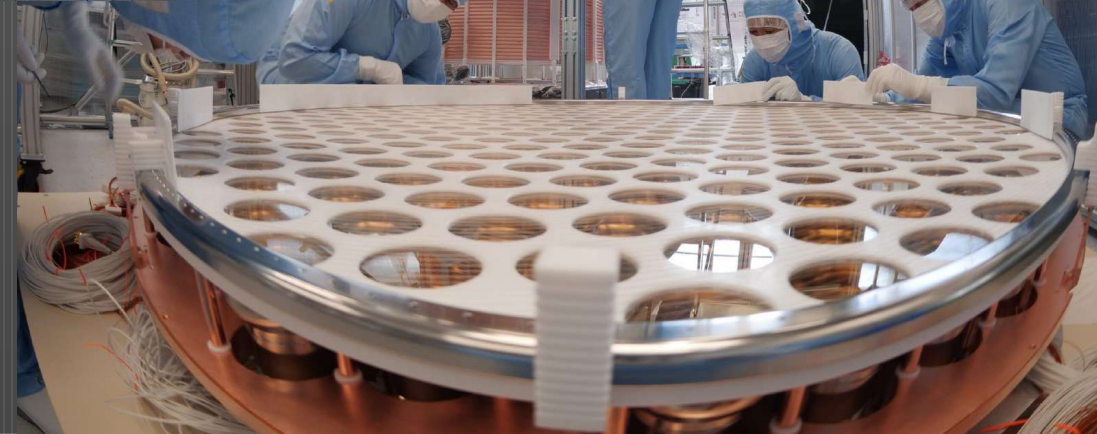
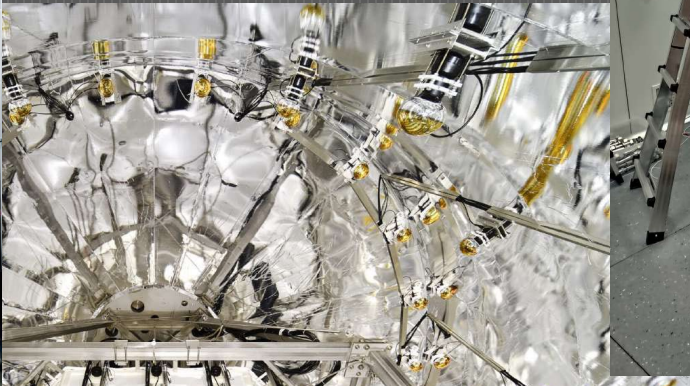
宇宙線研
森山先生

XENON-nT 検出器

Credit: XENON Collaboration

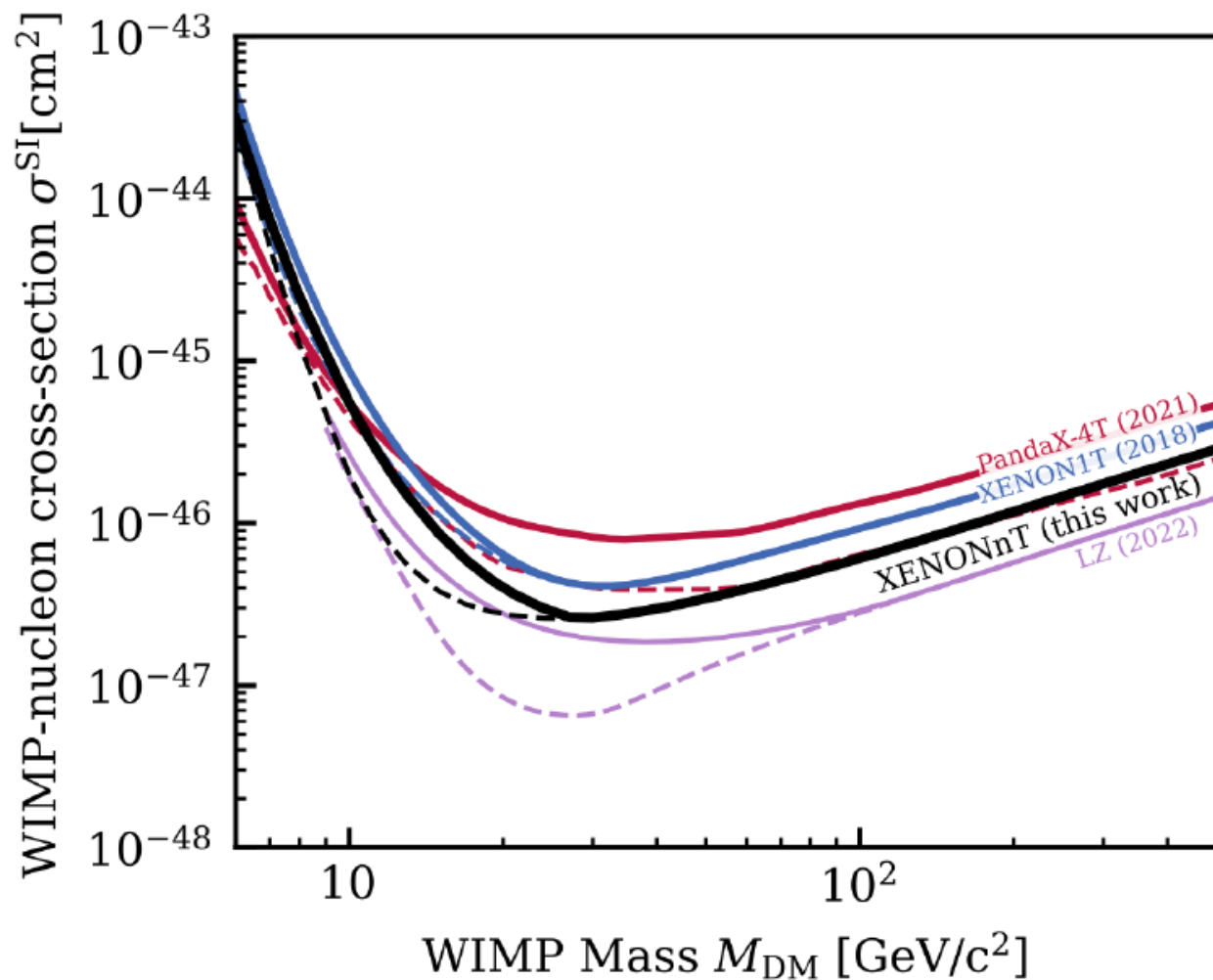


Gd水シールド←SK-Gd
完璧な中性子シールド



最新結果

3つのキセノン検出器が切磋琢磨し
最高感度を更新しつつ探索している



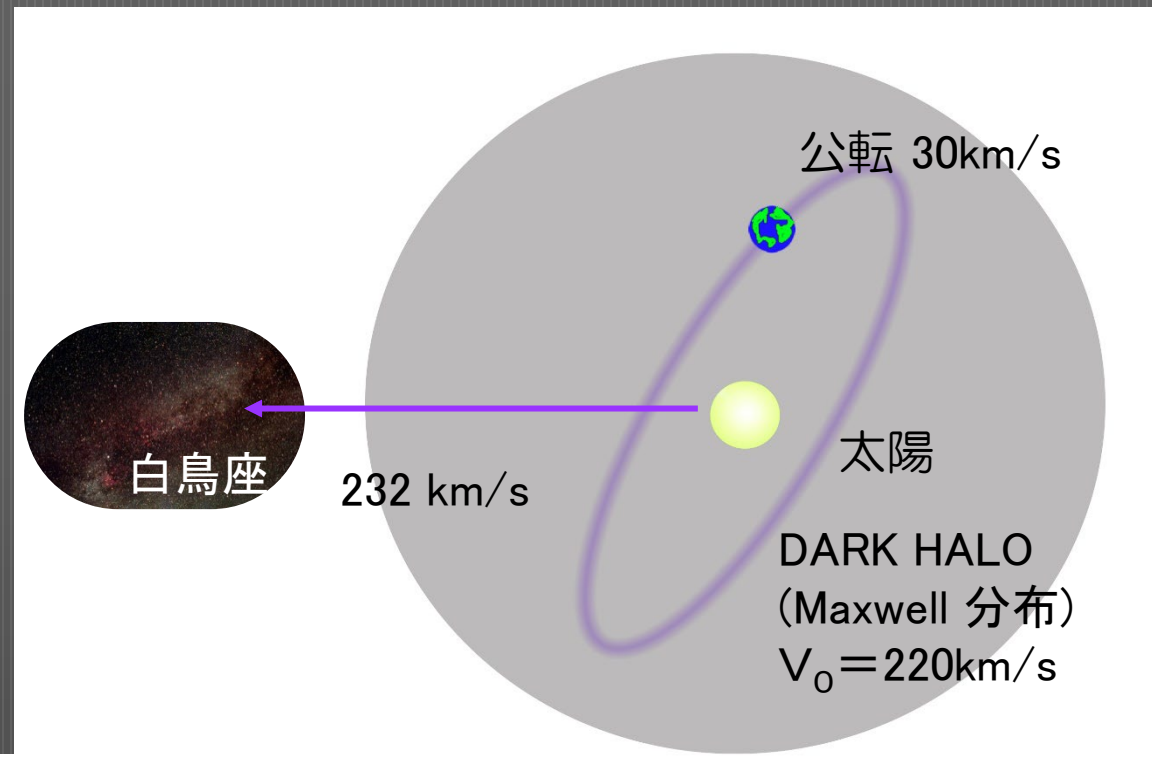
PandaX-4T: Phys. Rev. Lett. **127**, 261802

LZ: Phys. Rev. Lett. **131**, 041002 (2023)

XENONnT: Phys. Rev. Lett. **131**, 041003 (2023)

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！



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

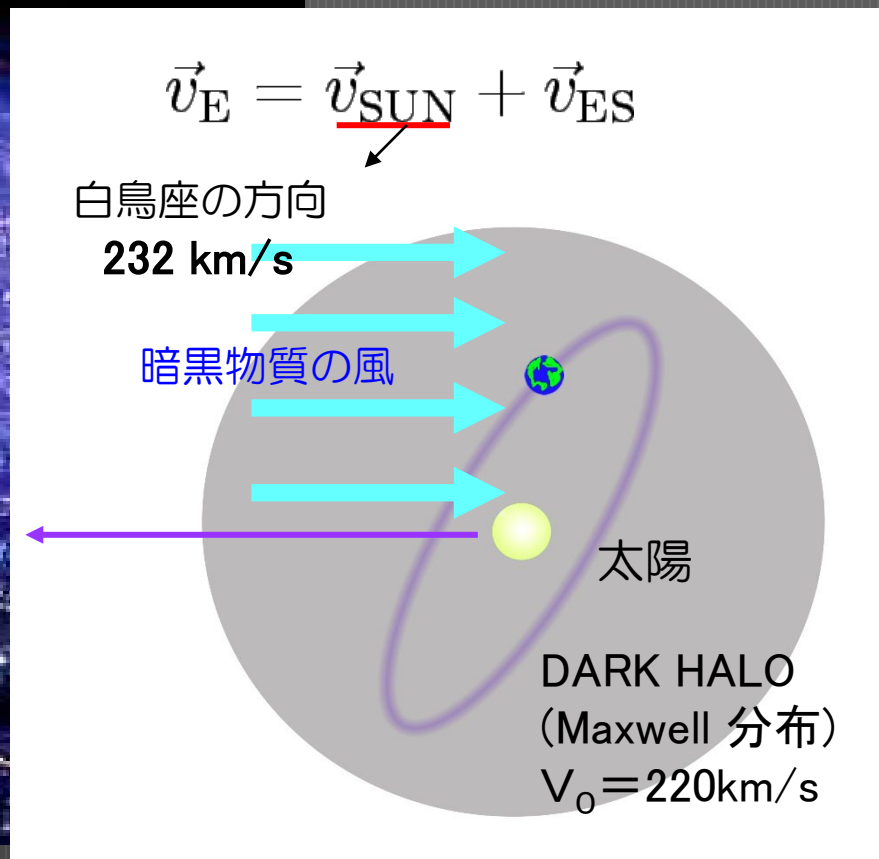
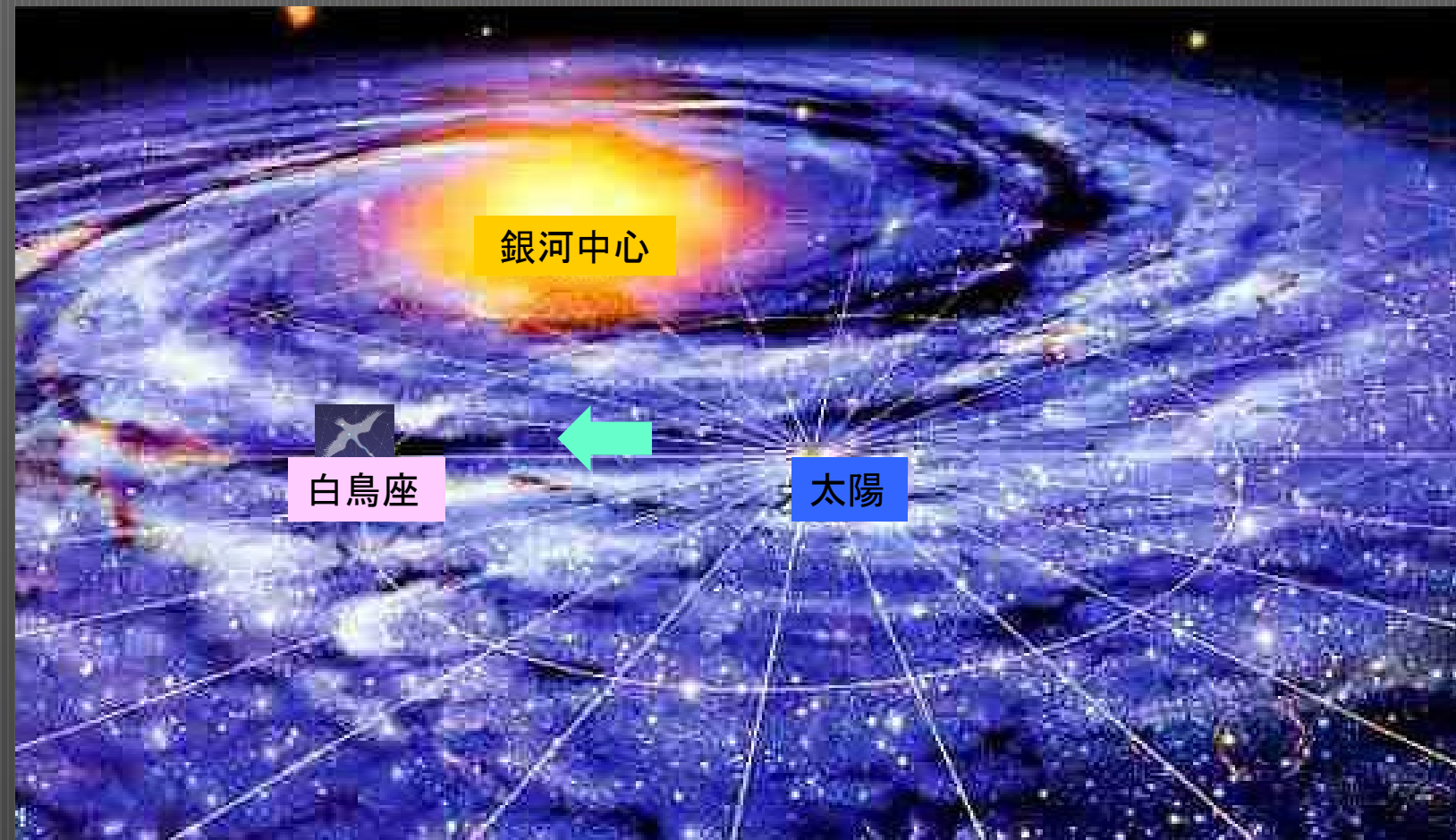
\vec{v}_{SUN} → 白鳥座の方向 232 km/s
 \vec{v}_{ES} → 公転 30 km/s

→ $f(\vec{v} + \vec{v}_E)$ 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

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



異方性発光シンチレータ ZnWO₄

- 発光量が粒子の入射方向で変化する結晶
 - 単斜晶系Wolframite typeシンチレータ-

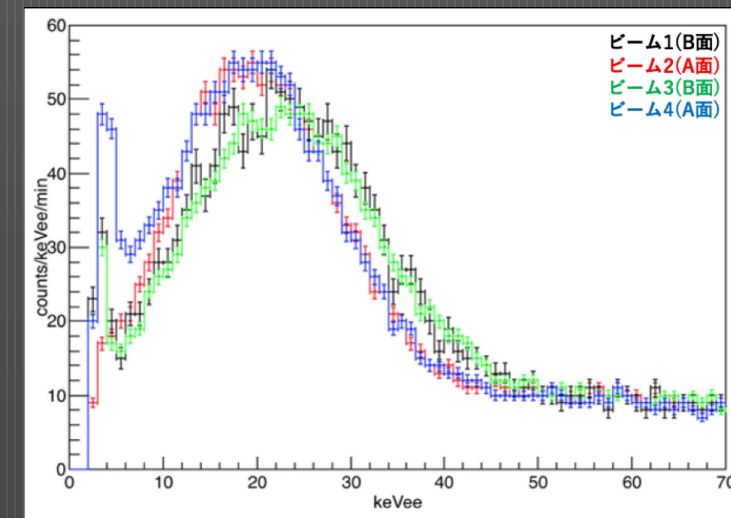
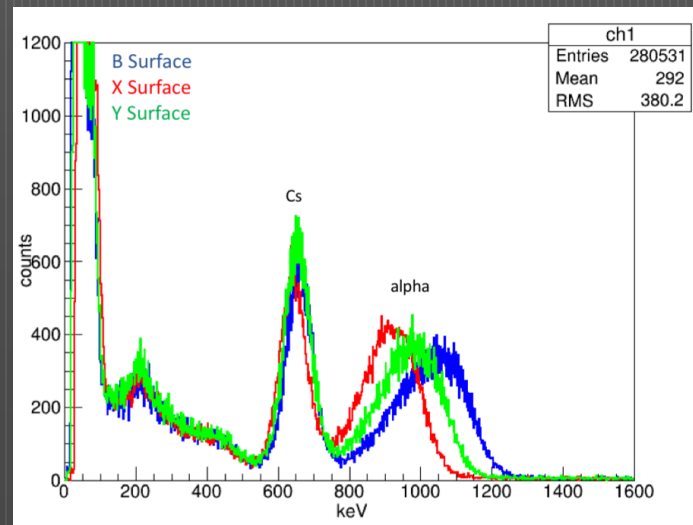
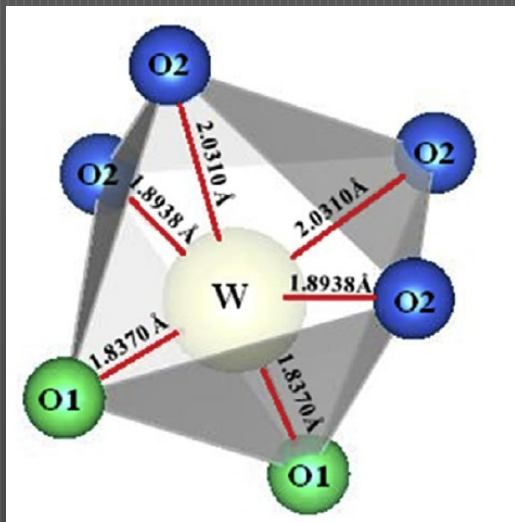
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144
145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162
163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198
199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216
217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234
235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252

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

~15%程度

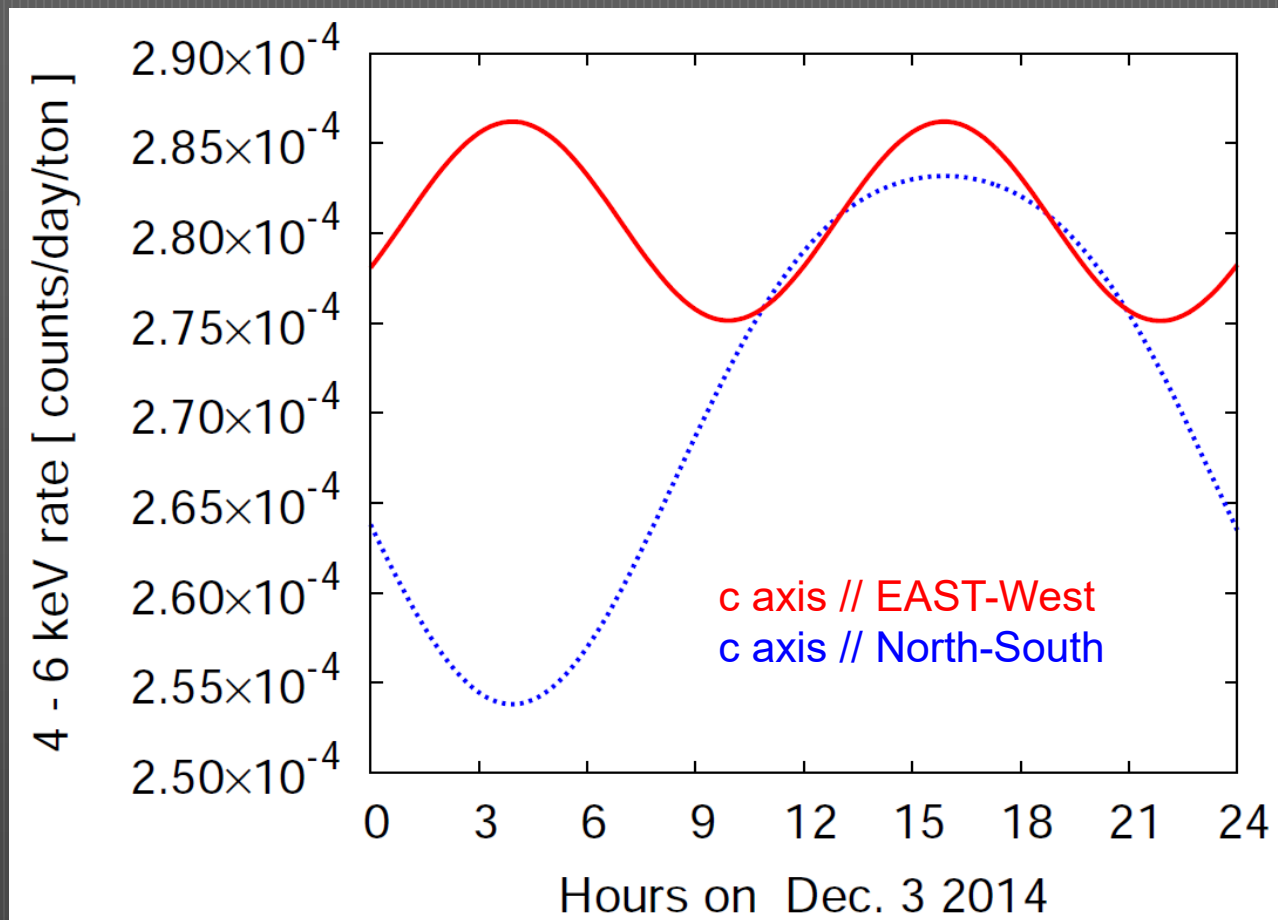
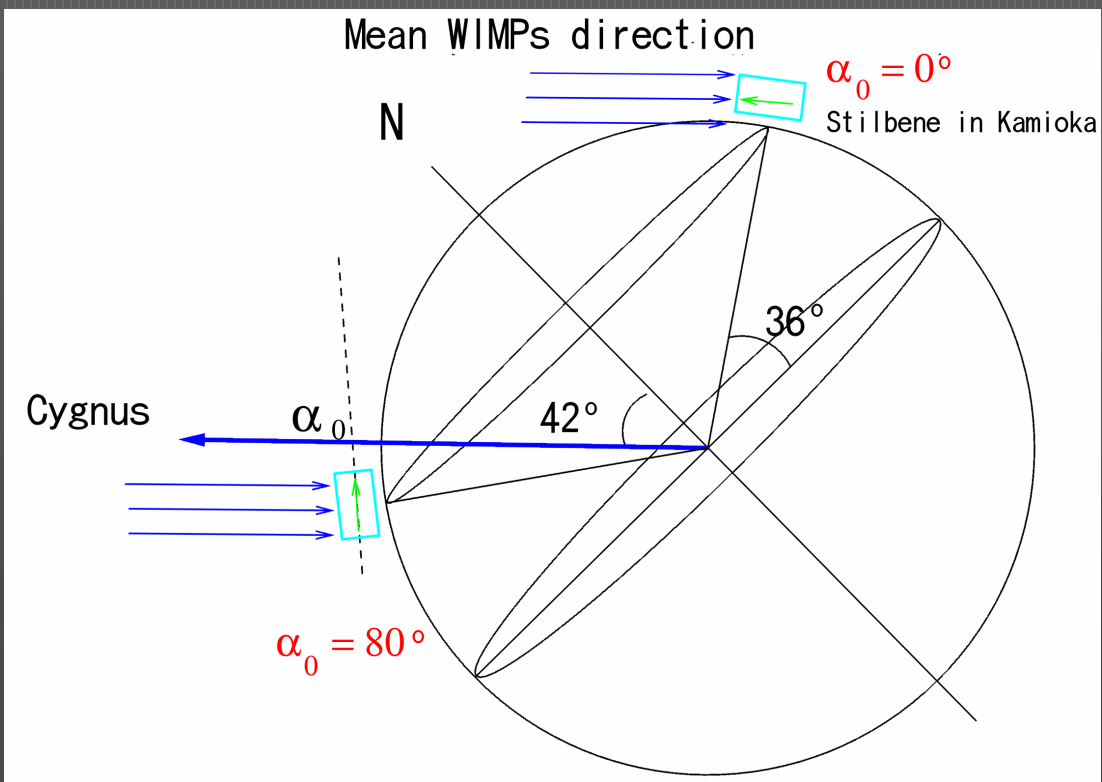
γ線とα線に対する応答

中性子に対する応答



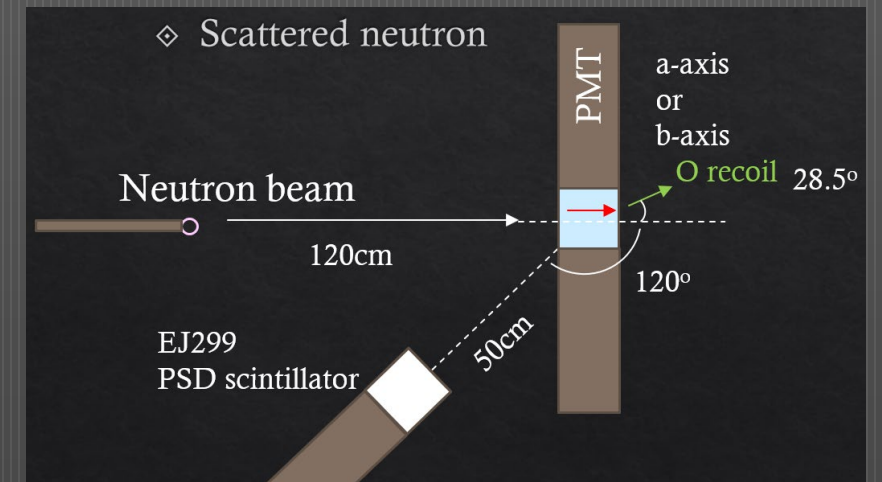
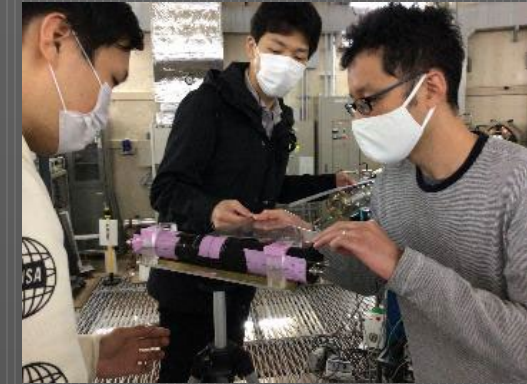
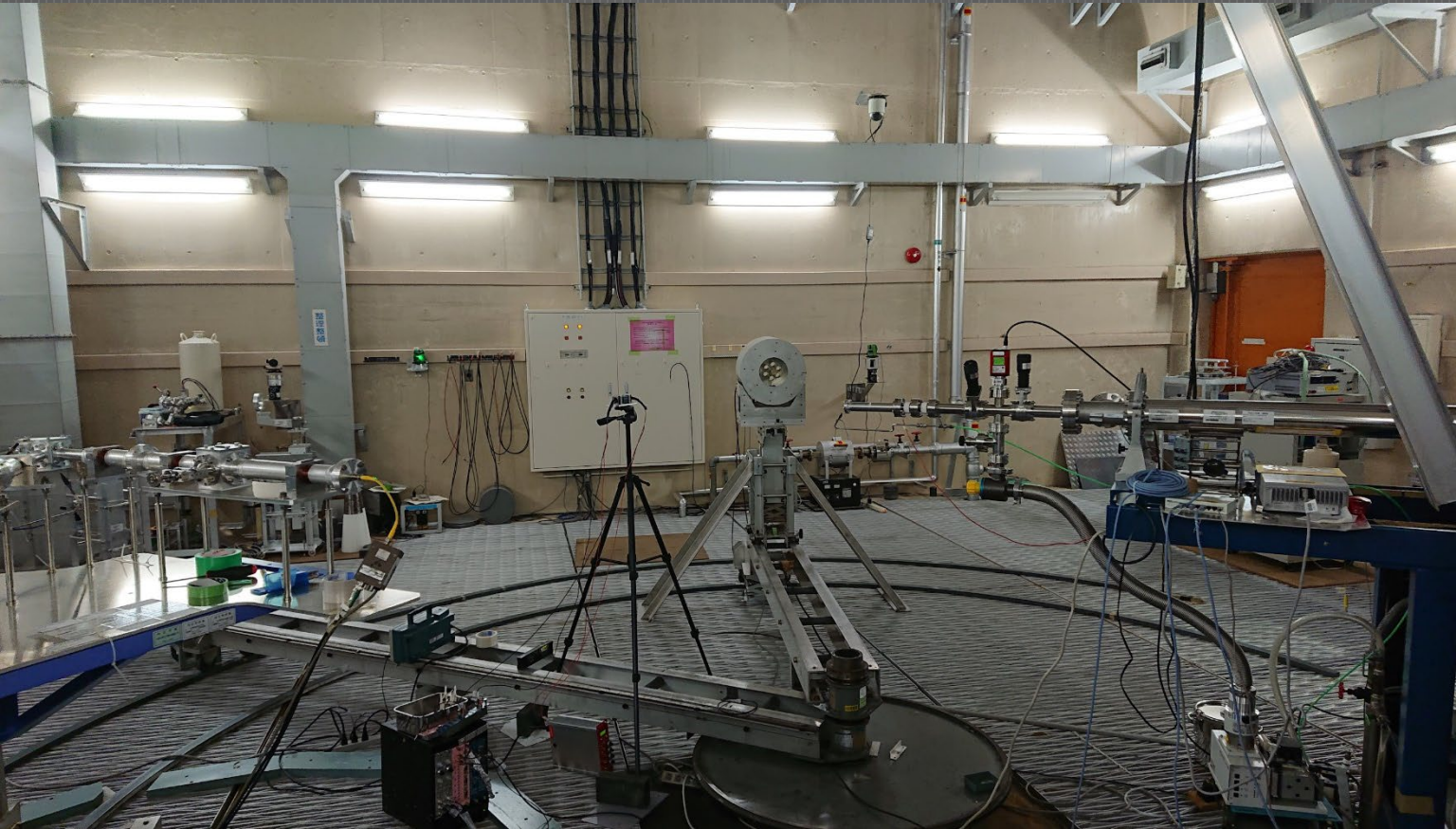
どう使うか

- 完全な方向はわからないけれど神岡に置いておくと



(暗黒物質の代わりに)中性子ビームでの応答測定の様子

産総研(つくば) 中性子標準ビームライン



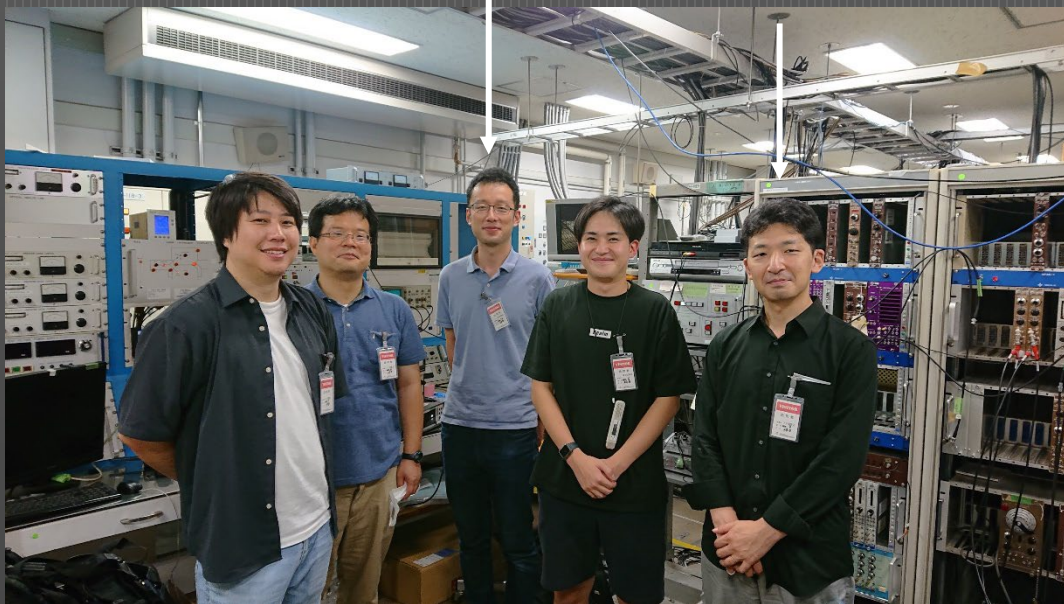
ちいさなグループでの実験

宇宙線研、東大理、東北大、韓国IBS

修士論文がPublish paperに！

東大理
中島先生

関谷



PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 023C01 (8 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptz168

Anisotropic response measurements of ZnWO_4 scintillators to neutrons for developing a direction-sensitive dark matter detector

Juan W. Pedersen^{1*}, Hiroyuki Sekiya^{2,3}, Koichi Ichimura^{2,3}

¹Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

²Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Hida, Gifu 506-1205, Japan

³Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), the University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

*E-mail: pedersen@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

Received October 18, 2019; Revised December 19, 2019; Accepted December 19, 2019; Published February 22, 2020

.....
The scintillation yields of
cles. This property can be
the ZnWO_4 light yields re
recoils (quenching factor)
irradiated with a quasi-mc
both surfaces for the oxyg
quenching factors of the
confirming 15.3% anisotr
.....

Subject Index C34, C

PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. **2022** 013C01(7 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptab132

Precise measurement of the scintillation decay constant of the ZnWO_4 crystal

M. Shibata^{1*}, H. Sekiya^{1,2}, and K. Ichimura³

¹Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Hida, Gifu 506-1205, Japan

²Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo, Institutes for Advanced Study, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

³Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

*E-mail: mshibata@km.icrr.u-tokyo.ac.jp

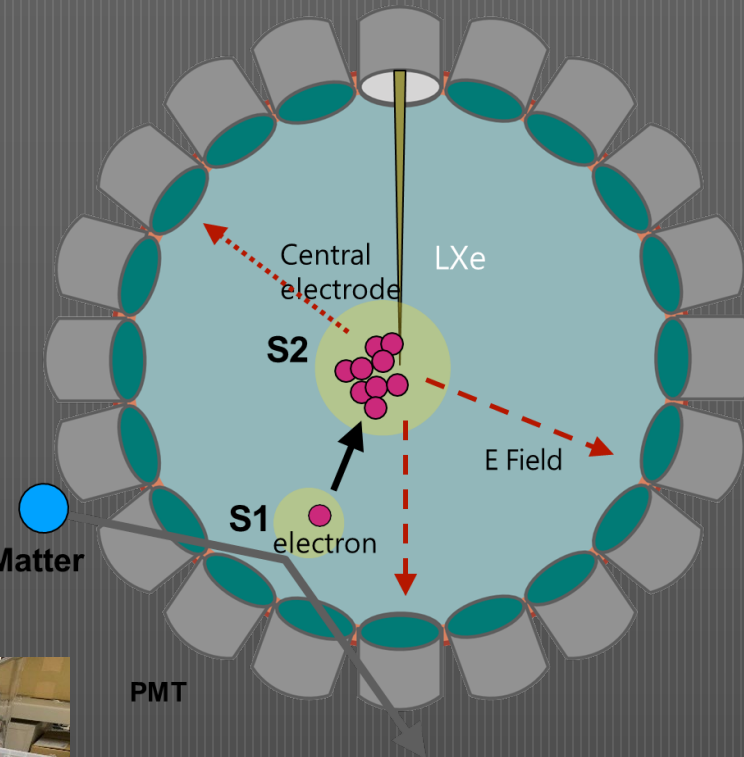
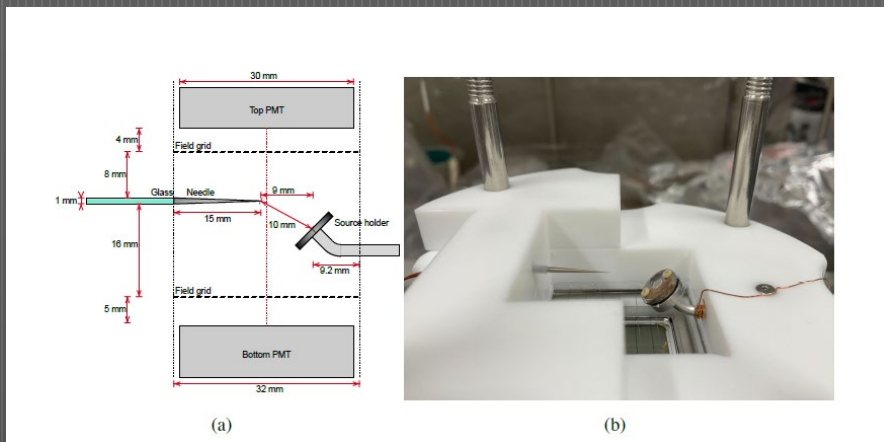
Received August 27, 2021; Revised October 4, 2021; Accepted October 16, 2021; Published October 21, 2021

.....
The scintillation decay time constant of a ZnWO_4 crystal irradiated with α -particles from ^{241}Am was precisely investigated, and was found to depend on the incident direction of the α -particles on the crystal. The longest decay time constant ($24.3 \pm 0.6 \mu\text{s}$) was obtained on the surface perpendicular to the b -axis of the crystal (surface B). On surfaces A and C, the decay constants were 20.0 and $21.3 \pm 0.2 \mu\text{s}$, respectively. The scintillation yield of ZnWO_4 was also anisotropic and depended on the incident direction of the heavy particles. The maximum yield was achieved on surface B, suggesting a correlation between the light yield and the scintillation decay time constant of ZnWO_4 crystals.
.....

Subject Index C40, C43, H20

将来の超大型キセノン検出器を見据え

- 液体キセノンのみの1相式検出器開発
 - 現状3cmサイズ@神岡地上



arXiv:2401.02327v1 [physics.ins-det] 4 Jan 2024

Measurement of scintillation from proportional electron multiplication in liquid xenon using a needle

P. Knights,^{a,1} H. Sekiya,^{b,c} I. Katsioulas,^d K. Nikolopoulos,^{a,e} K. Kanzawa,^f and I. Giomataris^g

^aSchool of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Edgbaston, B15 2TT, Birmingham, United Kingdom

^bKamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, 456 Higashi-Mizumi, Kamioka, Gifu, 506-1205, Japan

^cKavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8583, Japan

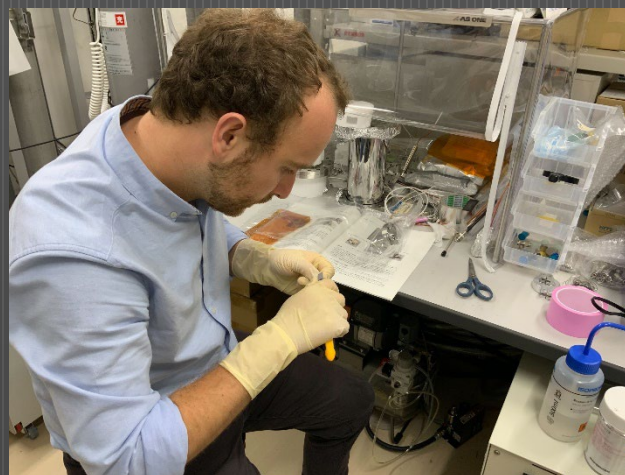
^dEuropean Spallation Source, PO Box 176, 22100, Lund, Sweden

^eInstitute of Experimental Physics, University of Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761, Hamburg, Germany

^fInstitute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

^gIRFU, CEA, Université Paris-Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

E-mail: p.r.knights@bham.ac.uk



イギリスBirmingham大
スウェーデンESSとの共同研究

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、5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。