ダークマター探索

伊藤 慎太郎 (KEK)

Flavor Physics Workshop 2021

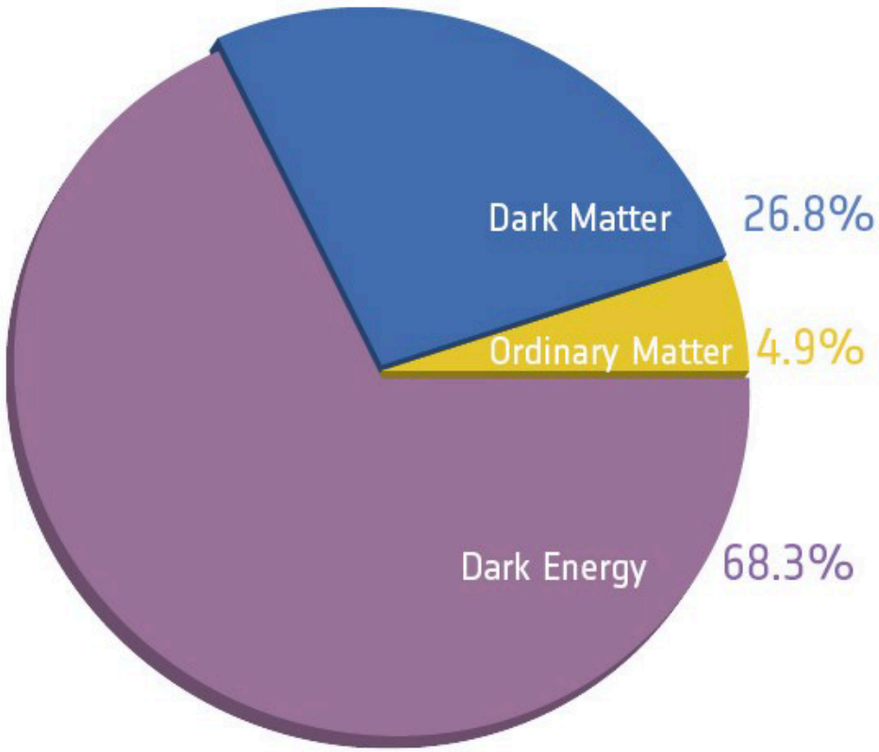
自己紹介

- これまでの研究
  - 2011年〜現在: PIENU実験 (TRIUMF)
    - 荷電パイ中間子の崩壊分岐比の精密測定
    - Dark sector探索など
  - 2016年〜2021年: Super-Kamiokande / SK-Gd実験
    - SK-Gdの推進
    - ニュートリノ解析など
  - 2021年4月よりBelle-II: ダークマター探索
- 今日の話
  - ダークマターそのものについて
  - ダークマター探索実験 (Belle-IIにフォーカスしたものは昨年を参照)
    - ➡ Belle-IIにフォーカスせず、他の実験を例にして話します。
    - ➡ 実験の人にも理論の人にも学部生の人にも分かるように話します。

ダークマター(暗黒物質)とは？？？

- 光らない物質(光学的に観測できない)。
- 宇宙の1/4を占める(我々が観測できているのはたかだか約5%)。
- 質量をもつ(どのくらいなのかは分かっていない)。
- 電荷をもたない。
- 相互作用は非常に弱い(どのくらいなのかは分かっていない)。
- 安定している(長寿命)。
- 冷たい(飛び回っていない)。

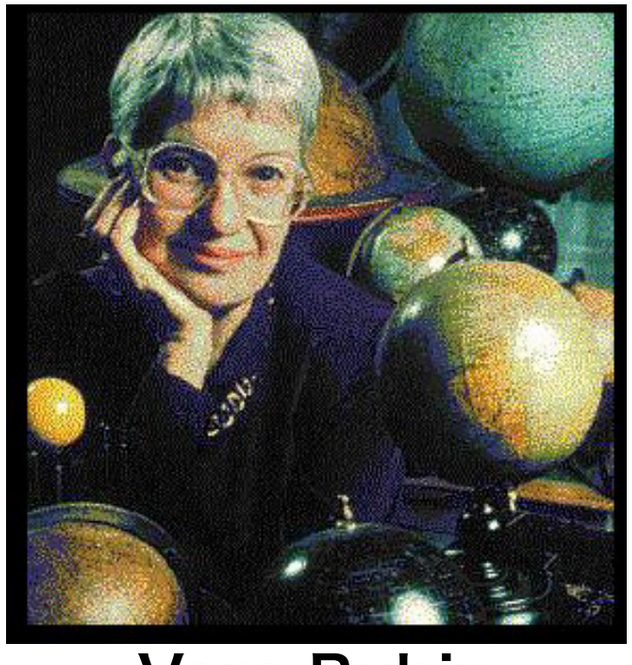
いくつかの観測から、重力相互作用をする何かが存在することは示唆されているが、未だ観測できていない。



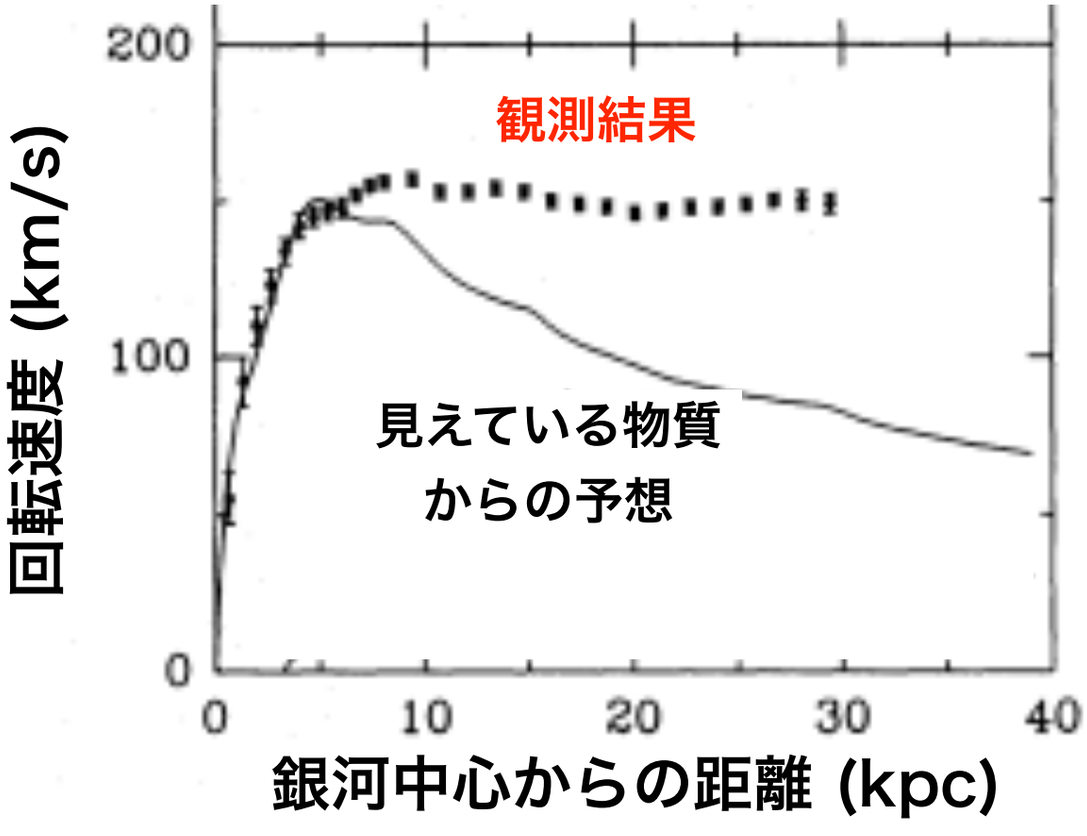
宇宙の組成

ダークマター存在の証拠1

- 初めてダークマターについて議論されたのは1933年 by F. Zwicky.
  - 「かみの毛座銀河団内の銀河が、見える銀河の重力だけでは説明できない速度で運動している!!!」
- 1970年代にV. Rubinらにより本格的に観測。
  - ➡ 高速で回転するには強い引力が必要。
  - **目に見える星だけでは足りない!!!**
  - **「目に見えない」何かがあるはず!!!**



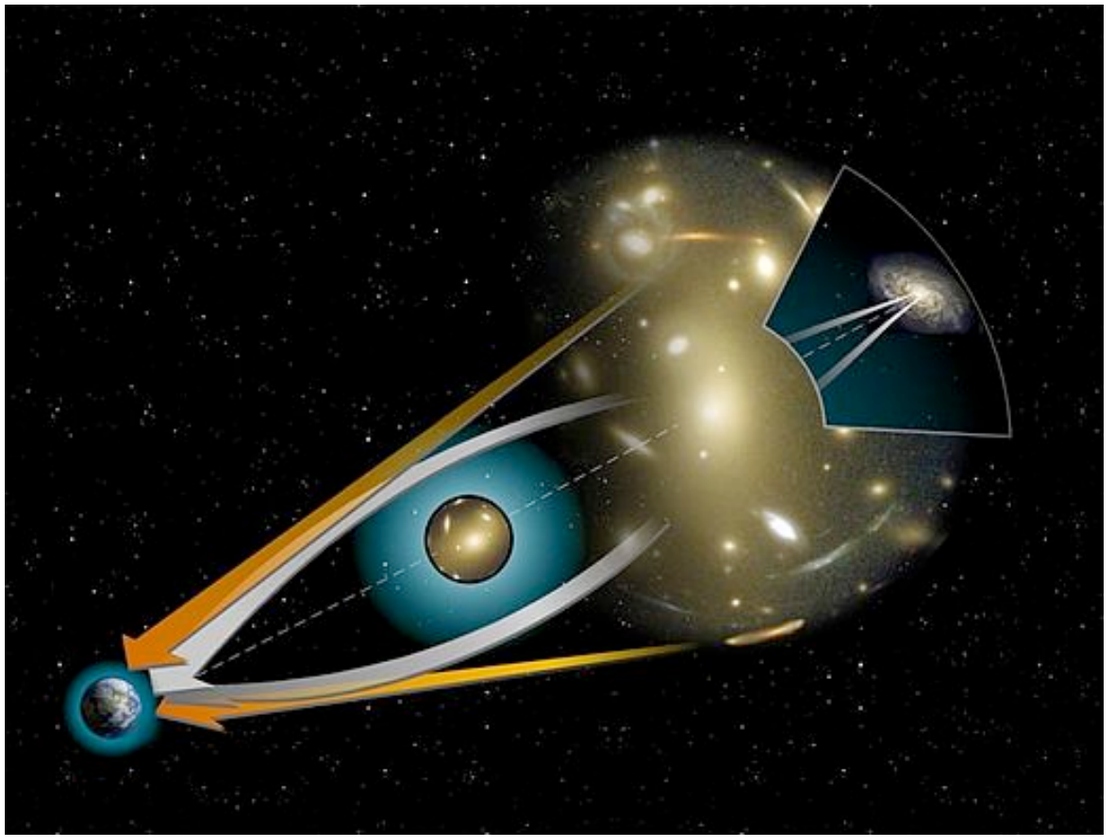
Vera Rubin



ダークマター存在の証拠2

- 重力レンズ: 光が曲げられる。
  - 手前の銀河により、遠方の銀河が円弧状に曲がって見える。
  - 光学的観測による銀河の質量と曲がり方が合わない。

    ➡ **見えない重力相互作用をする何かがたくさんある。**

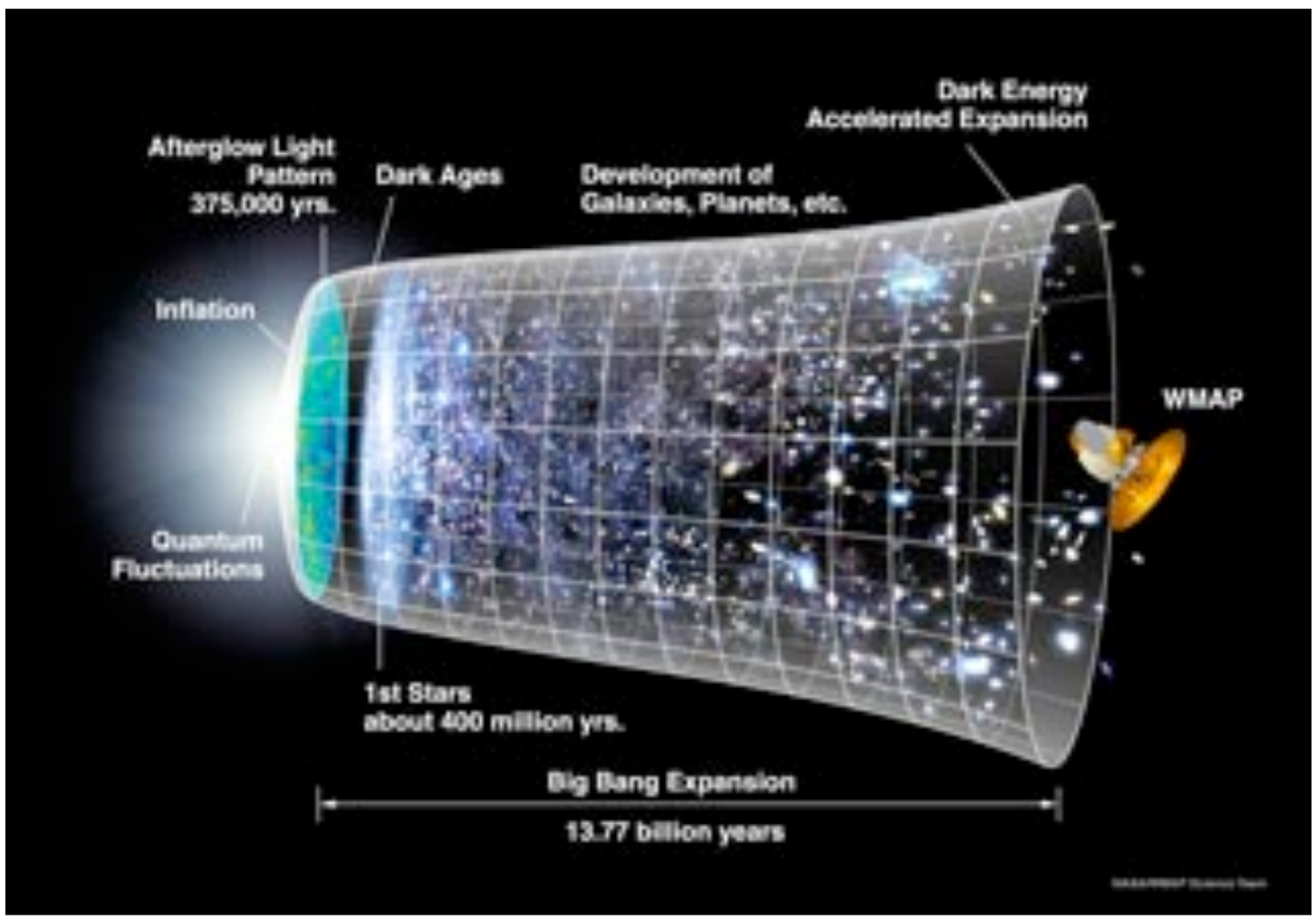


ダークマター存在の証拠3

- **宇宙マイクロ波背景放射** (CMB: cosmic microwave background)

➡ ざっくり言うと「宇宙最古の電磁波」

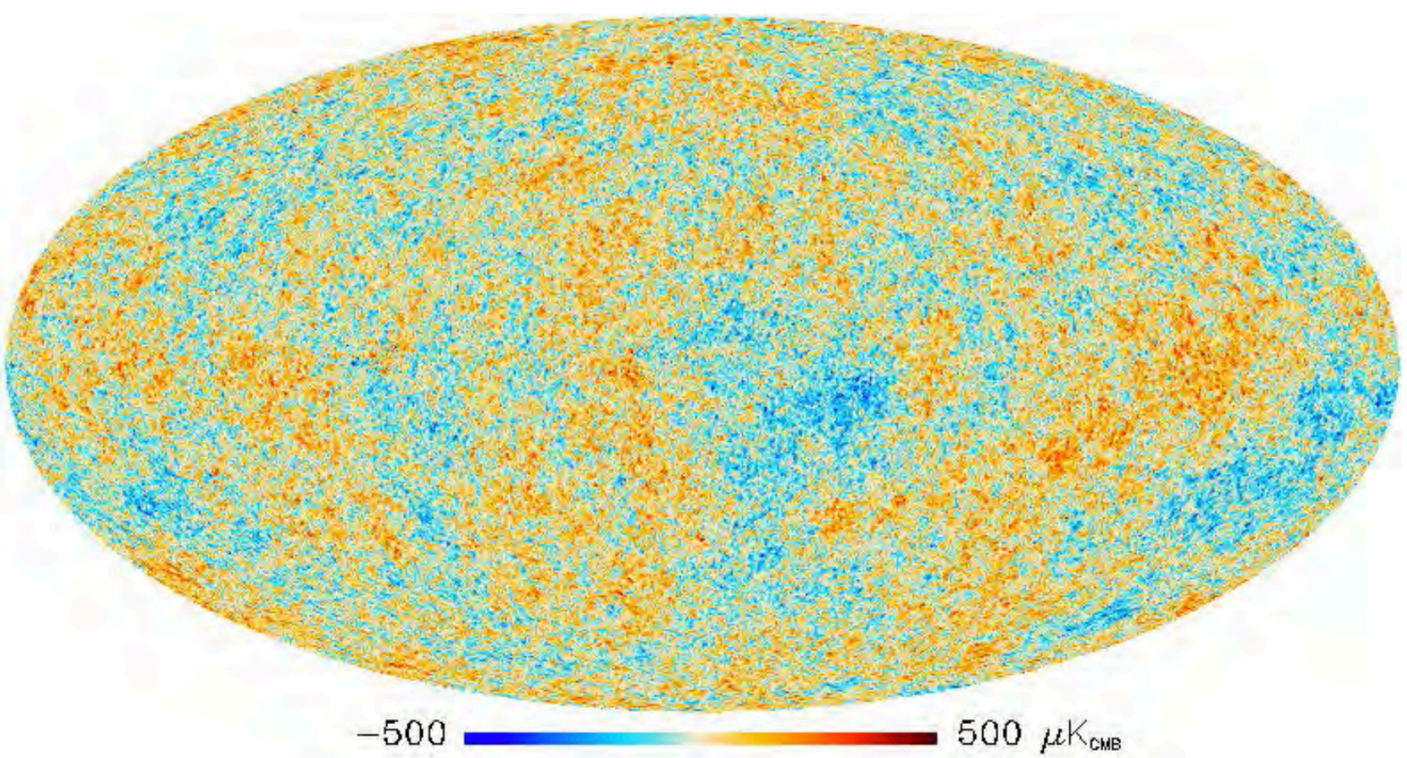
- ビッグバン直後の宇宙は非常に高温。
- 宇宙の膨張とともに、温度が下がってきた。
- 電磁波が直進できるようになった。今も宇宙空間を満たし続けている。

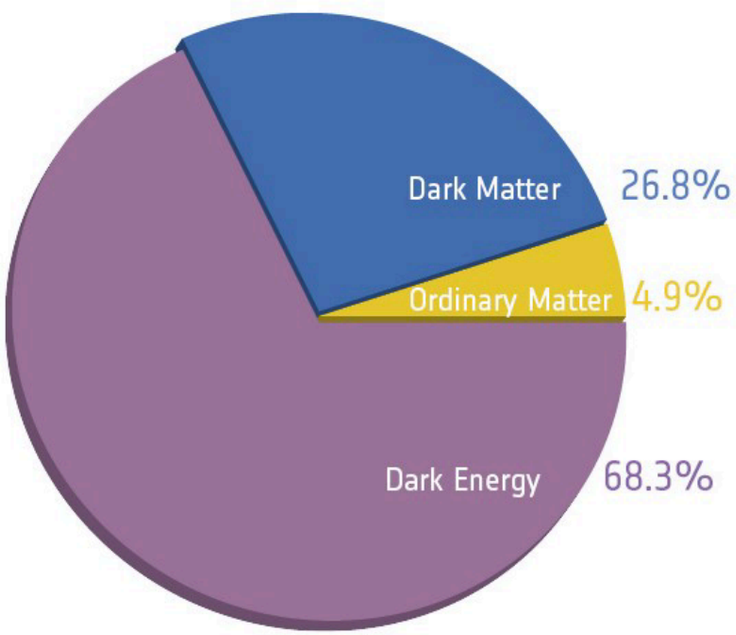


ダークマター存在の証拠3

- 宇宙の膨張とともに波長が伸び、現在観測している宇宙マイクロ波背景放射の温度は～2.7 K。
- NASAのCOBEやWMAP, ESAのPLANCKによる観測によって、温度に10万分の1℃の**「ムラ」**があることが分かっている。
- 温度のムラは物質の集まりの差を示す。

➡ 宇宙の進化や物質の組成などの情報。





などなど、存在を示唆するものはたくさんあるが、未観測。

ダークマターの候補1 WIMP

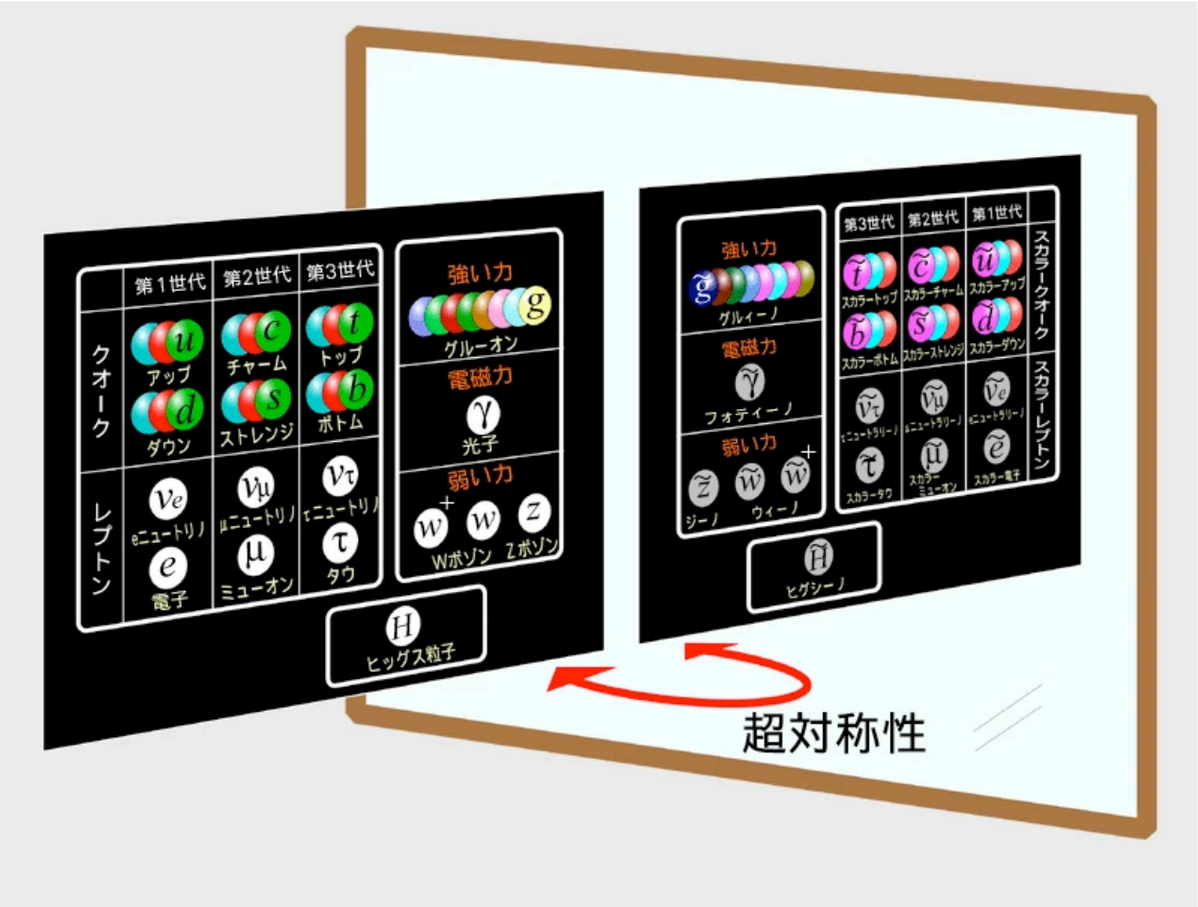
- Weakly interacting massive particle.

  ➡ **超対称性粒子**(ニュートラリーノなど、SUSY)が候補。

- 弱い相互作用のスケールの生成・対消滅断面積として

  残留粒子を見積もると、観測量と一致する(**WIMPの奇跡**)。

- ただ、今の所LHCやMEGなどで、SUSYは見つかっていない。



ダークマターの候補2 Axion

- Axionとは、強い相互作用におけるCP問題を解決するために導入された仮想粒子である。
- 標準理論の量子色力学(QCD)でのラグランジアンには、CP対称性を破る項が含まれている。

$$\cancel{\mathscr{L} = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} G_{a\mu\nu} \tilde{G}^{a\mu\nu}}$$

- この項は中性子の電気双極子モーメント(EDM)を生み出す。
  - ➡ 実験により厳しい制限: $\theta \lesssim 10^{-10}$
- Peccei & Quinn(PQ)対称性の導入(PRL 38 (1977) 1440)。
  - ➡ PQ対称性が自発的に破れた時、この項が打ち消される。
  - ➡ <u>この時に現れる擬Nambu·Goldstonボソンがaxion。</u>

    S.Weinberg, PRL 40 (1978) 223 & F.Wilczek, PRL 40 (1978) 271

ダークマターの候補2 Axion

- QCD axionの質量m_aと崩壊定数f_a: $\cancel{m_a f_a \sim m_\pi f_\pi}$

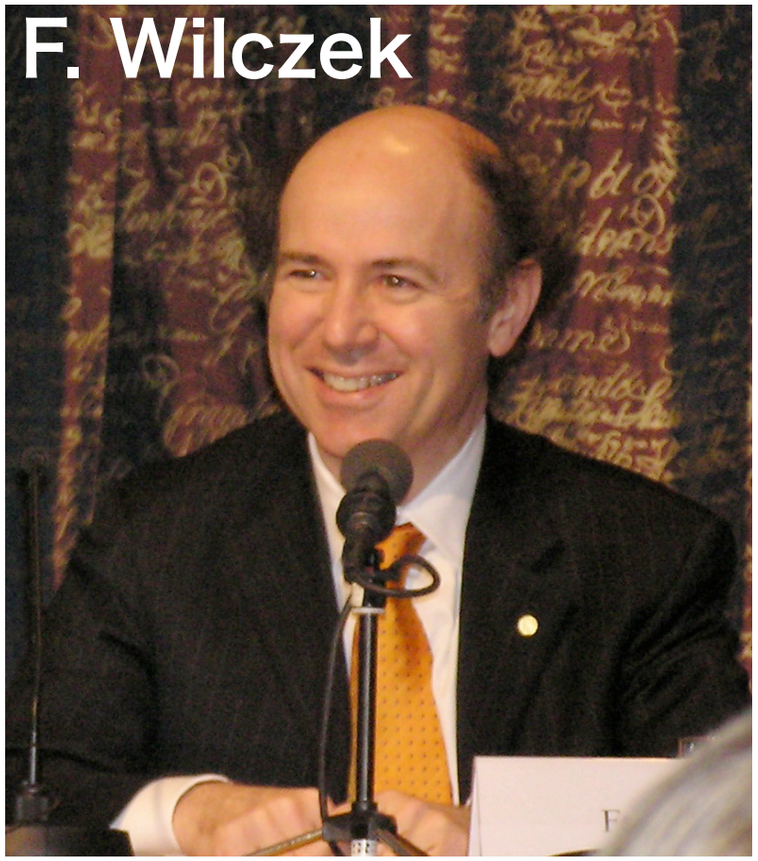
  ➡ Axionがダークマターなら、いくつかの観測から$10^{-6} \lesssim m_a \lesssim 10^{-3}$ eV。

- Axion like particles (ALPs)

  ➡ 質量と崩壊定数の制限をなくし、より自由度を増やしたもの。

  ➡ モデルは色々ある。

様々なaxion



“I named them after a laundry detergent, since they clean up a problem.”

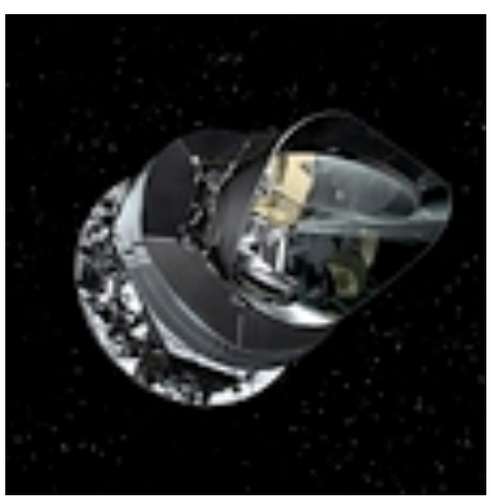
ダークマターの探索方法

- 主に3つ。

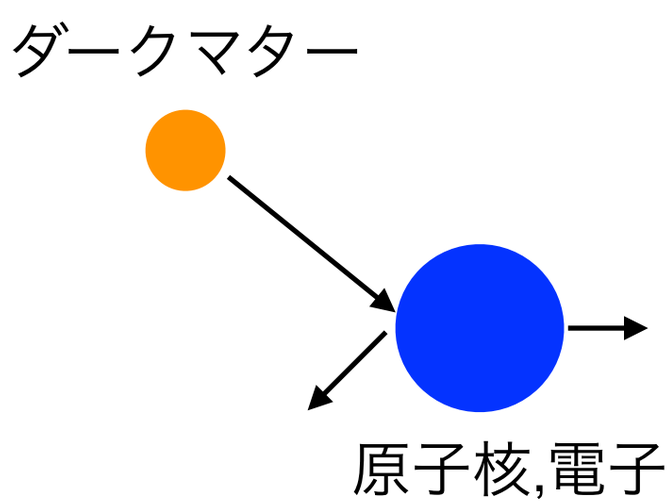
  1.間接探索: 暗黒物質同士が対消滅して出てきた信号(ガンマ線、電子、ニュートリノ)などを観測(衛星や望遠鏡など、今日は省略)。

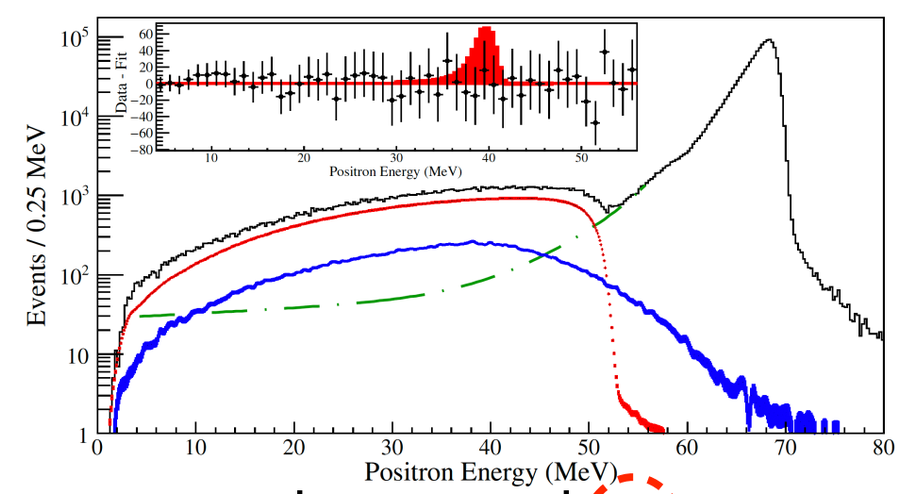
  2.直接探索: ダークマターが物に当たったのを観測する。

  3.加速器: 粒子を作って崩壊させ、崩壊したものを測定する。



Planck衛星





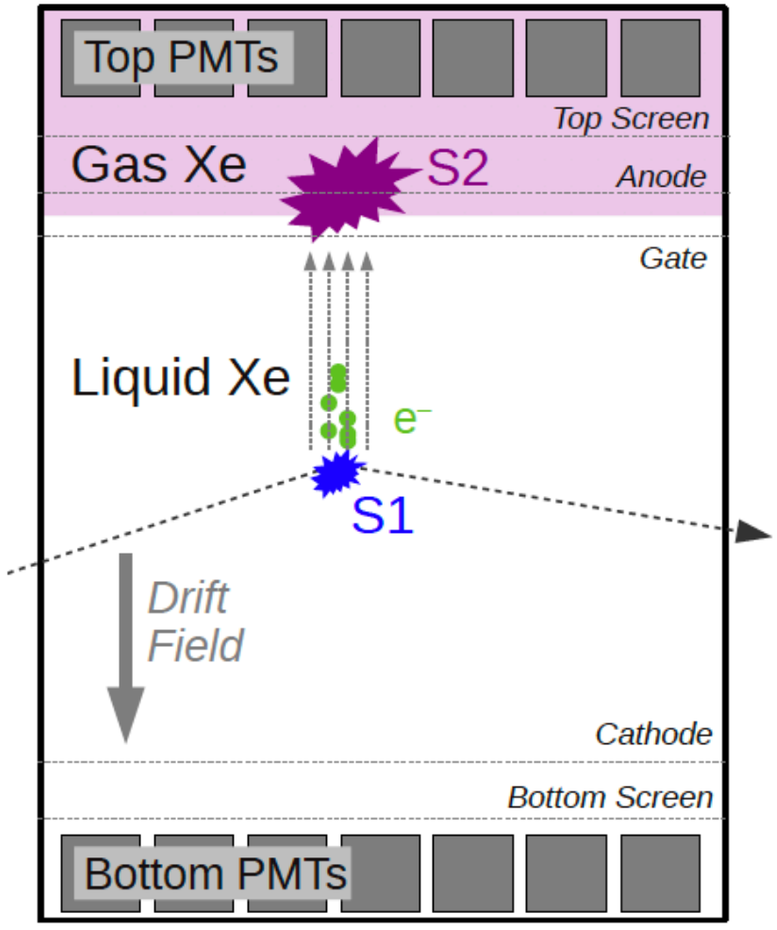
$$\pi^+ \to e^+ X$$

見えない

直接探索方法

- ダークマターがXeに当たって発光する(先発信号、S1)。
- コンプトン散乱によって電子が発生し、電場で引っ張られて、Xeガスに当たって増幅する(後発信号、S2)。
- 光を上下のPMTで測定する。S1,S2でバックグラウンドと区別。

➡ あとは光るのを待つだけ？？？



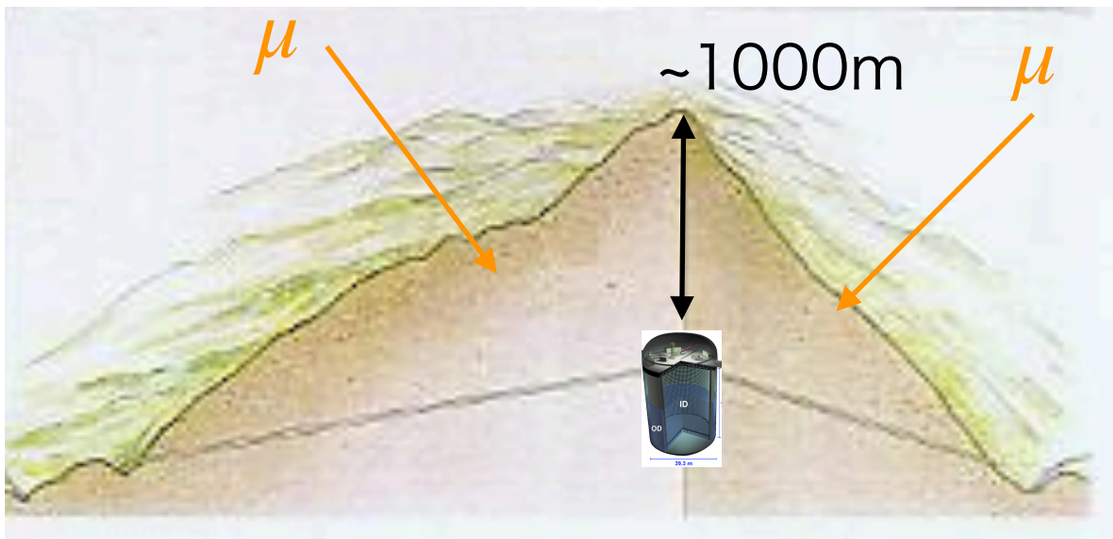
XENON1Tを例に

- 参考にSuper-Kamiokandeでは、、、
- 太陽ニュートリノは1秒間1cm^{2}あたり、約660億個やってきている。
- これを5万トンの水タンクで測ると、、、

➡ 1日当たり見えるのは20個くらい。。。こりゃ大変。。。

(余談ですが、)地下実験

- ダークマターやニュートリノなどの直接探索実験は**地下でやる。**
  - 宇宙線バックグラウンドを除去するため(地上だと手のひらに1個/秒)。
  - SK: 高さ1000mの山の中にあるので、2個/秒/SKまで減らせる。
- **環境バックグラウンド(放射線不純物)を減らすことが鍵。**
  - keV~MeVレベルの反応が稀な事象を見るから。
  - 我々の周りはウランやトリウムなどでいっぱい(もちろん人体には影響がないレベルであり、”地下実験視点”でいっぱいということ)。
  - 検出器(水、キセノン、マテリアルなど)や空気中のラドンなど。



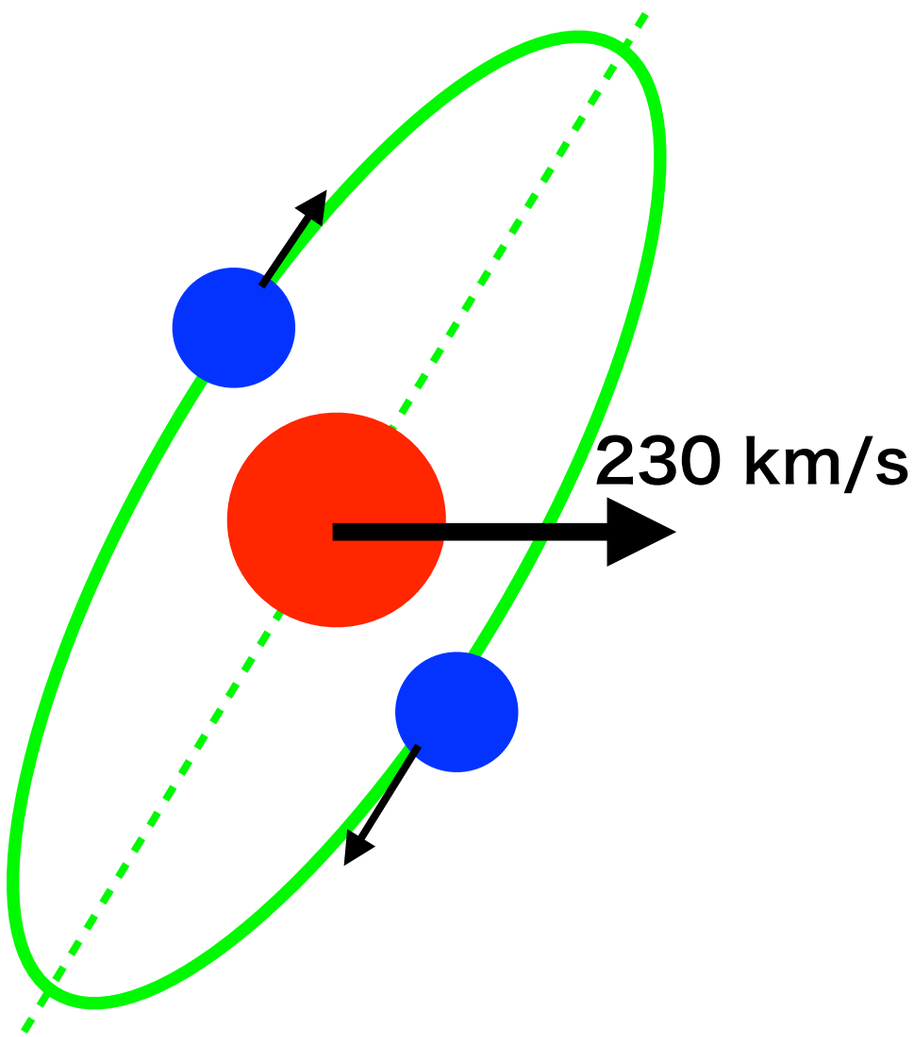
ダークマターの季節変動

- 太陽系は秒速230 kmで運動している。

  ➡ ダークマターの海に向かっている。

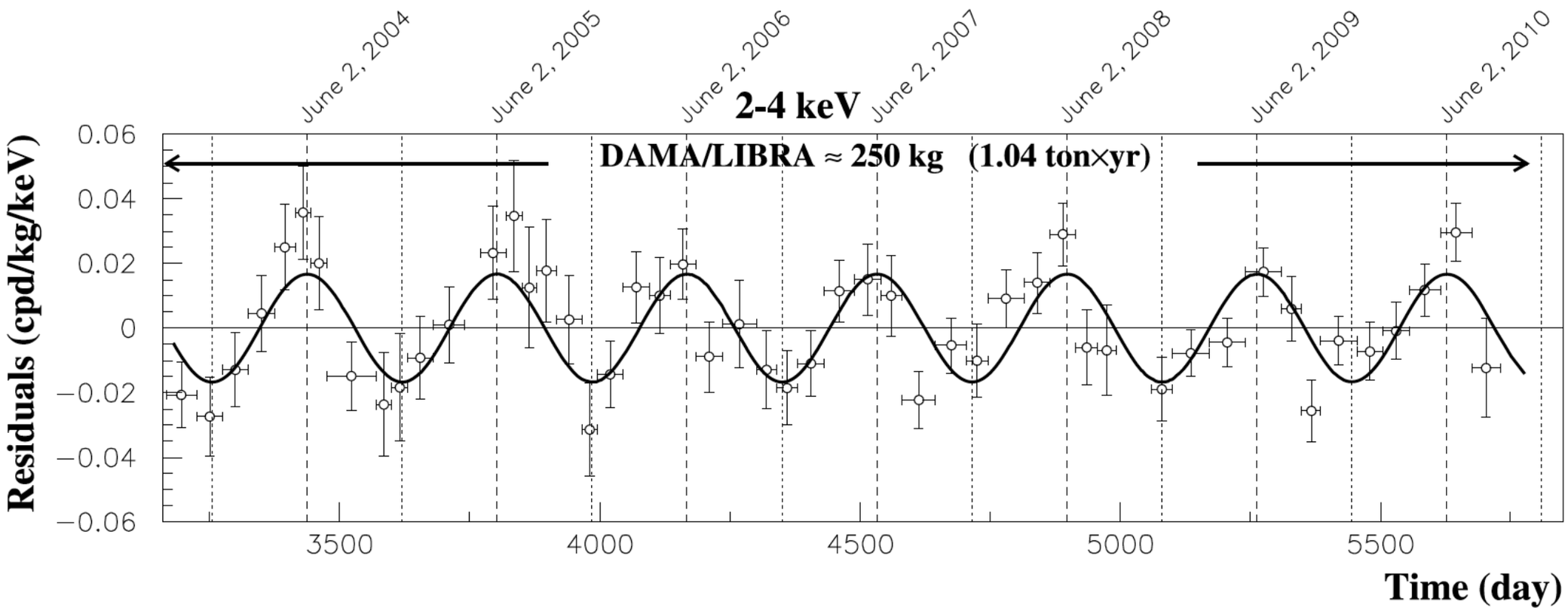
- 地球は太陽の周りを公転しているので、季節によってダークマターに対する相対速度が変動する(6月Max. 12月Min.)。

  ➡ 季節によって検出数が変動する。



ダークマターの観測？？？

- DAMA/NaI, DAMA/LIBRA実験@イタリア (EPJC 73 (2013) 2648)
- NaIを用いたダークマター探索。
- 9.2σで季節変動が見えた!?



- ほんまかいな？？？
- 他のダークマター実験では一切観測されておらず、棄却されている。

Solar Axion in XENON1T???

PHYSICAL REVIEW D **102,** 072004 (2020)

Featured in Physics

Excess electronic recoil events in XENON1T

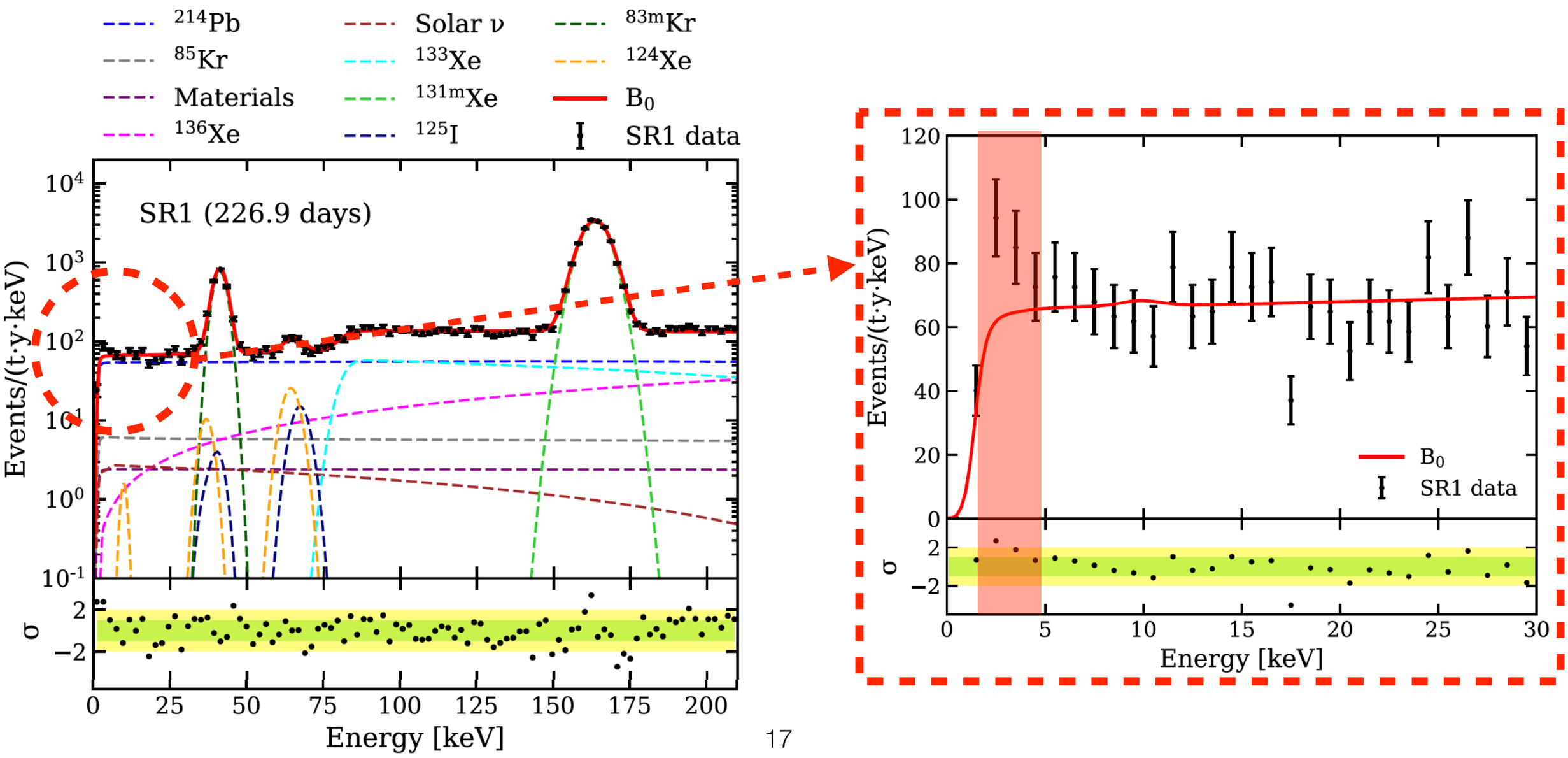
E. Aprile,[1] J. Aalbers,[2] F. Agostini,[3] M. Alfonsi,[4] L. Althueser,[5] F. D. Amaro,[6] V. C. Antochi,[2] E. Angelino,[7] J. R. Angevaare,[8] F. Arneodo,[9] D. Barge,[2] L. Baudis,[10] B. Bauermeister,[2] L. Bellagamba,[3] M. L. Benabderrahmane,[9] T. Berger,[11] A. Brown,[10] E. Brown,[11] S. Bruenner,[8] G. Bruno,[9] R. Budnik,[12,*] C. Capelli,[10] J. M. R. Cardoso,[6] D. Cichon,[13] B. Cimmino,[14] M. Clark,[15] D. Coderre,[16] A. P. Colijn,[8,†] J. Conrad,[2] J. P. Cussonneau,[17] M. P. Decowski,[8] A. Depoian,[15] P. Di Gangi,[3] A. Di Giovanni,[9] R. Di Stefano,[14] S. Diglio,[17] A. Elykov,[16] G. Eurin,[13] A. D. Ferella,[18,19] W. Fulgione,[7,19] P. Gaemers,[8] R. Gaior,[20] M. Galloway,[10,‡] F. Gao,[1] L. Grandi,[21] C. Hasterok,[13] C. Hils,[4] K. Hiraide,[22] L. Hoetzsch,[13] J. Howlett,[1] M. Iacovacci,[14] Y. Itow,[23] F. Joerg,[13] N. Kato,[22] S. Kazama,[23,§] M. Kobayashi,[1] G. Koltman,[12] A. Kopec,[15] H. Landsman,[12] R. F. Lang,[15] L. Levinson,[12] Q. Lin,[1] S. Lindemann,[16] M. Lindner,[13] F. Lombardi,[6] J. Long,[21] J. A. M. Lopes,[6,‖] E. López Fune,[20] C. Macolino,[24] J. Mahlstedt,[2] A. Mancuso,[3] L. Manenti,[9] A. Manfredini,[10] F. Marignetti,[14] T. Marrodán Undagoitia,[13] K. Martens,[22] J. Masbou,[17] D. Masson,[16] S. Mastroianni,[14] M. Messina,[19] K. Miuchi,[25] K. Mizukoshi,[25] A. Molinario,[19] K. Morå,[1,2] S. Moriyama,[22] Y. Mosbacher,[12] M. Murra,[5] J. Naganoma,[19] K. Ni,[26] U. Oberlack,[4] K. Odgers,[11] J. Palacio,[13,17] B. Pelssers,[2] R. Peres,[10] J. Pienaar,[21] V. Pizzella,[13] G. Plante,[1] J. Qin,[15] H. Qiu,[12] D. Ramírez García,[16] S. Reichard,[10] A. Rocchetti,[16] N. Rupp,[13] J. M. F. dos Santos,[6] G. Sartorelli,[3] N. Šarčević,[16] M. Scheibelhut,[4] J. Schreiner,[13] D. Schulte,[5] M. Schumann,[16] L. Scotto Lavina,[20] M. Selvi,[3] F. Semeria,[3] P. Shagin,[27] E. Shockley,[21,¶] M. Silva,[6] H. Simgen,[13] A. Takeda,[22] C. Therreau,[17] D. Thers,[17] F. Toschi,[16] G. Trinchero,[7] C. Tunnell,[27] M. Vargas,[5] G. Volta,[10] H. Wang,[28] Y. Wei,[26] C. Weinheimer,[5] M. Weiss,[12] D. Wenz,[4] C. Wittweg,[5] Z. Xu,[1] M. Yamashita,[23,22] J. Ye,[26,**] G. Zavattini,[3,††] Y. Zhang,[1] T. Zhu,[1] and J. P. Zopounidis,[20]

Solar Axion in XENON1T???

- (暗黒物質というわけではないが、)太陽内での反応により、アクシオンが大量に生成されている可能性がある(solar axion)。

  ➡ 大体数keVのレベル。

- XENON1Tでの観測 ⇒ 3σレベルの超過が見える？？？



本当にSolar Axionなのか???

1.Solar axion: 3.4σ

2.ニュートリノの磁気モーメント: 3.2σ

3.もしくは他の新物理？？？　ダークエネルギー？？？

4.理解できていないバックグラウンド？？？

- トリチウム^{3}H : 3.2σ 似たエネルギーの電子を出して崩壊する。
- 自然界に超微量に存在: Xe原子10^{25}個に対して数個あれば説明できる。

- 今の所、これ以上の議論はできない。。。さらなる観測が必要。。。
- じゃあ、もっと感度を出すにはどうすればよいのか？？？

➡ **液体Xeの量を増やせばいい!!!**

➡ **XENON nT実験。**

- Xeの量はXENON1Tの約3倍。コミッショニングラン。

加速器実験

- よく用いられる方法の一例
- とある親粒子(M)のleptonicな二体崩壊を観測する。

$$M^{\pm} \to \ell^{\pm}\nu_{\ell}$$

  - 二体崩壊なので、レプトン(ℓ)のエネルギーE_{ℓ}は単一に決まる。
- 暗黒物質(Xとする)を伴った崩壊

$$M^{\pm} \to \ell^{\pm}X$$

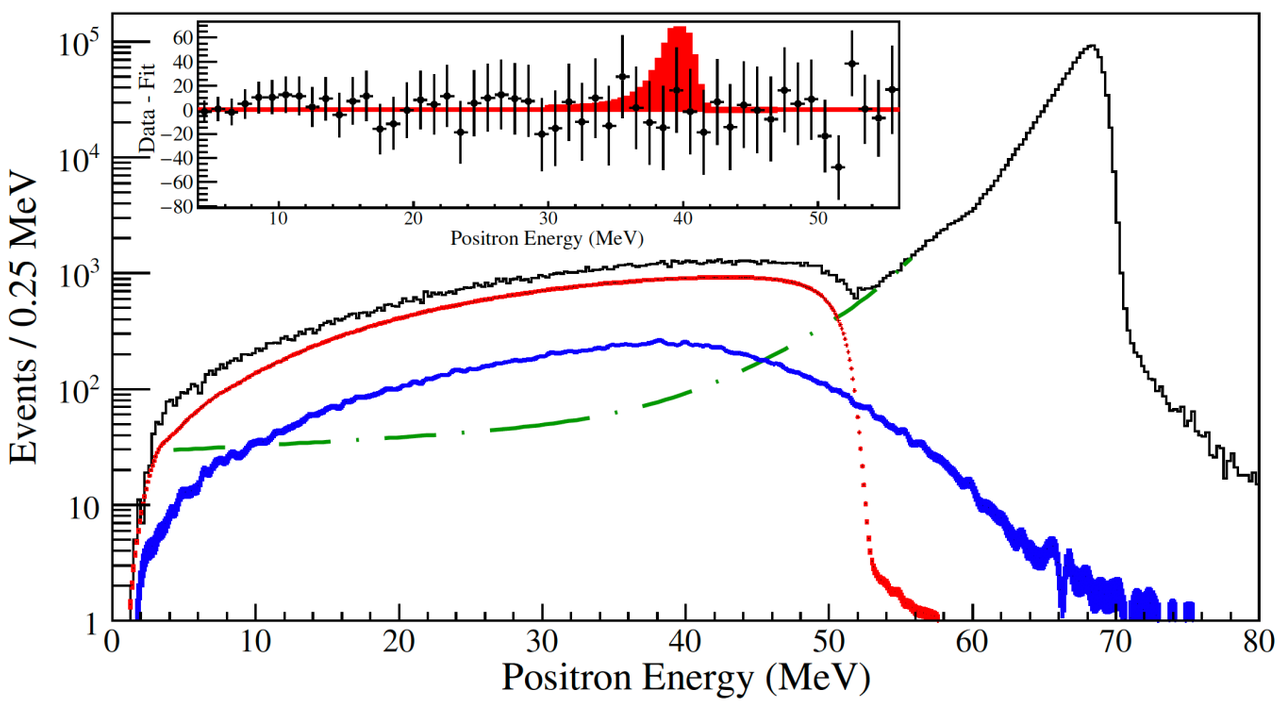
見えない

  - 通常のleptonicな崩壊と比べて、**エネルギーE_{ℓ}は低くなる。**

➡レプトンのエネルギーを精密に測定することで探索できる。

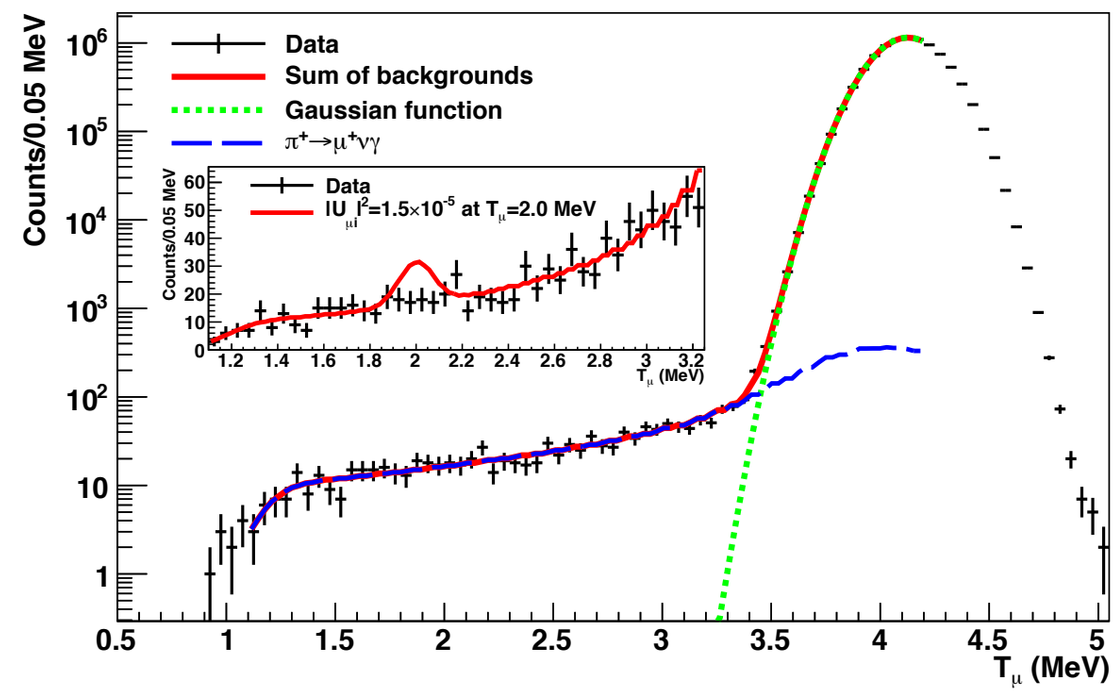
加速器実験(PIENU実験を例に)

$\pi^+ \to e^+ \nu_H$



Phys. Rev. D 97, 072012 (2018)

$\pi^+ \to \mu^+ \nu_H$



Phys. Lett. B 798, 134980 (2019)

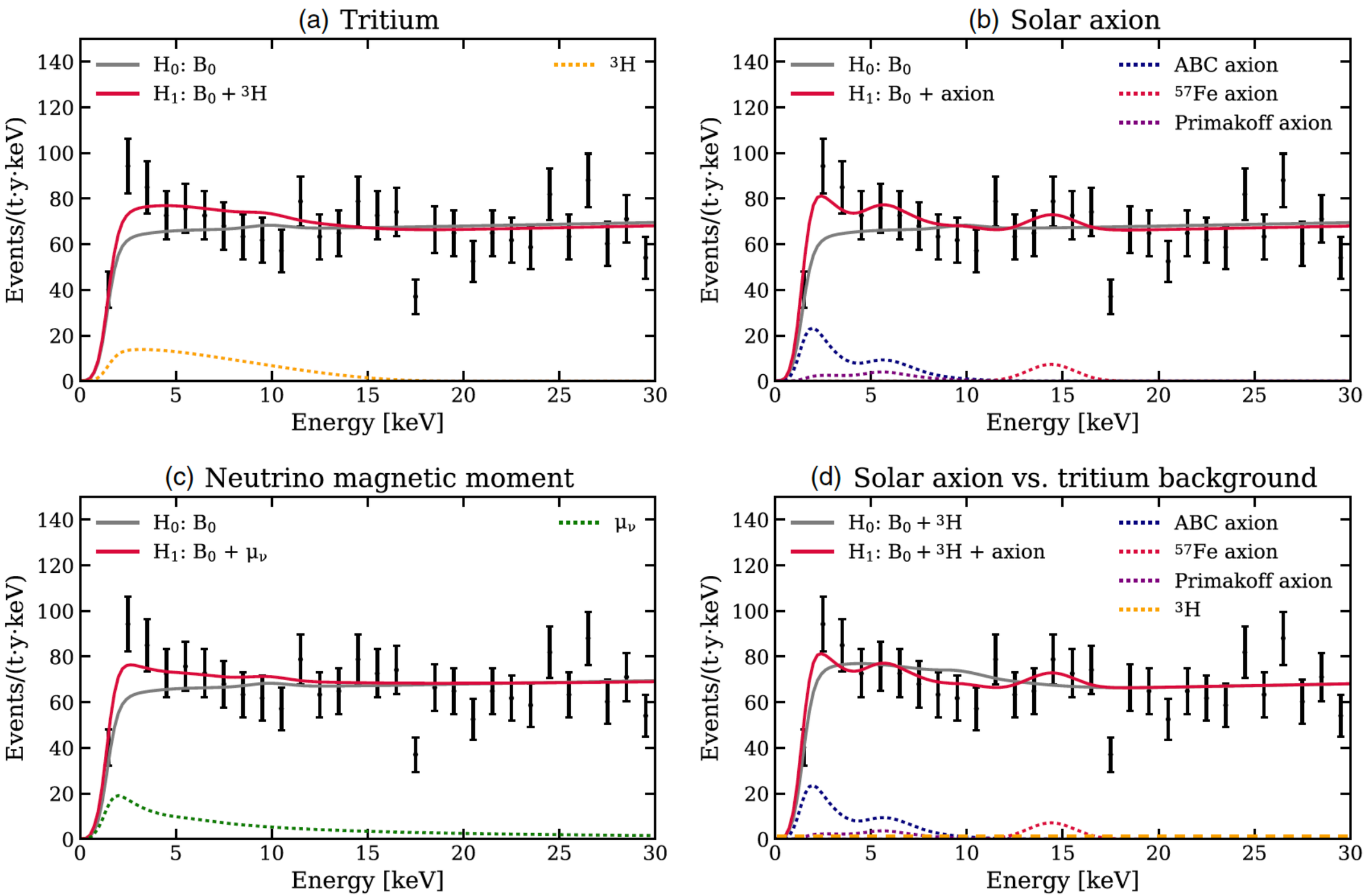
- π^+中間子のleptonicな二体崩壊の$\pi^+ \to \ell^\pm \nu_H$探索(ヘビーニュートリノ)
- メインピーク($E_e = 69.8$ MeV, $T_\mu = 4.1$ MeV)よりも低いところで信号によるピークを探索。

  ➡残念ながら、統計的に有意な信号は見つからなかった。
- 同様に$\tau \to \ell X$も arXiv:2106.02451 にて議論している。

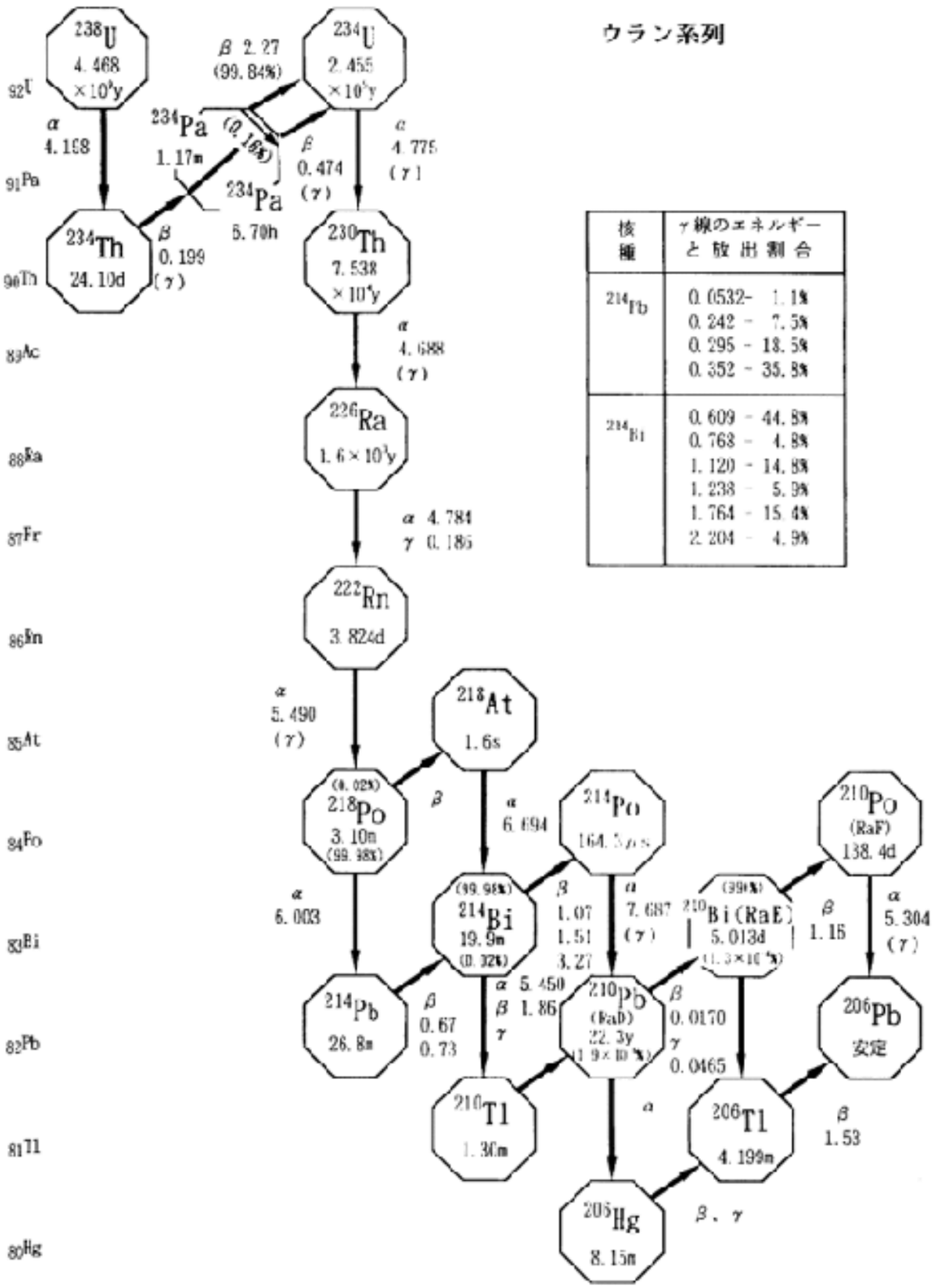
まとめ

- ダークマターとは目に見えない重力相互作用をするもの。
- 数々の観測事実より、何かがあることはわかっているが、直接観測はいまだにできていない。
- ダークマター探索には様々な方法がある。
  - ➡ 直接観測、間接観測、加速器など。
- XENON1Tにて、solar axionの兆候を観測？？？
  - ➡ XENONnTでより高感度の観測へ。
- 様々な加速器実験でも鋭意探索中。

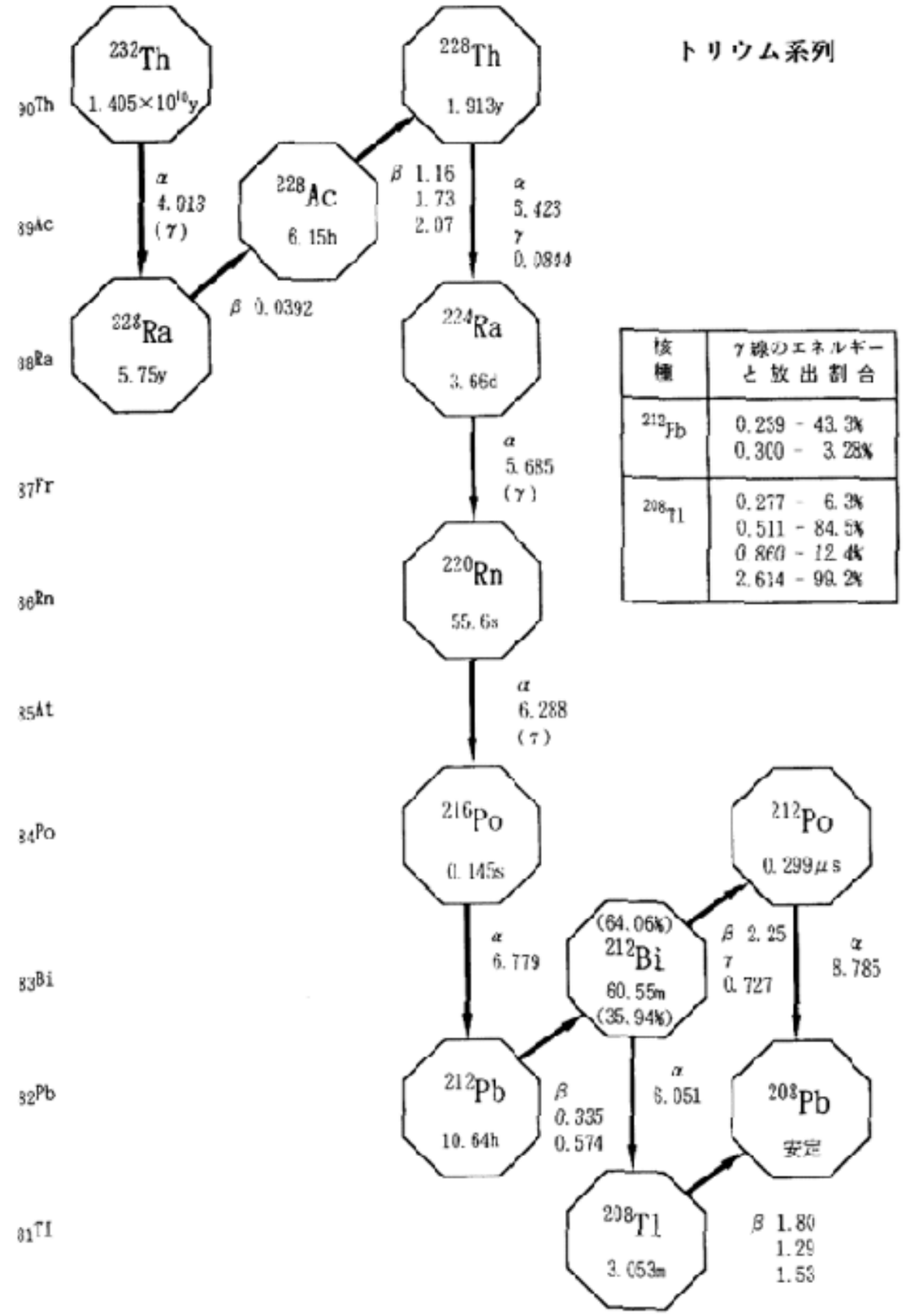
バックアップ


(a) Tritium
H0: B0
H1: B0 + 3H
3H
Events/(t·y·keV)
Energy [keV]
(b) Solar axion
H0: B0
H1: B0 + axion
ABC axion
57Fe axion
Primakoff axion
Events/(t·y·keV)
Energy [keV]
(c) Neutrino magnetic moment
H0: B0
H1: B0 + μν
μν
Events/(t·y·keV)
Energy [keV]
(d) Solar axion vs. tritium background
H0: B0 + 3H
H1: B0 + 3H + axion
ABC axion
57Fe axion
Primakoff axion
3H
Events/(t·y·keV)
Energy [keV]

ウラン系列、トリウム系列



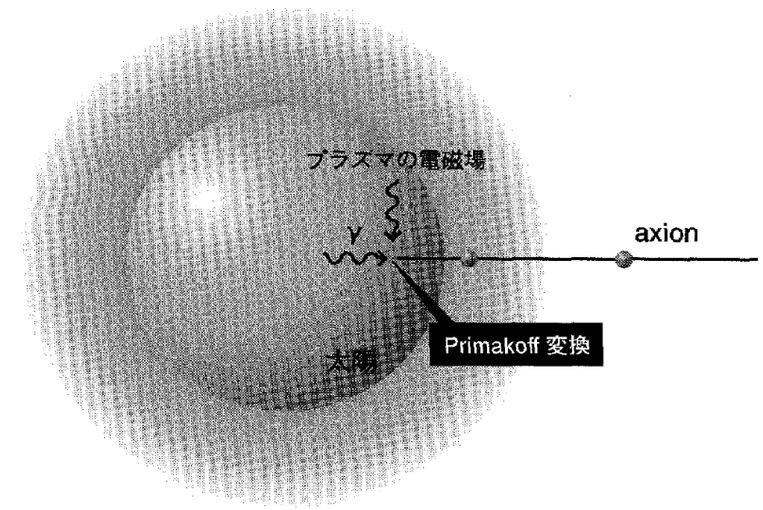
核種	γ線のエネルギーと放出割合
^{214}Pb	0.0532- 1.1% 0.242 - 7.5% 0.295 - 18.5% 0.352 - 35.8%
^{214}Bi	0.609 - 44.8% 0.768 - 4.8% 1.120 - 14.8% 1.238 - 5.9% 1.764 - 15.4% 2.204 - 4.9%



核種	γ線のエネルギーと放出割合
^{212}Pb	0.239 - 43.3% 0.300 - 3.28%
^{208}Tl	0.277 - 6.3% 0.511 - 84.5% 0.860 - 12.4% 2.614 - 99.2%

XENON1T

- Solar axion
  - 電磁場と光子の反応。



- ニュートリノ磁気モーメント
  - 標準理論ではニュートリノは質量0で、磁気モーメントをもたない。
  - ニュートリノ振動の観測により、実際は質量をもつ。
  - ニュートリノ振動を考慮しても$\mu_\nu \sim 10^{-20}$
  - 標準理論を超えた物理だと、これよりも大きくなる。
    - ➡ 磁気モーメントが大きいと、低エネルギー領域での物質との反応断面積が大きくなる。