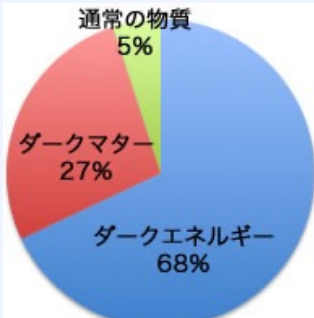


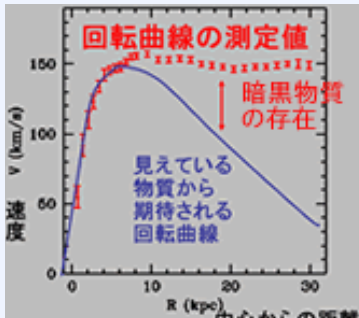
I. 暗黒物質直接探索

暗黒物質

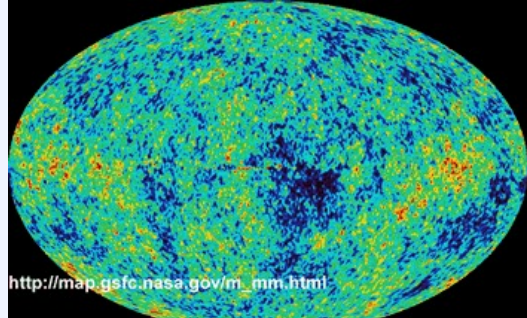
- 宇宙を構成している未知の質量成分
- 標準模型を超えた物理, 宇宙の大規模構造の解明の鍵



宇宙の構成物質, エネルギーの割合
XMASS実験 HP

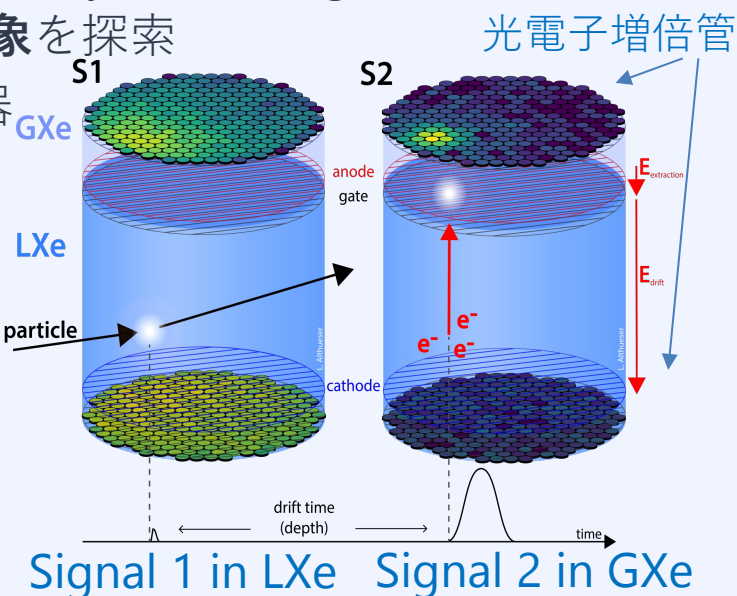


渦巻き銀河の回転曲線
XMASS実験 HP



XENONnT実験

- グランサッソ国立研究所地下実験施設 (イタリア)
- 暗黒物質候補 WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) によるXe原子核反跳事象を探索
- 8.5tのXeを用いた検出器

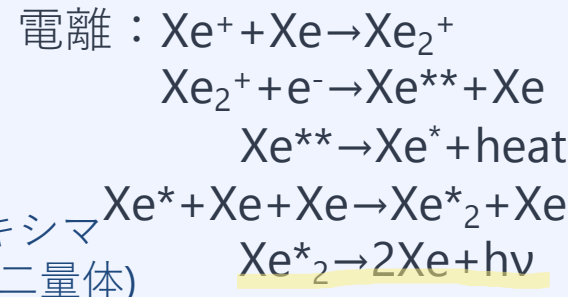


II. XENONnT実験における信号

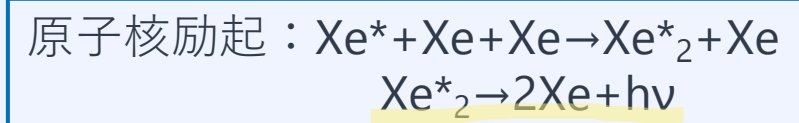
Xeシンチレータ: WIMPと同程度の質量, 大光量, 速い応答!

| | 密度 [g/cc] | 沸点 @1 bar [K] | Electron mobility [cm ² /Vs] | Scintillation wavelength [nm] | Scintillation yield [photons/MeV] | Long-lived radioactive isotope | Triplet molecule lifetime [μs] |
|-----|-----------|---------------|-----------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| LAr | 1.4 | 87.3 | 400 | 125 | 40,000 | ³⁹ Ar, ⁴² Ar | 1.6 |
| LKr | 2.4 | 120 | 1200 | 150 | 25,000 | ⁸¹ Kr, ⁸⁵ Kr | 0.09 |
| LXe | 3.0 | 165 | 2200 | 175 | 42,000 | ¹³⁶ Xe | 0.03 |

Xeの発光機構



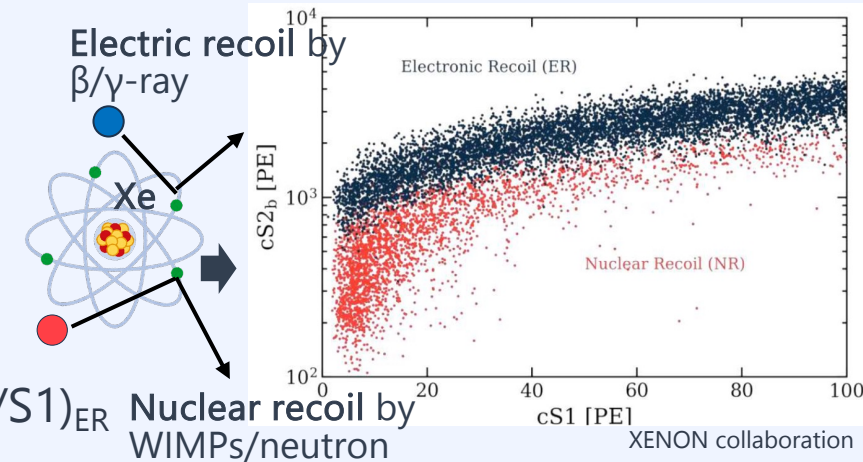
単体の励起状態Xe*の光 (λ~147 nm) は他のXeを励起させ吸収される



- 減衰時間: 4.2 ns (singlet), 22 ns (triplet)

信号の利用

- 入射粒子の反応点3次元位置
- S1, S2を合わせた信号と入射粒子のエネルギーの良い線形性
- 低エネルギー閾値 (1 keV)
- 入射粒子弁別: $(S2/S1)_{NR} < (S2/S1)_{ER}$



III. XENONnT実験におけるXe中の不純物と純化システム

稀な信号探索のため, 背景事象低減, 高感度探索が必要

⇒ 不純物の低減が重要

(a) 信号を減衰させる不純物

- H₂O: 光を吸収しS1, S2を減衰

信号減衰率:

吸収係数 $\mu = 1/N\sigma \sim 0.3 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$
 @波長175nm

N: 単位体積あたりの水分子数, σ: 反応断面積

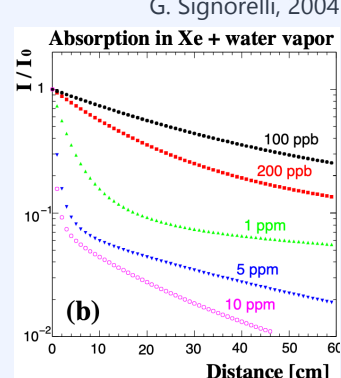
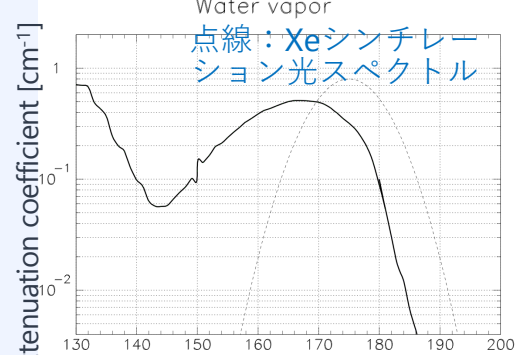
純化方法: GXe純化

LXeを気化し, ゲッターで不純物除去 (不純物がジルコニウムと反応)

到達濃度: 1 ppb未満

吸収長 l ($10^2 - 10^3$) m

H₂OによるS1の減衰はほとんどない



- O₂: 電気陰性度が高く, 電子を捕獲しS2を減衰

信号減衰率:

$S2(t) = S2(0)e^{-t/\tau_e}$ (τ_e : 電子寿命 [s])

$\tau_e = \frac{1}{k_{O_2}c_{O_2}} = \frac{M_{Xe}}{k_{O_2}x_{O_2}\rho_{LXe}} = \frac{257 \mu s \cdot ppb}{x_{O_2}}$

$k_{O_2} \sim 10^{11}$ [L/mol/s]: 付着率, c_{O_2} [mol/L]: 濃度

- 目標: 数十ppt以下 (⇒ 電子寿命 > 3 ms)

純化方法: GXe純化 + LXe純化

LXeをフィルター (Q5/St707) で純化
1000slpm (GXe純化の約12倍の速さ)

Q5 (BASF "Cu-0226 S")

酸素ゲッター触媒 (高表面積(200m²/g)のアルミナビーズに酸化銅粉末)

- 酸素を吸着: $2Cu + O_2 \rightarrow 2CuO$
- 再生(Ar+H₂ガス): $CuO + H_2 \rightarrow Cu + H_2O$

Rn放出率: $\mathcal{O}(100)$ mBq/kg, 物理観測中には使えない
効率: ~100%! 数日で $\tau_e \sim 6$ ms (2 L/min)

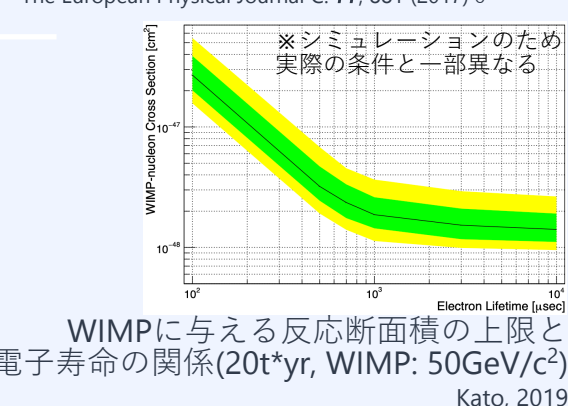
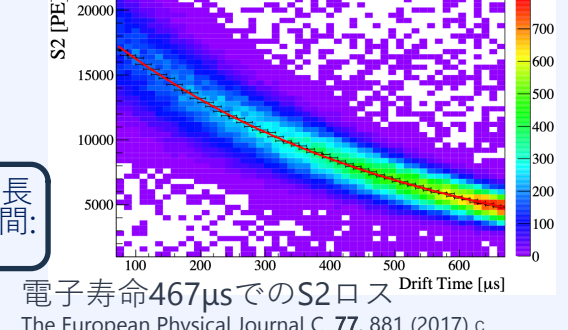
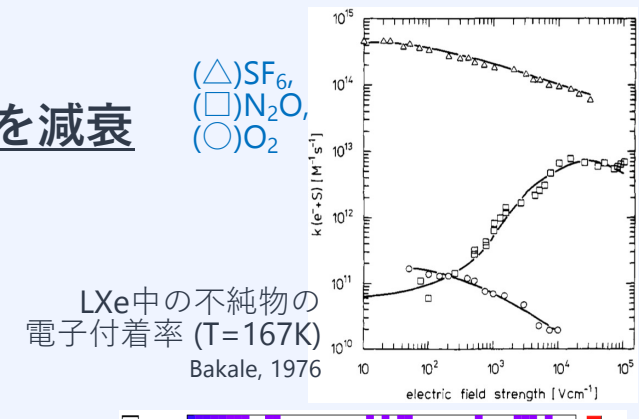
SAES St707

非蒸発性ゲッター (Zr, V, Fe)

ガス精製に使用されていたが, XENON日本グループの案により低温の液体での試験にて作用を確認

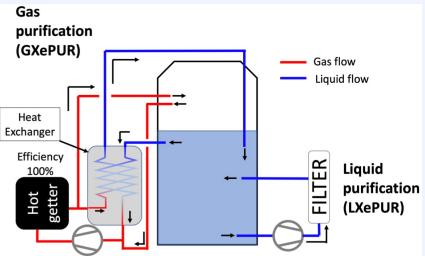
Rn放出率: 0.24 ± 0.03 mBq/unit, 低い!
効率: $\tau_e > 10$ ms (2 L/min)を維持

到達濃度: ~20 ppt (⇒ > 10 ms)

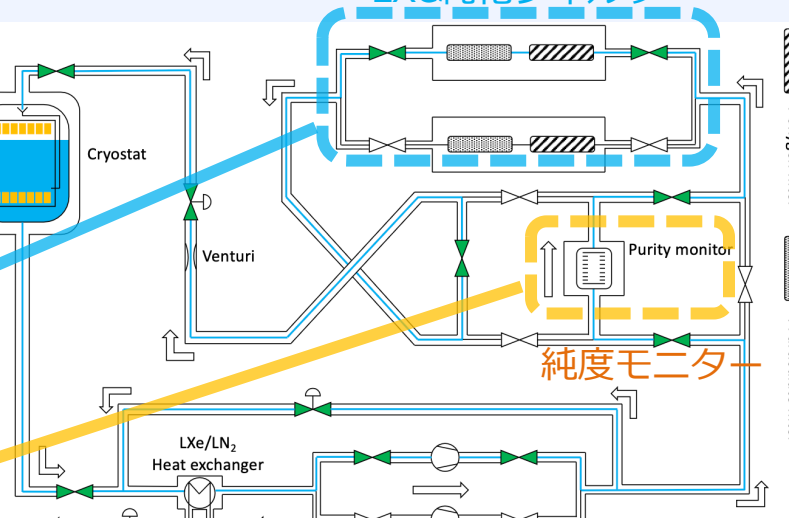


検出器内最長ドリフト時間: 2.2ms

GXe純化



LXe純化



(b) 背景事象を作る放射性不純物

- Rn, Kr: 長寿命の放射性同位体が存在

純化方法: 蒸留法 (Xe沸点 -108.1°C)

| | 沸点 | 純化前濃度 | 純化後濃度 |
|----|----------|------------|----------------|
| Rn | -61.7°C | 3.3 μBq/kg | 1.77 μBq/kg |
| | | 28 mBq/検出器 | 15 mBq/検出器 |
| Kr | -153.4°C | < 20 ppt | 0.056±0.036ppt |



IV. 運用状況

- Q5, St707の導入によりXe中のO₂, Rnを世界最高レベルで低減し, S2の高感度化を実現

XENONnTでの到達純度とXENON1Tの純度, Kato, 2021

| | Target | Achieved | XENON1T |
|---------------------------------|--------|----------|---------|
| Electron lifetime [ms] | 3 | 13.5 | 0.66 |
| ²²² Rn rate [μBq/kg] | 1.0 | 1.7 | 13 |

- 背景事象の低減にも成功し, 前身のXENON1T実験における結果(発表時世界最高の上限曲線)に約1/3の観測期間で追いついた (Science Run 0)

- この測定環境を維持し, データ取得中

