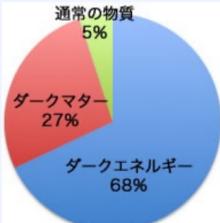


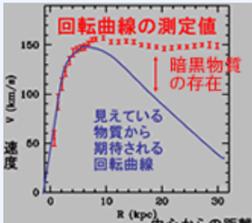
## I. 暗黒物質直接探索

### 暗黒物質

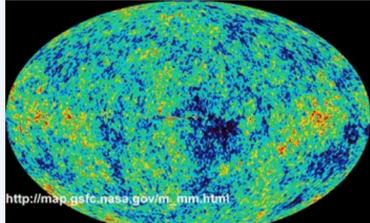
- 宇宙を構成している未知の質量成分
- 標準模型を超えた物理, 宇宙の大規模構造の解明の鍵



宇宙の構成物質, エネルギーの割合  
XMASS実験 HP

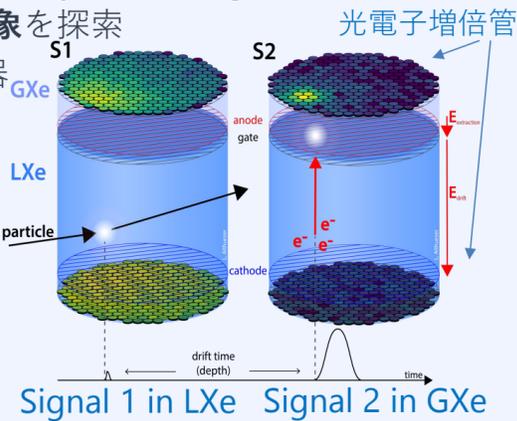


渦巻き銀河の回転曲線  
XMASS実験 HP



### 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

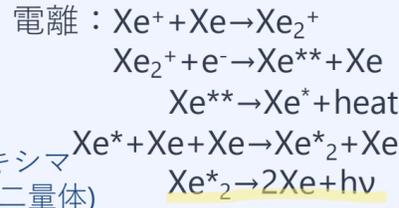


## II. XENONnT実験における信号

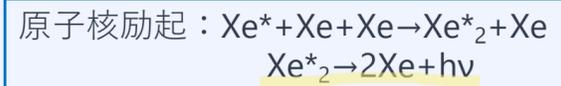
Xeシンチレータ: WIMPと同程度の質量, 大光量, 速い応答!

	密度 [g/cc]	沸点 @1 bar [K]	Electron mobility [cm <sup>2</sup> /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	<sup>39</sup> Ar, <sup>42</sup> Ar	1.6
LKr	2.4	120	1200	150	25,000	<sup>81</sup> Kr, <sup>85</sup> Kr	0.09
LXe	3.0	165	2200	175	42,000	<sup>136</sup> Xe	0.03

### Xeの発光機構



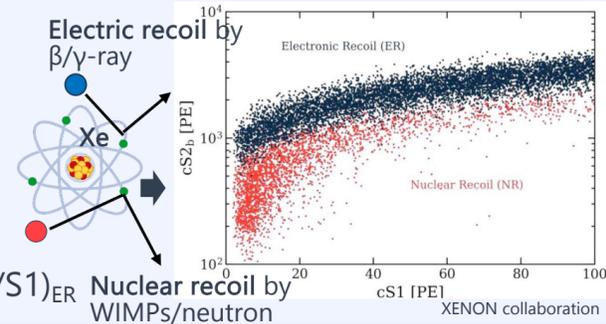
単体の励起状態Xe\*の光 (λ~147 nm) は他のXeを励起させ吸収される



- 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

- H<sub>2</sub>O: 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

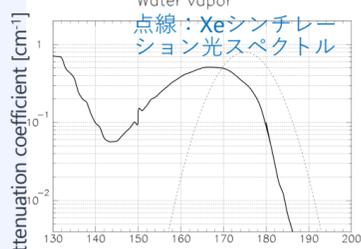
- 純化方法: GXe純化

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)

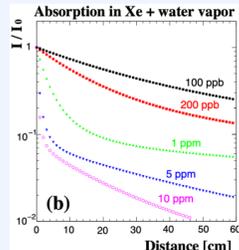
- 到達濃度: 1 ppb未満

吸収長  $l$  ( $10^2 - 10^3$ ) m

H<sub>2</sub>OによるS1の減衰はほとんどない



H<sub>2</sub>O 1ppm混入時のXeの吸収係数  
G. Signorelli, 2004



H<sub>2</sub>O混入時のXeシンチレーション光減衰率  
Ozone, 2005

- O<sub>2</sub>: 電気陰性度が高く, 電子を捕獲しS2を減衰

信号減衰率:

$S2(t) = S2(0)e^{-t/\tau_e}$  ( $\tau_e$ : 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(200m<sup>2</sup>/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+H<sub>2</sub>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)

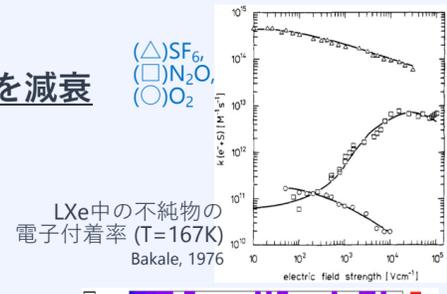
### SAES St707

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

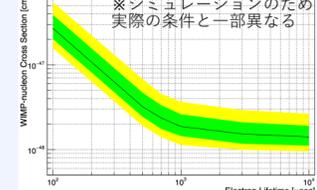
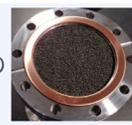
Rn放出率:  $0.24 \pm 0.03$  mBq/unit, 低い!  
効率:  $\tau_e > 10$  ms (2 L/min)を維持

到達濃度: ~20 ppt (⇒ > 10 ms)

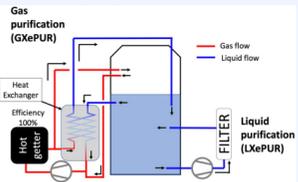


検出器内最長ドリフト時間: 2.2ms

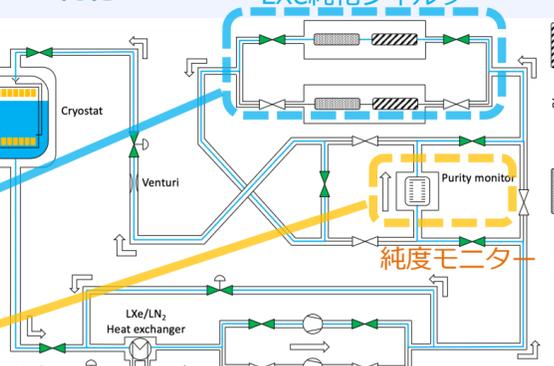
電子寿命467μsでのS2ロス  
The European Physical Journal C. 77, 881 (2017) c



### 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

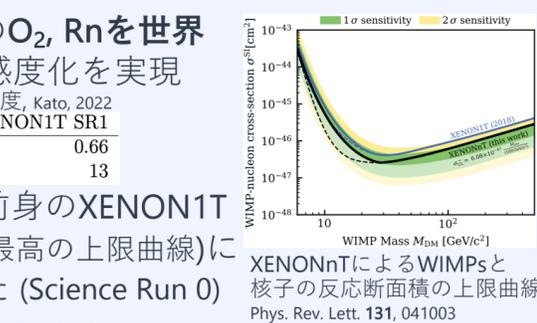
- Q5, St707の導入によりXe中のO<sub>2</sub>, Rnを世界最高レベルで低減し, S2の高感度化を実現

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
<sup>222</sup> 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



XENONnTによるWIMPsと核子の反応断面積の上限曲線  
Phys. Rev. Lett. 131, 041003