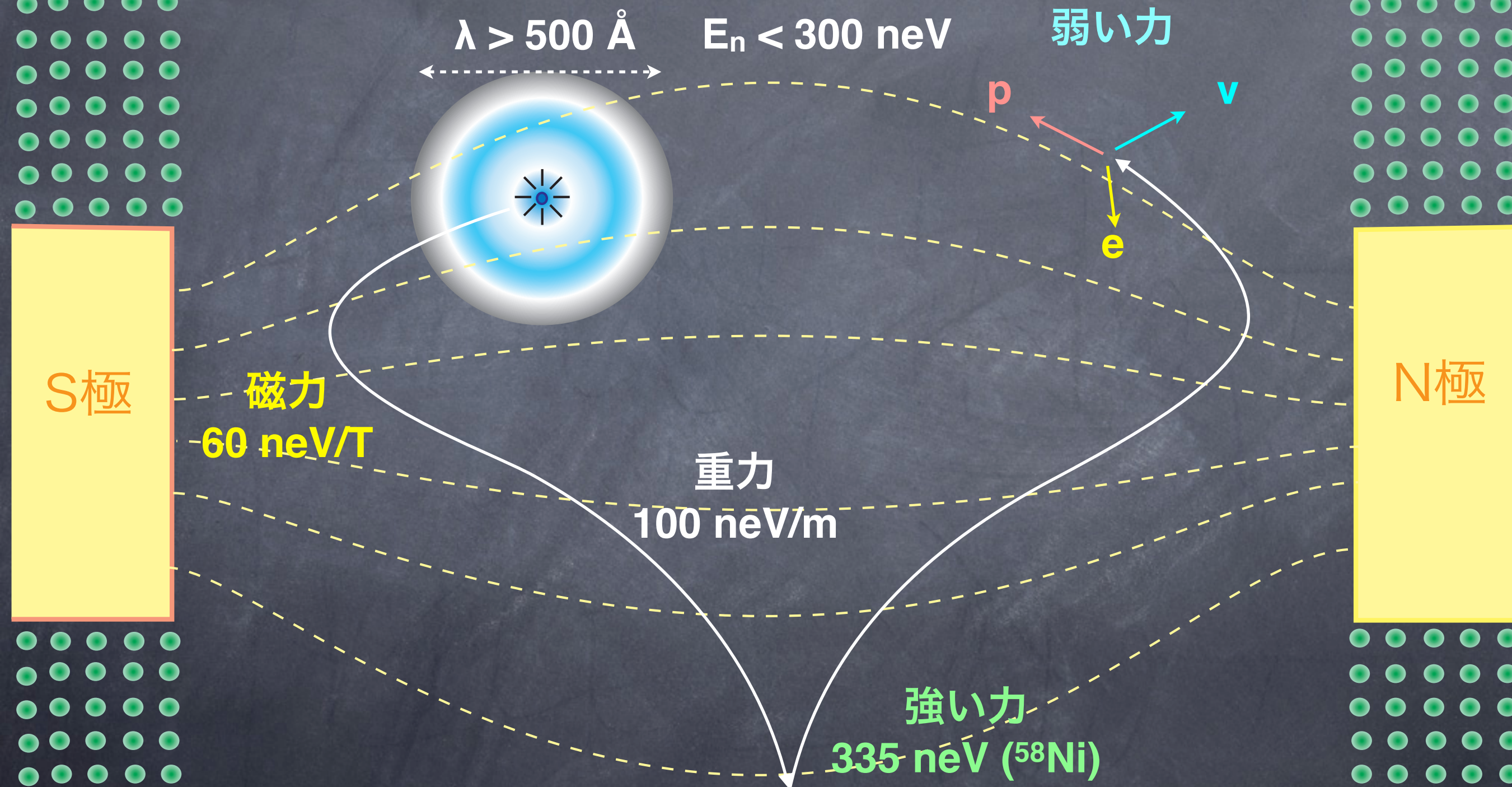
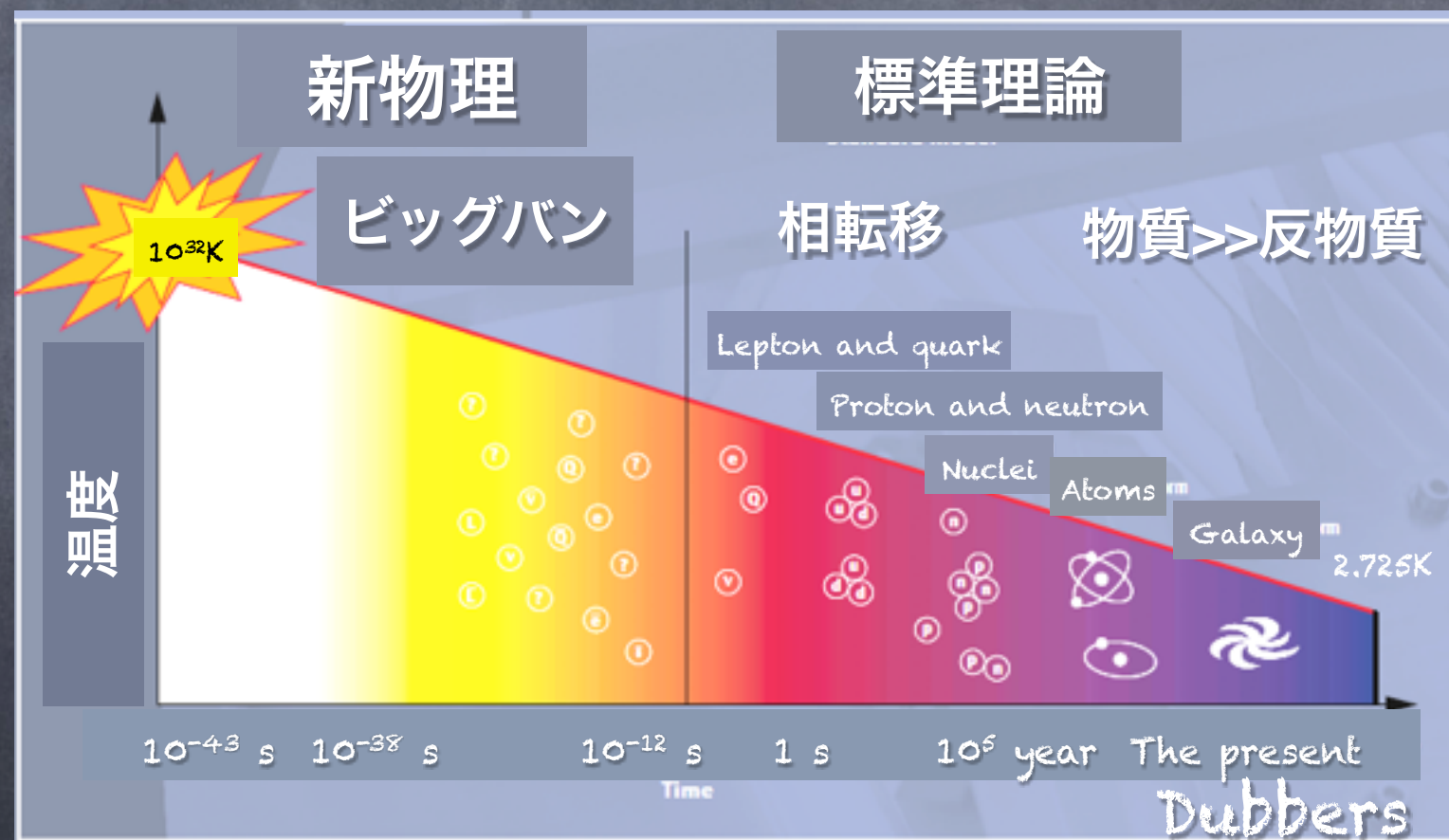
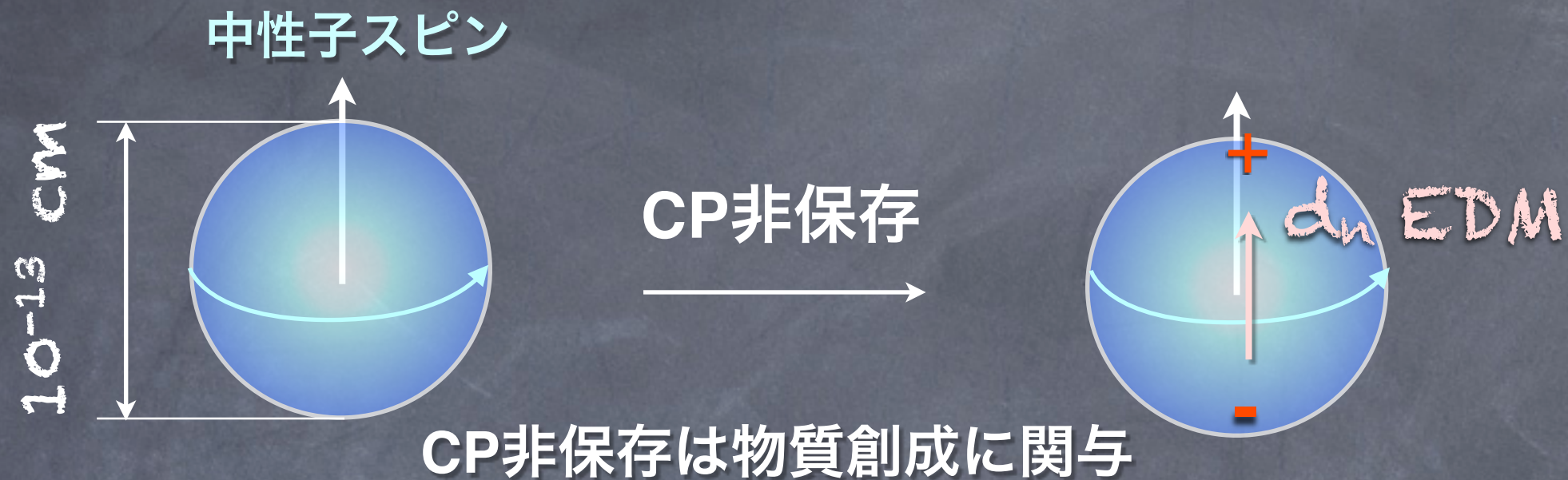


超冷中性子とEDM

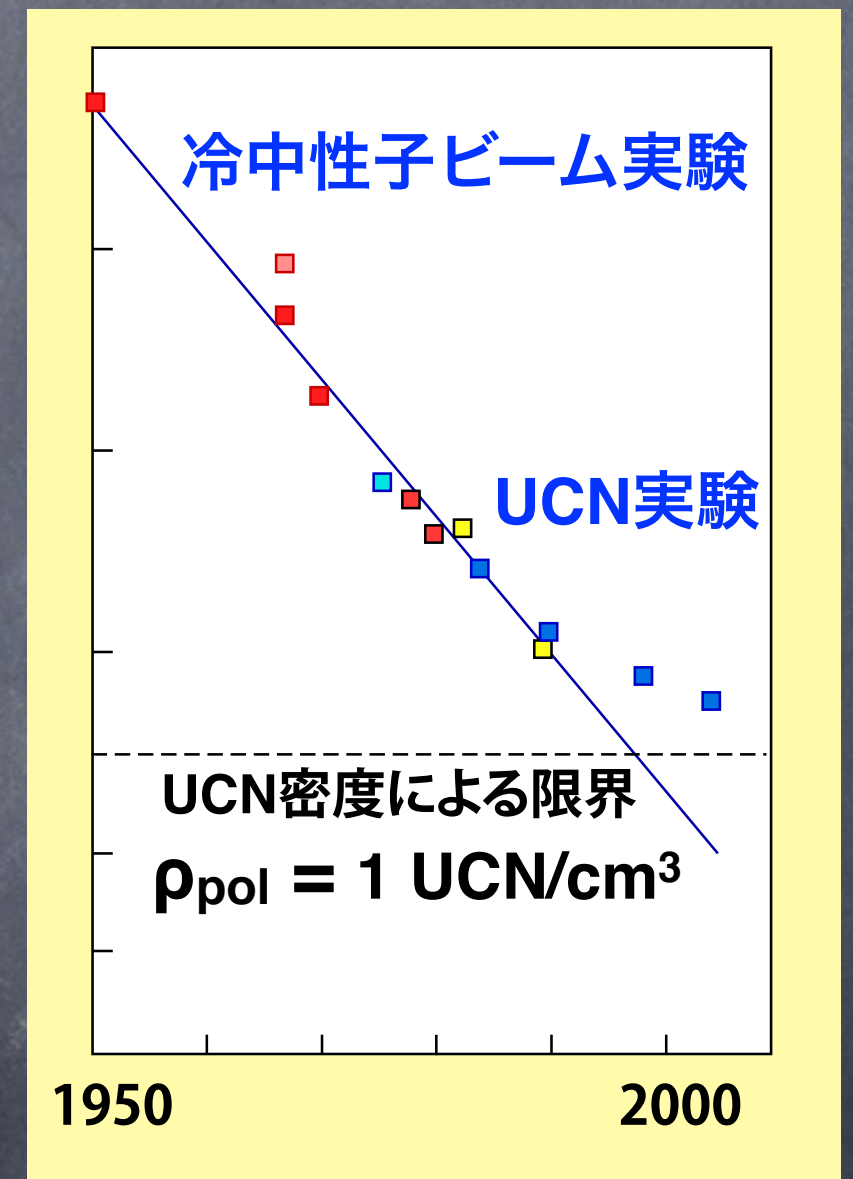
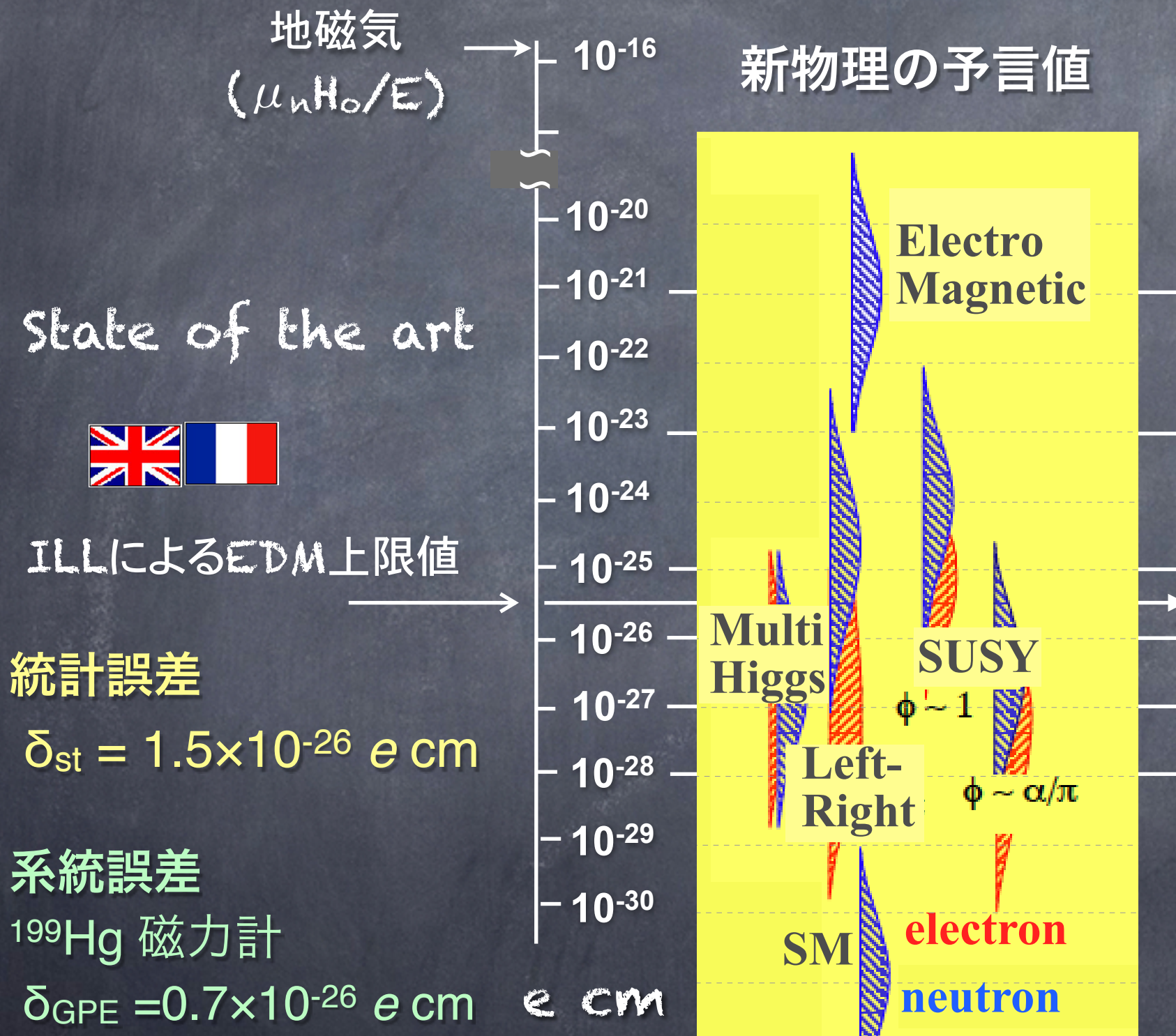


nEDM測定



標準理論はバリオン非対称を説明できず、新物理が必要、その検証にnEDM

nEDM測定現状



EDM測定歴史

KEK-RCNP-Osakaの計画

地磁気
($\mu_n H_0 / E$)

10^{-16}

10^{-20}

10^{-21}

10^{-22}

10^{-23}

10^{-24}

10^{-25}

10^{-26}

10^{-27}

10^{-28}

10^{-29}

10^{-30}

e cm



ILLによるEDM上限値

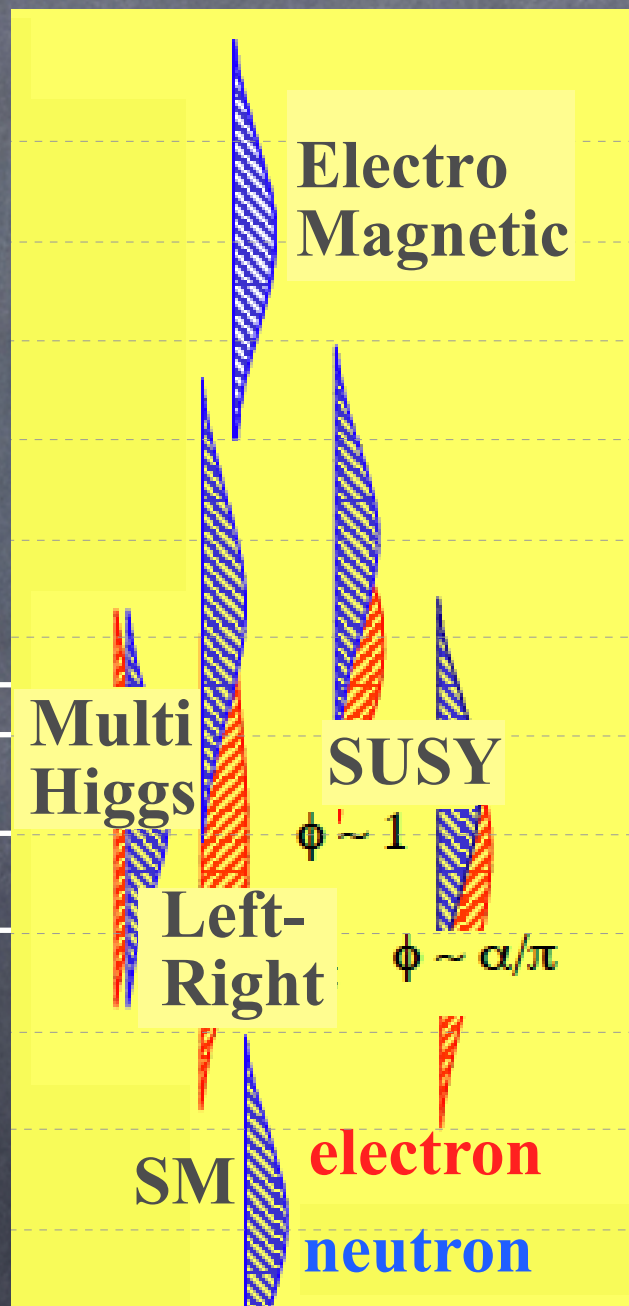
統計誤差

$$\delta_{st} = 1.5 \times 10^{-26} \text{ e cm}$$

系統誤差

^{199}Hg 磁力計

$$\delta_{GPE} = 0.7 \times 10^{-26} \text{ e cm}$$



KEK-RCNP-Osaka

新UCN源



2013~2016 RCNP

$$\rho_{pol} = 260 \text{ UCN/cm}^3$$

$$\delta_{st} < 10^{-26} \text{ e cm}$$



2016 ~ TRIUMF

$$\rho_{pol} = 1300 \text{ UCN/cm}^3$$

$$\delta_{st} < 10^{-27} \text{ e cm}$$

2015~2016

^{129}Xe 磁力計

$$\delta_{GPE} < 10^{-27} \text{ e cm}$$

従来のILL-UCN源



タービン
冷中性子
ガイド
冷中性子
源
60 MW
原子炉

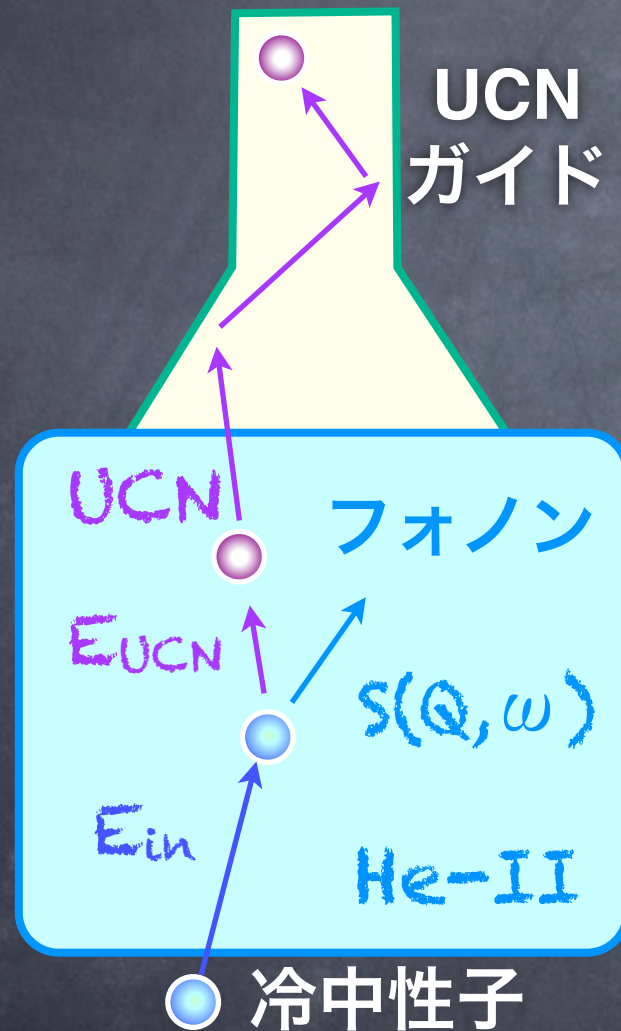
重力とドップラー効果で
冷中性子を減速

UCN源内で
 $\rho = 36 \text{ UCN/cm}^3$
 $E_c = 190 \text{ neV}$

EDM容器内で
 $\rho = 1 \text{ UCN/cm}^3$
 $E_c = 90 \text{ neV}$

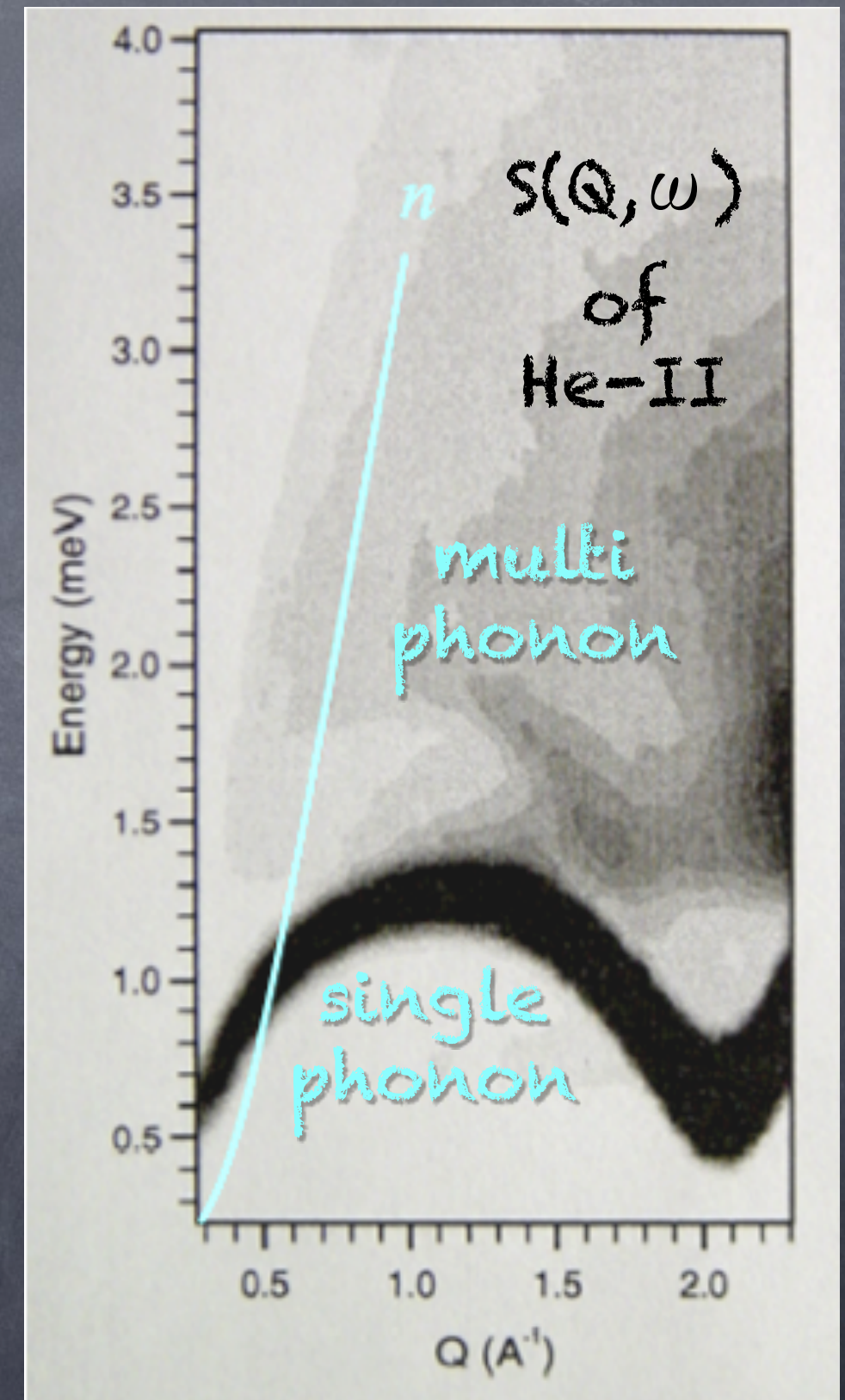
UCN 密度はLiouvilleの定理
で制限されている

スーパーサーマル法



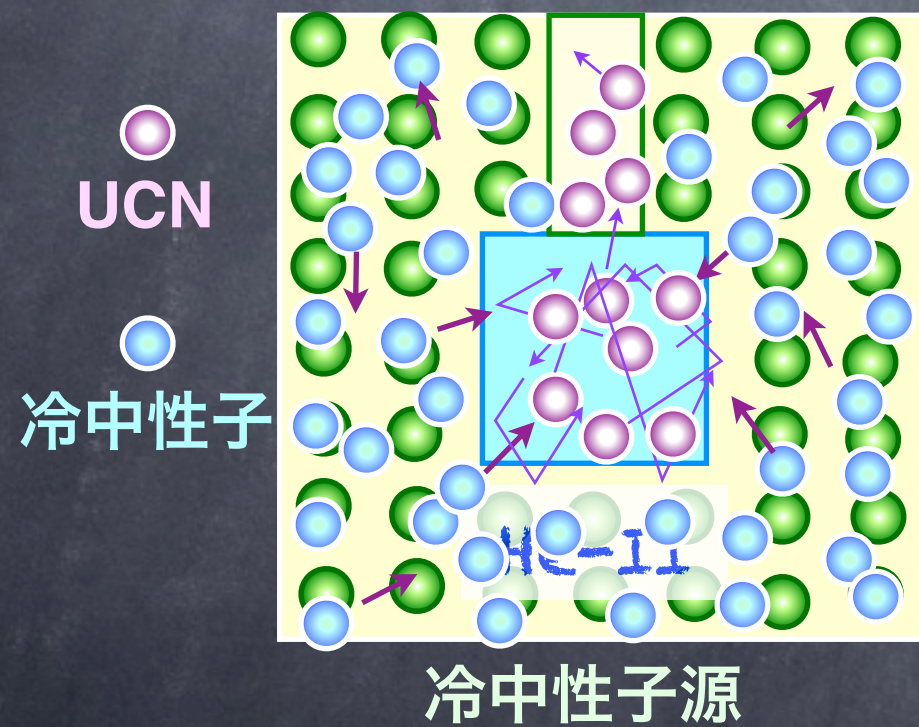
He-II フォノンの位相空間を用いて冷中性子をさらに冷却

Golub and Pendlebury (1977)



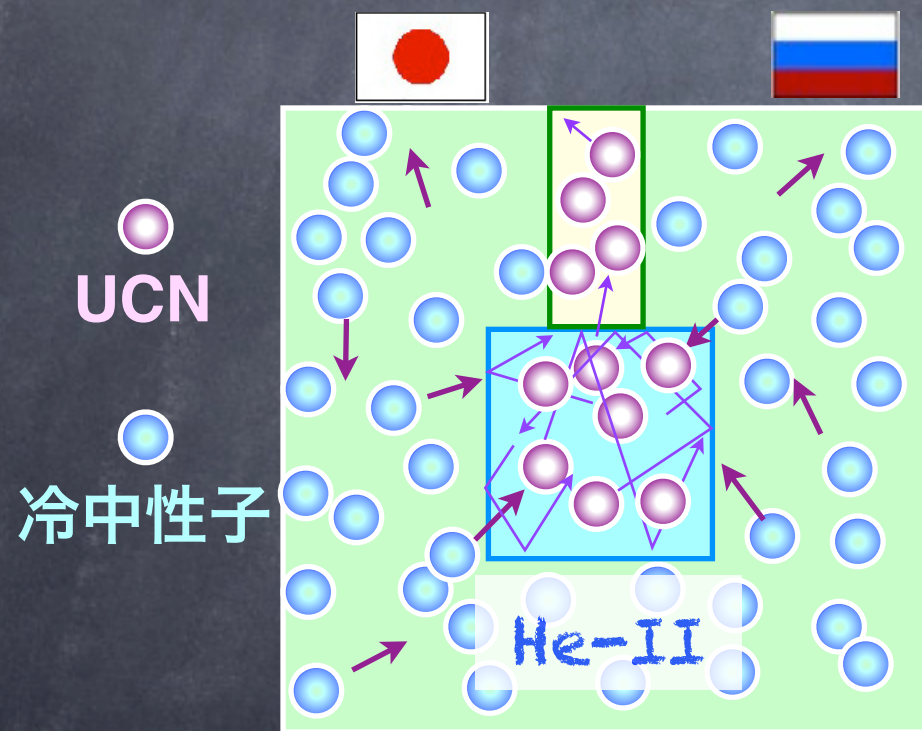
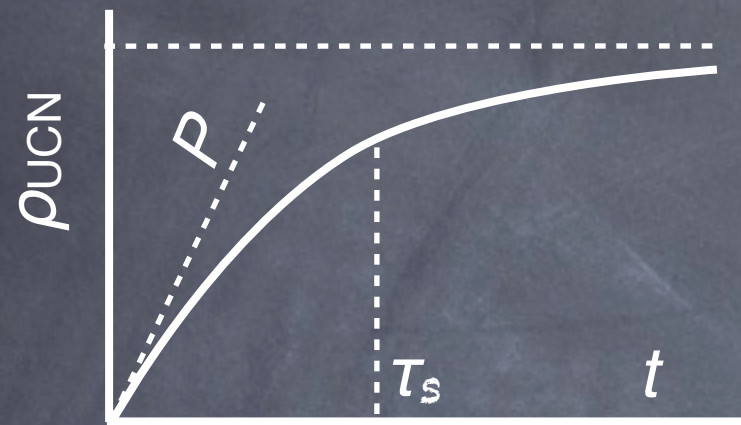
M.R. Gibbs et al. (1999)

我々のスーパーサーマルUCN源

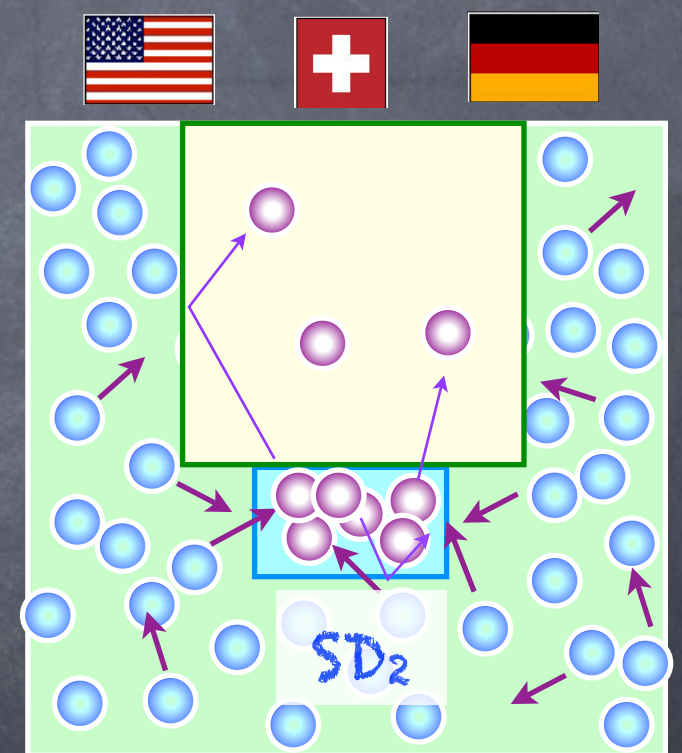
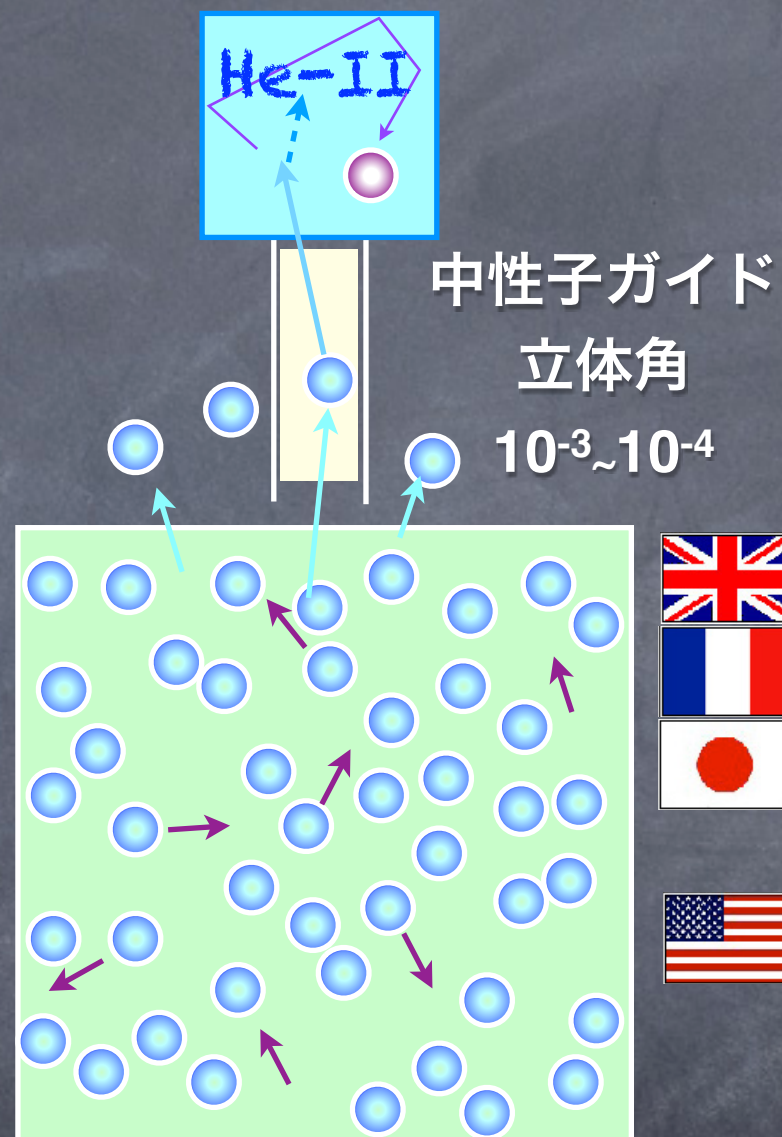


スーパーサーマルUCN源

$$\rho_{\text{UCN}} = P \times \tau_s \times \varepsilon_d (\text{希釈率})$$



冷中性子源

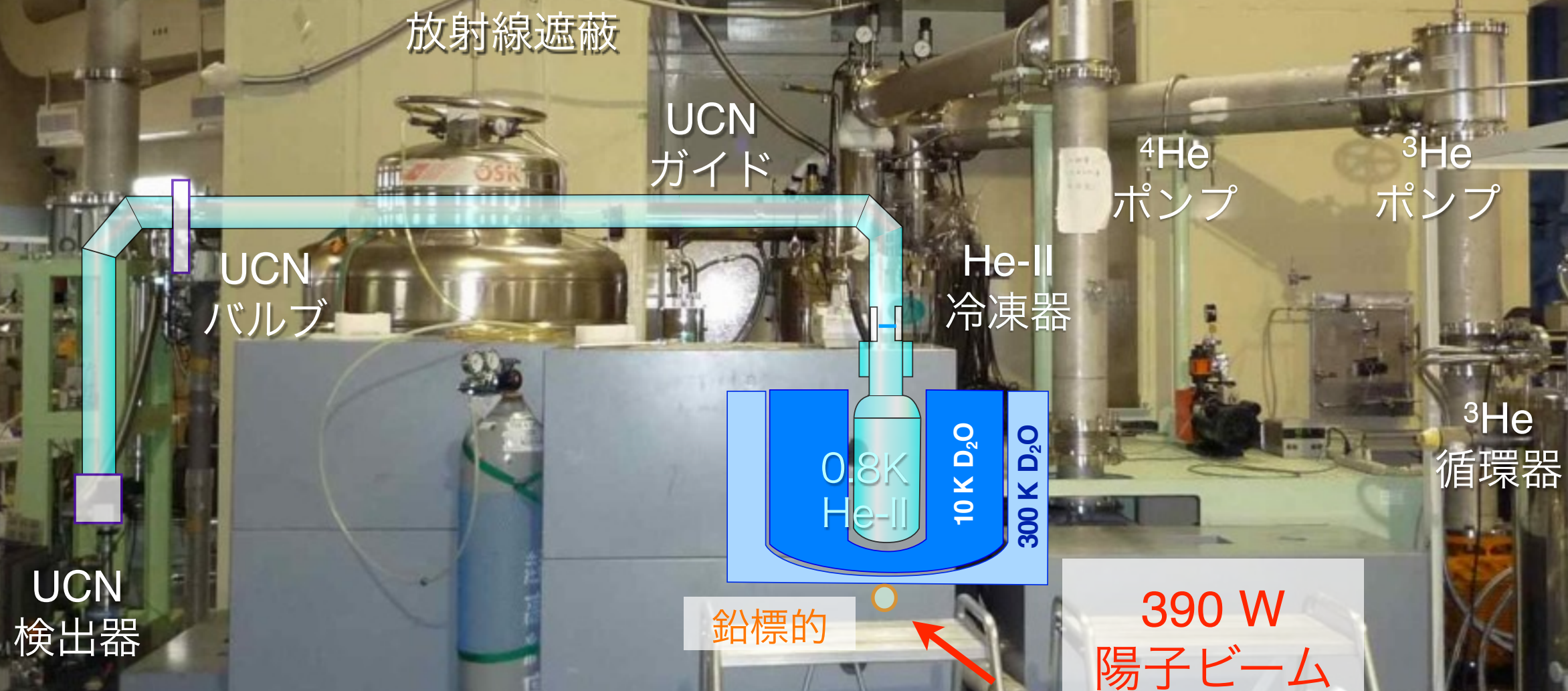


P	生成率	中	小	大
τ_s	寿命	長	長	短
ε_d	希釈率	大 (生成体積大)	大 (生成体積大)	小 (生成体積小)

我々のプロトタイプUCN源

東

PRL 89, 284801(2002)



RCNPでのUCN生成

東

$P = 4 \text{ UCN/cm}^3 \cdot \text{s}$ at $E_c = 210 \text{ neV}$ for 0.4 kW proton beam

$T_s = 81 \text{ s}$

PRL 108(2012)134801

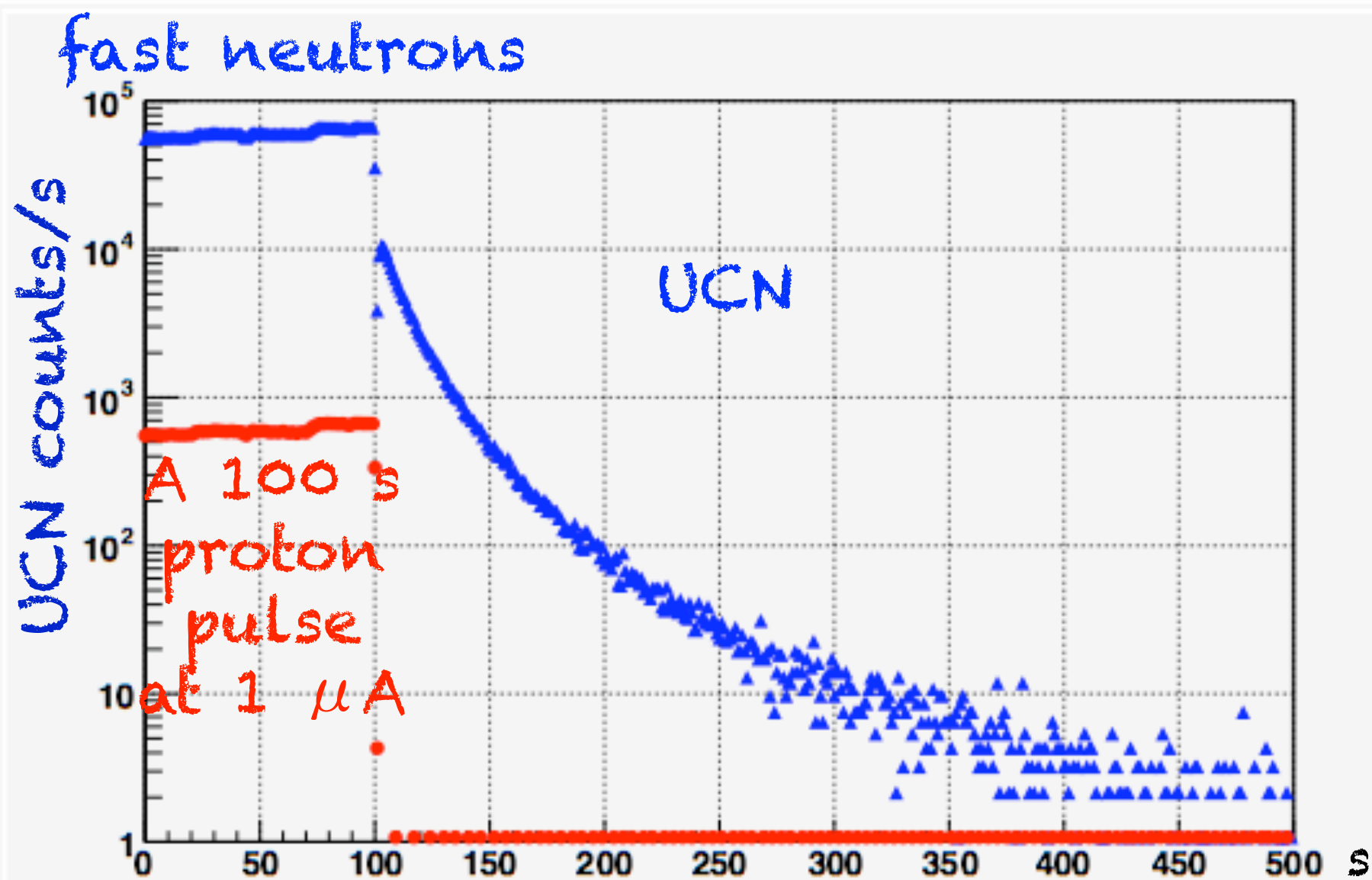
240 s 陽子ビーム照射

320 UCN/cm^3 at $E_c = 210 \text{ neV}$ He-II容器

26 Iron and concrete

$E_c = 90 \text{ neV}$ 実験ポート

世界最高値



UCN detector

He
ulator

Ramsey 共鳴装置

球面コイル

EDM 容器

$E_c = 90 \text{ neV}$

$\pi/2$ RFコイル

ドア型バルブ

垂直型UCN源

UCN
バルブ

重力加速

スピントリッパー

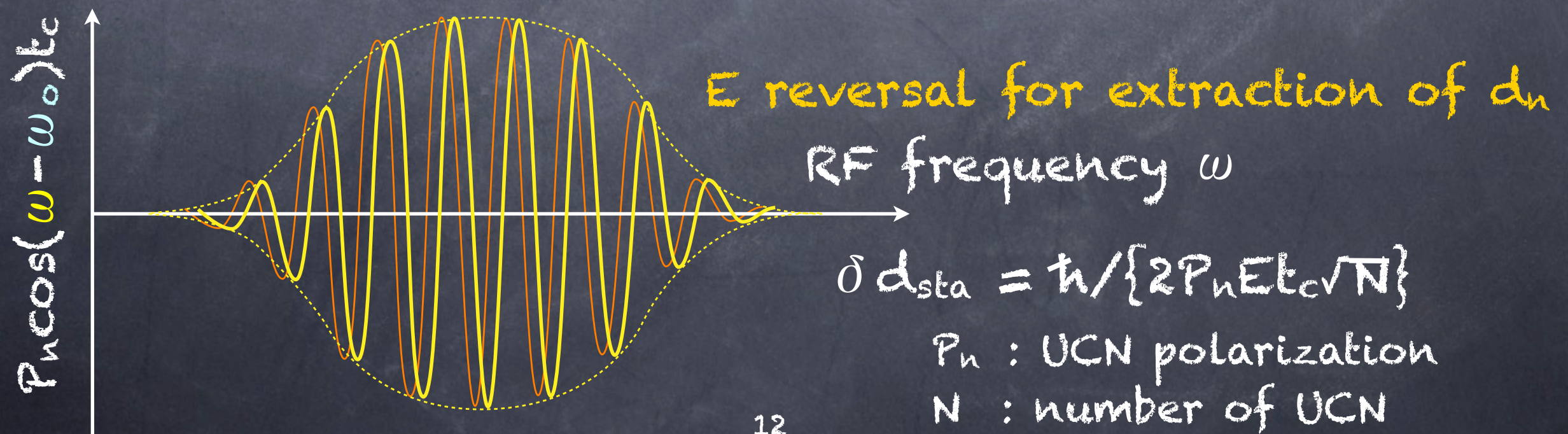
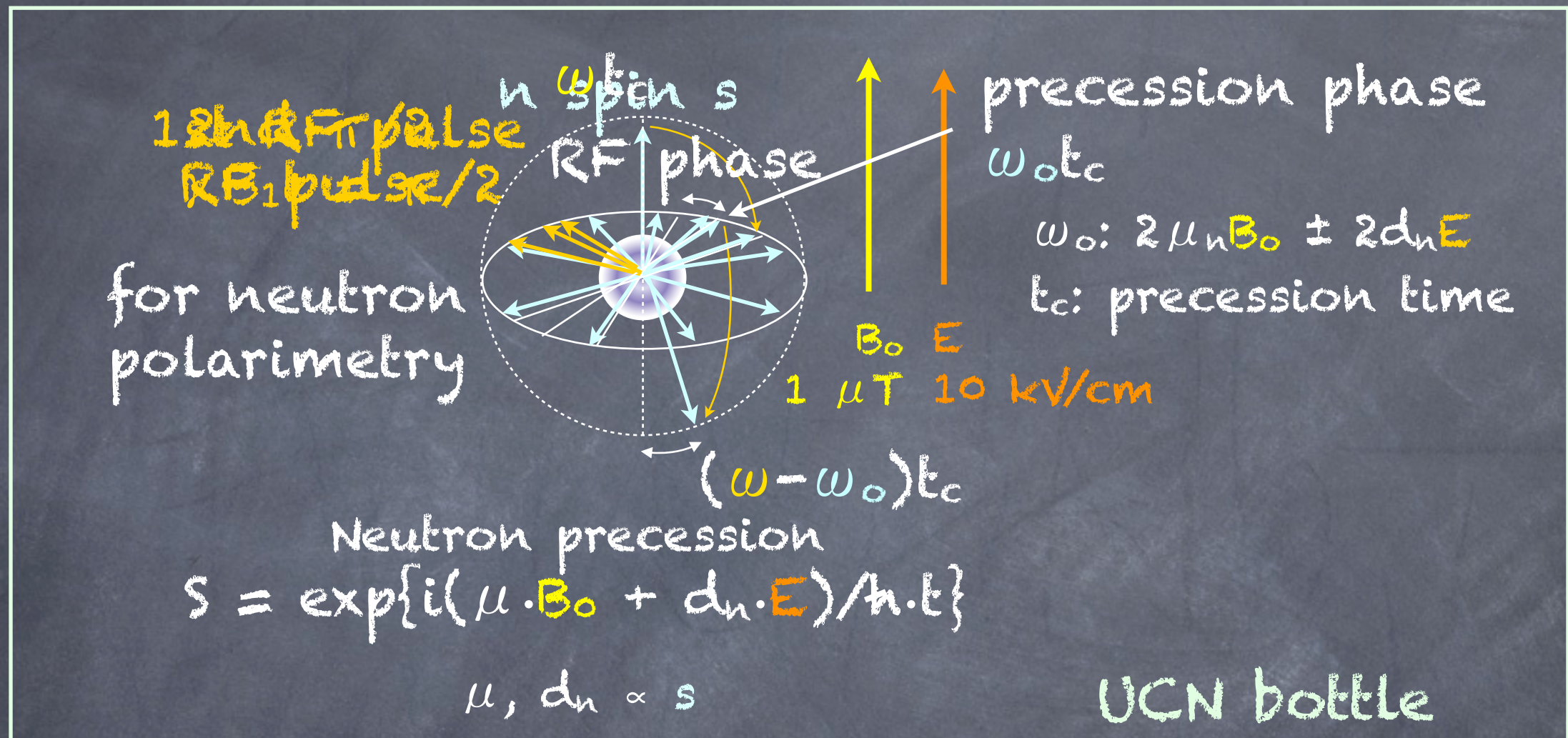
純鉄磁化フォイル

ロータリーバルブ

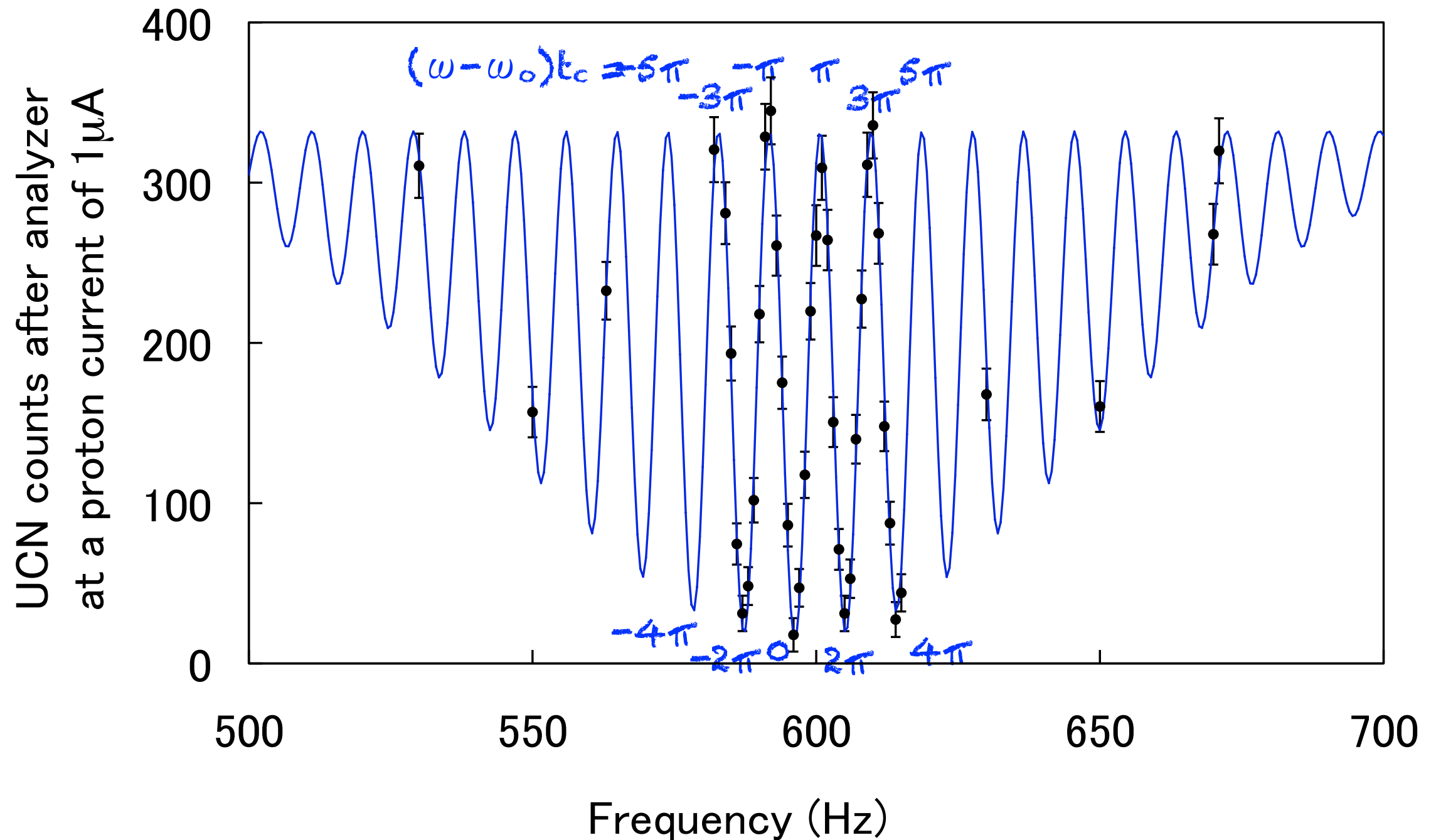
UCN 検出器

EDM測定法

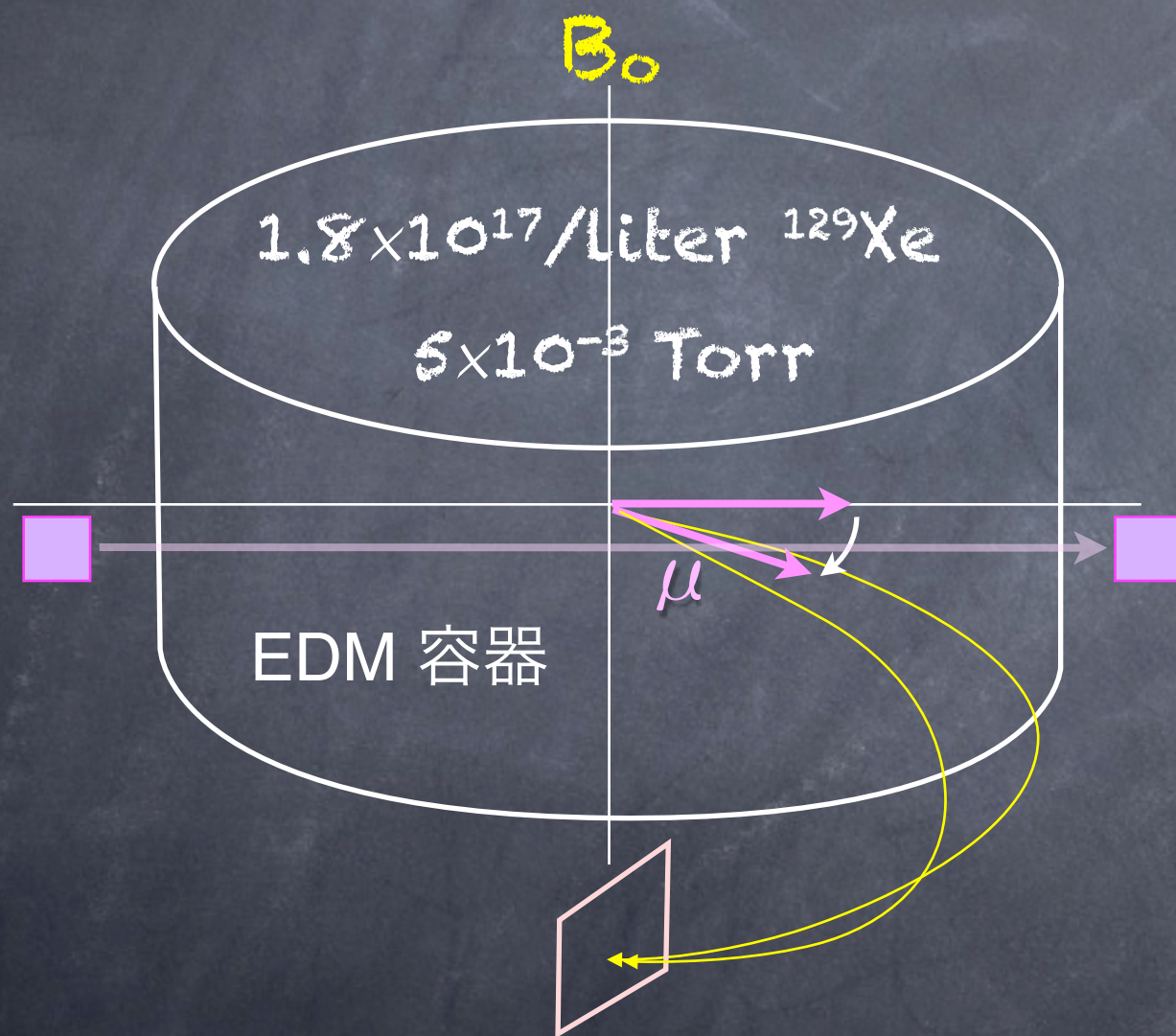
PLA 364, 87(2007)



Ramsey共鳴の測定結果



^{129}Xe 磁力計



^{129}Xe 才差運動を測定

1 SQUID 1fT, $5\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$

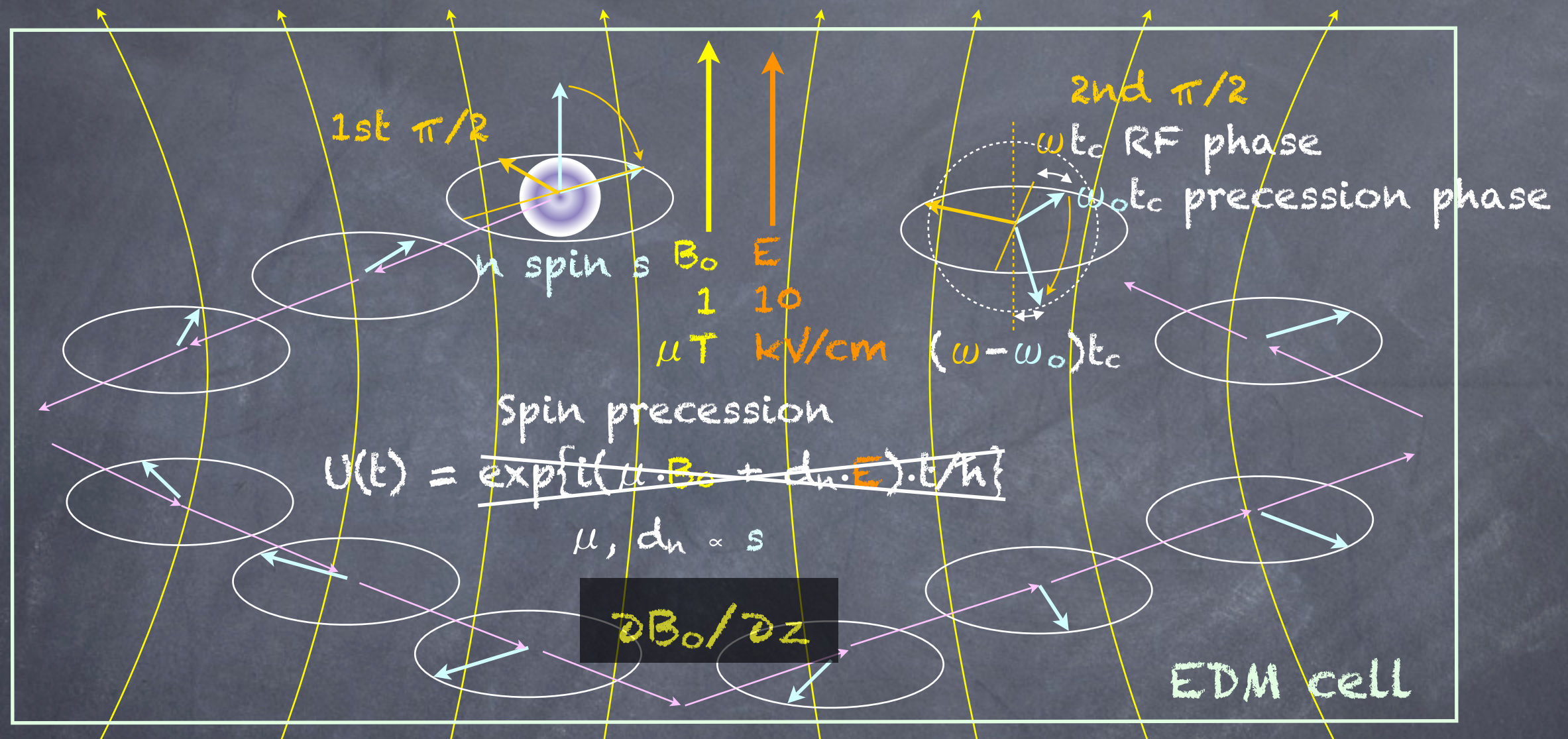
2 ^{129}Xe Ramsey 共鳴

3 偏極 ^{129}Xe 原子の2光子励起

PLA 376, 1347(2012)

Appl. Phys. Lett. 87, 053506(2005)

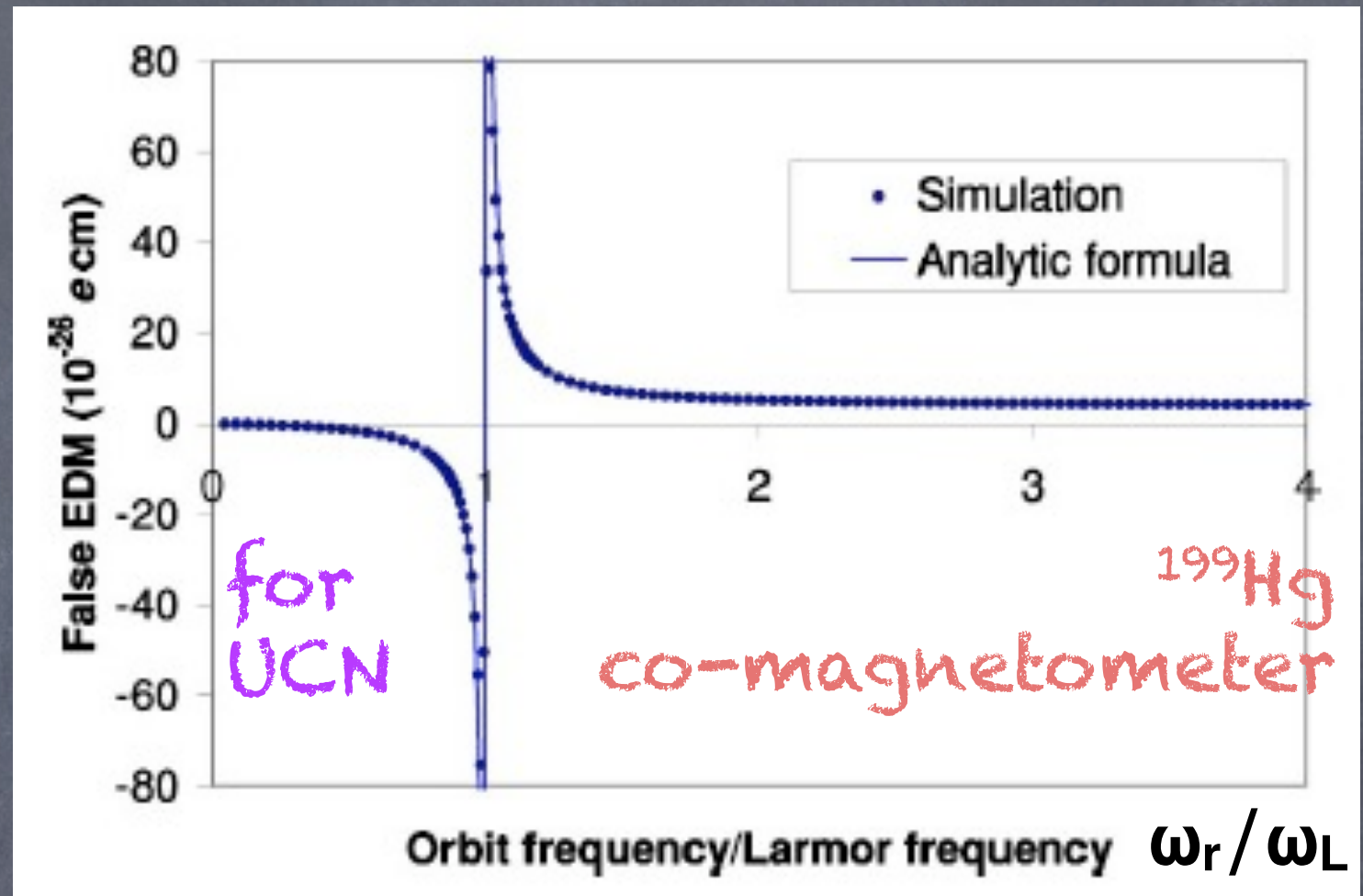
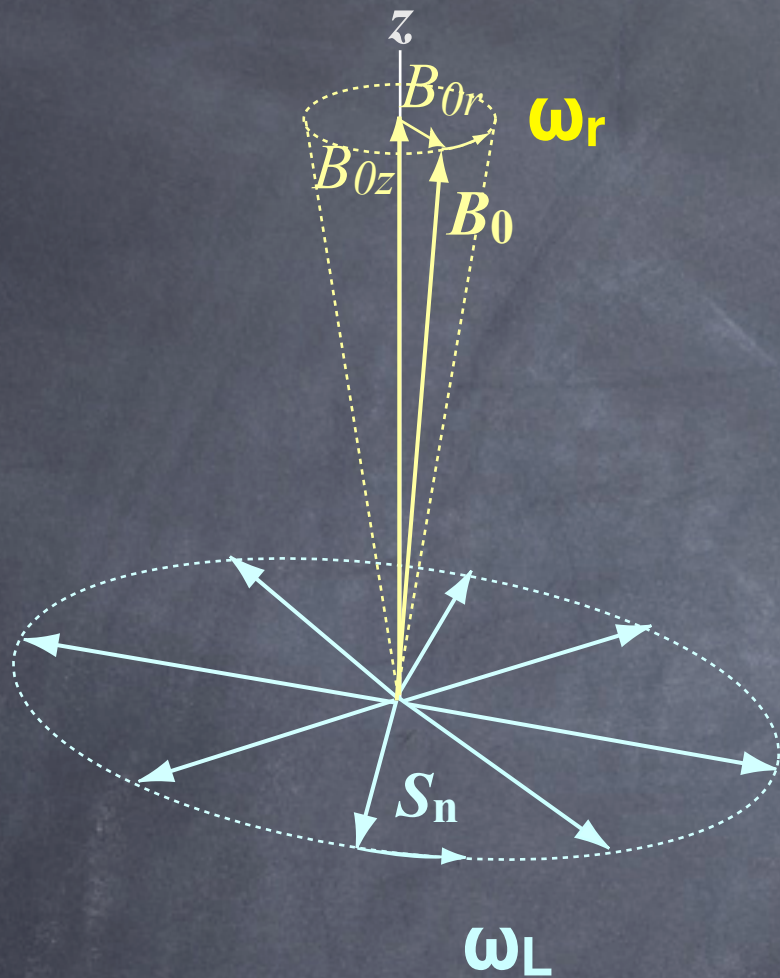
幾何学的位相シフト



横磁場 $B_{or} = (\partial B_0 / \partial z) r / 2$, $B_V = E \times v / c^2$ の回転によって位相がシフトする

Pendlebury, Phys. Rev. A70(2004)032102.
Lamoreaux, Phys. Rev. A71(2005)052115.

幾何学的位相による系統誤差 (GPE)



$$\omega_r \ll \omega_L$$

$$d_{afn} = -\hbar/4 \cdot (\partial B_{0z}/\partial z) \cdot (v_{xy}/c / B_{0z})^2$$

$$\partial B_{0z}/\partial z = 1 \text{ nT/m}, B_{0z} = 1 \mu\text{T}$$

$$= 1 \times 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

$$\omega_r \gg \omega_L$$

$$d_{afHg} = \hbar/8 \cdot \gamma_n \gamma_{Hg} (\partial B_{0z}/\partial z) R^2/c^2$$

$$R = 25 \text{ cm}$$

$$= 5 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

世界のnEDM計画

	EDM 容器	磁力計 GPE 抑制法	B_0	磁気遮蔽
本計画 	T = 300 K	^{129}Xe co-magnetometer 小型EDM容器、Xeバッファガス	球面コイル	μ メタル Finemet
SNS 	T ~ 0.5 K	^3He co-magnetometer フォノンバッファガス	$\cos\theta$ コイル	μ メタル, Metglass 超伝導
Sussex RAL 	T ~ 0.5 K	n 磁力計 E = 0	ソレノイド	μ メタル, 超伝導
PSI 	T = 300 K	Cs 磁力計 E = 0	$\cos\theta$ コイル	μ メタル
TUM 	T = 300 K	^{199}Hg 磁力計 E = 0	$\cos\theta$ コイル	μ メタル

GPE問題に対する我々の解答

PLA 376, 1347(2012)

第1の方法:

$$\partial B_{0z}/\partial z = 1 \text{ nT/m} \rightarrow 0.1 \text{ nT/m at } B_{0z} = 1 \mu\text{T}, R = 25 \rightarrow 10 \text{ cm}$$

UCN

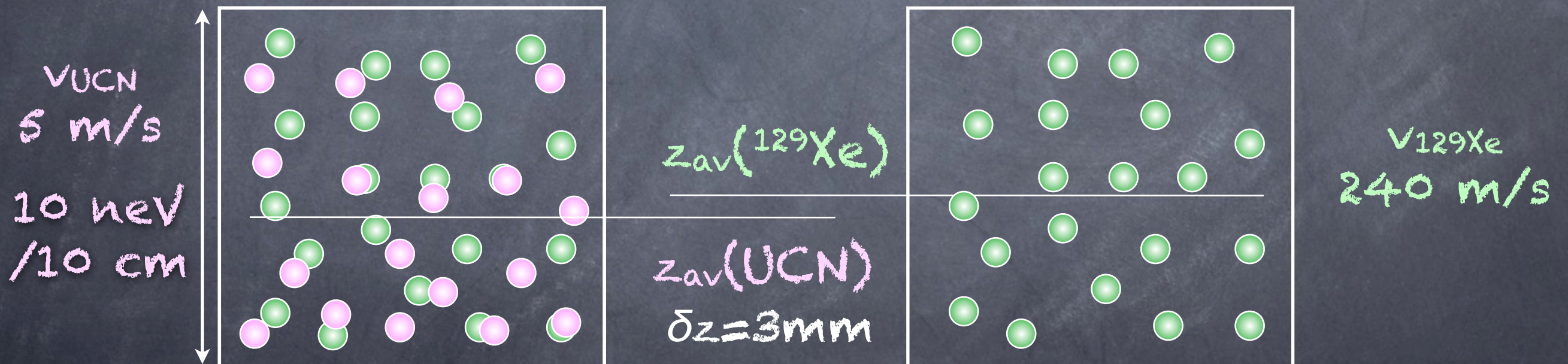
$$d_{afn} = -\hbar/4 \cdot (\partial B_{0z}/\partial z) / B_{0z}^2 \cdot v_{xy}^2 / c^2$$

$$= 1 \times 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

^{129}Xe magnetometer

$$d_{afXe} = \hbar/8 \cdot \gamma_n \gamma_{Xe} (\partial B_{0z}/\partial z) R^2 / c^2$$

$$= 1.2 \times 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$$



$$\omega_n / \gamma_n = B(h_n)$$

$$\omega_{^{129}\text{Xe}} / \gamma_{^{129}\text{Xe}} = B(h_{^{129}\text{Xe}})$$

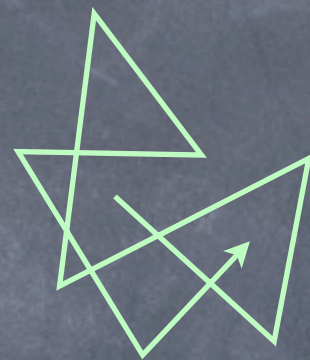
$$(\omega_n / \gamma_n) / (\omega_{^{129}\text{Xe}} / \gamma_{^{129}\text{Xe}}) = 1 + \delta\gamma + \delta z (\partial B_{0z} / \partial z) / B_{0z}$$

第2の方法: ^{129}Xe 原子数密度を上げ平均自由行程 λ を短くする

GPE

$$U_I(t) = 1 + \frac{is_z}{\hbar} \frac{1}{4} \gamma^2 \frac{E}{c^2} \frac{\partial B_{0z}}{\partial z} \int_0^t dt' \int_0^{t'} d\tau \cos(\omega_0 \tau) \{x(t')v_x(t'-\tau) - x(t'-\tau)v_x(t') + y(t')v_y(t'-\tau) - y(t'-\tau)v_y(t')\}$$

PLA 376, 1347(2012)



$r(t)$ ほぼ一定

$v(t-\tau)$ 急激に変化

$\langle r(t)v(t-\tau) \rangle \rightarrow \ll 1$

拡散速度は $\omega_r \ll \omega_L$ の領域 $\text{GPE} \rightarrow (v_{xy}/c/B_{0z})$

$$\{v_{xy}\lambda/(2R)^2\} = 196\text{m/s} \times 5 \times 10^{-3}\text{m} / 0.5^2\text{m}^2 = 4\text{Hz} \ll \omega_L/2\pi = 122\text{Hz}$$

$$R = 25\text{ cm}$$

$$B_{0z} = 10\mu\text{T}$$

$$d_{\text{afXe}} \rightarrow 3 \times 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm} \text{ at } 3 \text{ mTorr} \quad (\partial B_{0z}/\partial z = 1\text{nT/m})$$

$$\rightarrow 1 \times 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm} \text{ at } 5 \text{ mTorr, } 6 \text{ cm E gap}$$

HV break down

with ^{129}Xe gas

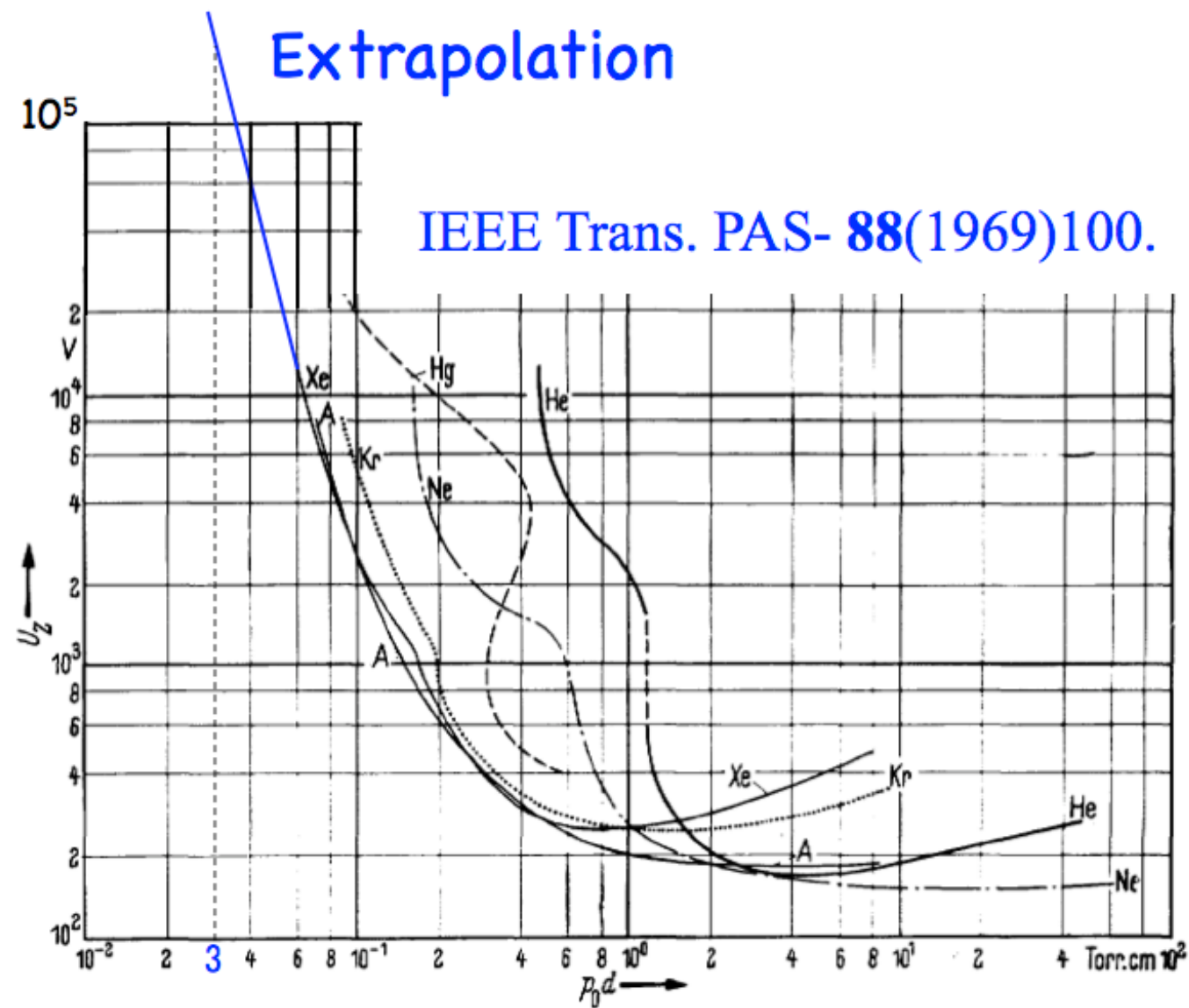
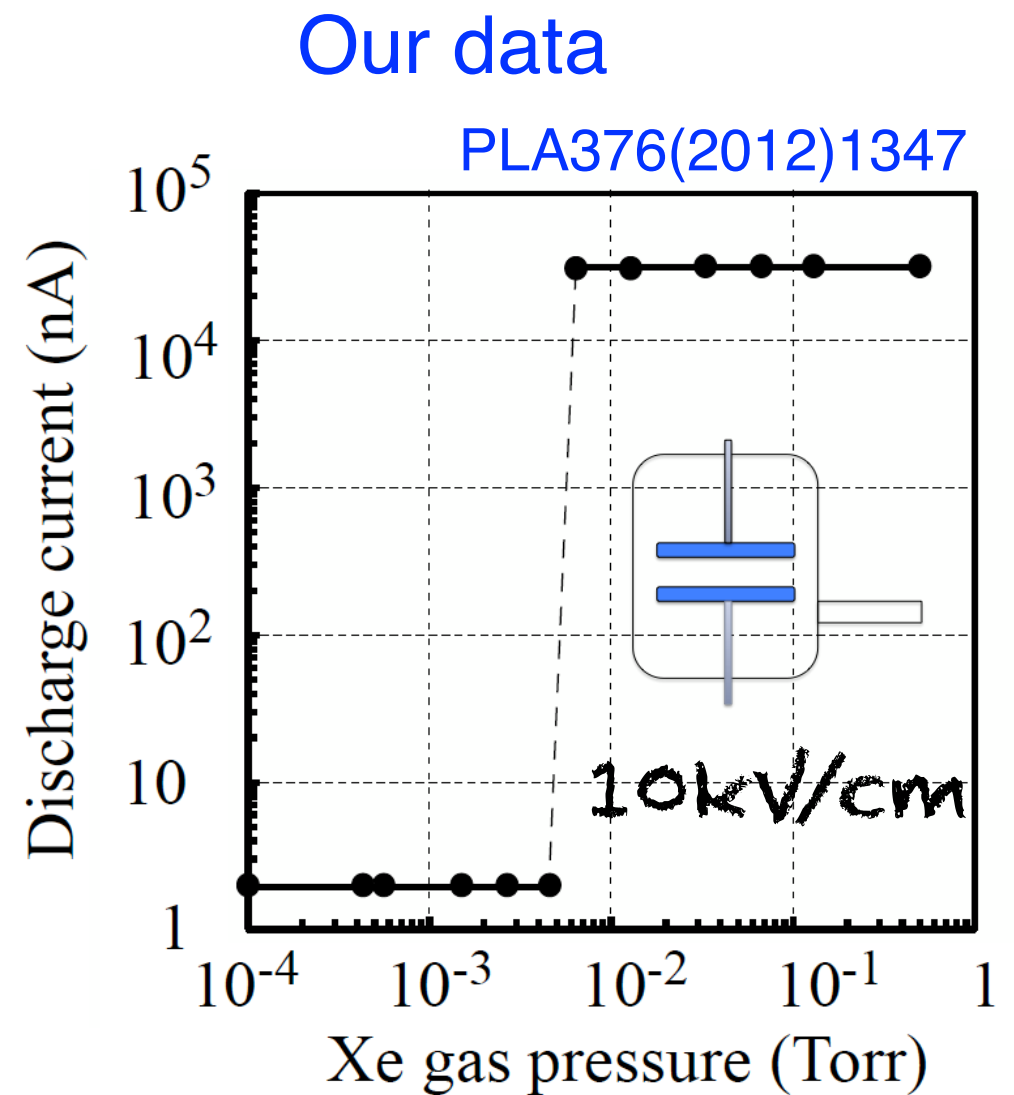
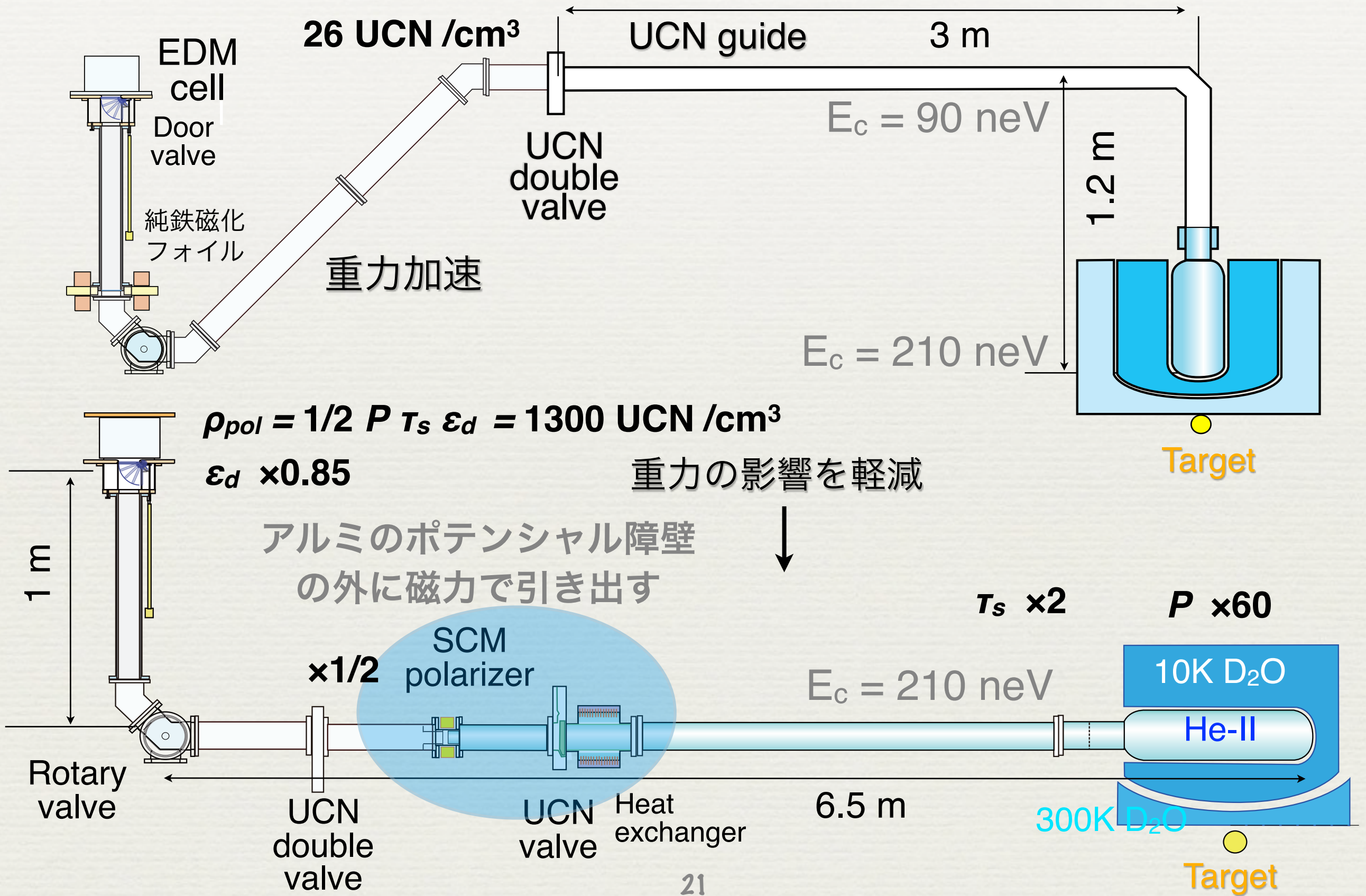


Fig. 7. Breakdown characteristics of the noble gases.
Hg characteristic from [13].

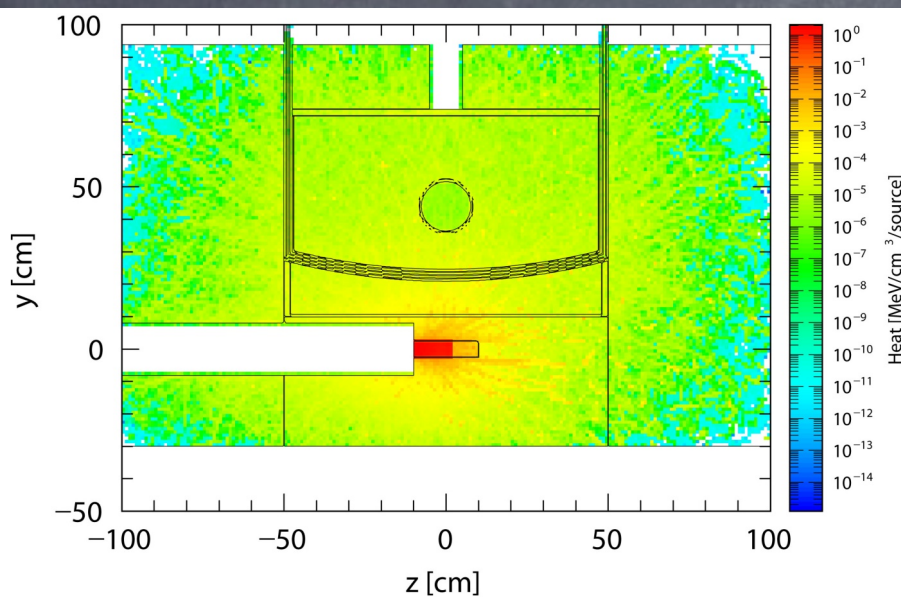


統計精度向上：垂直から水平取出しへ

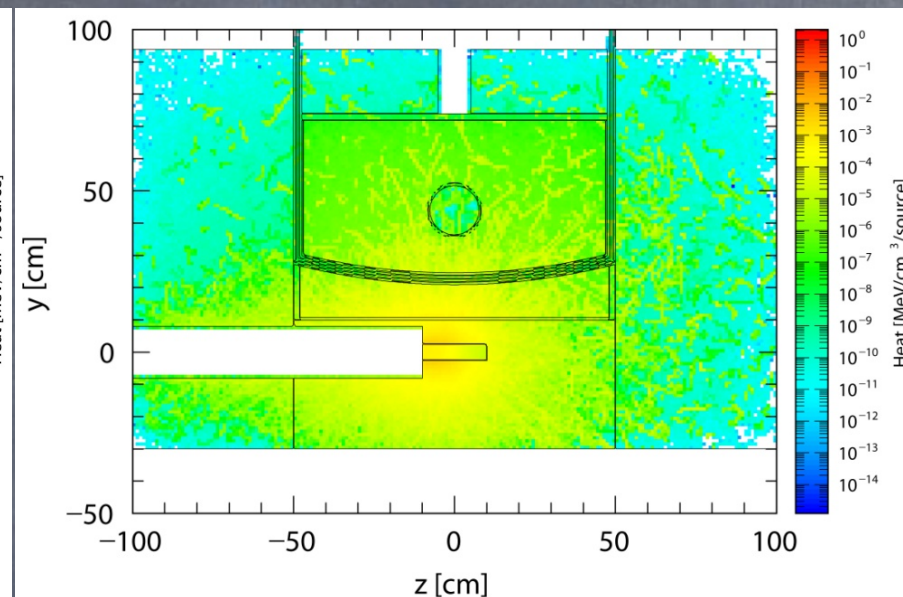


Energy deposit

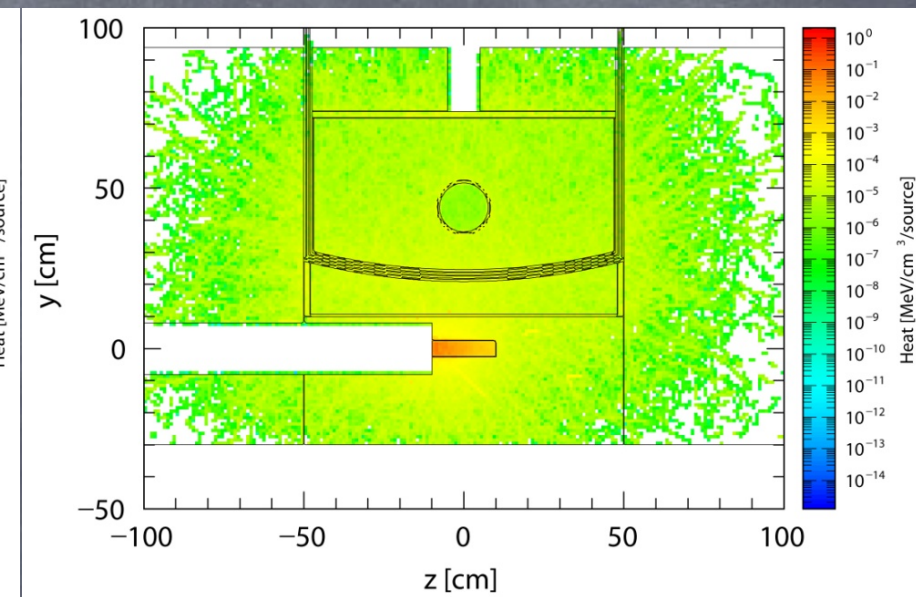
PHITS code



Total



Neutron



photon

Heat deposit

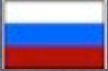
He-II 20K D₂O

0.1 W 4 W 400MeV×1μA RCNP

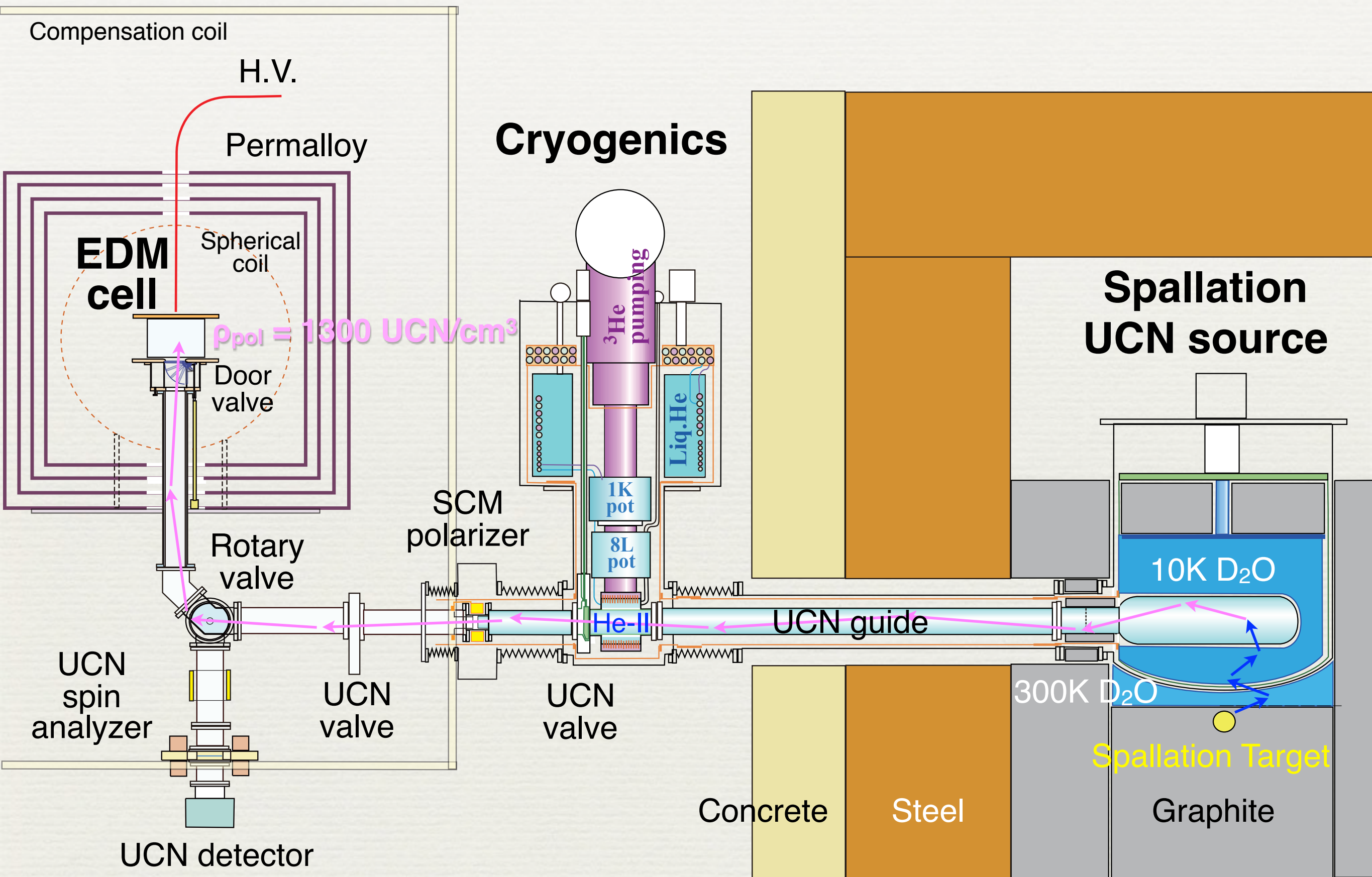
1 W 44 W 400MeV×10μA

5.2 W 266 W 500MeV×40μA TRIUMF

世界のスーパーサーマルUCN源

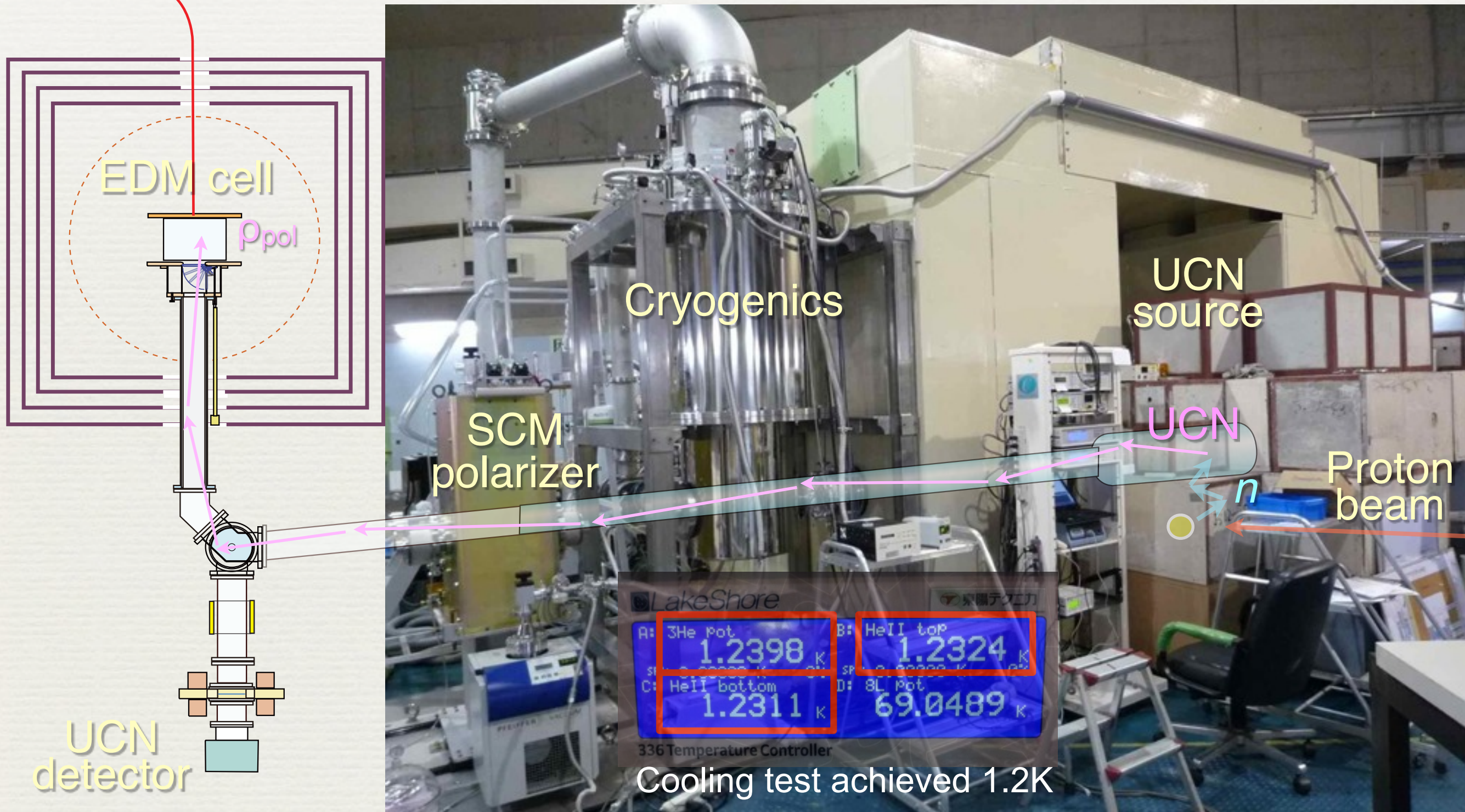
	UCN源 の形式	実験装置内 ρ UCN/cm ³ (E_c neV)	ρ at $E_c = 90$ neV $\rho \propto E_c^{3/2}$
本UCN源 	He-II@D ₂ O スプレーション	1300 (90) pol	1300 pol
PNPI 	He-II@D ₂ 原子炉	12000 (250)	2600
Los Alamos 	SD ₂ スプレーション	120 (180)	42
PSI 	SD ₂ スプレーション	1000 (250)	216
Munich 	SD ₂ 原子炉	1000 (250) pol	216 pol
Sussex-RAL-ILL   	He-II nビーム	1000 (250)	216
SNS 	He-II nビーム	150 (134)	83

第2世代UCN源



タイムライン

2012 at RCNP $400\text{MeV} \times 1\mu\text{A}$, $\rho = 26 \text{ UCN/cm}^3$
2014 at RCNP $400\text{MeV} \times 10\mu\text{A}$, $\rho_{\text{pol}} = 260 \text{ UCN/cm}^3 < 10^{-26} \text{ e cm}$
2016 ~ at TRIUMF $500\text{MeV} \times 40\mu\text{A}$, $1300 \text{ UCN/cm}^3 < 10^{-27} \text{ e cm}$



People at RCNP





Thanks