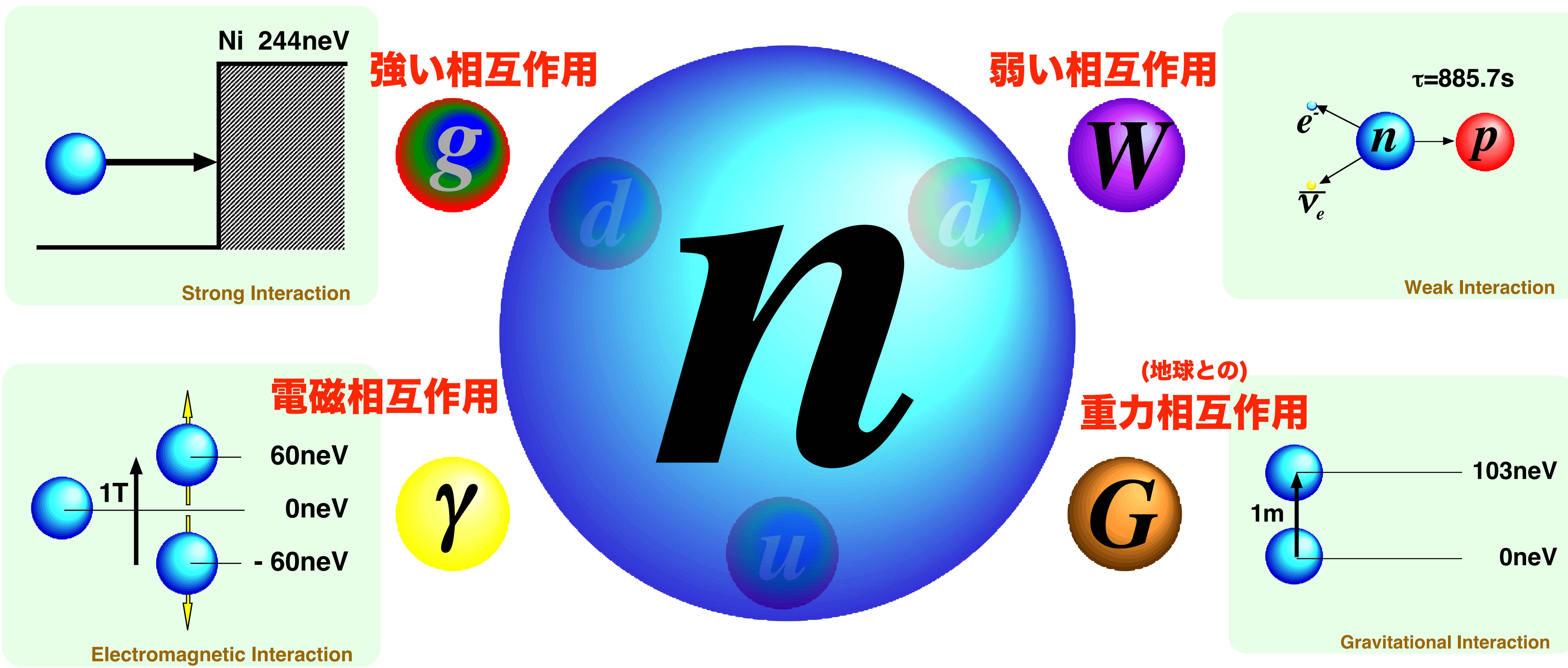
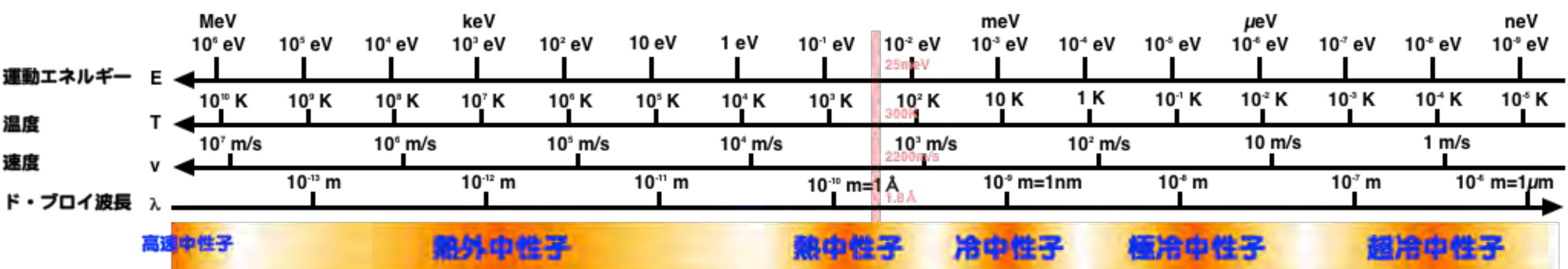
スピンと中性子科学

清　水　裕　彦
高エネルギー加速器研究機構
中性子科学研究系
hirohiko.shimizu@kek.jp

中性子

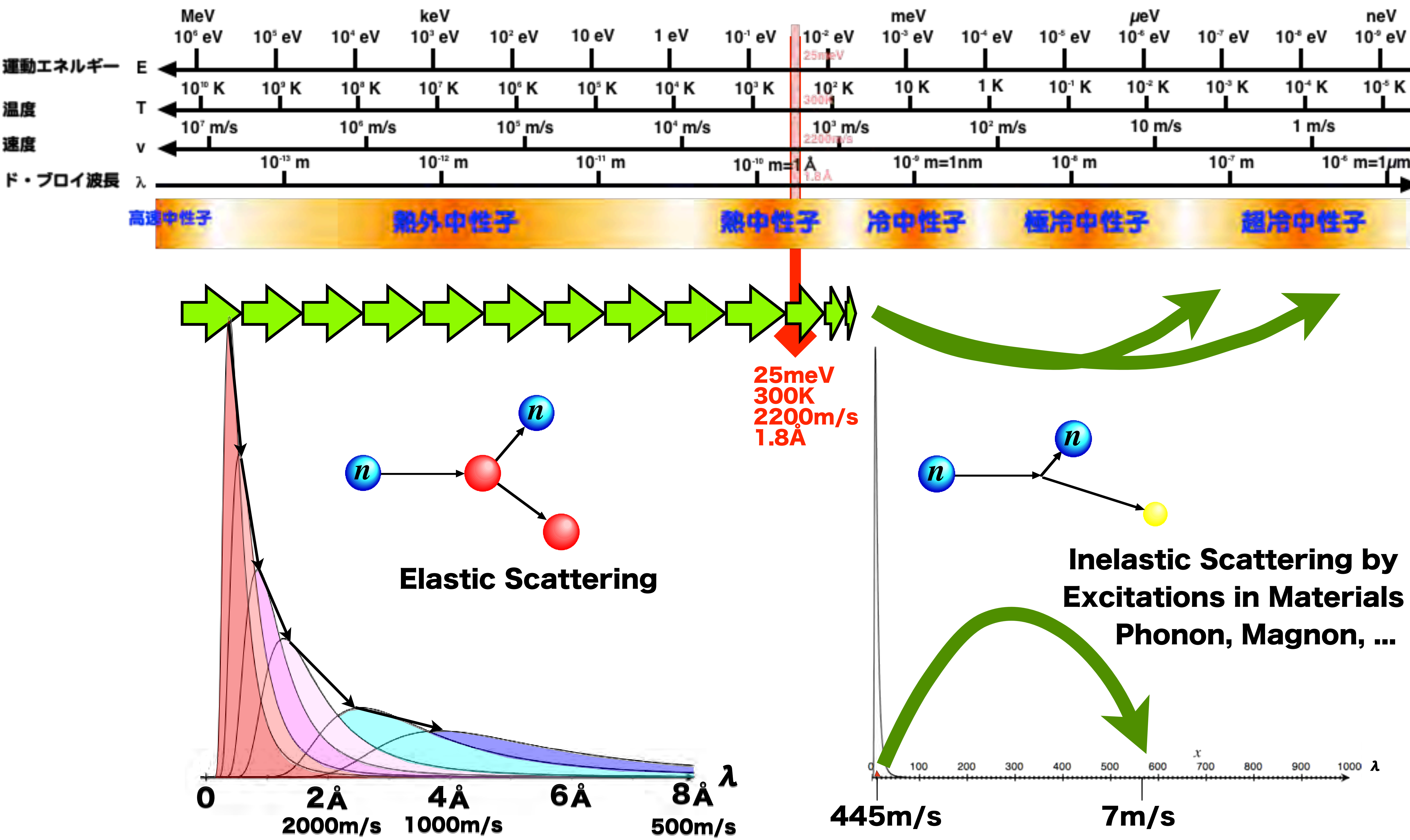


Ni 244neV
Strong Interaction
強い相互作用
g
n
d
d
u
弱い相互作用
W
τ=885.7s
e⁻
n
p
$\bar{\nu}_e$
Weak Interaction
電磁相互作用
1T
60neV
0neV
- 60neV
γ
Electromagnetic Interaction
(地球との)
重力相互作用
G
103neV
1m
0neV
Gravitational Interaction

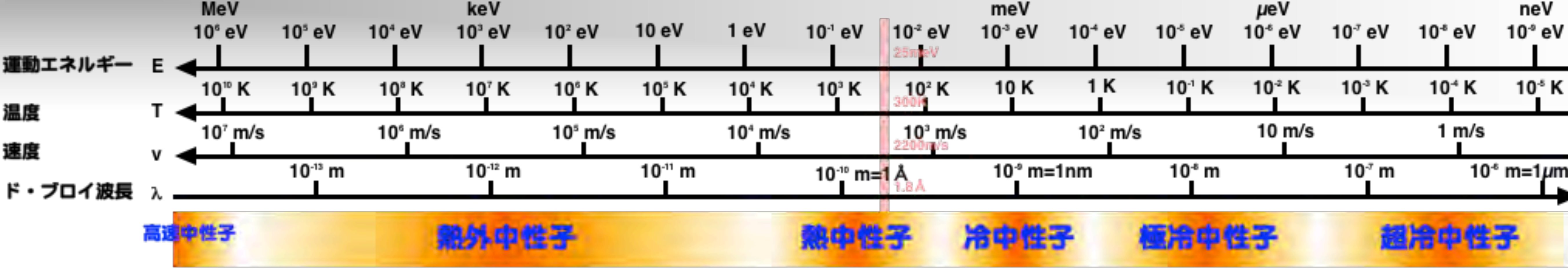


MeV
keV
meV
μeV
neV
10^6 eV
10^5 eV
10^4 eV
10^3 eV
10^2 eV
10 eV
1 eV
10^{-1} eV
10^{-2} eV
10^{-3} eV
10^{-4} eV
10^{-5} eV
10^{-6} eV
10^{-7} eV
10^{-8} eV
10^{-9} eV
25meV
運動エネルギー E
10^{10} K
10^9 K
10^8 K
10^7 K
10^6 K
10^5 K
10^4 K
10^3 K
10^2 K
10 K
1 K
10^{-1} K
10^{-2} K
10^{-3} K
10^{-4} K
10^{-5} K
300K
温度 T
10^7 m/s
10^6 m/s
10^5 m/s
10^4 m/s
10^3 m/s
10^2 m/s
10 m/s
1 m/s
2200m/s
速度 v
10^{-13} m
10^{-12} m
10^{-11} m
10^{-10} m=1 Å
10^{-9} m=1nm
10^{-8} m
10^{-7} m
10^{-6} m=1μm
1.8 Å
ド・ブロイ波長 λ
高速中性子
熱外中性子
熱中性子
冷中性子
極冷中性子
超冷中性子

中性子の減速



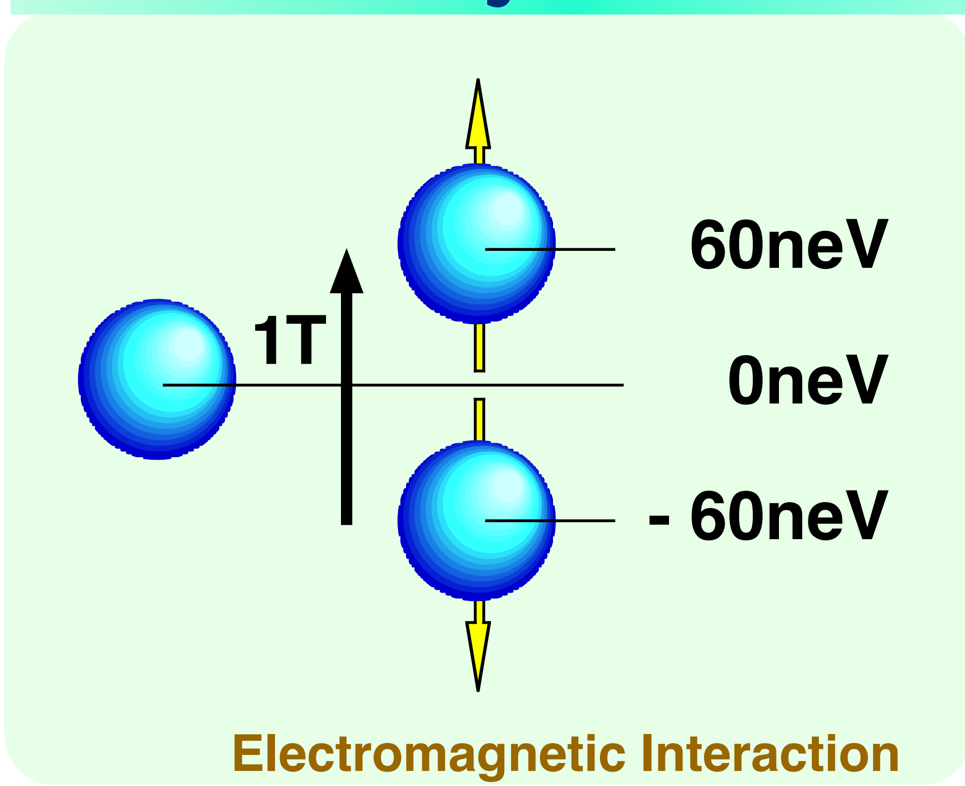
MeV
10^{6} eV
10^{5} eV
10^{4} eV
keV
10^{3} eV
10^{2} eV
10 eV
1 eV
10^{-1} eV
10^{-2} eV
25meV
meV
10^{-3} eV
10^{-4} eV
10^{-5} eV
μeV
10^{-6} eV
10^{-7} eV
10^{-8} eV
neV
10^{-9} eV
運動エネルギー E
10^{10} K
10^{9} K
10^{8} K
10^{7} K
10^{6} K
10^{5} K
10^{4} K
10^{3} K
10^{2} K
300K
10 K
1 K
10^{-1} K
10^{-2} K
10^{-3} K
10^{-4} K
10^{-5} K
温度 T
10^{7} m/s
10^{6} m/s
10^{5} m/s
10^{4} m/s
10^{3} m/s
2200m/s
10^{2} m/s
10 m/s
1 m/s
速度 v
10^{-13} m
10^{-12} m
10^{-11} m
10^{-10} m=1Å
1.8Å
10^{-9} m=1nm
10^{-8} m
10^{-7} m
10^{-6} m=1μm
ド・ブロイ波長 λ
高速中性子
熱外中性子
熱中性子
冷中性子
極冷中性子
超冷中性子
25meV
300K
2200m/s
1.8Å
n
n
Elastic Scattering
n
n
Inelastic Scattering by
Excitations in Materials
Phonon, Magnon, ...
0
2Å
4Å
6Å
8Å
λ
2000m/s
1000m/s
500m/s
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
λ
445m/s
7m/s

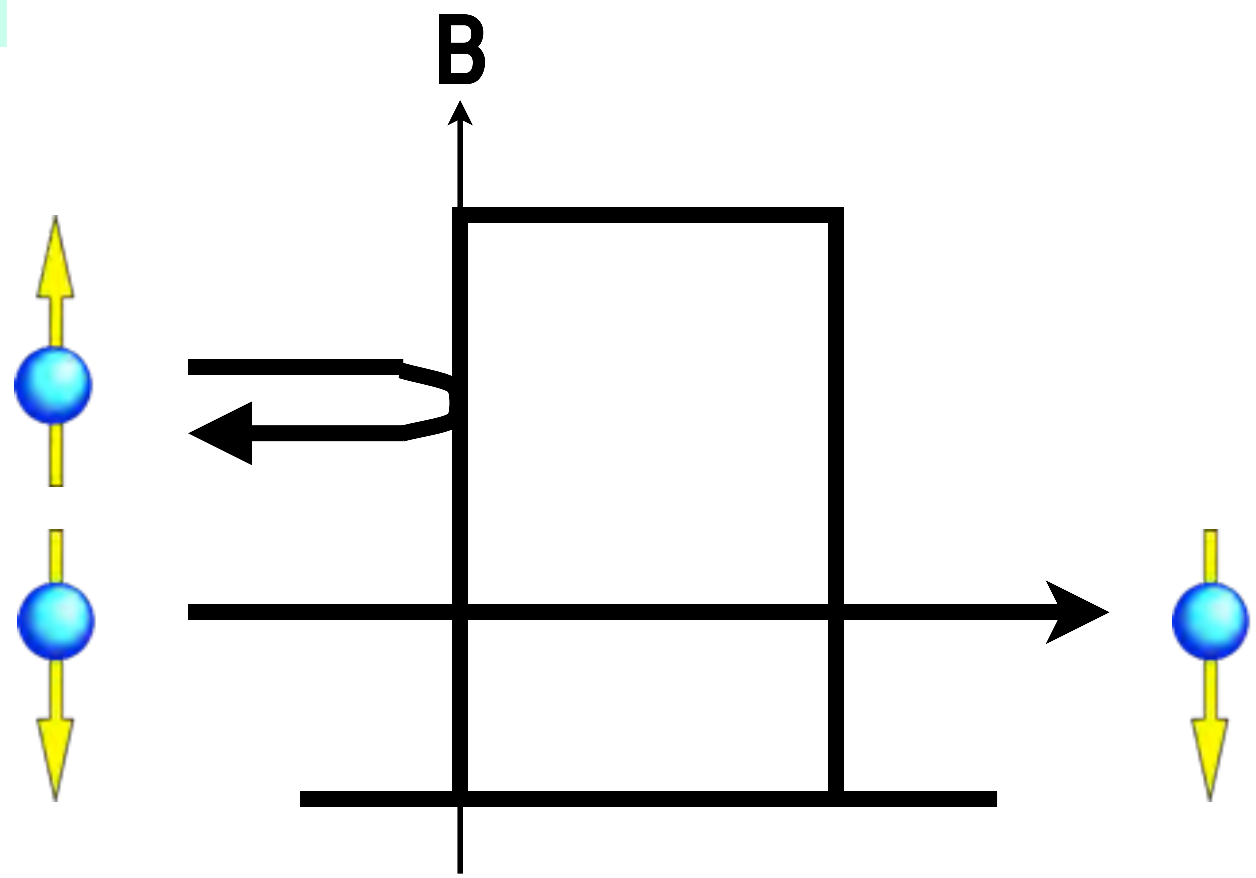


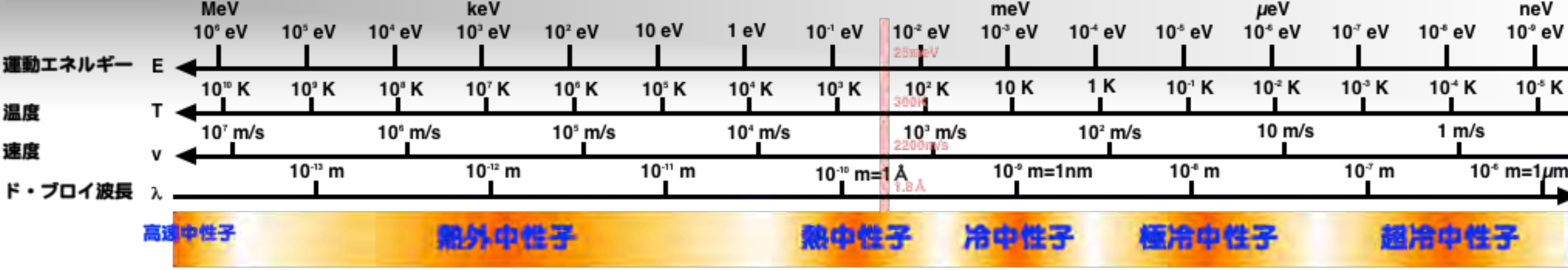
偏極方法

Magnetic Field

Magnetic Field







Magnetic Mirror

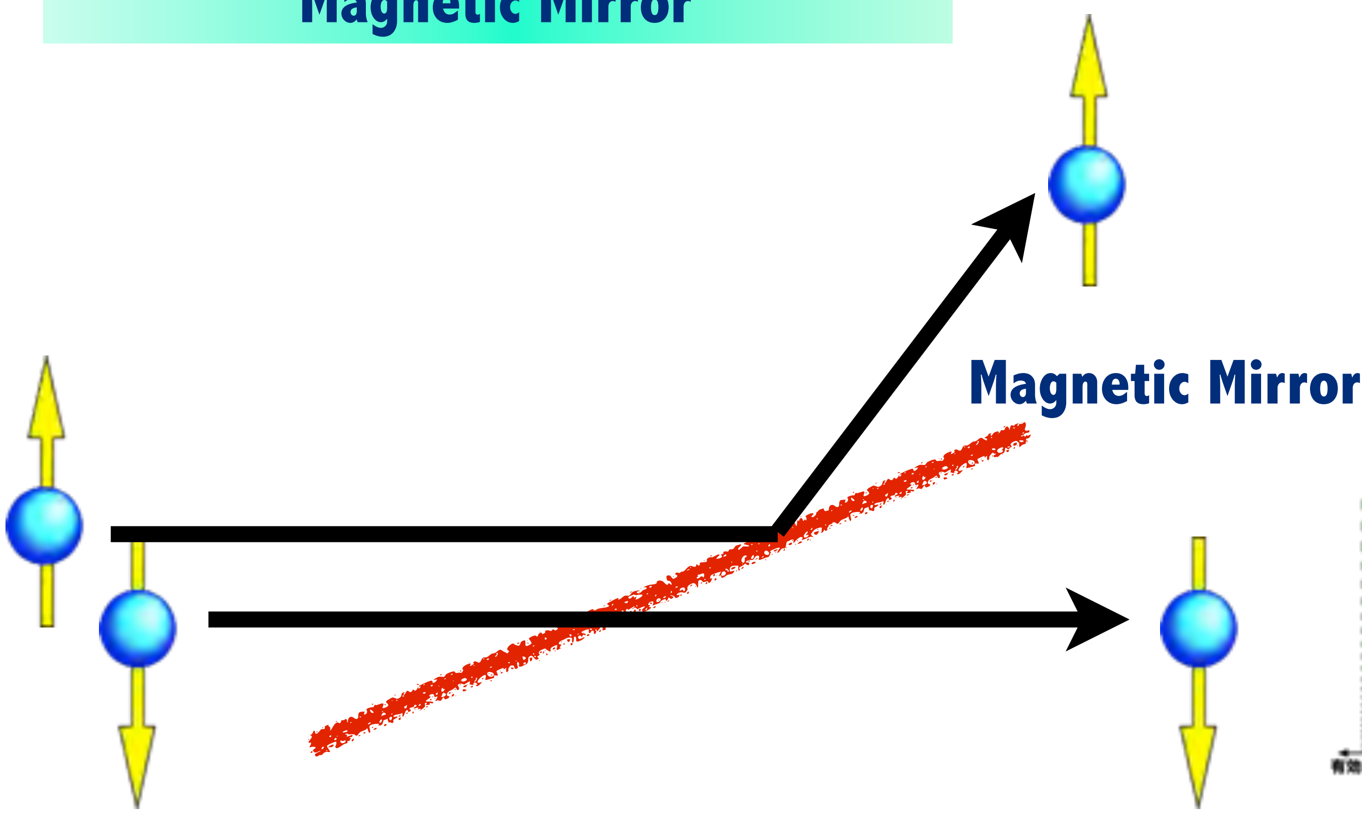
Magnetic Field

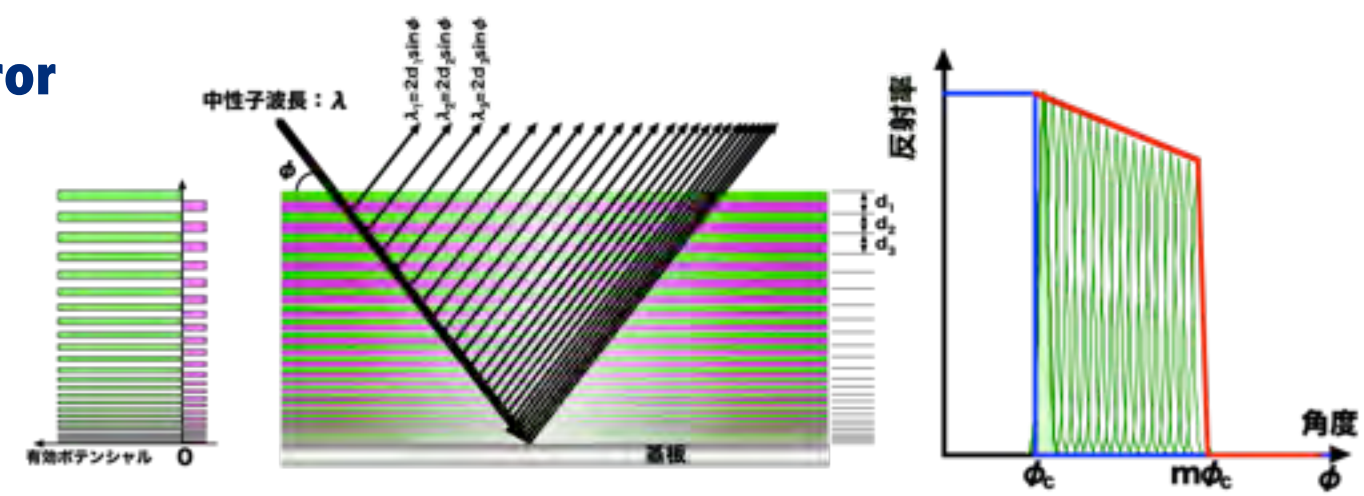
偏極方法

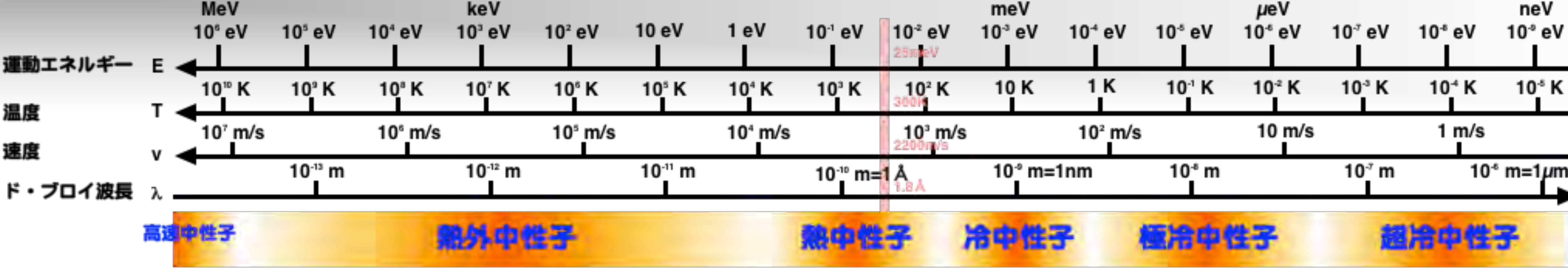
Magnetic Mirror

Magnetic Supermirror

$v_\perp < 40$m/s







Magnetic Mirror

偏極方法

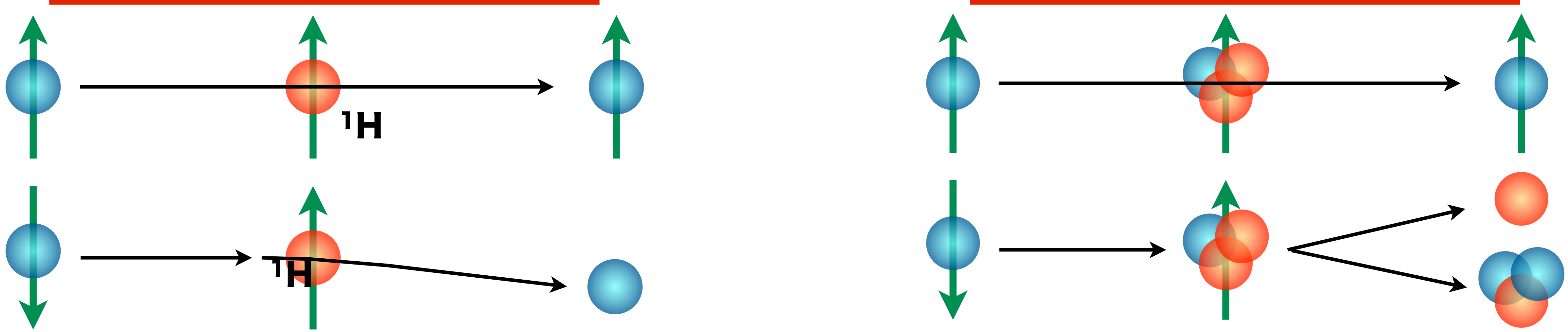
Polarized Proton

Magnetic Field

Polarized ^{3}He

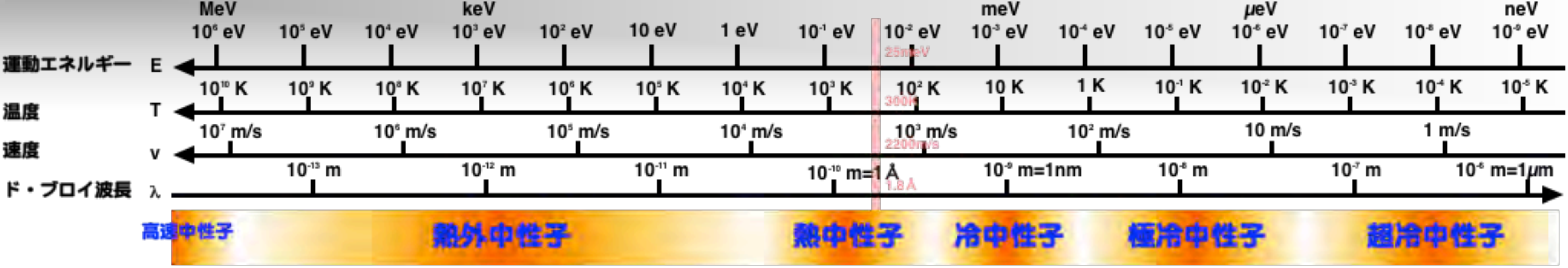
Polarized Proton

Polarized ^{3}He



Spin Filter

$$\sigma_{\pm} = \sigma_0 \pm P \sigma_{\mathrm{P}}$$



偏極方法

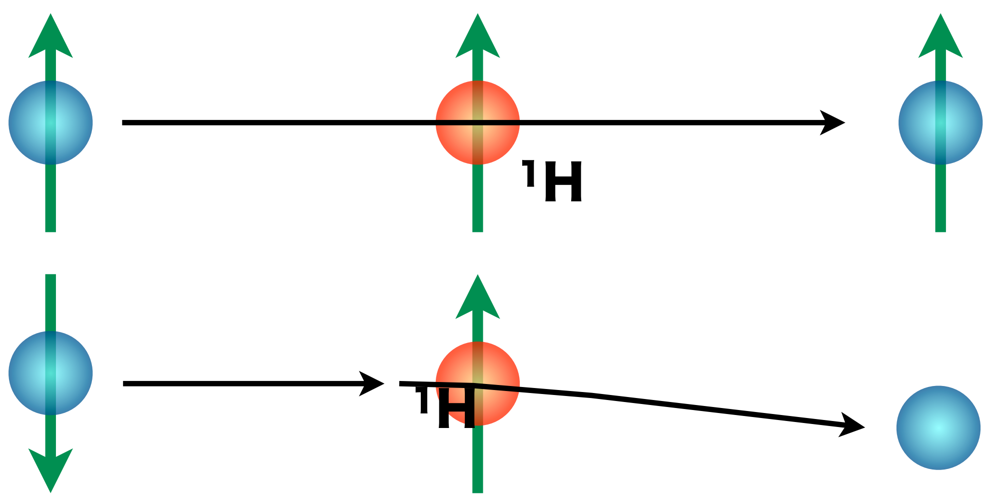
Magnetic Mirror

Polarized Proton

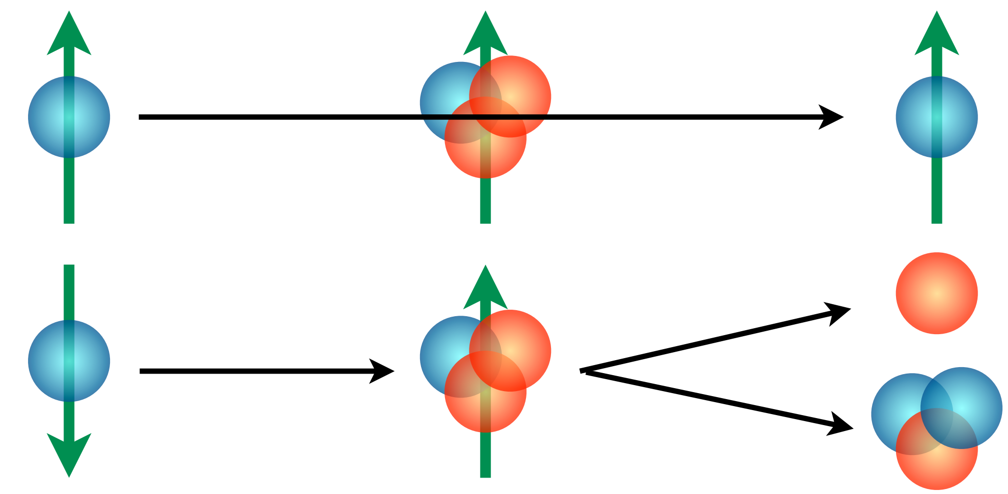
Magnetic Field

Polarized ^{3}He

Polarized Proton	Polarized ^{3}He



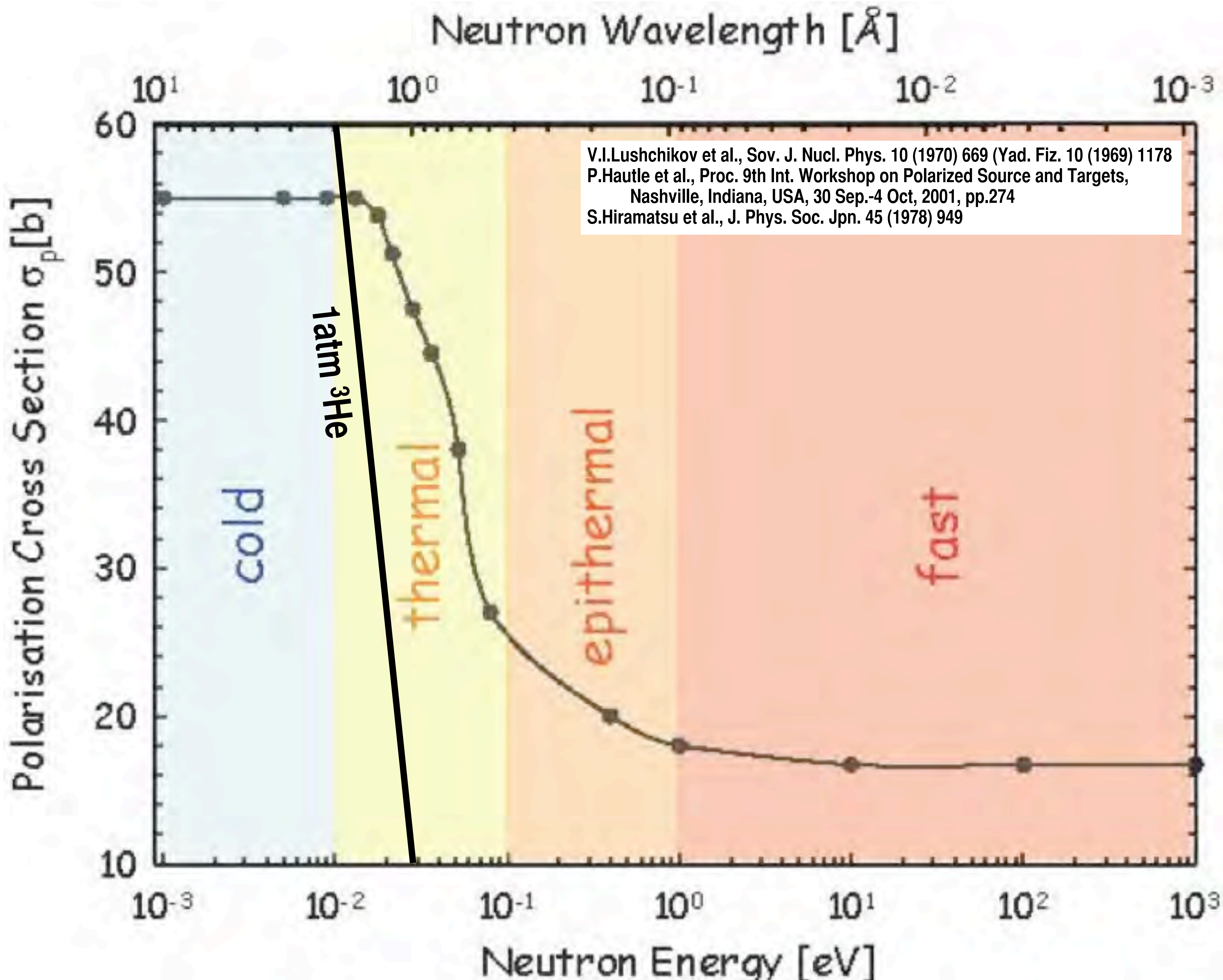
$$\sigma_\pm = \sigma_0 \pm P_p \, \underline{\sigma_{\mathrm{P}}(E_n)}$$

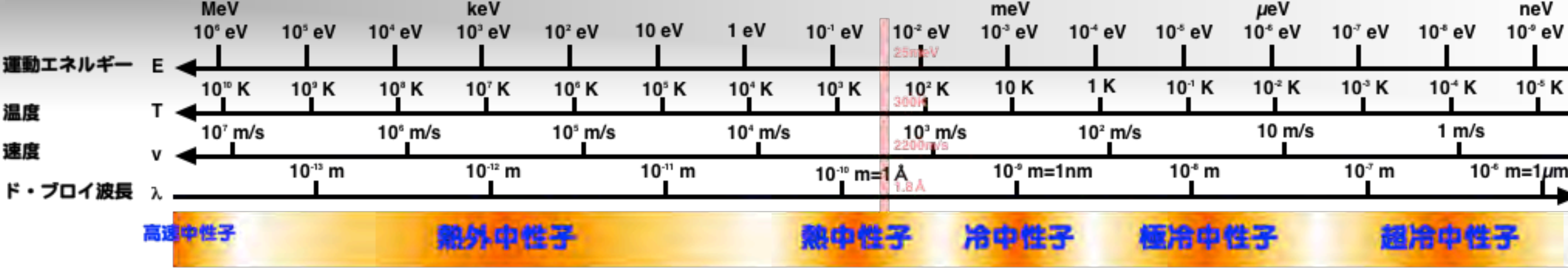


$$\sigma_\pm = \sigma_0 \times (1 \mp P_{^3\mathrm{He}})$$

$$\frac{\sigma_0}{1\mathrm{b}} = 5333\sqrt{\frac{25\mathrm{meV}}{E_n}}$$

Energy Dependence of Polarization Cross Section of Proton





Magnetic Mirror

偏極方法

Polarized Proton

Magnetic Field

Polarized ^{3}He

Heusler Crystal

Nuclear Engineering

Nuclear Physics

Particle Physics

研究分野

Hard Matter Researches

Soft Matter Researches

Particle Physics

熱外中性子光学
Epithermal Neutron Optics

未開拓領域

高強度パルス中性子源

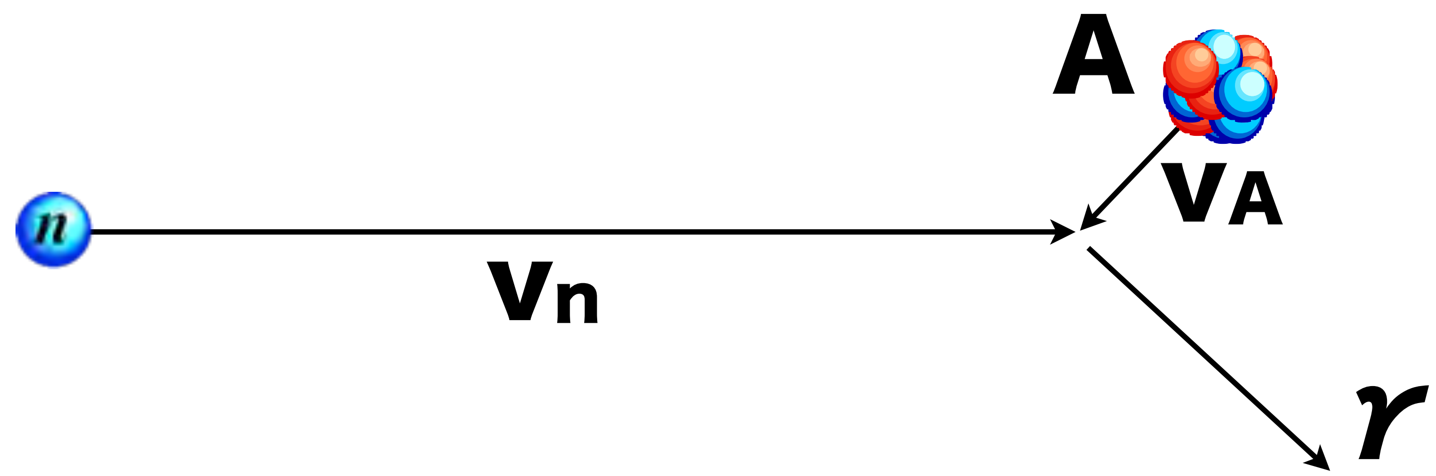
超高性能光学系

核偏極(動的核偏極)

物質中の原子運動

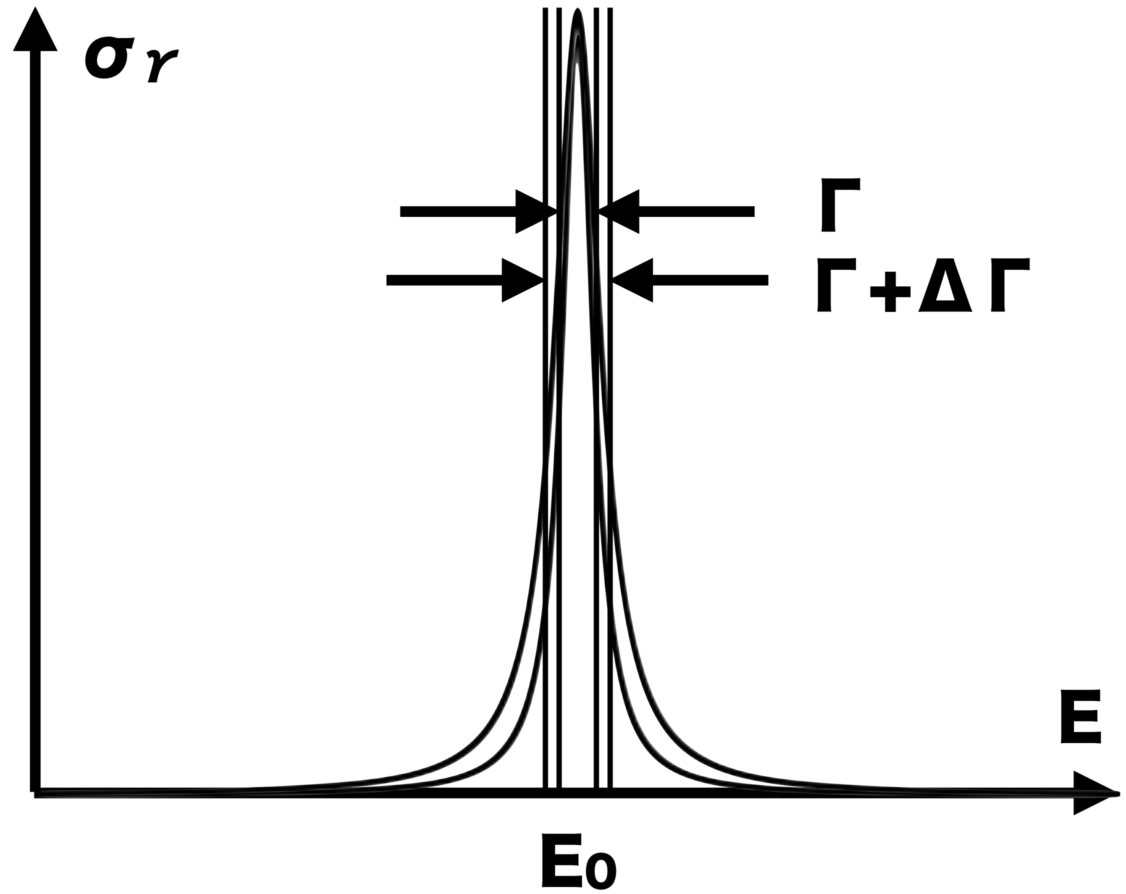
(n,γ) Doppler Spectroscopy

(n,γ) Doppler Spectroscopy

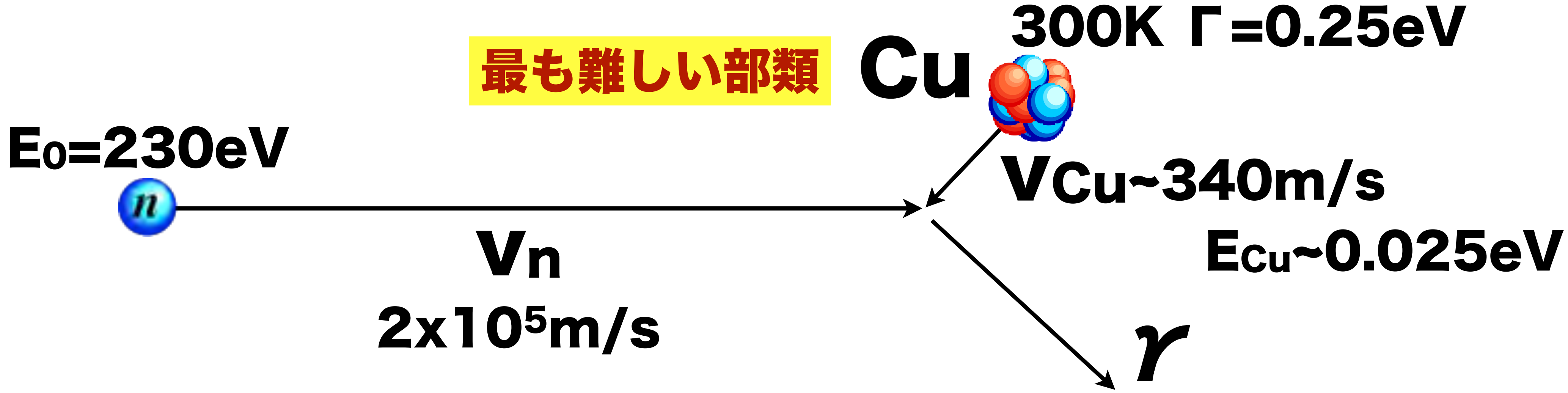


$$E_{\rm cm} = \frac{m_n}{2}\frac{A}{1+A}\left|\boldsymbol{v}_n - \boldsymbol{v}_A\right|^2$$

Doppler Broadening

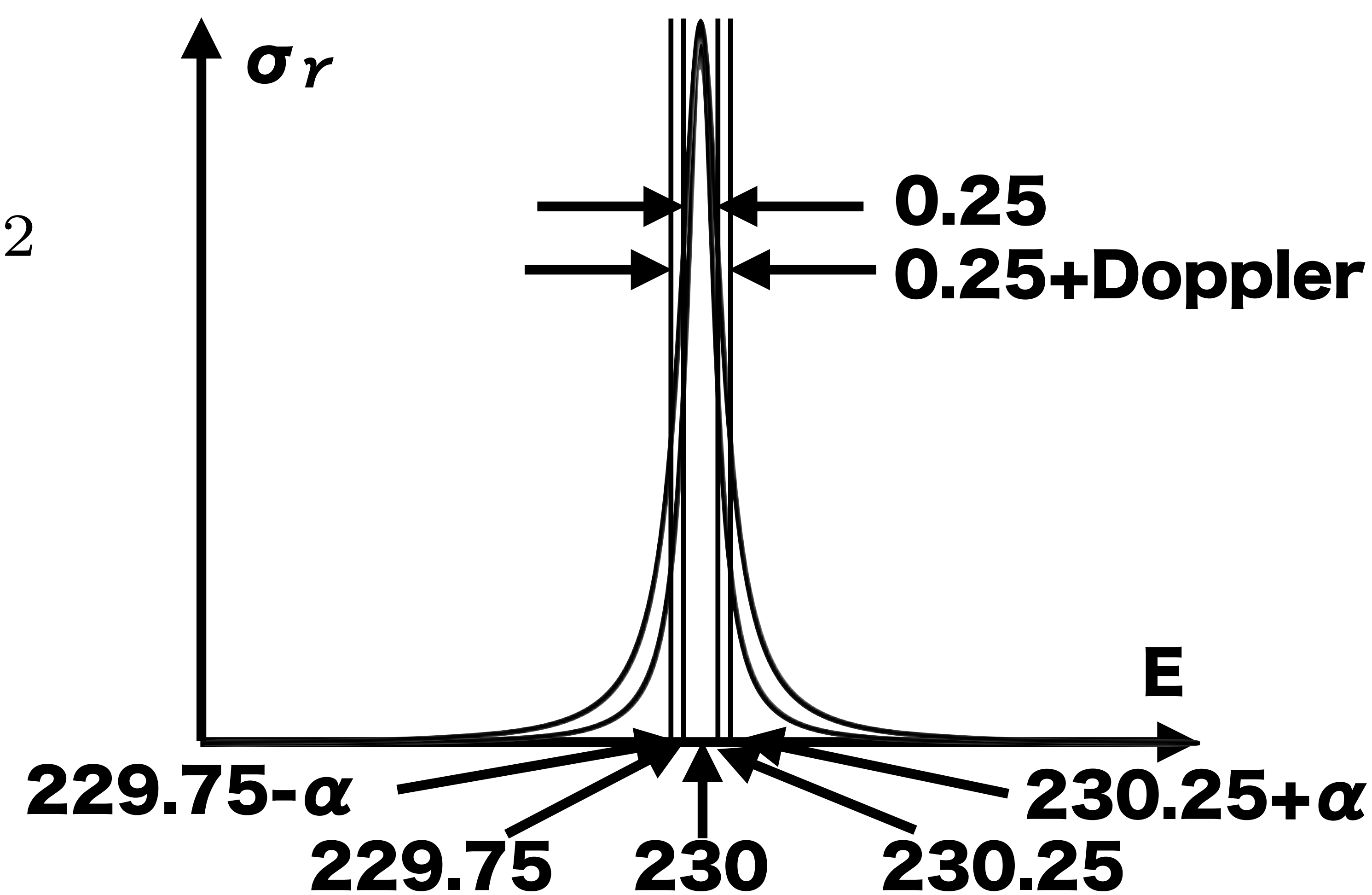


(n,γ) Doppler Spectroscopy

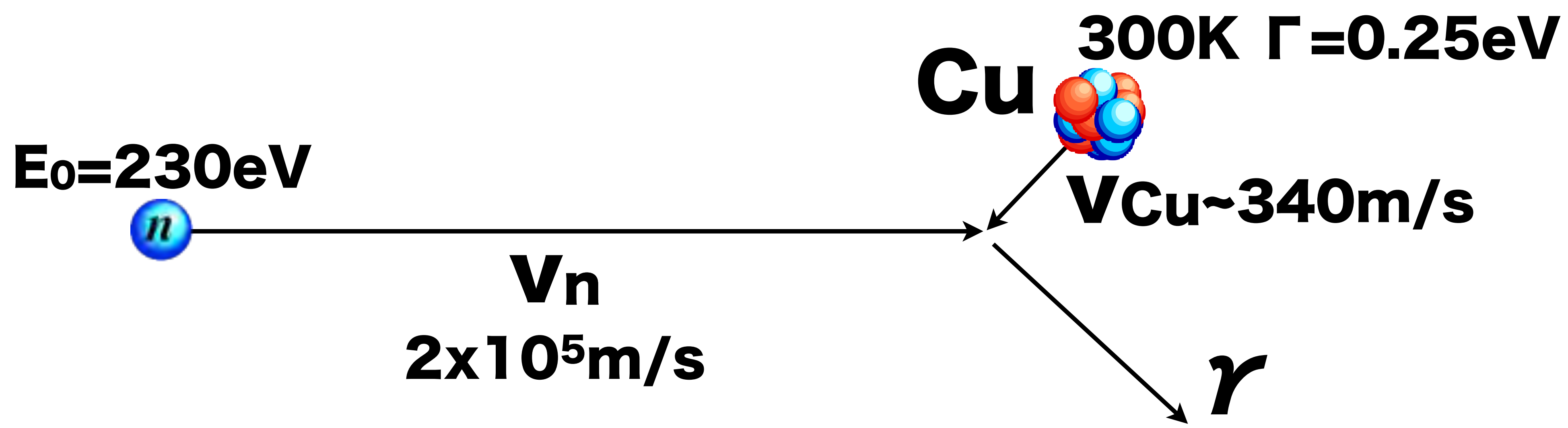


$$E_{\rm cm} = \frac{m_n}{2}\frac{A}{1+A}\left|v_n - v_A\right|^2$$

Doppler Broadening



(n,γ) Doppler Spectroscopy



$$\frac{\Delta E}{E} = 2\frac{\Delta v}{v} \sim 0.002$$

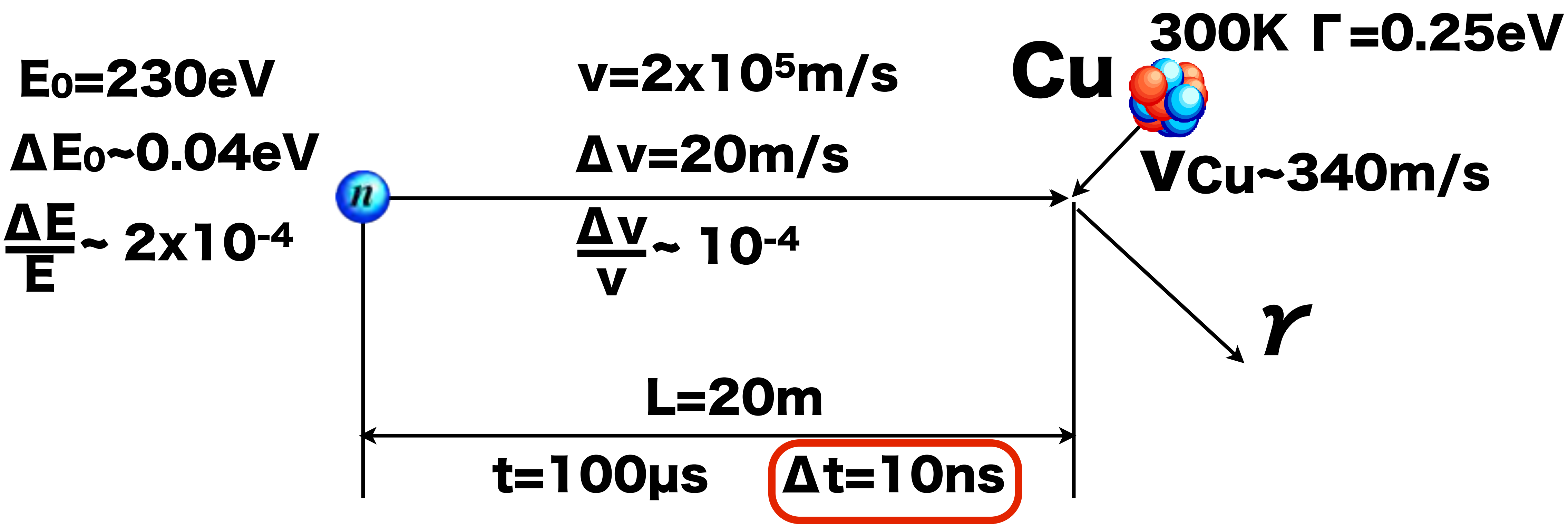
そこで

$$\frac{\Delta E}{E} \sim 2\times10^{-4} \qquad \frac{\Delta v}{v} \sim 10^{-4}$$

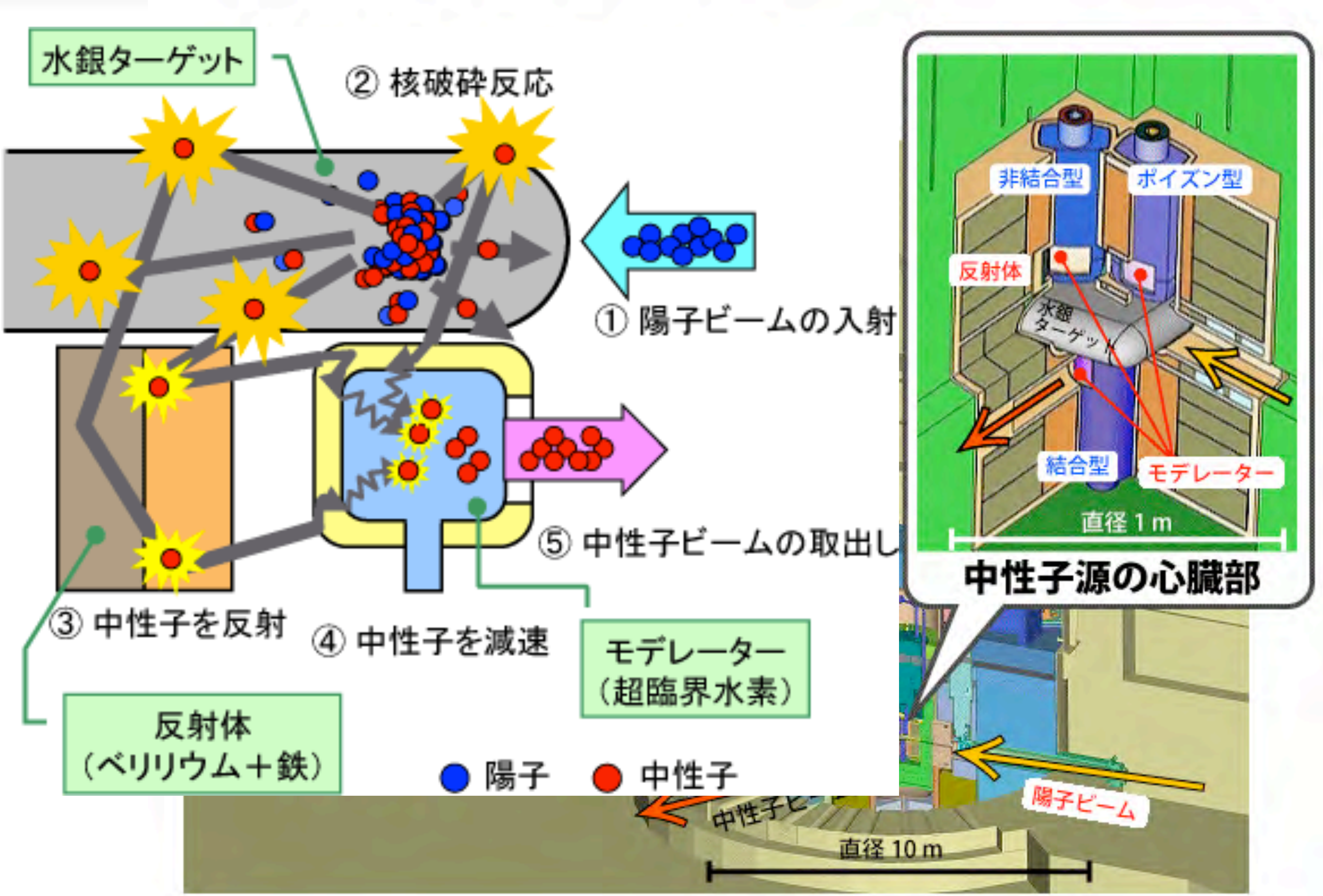
$(\Delta E \sim 0.04\text{eV})$

を要求することを考える

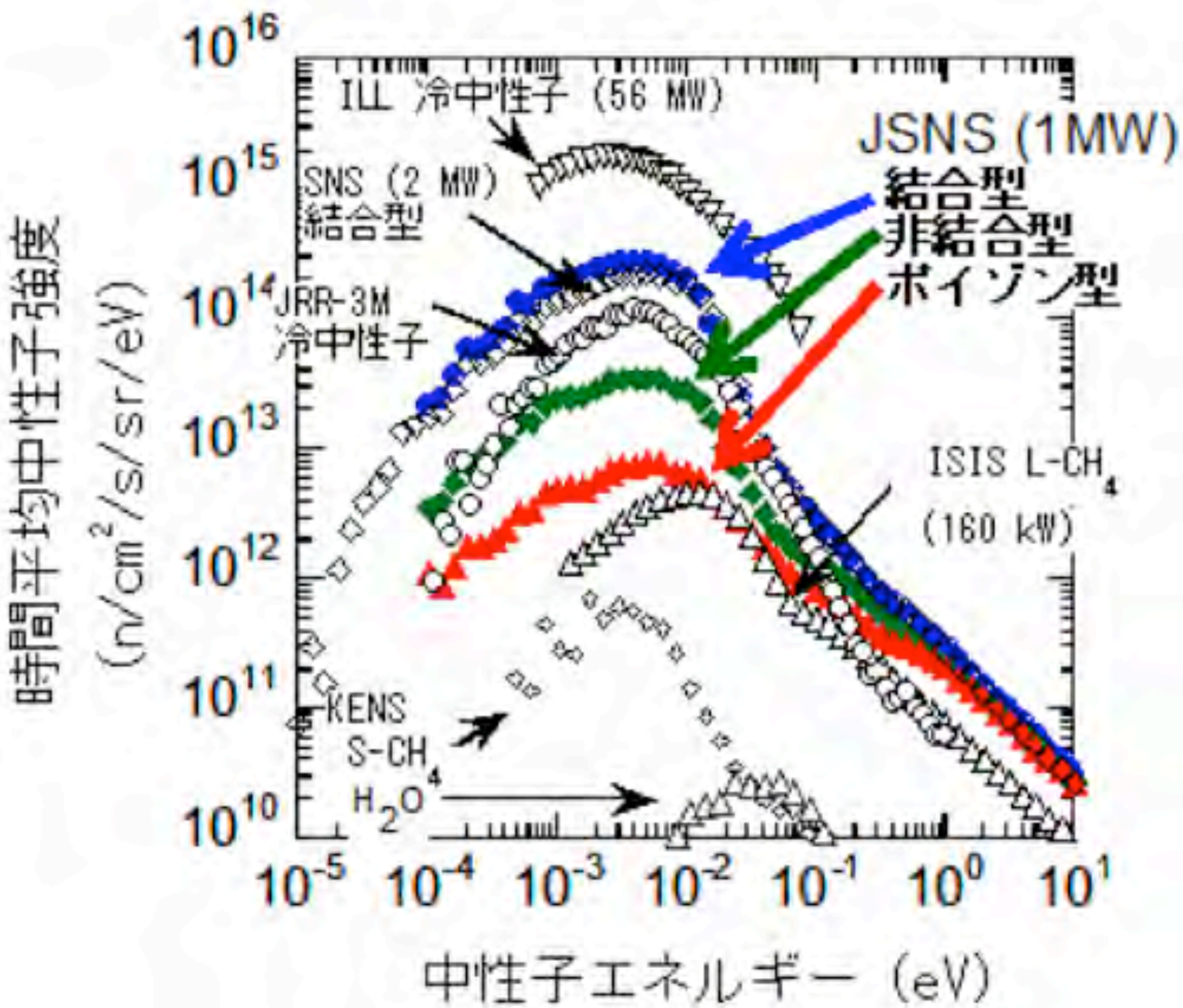
(n,γ) Doppler Spectroscopy

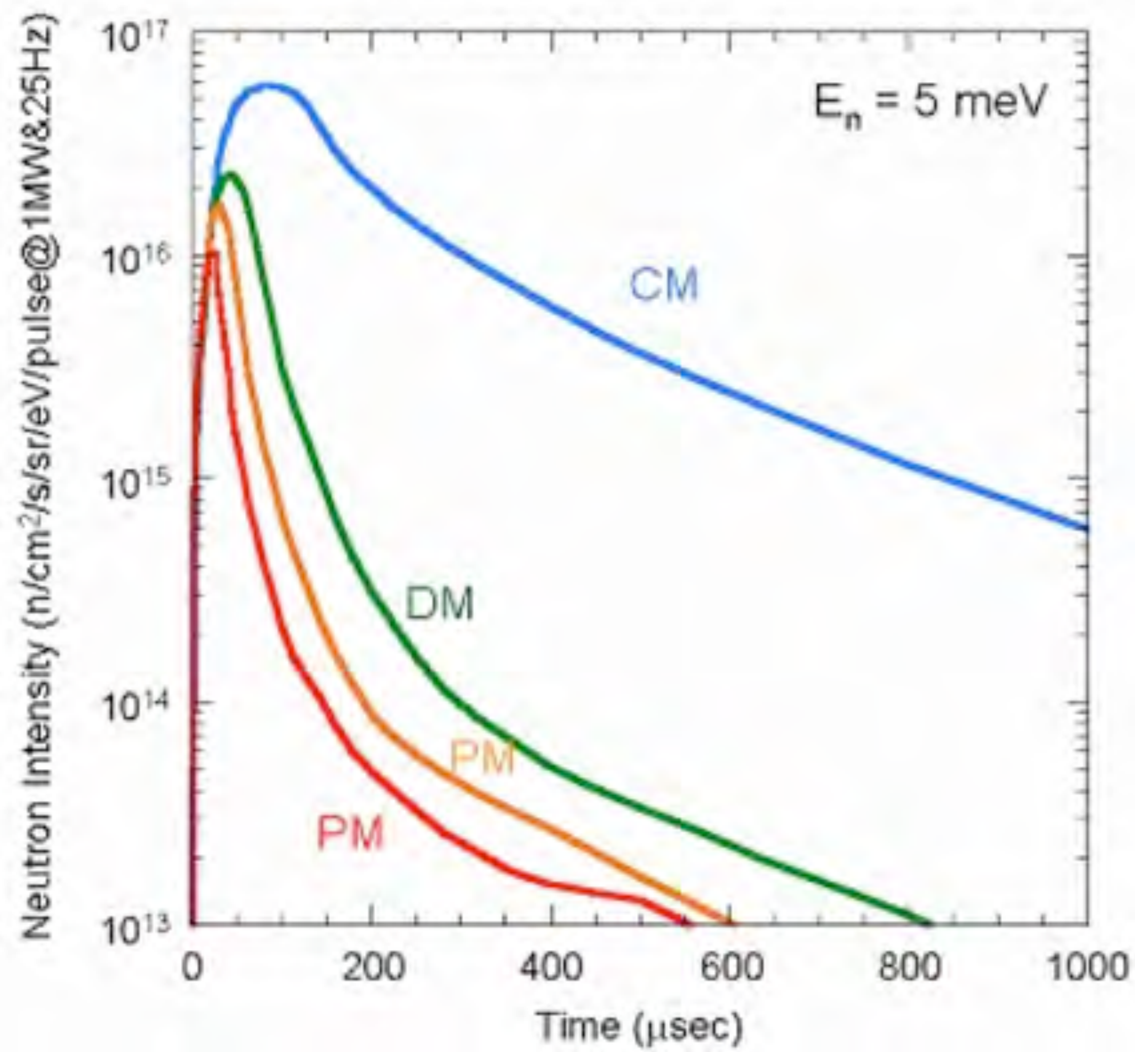


J-PARC Spallation Neutron Source



J-PARC Spallation Neutron Source





E_0=230eV

ΔE_0~0.04eV

$\frac{\Delta E}{E}$~ 2×10^{-4}

$v=2\times10^5$ m/s

Δv=20m/s

$\frac{\Delta v}{v}$~ 10^{-4}

Cu 300K Γ=0.25eV

v_{Cu}~340m/s

γ

L=20m

t=100μs $\boxed{\Delta t=10\text{ns}}$

A=(1cm)^2

no guide

Ω=0.25μsr

high-m supermirrorが有効なエネルギー範囲(A=(1cm)^2)

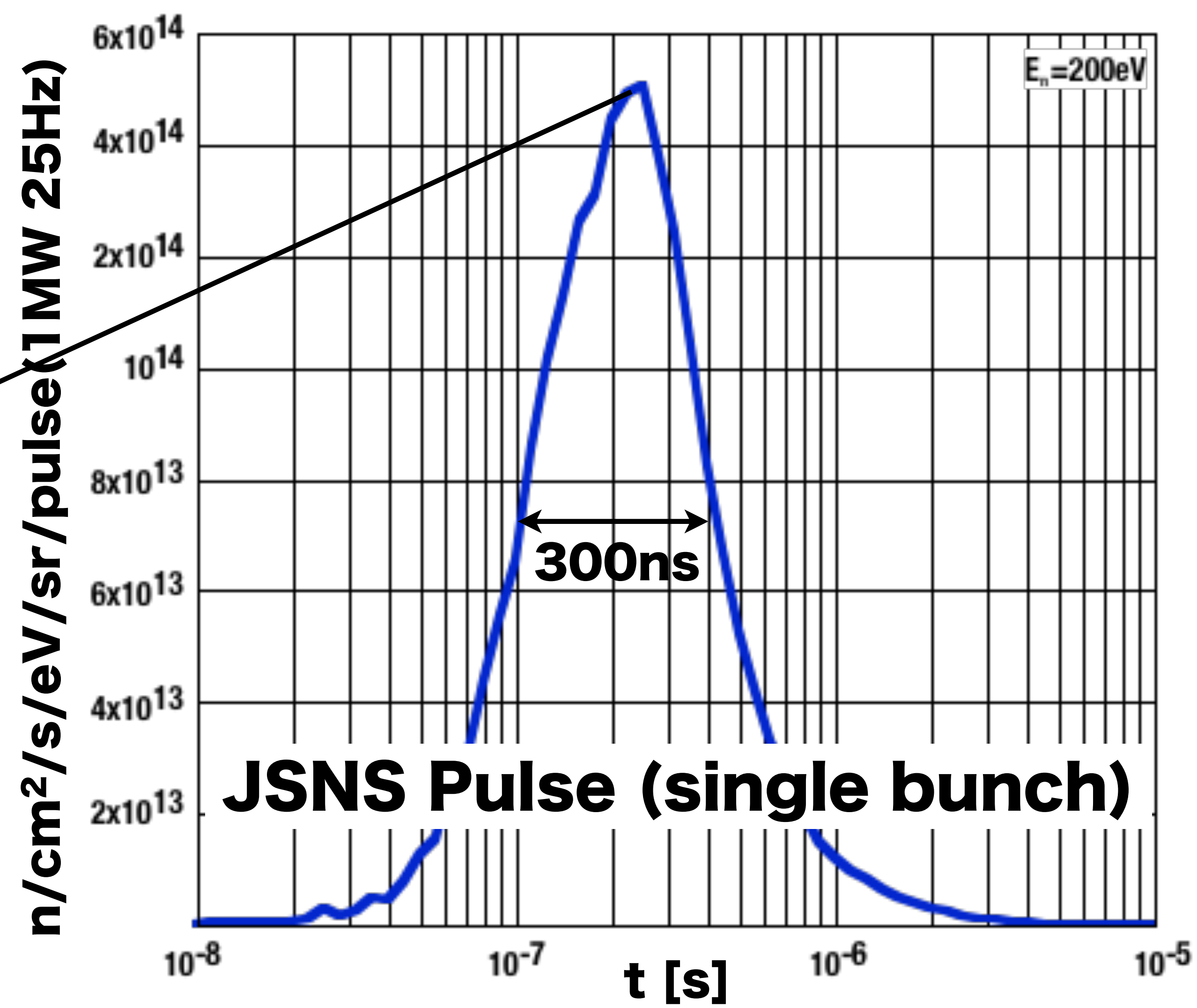
m= 5 E<25eV
m= 6 E<36eV
m=10 E<100eV
m=15 E<230eV

1.3 n/s

10^5 n/day

$\Omega_\gamma=4\pi\times0.1$ sr

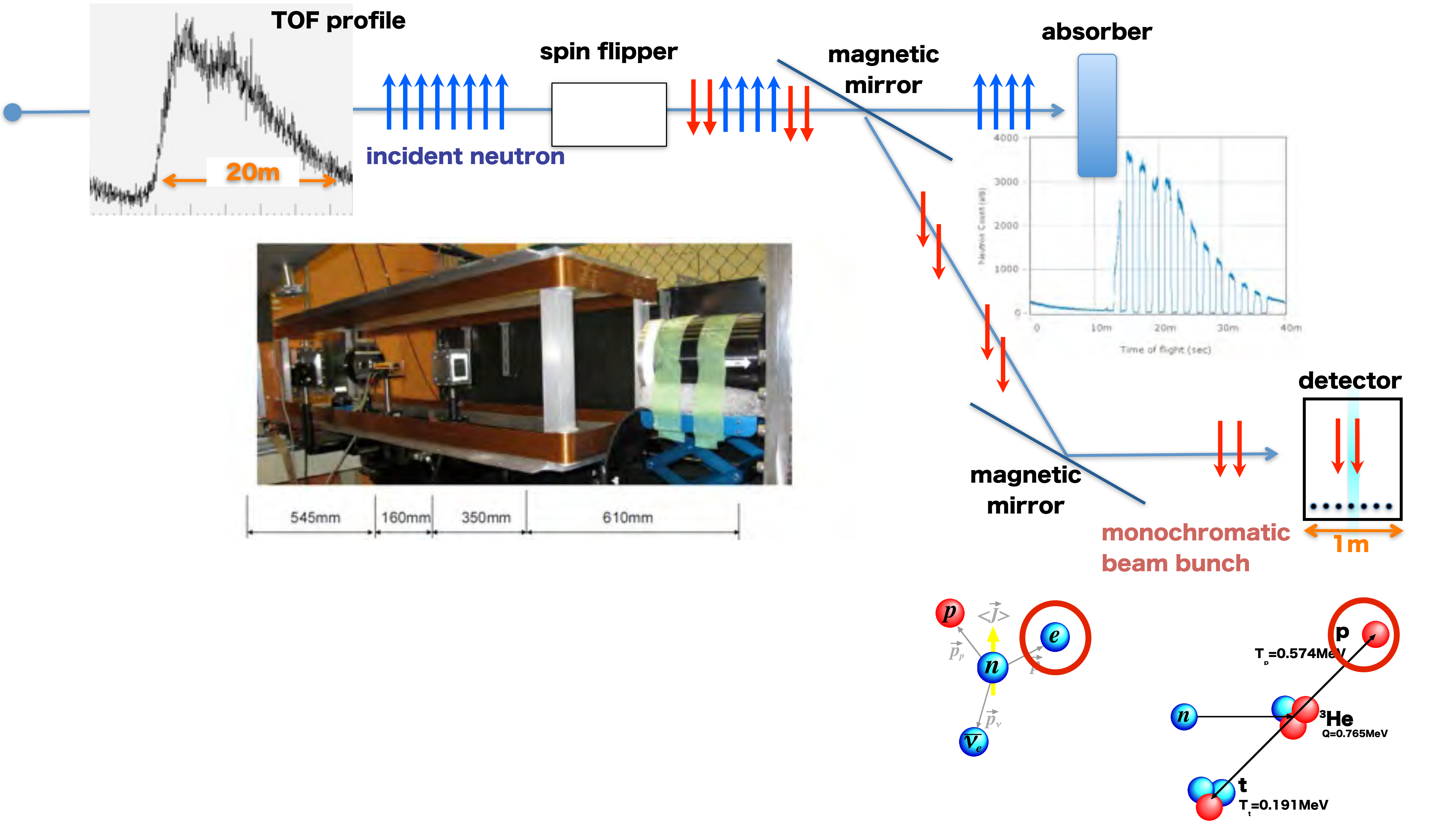
stat.=1% (1day)

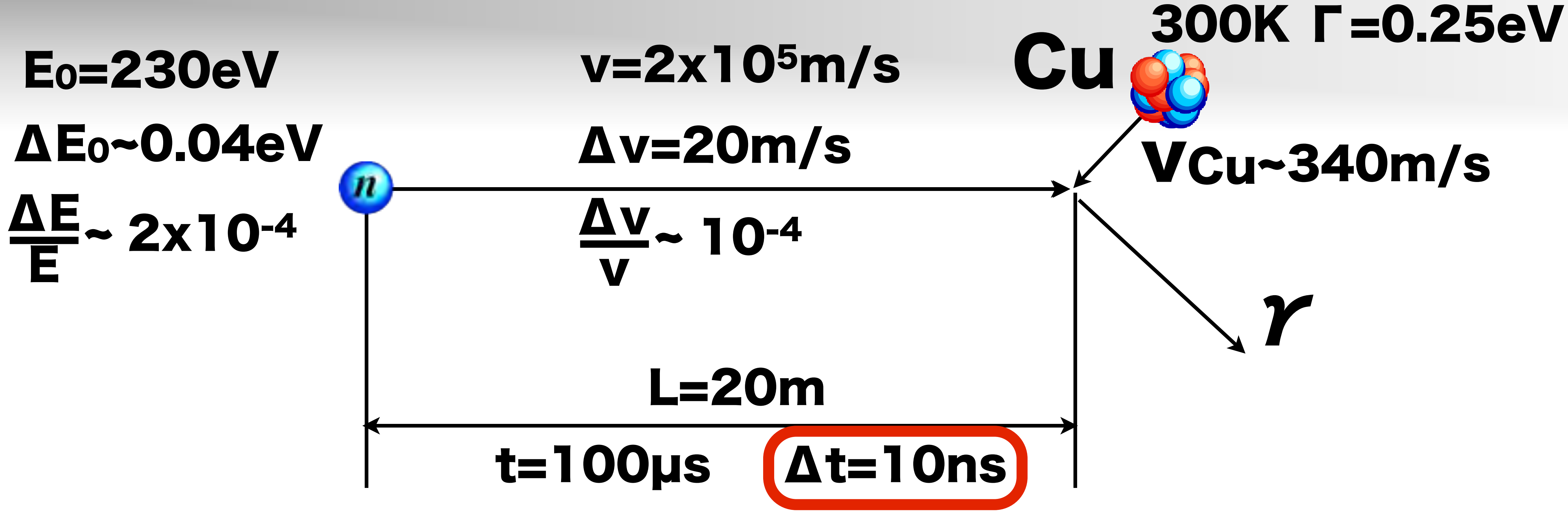


An Electrically Controlled Beam Steering

Spin-Flip Chopper

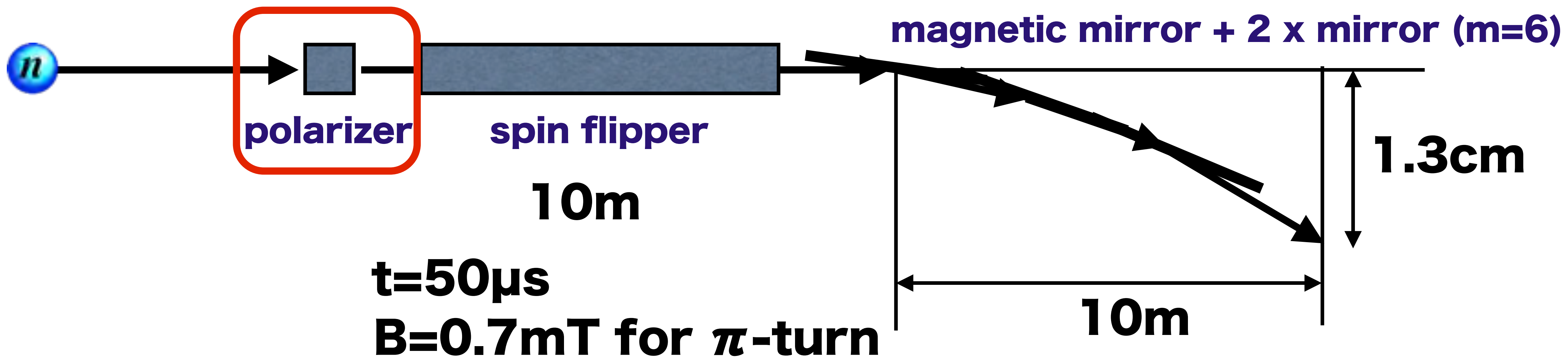
Spin-Flip Chopper
for Neutron Lifetime In-flight Measurement





velocity selector / chopper

epithermal spin flip chopper (E=230eV)

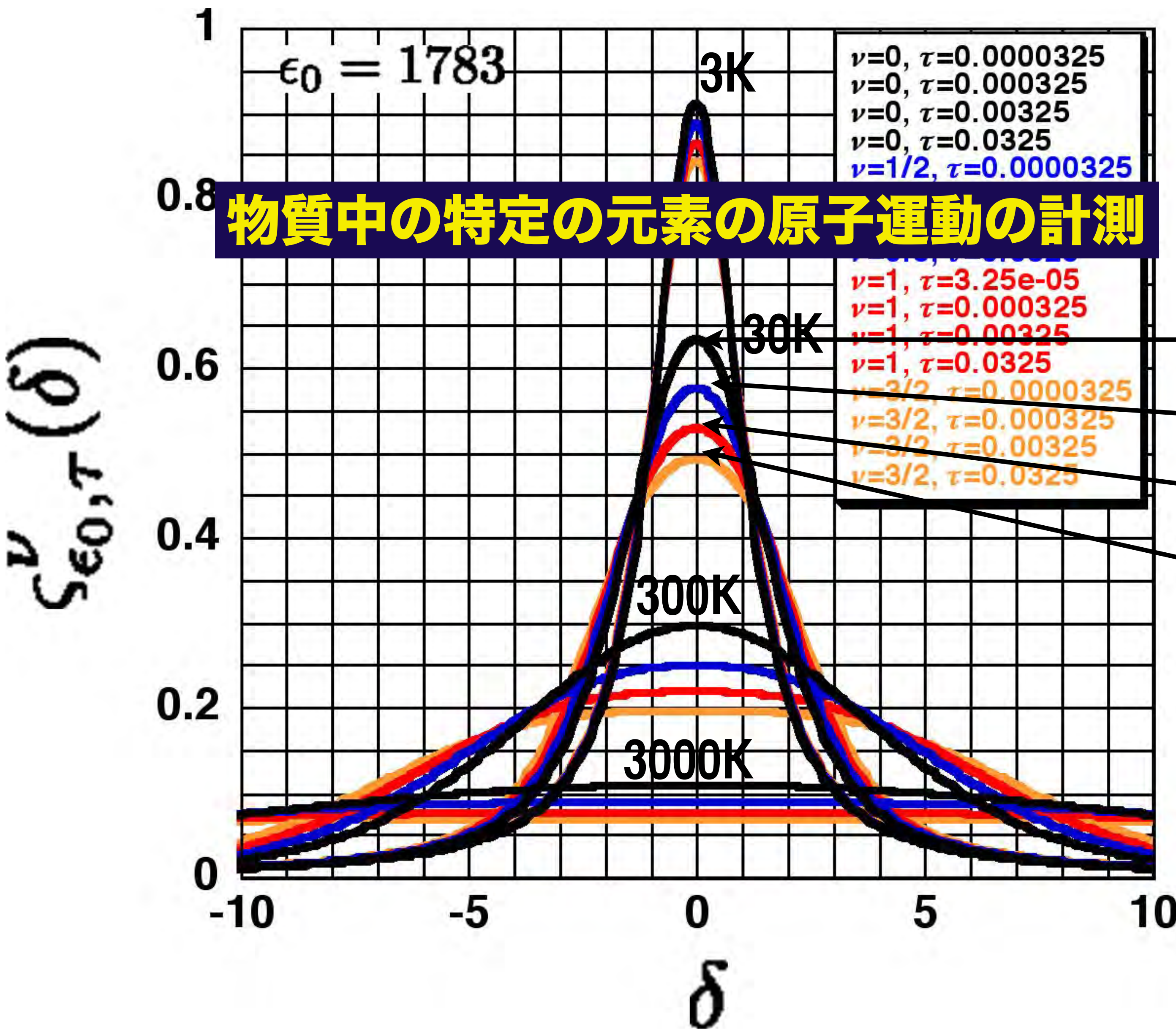


overall transport efficiency~0.1

⇒ 3% stat. (1day)

(n,γ) Doppler Spectroscopy

$$D\left(\frac{E_{\mathrm{A}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right) \propto \left(\frac{E_{\mathrm{A}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)^{\nu}$$



物質中の特定の元素の原子運動の計測

$\nu=0$

$\nu=1/2$

$\nu=1$

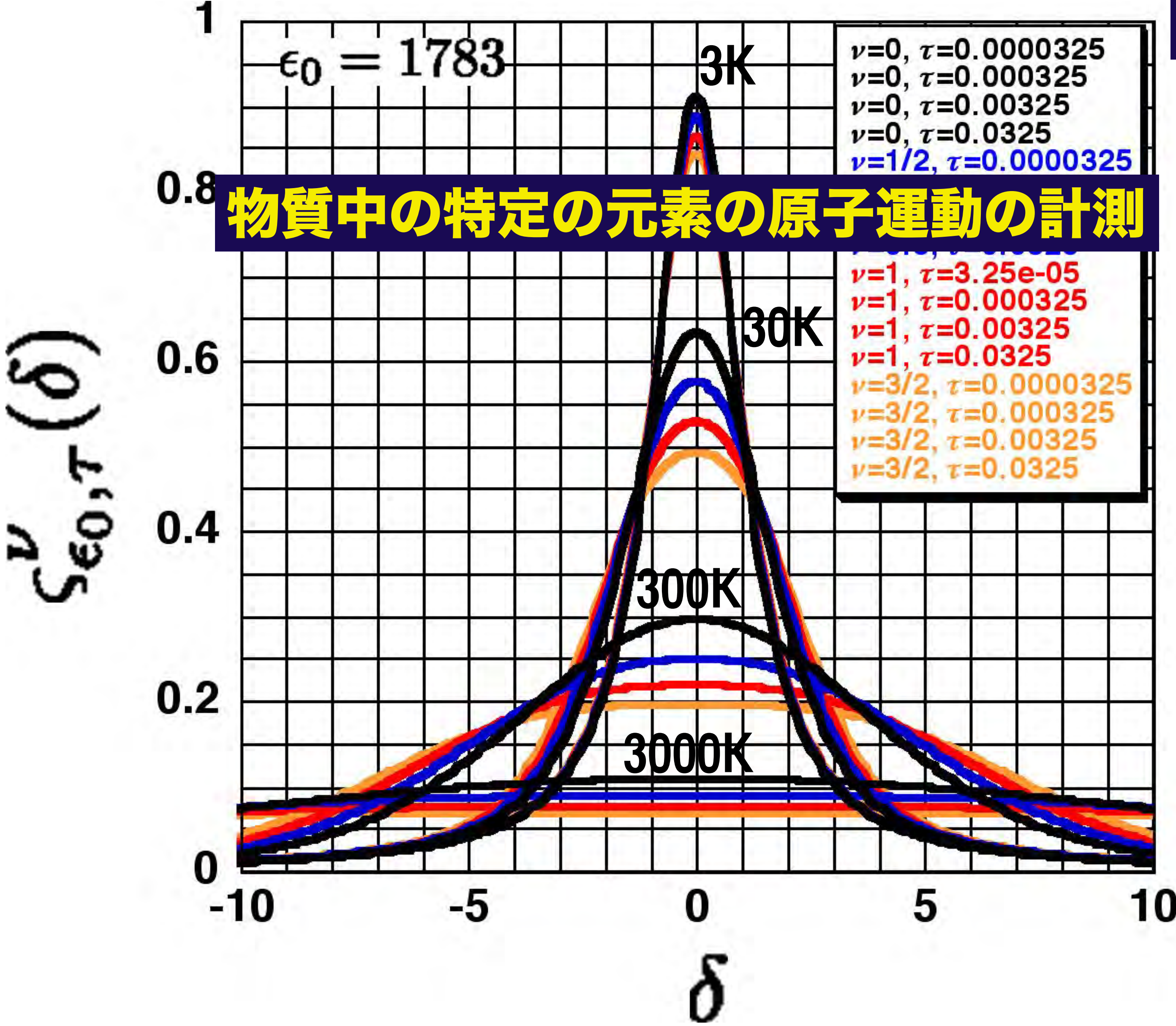
$\nu=3/2$

$$\delta = \frac{1}{\Gamma/2}\left\{\frac{m_n}{m_n+m_{\mathrm{A}}}E_n - E_0\right\}$$

$$\varsigma^{\nu}_{\epsilon_0,\tau}(\delta) = \frac{1}{\Gamma(\nu+3/2)}\int \frac{(\Gamma/2)^2}{(E_{\mathrm{CM}}-E_0)^2+(\Gamma_2)^2}\left(\frac{E_{\mathrm{A}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)^{\nu} \mathrm{d}^3p_{\mathrm{A}}$$

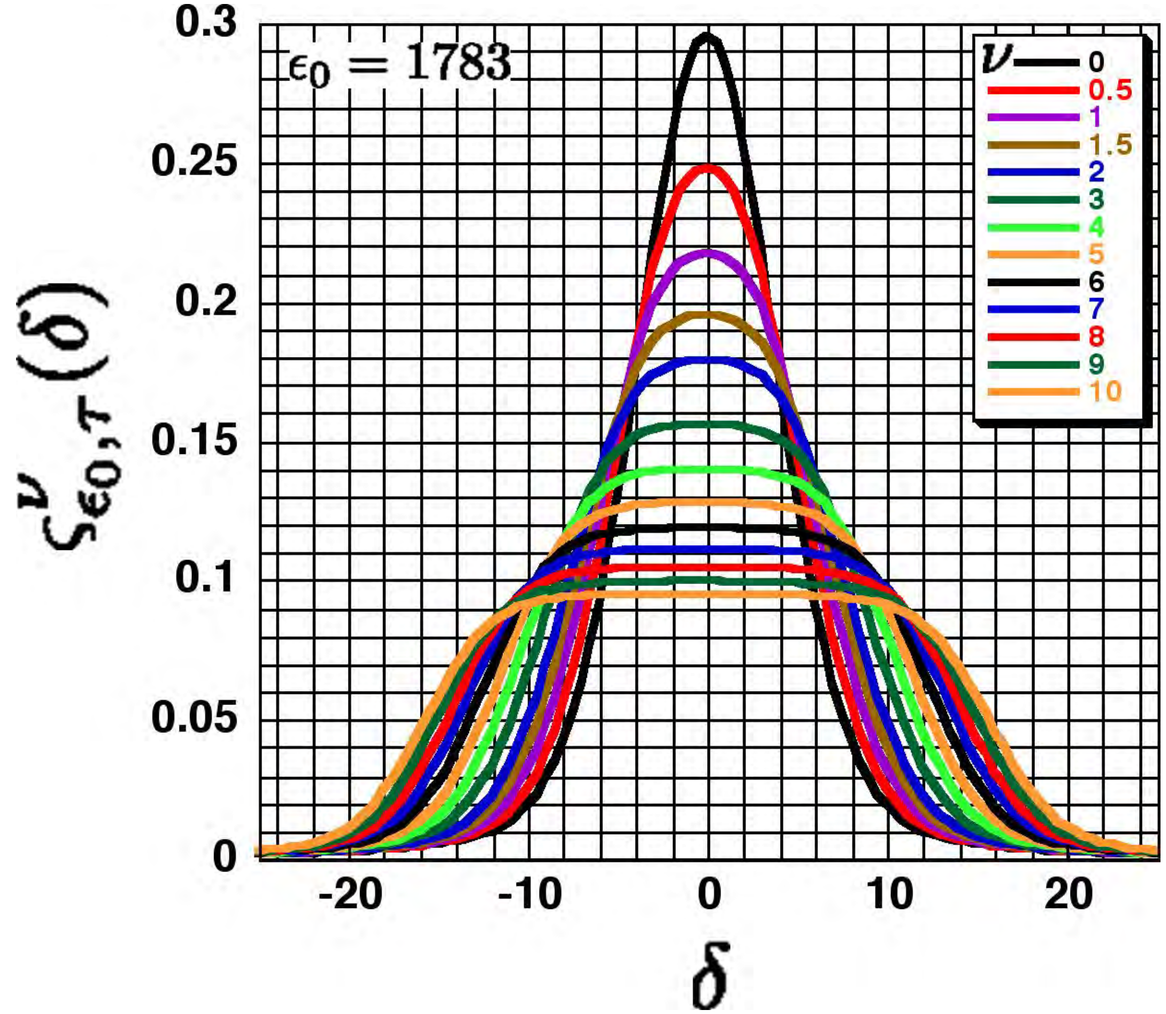
物質中の原子運動

(n,γ) Doppler Spectroscopy



物質中の特定の元素の原子運動の計測

元素(同位体)別の”部分的状態密度”の計測



$$\delta = \frac{1}{\Gamma/2}\left\{\frac{m_n}{m_n + m_{\mathrm{A}}}E_n - E_0\right\}$$

$$\varsigma^{\nu}_{\epsilon_0,\tau}(\delta) = \frac{1}{\Gamma(\nu+3/2)}\int \frac{(\Gamma/2)^2}{(E_{\mathrm{CM}} - E_0)^2 + (\Gamma_2)^2}\left(\frac{E_{\mathrm{A}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)^{\nu} \mathrm{d}^3 p_{\mathrm{A}}$$

複合核共鳴吸収反応における時間反転対称性の破れの増幅効果

新物理探索
(CP)

新物理探索(CP対称性⇔T対称性)

$$\mathcal{H}_W = \frac{g_W}{\sqrt{2}}[(\bar{u}\gamma^\mu d' + \bar{c}\gamma^\mu s' + \bar{t}\gamma^\mu b')W^+ + h.c.]$$

ニュートリノ振動、暗黒物質、暗黒エネルギー

階層性問題　　重力相互作用　　物質優勢宇宙

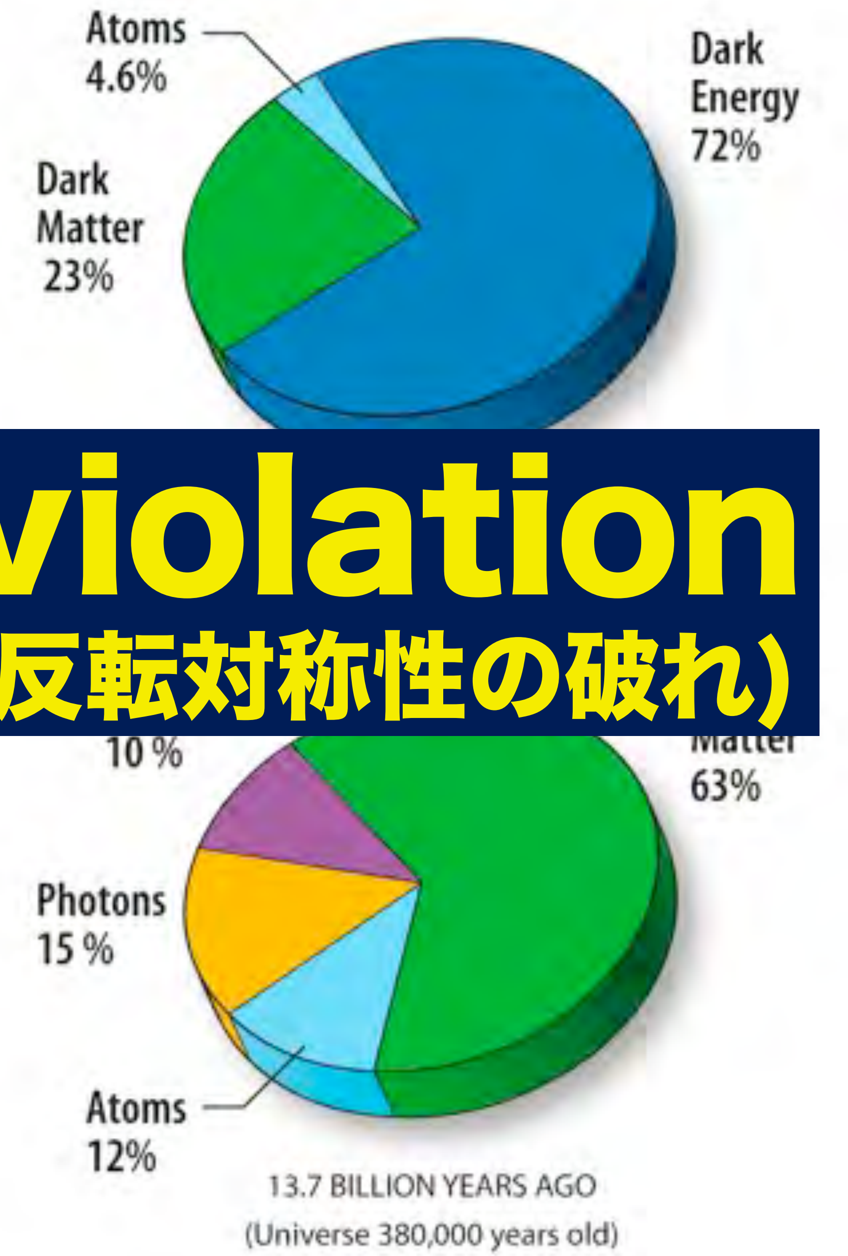
P-violation
(空間反転対称性の破れ)

新物理(New Physics)

追加的CP対称性の破れ

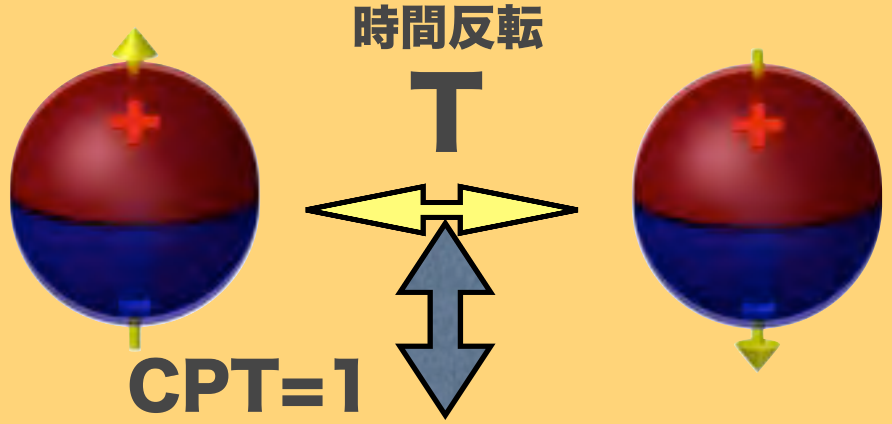
バリオン数非保存過程

暗黒物質、暗黒エネルギー



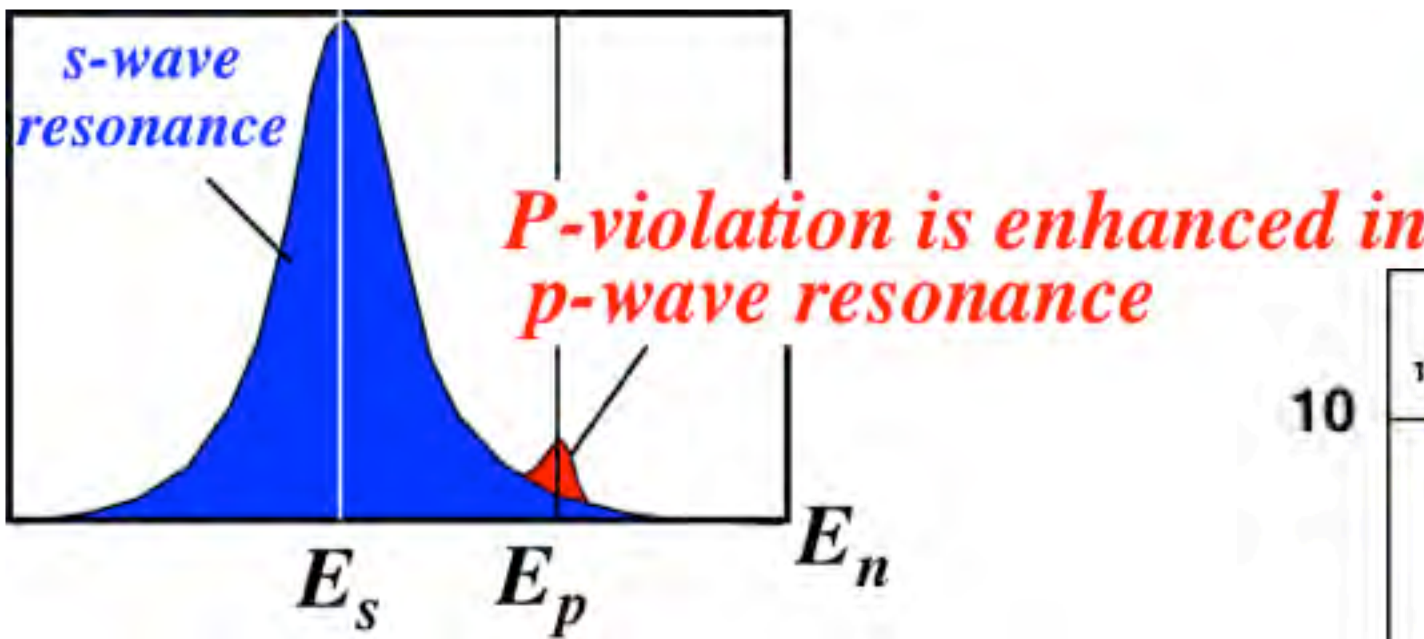
T-violation
(時間反転対称性の破れ)

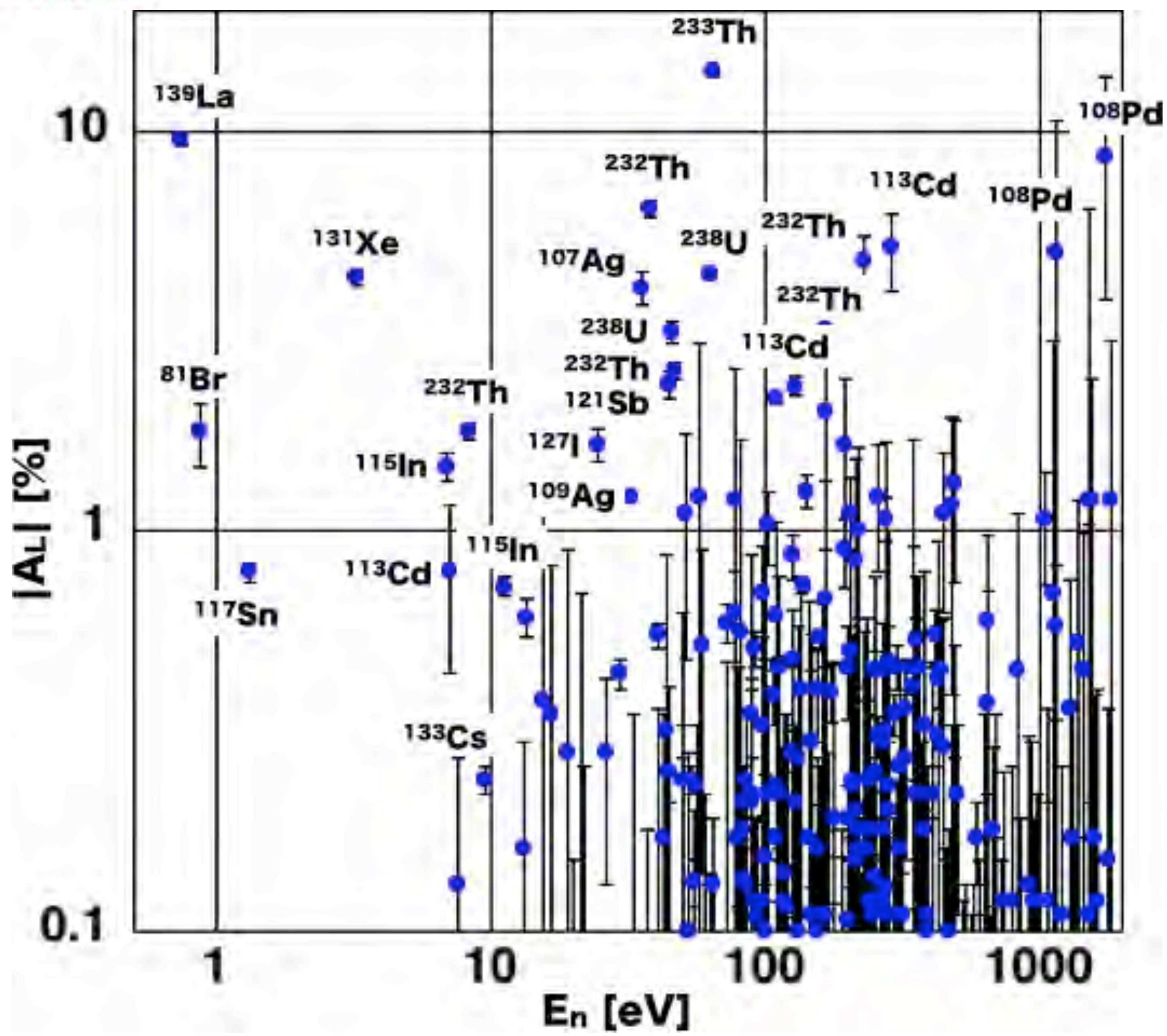
(代表例)電気双極子能率



Date(2011/10/15) by(H.M.Shimizu)
Title(スピンと中性子科学)
Conf(第2回総合スピン科学シンポジウム) At(Yamagata)

複合核共鳴吸収反応における対称性の破れの増幅効果⇒新物理探索

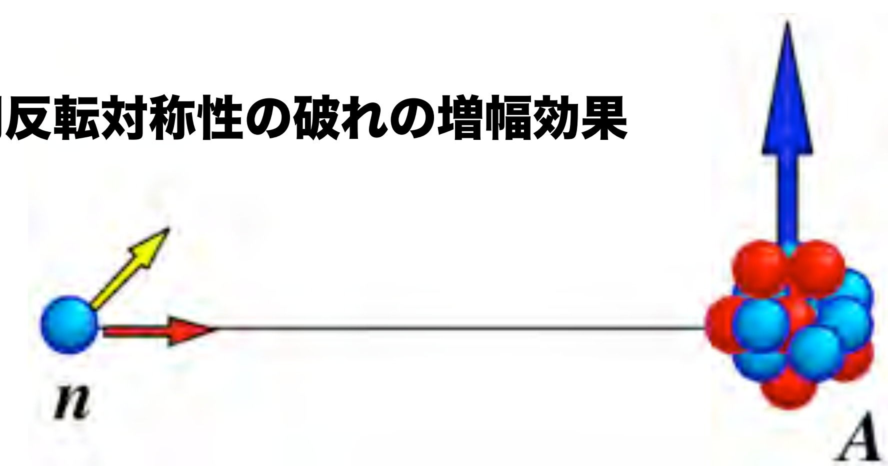




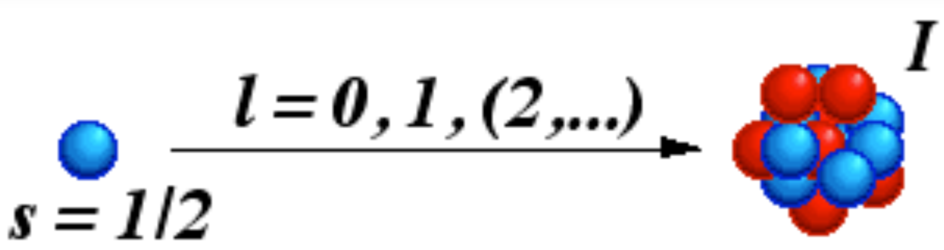
Mitchell, Phys. Rep. 354 (2001) 157

空間反転対称性の破れの増幅効果

時間反転対称性の破れの増幅効果



複合核共鳴吸収反応における対称性の破れの増幅効果⇒新物理探索

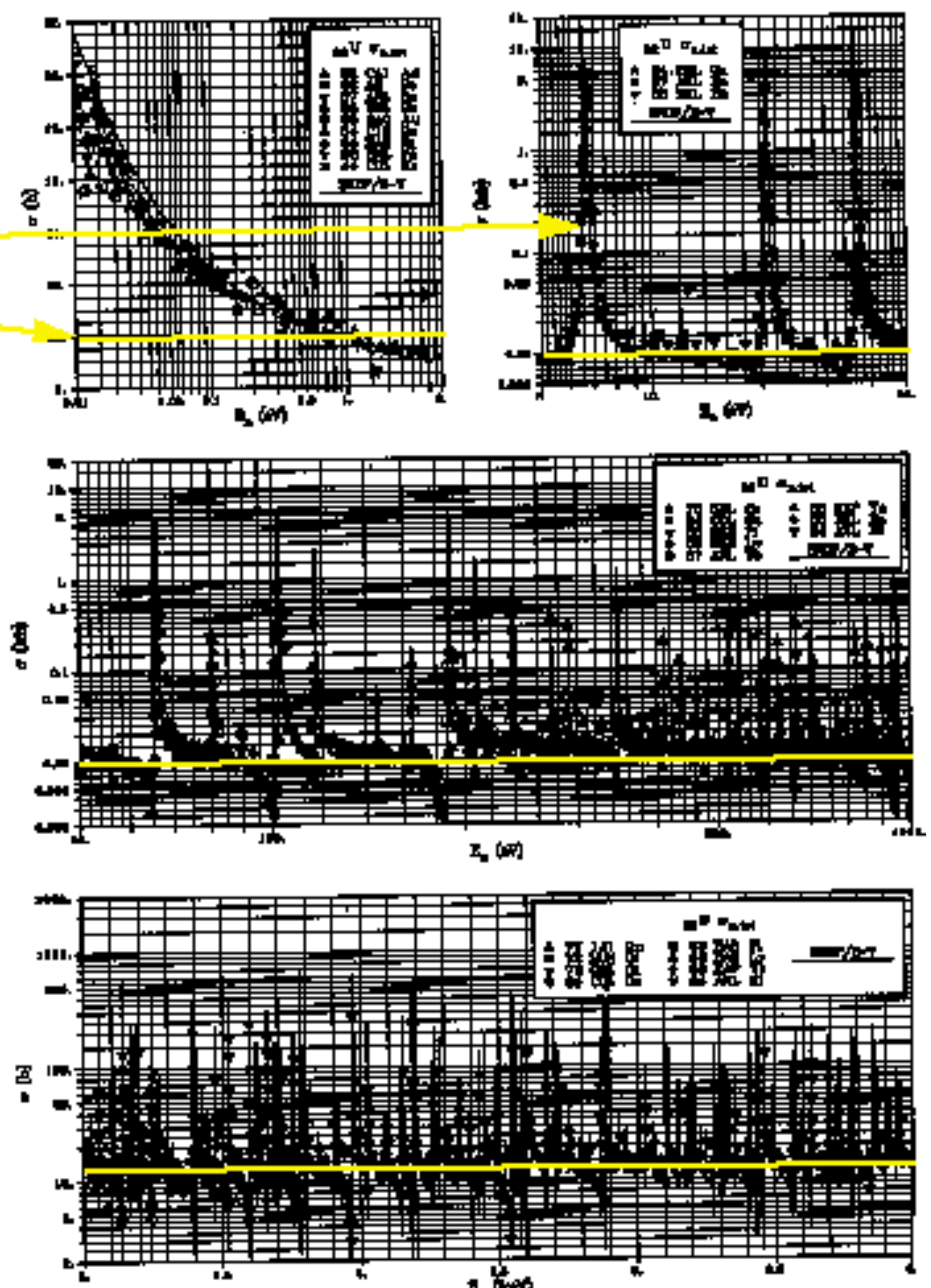


Potential Scattering

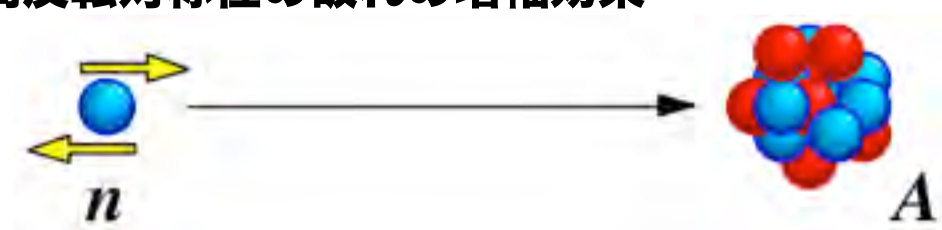
Compound Resonance

$\sigma_{n,tot}$ U

V McLane et al. Neutron Cross Sections vol 2

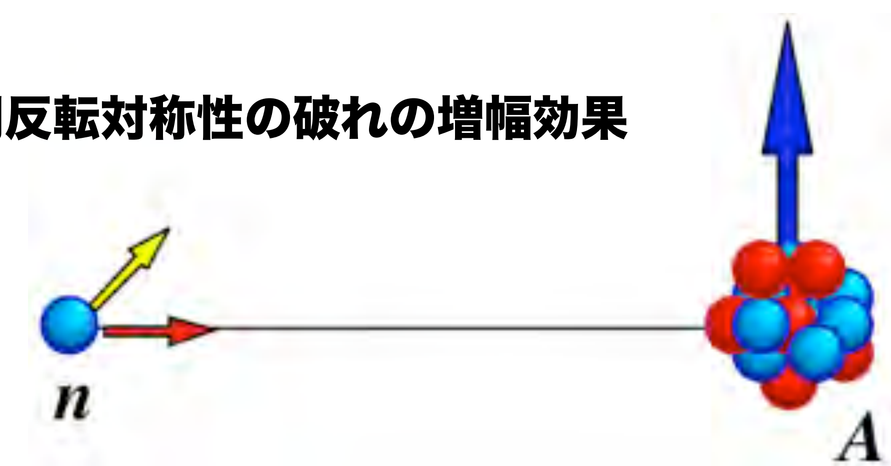


空間反転対称性の破れの増幅効果

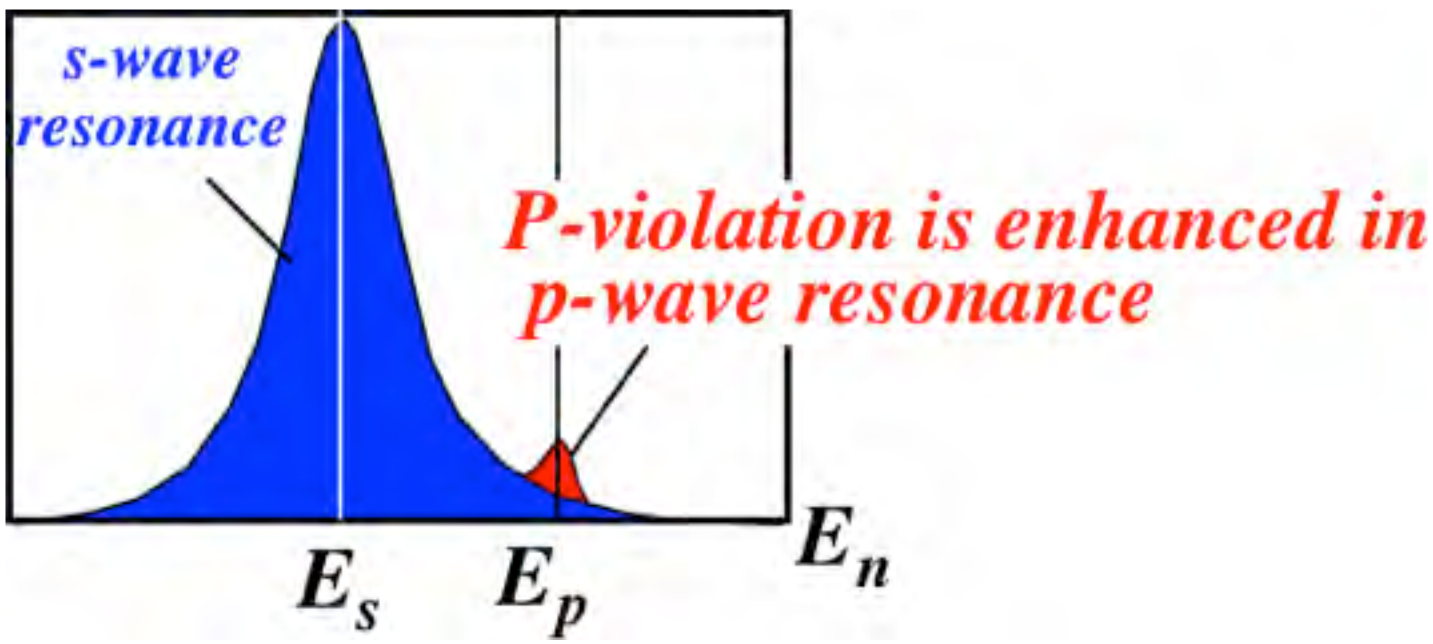


eV-keV

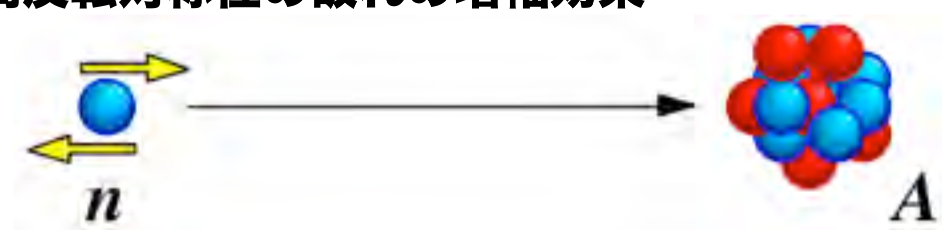
時間反転対称性の破れの増幅効果



複合核共鳴吸収反応における対称性の破れの増幅効果⇒新物理探索



空間反転対称性の破れの増幅効果

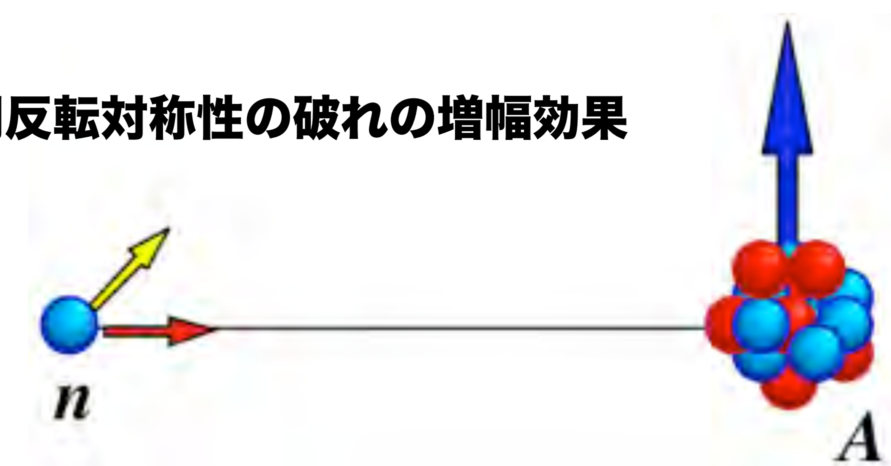


eV-keV

熱外偏極中性子

偏極陽子

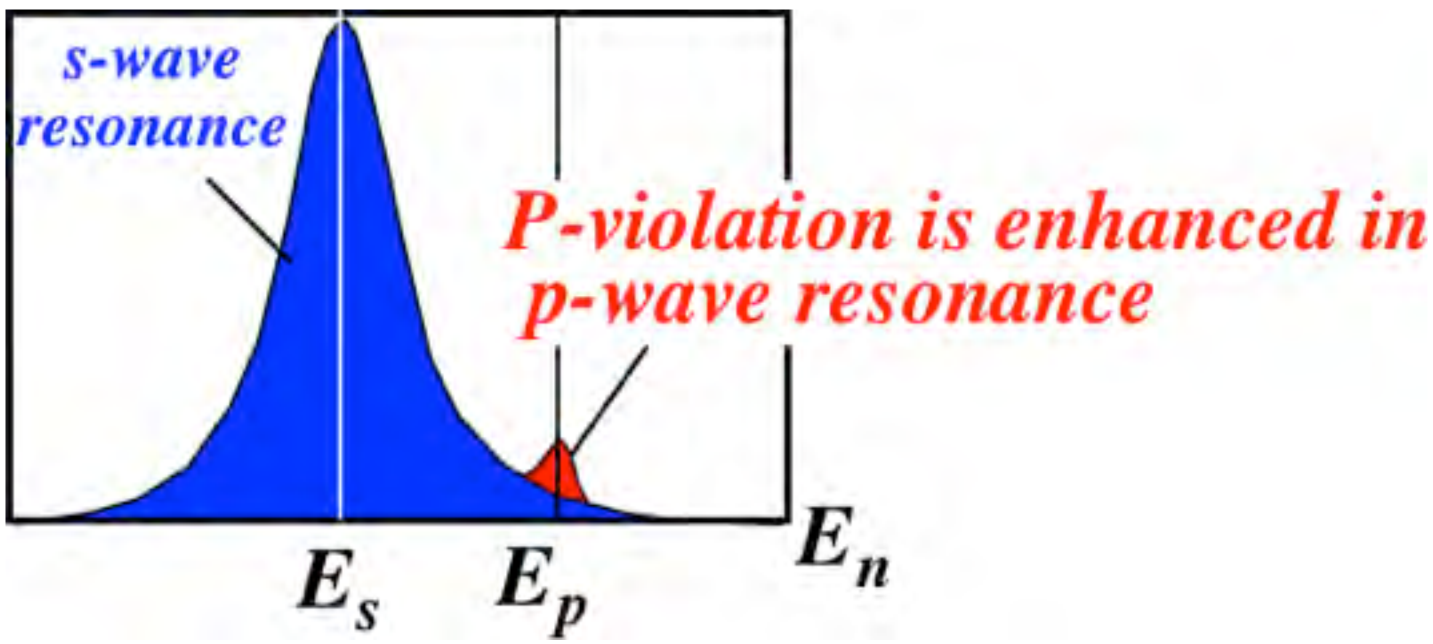
時間反転対称性の破れの増幅効果



偏極核標的

複合核共鳴吸収反応における対称性の破れの増幅効果⇒新物理探索

Gudkov, Phys. Rep. 212 (1992) 77



$$\Delta\sigma_T = \boxed{\kappa}\,\frac{\boxed{g_{CP}}}{\boxed{g_P}}\,\boxed{\Delta\sigma_P}$$

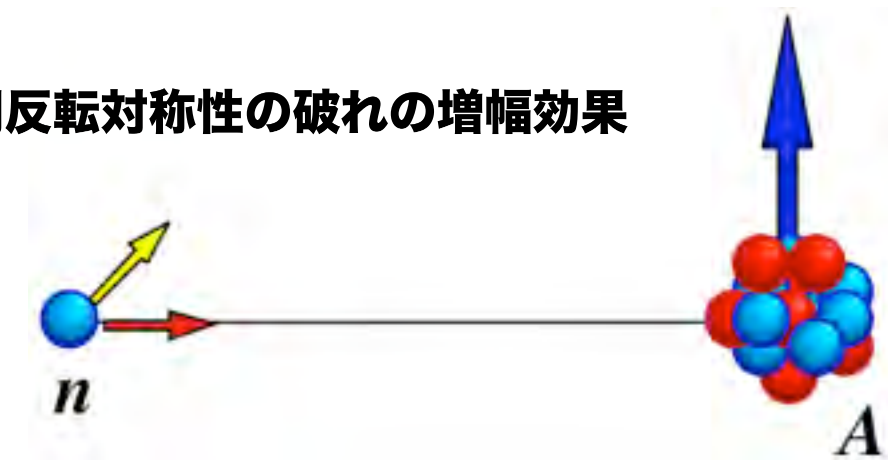
10^{-2}

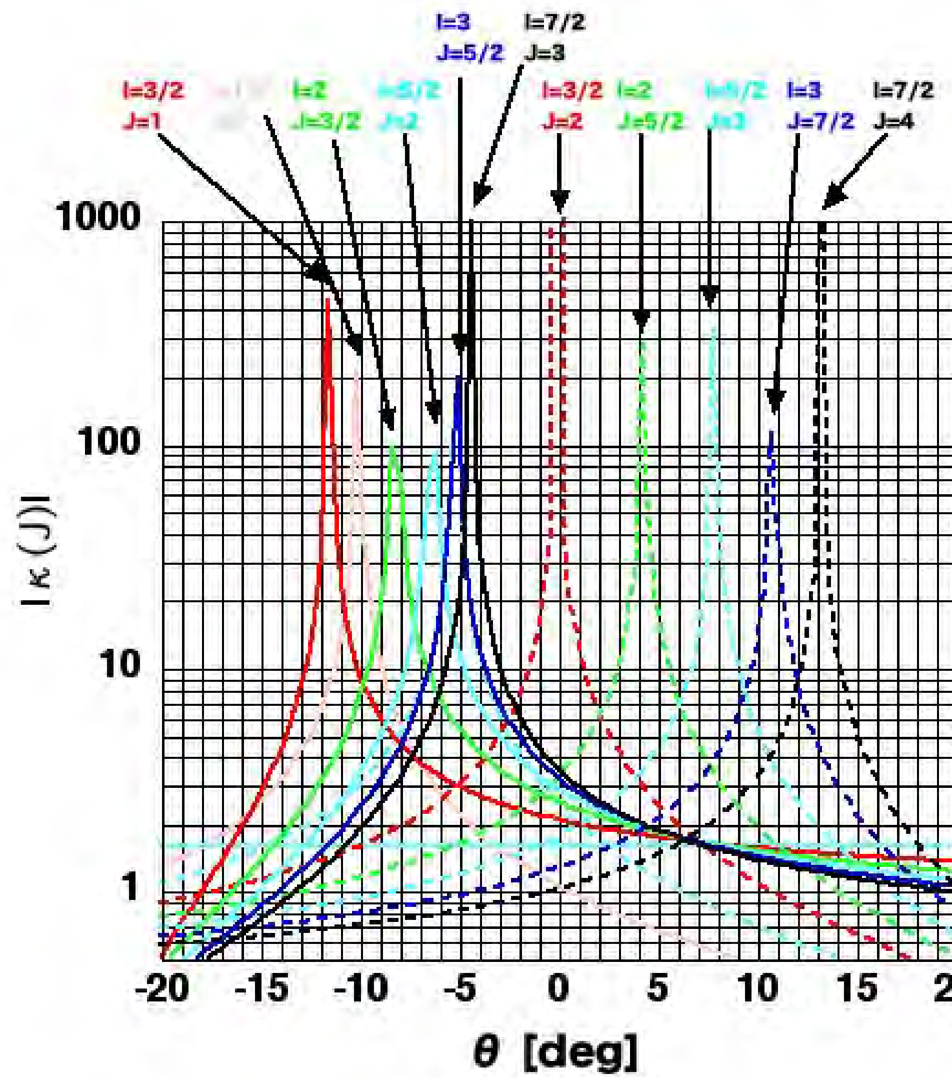
10^{-3}

present EDM upper bound

空間反転対称性の破れの増幅効果

時間反転対称性の破れの増幅効果





Summary

中性子スピン偏極

中性子反射光学 → 磁気ミラー → 偏極 熱・冷中性子

レーザー核偏極 → 偏極^{3}He → 偏極 熱・冷中性子

J-PARC/MLF BL23(東北大-KEK連携)において実現見込

動的偏極 → 偏極陽子 → **偏極熱外中性子**

(n,γ) Doppler Spectroscopy

各元素の温度計測 **部分的"状態密度"計測**

動的偏極

レーザー核偏極 → 偏極標的 → **新物理探索(CP)**

熱外領域はスパレーション中性子源が最も特長を活かせる領域

動的核偏極は必須の技術

(⇒KEK-PSI協力)

KEK中性子科学研究系は

大きな期待を持っており、最大限の協力を希望しております

熱外中性子光学

Epithermal Neutron Optics

未開拓領域

高強度パルス中性子源

超高性能光学系

核偏極(動的核偏極)

THE END