

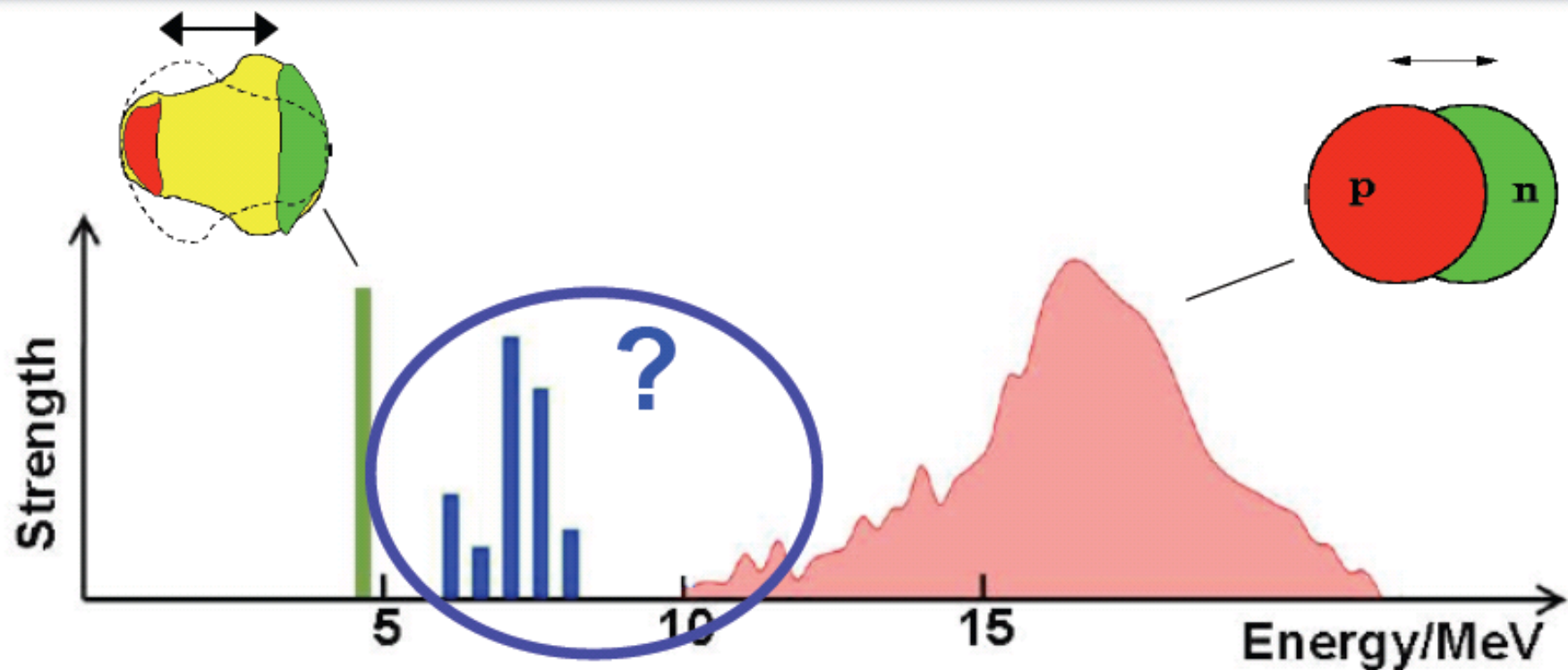
# Splitting and Isospin Structure of Pygmy Dipole Resonances

## References:

J. Enders et al., PRC80, 034302(2009),  
N. Paar et al., PRL103, 032502(2009),  
D. Savran, RCNP Seminar, 2006.  
etc.

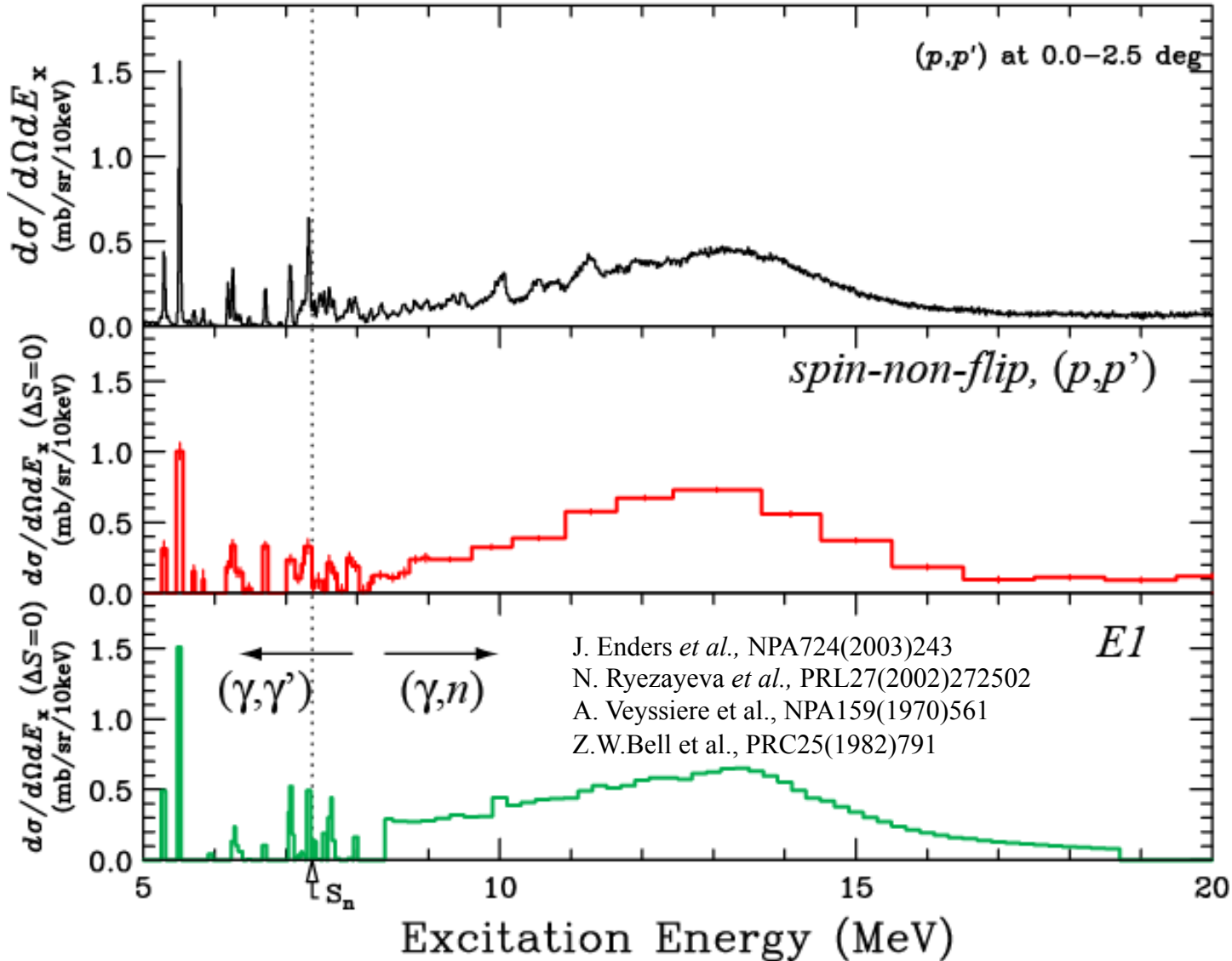
勉強会, A. Tamii, 2009.12.8

# Electric dipole strength in (spherical) atomic nuclei

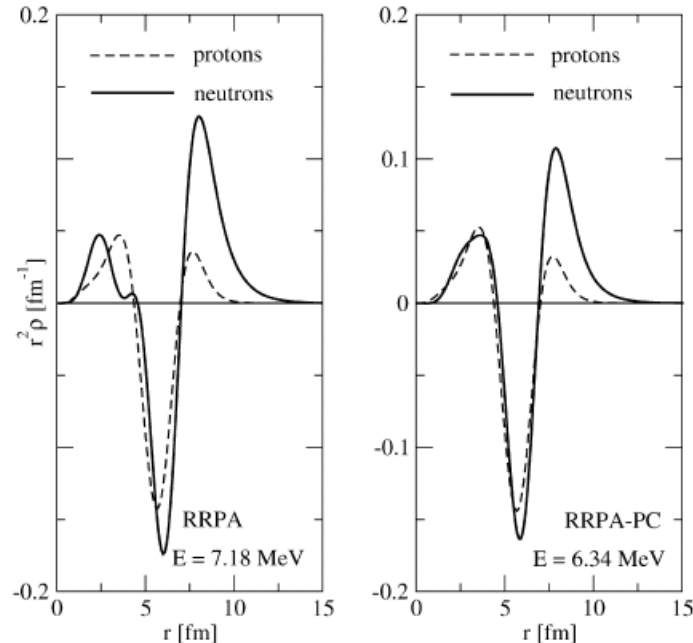


- Two-Phonon excitation ( $2^+ \otimes 3^-$ )
- Giant Dipole Resonance (GDR)
- Pygmy Dipole Resonance (PDR)

## Preliminary

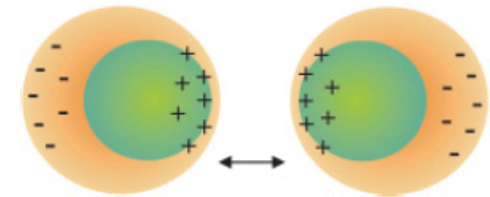
 $^{208}\text{Pb}(p,p')$  at  $E_p=295$  MeV

$^{208}\text{Pb}$



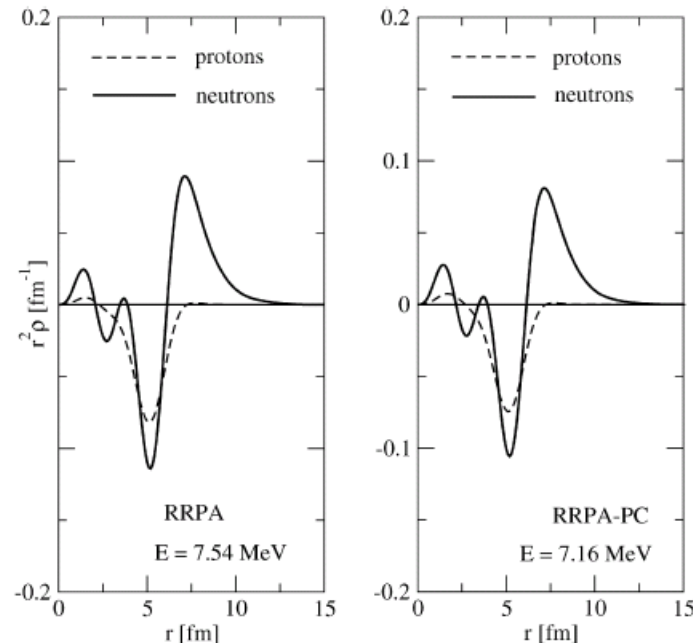
Relativistic RPA (RRPA)  
Phonon Coupling (PC)

内部でp-nがin-phase (IS)、  
表面でnが振動



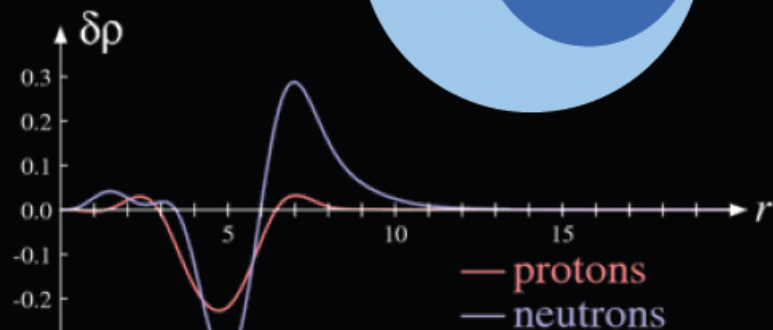
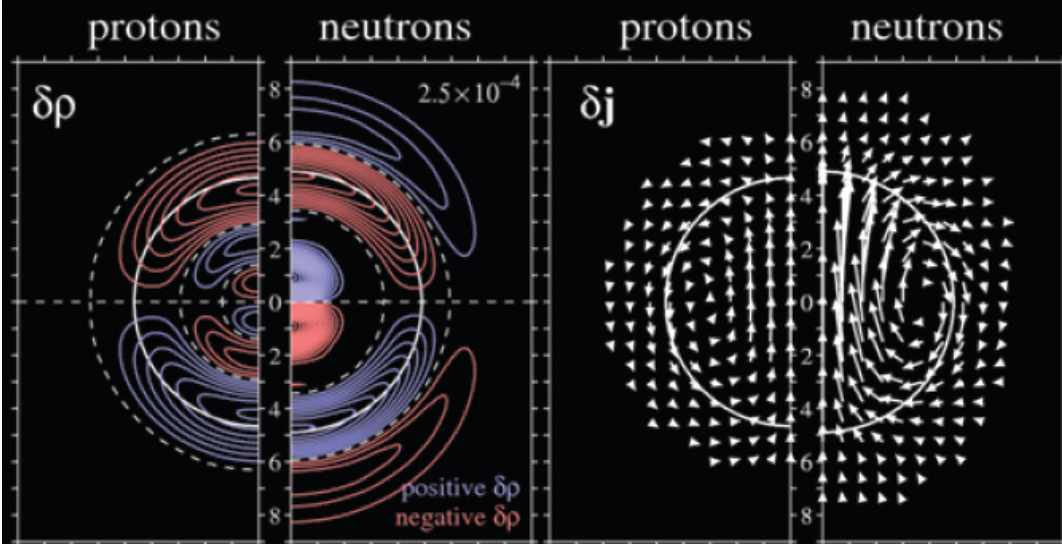
Isospin-Saturated Coreと  
中性子(陽子)スキンのDipole振動

$^{132}\text{Sn}$

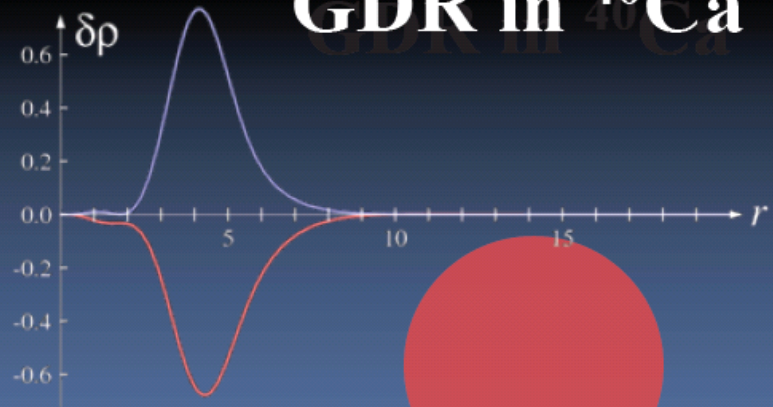
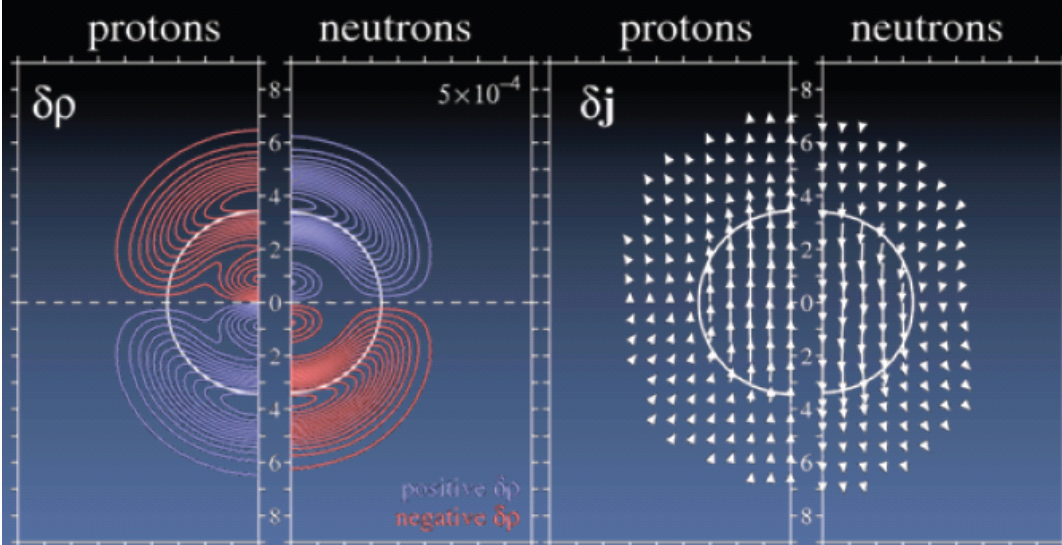


この描像では、ISとIVの線形  
結合となるはず。

# Transition density in PDR and GDR



PDR in  $^{132}\text{Sn}$   
GDR in  $^{40}\text{Ca}$



# Abstracts

J. Enders et al., PRC80, 034302(2009).

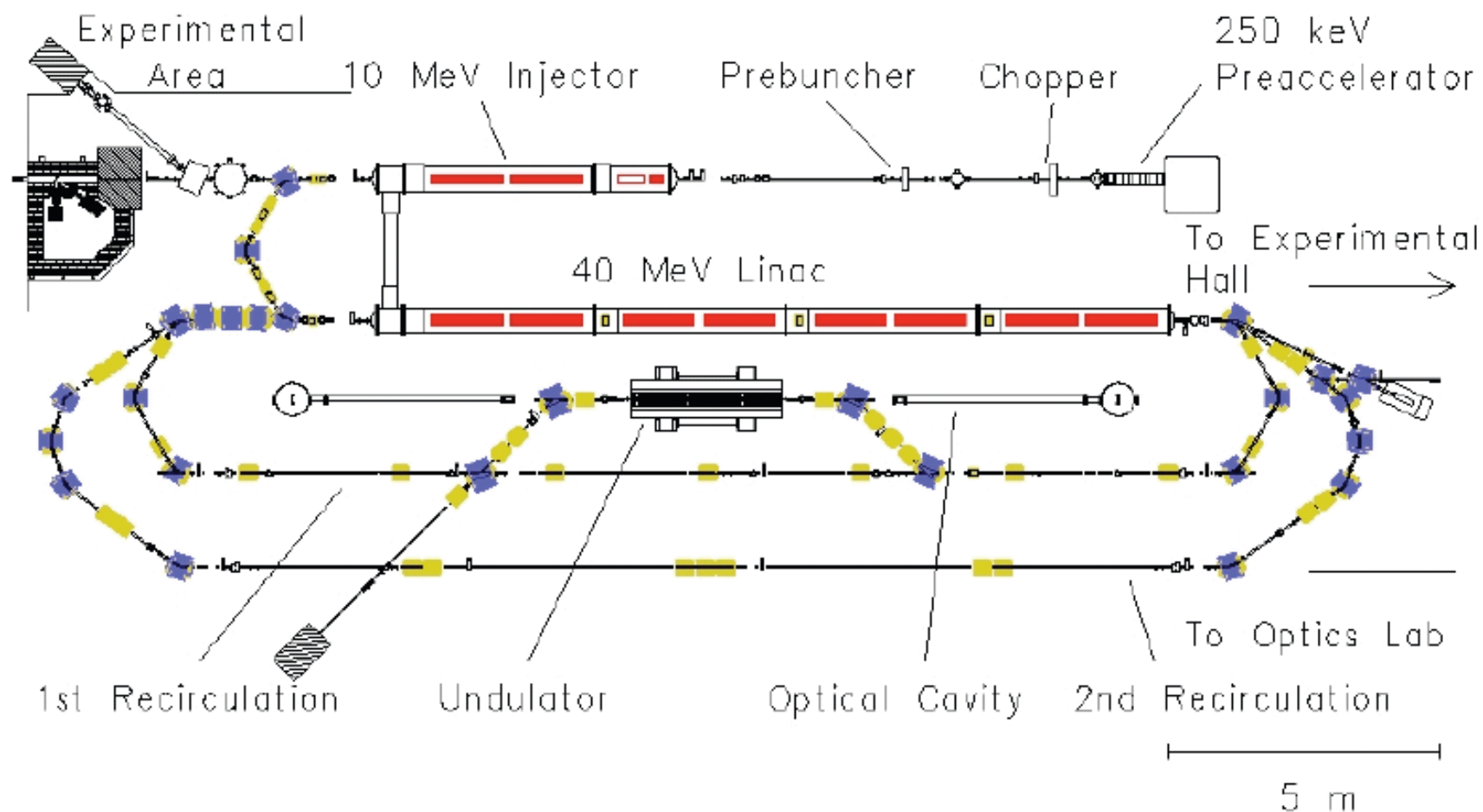
- $^{140}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{Ba}(\alpha, \alpha\gamma)$ を測定した。
- AGOR at KVI,  $E_\alpha=136$  MeV, BBS + 7-HPGe,
- $(\gamma, \gamma')$ との比較で、PDRが2つの成分から成っていることが分かった。
- $E_x < 6\text{MeV}$ : 両測定で観測される。  $E_x > 6\text{MeV}$ :  $(\alpha, \alpha\gamma)$ で観測されない。

N. Paar et al., PRL103, 032502(2009),

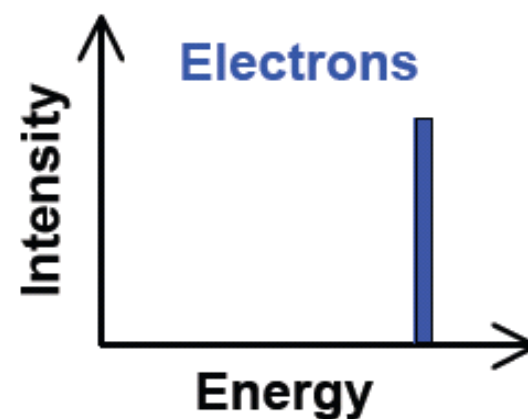
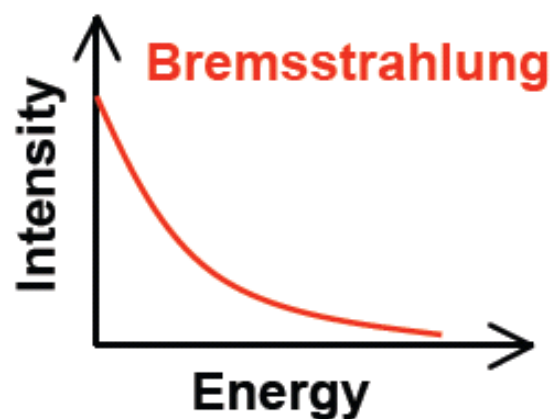
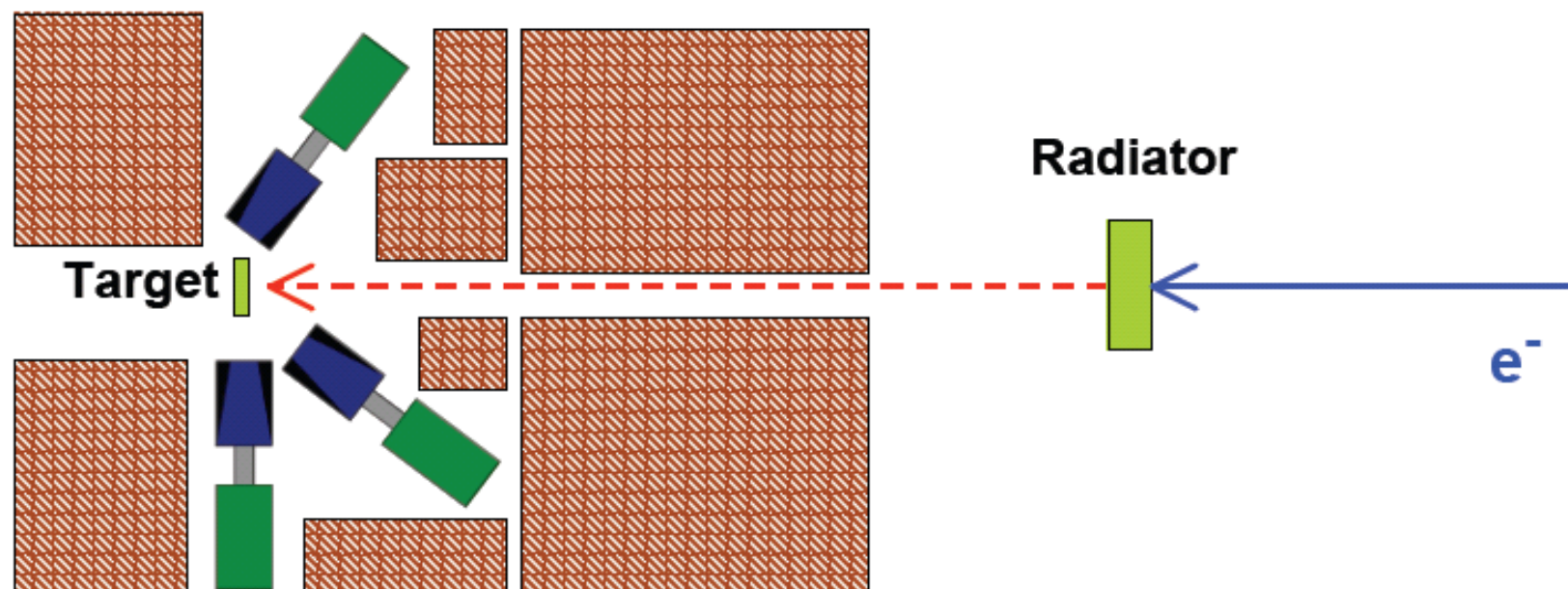
- $^{140}\text{Ce}$  の E1応答を理論的に調べた。
- fully consistent RQRPA
- 低 $E_x$ 成分(PDR)はisospinの性質により2つのセグメントに分かれる。
- 低 $E_x$ 側成分: 主にisoscalarで、遷移密度は表面にピークを持つ
- 高 $E_x$ 側成分: 主にisovectorで、IVGDRと同じ性質を持つ
- $(\gamma, \gamma')$ 、 $(\alpha, \alpha\gamma)$ の実験で見られた性質を定性的に説明する。



# NRF at S-DALINAC

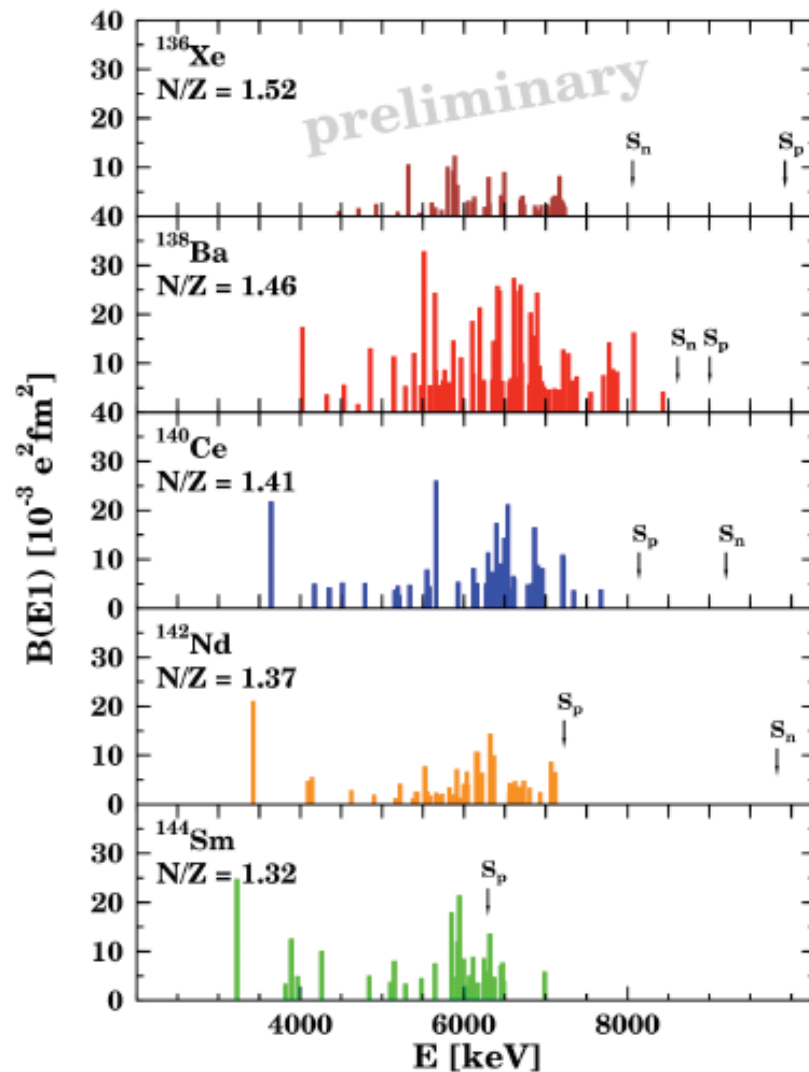


# NRF at S-DALINAC





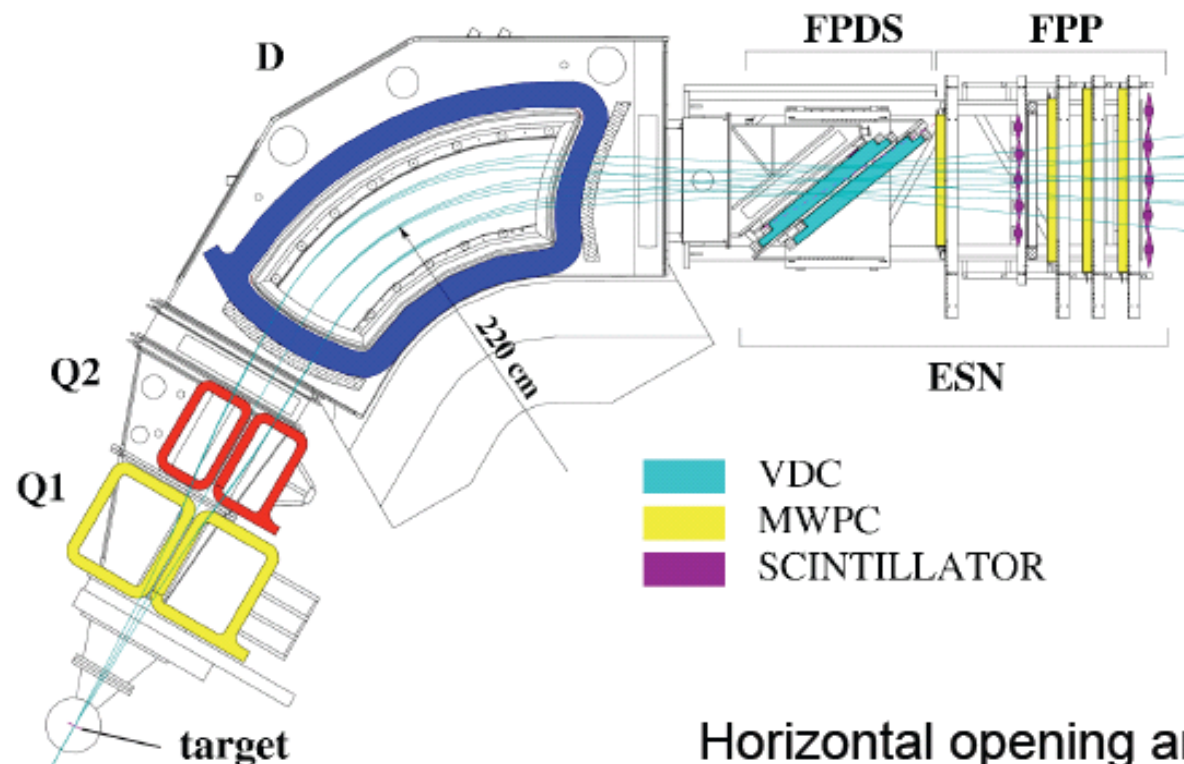
# PDR - Results from $(\gamma, \gamma')$ in stable N=82 isotones



- Large fragmentation
- Concentrated around 6.0-6.5 MeV
- Observed level spacing about 10-20 keV
- Scaling with N/Z ??

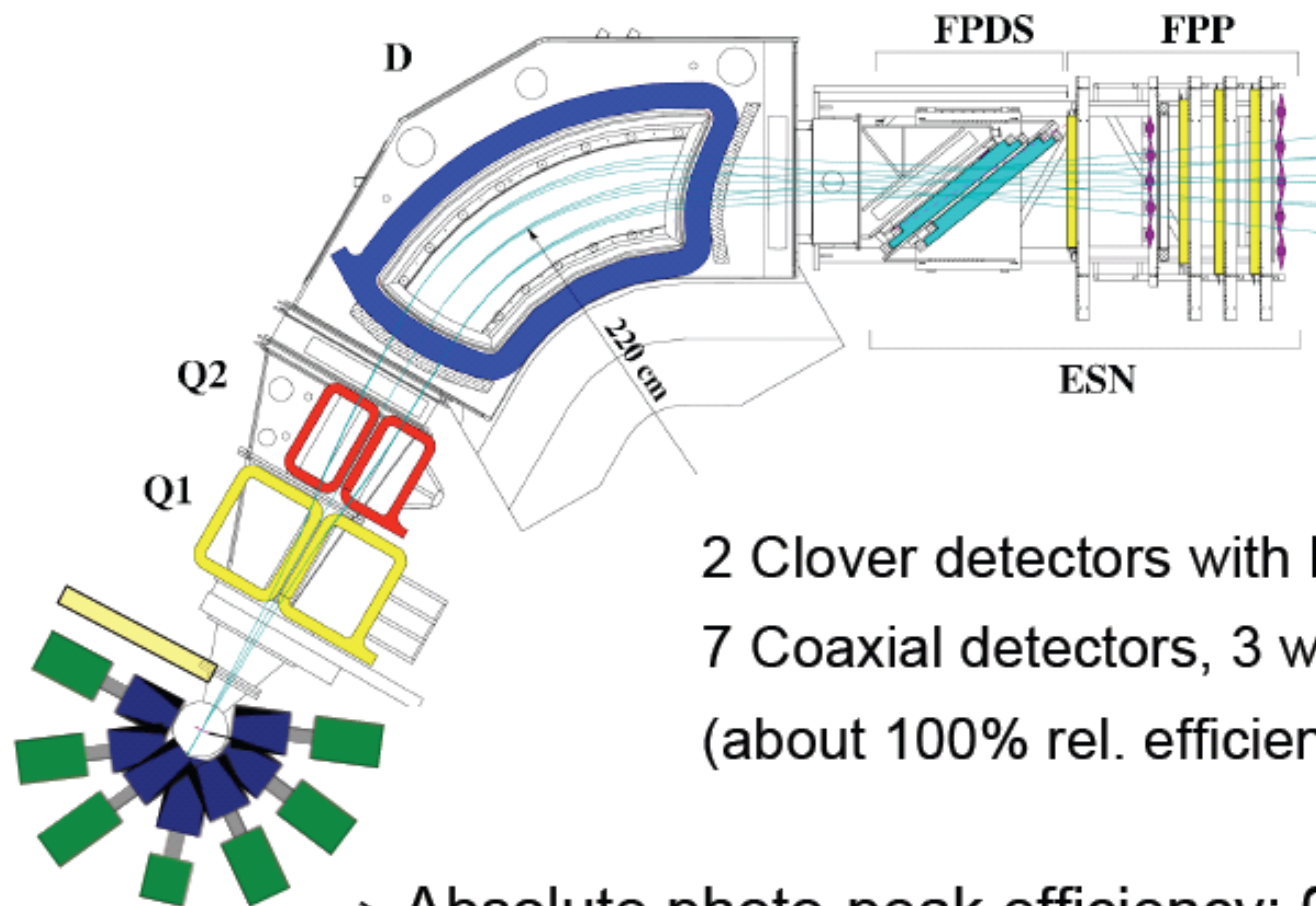
A. Zilges et al., *Phys. Lett. B* **542** (2002) 43  
S. Volz et al., *Nucl. Phys. A*, in press

## Big-Bite Spectrometer (BBS) at KVI:



Horizontal opening angle : 66 mrad  
Vertical opening angle : 140 mrad  
Energy resolution :  $\approx 180$  keV  
Angle resolution :  $\approx 6$  mrad

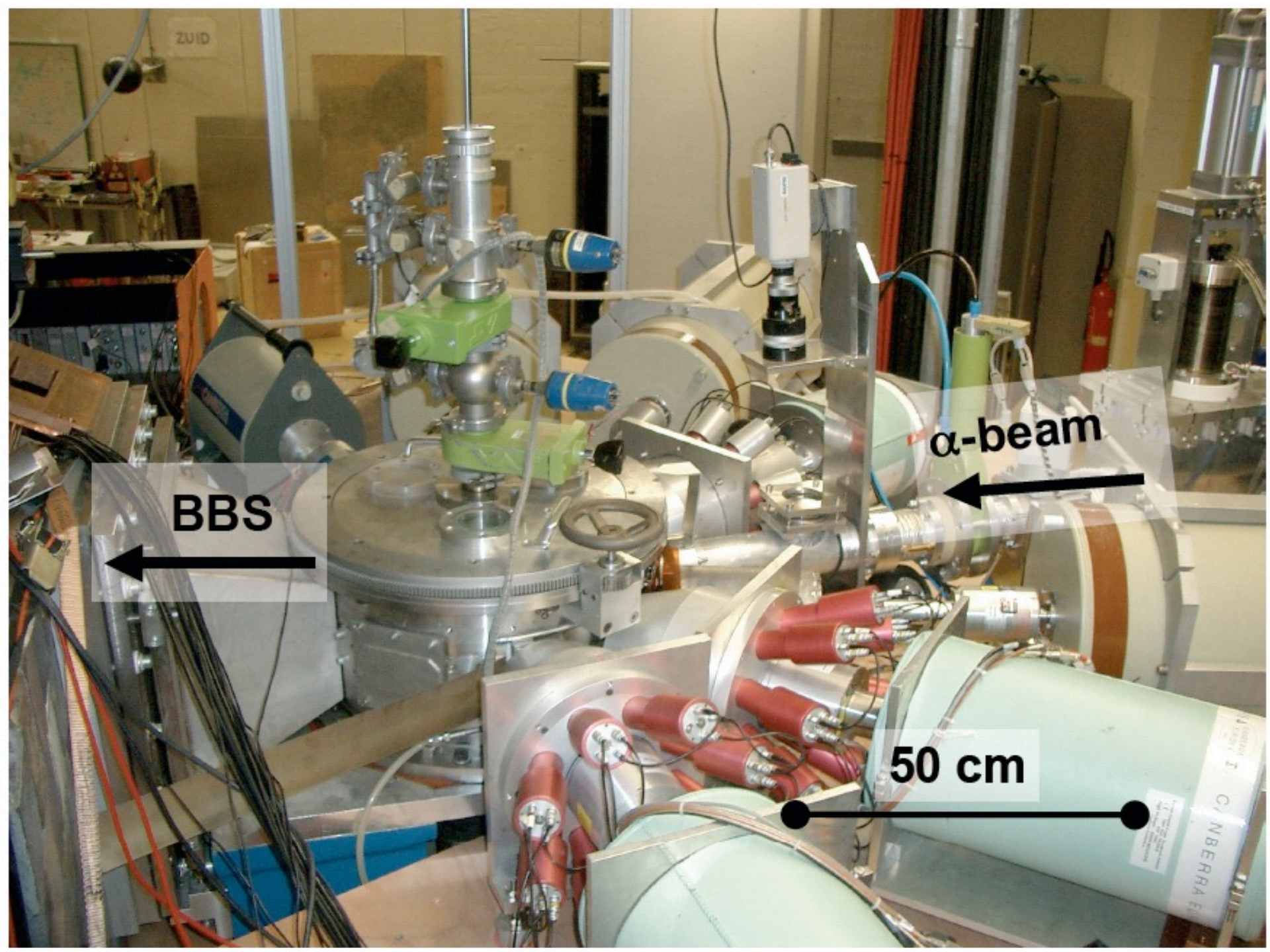
## HPGe detectors



2 Clover detectors with BGO  
7 Coaxial detectors, 3 with BGO  
(about 100% rel. efficiency each)

⇒ Absolute photo-peak efficiency: 0.5% at 1.33 MeV





**BBS**

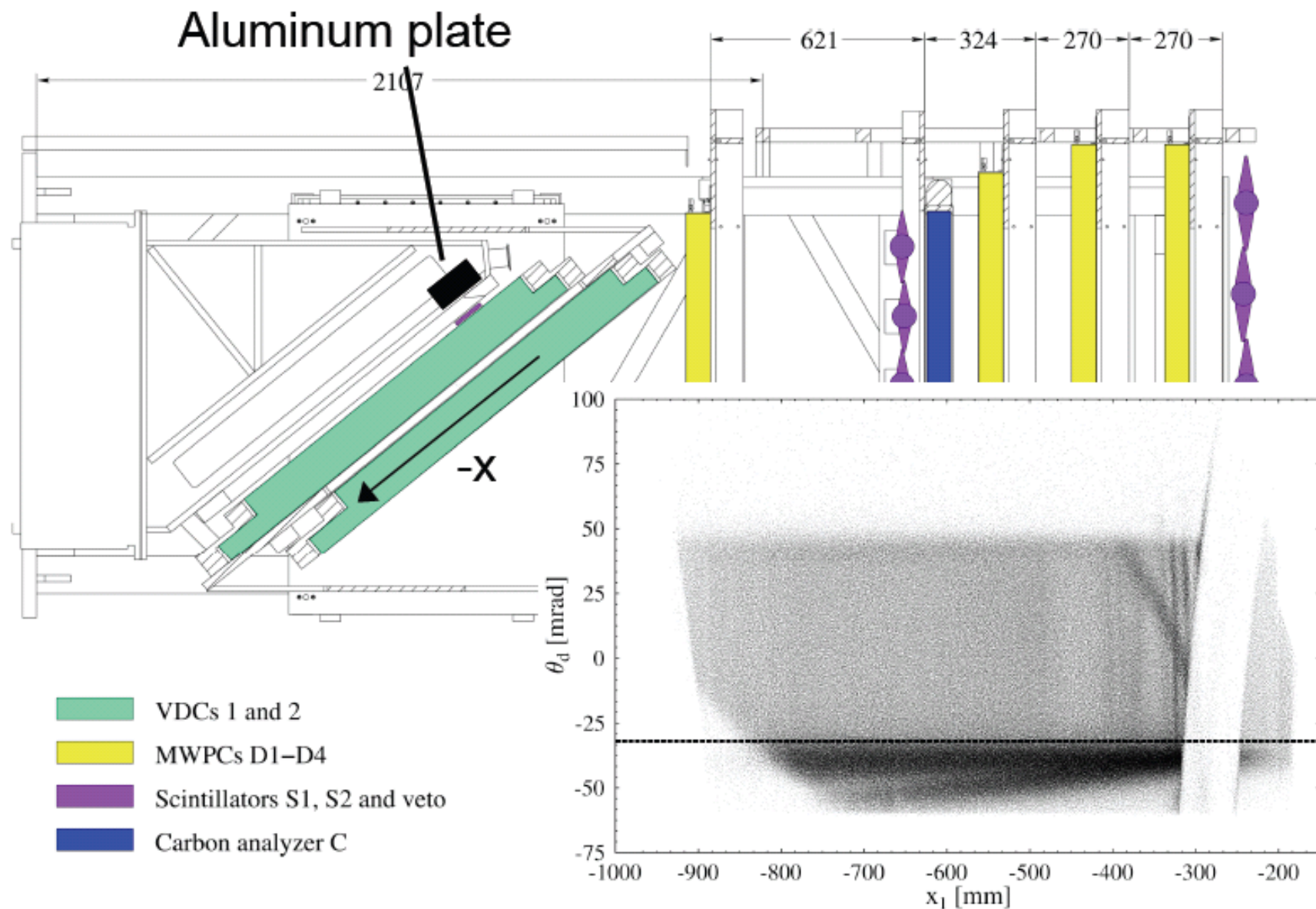
**$\alpha$ -beam**

**50 cm**

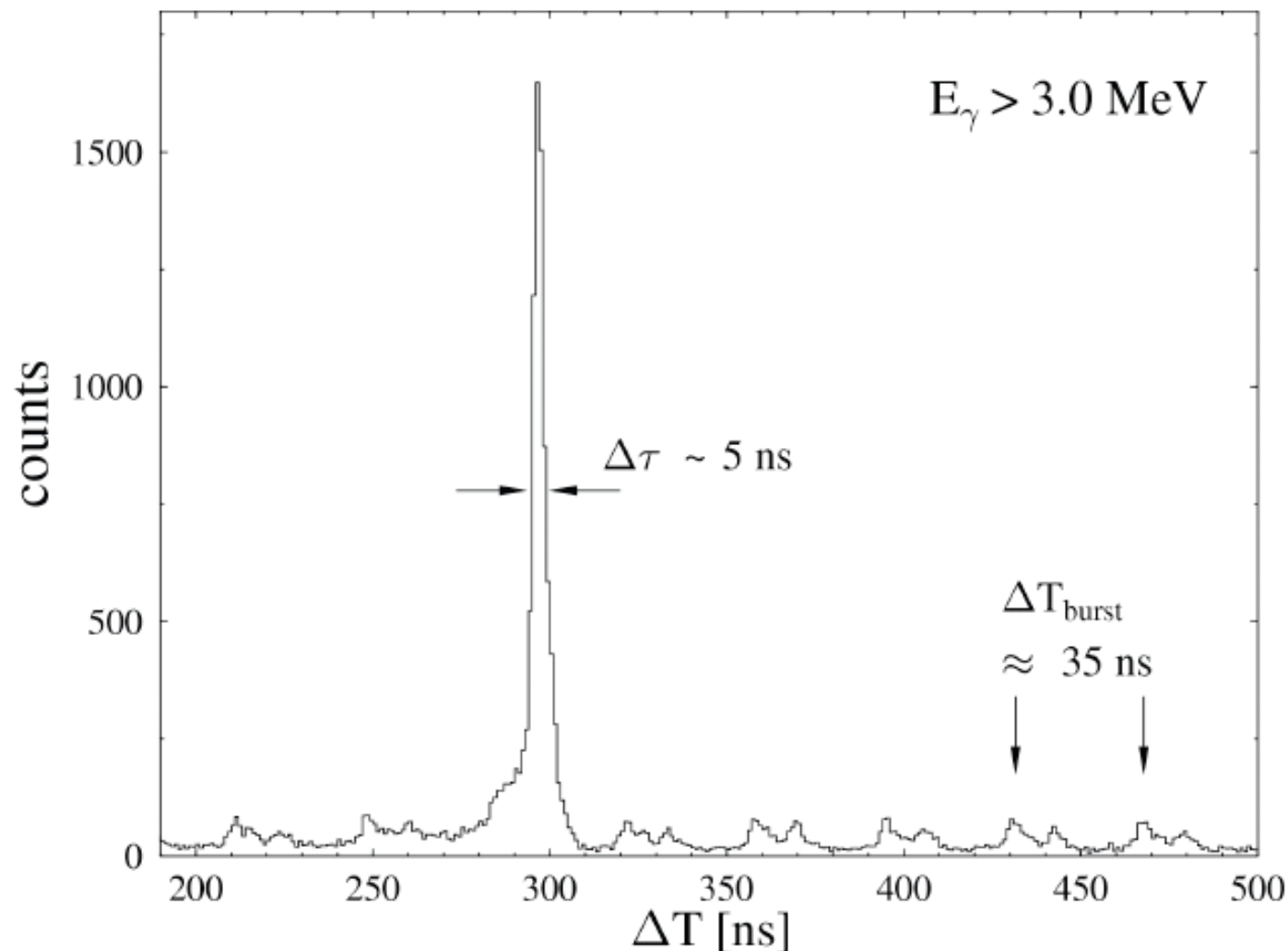
ALFA I  
C/ NBERRA E



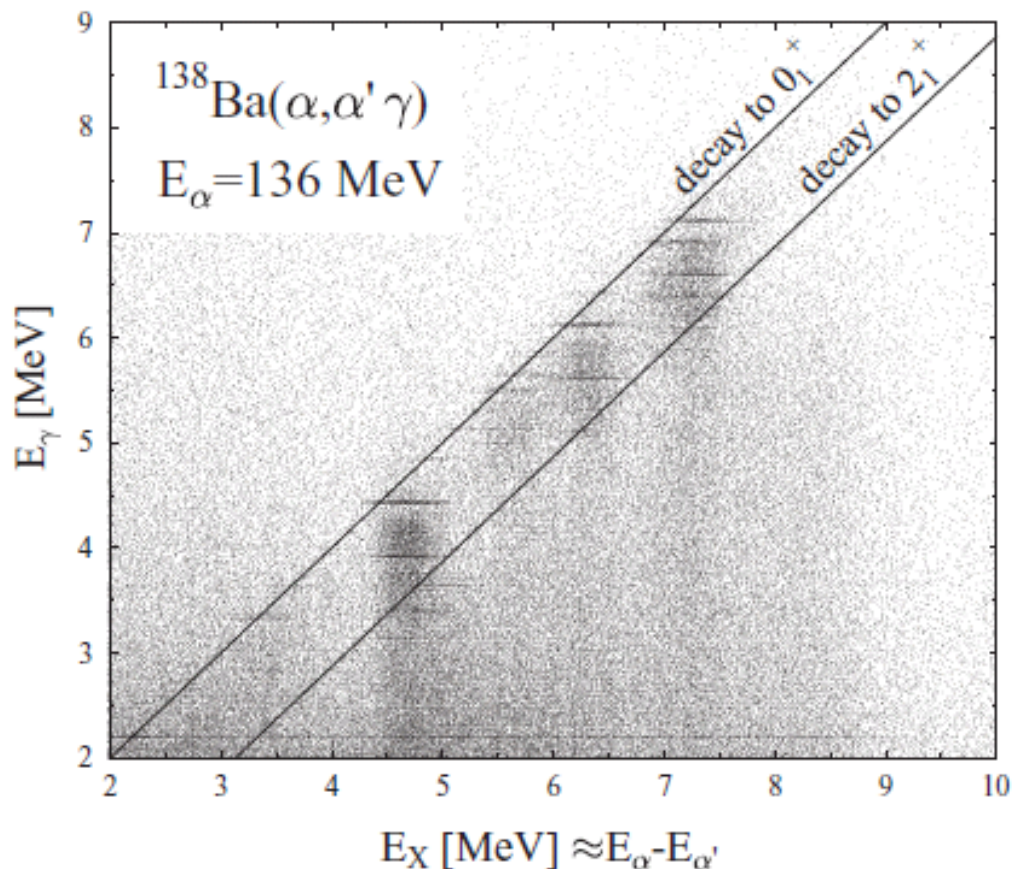
# Problem: elastic scattering



## HPGe-Detektor with respect to the RF:







2+: 1.436 MeV

何故主に線の右側に延びる？

2つの線の間に見えるのは主に  
single escape?

その他は？不純物？

FIG. 1. This  $\alpha$ - $\gamma$  coincidence matrix shows the  $\gamma$ -ray decay energy,  $E_\gamma$ , measured with a germanium detector positioned at backward angles versus the excitation energy,  $E_x$ , in the experiment on  $^{138}\text{Ba}$ . In this matrix, transitions between bound states occur as thin horizontal lines. The regions of ground-state decays and decays into the  $2_1^+$  state are marked with diagonal lines.

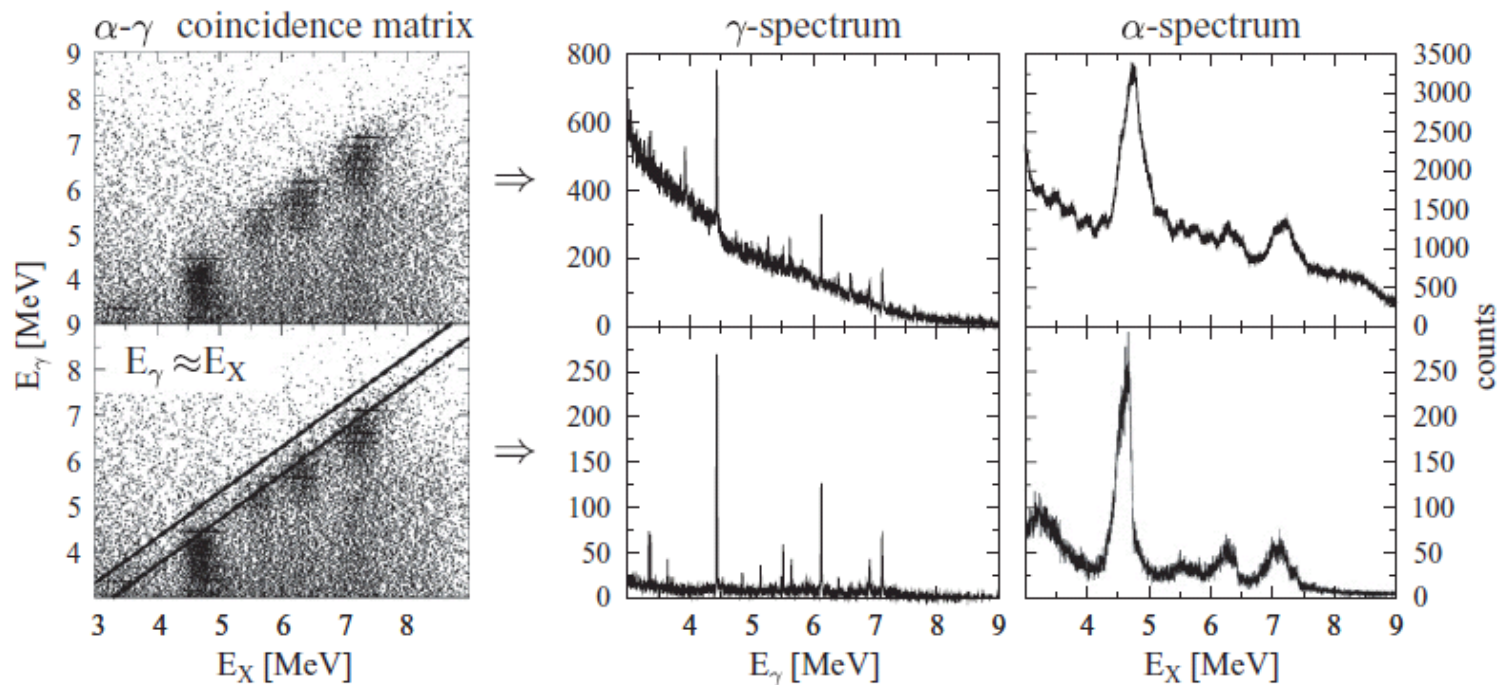


FIG. 2. Two-dimensional scattering matrix and projections for the  $^{138}\text{Ba}(\alpha, \alpha'\gamma)$  experiment. Different decay channels can be selected by applying conditions on the  $\alpha$ - $\gamma$  coincidence matrix. Ground-state decays can be selected to study  $E1$  ground-state transitions of the PDR. The resulting  $\gamma$  spectrum has a strongly reduced background and shows clearly separated peaks.

$$A = F - B \quad (3)$$

For the statistical error of the peak area including the background we assume:

$$\Delta A = \sqrt{A + 2B} \quad (4)$$

The relative uncertainty of the peak area  $p = \frac{\Delta A}{A}$  is required to be smaller than  $p \leq 0.3$  to be accepted in the analysis. To indicate a sensitivity limit the minimal peak area is calculated by

$$A \geq \frac{1}{2p^2} + \sqrt{\frac{1}{4p^4} + \frac{2B}{p^2}} \quad (5)$$

←  $p$ でなく  $p_{\max}=0.3$   
 $p \leq p_{\max}=0.3$   
 とすべし。

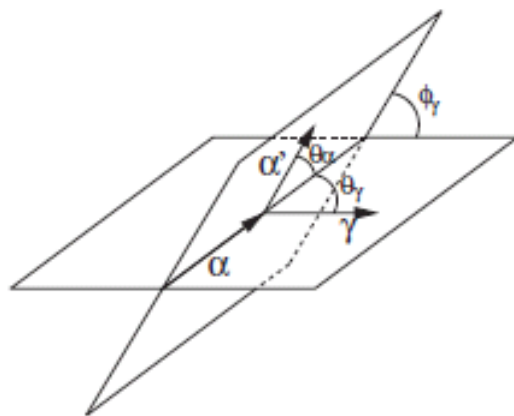
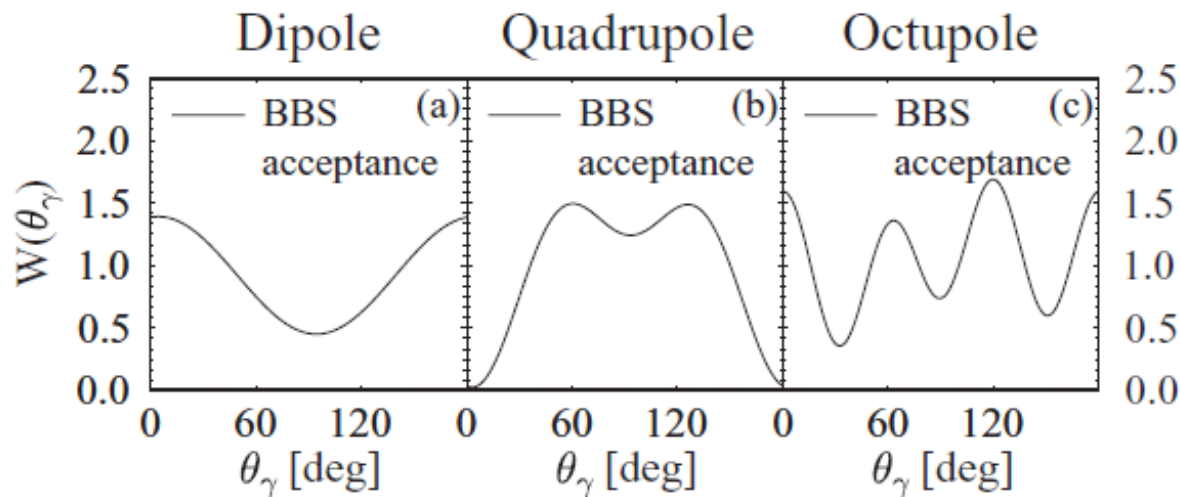


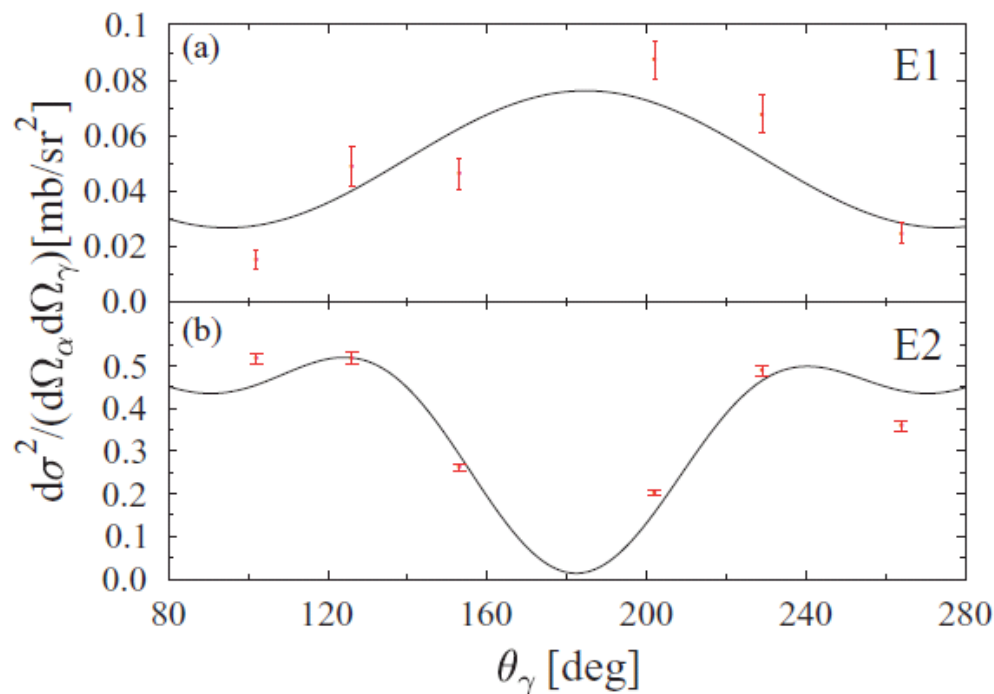
FIG. 3. Illustration of the angles for the  $\alpha$ - $\gamma$  angular correlation.



BBS at 3.5deg  
BBS acceptance averaging

with DWBA

FIG. 4.  $\alpha$ - $\gamma$  angular correlations for transitions from states with  $J^\pi = 1^-, 2^+$ , and  $3^-$  to the ground state of an even-even nucleus as a function of  $\theta_\gamma$ . Each plot shows the distribution of the averaged angular correlation for the full acceptance of the BBS, which was positioned at  $3.5^\circ$ .



g-detector の acceptance  
averaging を入れた？

FIG. 6. (Color online)  $\alpha$ - $\gamma$  angular correlations for dipole and quadrupole transitions in  $^{138}\text{Ba}$ . The upper plot shows the calculated E1 distribution (solid line) and the extracted data points for the  $1^-$  state at 5511.3(10) keV. The lower plot shows the corresponding values for the  $2_1^+$  state at 1435.816(10) keV. The given errors are statistical only. Due to a laboratory scattering angle of  $3.5^\circ$  (corresponding to the central BBS angle) the angular correlation is not symmetric around  $180^\circ$  and therefore it has been plotted for angles ( $\theta_\gamma$ ) from  $0^\circ$  up to  $360^\circ$  in the reaction plane.

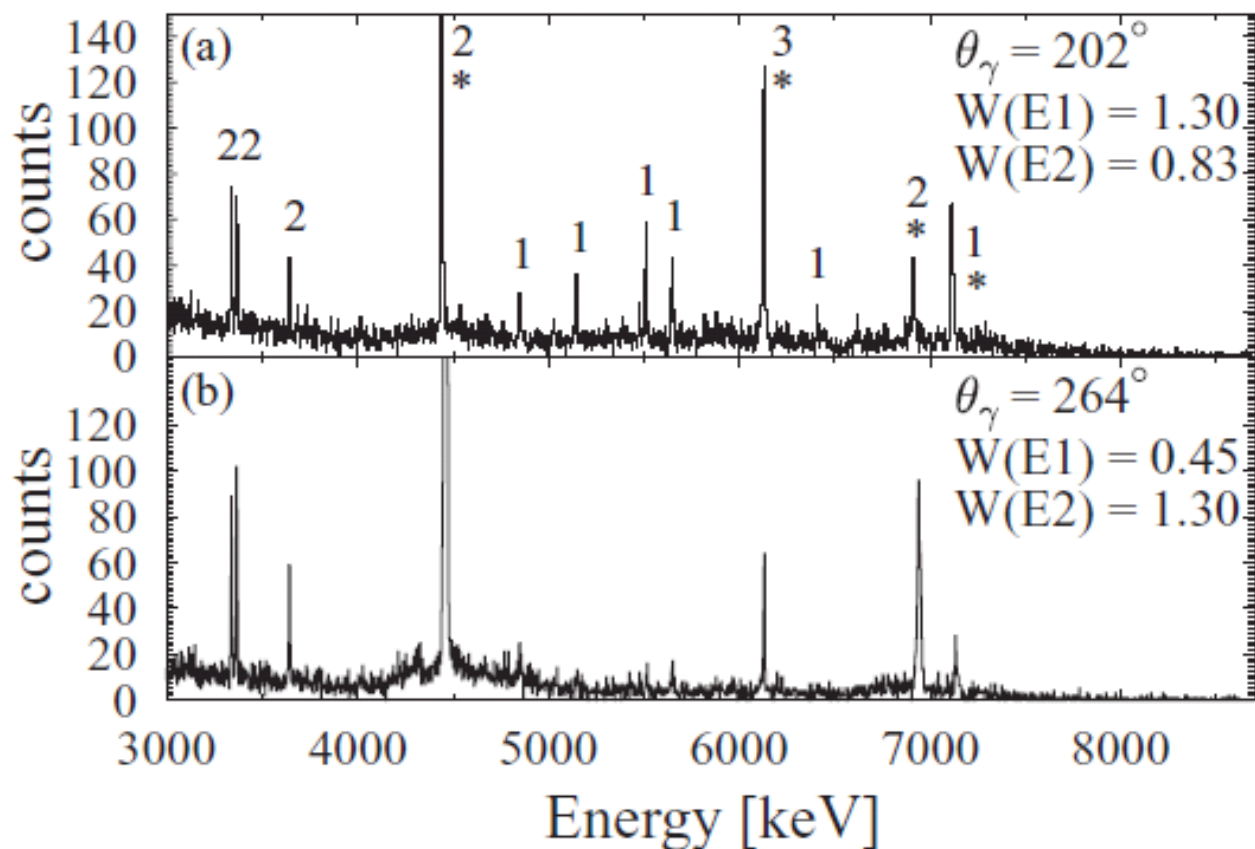


FIG. 5. Ground-state decay spectra obtained with HPGe detectors at different angles for  $^{138}\text{Ba}(\alpha, \alpha' \gamma)$ . The value of the averaged angular correlation  $W(L\pi)$  is denoted for the corresponding angles. Strong transitions are labeled with the angular momentum. Peaks marked with asterisks (\*) stem from background transitions in  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$ .



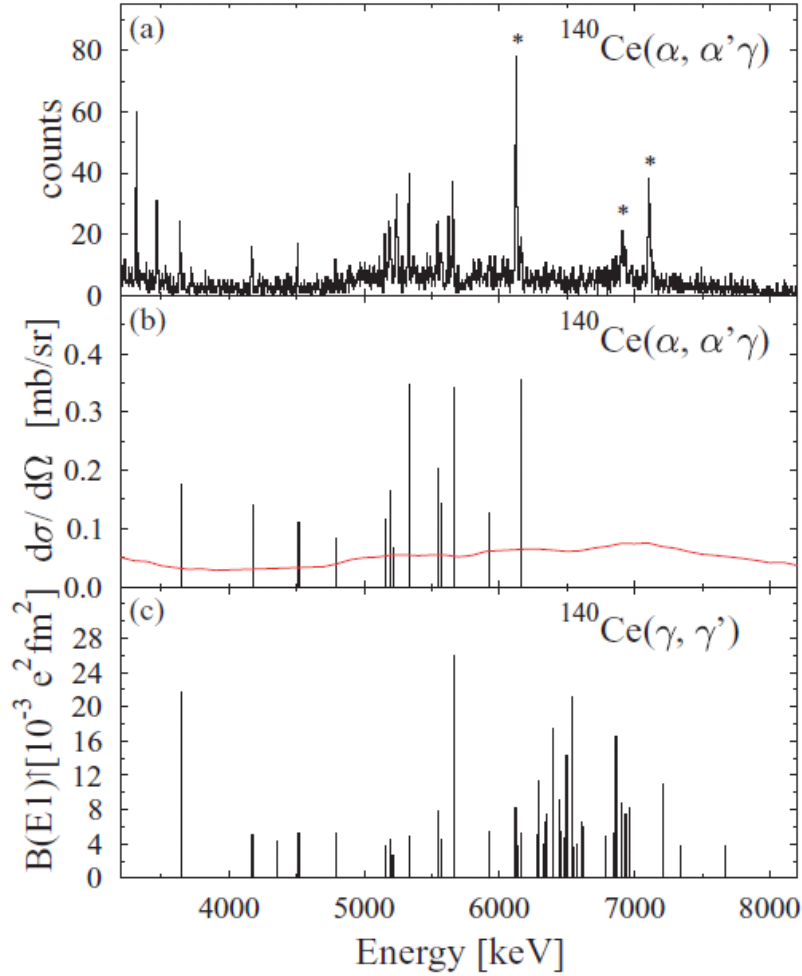


FIG. 7. (Color online) (a) Final  $\gamma$ -ray spectrum for ground-state decay measured in  $^{140}\text{Ce}(\alpha, \alpha'\gamma)$  and summed for all the HPGe detectors. Peaks marked with an asterisk (\*) stem from transitions in  $^{16}\text{O}$ . (b) Single cross sections for the excitation of the  $1^-$  states in  $^{140}\text{Ce}$  deduced from  $(\alpha, \alpha'\gamma)$  measurement. The solid line shows the energy-dependent sensitivity limit. (c)  $B(E1)\uparrow$  strength distribution measured with the  $(\gamma, \gamma')$  reaction.

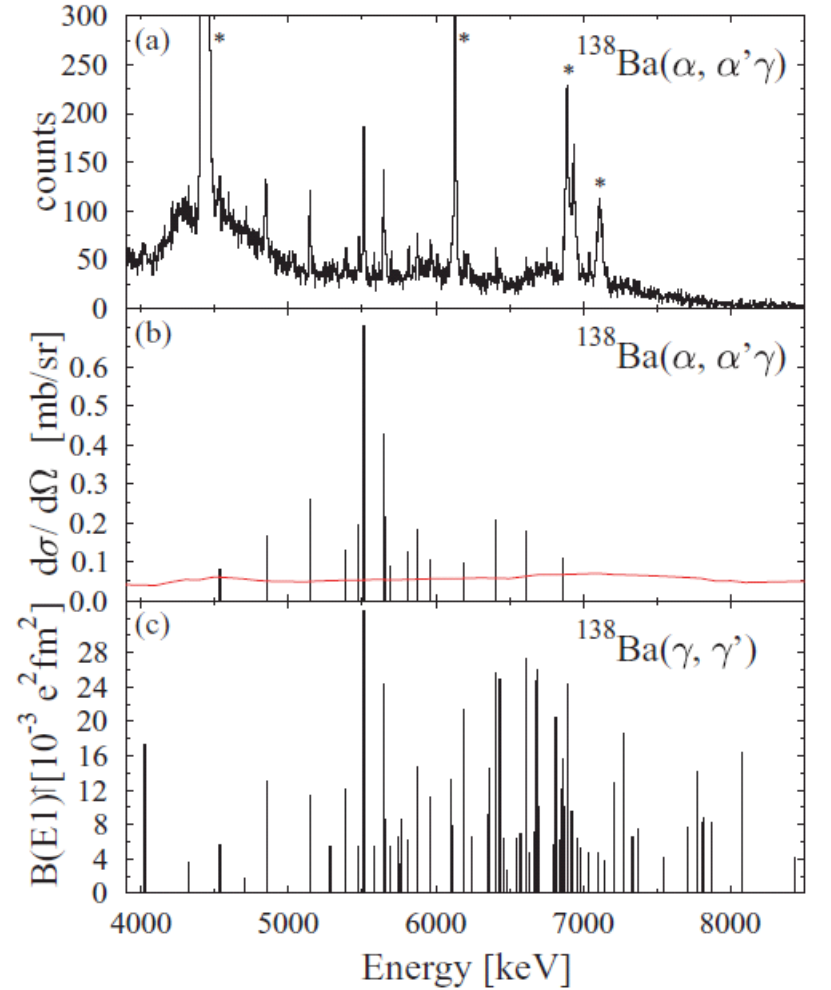


FIG. 8. (Color online) Same as in Fig. 7 but for  $^{138}\text{Ba}(\alpha, \alpha'\gamma)$  and  $^{138}\text{Ba}(\gamma, \gamma')$ . Around 4439 keV the spectrum is dominated by the transition stemming from  $^{12}\text{C}$ .



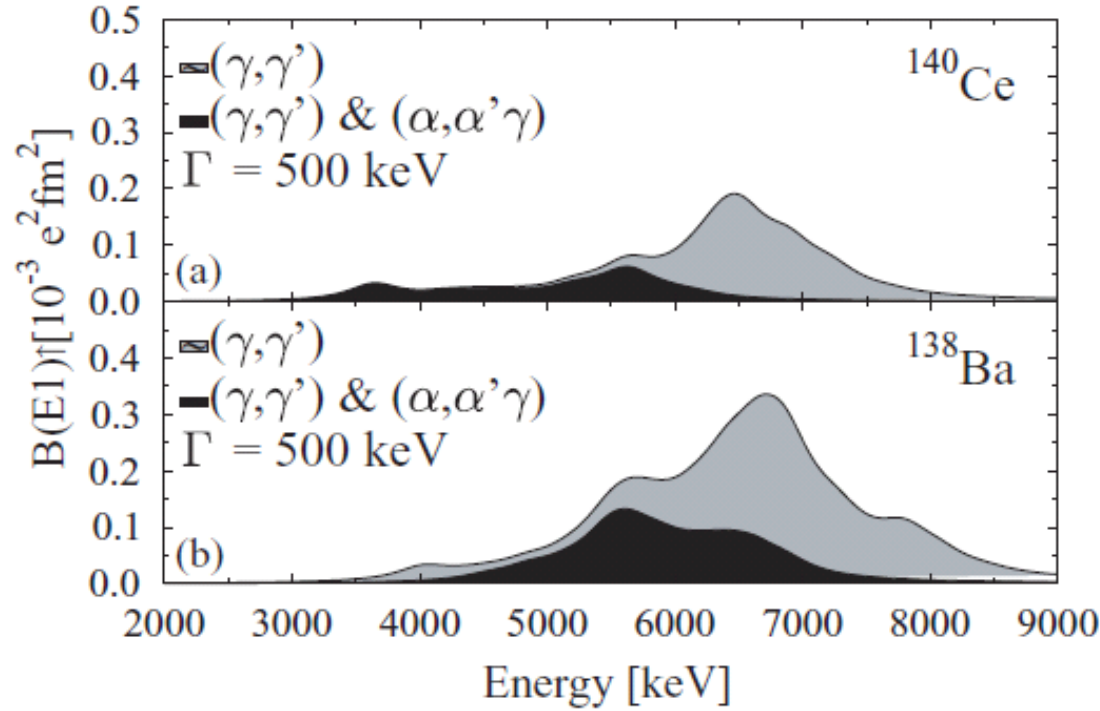


FIG. 9.  $B(E1)\uparrow$  strength distribution measured in  $(\gamma, \gamma')$  convoluted with a Lorentzian function with  $\Gamma = 500$  keV for  $^{140}\text{Ce}$  (upper part) and  $^{138}\text{Ba}$  (lower part), respectively. All of the  $1^-$  states are included in the gray-shaded distribution. The black-shaded distribution includes only states that could be observed in  $(\gamma, \gamma')$  as well as in  $(\alpha, \alpha'\gamma)$ .

fully self-consistent

Relativistic Hartree Bogoliubov (RHB) (基底状態、single-particle orbits)

+ Relativistic Quasiparticle Random Phase Approximation (RQRPA)

$0 < r < 8$  fm

$4.25 < r < 8$  fm

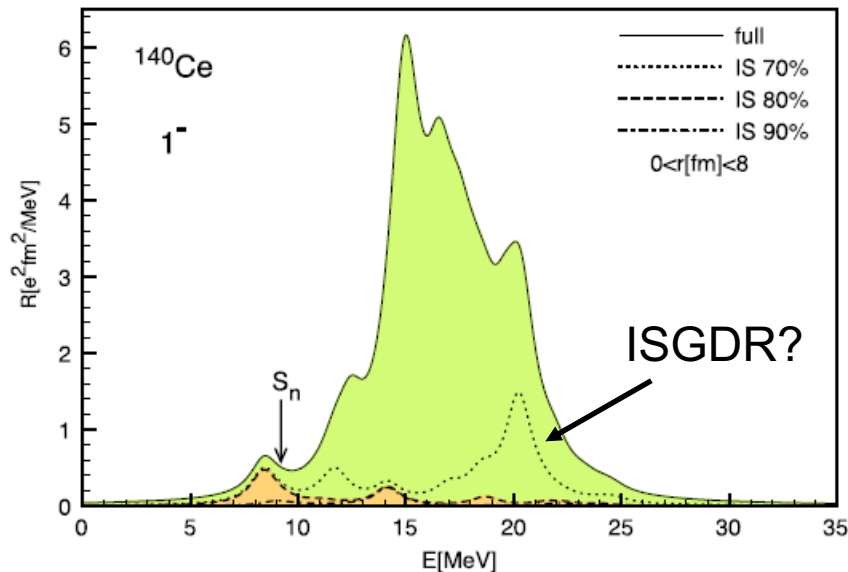


FIG. 1 (color online). The total RHB + RQRPA  $E1$  transition strength for  $^{140}\text{Ce}$  (solid curve). The dotted, dashed, and dash-dotted curves connect states with predominant (at least 70%, 80%, and 90%, respectively) isoscalar (IS) components, identified by analyzing the corresponding proton and neutron transition densities over the radial interval  $[0, 8]$  fm. The vertical arrow denotes the one-neutron separation energy  $S_n = 9.2$  MeV.

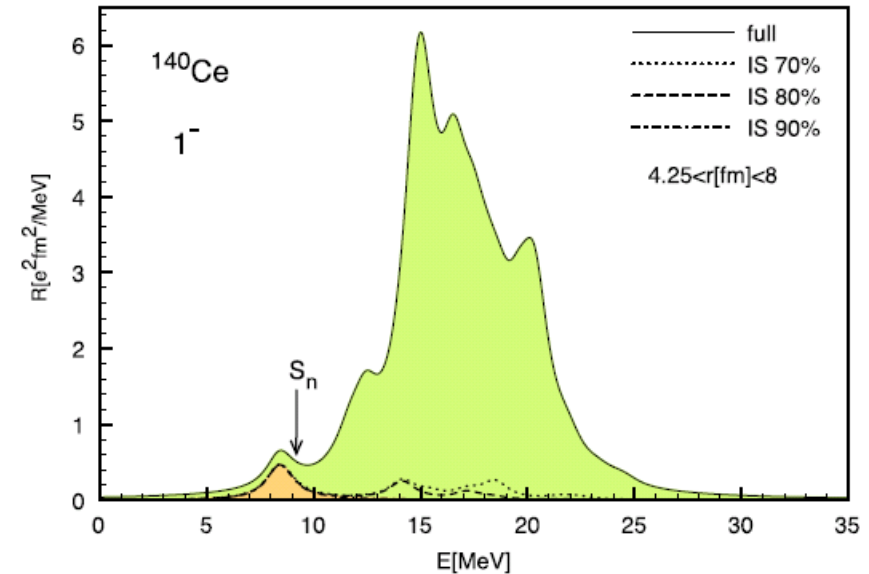
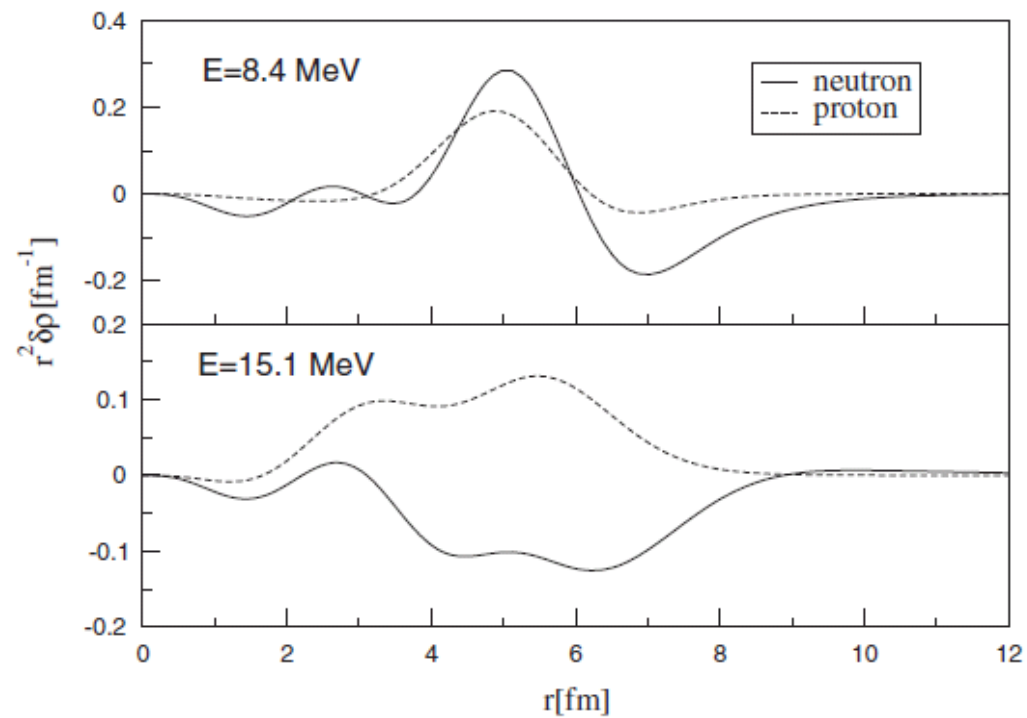


FIG. 2 (color online). Same as in Fig. 1, but the dotted, dashed, and dash-dotted curves are determined from the radial dependence of the neutron and proton transition densities in the surface region:  $4.25 < r < 8$  fm.

Isoscalar と Isovector の成分比に分けて  
プロットしてくれたほうがありがたいが...



IS: 表面励起

IV: 全体で励起

FIG. 3. The RQRPA neutron and proton transition densities for the peaks at 8.4 MeV and 15.1 MeV excitation energy in  $^{140}\text{Ce}$ .

ISの励起エネルギーが実験と合わない(高い)

考えられる理由

× effective mass が小さい? ( $m^* < 0.7m_N$ )

→ spin-orbit single-nucleon potential でかなり制限されている

× coupling to low-energy surface phonons?

→ 定性的には可能性があるが、QPMなどの試算ではあまり効かない

? 現象論的にN=82 shell gap の neutron single-particle energy を入れると、ISが $E_x=5$  MeV程度まで下がる。

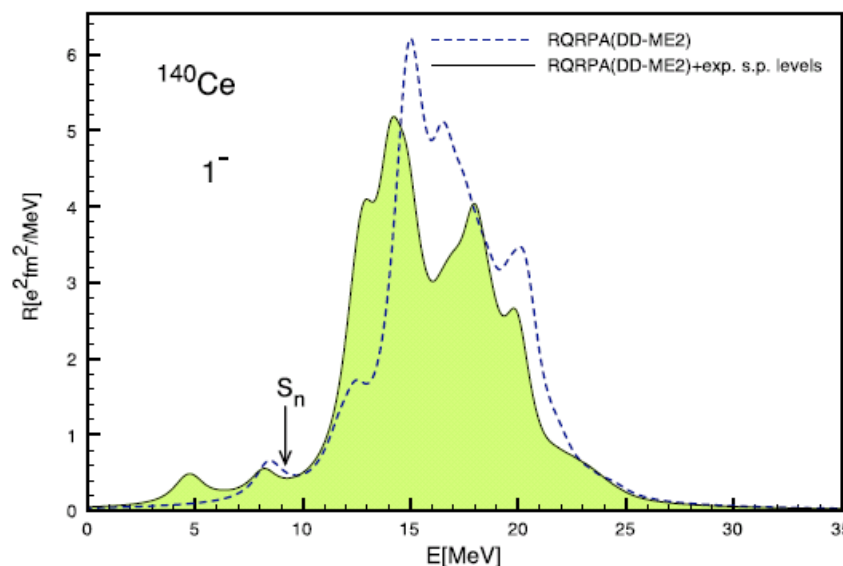


FIG. 5 (color online). The total RHB + RQRPA  $E1$  transition strength for  $^{140}\text{Ce}$  in comparison with calculation using experimental neutron single-particle energies.



# 質問、主張

- (中性子) スキンとコアのdipole振動というのは、そもそも描像として可能なのか？  
Pauli Blockingは？
- PDRは閾値( $S_n$ )付近に出やすい。  
逆に $S_n$ 付近に出やすいものが他にもあるのでは？  
スキンの他のタイプの振動、回転、 $\Delta S=1$ 振動、 $\Delta T?$ ...、バンド構造？
- PDRと同じような励起エネルギー付近にM1共鳴の存在が報告されている。  
M1共鳴が $S_n$ 付近に出やすい理由はあるのか？
- single p-h 状態では、スキンのようなものを多くの核で系統的には作れないのでは？  
集団運動的なイメージとは対極の状態にある。  
single ph 状態でPDRが説明されるとすれば、その物理的描像はどうなるのか？
- Direct に transition density を測る実験。transition form factor q-dependence を測る  
実験を考える。**どの程度重要か、どの程度の精度が必要か。実験は可能か？**
- ( $\gamma$ ,abs)で安定核isotope abundance の非常に大きいものを対象として、PDR測定を系統的に測定できるか。  
**効率を上げる工夫、資料の物質量を減らす工夫、E1/M1/...を分ける工夫。**
- PDRからのdecayを見る。  
single p-h 的描像であれば、崩壊先の状態のpopulationに特徴が出るはず？  
集団運動的描像であれば、transition density の特徴(殻のような中性子trans. density)に起因する、特徴的な $\gamma$ 放射分布、中性子角度分布が見られないか？ Prediction
- 中空のtransition density。(p,p')などの角分布に特徴的な形がでる可能性があるのでは？



- **PDRの(アイソスピン)アナログ状態は存在するのか？しないのか？**

$$(v^{-1}v^{+1}) \Leftrightarrow (v^{-1}\pi^{+1})$$

**(p,p') or (3He,3He')  $\Leftrightarrow$  (p,n) or (3He,t)の励起の違いを見る。**

IVGDRにはアナログが存在するはず。PDRはある？ない？

- PDRの $\gamma$ (EM)による励起強度とproton(ハドロン)による励起しやすさは違うかもしれない。

$\gamma$ (EM)は、中性子スキン部のtransition density やアイソスカラーなコアのtransition density をプローブしにくい？

proton(ハドロン)の核力は励起しやすい？

$\gamma$ とprotonで差が見えるか？

(p,p')で見えているバンプはPDRをよりprobeしやすいからか？

Zrなど報告されているM1は実はPDRか？ 散乱角が大きくなるとより顕著化か？

( $\alpha, \alpha'\gamma$ )と( $\gamma, \gamma'$ )の差は、本当にT=0とT=1に起因する差を見ているのか？

EMと核力による励起強度の差をみているのではないか？

- **Collectiveであること、Collectivity の定義、データによる検証の可能性。**

- Reaction Mechanism

- **何故特定の原子核にPDRが見えるのか？ あるいは普遍的に存在？**

**本当にスキンのせいなのか？ N-Zと強度との相関を見るのが本当によいのか。**

**稲倉モデルでのPDRの理解。PDRの存在条件の明文化。**

表面付近に n の transition density があることと、p の transition density がないことの

両方が必要。g.s. の状態に関する条件。Particle起動の条件 s,p,? Or 主量子数の変化？

g.s.でのスキンの存在、集団運動のイメージとうまく結びつくか？

