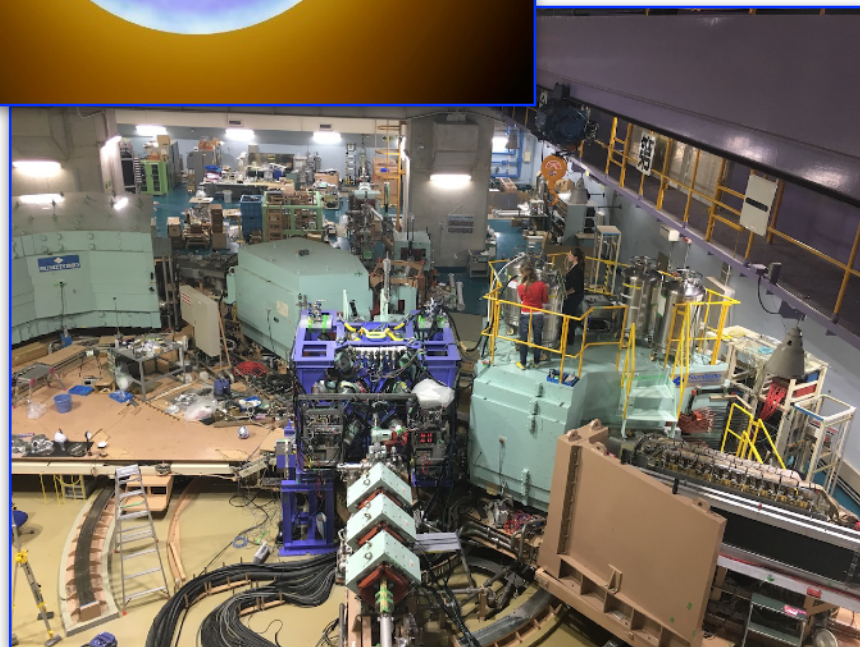
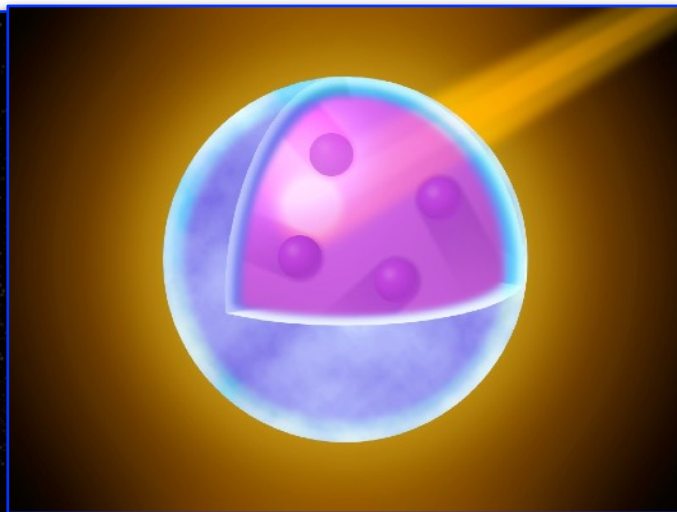
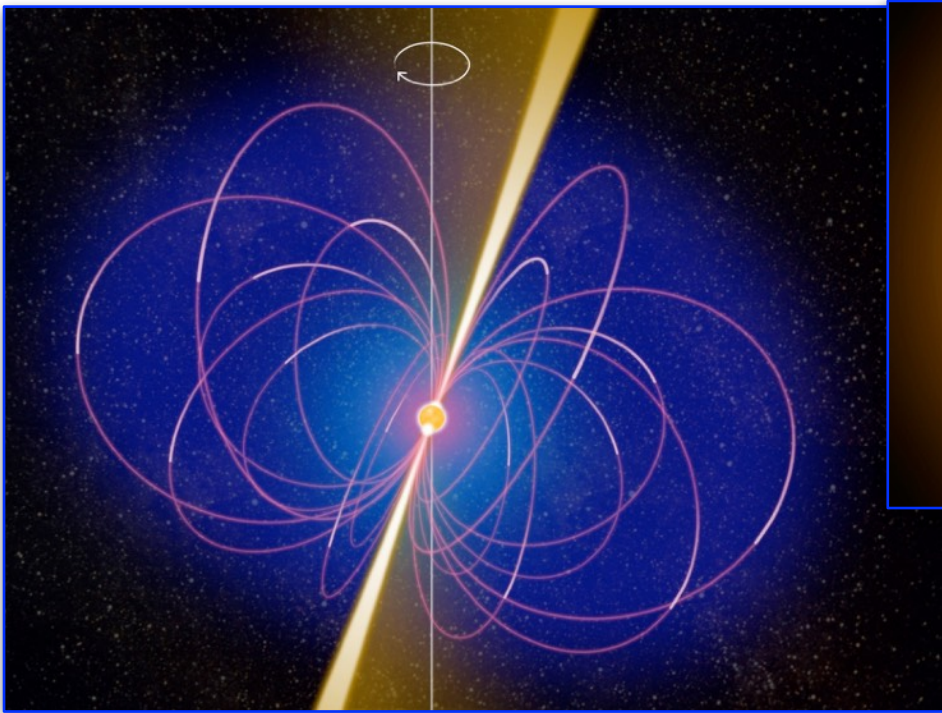


原子核の巨大共鳴と電磁応答



民井 淳

大阪大学核物理研究センター

Menti

menti.com: 4342 5774

参加者統計(練習)



講義中自由に質問してください

Menti

menti.com: 1298 4808

内容に関する質問（1日目）



講義中自由に質問してください

ノート

氏名、学部・学科、学年、学籍番号を記載

ページ番号
キーワード

疑問点、よく分からなかった点、不思議に
思ったことなど

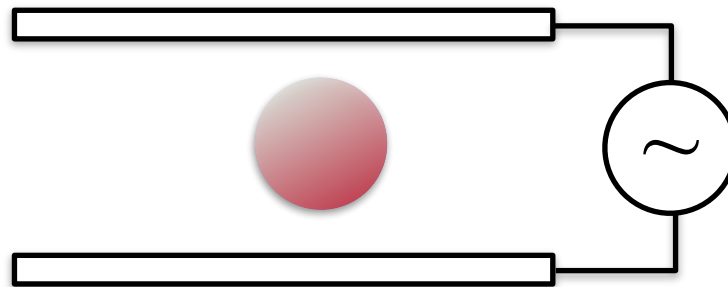
感想など

左側に授業の中でキーワードとページ番号をメモ。
よく分からなかったこと、疑問に思ったことなど
疑問点を質問する、右側に疑問点を書く。

自身でノートを作っている場合はノー
トを優先し、提出時に疑問的などを
記載してください。

イントロダクション

原子核の電磁応答



静電磁場

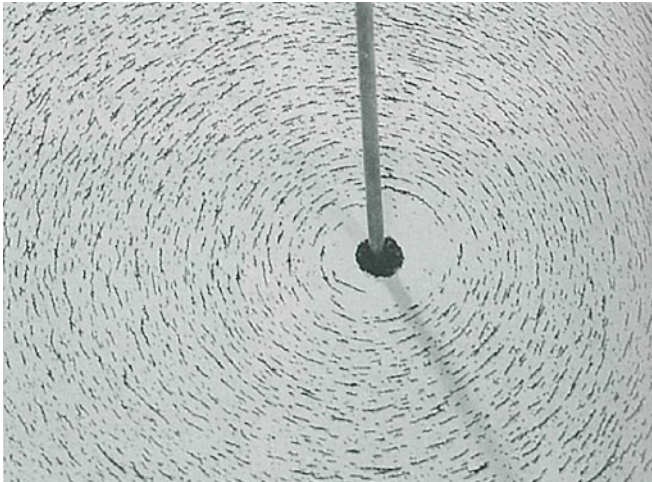
静電場

紙が櫛に引き寄せられる



静磁場

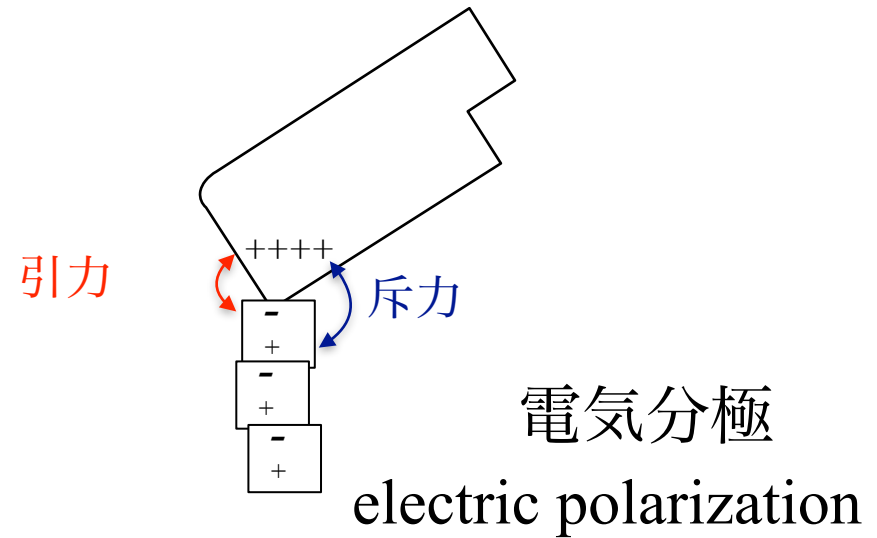
砂鉄が磁場の方向に整列するs



静電場内の分極



電気を帯びた櫛が、電氣的に中性な紙を引き寄せる。



櫛の電荷

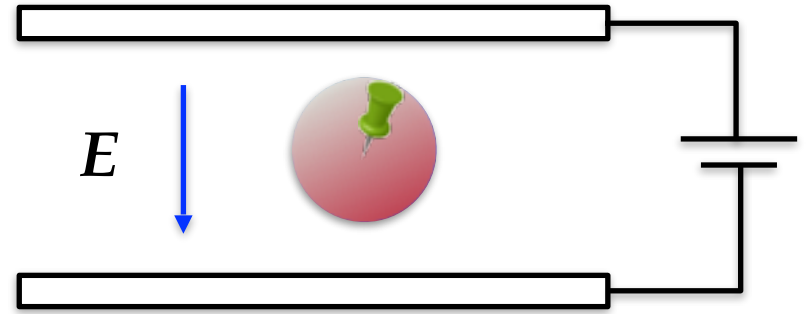
- 中性な紙が電氣的に分極する
- 紙が櫛に引き寄せられる
- 次の紙が分極し、引き寄せられる

電気分極率 (α_D)

電気双極モーメント

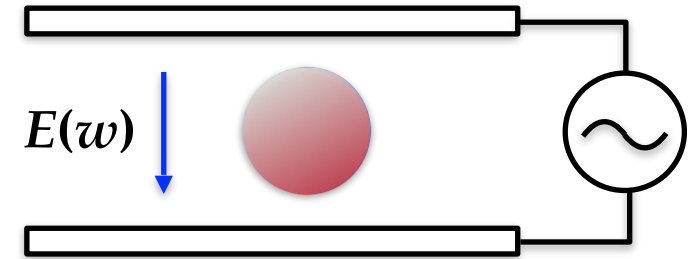
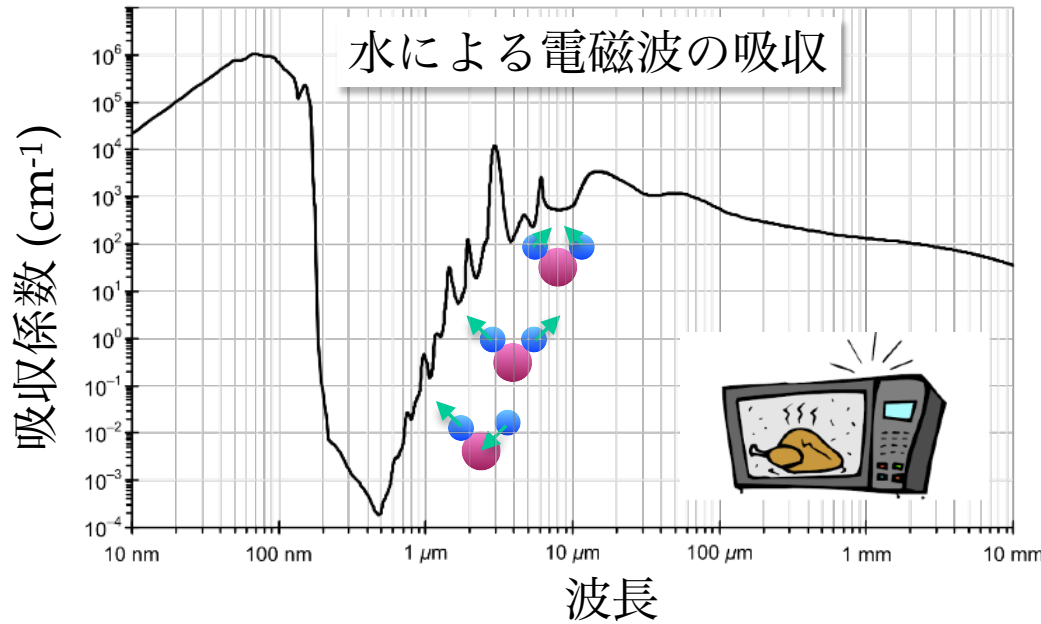
$$p = \alpha_D \times E$$

α_D : 電気分極率

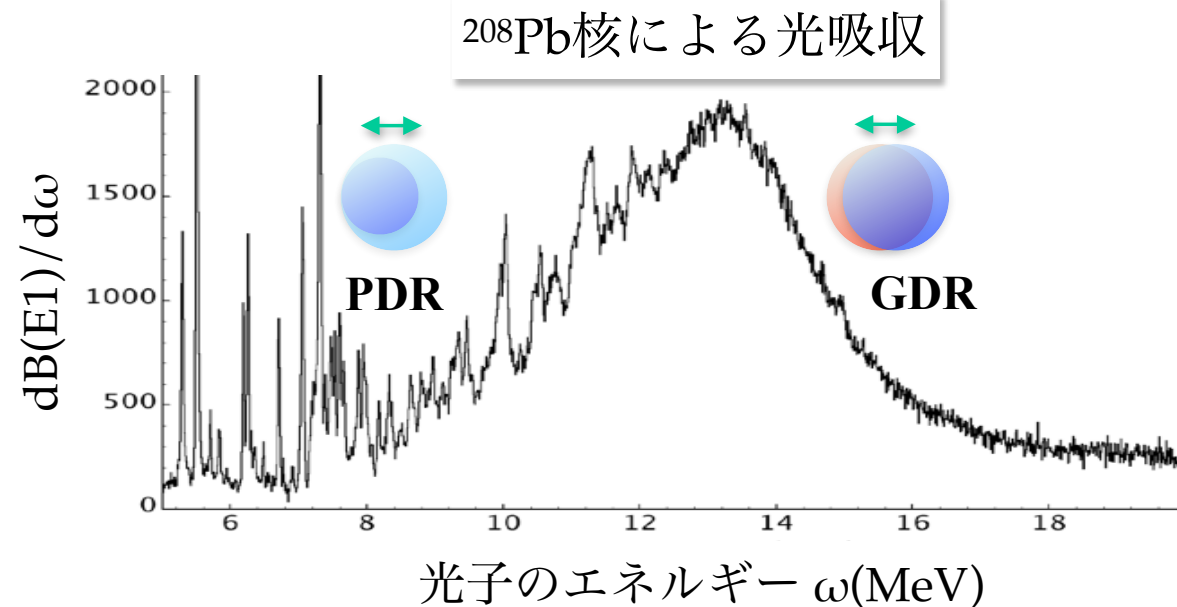


静電場中の原子核
(重心を固定)

原子核の電気応答



振動電場中の誘電体



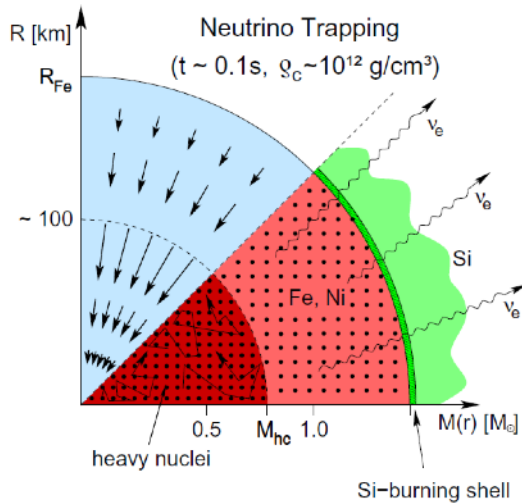
(E1) 光吸収断面積

E1 換算遷移確率

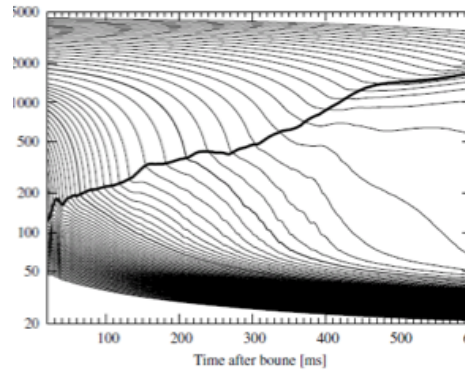
$$\sigma_{\text{abs}}^{E1} = \frac{16\pi^3\alpha\omega}{9} \frac{dB(E1)}{d\omega}$$

原子核の状態方程式、対称エネルギー項

Core-collapse supernova



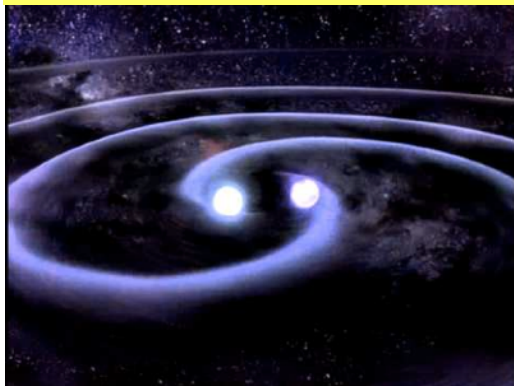
Langanke and Martinez-Pinedo



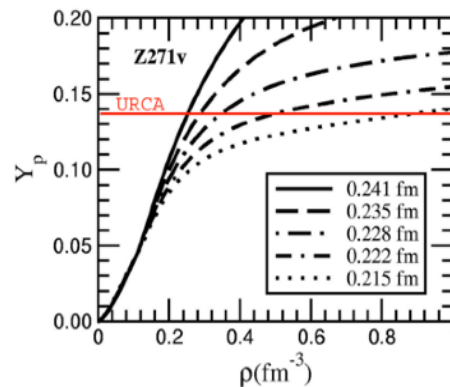
Y. Suwa et al., ApJ764, 99 (2013).

Nucleosynthesis

Neutron Star Merger Gravitational Wave

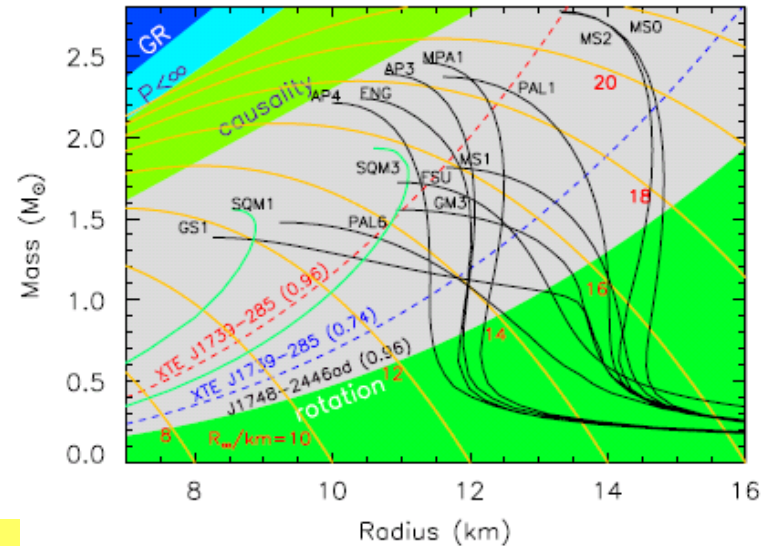


Neutron star cooling



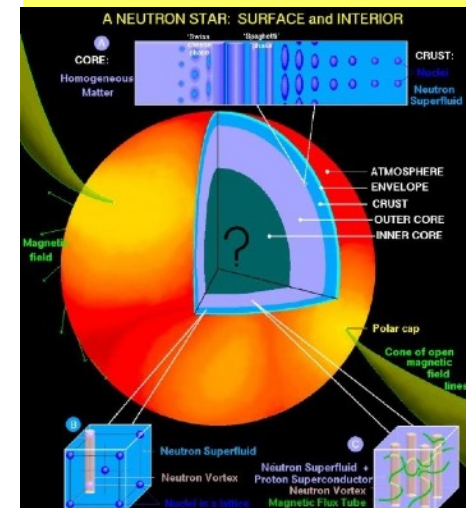
Lattimer and Prakash, Science 304, 536 (2004).

Neutron star mass vs radius



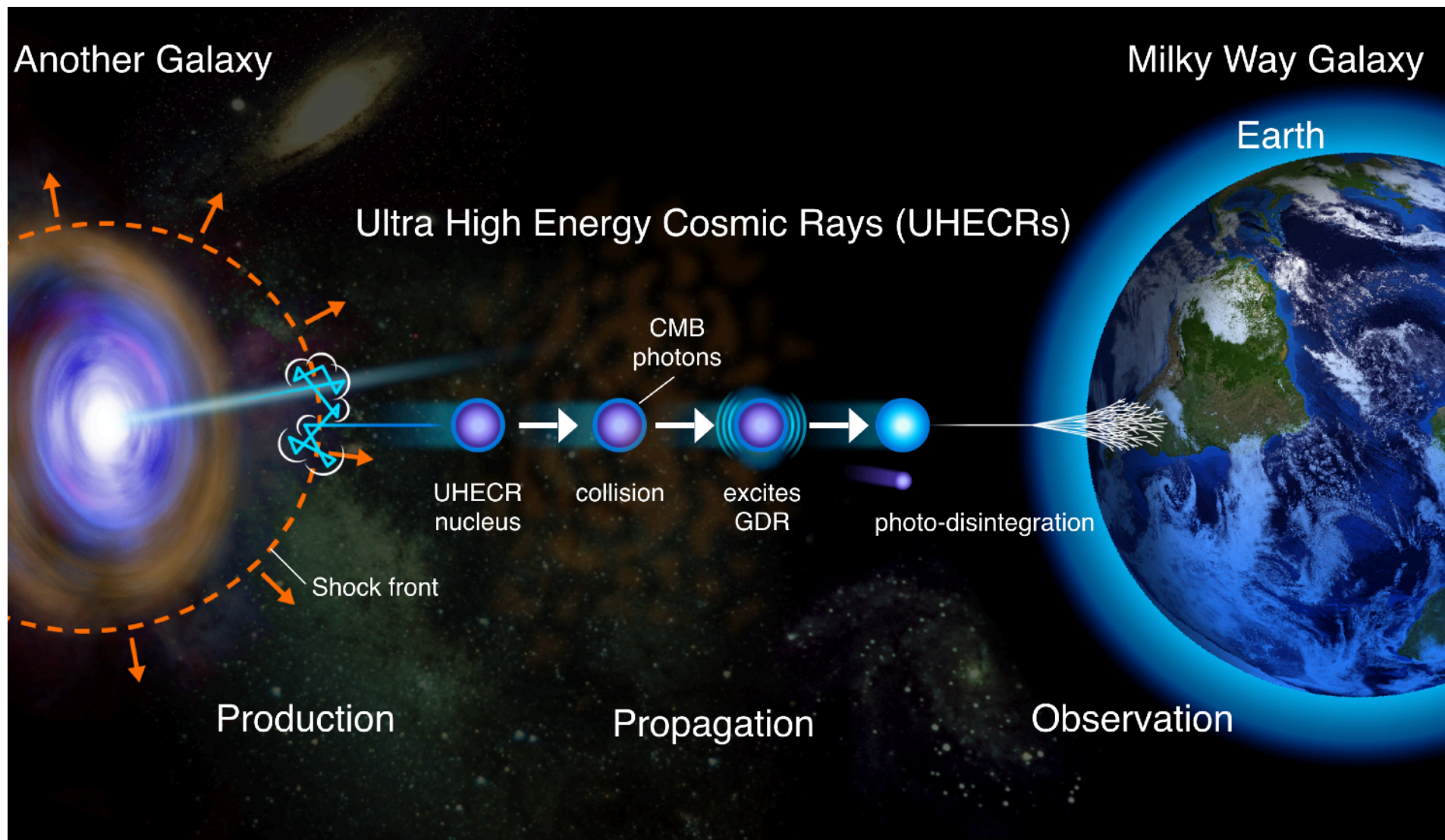
Lattimer et al., Phys. Rep. 442, 109(2007)

Neutron star structure



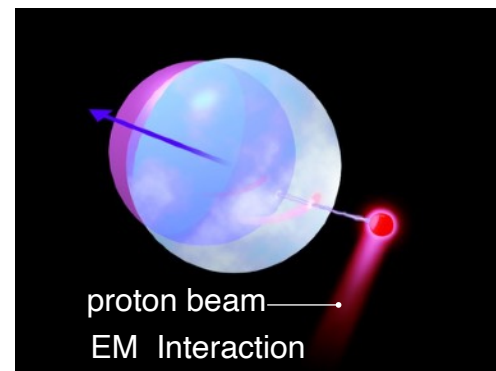
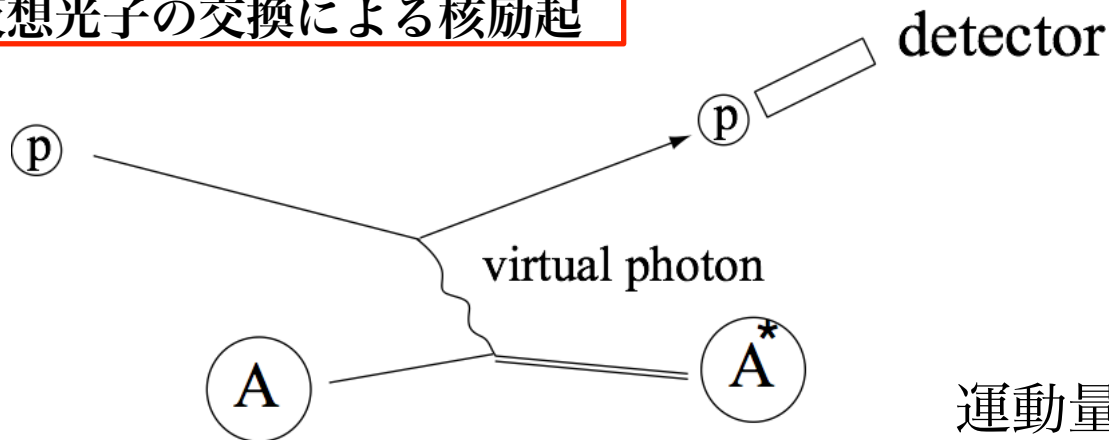
<http://www.astro.umd.edu/~miller/nstar.html>

超高エネルギー宇宙線の銀河間伝播機構



陽子前方散乱による原子核の電磁応答測定

仮想光子の交換による核励起



運動量移行 $q \sim 0$ (~ 0 deg.)

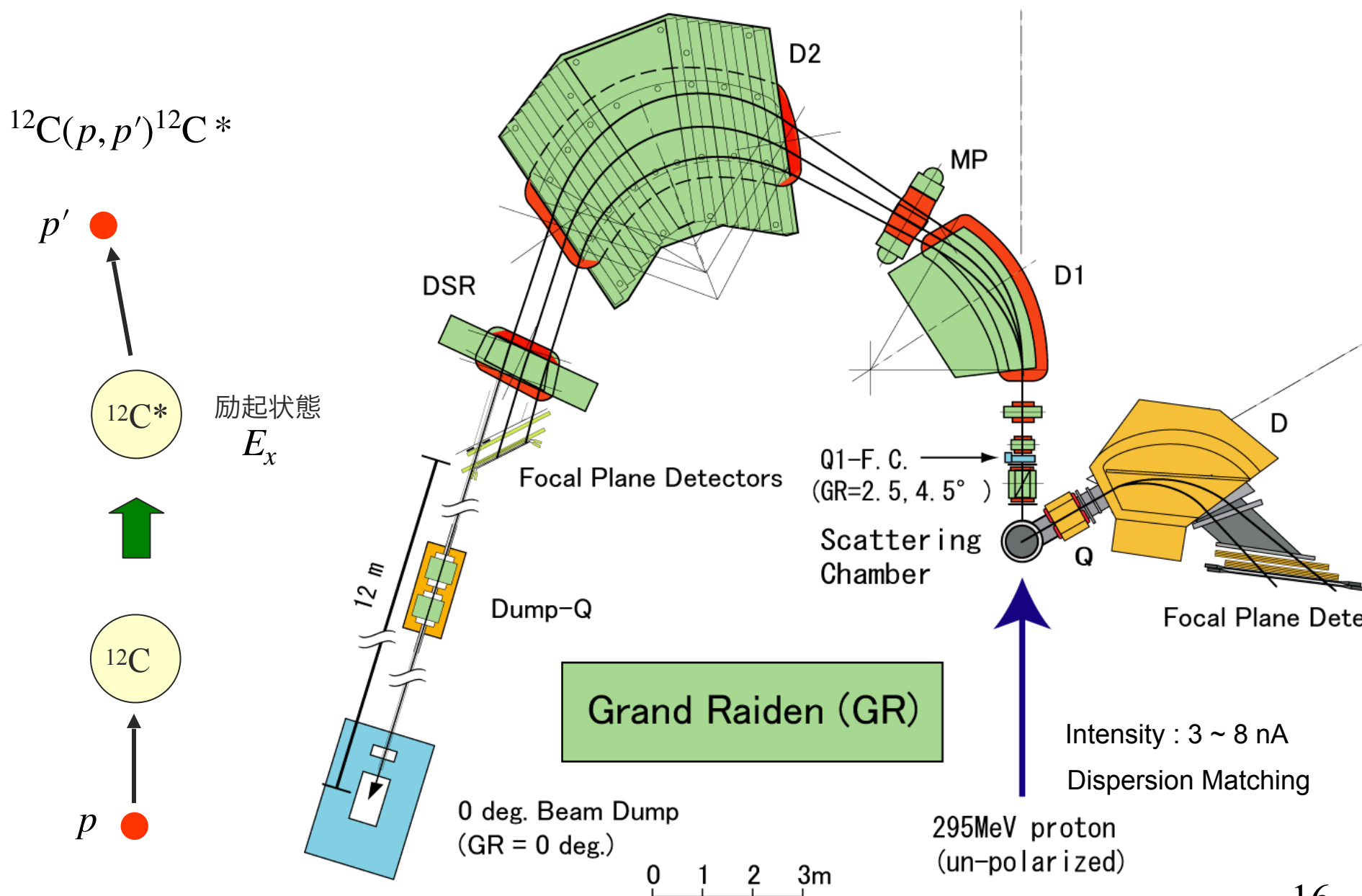
- 質量欠損法による核励起のスペクトロスコピー:

励起した核を直接観測しない = inclusive 測定

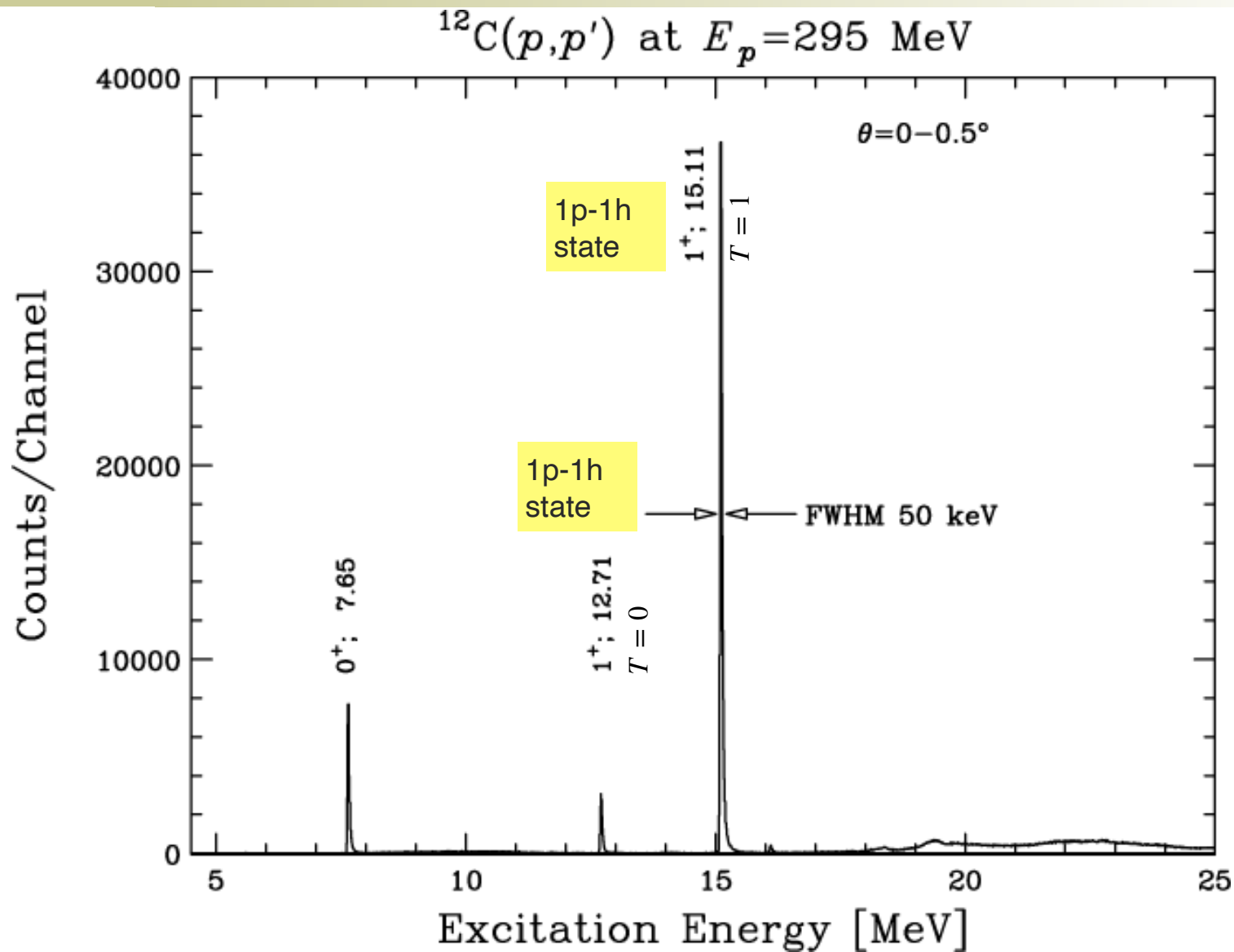
- 仮想光子交換によるクーロン励起

励起強度の絶対値が決まる

0度陽子散乱実験: グランドライデン、核物理研究センター

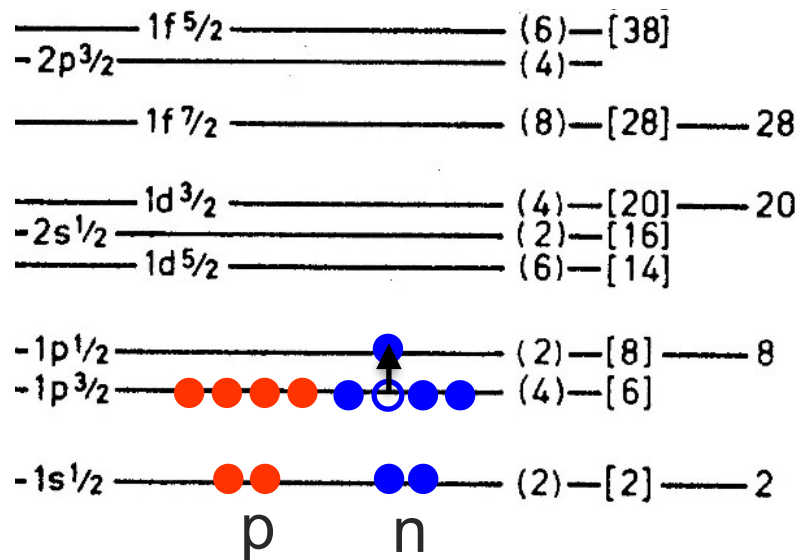


^{12}C の励起状態

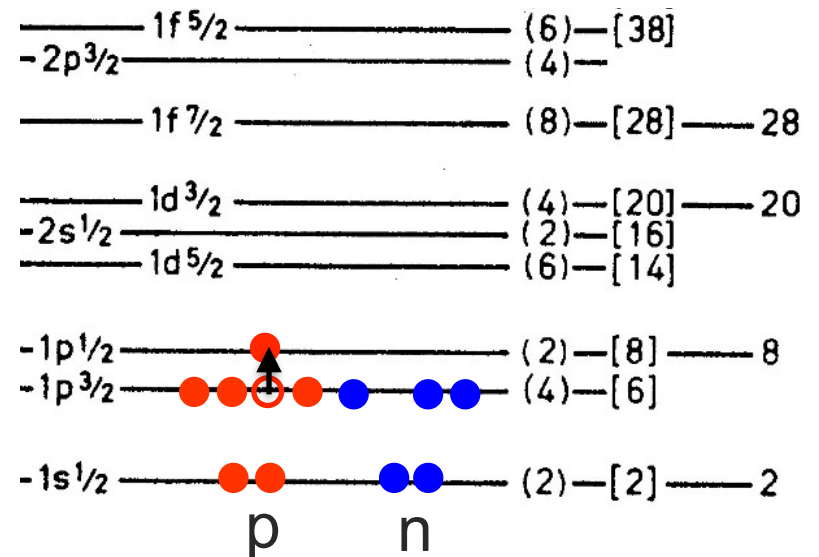


1粒子-1空孔励起

中性子1粒子1空孔励起



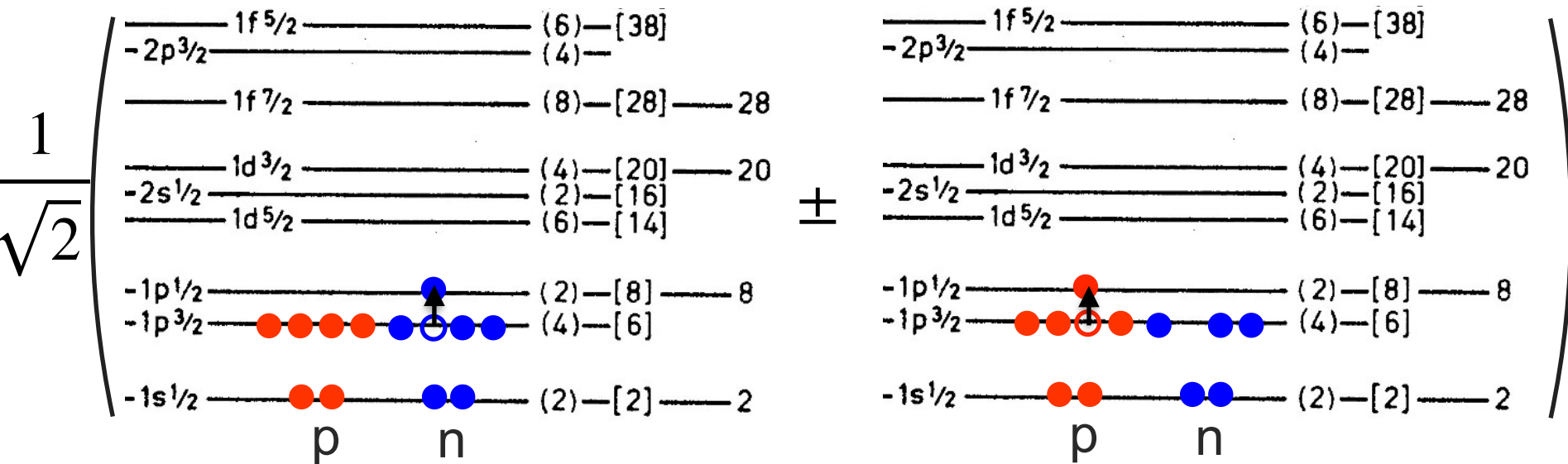
陽子1粒子1空孔励起



1粒子-1空孔励起

中性子1粒子1空孔励起

陽子1粒子1空孔励起



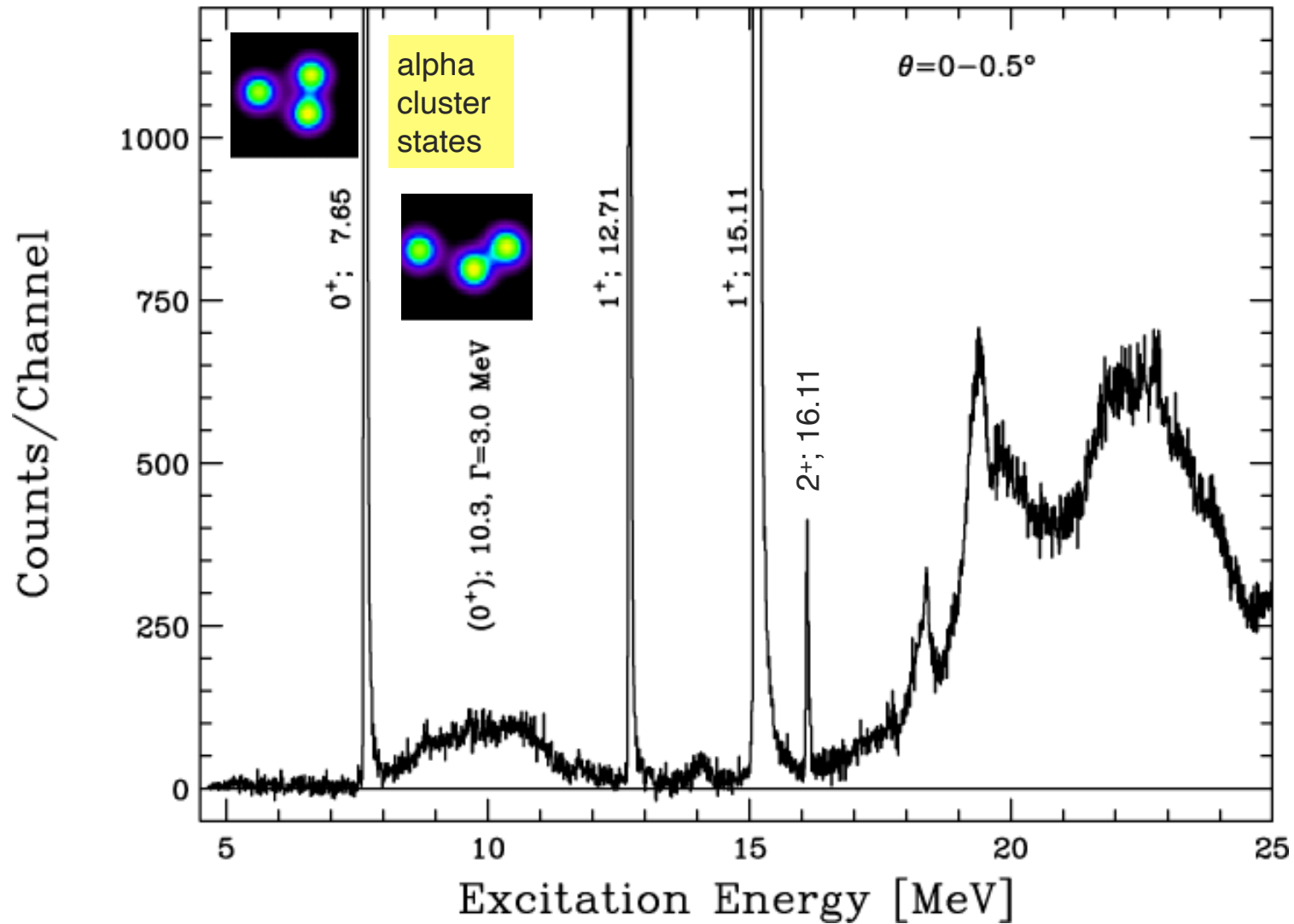
2つの1粒子1空孔励起のコヒーレントな重ね合わせ
(coherent superposition)

+ : アイソスカラー励起

- : アイソベクトル励起

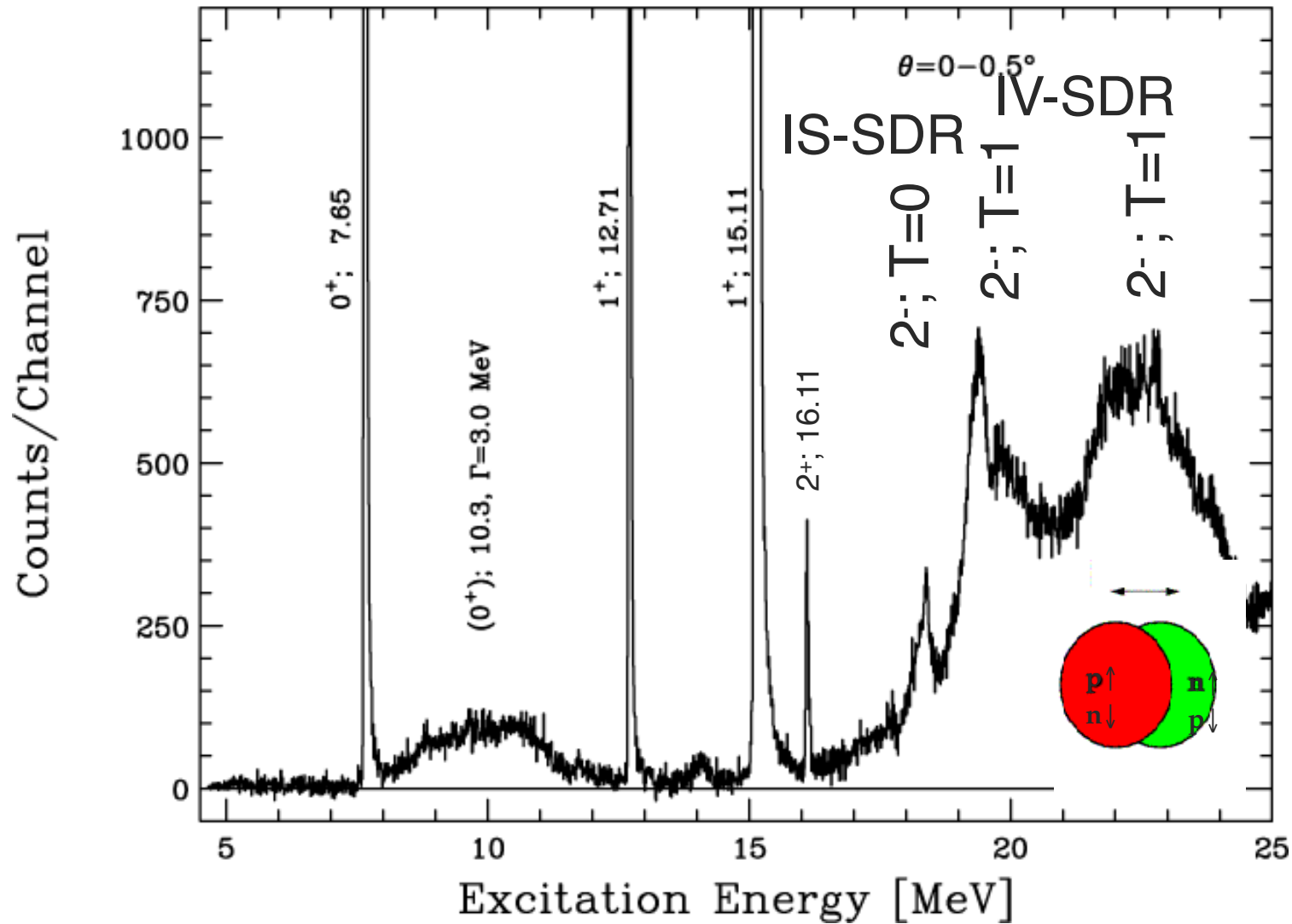
^{12}C の励起状態

$^{12}\text{C}(p,p')$ at $E_p=295$ MeV



^{12}C の励起状態

$^{12}\text{C}(p,p')$ at $E_p=295$ MeV



講義予定

- I. イントロダクション
- II. 原子核の巨大共鳴
- III. 軽核散乱の実験手法
- IV. 和則
- V. 原子核物質の状態方程式
- VI. 原子核の電気応答と光核反応
- VII. 原子核の磁気応答
- VIII. 共鳴の減衰、微細構造
- IX. まとめ

およそこの予定で進みますが、進行状況により追加・省略・入れ替えがあるかもしれません。

講義中自由に質問してください

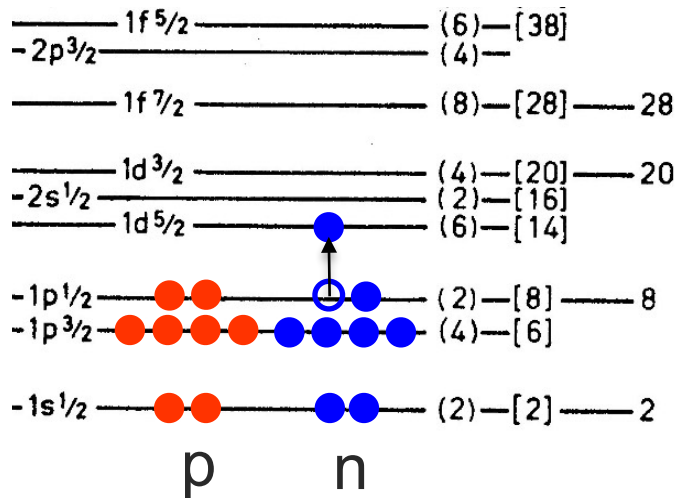
II 原子核の巨大共鳴

Giant Resonances

単一粒子の励起 $\Leftrightarrow$ 集団運動の励起

単一粒子の励起

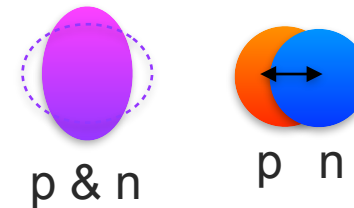
(独立粒子描像的)



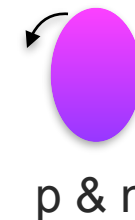
集団運動の励起

(大多数の核子が規則的に関与)

振動励起: 巨大共鳴



回転励起



原子核を叩いて振動させる・オペレータ



木のハンマー



鉄のハンマー

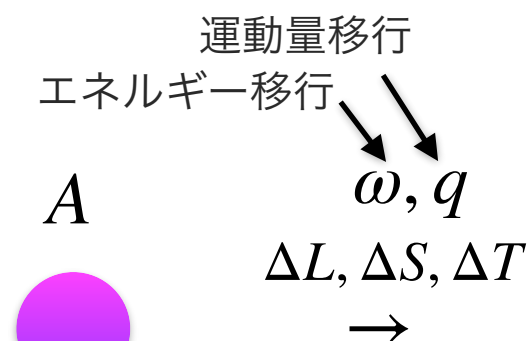
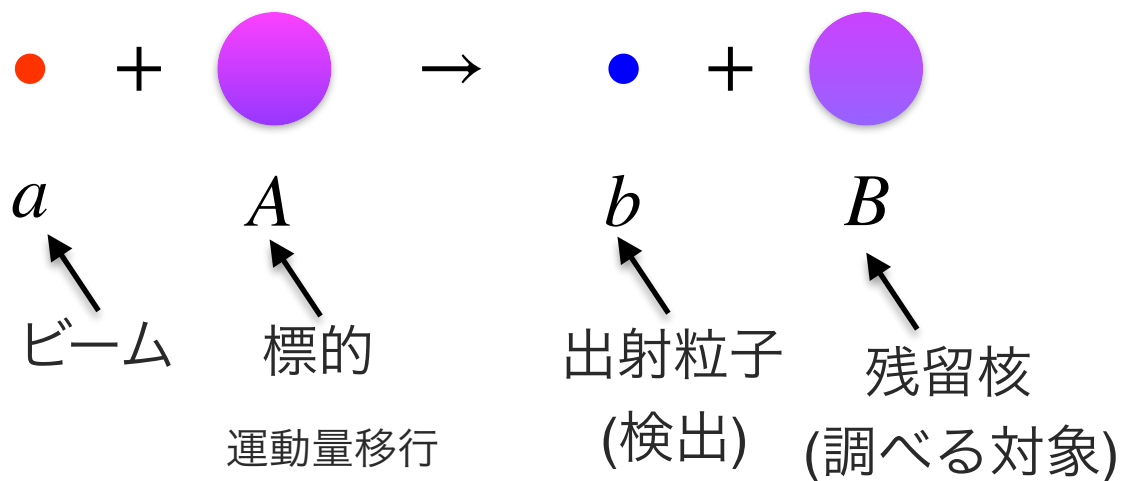
ハンマー=オペレータ

釣り鐘は、その形によって決まる固有の音(音色)を持つ。
音色は、叩くハンマーによって異なる。

原子核にも同様に特有の音色があり、叩き方によって異なる固有振動を起こす。ハンマーに対応するのが原子核に作用するオペレータである。

軽イオン散乱の移行量子数 $\Delta S, \Delta T, \Delta L$

$A(a, b)B$



A

$\vec{T}_i$

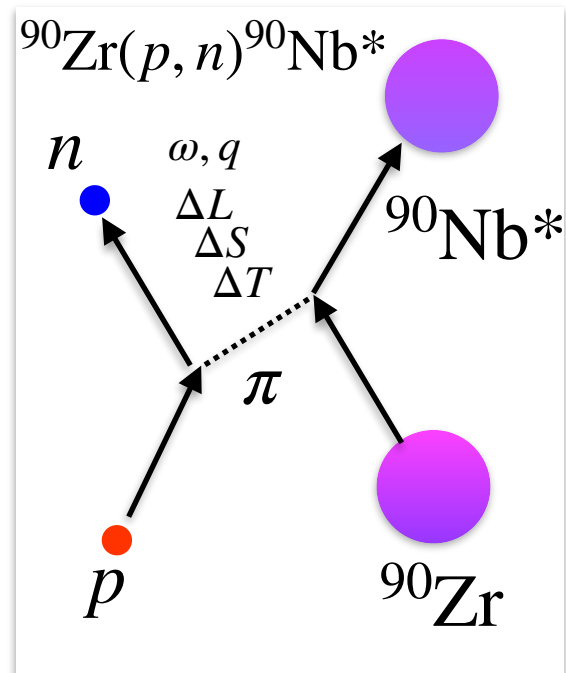
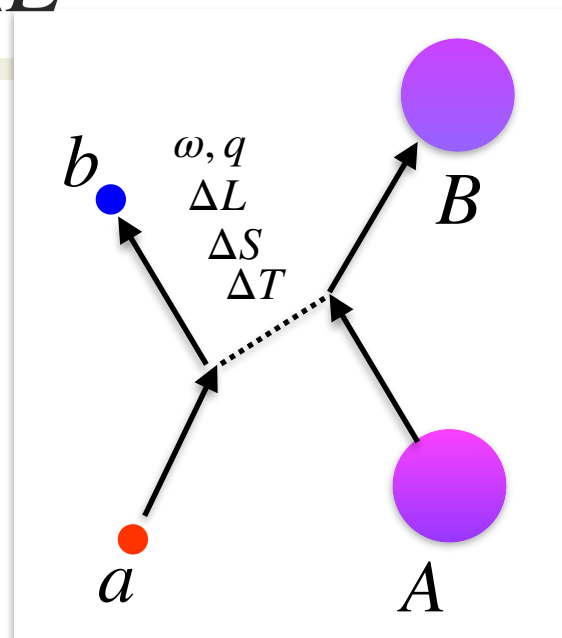
$\vec{J}_i$

B

$\vec{T}_f = \vec{T}_i + \Delta \vec{T}$

$\vec{J}_f = \vec{J}_i + \Delta \vec{J}$

$$\vec{J} = \Delta \vec{L} + \Delta \vec{S}$$



原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

		アイソ・スカラー 電気的多重極	アイソ・ベクトル 電気的多重極	アイソ・スカラー 磁気的多重極	アイソ・ベクトル 磁気的多重極
	$(\Delta T, \Delta S)$	$(0, 0)$	$(1, 0)$	$(0, 1)$	$(1, 1)$
単極振動	$\Delta L = 0$				
双極振動	$\Delta L = 1$	—			
四重極振動	$\Delta L = 2$				
...					

図 5.40 各種の振動モード

多重極 (multi-polarity)

杉本・村岡「原子核構造学」

原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

電氣的 $\Delta S = 0$

磁氣的 $\Delta S = 1$

		電氣的 $\Delta S = 0$		磁氣的 $\Delta S = 1$	
		アイソ・スカラー 電氣的多重極	アイソ・ベクトル 電氣的多重極	アイソ・スカラー 磁氣的多重極	アイソ・ベクトル 磁氣的多重極
	$(\Delta T, \Delta S)$	(0, 0)	(1, 0)	(0, 1)	(1, 1)
単極振動	$\Delta L = 0$				
双極振動	$\Delta L = 1$	—			
四重極振動	$\Delta L = 2$				
...					

図 5.40 各種の振動モード

多重極 (multi-polarity)

杉本・村岡「原子核構造学」

原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

アイソスカラー $\Delta T = 0$

アイソベクトル $\Delta T = 1$

		アイソ・スカラー 電気的多重極	アイソ・ベクトル 電気的多重極	アイソ・スカラー 磁気的多重極	アイソ・ベクトル 磁気的多重極
	$(\Delta T, \Delta S)$	(0, 0)	(1, 0)	(0, 1)	(1, 1)
単極振動	$\Delta L = 0$				
双極振動	$\Delta L = 1$	—			
四重極振動	$\Delta L = 2$				
...					

図 5.40 各種の振動モード

多重極 (multi-polarity)

杉本・村岡「原子核構造学」

スピンとアイソスピン

スピン

$\mathbf{s}, \boldsymbol{\sigma}$ はx,y,z成分を持つベクトル

- 核子（陽子と中性子）はスピン1/2をもつ

核子のスピン演算子を $\mathbf{s} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{2}$ とする。 $\boldsymbol{\sigma}$ はパウリ行列。

$$\mathbf{s}^2|\uparrow\rangle = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)|\uparrow\rangle \quad s_z|\uparrow\rangle = +\frac{1}{2}|\uparrow\rangle \quad \text{スピン上向き}(\uparrow)$$

$$\mathbf{s}^2|\downarrow\rangle = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)|\downarrow\rangle \quad s_z|\downarrow\rangle = -\frac{1}{2}|\downarrow\rangle \quad \text{スピン下向き}(\downarrow)$$

アイソスピン

- 核力においては陽子と中性子は同じ相互作用を行う（**荷電独立性**）

この仮定は完全ではないが極めてよく成り立っている。

陽子と中性子は同種粒子でアイソスピンの第3成分が異なると定義する。

核子のアイソスピン演算子を $\mathbf{t} = \frac{\boldsymbol{\tau}}{2}$ とする。

$\mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}$ はx,y,z成分を持つベクトル

$\boldsymbol{\tau}$ は $\boldsymbol{\sigma}$ と同じ形の行列。但しアイソスピン空間で作用する

$$\mathbf{t}^2|n\rangle = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)|n\rangle \quad t_z|n\rangle = +\frac{1}{2}|n\rangle \quad \text{中性子}$$

$$\mathbf{t}^2|p\rangle = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)|p\rangle \quad t_z|p\rangle = -\frac{1}{2}|p\rangle \quad \text{陽子}$$

原子核業界の定義。素粒子業界は1で I_z の符号の定義は逆。

オペレータと励起強度

各振動に対応する巨大共鳴(GR)への遷移を引き起こすオペレータ O

$$|\Psi_{\text{GR}}^{\Delta L, \Delta S, \Delta T}\rangle = O^{\Delta L, \Delta S, \Delta T} |\Psi_{\text{g.s.}}\rangle$$

ΔL : 多重極=軌道角運動量の変化

ΔS : スピン自由度の変化

ΔT : アイソスピン自由度の変化

Y : 球面調和関数

$$O^{\Delta L, \Delta S=0, \Delta T=0} = \sum_{i=1}^A r_i^{\Delta L} Y_{\Delta L}(\hat{r}_i)$$

$$O^{\Delta L, \Delta S=1, \Delta T=0} = \sum_{i=1}^A r_i^{\Delta L} Y_{\Delta L}(\hat{r}_i) \vec{\sigma}_i$$

$$O^{\Delta L, \Delta S=0, \Delta T=1} = \sum_{i=1}^A r_i^{\Delta L} Y_{\Delta L}(\hat{r}_i) \vec{\tau}_i$$

$$O^{\Delta L, \Delta S=1, \Delta T=1} = \sum_{i=1}^A r_i^{\Delta L} Y_{\Delta L}(\hat{r}_i) \vec{\sigma}_i \vec{\tau}_i$$

Electric: 電氣的

Magnetic : 磁氣的

Isoscalar : アイソスカラー型

Isovector : アイソベクトル型

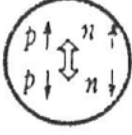
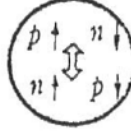
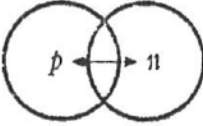
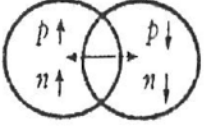
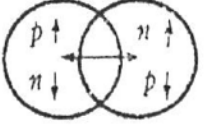
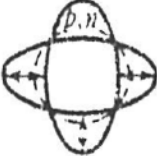
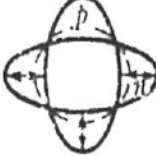
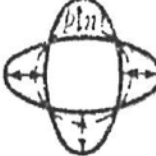
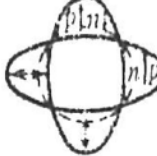
原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

Giant Monopole Resonance (GMR) $r^2 Y_0$

スピンパリティ: 0^+

(2次の高調波)

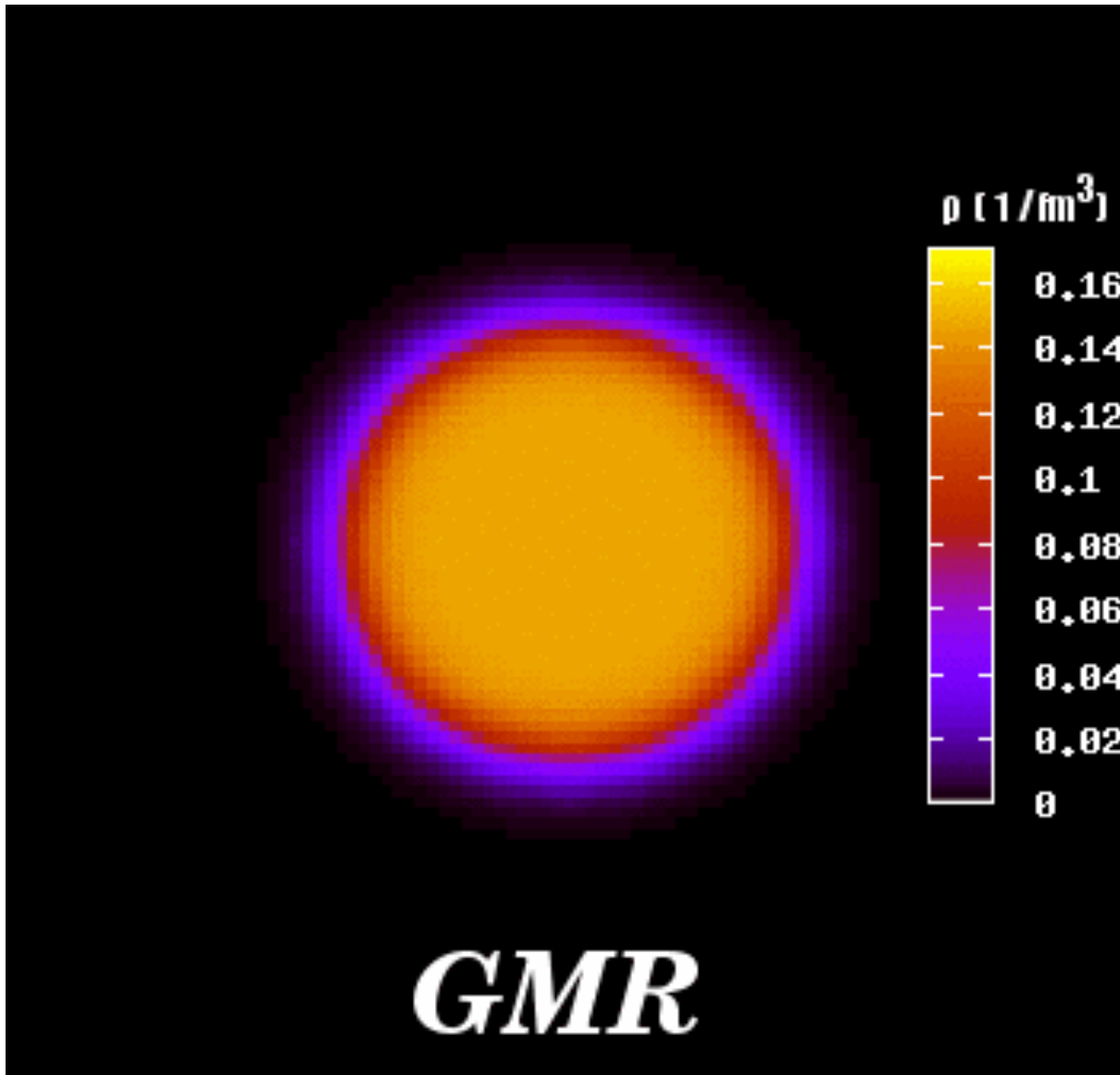
アイソ・スカラー アイソ・ベクトル アイソ・スカラー アイソ・ベクトル
電気的多重極 電気的多重極 磁気的多重極 磁気的多重極

$(\Delta T, \Delta S)$		(0, 0)	(1, 0)	(0, 1)	(1, 1)
単極振動	$\Delta L = 0$				
双極振動	$\Delta L = 1$	—			
四重極振動	$\Delta L = 2$				

...

図 5.40 各種の振動モード

(Isoscalar) Giant Monopole Resonance (GMR)



breathing mode

集団励起状態(巨大単極子共鳴 GMR)

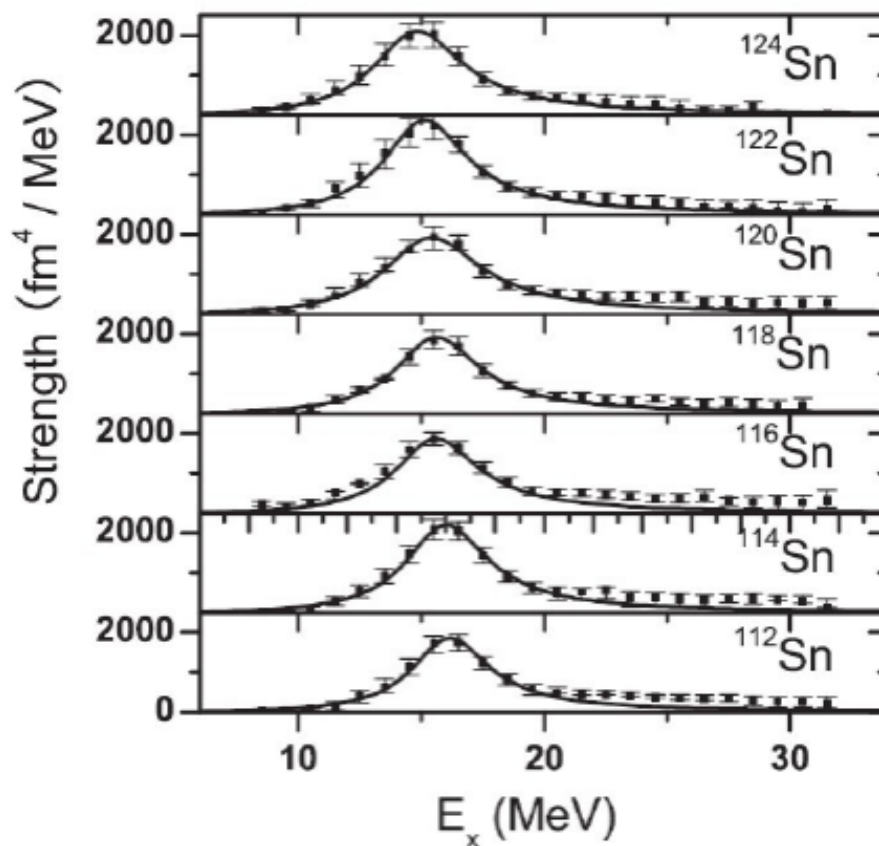
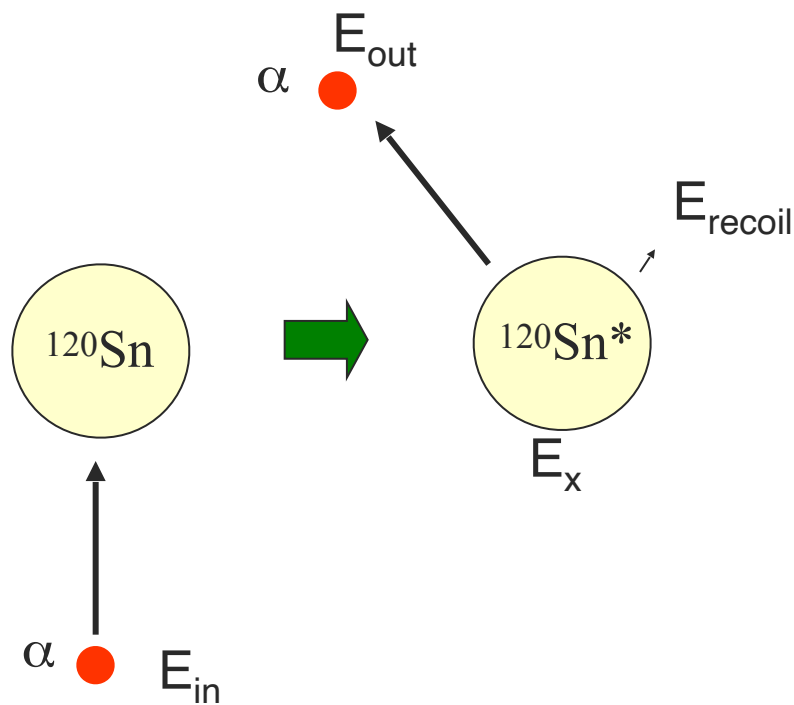


図 2.2.13: Sn 同位体の GMR 励起強度分布。

原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

Isoscalar Giant Dipole Resonance (ISGDR) $r^3 Y_1$

スピンパリティ: 1^+

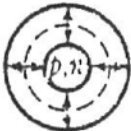
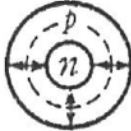
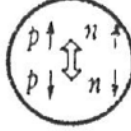
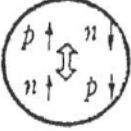
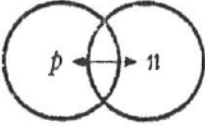
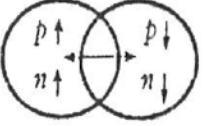
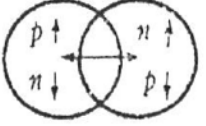
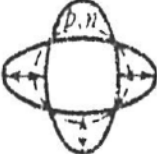
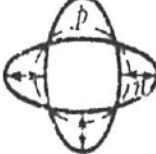
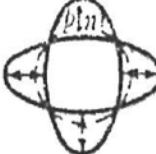
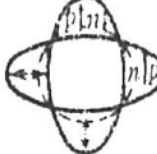
アイソ・スカラー
電気的多重極

アイソ・ベクトル
電気的多重極

アイソ・スカラー
磁気的多重極

アイソ・ベクトル
磁気的多重極

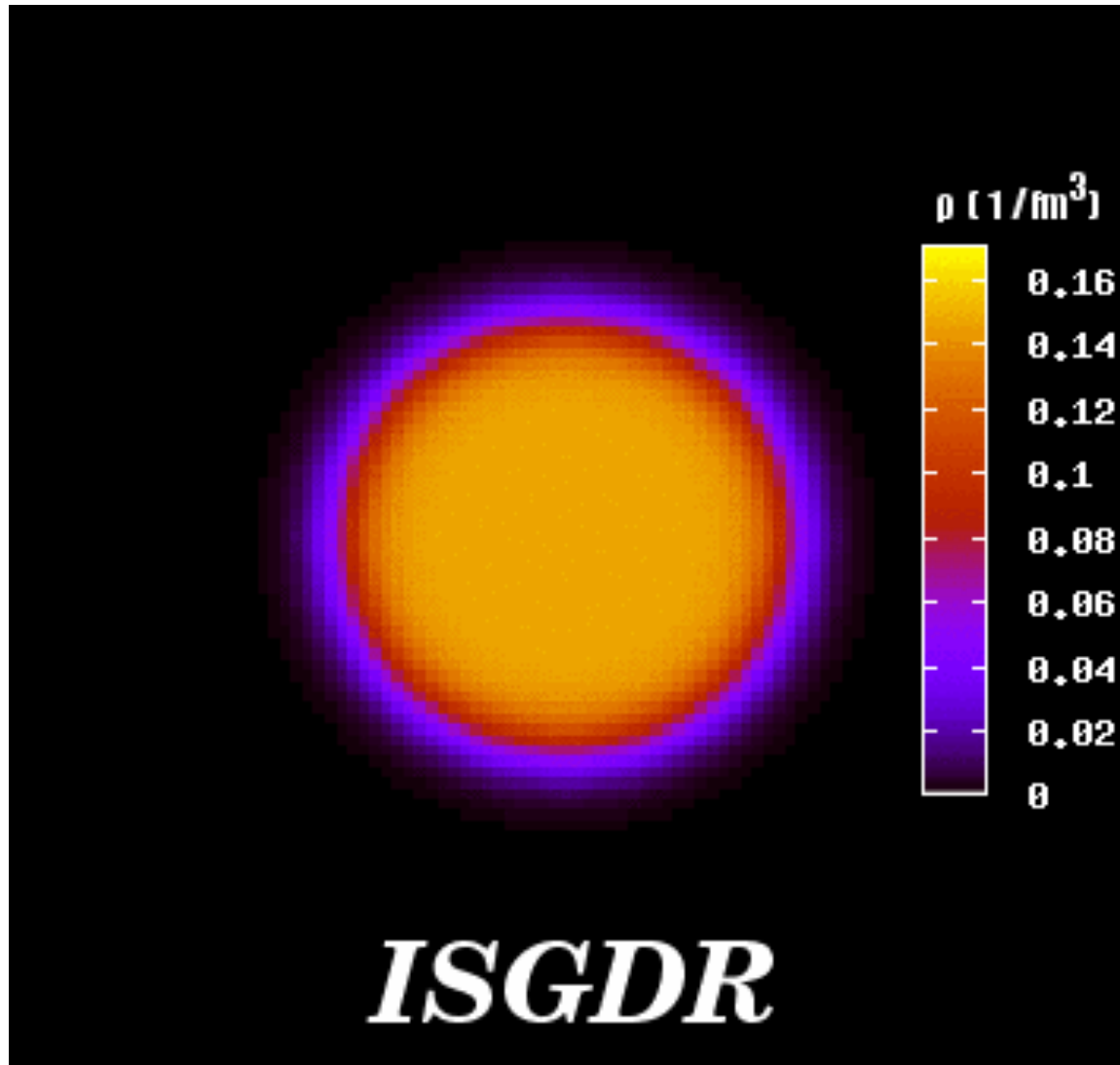
(2次の高調波)

$(\Delta T, \Delta S)$		(0, 0)	(1, 0)	(0, 1)	(1, 1)
単極振動	$\Delta L = 0$				
双極振動	$\Delta L = 1$				
四重極振動	$\Delta L = 2$				

...

図 5.40 各種の振動モード

Isoscalar Giant Dipole Resonance (ISGDR)



原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

(Isovector) Giant Dipole Resonance (GDR) $rY_1\tau$

スピンパリティ: 1^-

アイソ・スカラー
電気的多重極

アイソ・ベクトル
電気的多重極

アイソ・スカラー
磁気的多重極

アイソ・ベクトル
磁気的多重極

$(\Delta T, \Delta S)$

$(0, 0)$

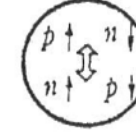
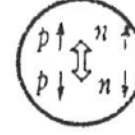
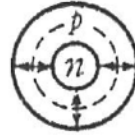
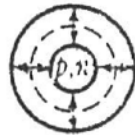
$(1, 0)$

$(0, 1)$

$(1, 1)$

単極振動

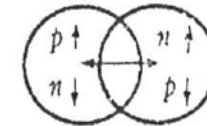
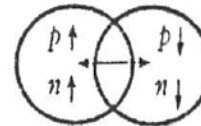
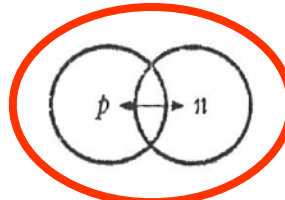
$\Delta L = 0$



双極振動

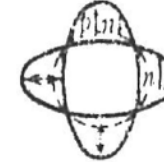
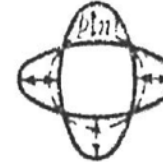
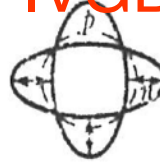
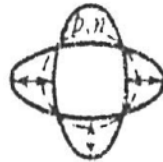
$\Delta L = 1$

—



四重極振動

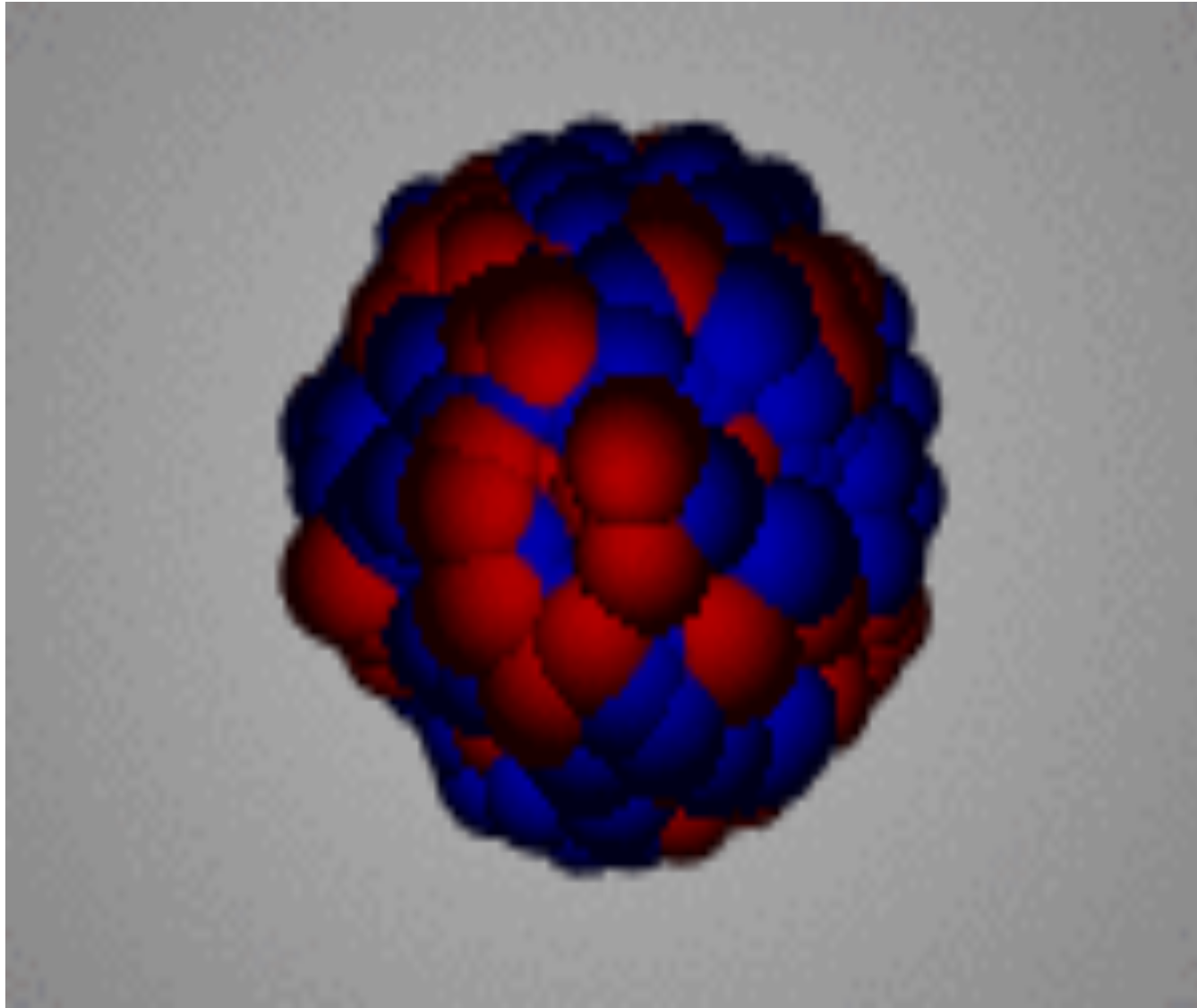
$\Delta L = 2$



...

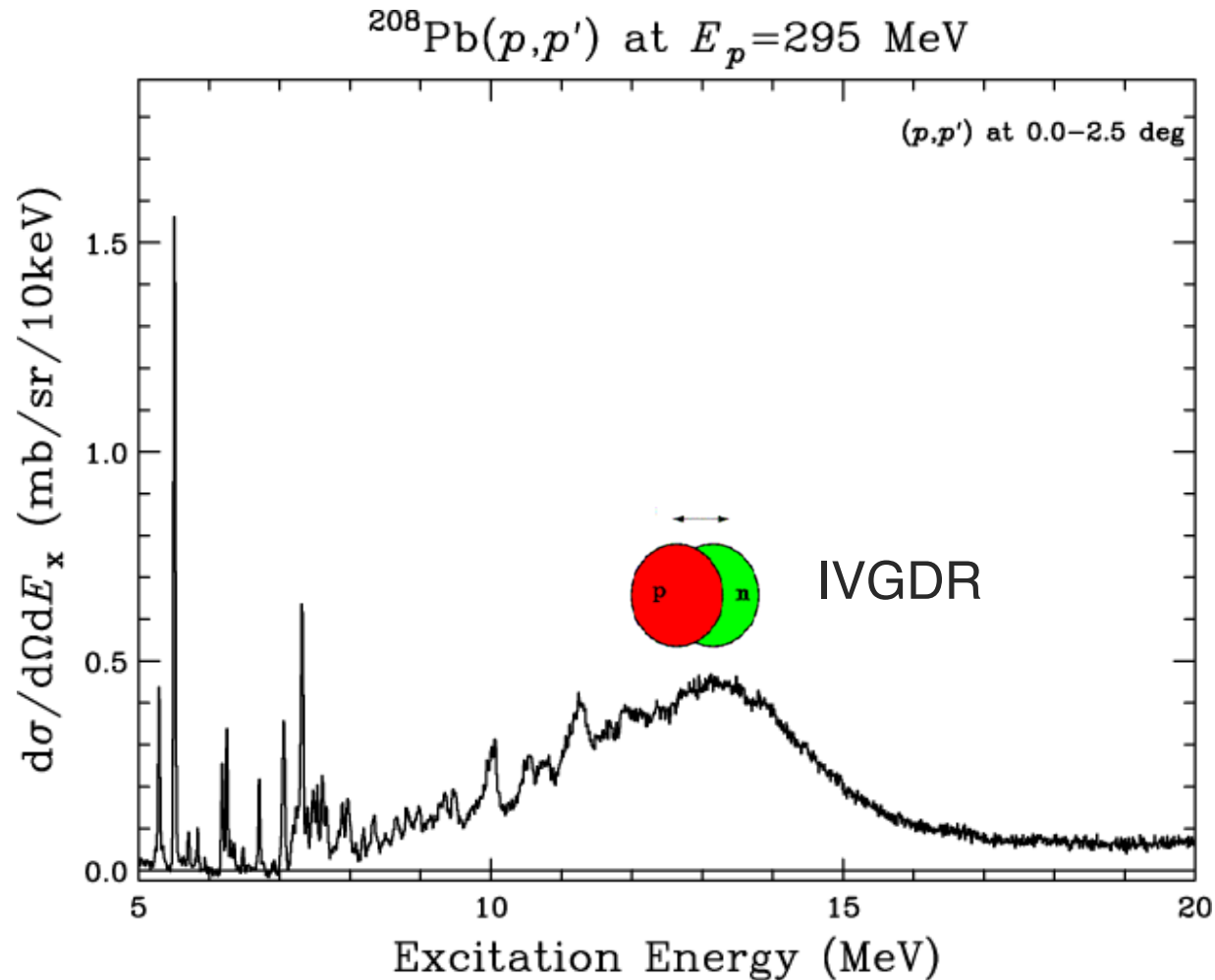
図 5-40 各種の振動モード

(Isovector) Giant Dipole Resonance (GDR)



movie by P. Adrich

(Isovector) Giant Dipole Resonance (GDR)

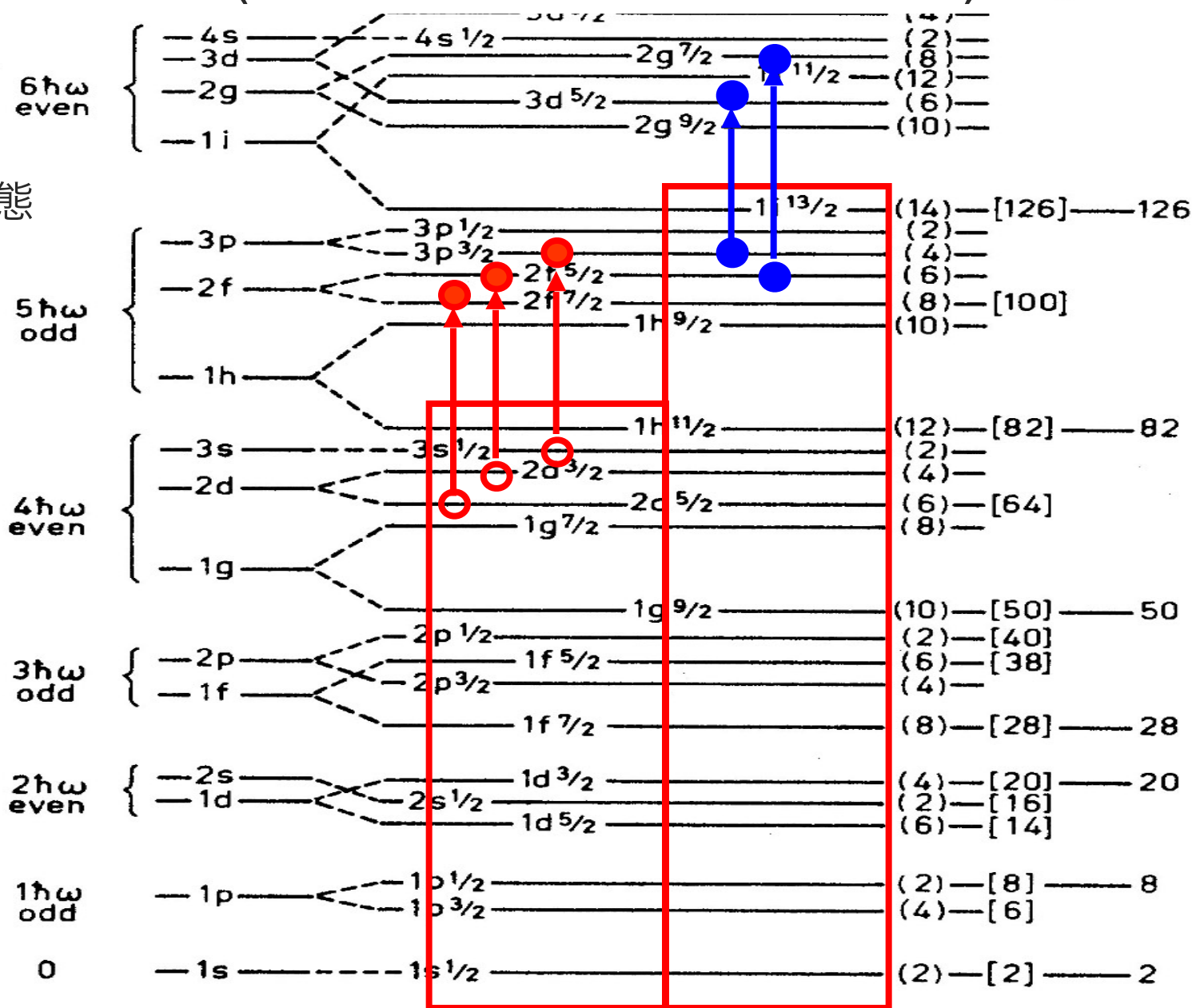


AT et al., PRL107, 062502 (2011)

集团励起状态(巨大双極子共鳴 IVGDR)

84]—184

1 粒子 1 空孔状态
(非弹性散乱)



原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

Spin Dipole Resonance (SDR)

$$rY_1\sigma$$

$$rY_1\sigma\tau$$

アイソ・スカラー アイソ・ベクトル アイソ・スカラー アイソ・ベクトル
電氣的多重極 電氣的多重極 磁氣的多重極 磁氣的多重極

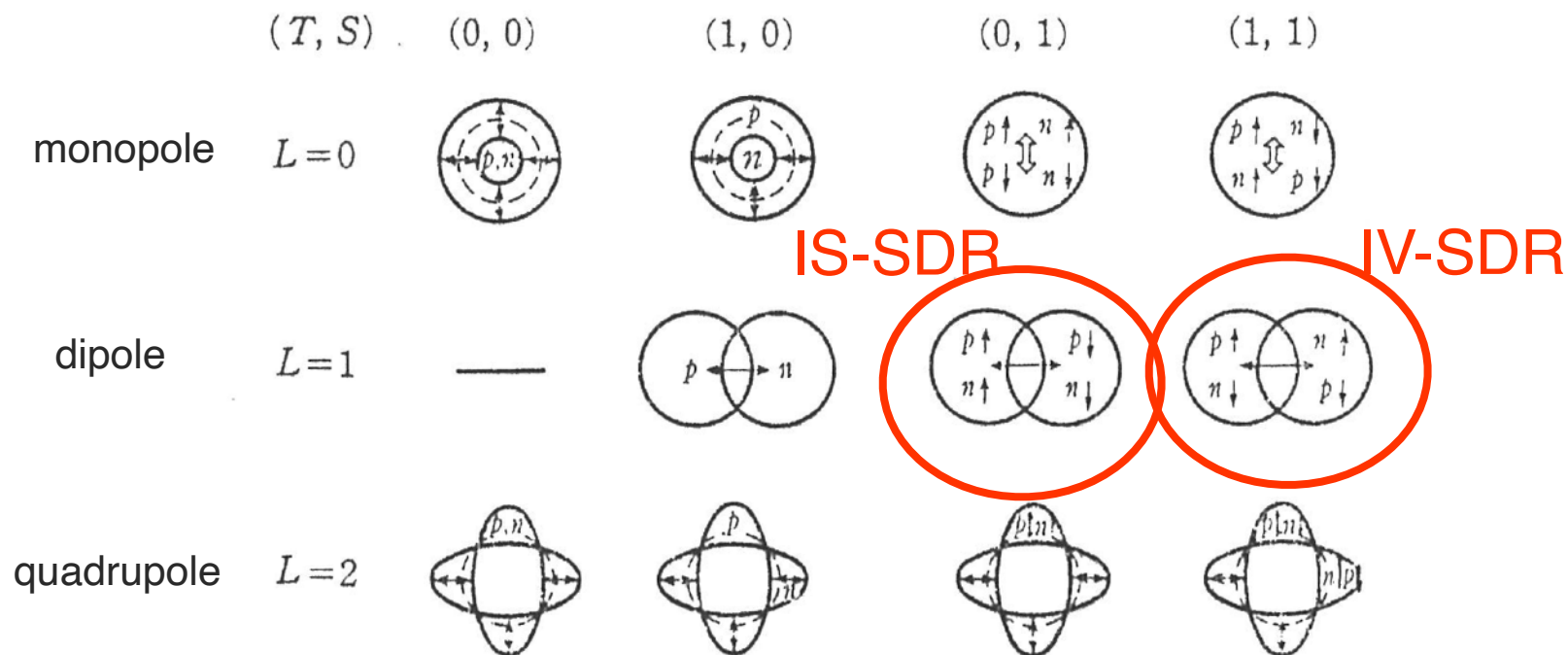
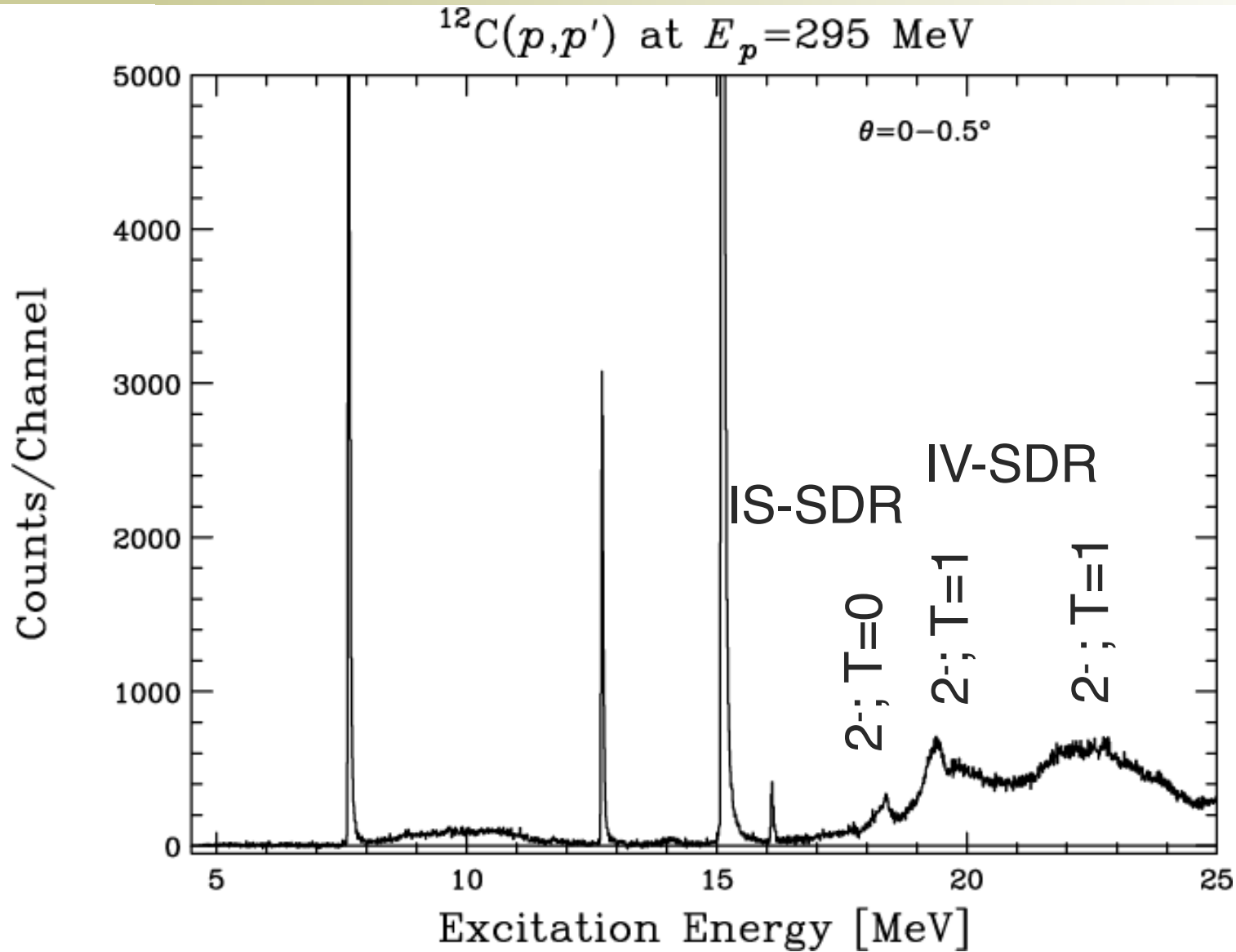


図 5.40 各種の振動モード

Excitation Energy Spectra



原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

Gamow-Teller Giant Resonance (GTGR)

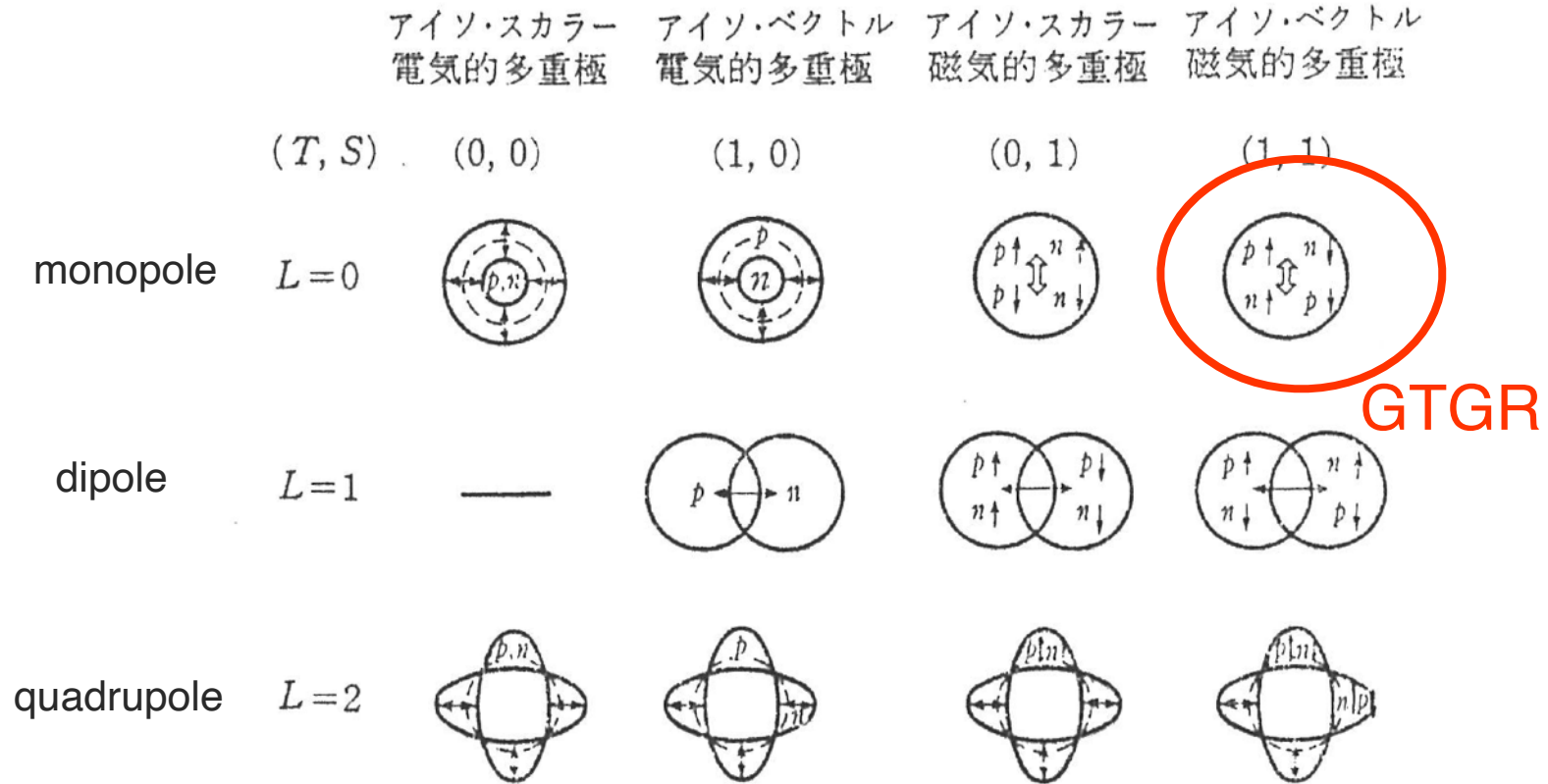


図 5.40 各種の振動モード

Gamow-Teller Giant Resonance (GTGR)

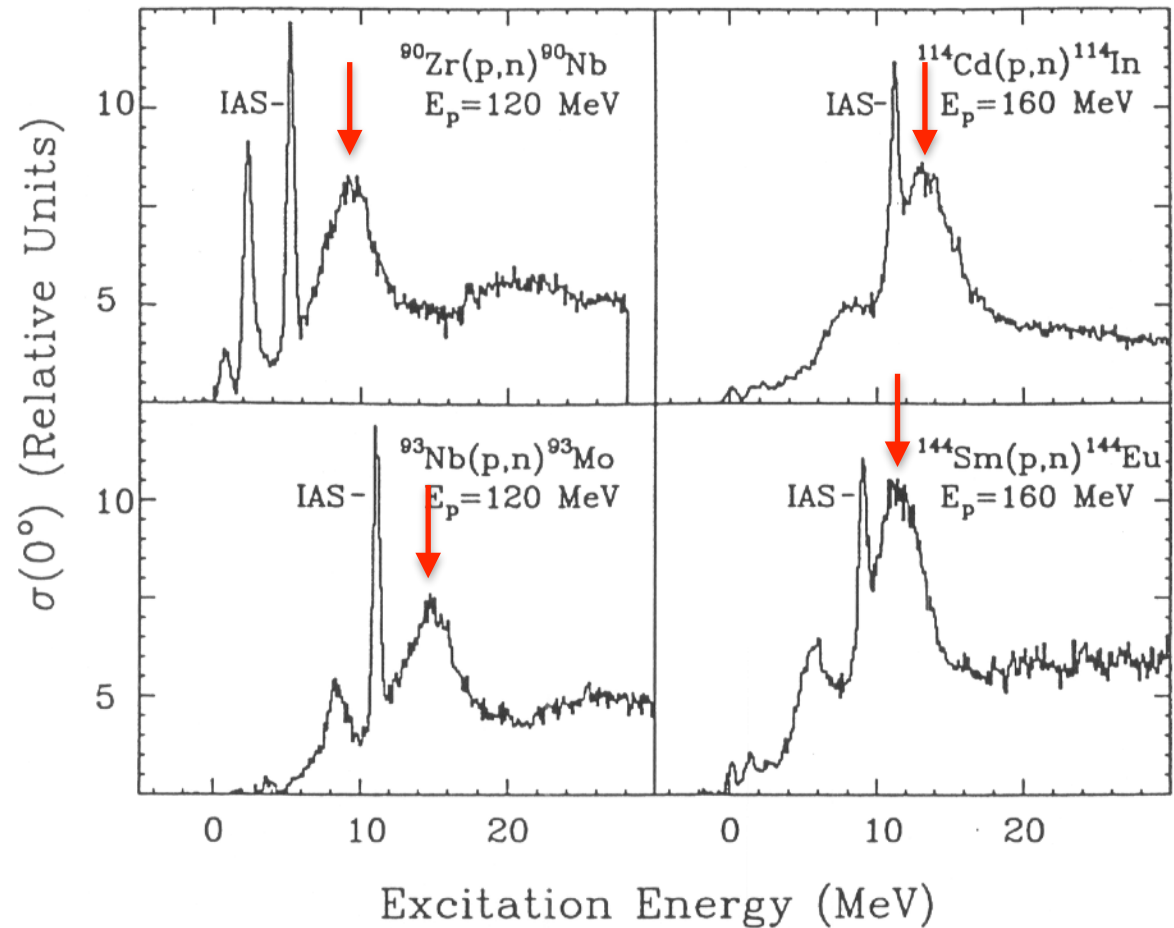
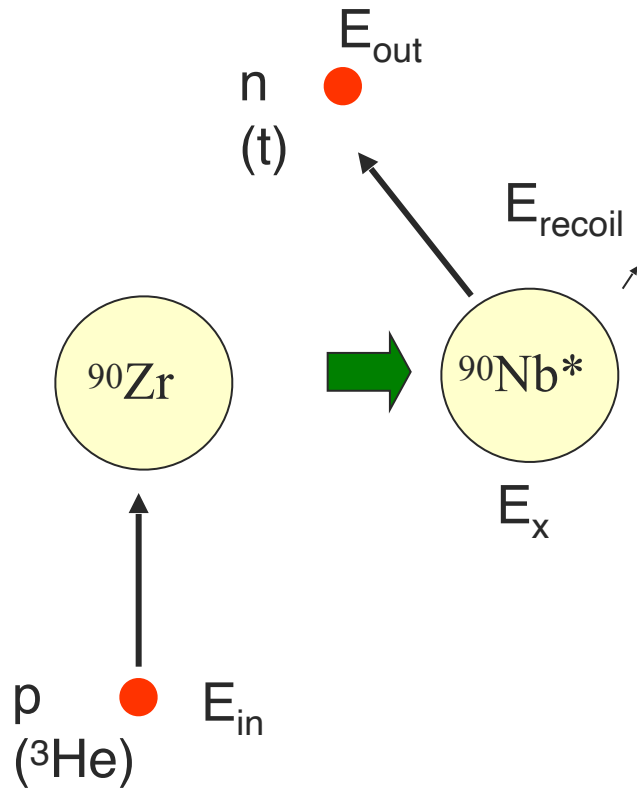


Figure 10 Zero-degree (p,n) spectra for medium A -mass nuclei at the indicated incident energies.

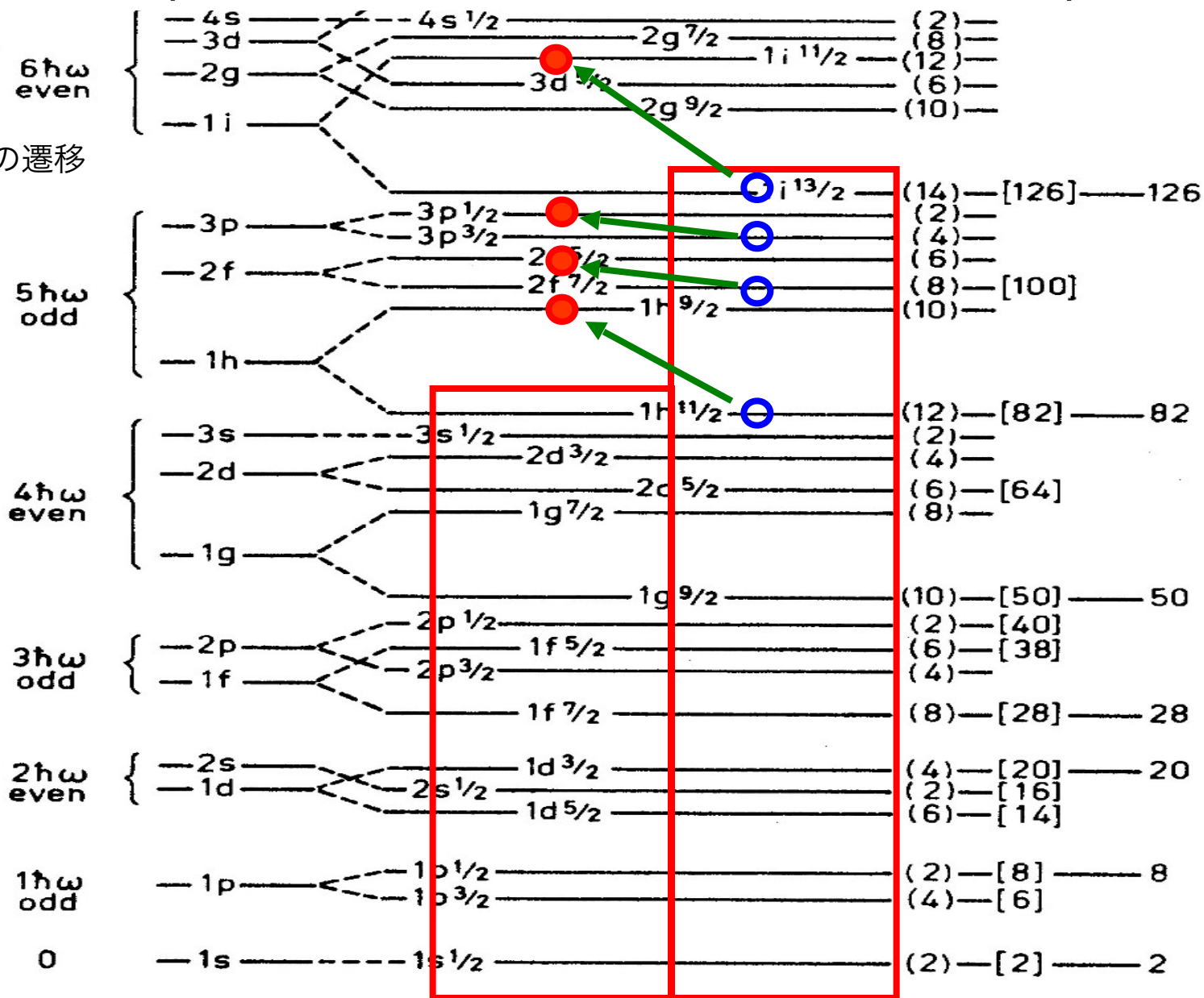
アイソバリックアナログ状態(IAS):

$\Delta L=0$ 、 $\Delta S=0$ 、 $\Delta T=1$ で、中性子が1つ同じ軌道の陽子に変化した遷移

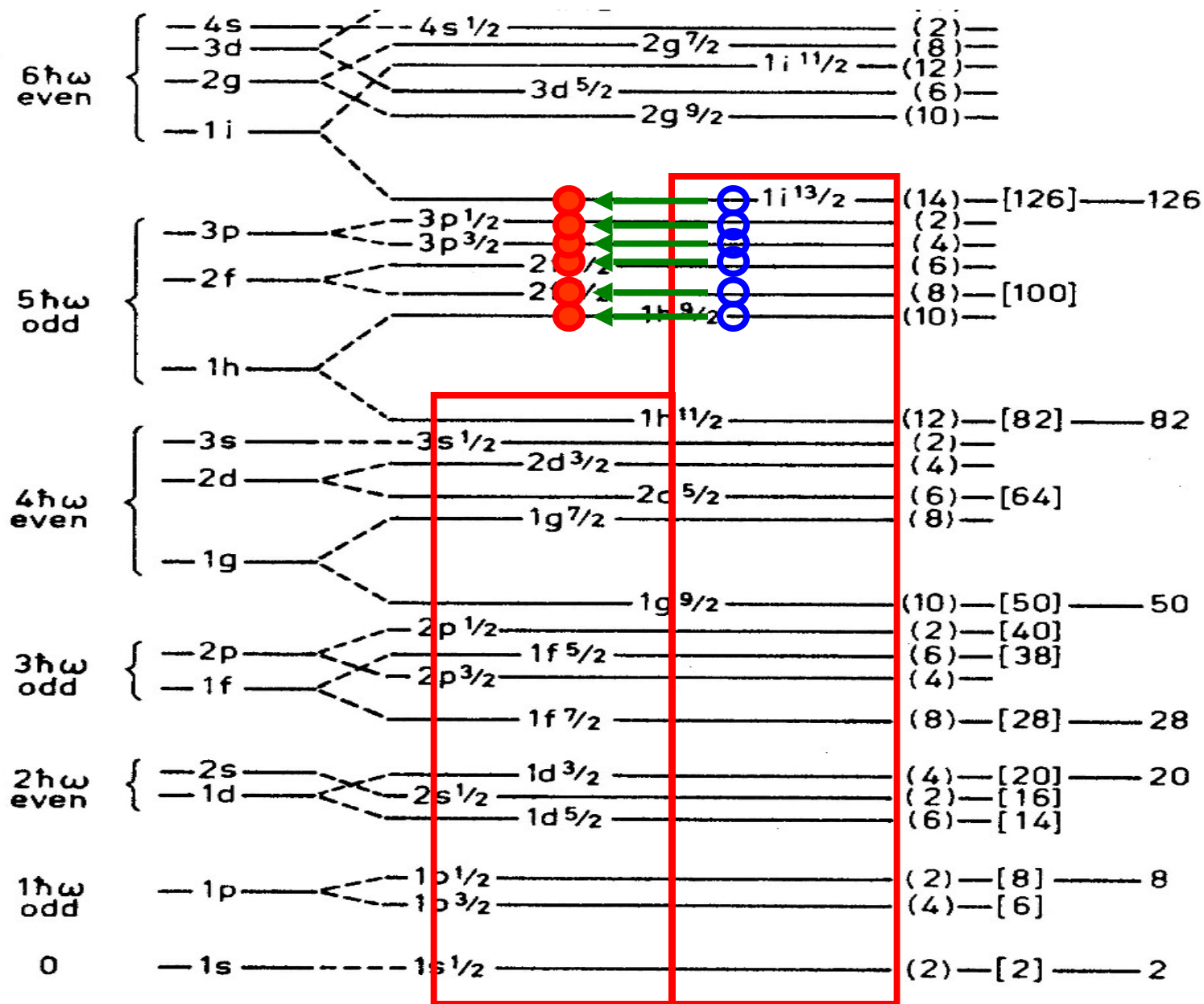
集団励起状態(ガモフテラー巨大共鳴GTGR) —184

スピン軌道ペア内の遷移

スピンパリティ:1+



集団励起状態(アイソバリックアナログ状態IAS) —184



集団励起状態(ガモフテラー巨大共鳴GTGR)

$^{58}\text{Ni}(p, n)^{58}\text{Cu}$

$E_p = 160 \text{ MeV}$

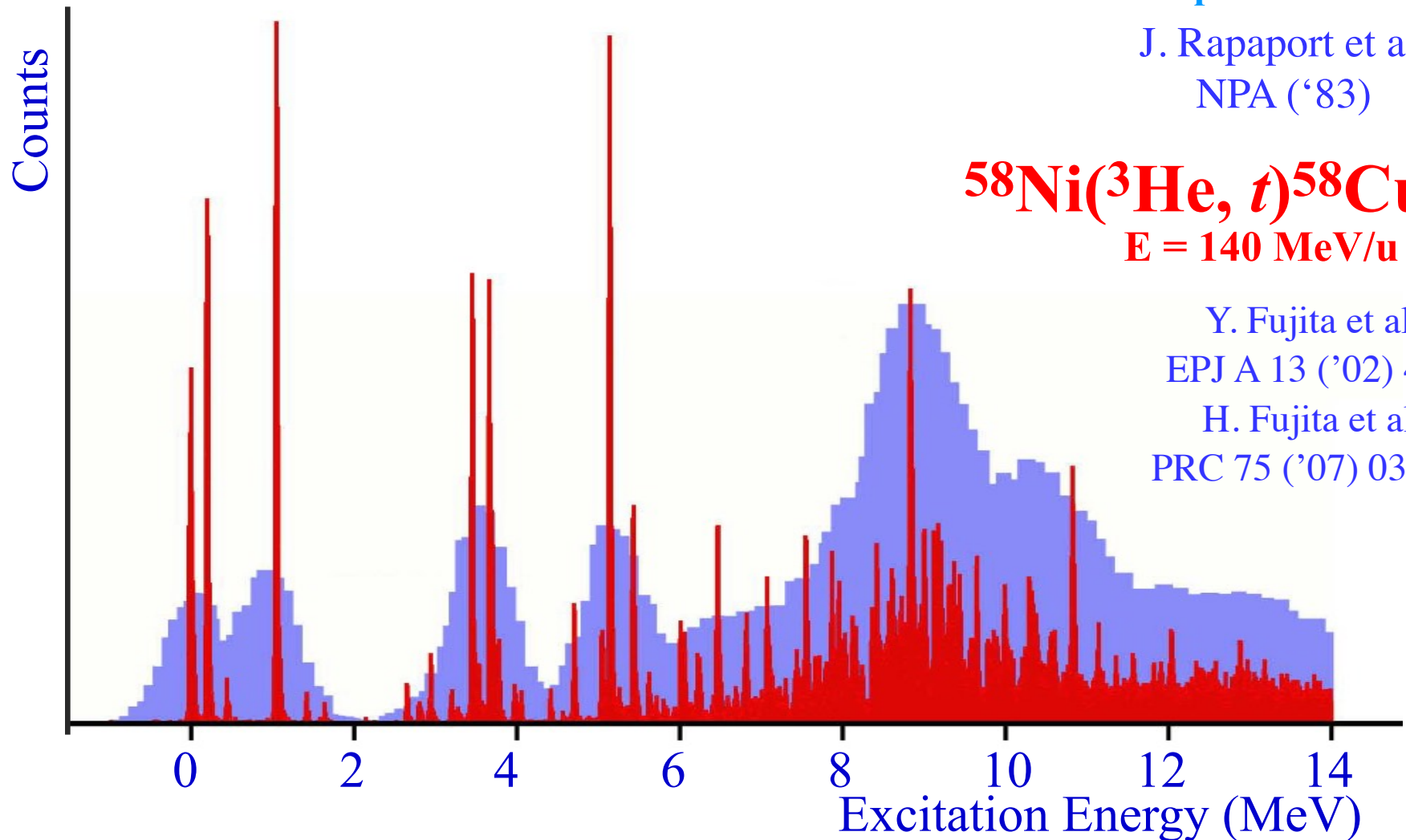
J. Rapaport et al.
NPA ('83)

$^{58}\text{Ni}(^3\text{He}, t)^{58}\text{Cu}$

$E = 140 \text{ MeV/u}$

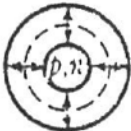
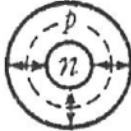
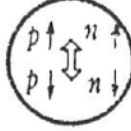
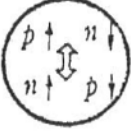
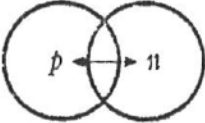
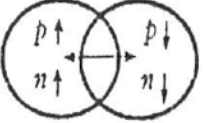
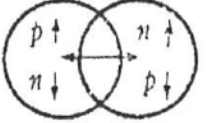
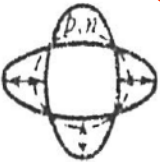
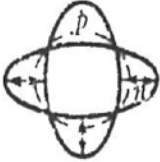
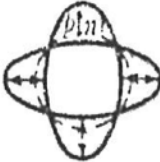
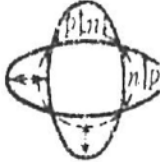
Y. Fujita et al.,
EPJ A 13 ('02) 411.

H. Fujita et al.,
PRC 75 ('07) 034310



原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

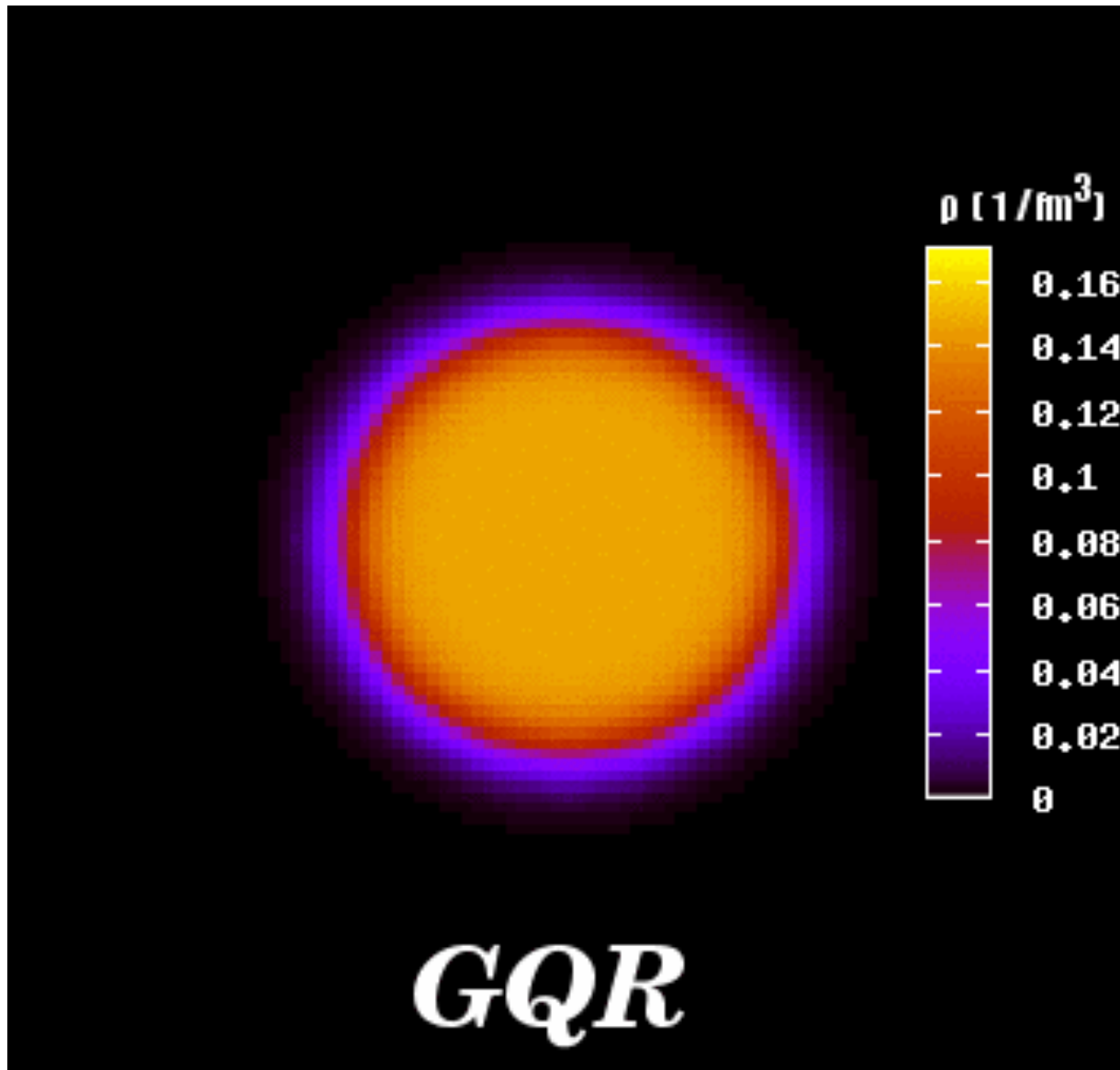
Isoscalar Giant Quadrupole Resonance (ISGQR)

		アイソ・スカラー 電気的多重極	アイソ・ベクトル 電気的多重極	アイソ・スカラー 磁気的多重極	アイソ・ベクトル 磁気的多重極
	(T, S)	$(0, 0)$	$(1, 0)$	$(0, 1)$	$(1, 1)$
monopole	$L=0$				
dipole	$L=1$	—			
quadrupole	$L=2$				

IS-GQR

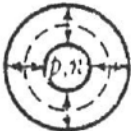
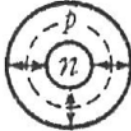
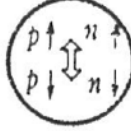
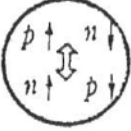
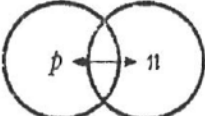
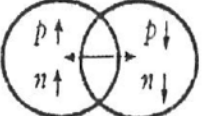
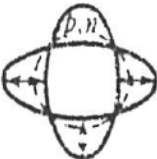
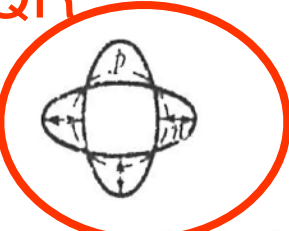
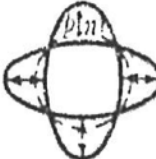
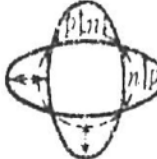
図 5.40 各種の振動モード

Isoscalar Giant Quadrupole Resonance (ISGQR)



原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

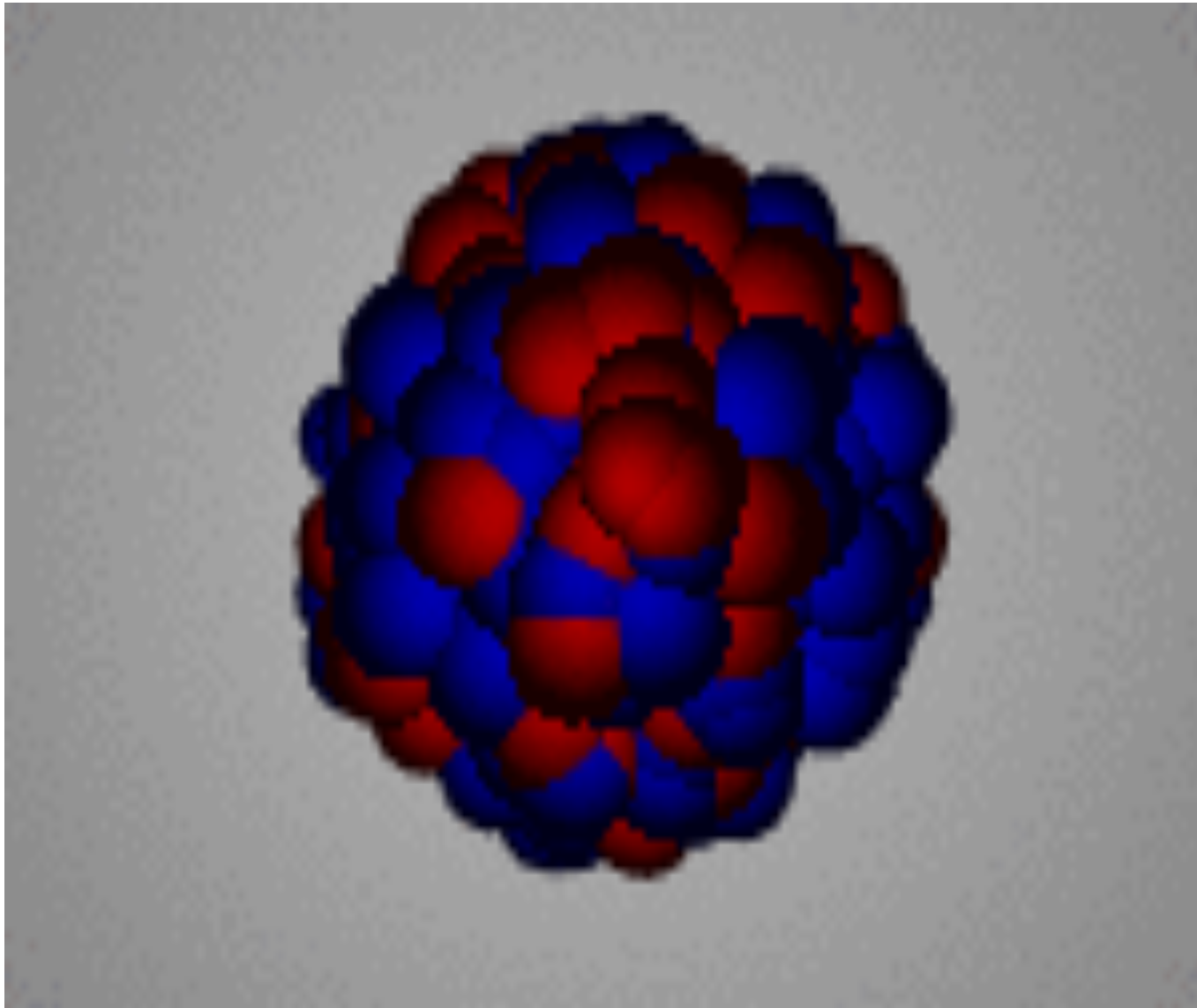
Isovector Giant Quadrupole Resonance (IV-GQR)

		アイソ・スカラー 電気的多重極	アイソ・ベクトル 電気的多重極	アイソ・スカラー 磁気的多重極	アイソ・ベクトル 磁気的多重極
		(T, S) : (0, 0)	(1, 0)	(0, 1)	(1, 1)
monopole	$L=0$				
dipole	$L=1$	—			
quadrupole	$L=2$				

IV-GQR

図 5.40 各種の振動モード

IV Giant Quadrupole Resonance (IVGQR)



movie by P. Adrich

集団励起状態

同じ量子数をもつ多くの配位が考られ、近いエネルギー領域に存在する場合、多くの配位が混合することにより、1つの強い状態と多くの弱い状態に分離する。

量子力学的効果

多くの配位が、位相をそろえて(Coherent)重なりあうことで強めあう効果が生じる。

集団励起状態の微視的説明

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$$

$$\begin{aligned} \left| \langle \varphi | O | g.s. \rangle \right|^2 &= \left| \langle \varphi_1 | O | g.s. \rangle + \langle \varphi_2 | O | g.s. \rangle + \dots + \langle \varphi_n | O | g.s. \rangle \right|^2 \\ &\neq \left| \langle \varphi_1 | O | g.s. \rangle \right|^2 + \left| \langle \varphi_2 | O | g.s. \rangle \right|^2 + \dots + \left| \langle \varphi_n | O | g.s. \rangle \right|^2 \end{aligned}$$

→集団励起状態

振動励起状態、回転励起状態、その他

“巨大共鳴”：元となる励起強度の大部分を担う励起状態をさす。

= 和則値に対して占める割合が大きい

練習問題



menti.com

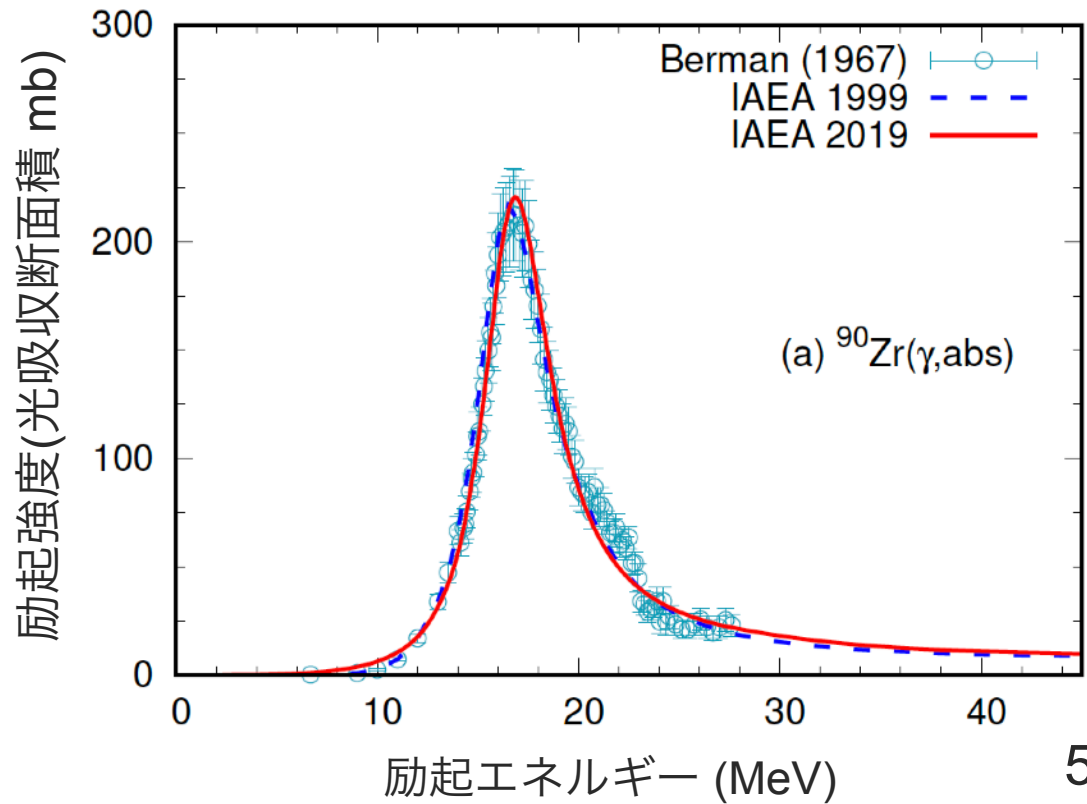
5676 6648

1. ^{90}Zr の巨大双極子共鳴 (GDR) は陽子と中性子の相対単振動である。下の実験値のプロットを参考にこの振動の

- ・ 角振動数(ω)
- ・ 寿命(減衰定数)

を概算で求めよ。

T. Kawano et al., Nuclear Data Sheets 163, 109 (2020)



練習問題



menti.com

5676 6648

1. ^{90}Zr の巨大双極子共鳴 (GDR) は陽子と中性子の相対単振動である。下の実験値のプロットを参考にこの振動の

- ・ 角振動数(ω)
- ・ 寿命(減衰定数)

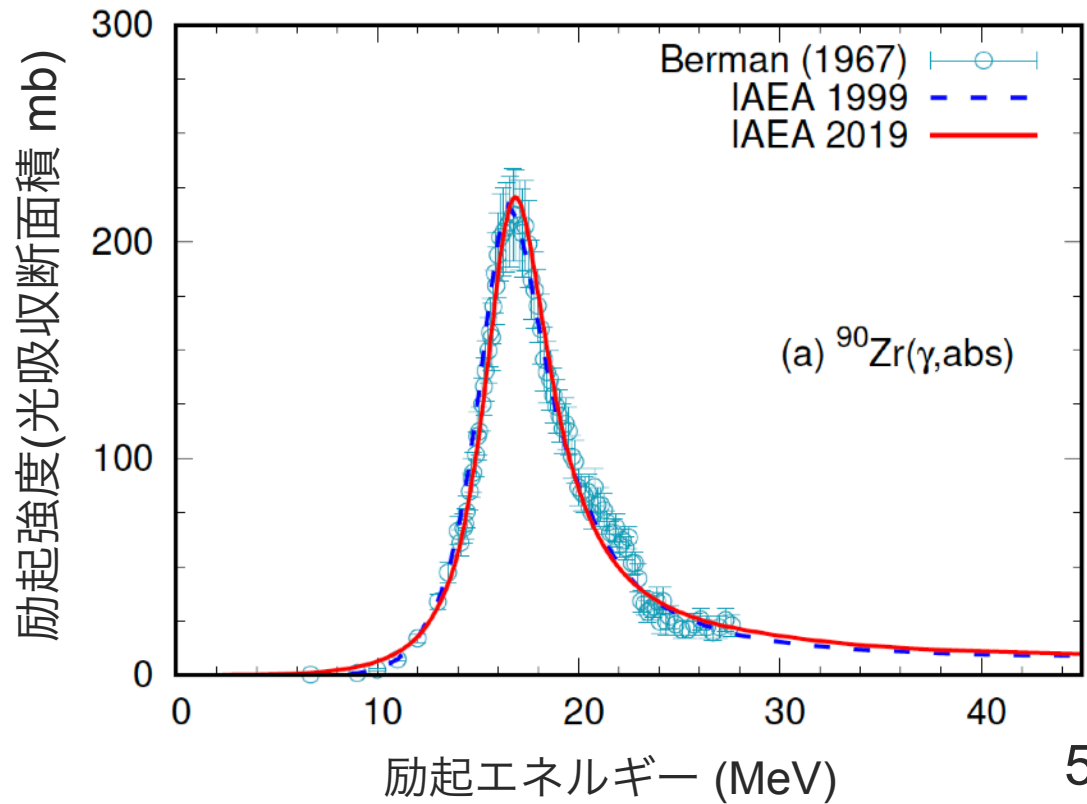
を概算で求めよ。

T. Kawano et al., Nuclear Data Sheets 163, 109 (2020)

ヒント

- ・ 励起エネルギー $E_x \sim \hbar\omega$
- ・ 不確定性関係より
共鳴状態の幅 Γ と寿命 τ の関係
 $\tau\Gamma \sim \hbar$
半値全幅(FWHM)を使ってみよう

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$
$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

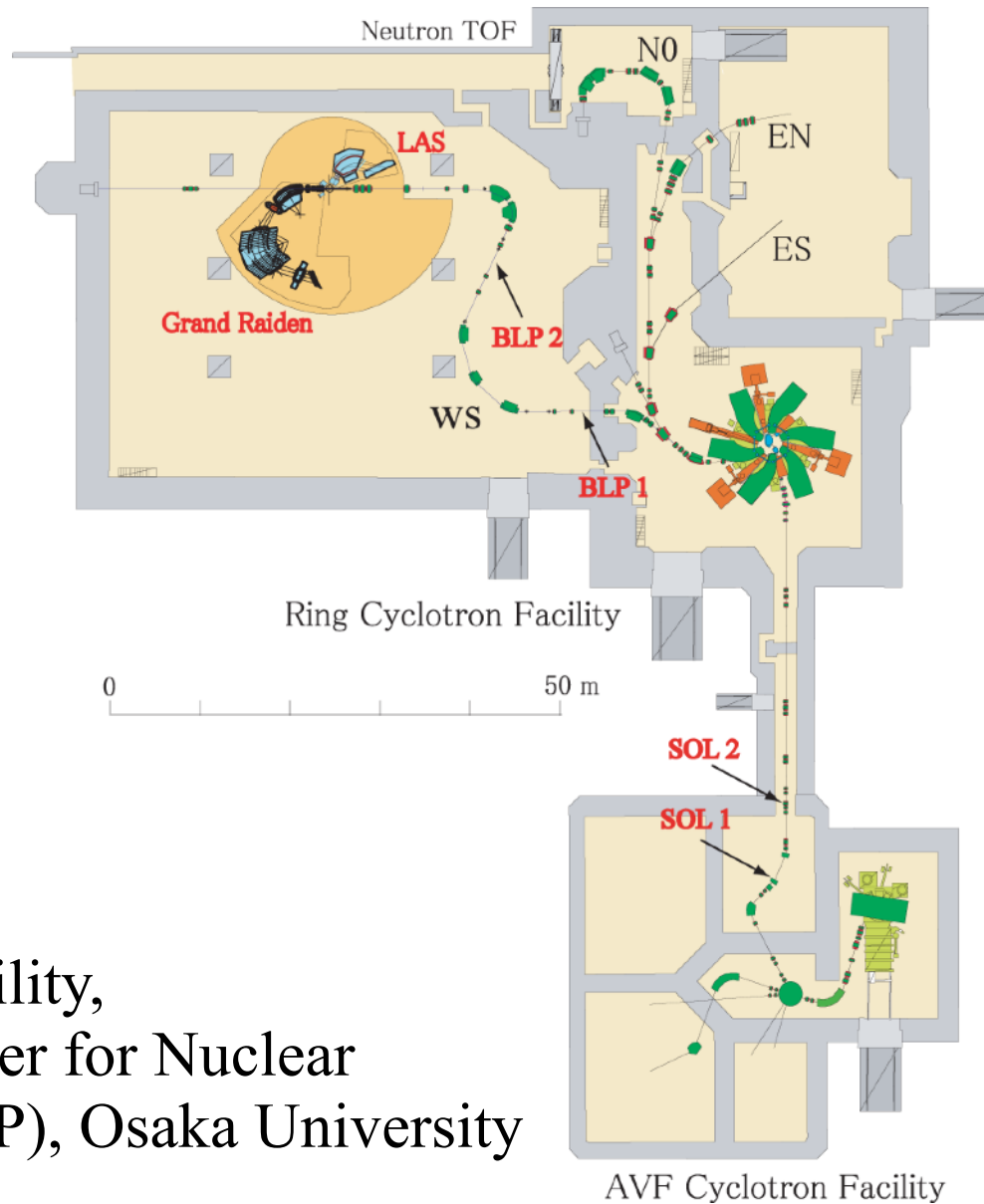


III 実験の実際

スペクトロメータ

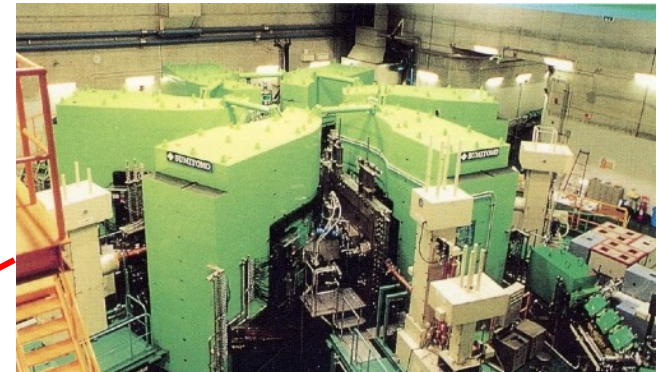
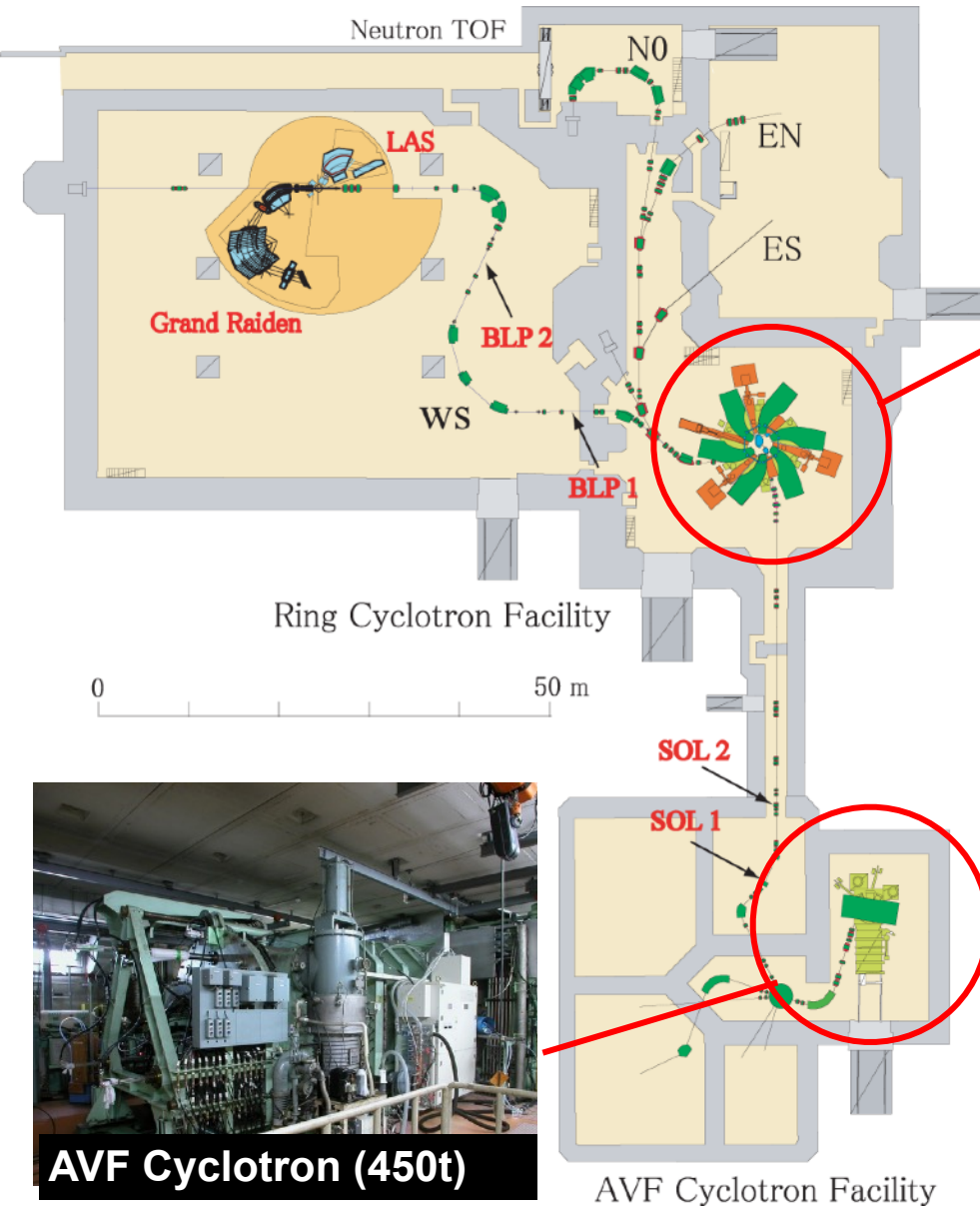
@核物理研究センター

大阪大学核物理研究センター 加速器施設



Cyclotron Facility,
Research Center for Nuclear
Physics (RCNP), Osaka University

リングサイクロトロロン加速器



RING Cyclotron (2,200t)

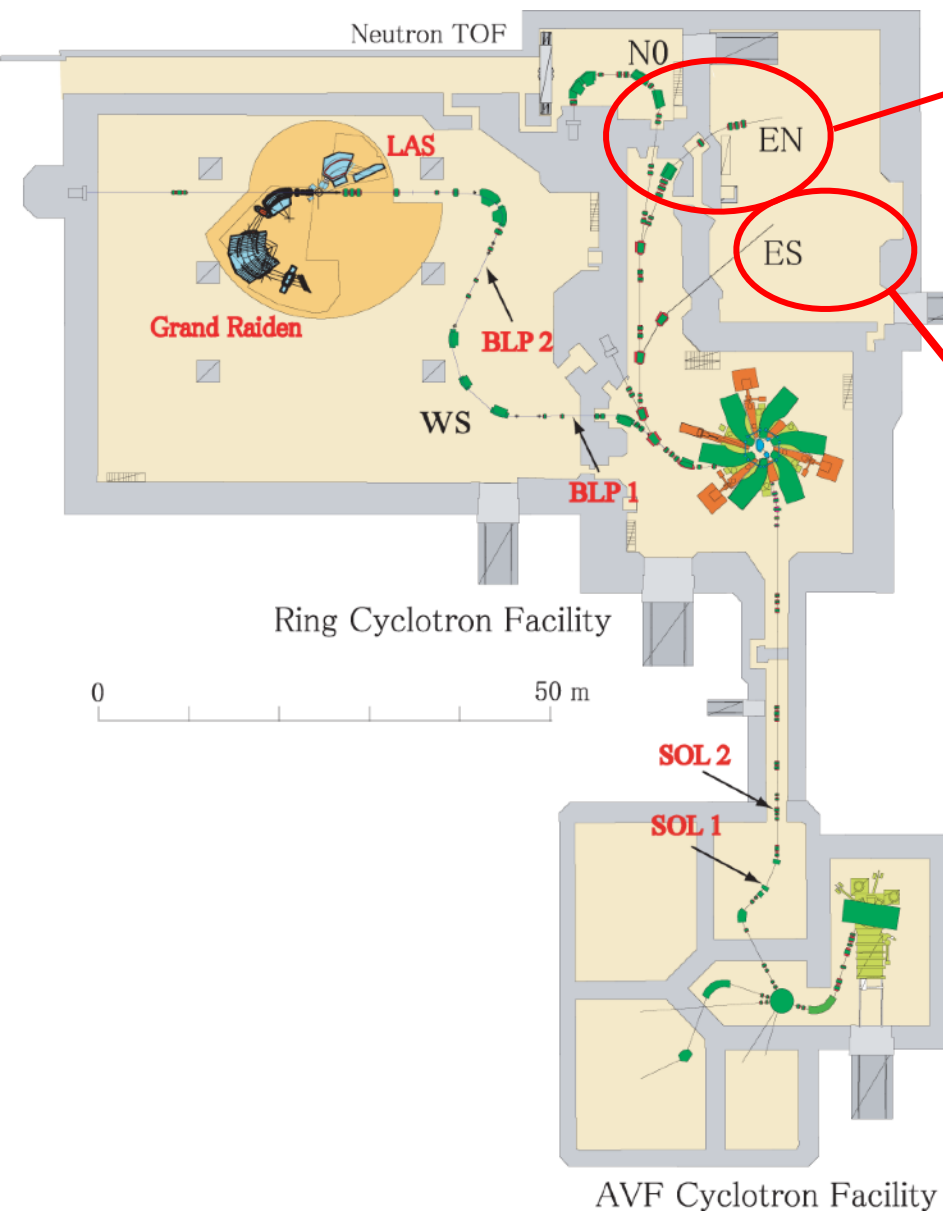
$K=400$

- 陽子ビーム
 $\leq 400 \text{ MeV}, \sim 1 \mu\text{A}$
- ^3He ビーム
 $\leq 150 \text{ MeV/A}$
- $d, \alpha, ^6\text{Li}$
 $\leq 100 \text{ MeV/A}$
- 重イオンビーム



AVF Cyclotron (450t)

AVFサイクロトロロン加速器



不安定核の生成、実験

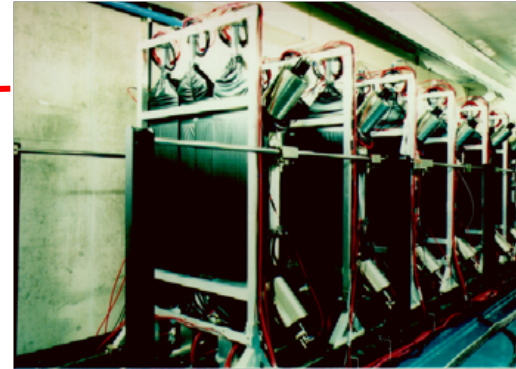
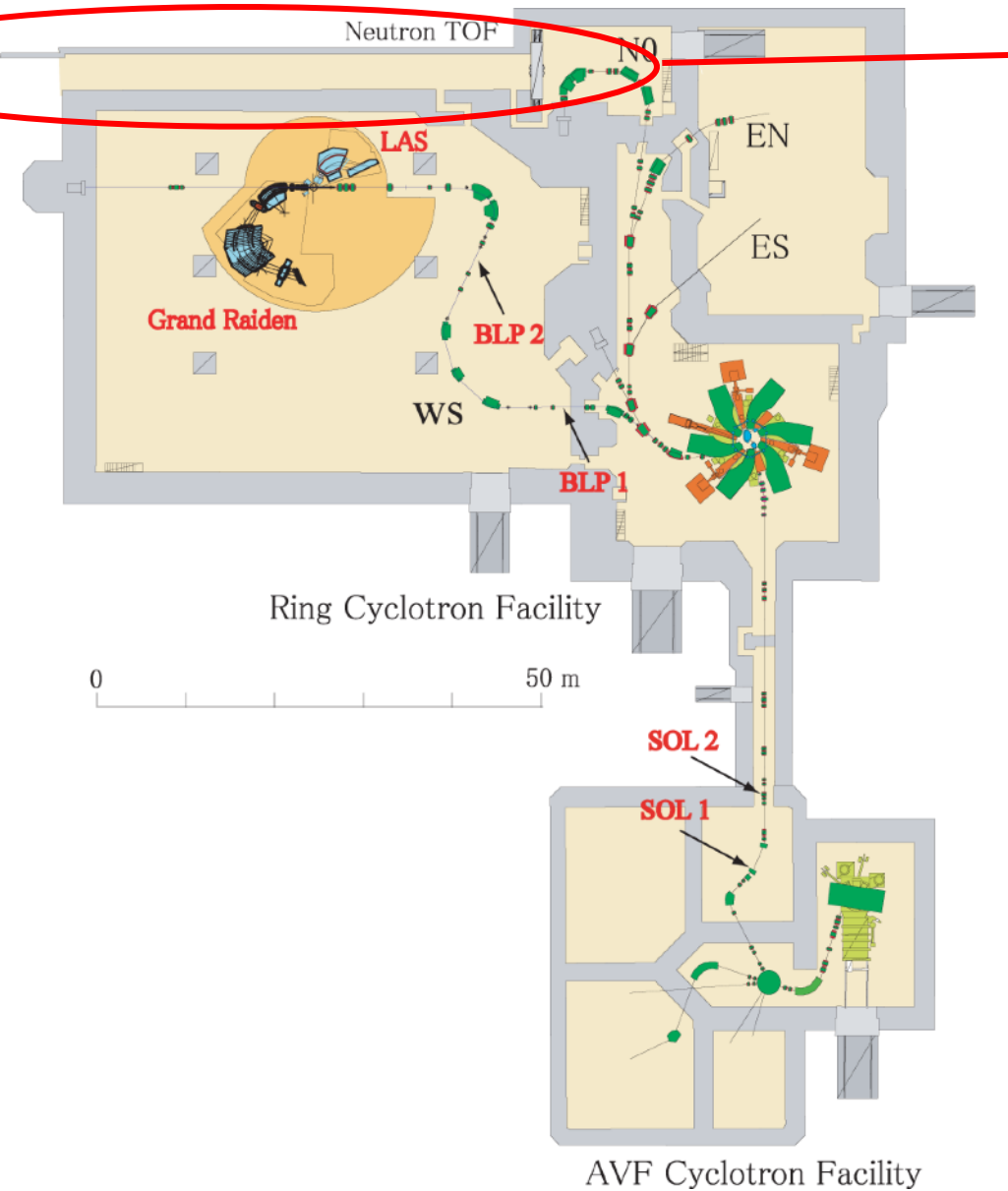
高スピン核、超変形核や、星の中に
しか存在しないような原子核を作る

超冷中性子 (UCN)の生成* 中性子をボトルに溜める

*TRIUMF(カナダ)に移送

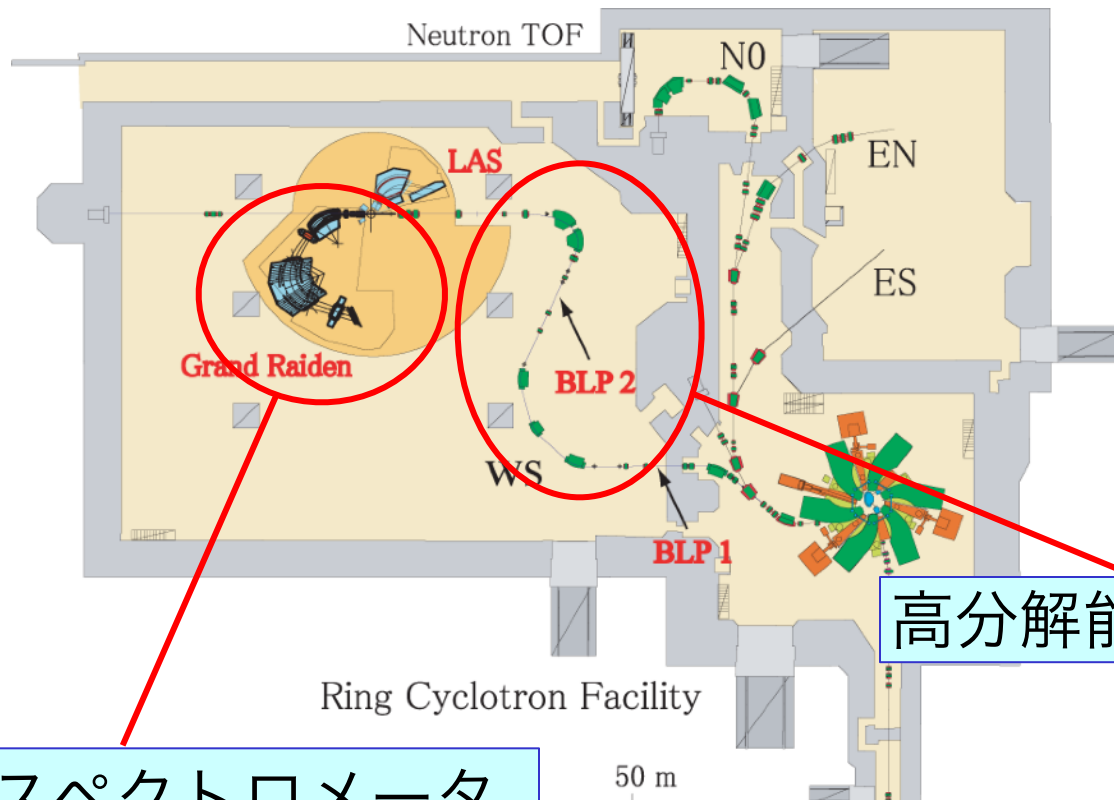


中性子トンネル(100m)



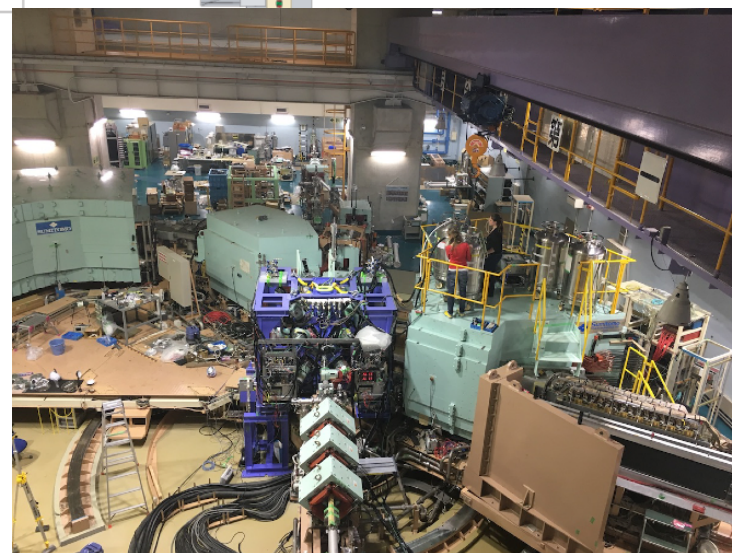
中性子検出器
(NPOL-2)

飛行時間で中性子の速度を測る

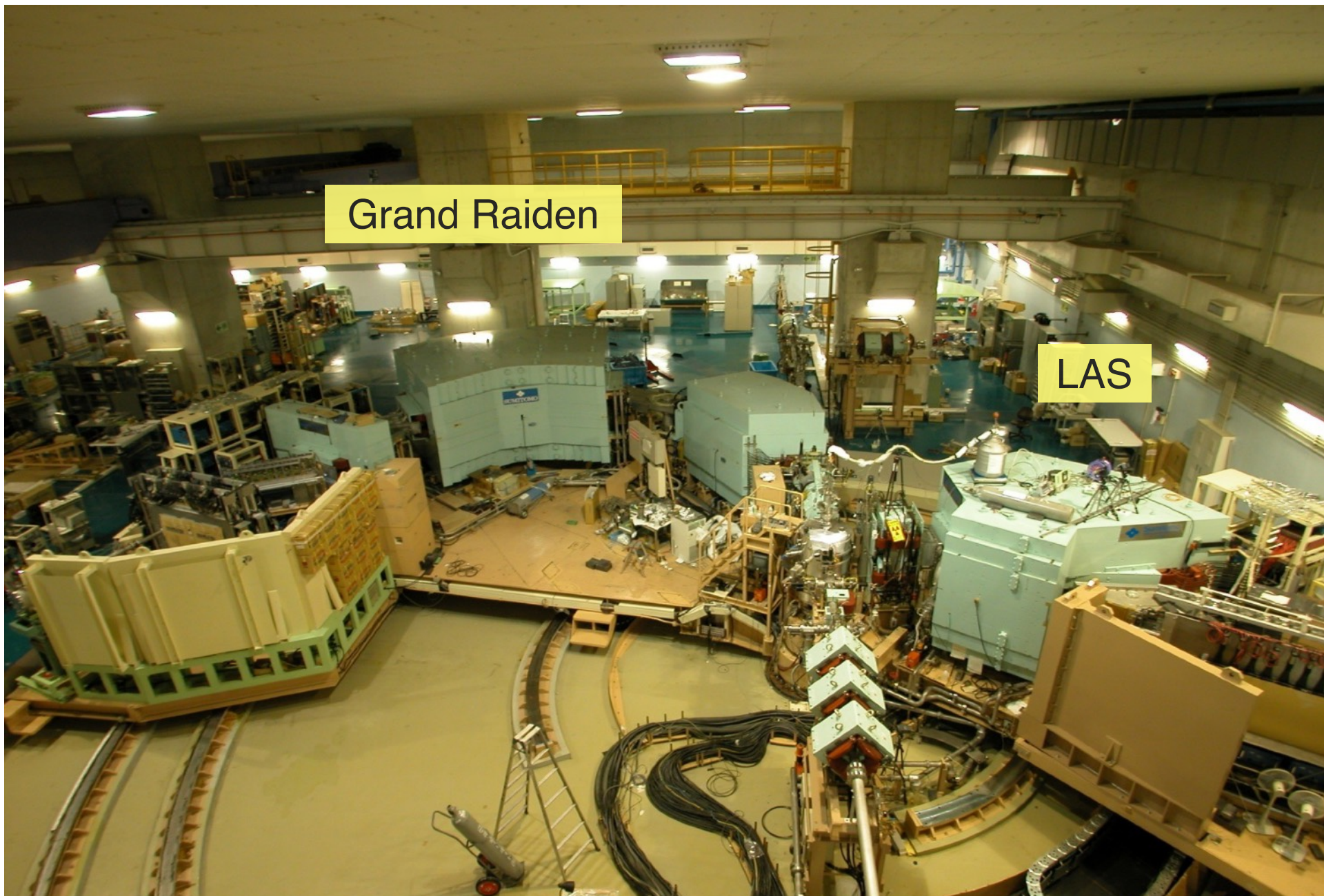


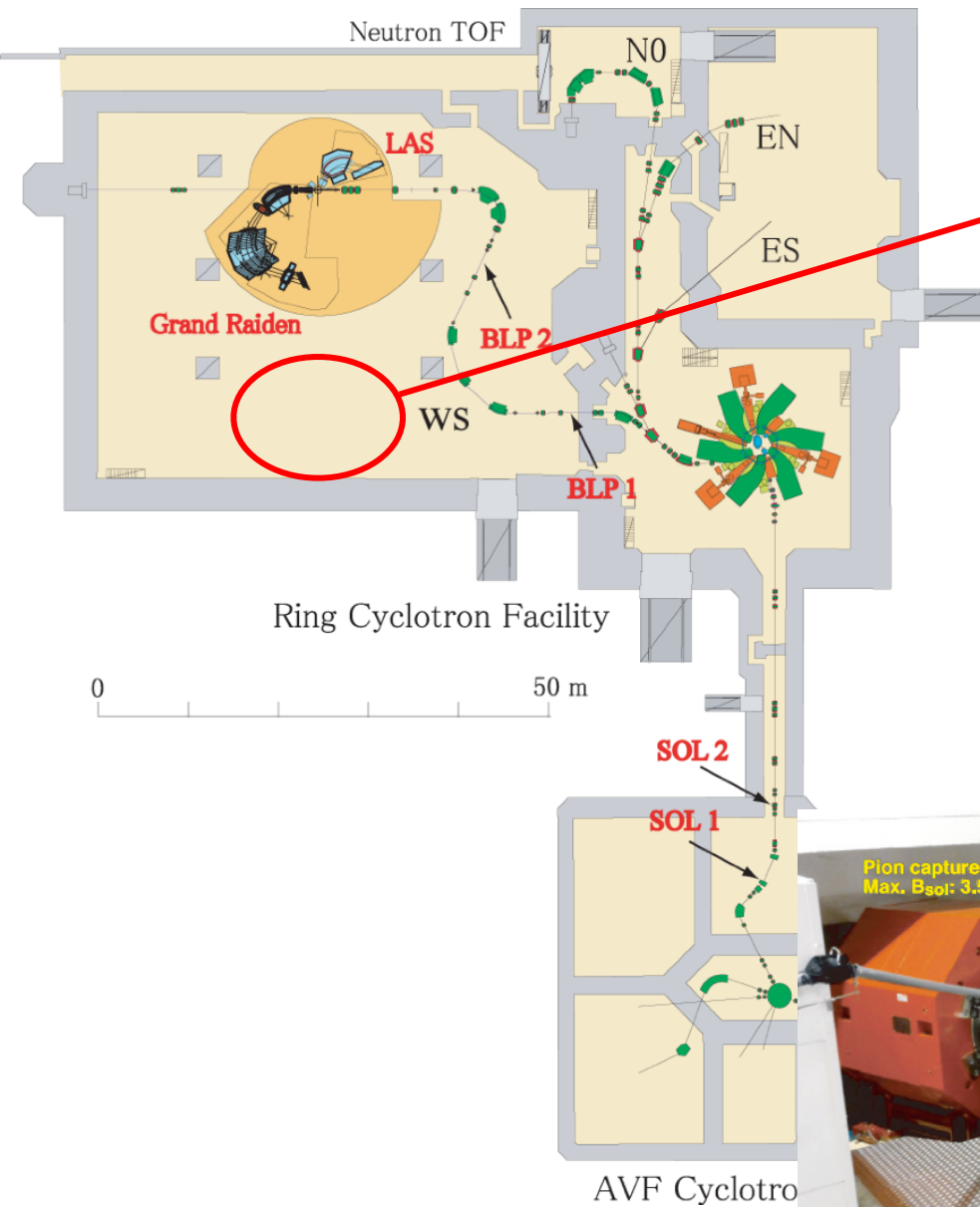
高分解能スペクトロメータ
「グランドライデン」

原子核の顕微鏡
原子核を見る！



Double Arm Spectrometer: Grand Raiden and LAS



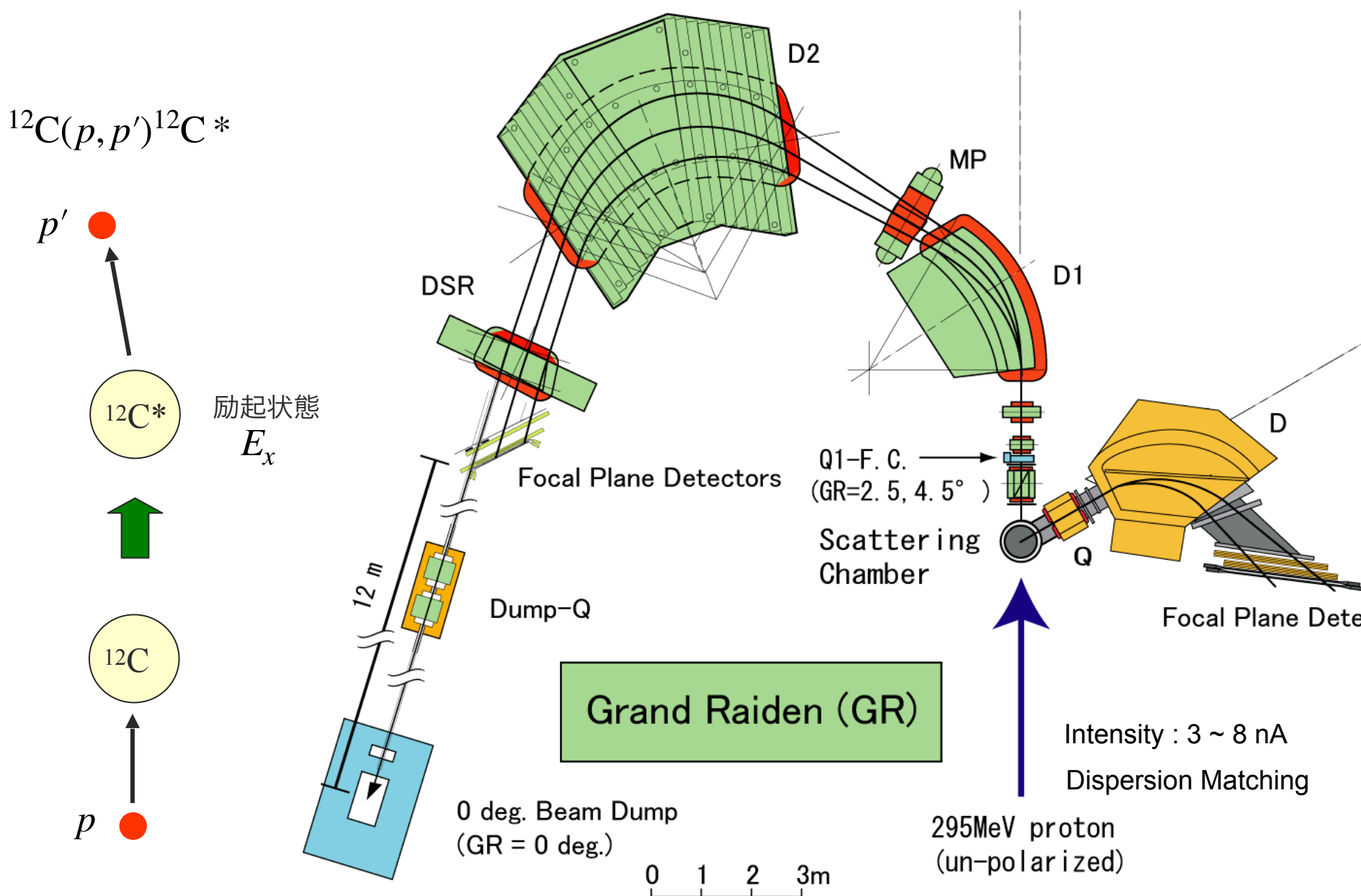


μ粒子生成装置(MuSIC)↓

宇宙誕生時の謎を探る
元素分析etc



陽子非弾性散乱@グランドライデン



質量欠損(Missing Mass)法-順運動学

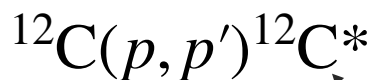
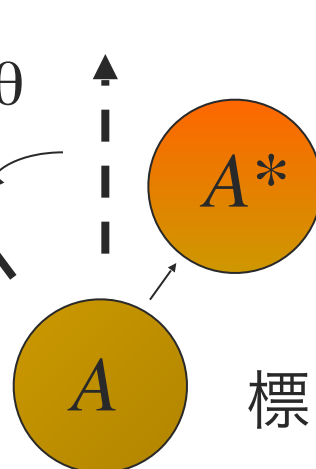
陽子非弾性散乱: (p, p')

測らずして測る！

残留(反跳)核
(基底or励起状態)
検出しない

散乱粒子 (陽子)
スペクトロメータで
運動量と角度を測定

興味がある状態



残留核

散乱粒子 (測定)

標的原子核

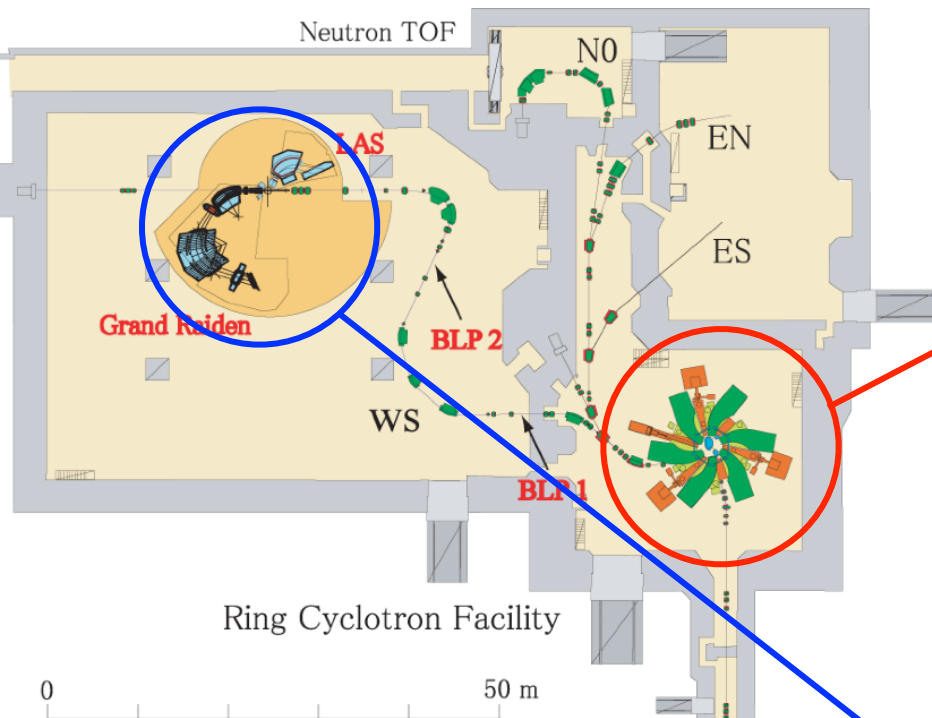
入射粒子

入射粒子 (陽子)
ビーム

III 軽核散乱の実験手法

－ 実験の実際 －

大阪大学核物理研究センター 加速器施設

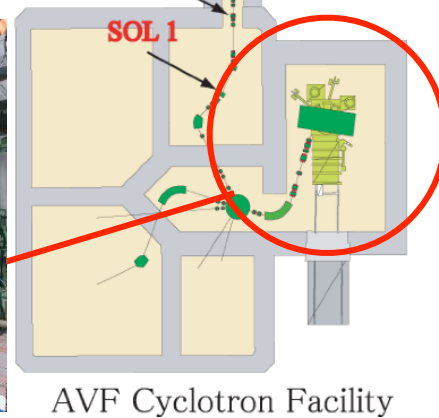


RING Cyclotron (2,200t)

リングサイクロロン加速器



AVFサイクロロン加速器

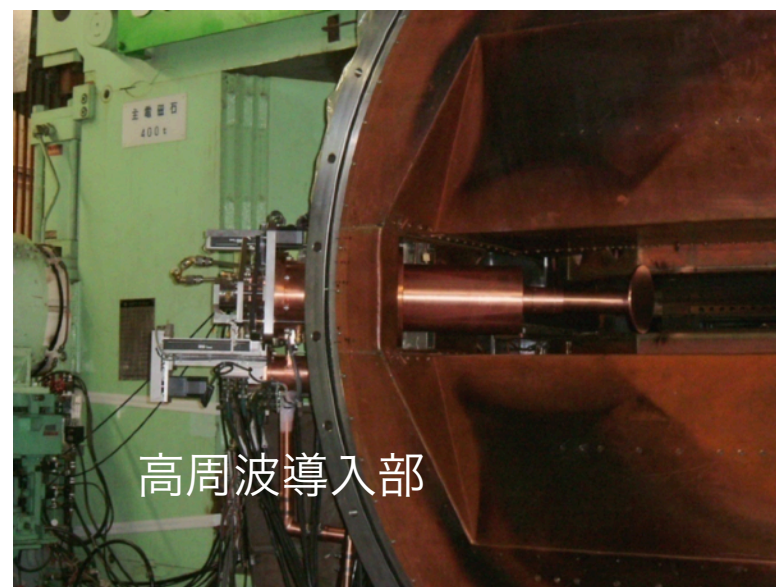
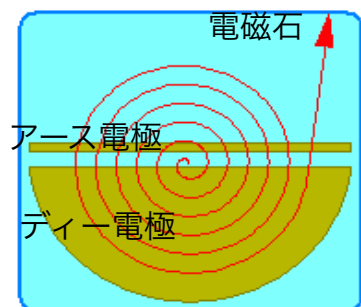
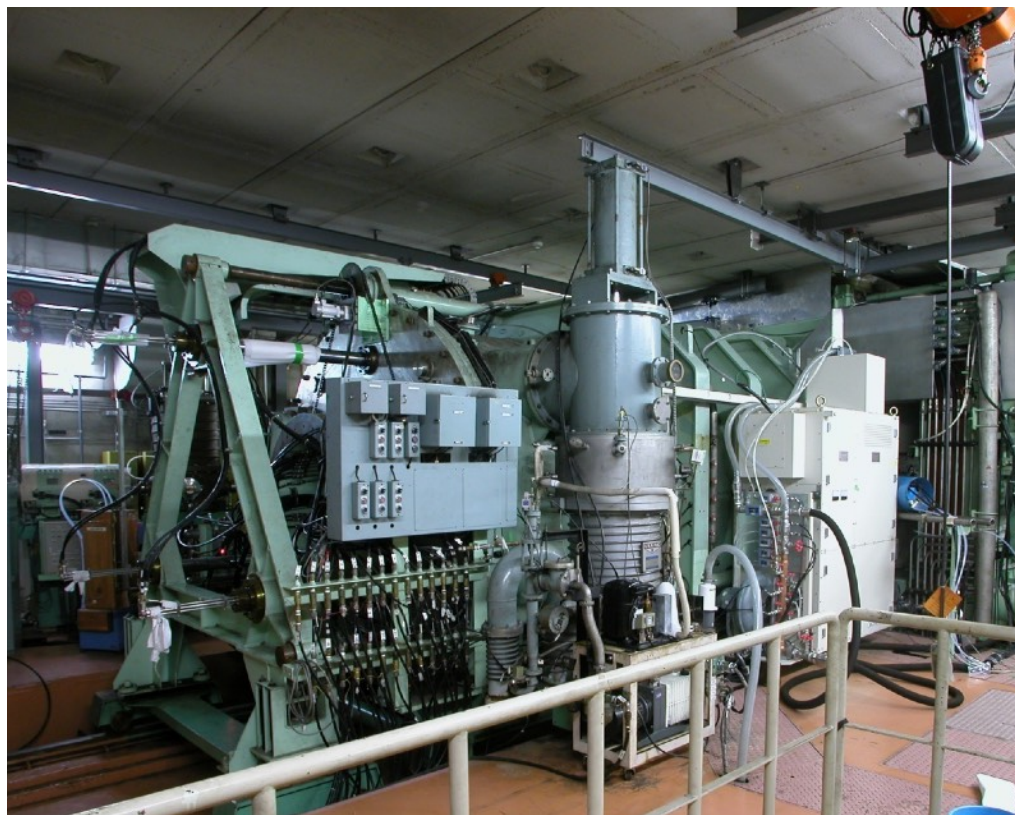


AVF Cyclotron Facility

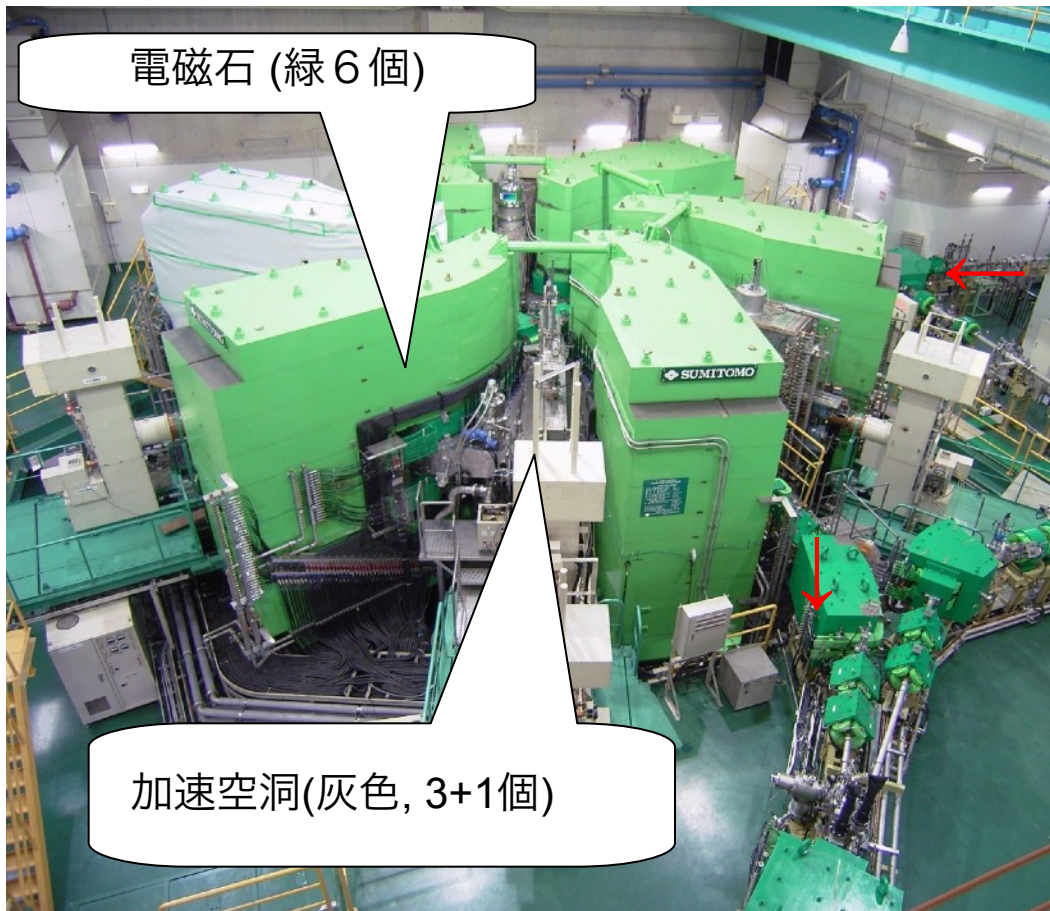


原子核の顕微鏡「グランドライデン」

AVFサイクロトロン



RINGサイクロトロン(K400)



RF Cavity

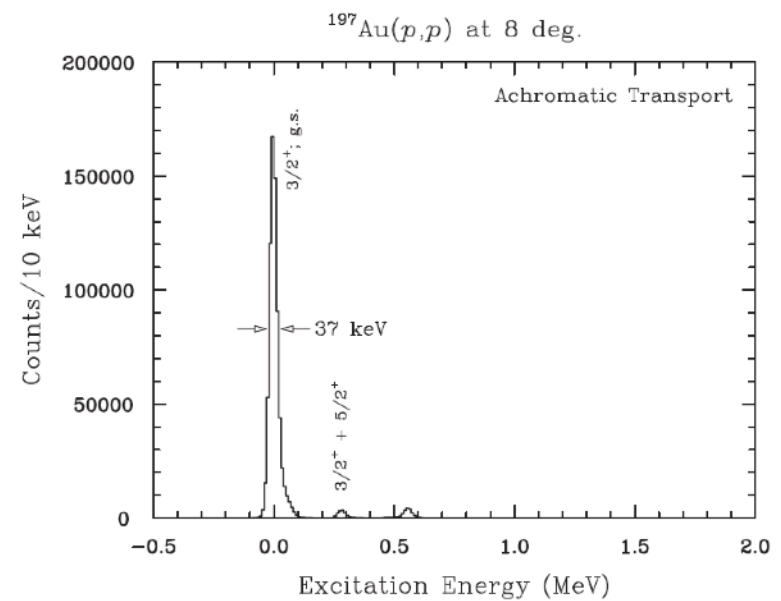
Frequency : 30~52MHz

Voltage : max500kV

Magnet (6)

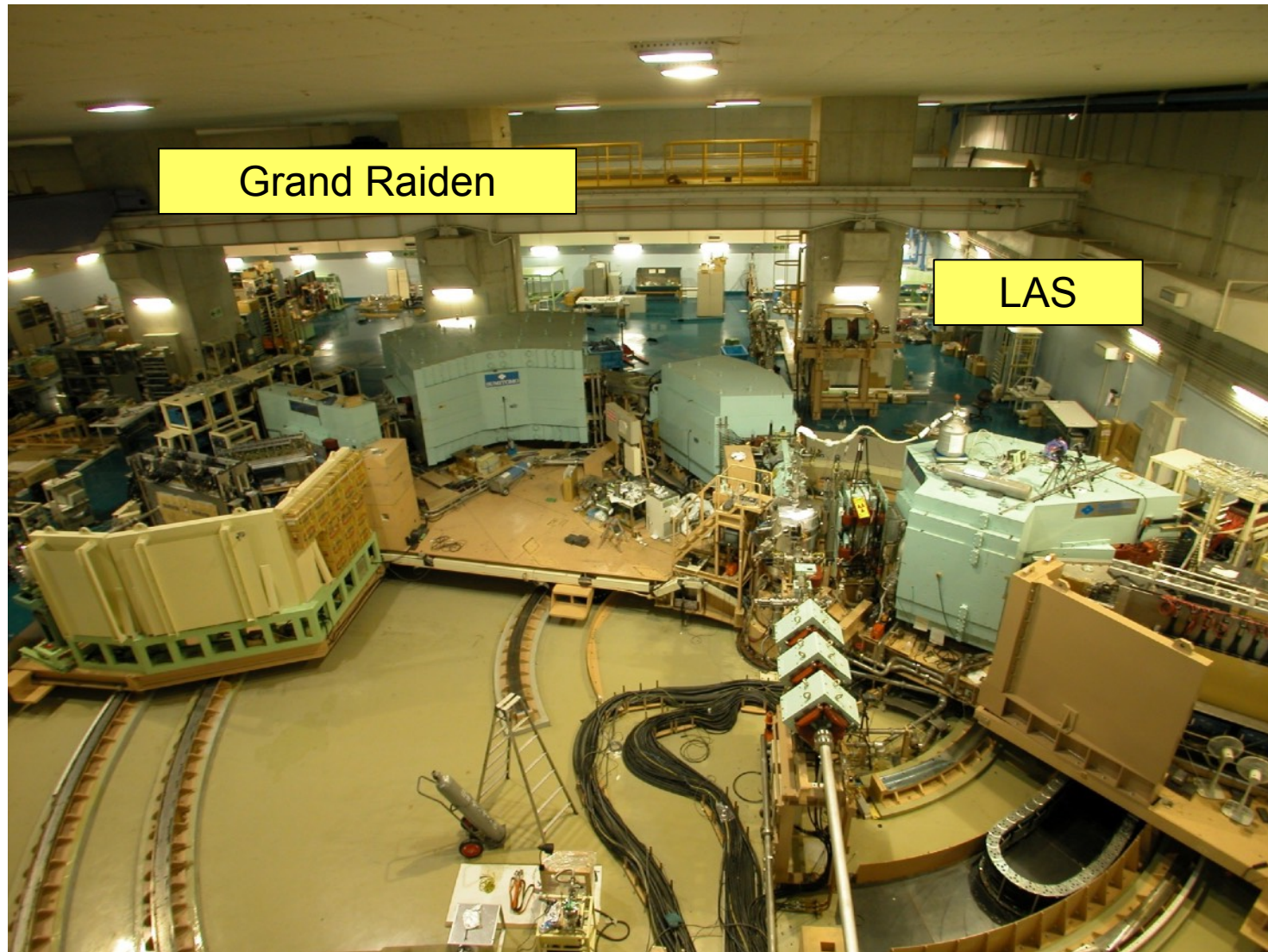
Weight : 2200ton

Field : max 1.75T



スペクトロメータ

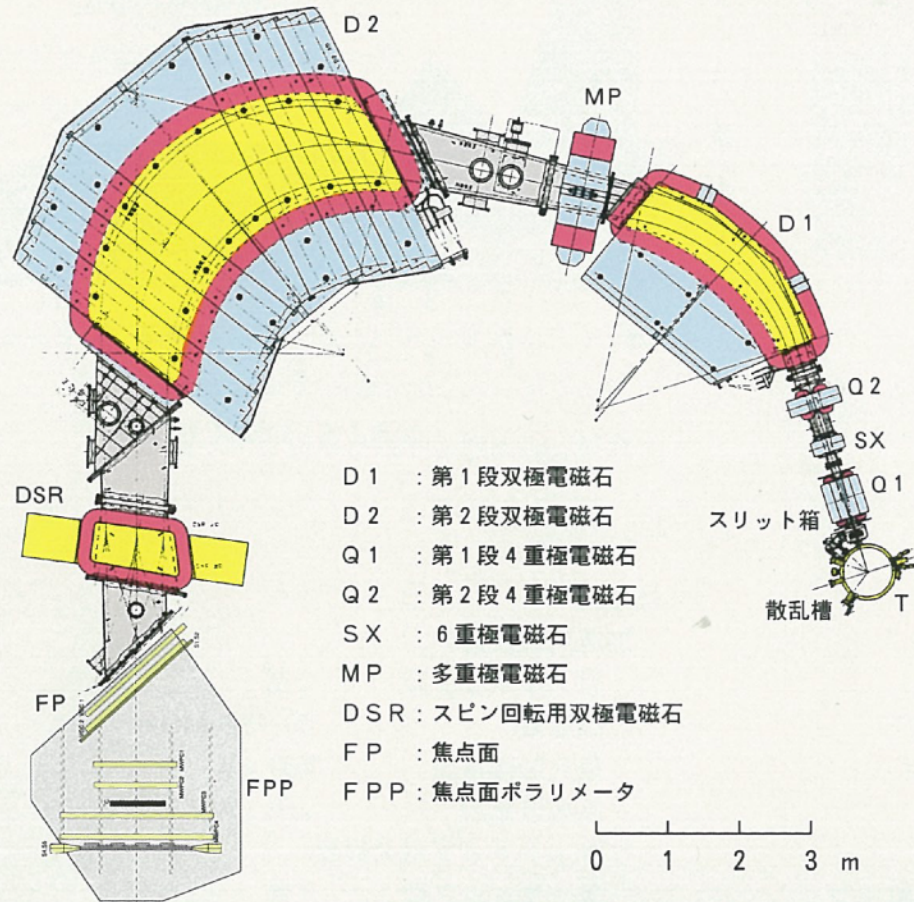
2アーム分光ロメータ



High-Resolution Spectrometer “Grand Raiden”

M. Fujiwara *et al.*, NIMA422,494(1999)

高分解能反応粒子スペクトログラフ “グランド雷電”



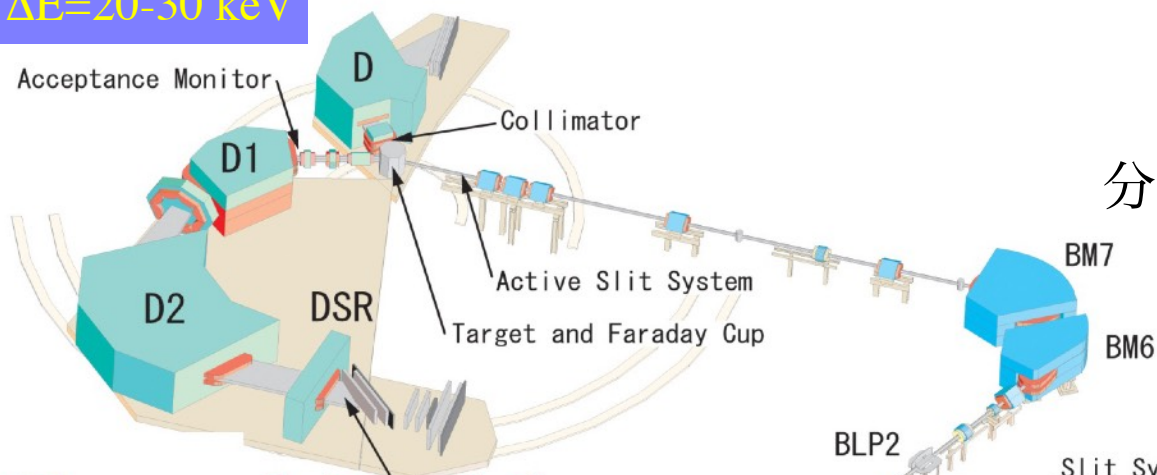
グランド雷電の構成

Resolving Power:	37,000
Bending Radius:	3 m
Bending Angle:	162 deg
Bending Power:	5.4 Tm
Dispersion:	15.4 m
Solid Angle:	~4 msr
Momentum Acceptance:	5 %
Horizontal Magnification:	-0.42
Vertical Magnification:	6.0
Angle:	0-70 deg

Two Multi-Wire Drift Chambers
Plastic Scintillators
Focal Plane Polarimeter (for protons)

高分解能ビームライン(WS)

$\Delta E = 20\text{--}30\text{ keV}$



分散整合(Dispersion Matching)

Grand Raiden

WS Beam Line

Slit System
for Achromatic Beam

Slit System
for Dispersive Beam

ビーム強度

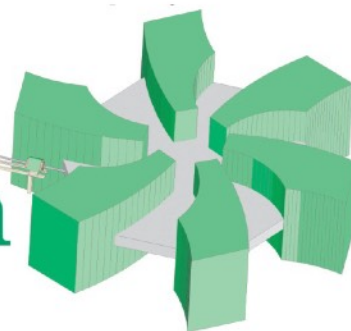
max: $1\text{ }\mu\text{A}$ ($10^{13}/\text{sec}$)
(limitation by radiation safety)
high-quality beam: $1\text{--}20\text{ nA}$ ($10^{10\text{--}11}/\text{sec}$)

エネルギー

low-energy beam from AVF
up to highest energy beam from RING.
e.g. $10\text{--}400\text{ MeV}$ for protons

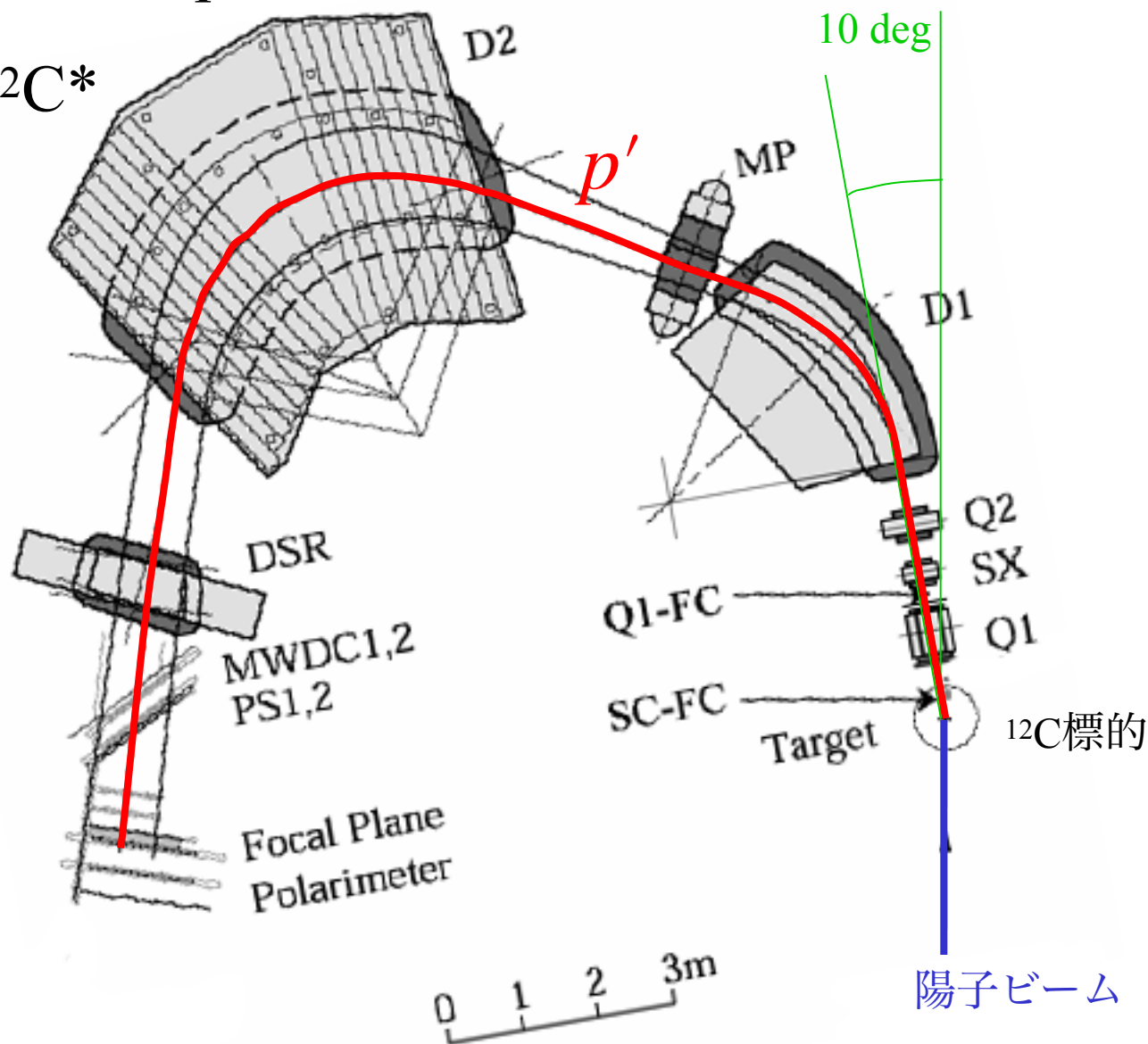
$\Delta E = 60\text{--}100\text{ keV}$

Ring Cyclotron



Grand Raiden Spectrometer

$^{12}\text{C}(p,p')^{12}\text{C}^*$
at 10 deg



双極(偏向) 電磁石



ディスパージョン
(運動量分散) :

$$(x|\delta) = \frac{\Delta x}{\delta}, \quad \delta = \frac{\Delta p}{p_0}$$

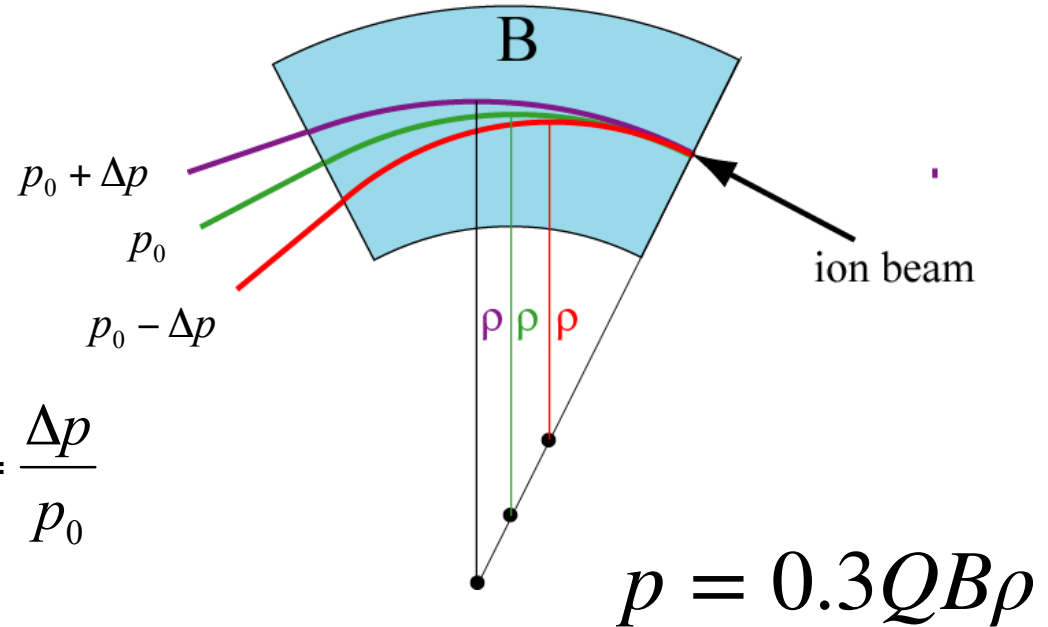
グランドライデンのディスパージョン

dispersion = 15.4 m

$$30 \text{ keV} / 400 \text{ MeV} = \sim 7 \times 10^{-5}$$

$$\rightarrow \delta = \sim 3.5 \times 10^{-5} \text{ in momentum}$$

$$\rightarrow \Delta x = 0.5 \text{ mm}$$



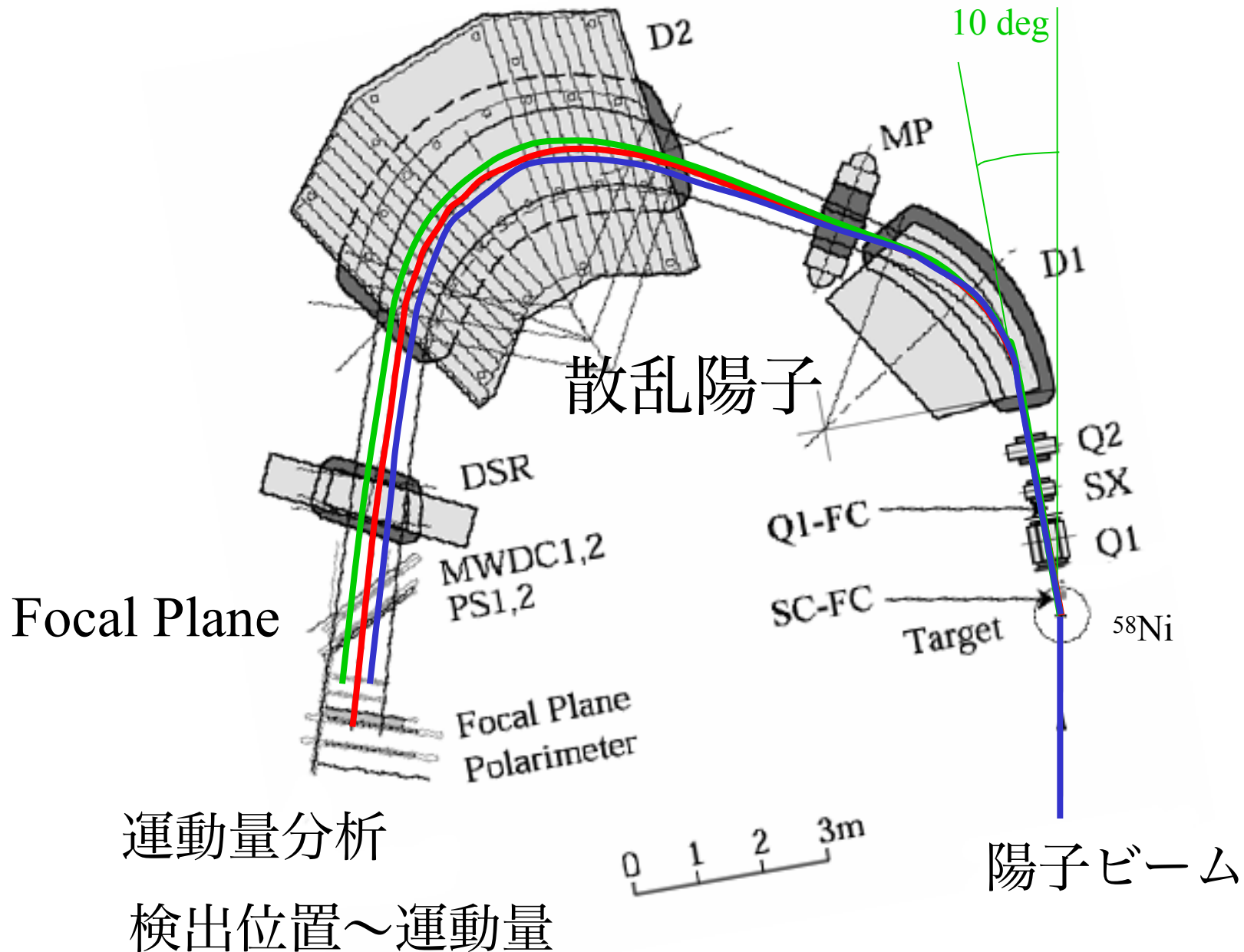
p (GeV/c)

Q (e)

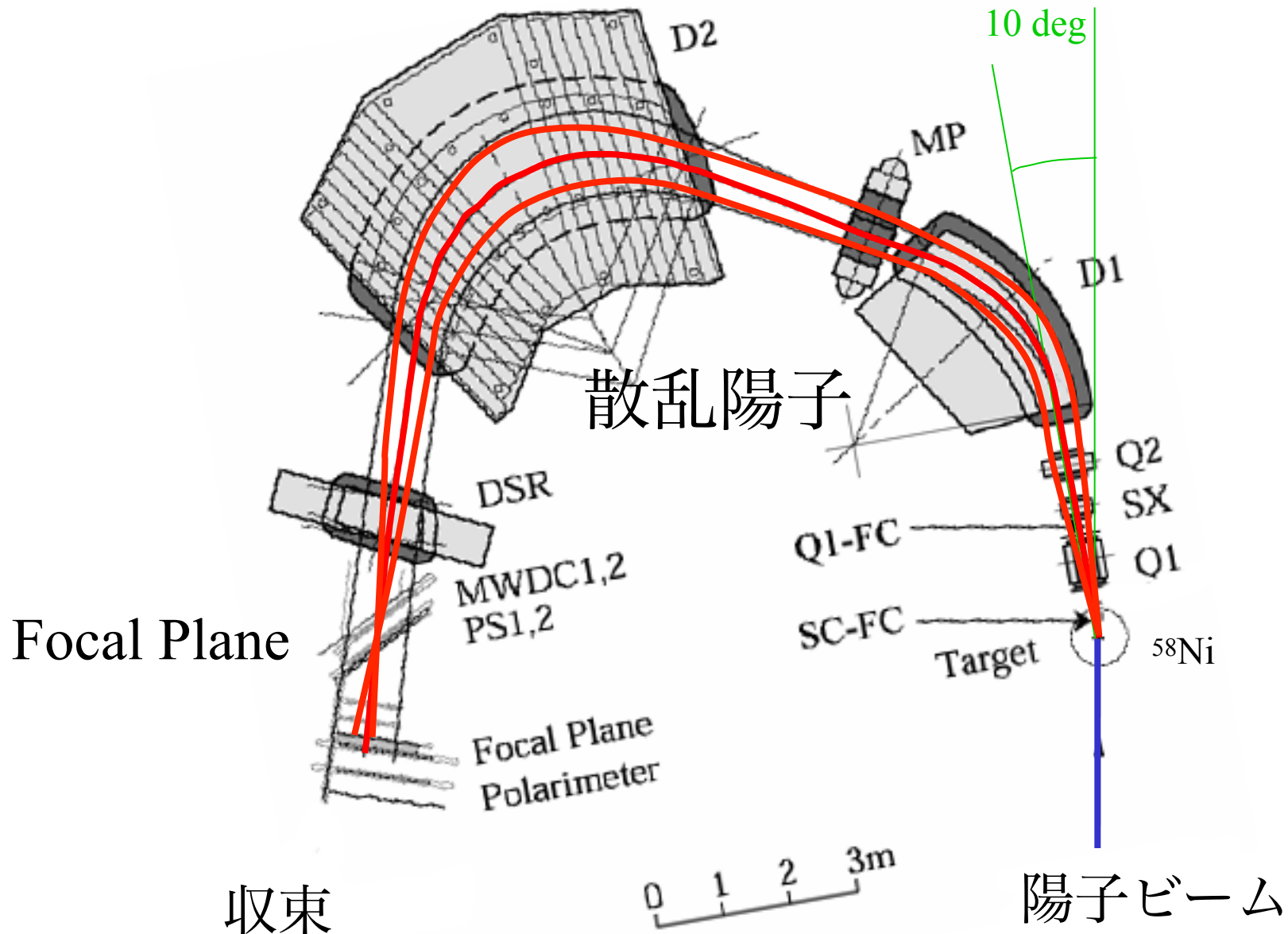
B (T)

ρ (m)

Grand Raiden Spectrometer



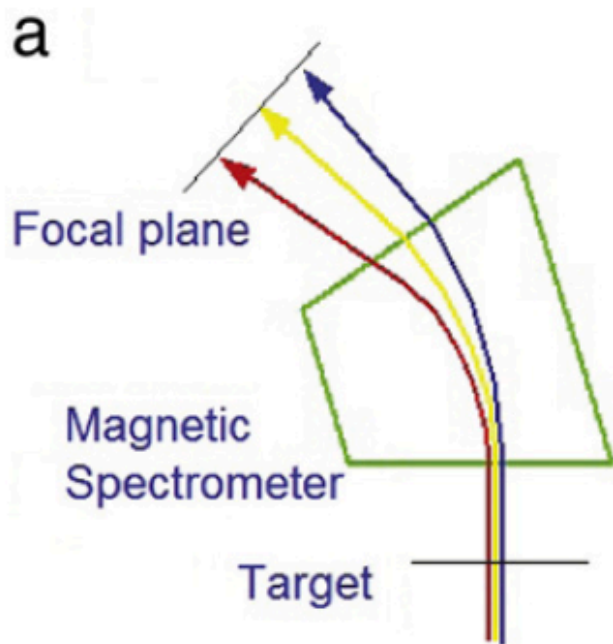
Grand Raiden Spectrometer



収束

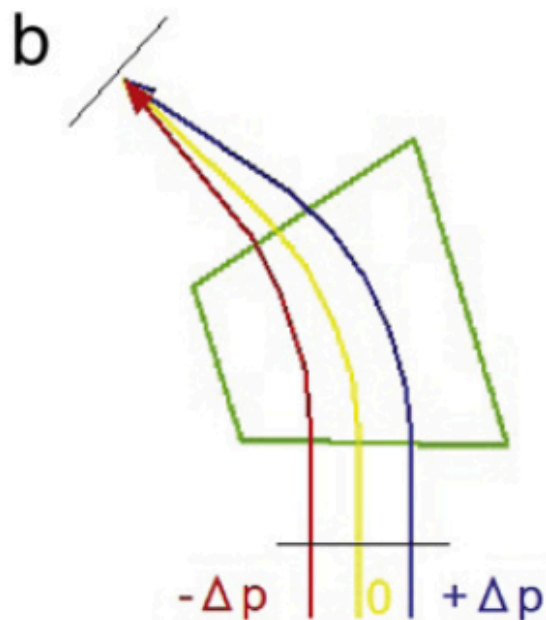
検出角度～入射角度(水平面内)

分散整合 (dispersion matching)



通常ビーム (アクロマティック)

ビームがエネルギー幅を持つ
→それ以上のエネルギー分解能
は達成されない

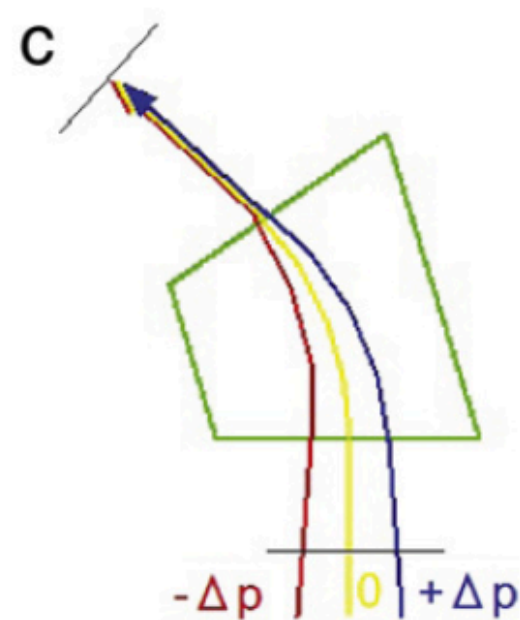


運動量分散整合

分散ビーム

ビームエネルギーを分析し、標
的上位置に相関させる
→焦点面での倍率と整合する
と、焦点面で一点に収束

高エネルギー分解能
100 keV → 20 keV



角度分散整合

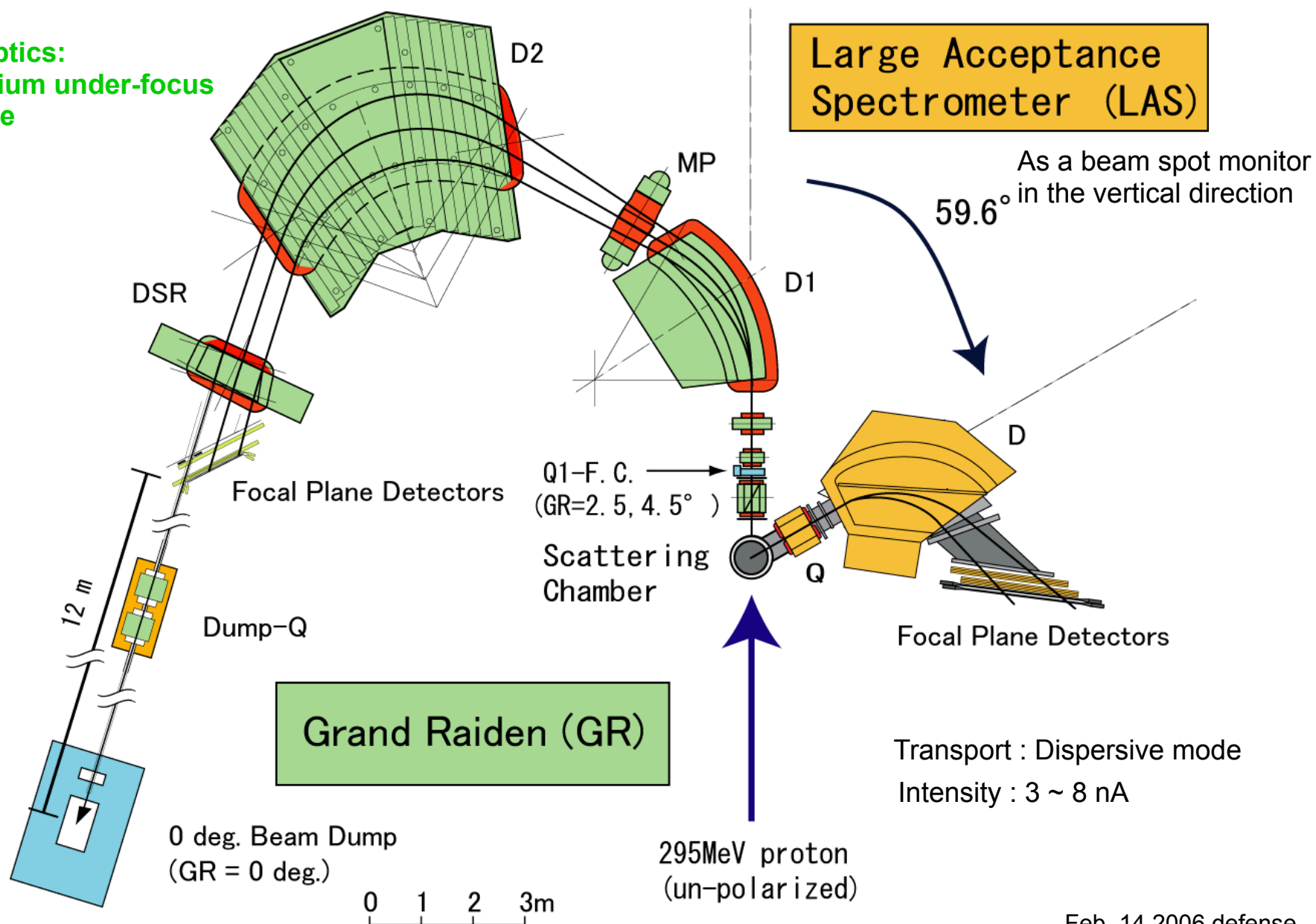
+角度分散ビーム

角度を標的位置と相関さ
せる
→焦点面での角度が揃う

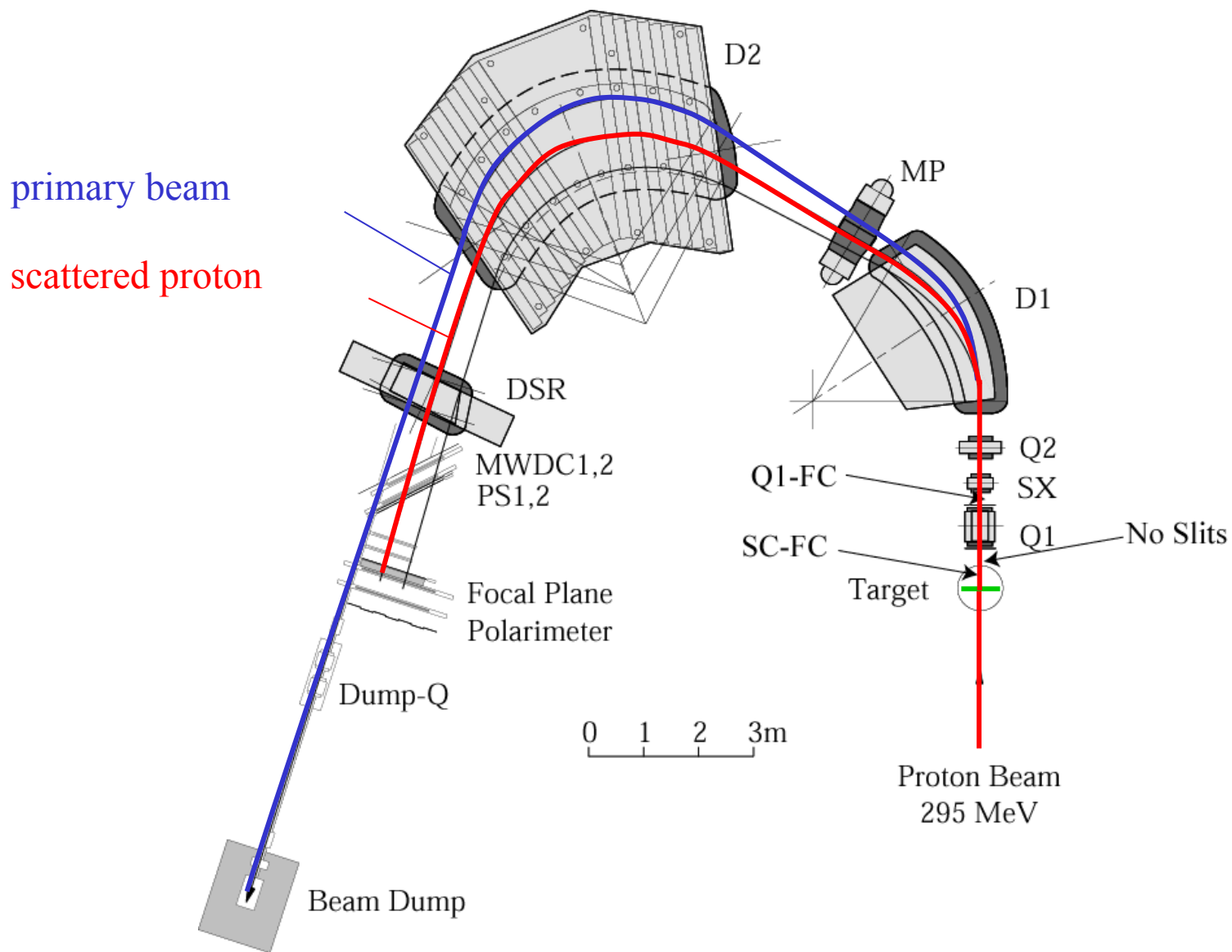
高角度分解能
~0.1度

0 度散乱実験セットアップ

Ion optics:
Medium under-focus
mode

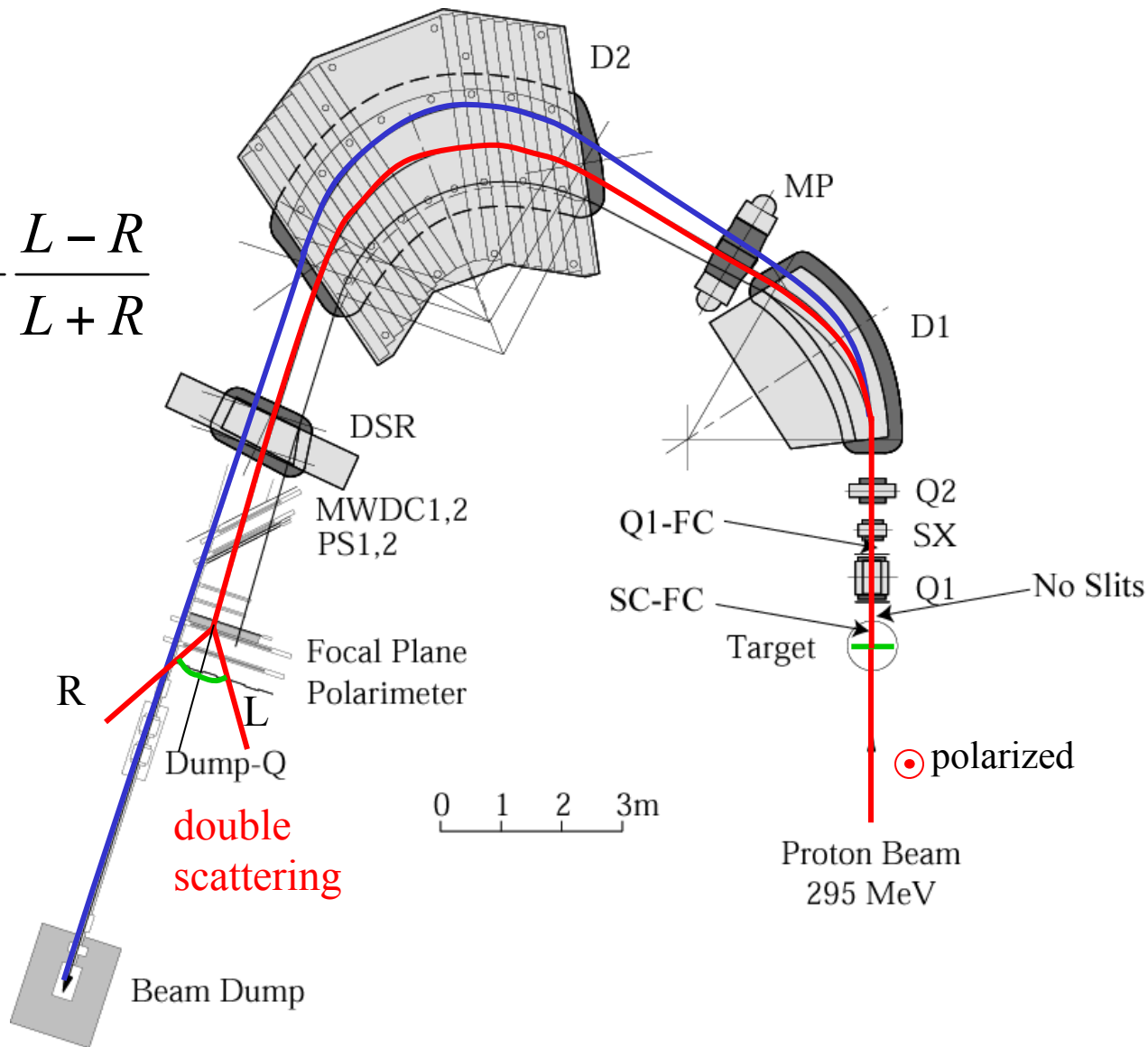


0 度散乱実験



0 度散乱実験(偏極測定)

$$p_{y'} = \frac{1}{A_y} \frac{L - R}{L + R}$$



測定器、回路

測定器

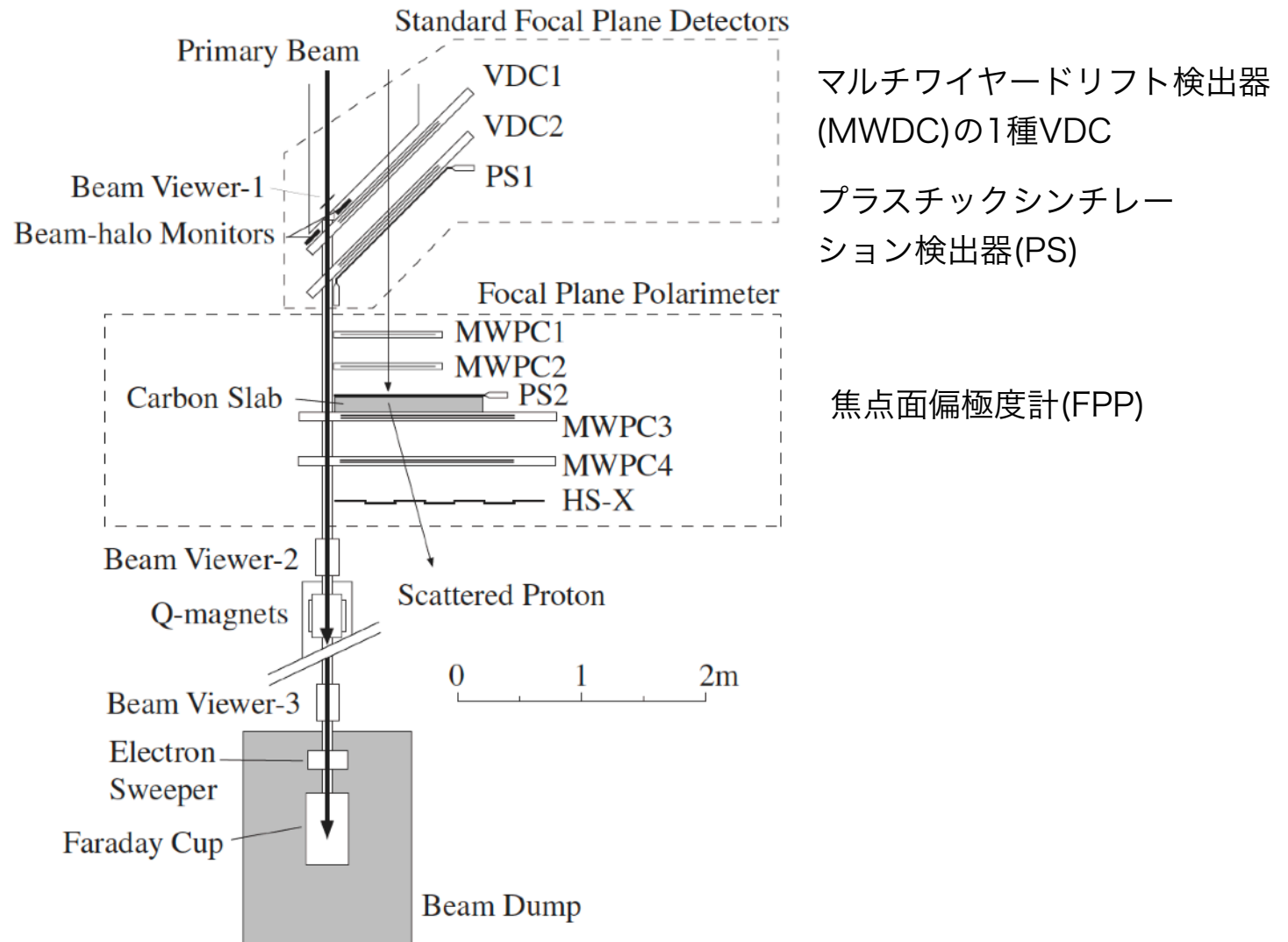
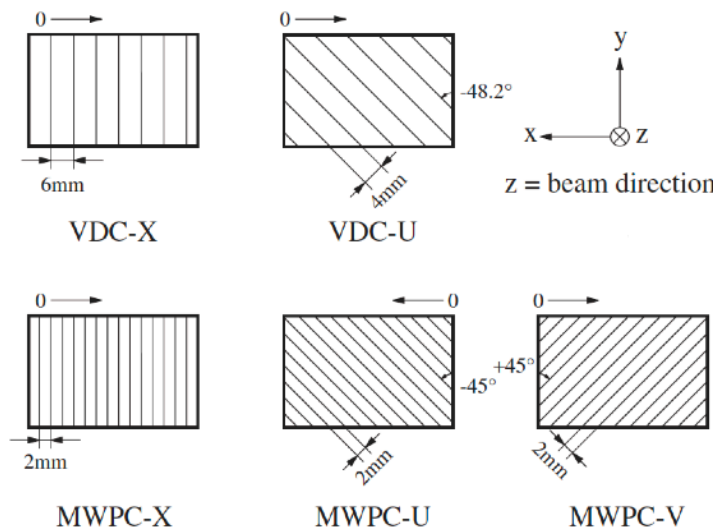


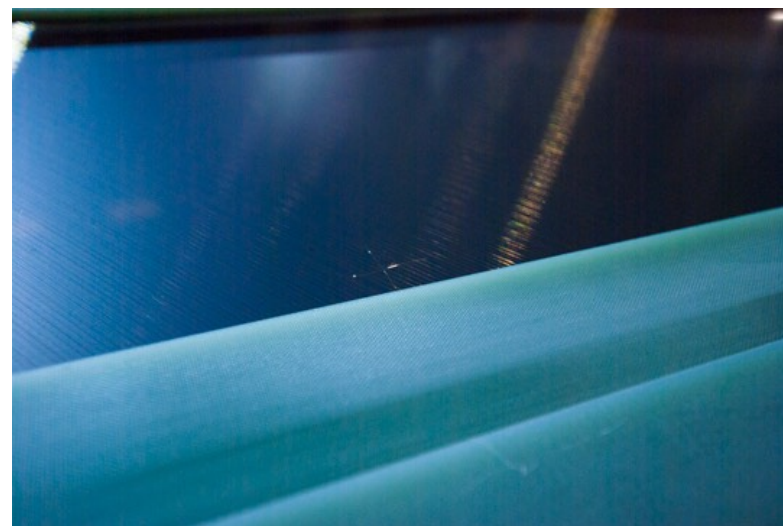
Figure 2.5: The standard focal plane detectors and the Focal Plane Polarimeter (FPP) at the focal plane of the spectrometer in the setup of the 0° experiment.

垂直ドリフト型位置検出器(VDC)

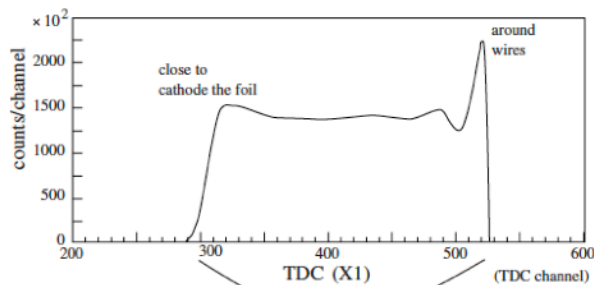
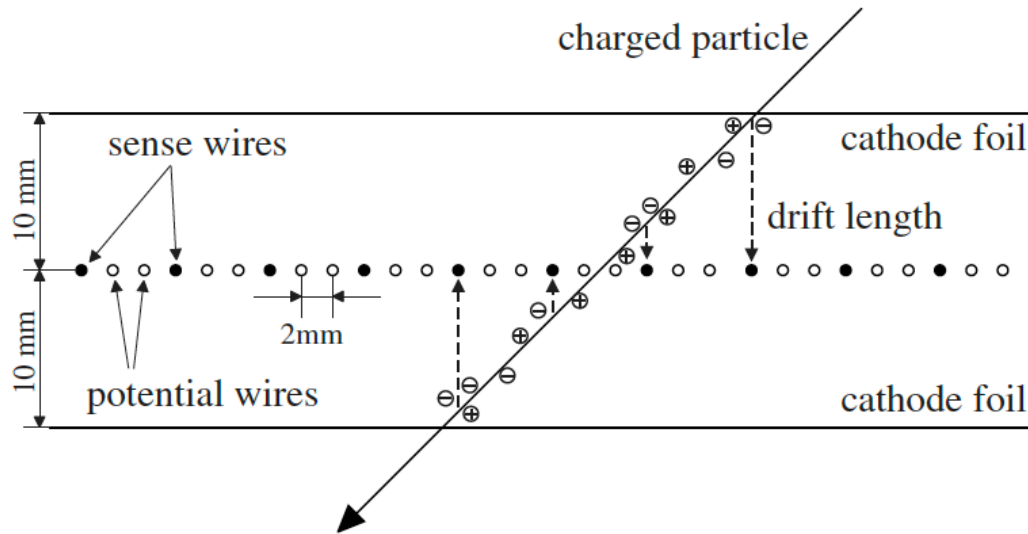


Wire configuration	X(0°), U(-48.2°)
Active area	1150 ^W × 120 ^H mm
Number of sense wires	192 (X), 208 (U)
Anode-cathode gap	10 mm
Anode wire spacing	2 mm
Sense wire spacing	6 mm (X), 4 mm (U)
Anode sense wires	20 $\mu\text{m}\phi$ gold-plated tungsten wire
Anode potential wires	50 $\mu\text{m}\phi$ gold-plated beryllium copper wire
Cathode film	10 μm carbon-aramid film
Applied voltage	-5600 V (cathode), -300 V (potential), 0 V (sense)
Gas mixture	argon:iso-butane:iso-propyl-alcohol = 70:30:* ¹
Pre-amplifier	LeCroy 2735DC
Digitizer	LeCroy 3377 drift chamber TDC

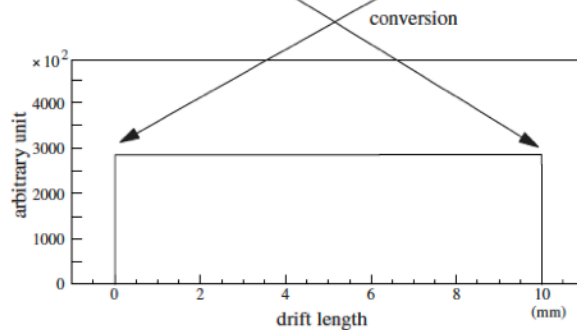
¹Mixed with the argon gas in 2°C vapor pressure.



垂直ドリフト型位置検出器(VDC)



- ・ 時間情報をドリフト距離情報に変換



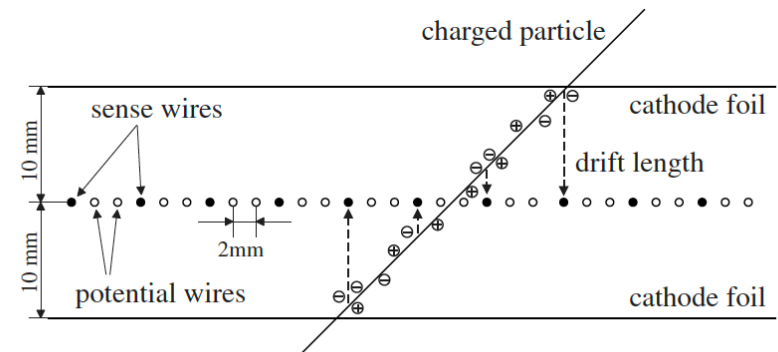
垂直ドリフト型検出器(MWDC of VDC type)

動作原理

- ・ 荷電粒子がガス中の通過軌道上に電子・イオンペアを作る。
- ・ 電子が電場によりアノードワイヤに移動（ドリフト）する。
- ・ アノードワイヤ付近の高電場により加速され、ガスを電離することにより電子が増える（雪崩効果）。イオンも増える。
- ・ アノード付近のイオンがカソード方向に移動することによりアノードワイヤーに信号が誘起される。
- ・ アノードワイヤーの信号を増幅（プリアンプ）して検出。
- ・ 時間信号を用いて位置もしくは軌道を同定する。

エッセンス

- ・ 比較的大面積を高位置分解能で測定できる（目安0.2-0.5mm）。
- ・ ガスは物質量が少ないため荷電粒子が直線に進んでくれる。（"多重散乱の影響が小さい"という）
- ・ ドリフト速度の電場依存性が小さくなる様に設計されている（一定ドリフト速度）。 $50\mu\text{m}/\text{nsec}$ 。
- ・ エネルギー損失と信号の大きさが比例する領域で使われることが多い"比例計数管"。エネルギー損失信号として利用することもある。PPACなど。



焦点面偏極度計(FPP)

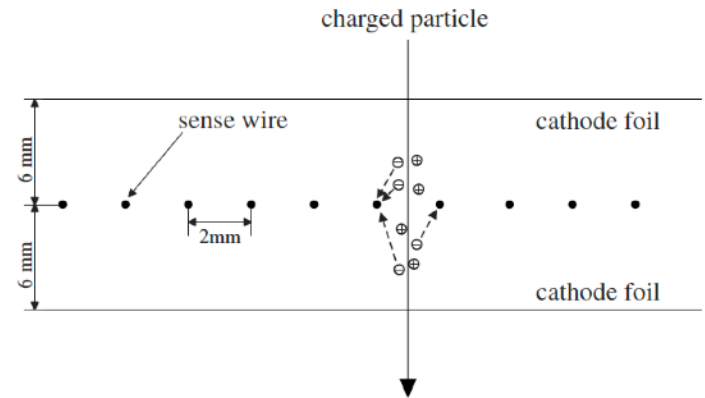
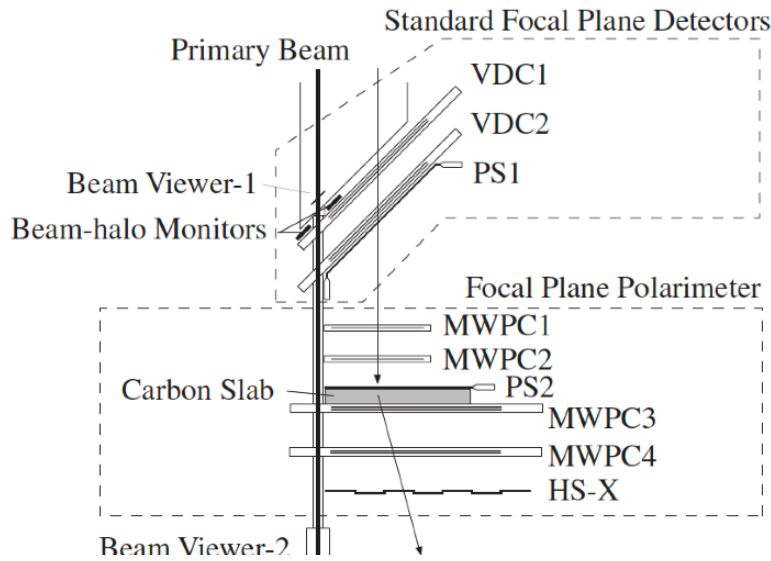
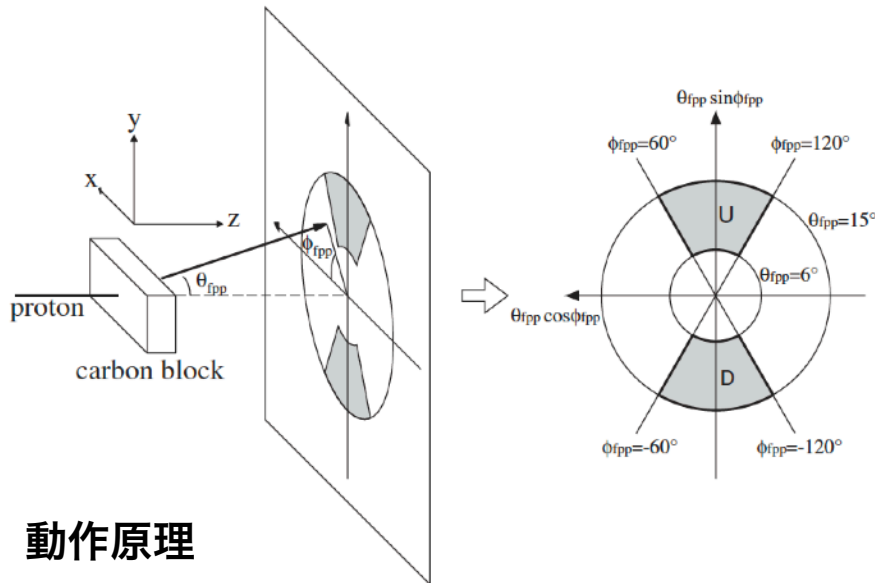


Figure 3.5: Structure of the MWPCs.

Table 2.3: Specification of the MWPCs.

	MWPC1,2	MWPC3	MWPC4
Wire configuration	X(0°)	X(0°, U(-45°), V(+45°)	
Active area	760 ^W × 200 ^H mm	1400 ^W × 418 ^H mm	1400 ^W × 600 ^H mm
Number of wires	384	704 (X), 640 (U,V)	704 (X,U,V)
Anode-cathode gap	6 mm		
Anode wire spacing	2 mm		
Anode wires	25 mmϕ gold-plated tungsten wire		
Cathode film	10 μm carbon-aramid		6 μm aluminized mylar
Cathode voltage	-4900 V	-4700 V	
Gas mixture	argon:iso-butane:freon:iso-propyl-alcohol = 66:33:0.3: ¹		
Pre-amplifier	LeCroy 2735PC and Nanometric N277-C3		
Digitizer	LeCroy PCOS III		

¹Mixed with the argon gas in 2°C vapor pressure.



動作原理

- ・ BLPと同じだが統計量をあげるために厚い標的を使い、全方位角で測っている

標的

標的開発

- 高分解能測定用 H_2O , ^{32}S 標的
with 液体窒素冷却標的機構

標的：実験上もっとも重要な
要素の1つ



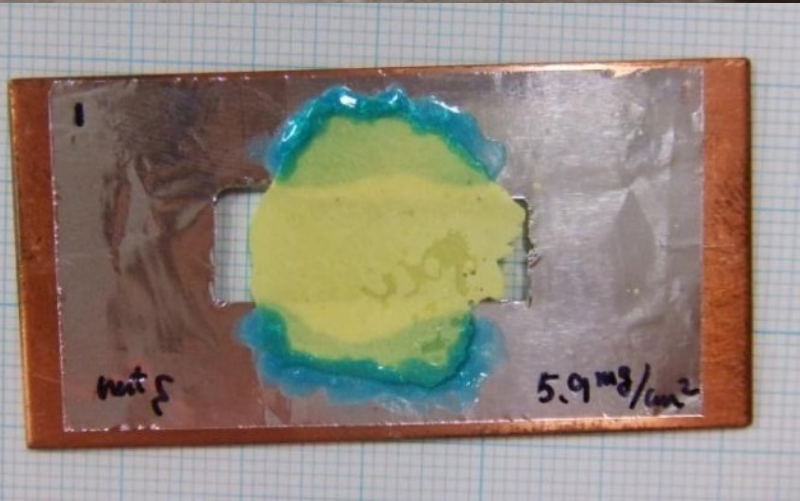
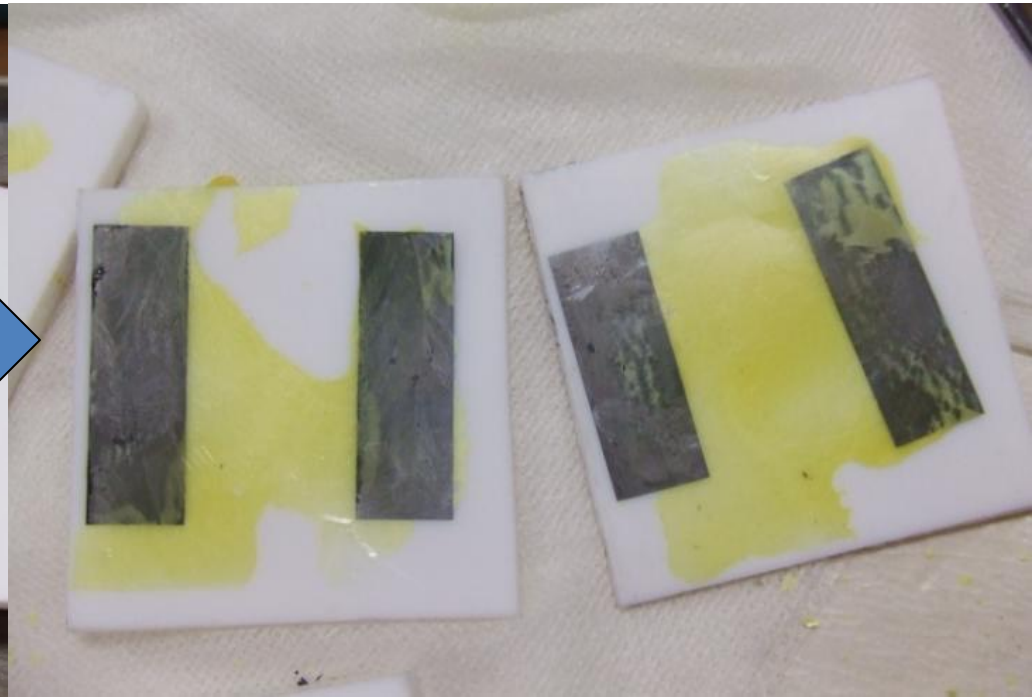
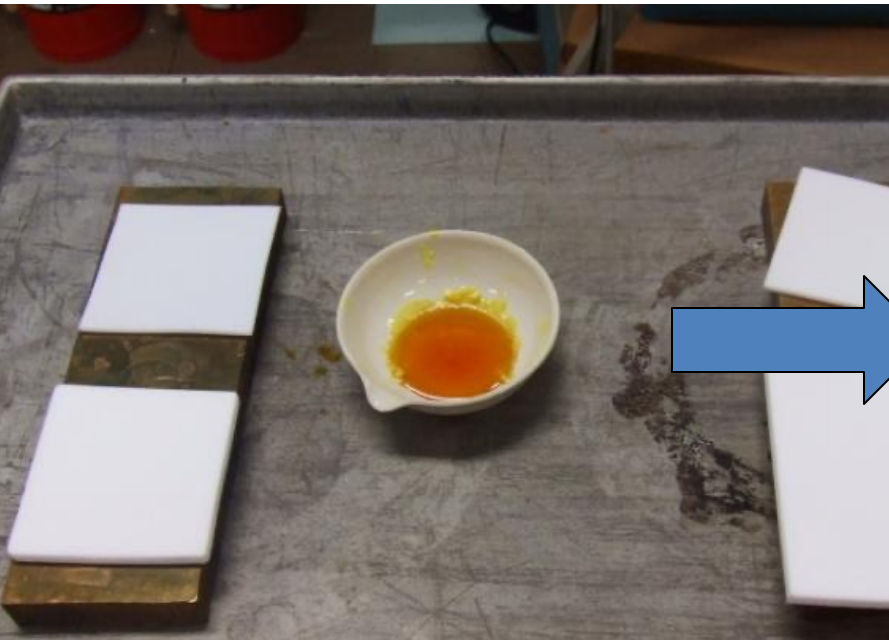
T. Kawabata *et al.*, NIMA 459 (2001) 171.



10 mg/cm² くらい

硫黄の薄膜製作

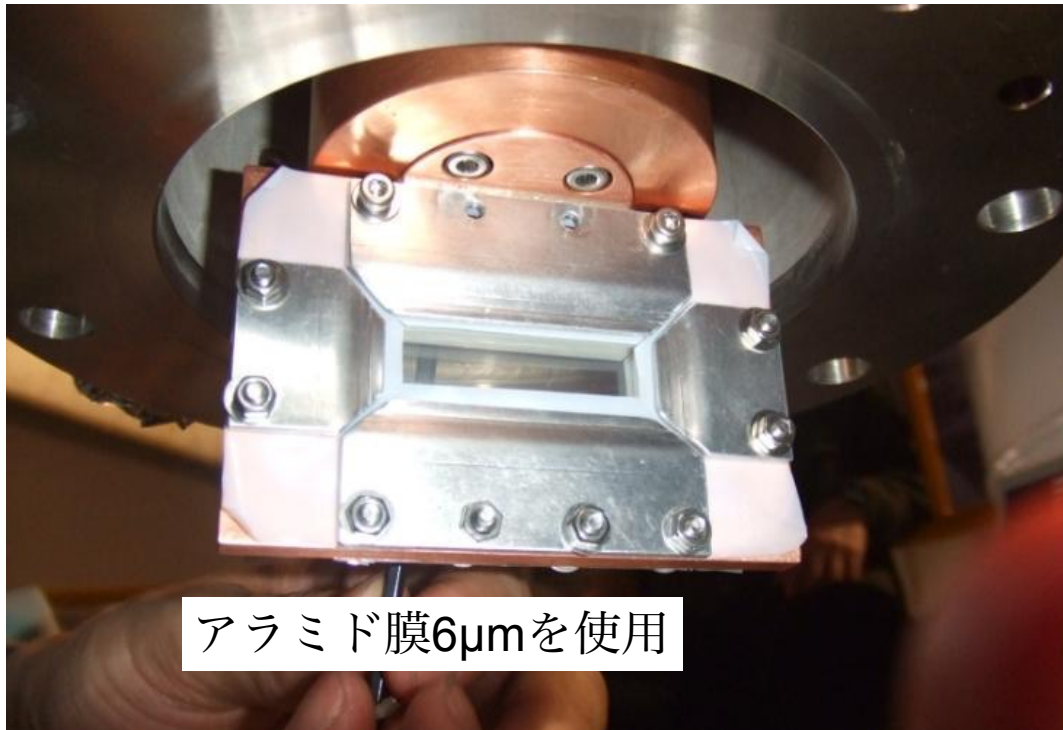
- 低い沸点 (112.8°C)



6 mg/cm² くらい

気体標的機構

- 高分解能測定対応 ($<30\text{keV}$ at $< 6\text{ deg}$)
- 液体窒素で冷却
- ガス回収機能 (^{36}Ar)

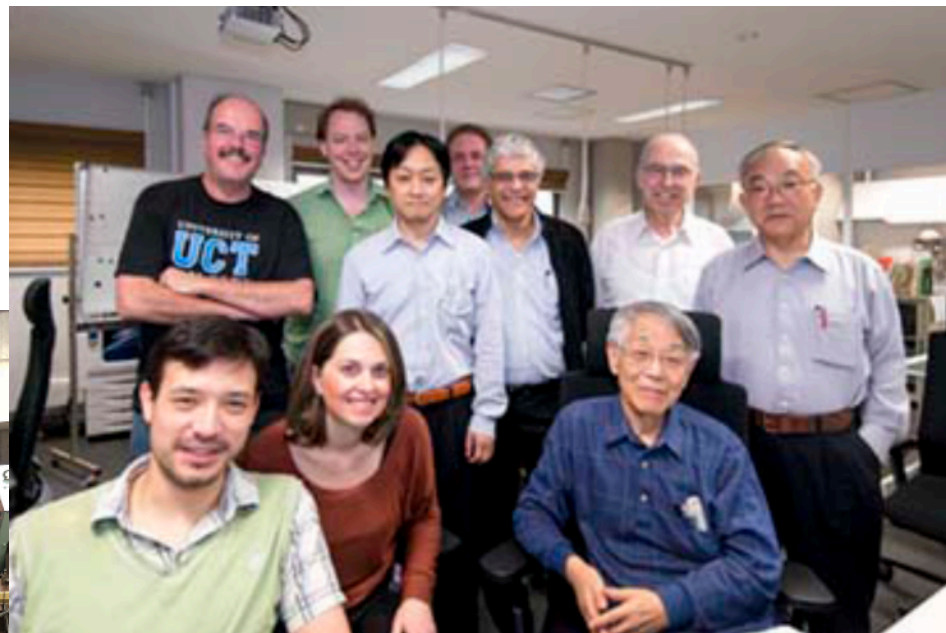
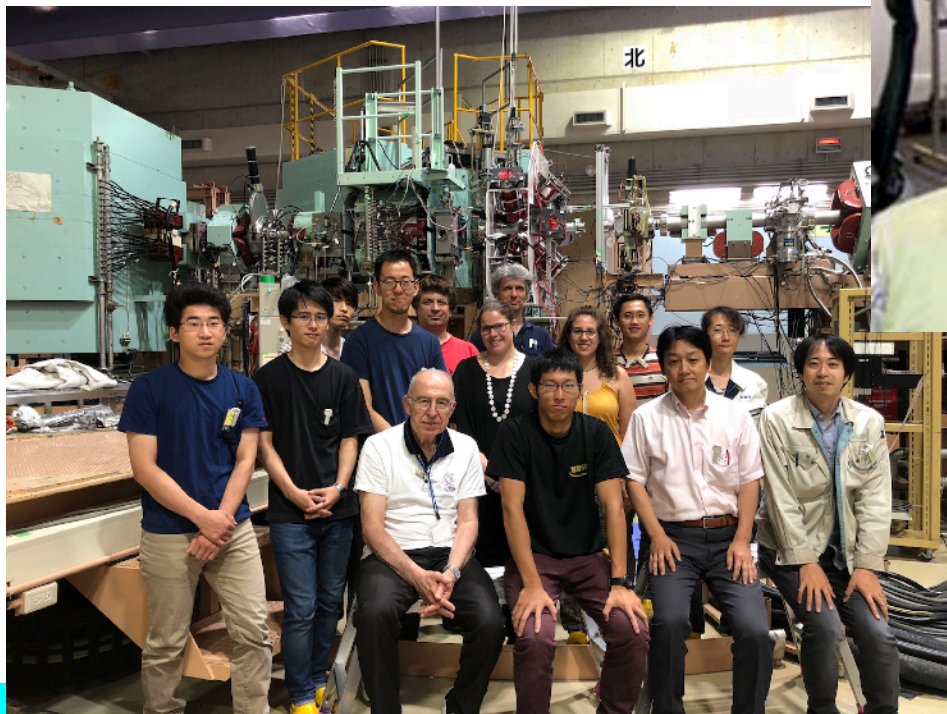


実験屋の特性 (完全に私見)

- 実験家は24時間働いている（これはウソ）
- 実験家はどこでも寝ることができる（結構本当）
- 実験家はなんでもできないといけない
実験に必要な要素はとても多い。
真空、電磁石、イオンオプティクス、検出器（多種あり）、回路、高圧、プログラミング、さらには組織力...
得意な分野がありつつ、しかし全体を把握している。必要になる都度勉強する。
- なんでもその場で概算する、見積もる。
- 理論やモデルのエッセンスをイメージ的に把握している（したい）。

結論： とても楽しいです。

実験の実施



実験人数は10-20人程度が多い。

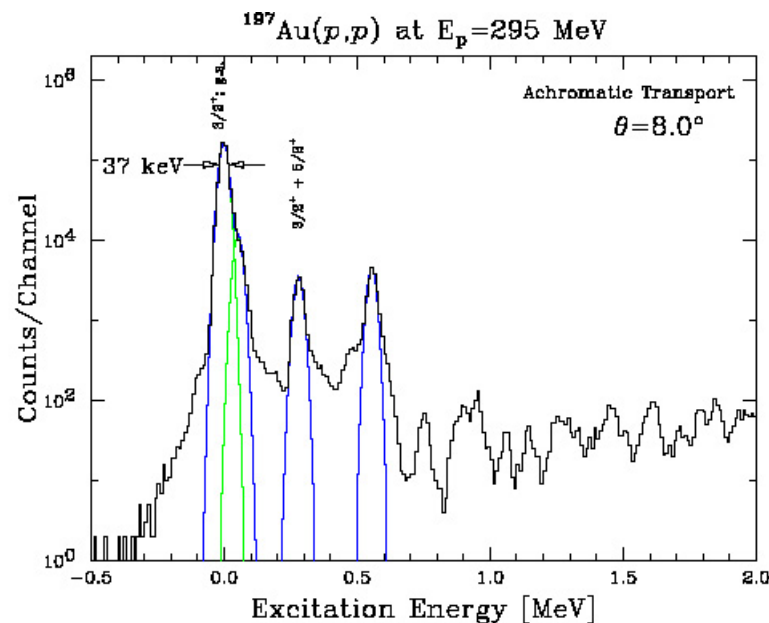
実験セッティング

E282&E316



ビーム調整、データ取得

- 高品質、高分解能ビームの調整には2日程度かかる。
- 各検出器が正しく動作しているかどうかを1つずつ確認していく。
- 本データ取得の条件を最適化、データ取得
- 正しくデータが取れているかどうか、オンライン解析により常にモニター。
- データ解析の較正に必要なデータを取得



ウンチク

- 実験を実施すると必ずといっていいほど問題（不具合）が起きる。
- 如何にして問題を発見し、さらに速やかに解決に導くか。問題解決は実験家の主要能力。



Beam spot in the dispersive mode

データ解析

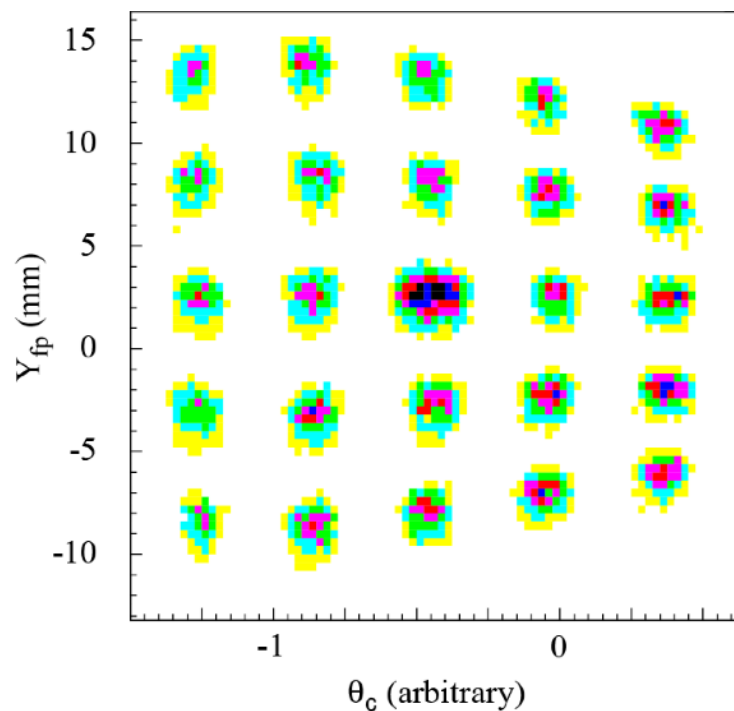
散乱角度の較正(sieve-slit analysis)



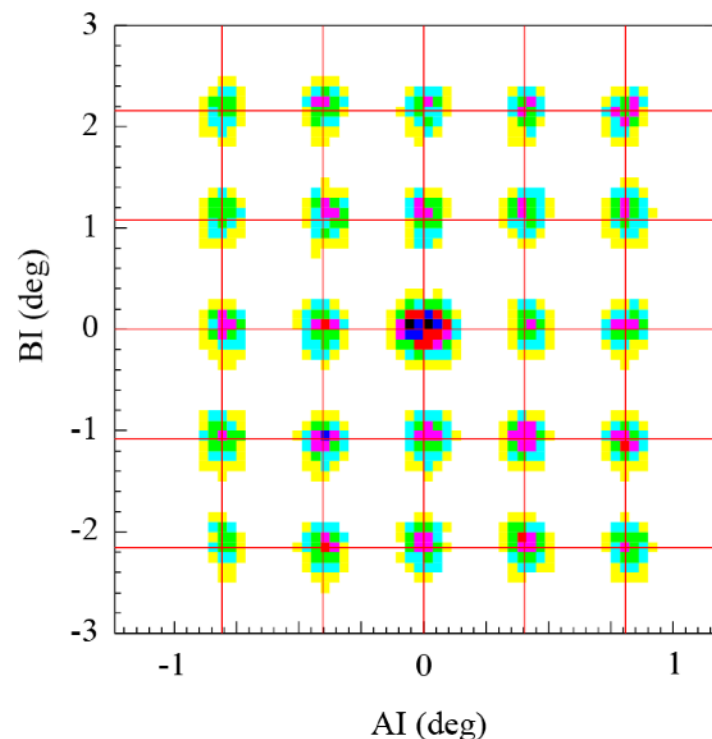
a sieve-slit was placed at the entrance of GR

$B = +1.0\%$, $X_{fp} = -460$ mm,
 $E_x \sim 6$ MeV at 0deg
 $\Delta\phi = 0.5$ deg, $\Delta\theta = 0.15$ deg

Image at the focal plane

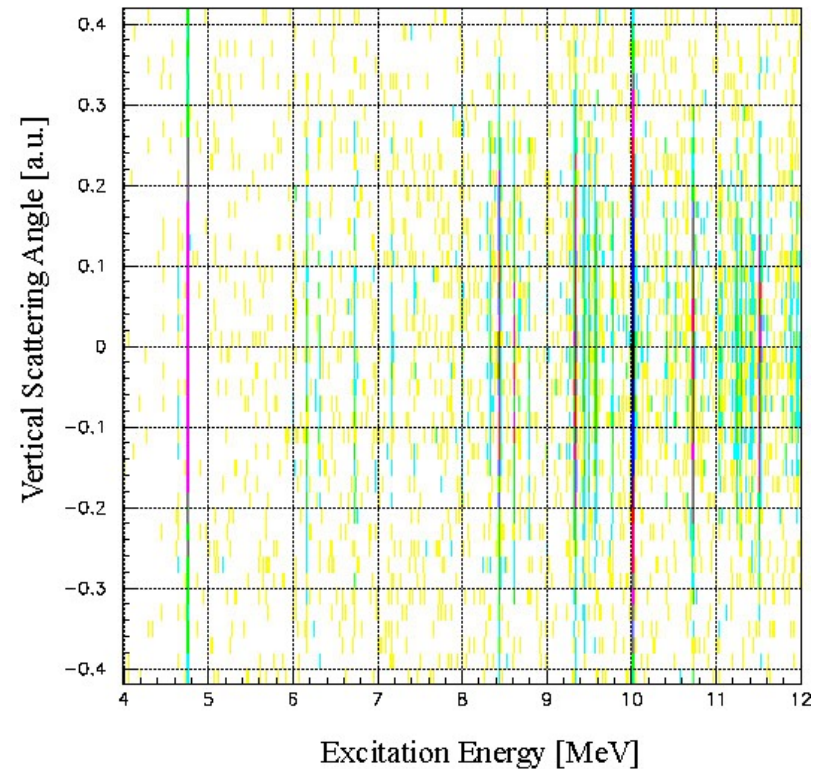
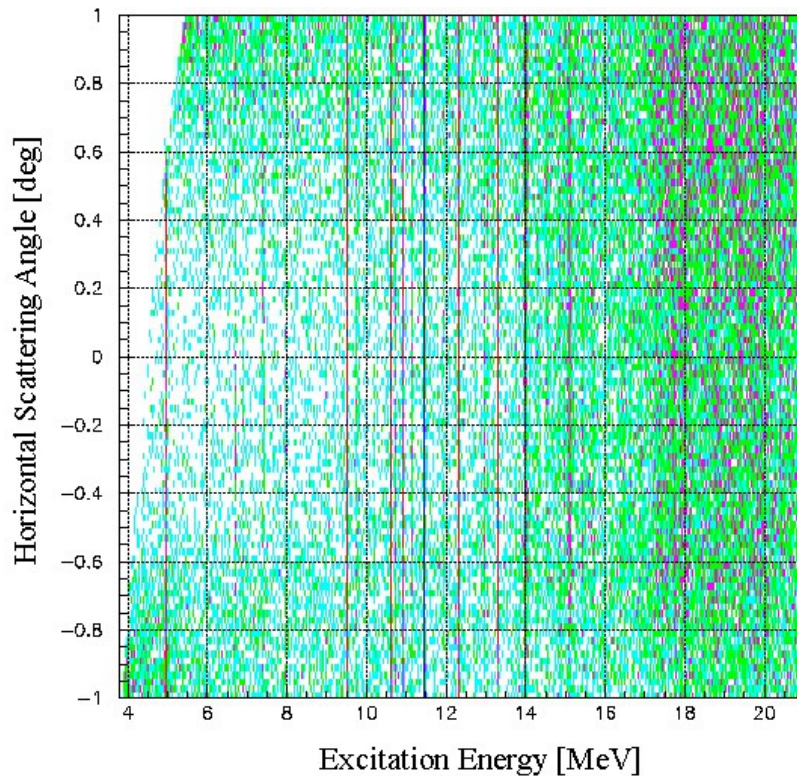


Reconstructed image



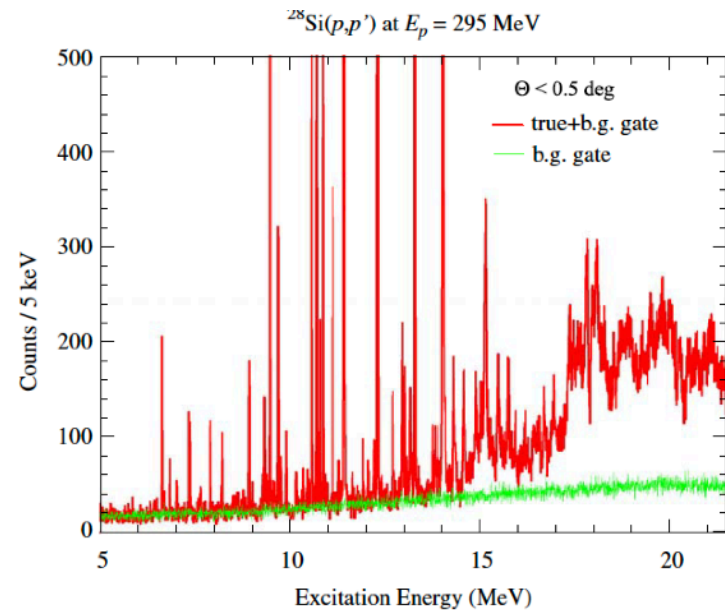
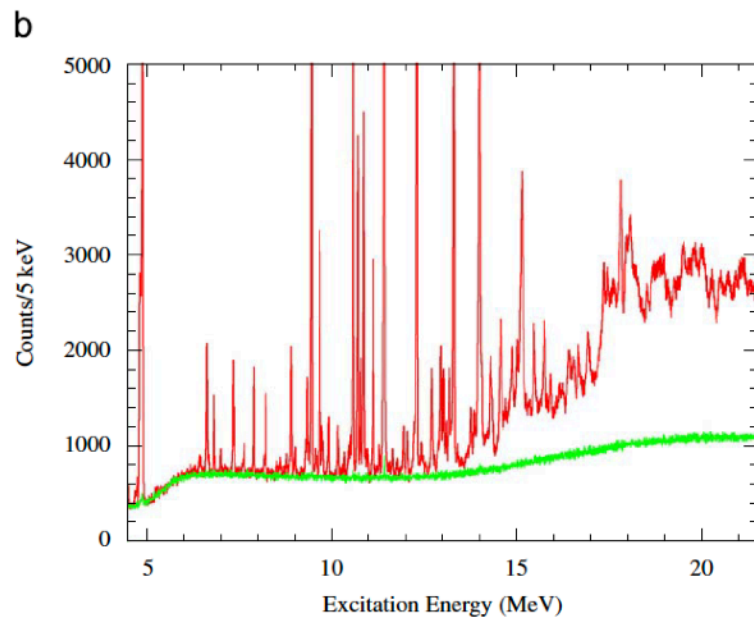
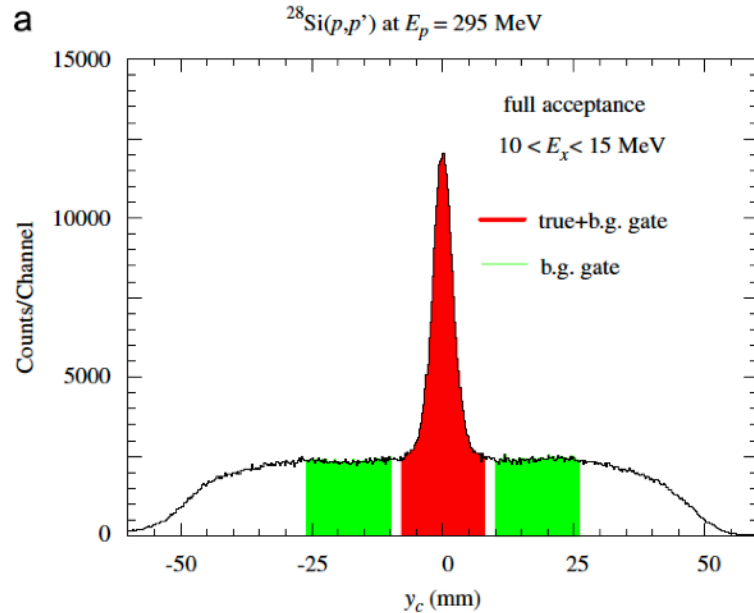
GRイオンオプティクス補正（高分解能解析）

calib. by H. Matsubara



Aberation of the ion optics of GR was calibrated as the energy resolution of discrete peaks becomes better.

バックグラウンドの評価と補正



スペクトロメータ内でのスピン回転の補正

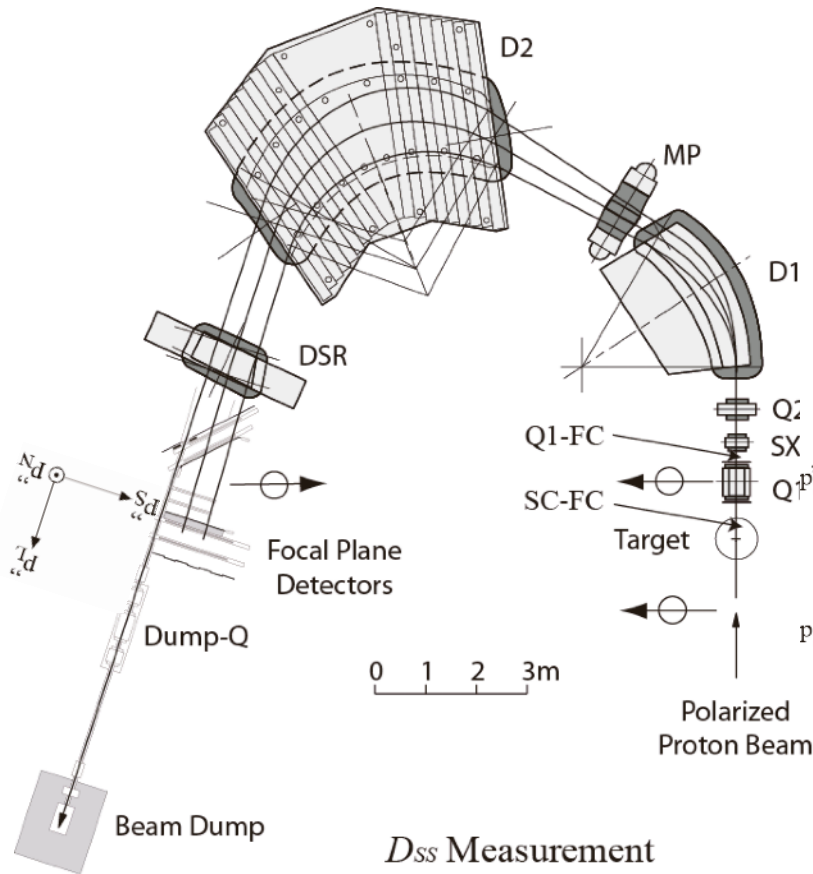
$$\theta_p = \gamma \left(\frac{g}{2} - 1 \right) \theta_b$$

θ_p : precession angle with respect to the beam direction

θ_b : bending angle of the beam

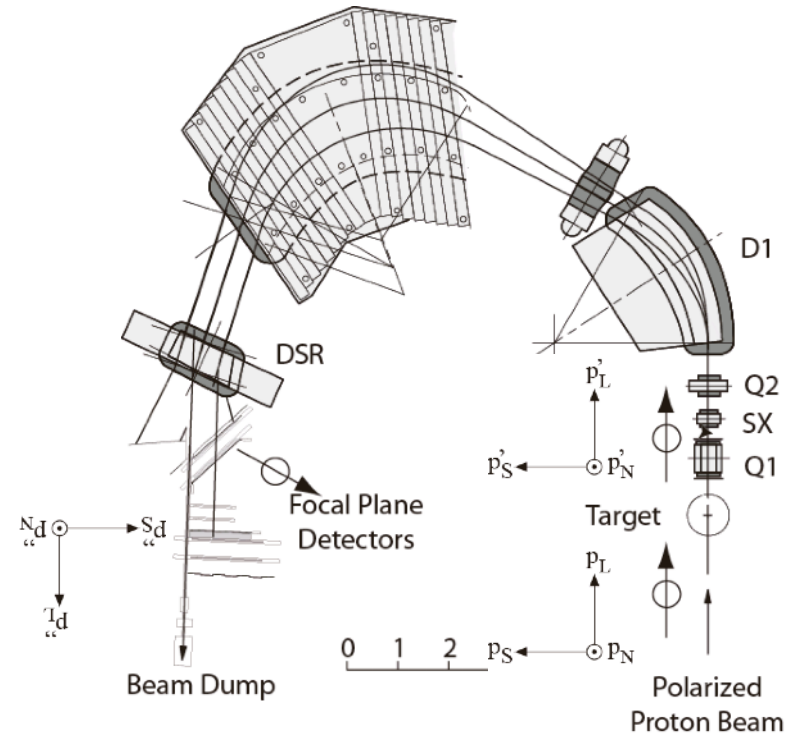
g : Lande's g-factor

γ : gamma in special relativity



D_{SS} Measurement

$$\theta_b \approx 162^\circ$$

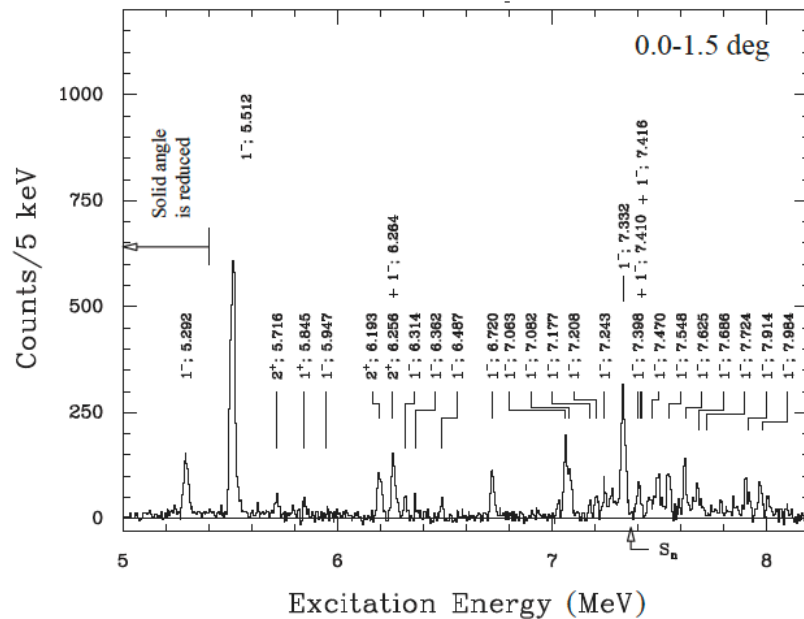


D_{LL} Measurement

$$\theta_b \approx 180^\circ$$

エネルギー較正、散乱断面積、偏極量の導出

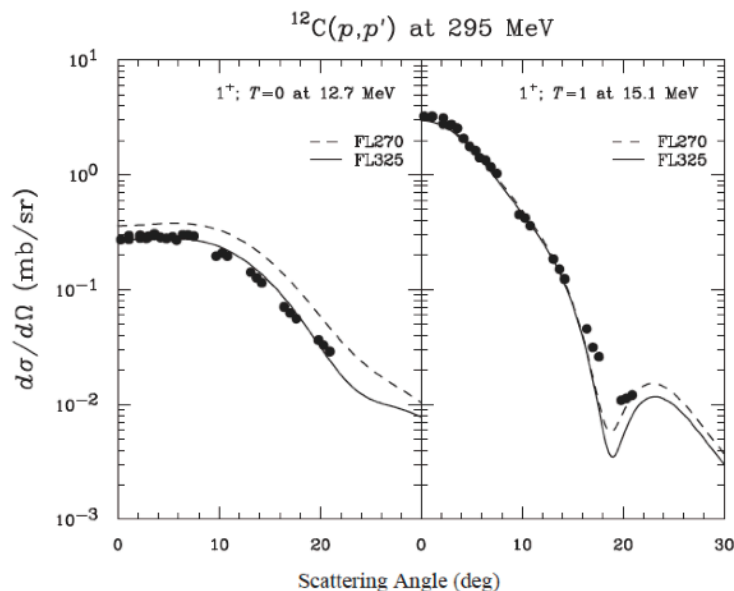
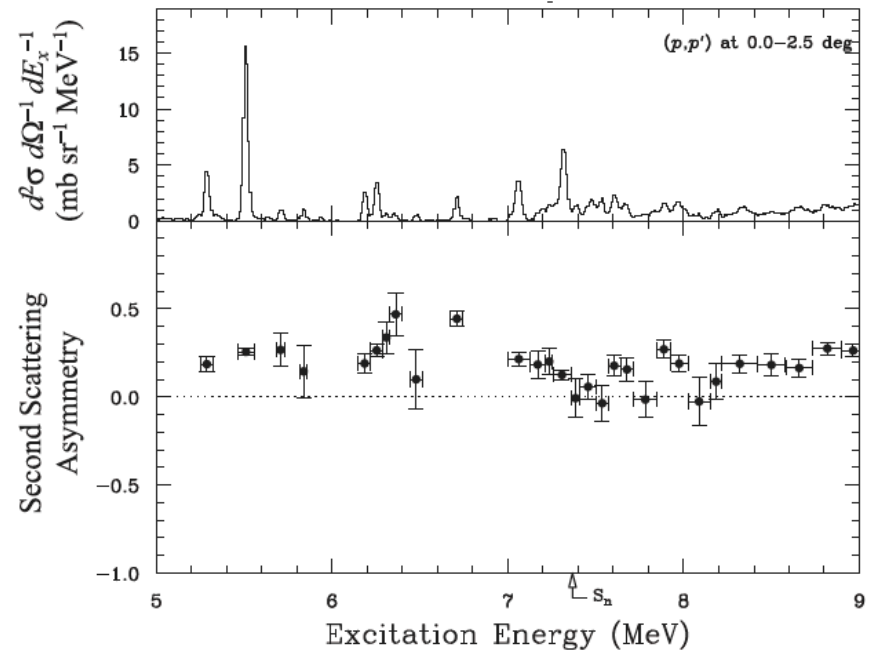
$^{208}\text{Pb}(p,p')$ at $E_p=295$ MeV



- あまたの較正や実験データの不具合の対処をくぐり抜けて…

どうしてデータ解析に2年も3年もかかるのか、と質問されることがありますが。

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

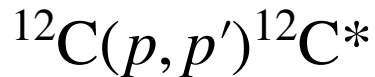


さらに理論との比較、物理の検討を進めて

ついに論文出版！

練習問題：質量欠損法

反跳核の励起エネルギーを計算せよ



標的原子核

炭素 1 2

入射陽子運動エネルギー

300 MeV

反跳陽子運動量

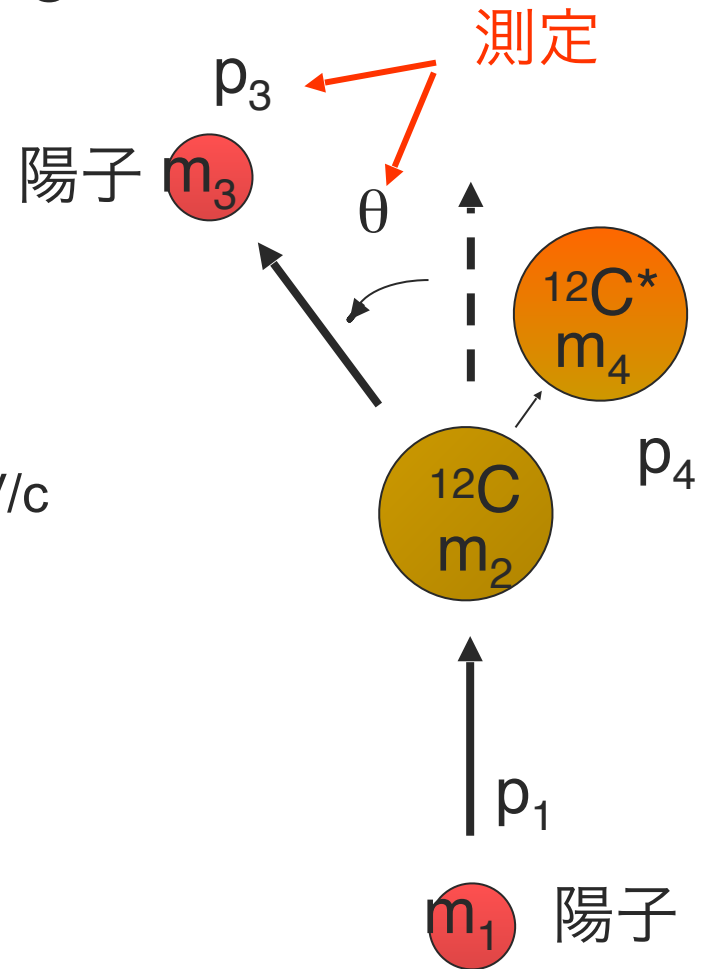
$p_3 = 783.3 \text{ MeV}/c$

散乱角

$\theta = 10^\circ$

特殊相対論で計算のこと

※反跳核の角度と運動量も出せるよ

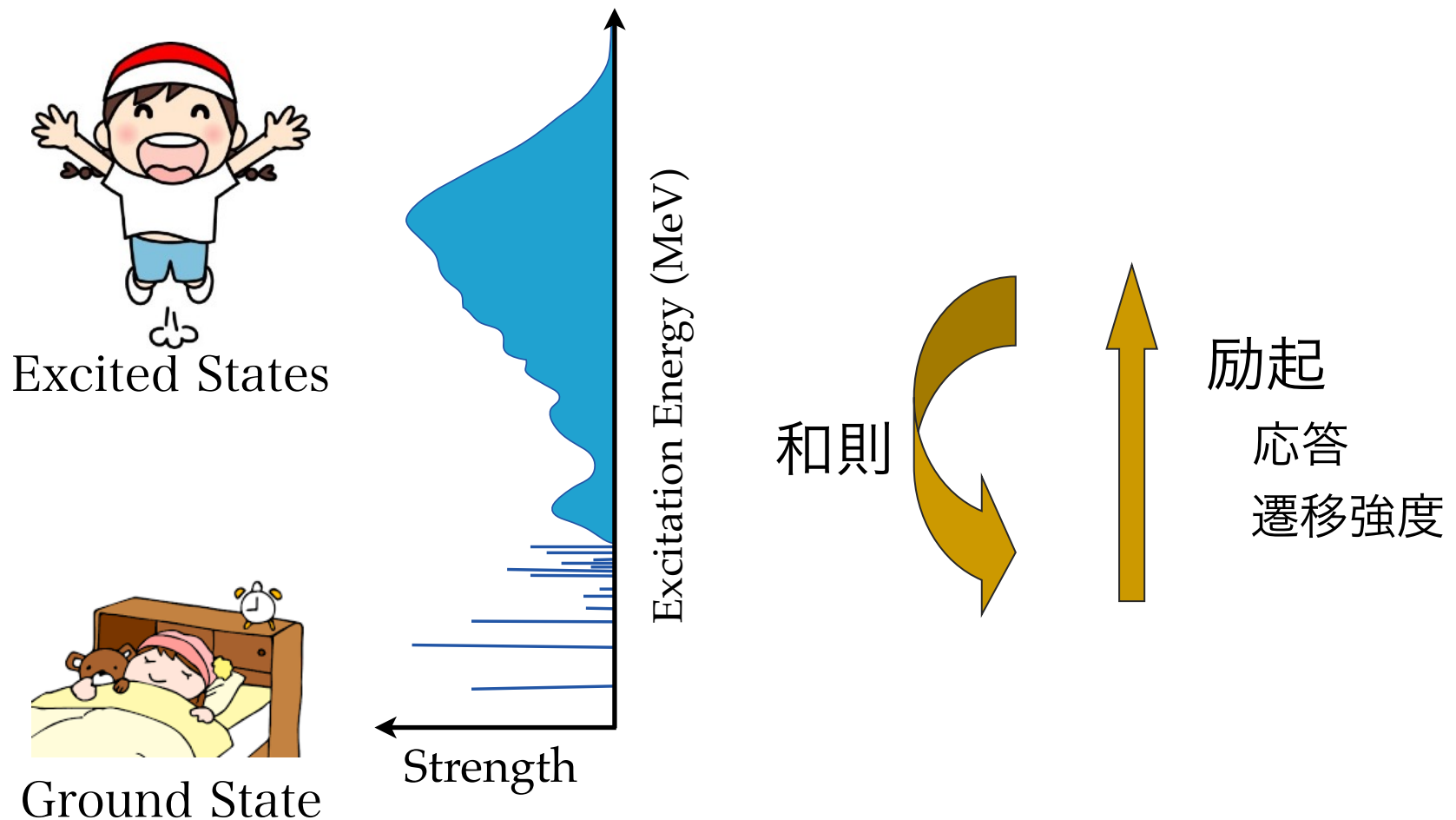


実験室系

IV 和則 (Sum Rules)

和則(Sum-Rule)とは

基底状態から励起状態への遷移強度を足し上げることに
より、基底状態の性質を引き出す関係式

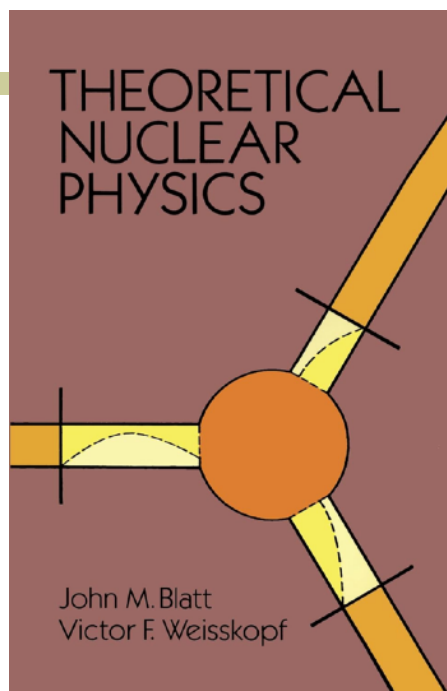
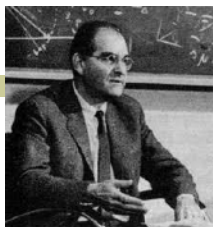


A.B. Migdal 1944

→どのような分布が観測されるのか？



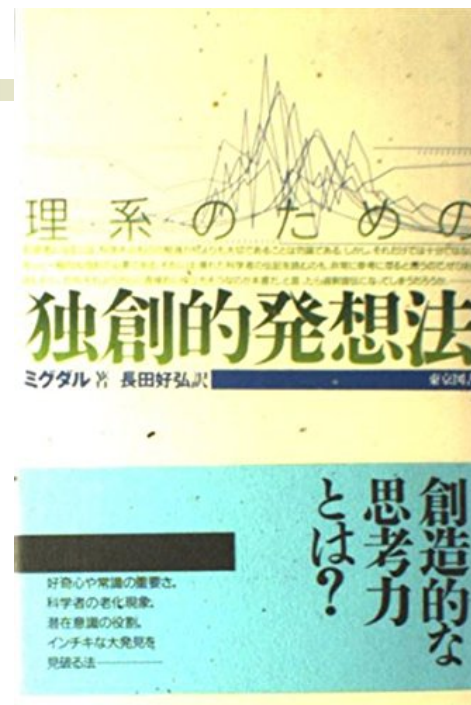
A.B. Migdal



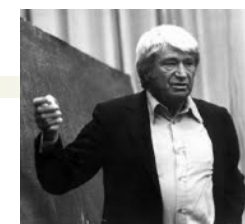
J.M. Blatt & V.F. Weisskopf
著 1952

Weisskopf Unit

= 1核子の軌道が遷移する
時の遷移強度の大きさ



A.B. Migdal著
長田好弘訳



発見すること自体が科学者の目的であってはならない。科学者の仕事は、自分がたずさわっている科学の分野の、深く詳細な研究をおこなうことである。新しい発見は、そうした**研究の副産物として生じる**ものである。

他の専門分野の人びとには注目されないような**小さな発見**は絶え間なく行われている。**科学者の仕事を真に価値あるもの**にしているのは、まさに、これらであることを知る必要がある。

励起強度分布のモーメントと和則

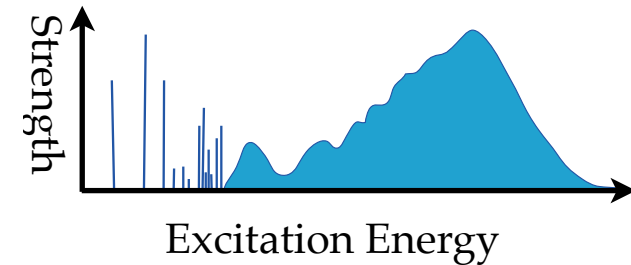
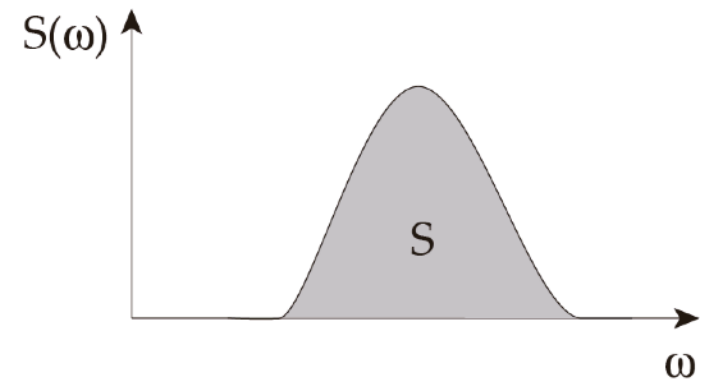
オペレータ O によって励起する状態の励起強度関数 (Strength Function)

$$S(\omega) \equiv \sum_k \left| \langle k | O | 0 \rangle \right|^2 \delta(\omega - \omega_k)$$

ω : 励起エネルギー

$|0\rangle$ 基底状態 $\omega_0 = 0$

$|k\rangle$ 状態状態 k (励起エネルギー ω_k)



励起強度関数 $S(\omega)$ の p 次のモーメント

$$m_p \equiv \int_0^\infty S(\omega) \omega^p d\omega = \sum_k \left| \langle k | O | 0 \rangle \right|^2 \omega_k^p$$

励起強度分布のモーメントと和則

励起強度関数 $S(\omega)$ の0次のモーメント

$$m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega = \sum_k \left| \langle k | O | 0 \rangle \right|^2$$

Non Energy-Weighted Sum-Rule

励起強度関数 $S(\omega)$ の1次のモーメント

$$m_1 = \int_0^\infty S(\omega) \omega d\omega = \sum_k \left| \langle k | O | 0 \rangle \right|^2 \omega_k$$

Energy-Weighted Sum-Rule

励起強度関数 $S(\omega)$ の-1次のモーメント

$$m_{-1} = \int_0^\infty \frac{S(\omega)}{\omega} d\omega = \sum_k \left| \langle k | O | 0 \rangle \right|^2 \frac{1}{\omega_k} \quad = \text{polarizability (分極率)}$$

Inversely Energy-Weighted Sum-Rule

モーメントと意味

全人数

$$S = m_0 \equiv \int_0^\infty S(\omega) d\omega = \sum_k |\langle k | O | 0 \rangle|^2$$

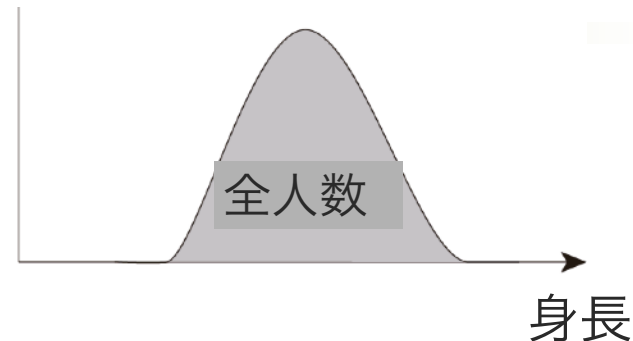
平均身長

$$\bar{\omega} = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\int_0^\infty S(\omega) \omega d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} = \frac{\sum_k |\langle k | O | 0 \rangle|^2 \omega_k}{\sum_k |\langle k | O | 0 \rangle|^2}$$

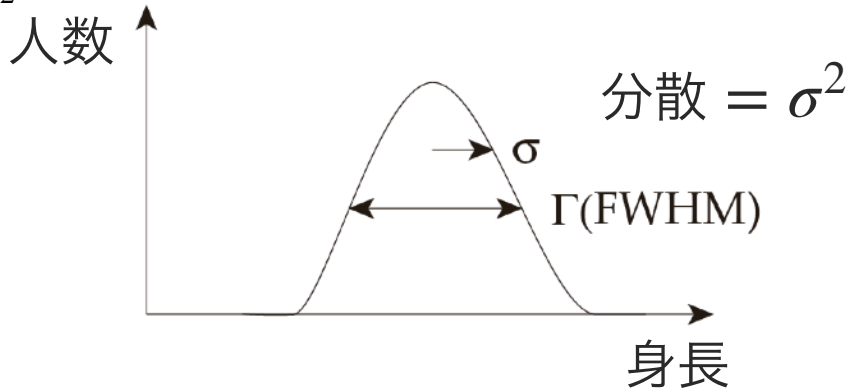
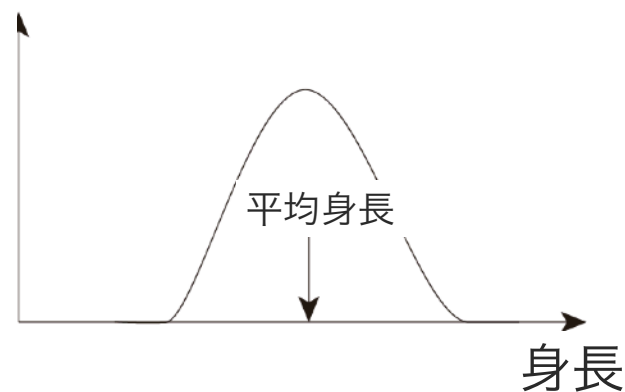
分散

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^2 = \frac{\int_0^\infty S(\omega) \omega^2 d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} - \left(\frac{\int_0^\infty S(\omega) \omega d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} \right)^2 \\ &= \frac{\int_0^\infty S(\omega) (\omega - \bar{\omega})^2 d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} \end{aligned}$$

人数



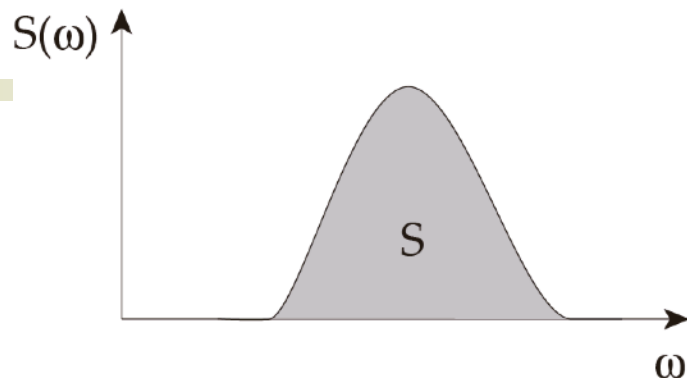
人数



モーメントと意味

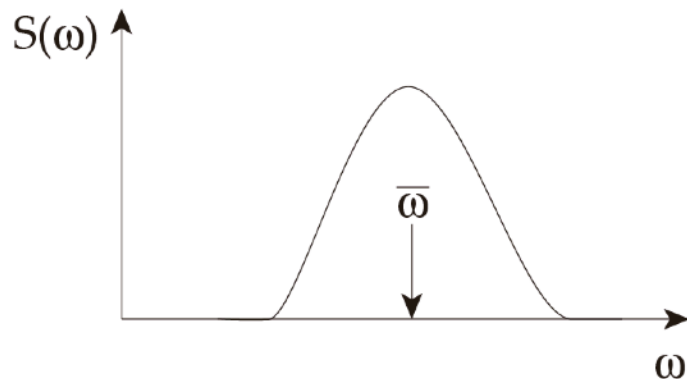
全励起強度

$$S = m_0 \equiv \int_0^\infty S(\omega) d\omega = \sum_k |\langle k | O | 0 \rangle|^2$$



平均励起エネルギー

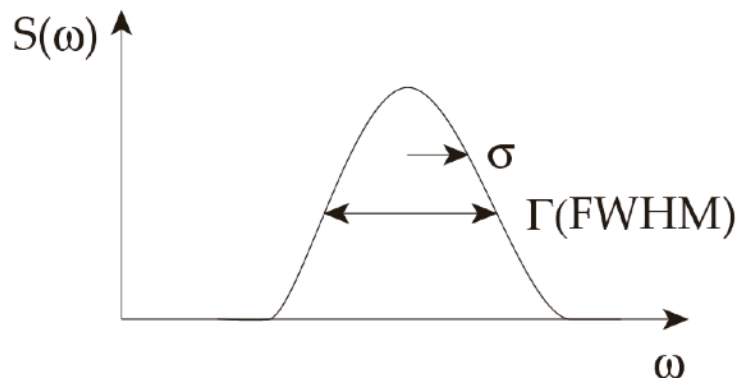
$$\bar{\omega} = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\int_0^\infty S(\omega) \omega d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} = \frac{\sum_k |\langle k | O | 0 \rangle|^2 \omega_k}{\sum_k |\langle k | O | 0 \rangle|^2}$$



分散

$$\sigma^2 = \frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^2 = \frac{\int_0^\infty S(\omega) \omega^2 d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} - \left(\frac{\int_0^\infty S(\omega) \omega d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega} \right)^2$$

$$= \frac{\int_0^\infty S(\omega) (\omega - \bar{\omega})^2 d\omega}{\int_0^\infty S(\omega) d\omega}$$



全ての励起状態に関する積算（積分値）

対応するオペレータに関する基底状態の期待値を表す。

$$\begin{aligned} m_p &\equiv \int_0^\infty S(\omega) \omega^p d\omega = \sum_k \left| \langle k | O | 0 \rangle \right|^2 \omega^p & O: \text{エルミート演算子} \\ & & O = O^\dagger \\ &= \sum_k \langle 0 | O | k \rangle \langle k | O | 0 \rangle \omega^p \\ &= \sum_k \langle 0 | O \omega^p | k \rangle \langle k | O | 0 \rangle \\ &= \sum_k \langle 0 | O H^p | k \rangle \langle k | O | 0 \rangle & \text{完全系} \\ &= \langle 0 | O H^p O | 0 \rangle \end{aligned}$$

励起状態への遷移を全て調べると基底状態の性質が分かる。

基底状態の期待値をとるオペレータは、ハミルトニアン H とオペレータ O の交換(半交換)関係で表すことができる（ことがある）。

$$m_0 = \langle 0 | OH^0 O | 0 \rangle = \langle 0 | O^2 | 0 \rangle$$

$$\text{交換関係} \quad [A, B] = AB - BA$$

$$\text{反交換関係} \quad \{A, B\} = AB + BA$$

$$m_1 = \langle 0 | OH^1 O | 0 \rangle = \frac{1}{2} \langle 0 | [O, [H, O]] | 0 \rangle$$

$$m_2 = \langle 0 | OH^2 O | 0 \rangle = \frac{1}{2} \langle 0 | \{[O, H], [H, O]\} | 0 \rangle$$

$$m_3 = \langle 0 | OH^3 O | 0 \rangle = \frac{1}{2} \langle 0 | [[O, H], [H, [H, O]]] | 0 \rangle$$

原子核の多様な振動モード：巨大共鳴

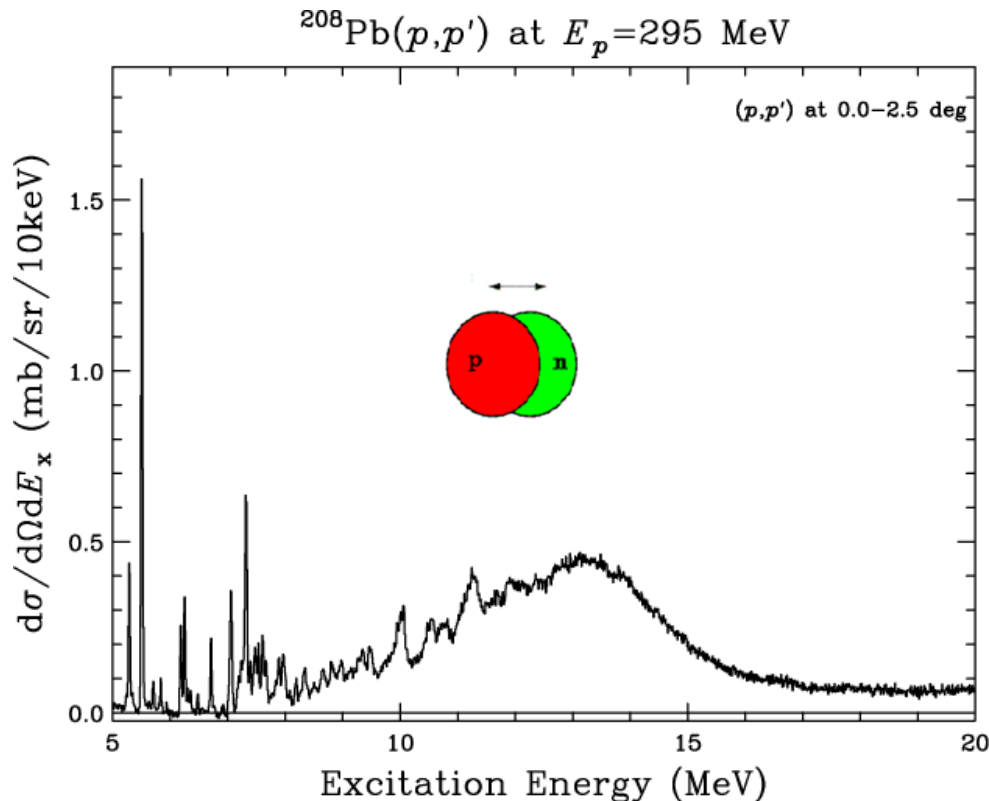
		アイソ・スカラー 電気的多重極	アイソ・ベクトル 電気的多重極	アイソ・スカラー 磁気的多重極	アイソ・ベクトル 磁気的多重極
	$(\Delta T, \Delta S)$	$(0, 0)$	$(1, 0)$	$(0, 1)$	$(1, 1)$
単極振動	$\Delta L = 0$				
双極振動	$\Delta L = 1$	—			
四重極振動	$\Delta L = 2$				
...					

図 5.40 各種の振動モード

Giant Dipole Resonance (GDR)

Isovector (Electric) Giant Dipole Resonance

$$O^{\Delta L=1, \Delta S=0, \Delta T=1} = \sum_{i=1}^A r_i Y_1(\hat{r}_i) \vec{\tau}_i$$



GDR励起強度と和則: TRK和則

$$D = O(IVE1) = \sum_i e_i r_i Y_1(\hat{r})$$
$$\rightarrow e \left[\frac{N}{A} \sum_i^Z r_i Y_1(\hat{r}_i) - \frac{Z}{A} \sum_i^N r_i Y_1(\hat{r}_i) \right] \quad \text{重心が動かない様に補正}$$

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m_N} + V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A)$$

$$[D, V] = 0$$

仮定: ポテンシャル V が核子の位置 $\mathbf{r}_i$ のみの関数である。

1次のモーメント (Energy Weighted Sum-Rule)

$$m_1^{IVE1} = \frac{1}{2} \left\langle 0 \left| [D, [H, D]] \right| 0 \right\rangle = \frac{8e^2}{9\pi m_N} \frac{ZN}{A}$$

Thomas-Reich-Kuhn (TRK)和則

「原子核の巨大共鳴状態」 鈴木敏男、物理学最前線 19 共立出版

「原子核構造論」 高田・池田、朝倉書店

GDR励起強度と和則: TRK和則

実験値/TRK和則

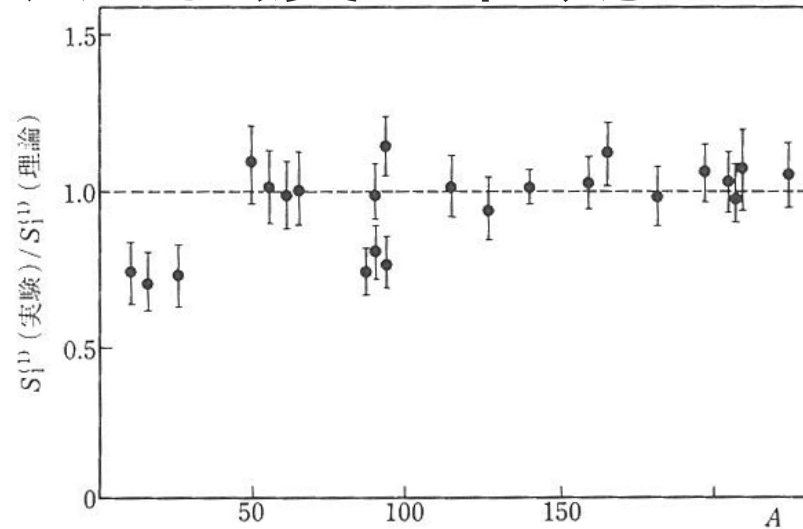
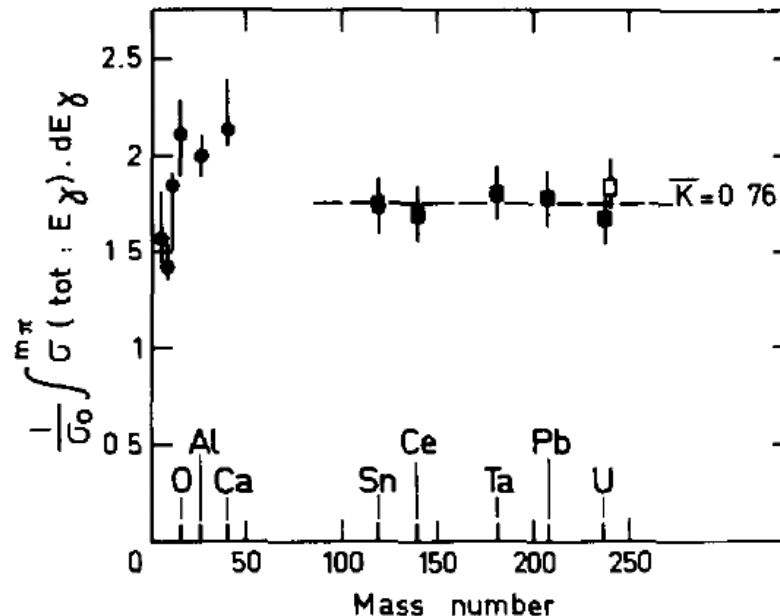


図 3.1 1- 状態励起に対する和則値の理論値と実験値の比⁸⁾
実験値は励起エネルギー30 MeV までの和. A は原子核の質量数

GDRはTRK和則値
の大部分を尽くす
= 巨大共鳴



さらに高いエネルギー
~140 MeV まで積分す
ると、TRK和則の1.8
倍程度になる。

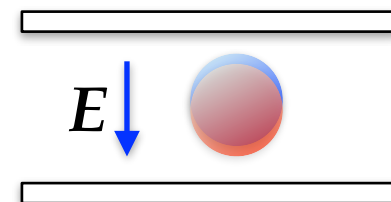
Enhancement factor
 $\kappa = \sim 1.8$

1-状態(E1 励起)の平均エネルギー

ミグダルは和則を使って平均励起エネルギーを求めることを思いついた。

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{m_1}{m_0}} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty S(\omega)\omega d\omega}{\int_0^\infty S(\omega)\omega^{-1}d\omega}} = \sqrt{\frac{\text{TRK 和則}}{\text{分極率}}}$$

原子核を外電場の中に置く



ハミルトニアンは外場がない場合の H_0 と外場 H_{ext} の和で表され

$$H = H_0 + H_{\text{ext}}$$

原子核の波動関数 Φ は一次の摂動で

$$\Phi = \Phi_0 - \sum_k \frac{\langle k | O^{E1} | 0 \rangle}{\omega_k} |k\rangle$$

$$= m_1^{E1} = \text{電気分極率}$$

E1 Polarizability

外電に対する電荷分布の
分極の大きさを表す

1-状態(E1 励起)の平均エネルギー

原子核の分極率は、

- ・ 電場により陽子と中性子の重心をずらす力
- ・ 対称エネルギー増加による復元力

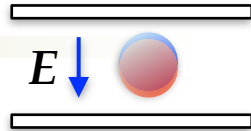
のバランスで決まる。



電場による分離
の力



対称エネルギーに
よる復元力



$$F = - \frac{\partial E}{\partial z}$$

原子核の質量公式

$$M(A, Z)c^2 = (NM_n + ZM_p)c^2 - a_v A + a_s A^{2/3} + a_c Z^2 A^{-1/3} + a_a (N - Z)^2 A^{-1} + \delta$$

対称エネルギー → 対称エネルギー密度 $\propto a_a \frac{(\rho_n - \rho_p)^2}{\rho}$

陽子・中性子が同じ半径(R)で球対称一様密度を持つと仮定

→ 分極率を a_a を用いて計算

$$m_{-1} = \frac{3AR^2}{320\pi a_a}$$

TRK和則

$$m_1 = \frac{8e^2}{9\pi m_N} \frac{ZN}{A}$$

$$\rightarrow \bar{\omega}^{E1} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{10a_a}{m}} \simeq 85A^{-1/3} \text{ (MeV)}$$

$$^{208}\text{Pb} \text{ の場合 } \rightarrow \bar{\omega}^{E1}(A = 208) = 14 \text{ MeV}$$

巨大共鳴の発見

ベータトロン加速器を持ちた実験により、
E1巨大共鳴(GDR)が発見される 1947年

$$\bar{\omega}^{E1} \simeq 85A^{-1/3} \text{ (MeV)}$$

Baldwin and Klaiber, Phys.Rev. (1947)

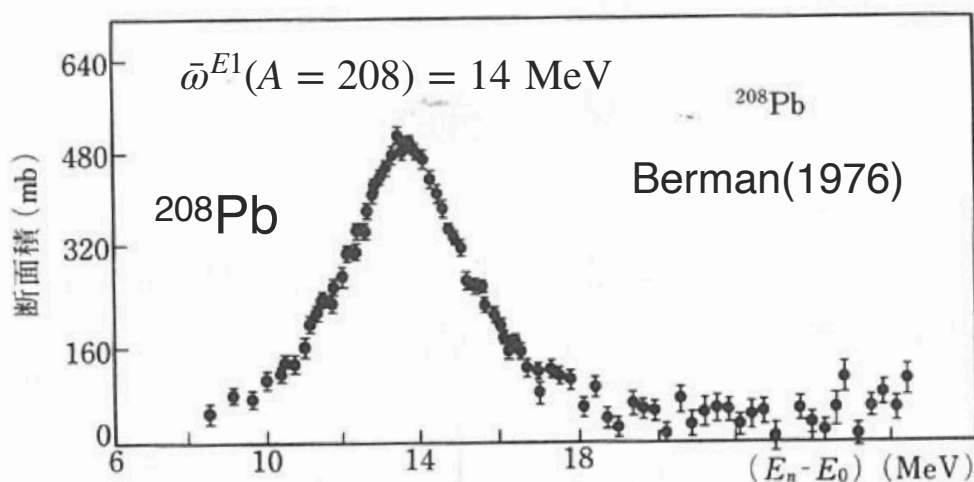


図 2.4 ^{208}Pb による光吸収断面積 (◆ は実験値⁶⁾ を示す)

理論の勝利!

ただし、ミグダルの初期論文では、E1和則に関する重心補正が入っていなかったので励起エネルギーを $\sqrt{2}$ 倍大きく見積もってしまっていた。

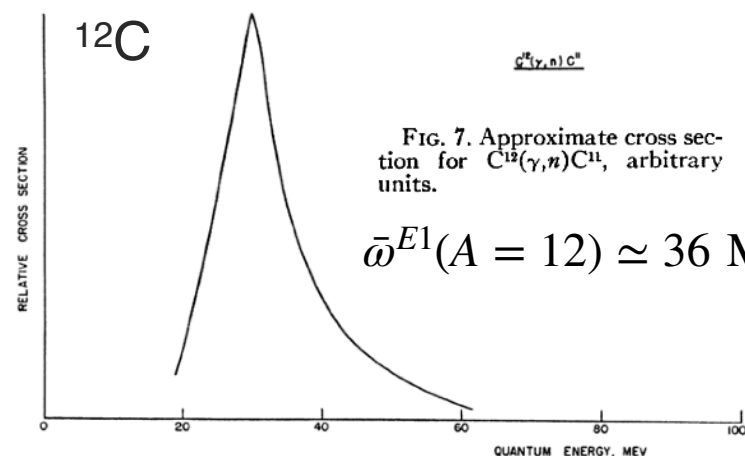


FIG. 7. Approximate cross section for $\text{C}^{12}(\gamma, n)\text{C}^{11}$, arbitrary units.

$$\bar{\omega}^{E1}(A = 12) \simeq 36 \text{ MeV}$$

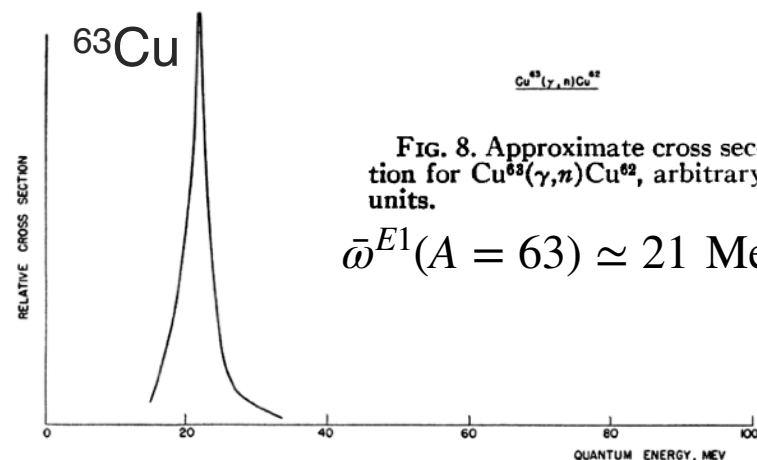
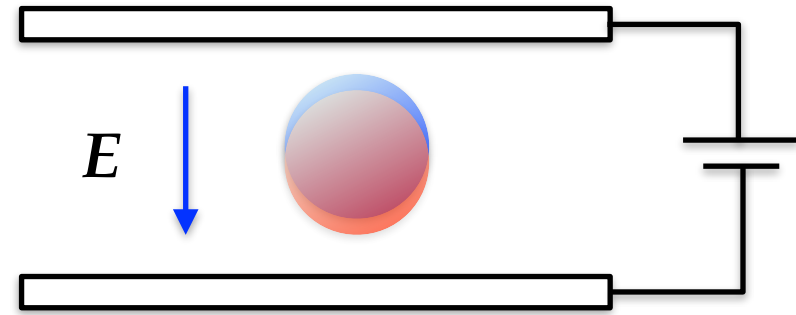
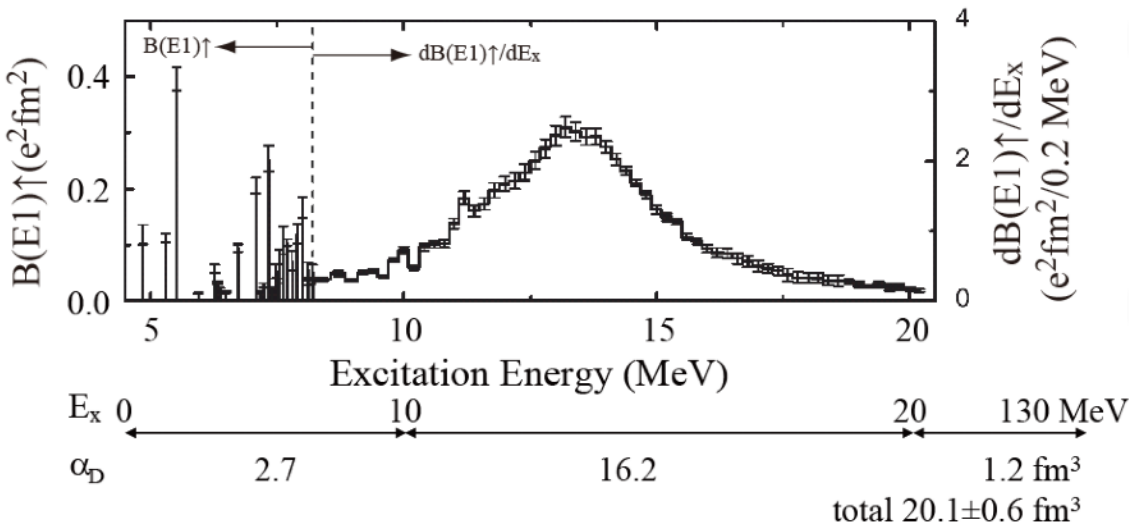


FIG. 8. Approximate cross section for $\text{Cu}^{63}(\gamma, n)\text{Cu}^{62}$, arbitrary units.

$$\bar{\omega}^{E1}(A = 63) \simeq 21 \text{ MeV}$$

GDRの m_{-1} 和則と誘電分極率



AT et al., PRL107, 062502(2011)

エネルギーを分母とする和則 m_{-1} を精度よく測定することにより、原子核を静電場に入れたときの電荷分布のずれである誘電分極率を決定した。

中性子星の状態方程式を決める重要な結果となった。

→ 後の講義で扱う

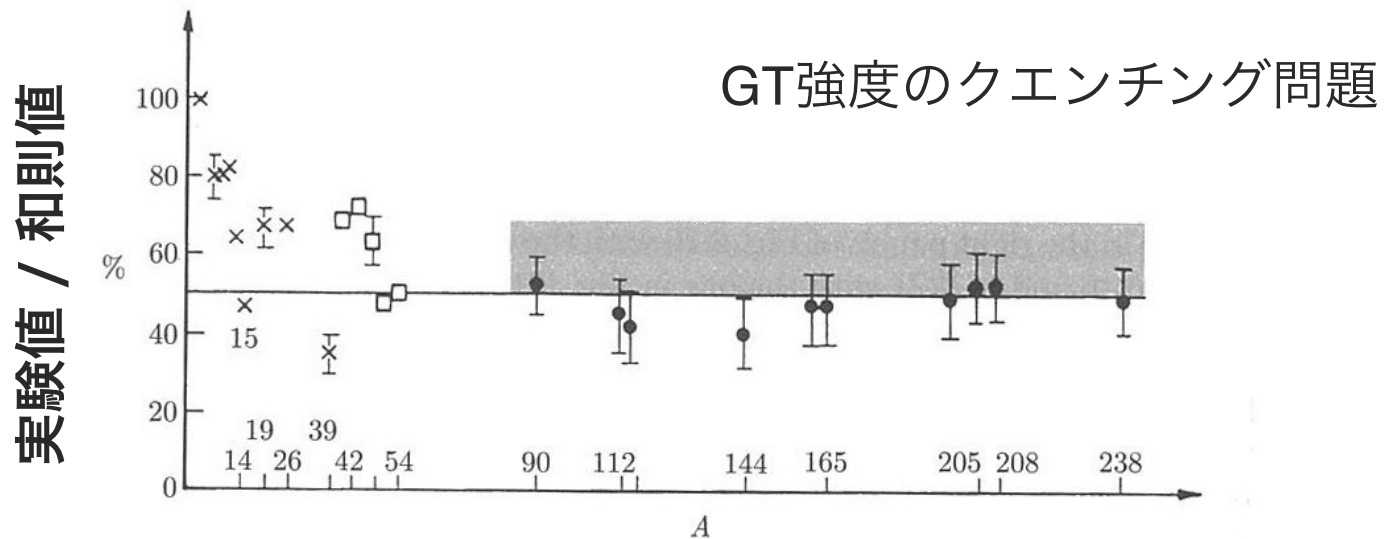
ガモフテラー遷移強度と和則

$$D = O^{0,\sigma,\tau} = \sum_{i=1}^A \sigma_i \tau_i$$

0次のモーメント (non-energy weighted sum-rule)

(p,n)側(-) と (n,p)側(+) の差

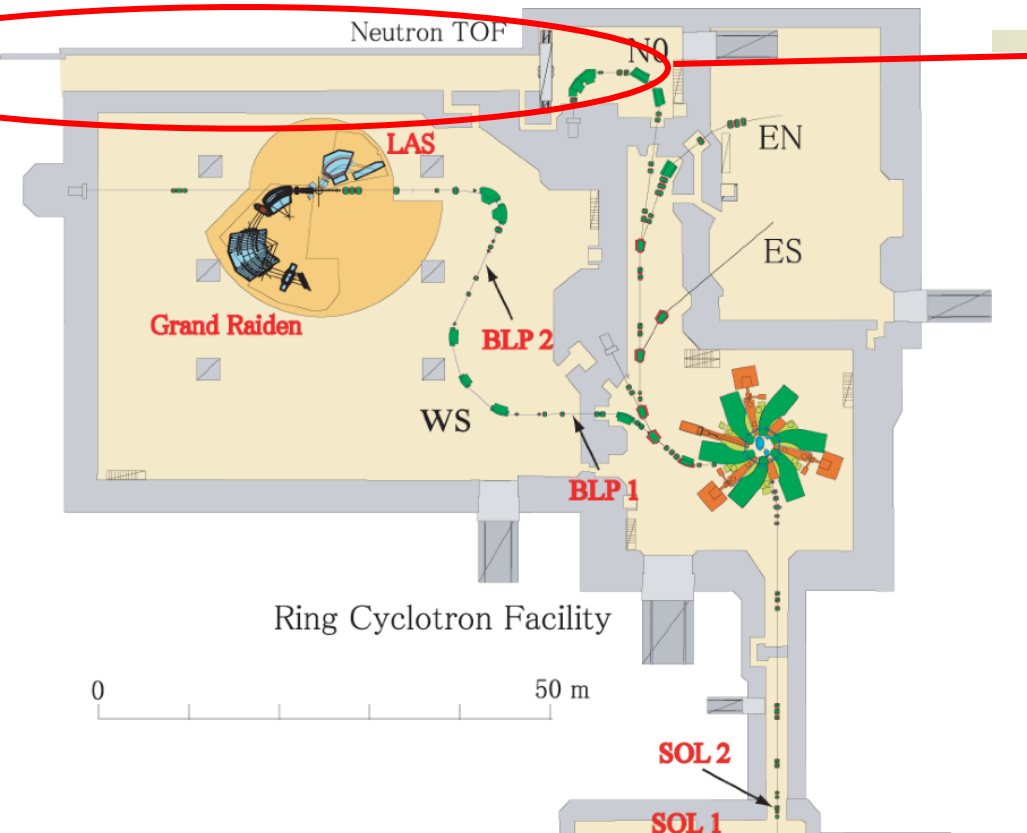
$$S_-^{(GT)} - S_+^{GT} = 3(N - Z) \quad \text{池田、藤井、藤田の和則}$$



「原子核の巨大共鳴状態」鈴木敏男、物理学最前線 19 共立出版

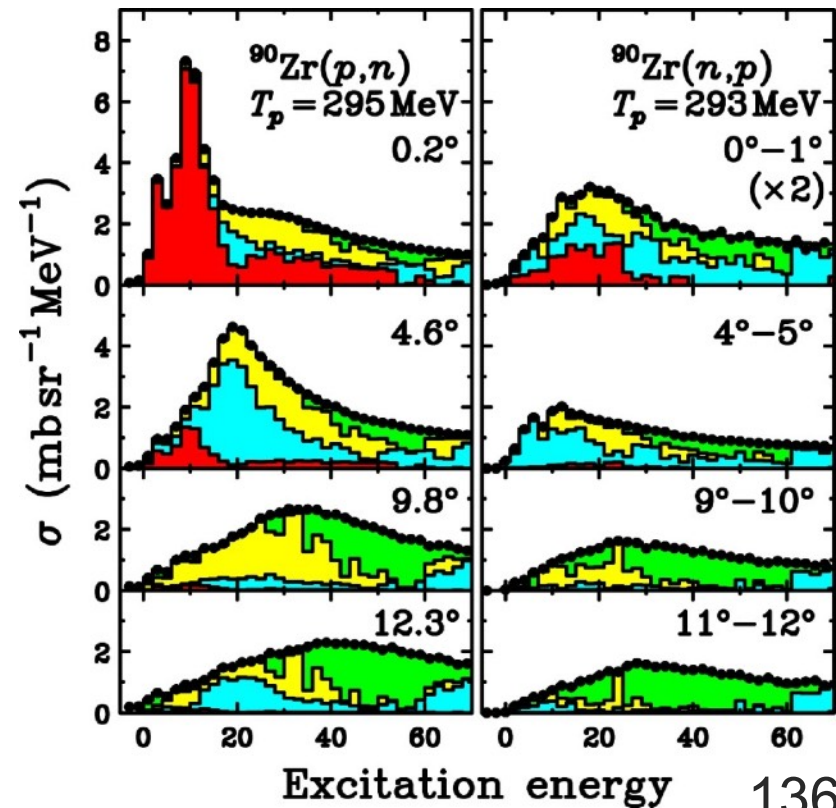
「原子核構造論」高田・池田、朝倉書店

100m n-TOF course



Neutron
Polarimeter
(NPOL-2)

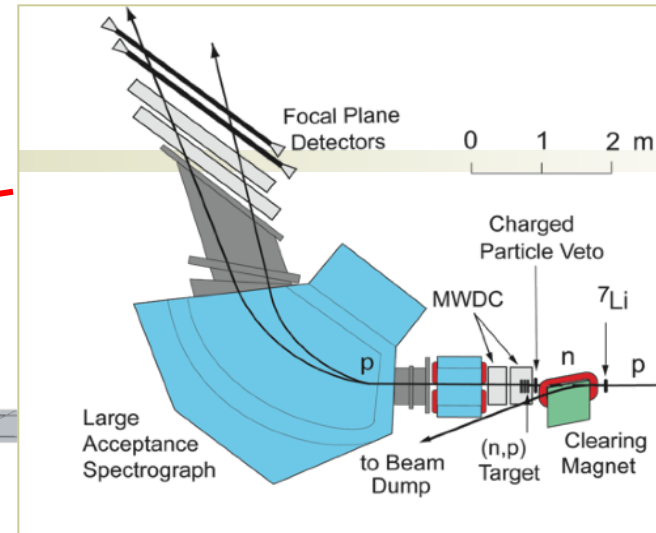
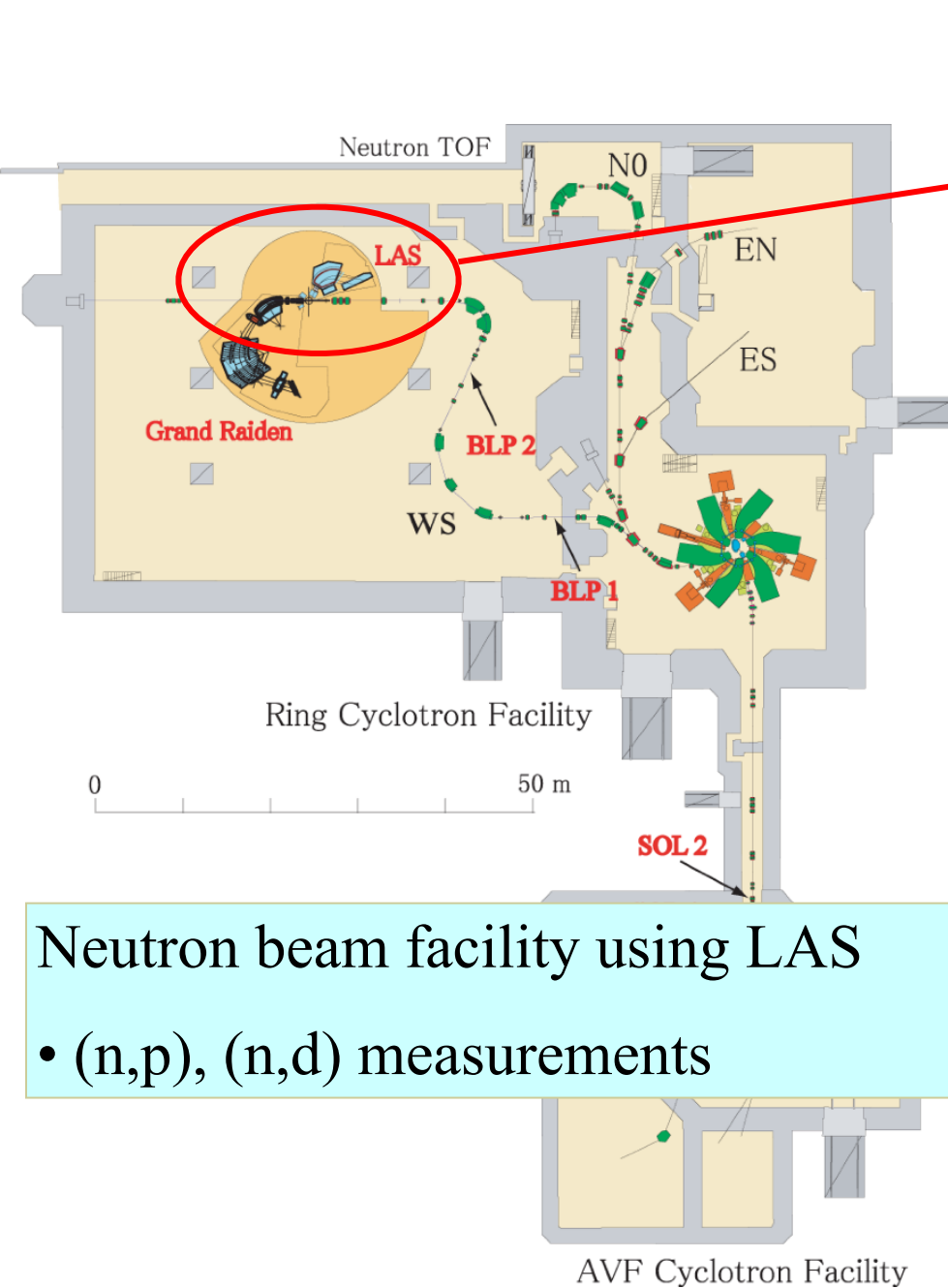
T. Wakasa et al.



Neutron TOF course and Neutron
Polarimeter (NPOL-2,3)

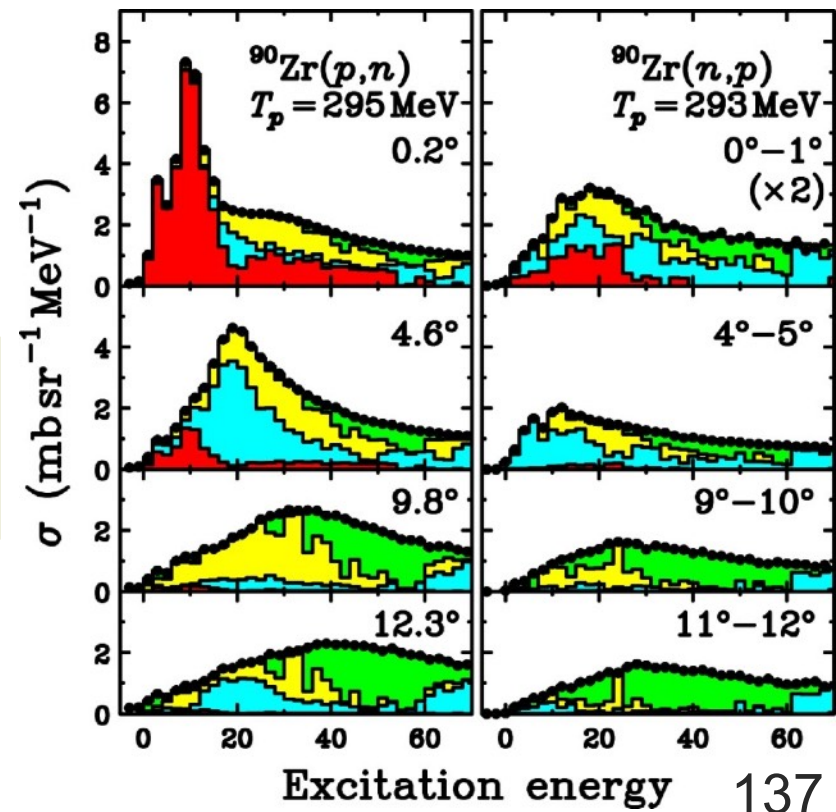
- (p,n) measurements for any spin-transfer coefficient

AVF Cyclotron Facility



Neutron
beam
facility

K. Yako et al.

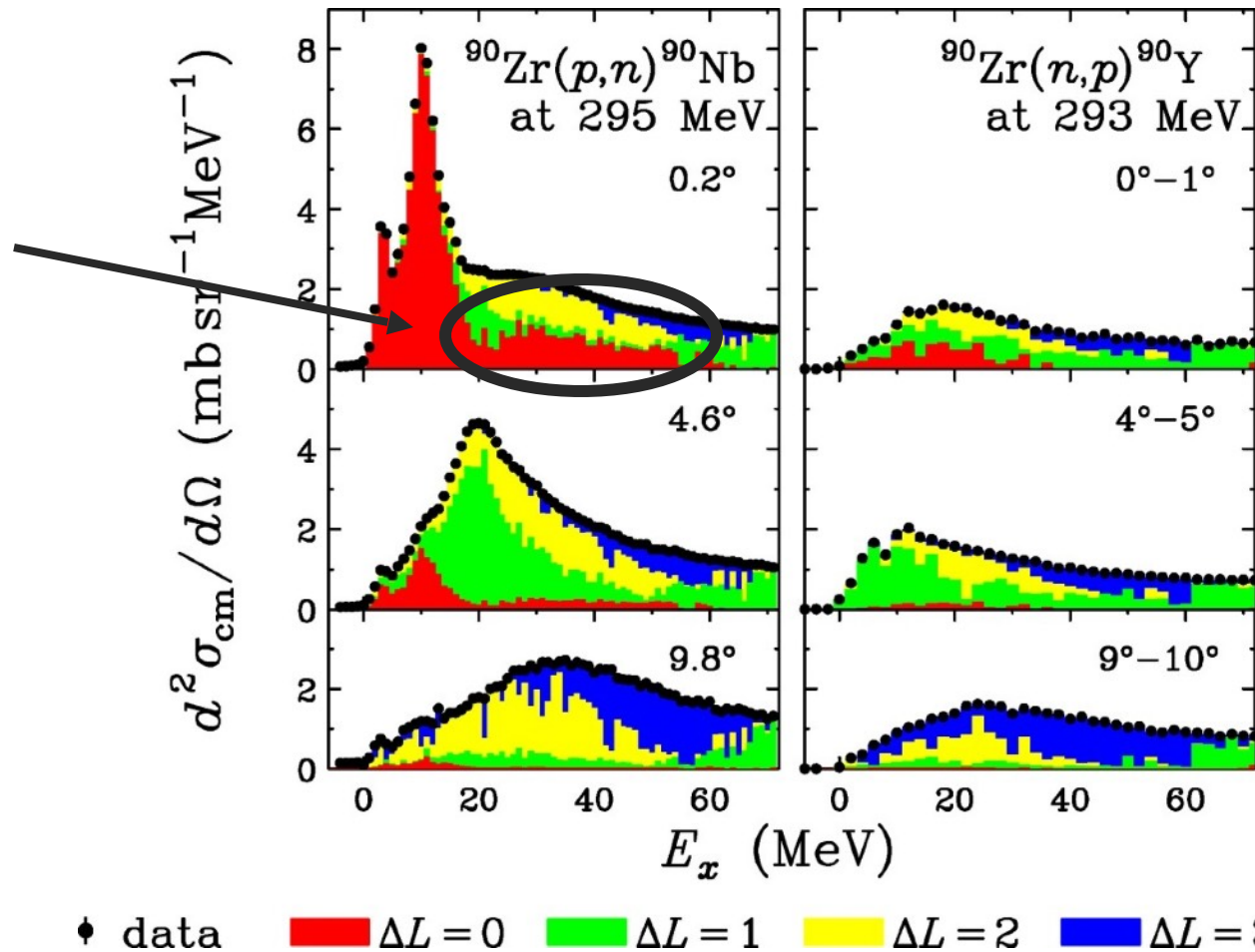


Neutron beam facility using LAS

- (n,p), (n,d) measurements

GT励起強度と和則

M. Ichimura, H. Sakai and T. Wakasa, PPNP. 56, 446 (2006).



~90%のストレングスが50 MeVの励起状態までに観測された

Menti

1298 4808



内容に関する質問（1日目）

講義中自由に質問してください