原子核におけるα粒子のBose-Einstein凝縮

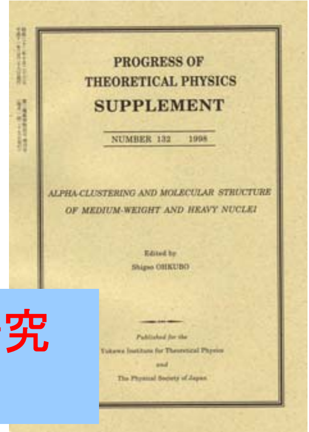
大久保茂男　S. Ohkubo
（高知女子大・環境理学科）

@

１９９９

クラスター模型　軽い領域だけでなく重い領域^{40}Ca-^{44}Ti　領域での成立　理論、実験

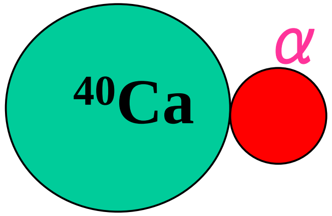
１９９８　PTP　Supplement　132　（山屋尭　追悼記念）



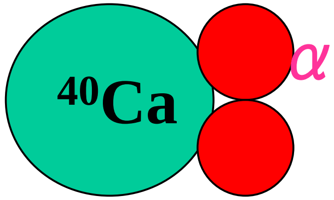
重い核の領域へのクラスター研究の道が切り開かれた

fp殻領域

^{44}Ti



^{48}Cr



クラスター模型の歴史と展開

２００５　基礎研シンポジウム

学問の系譜ーアインシュタインから湯川・朝永へ

素粒子論研究2006年3月号　Vol　112　No.6

物性研究　2006年6月号　Vol　86　No.3

（ダウンロード可能）

Schuck　の質問１９９９　Rab　（Croatia）　cluster　conference

^{48}Cr　の^{40}Ca＋α＋α　クラスター構造　の講演

α粒子の多体系でBose-Einstein凝縮はあるか？

Gambbir, Ring and Schuck:PRL 51, 1235 (1983):

A superfluid condensate of alpha particles ?

In conclusion we can say that our BCS-like theory for bosons in conjunction with the IBM2 Hamiltonian suggests that open-shell nuceli (open in protons and neutrons) may form a superfluid condensate of α particles rather than separate superfluid phases of proton and neutron pairs.

VOLUME 51, NUMBER 14 PHYSICAL REVIEW LETTERS 3 OCTOBER 1983

Nuclei: A Superfluid Condensate of α Particles? A Study within the Interacting-Boson Model

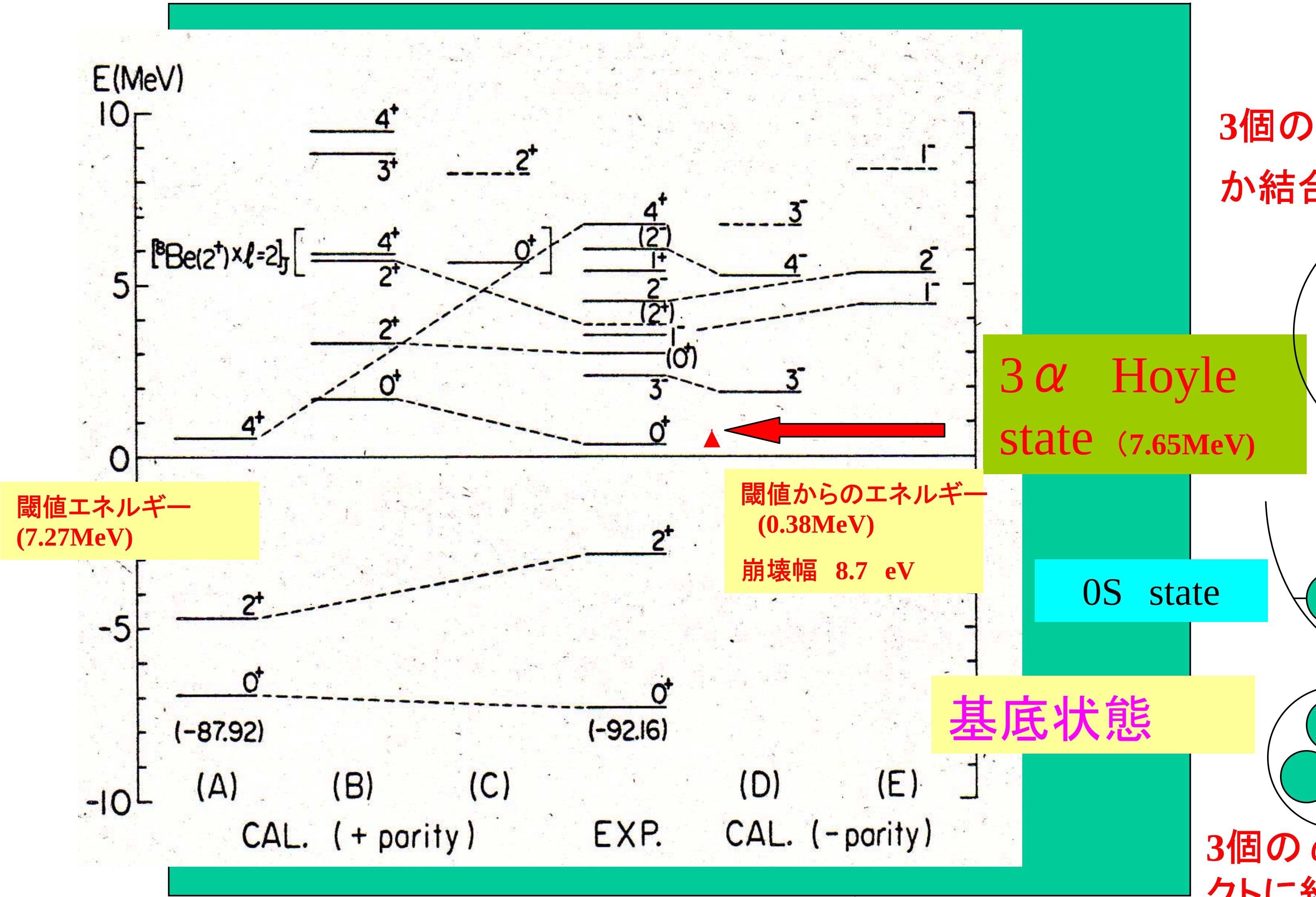
Y. K. Gambhir[a] and P. Ring
Physik-Department, Technische Universität München, D-8046 Garching, West Germany
and
P. Schuck
Institut des Sciences Nucléaires, F-38042 Grenoble, France
(Received 11 July 1983)

The authors have studied the question of whether pairs of neutrons and pairs of protons of the usual superfluid phases form a bound state to give rise to a superfluid condensate of "α particles." They indeed find indications for this to be the case from a BCS-like study for bosons using the proton-neutron interacting-boson model as well as from an even-odd effect in the number of pairs using experimental binding energies.

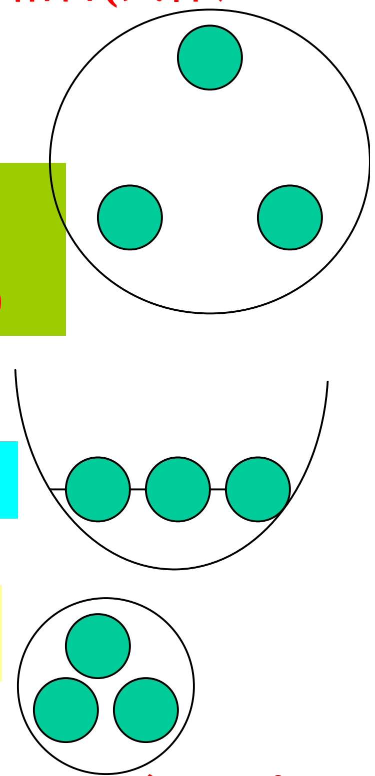
1977

Uegaki 3 alpha cluster model

:Energy level ^{12}C (PTP 57,1262(1977)) GCM



3個のαがゆるやか結合(気体）



3個のαがコンパクトに結合{固体）

1977

Kamimura 3 α RGM

INT. CONF. NUCLEAR STRUCTURE, TOKYO, 1977
... S. SOC. JAPAN 44 (1978) SUPPL. p. 225–231

The Resonating Group Method for 3-Cluster Systems Based on the Use of Generator Coordinate Kernels

—Application to the 3α Structure of ^{12}C and the 3α Reaction in Stellar Evolution—

Y. FUKUSHIMA and M. KAMIMURA†

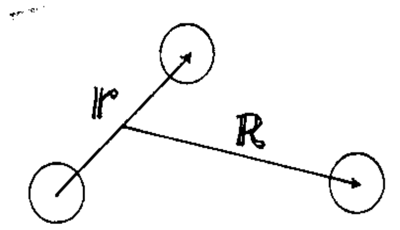
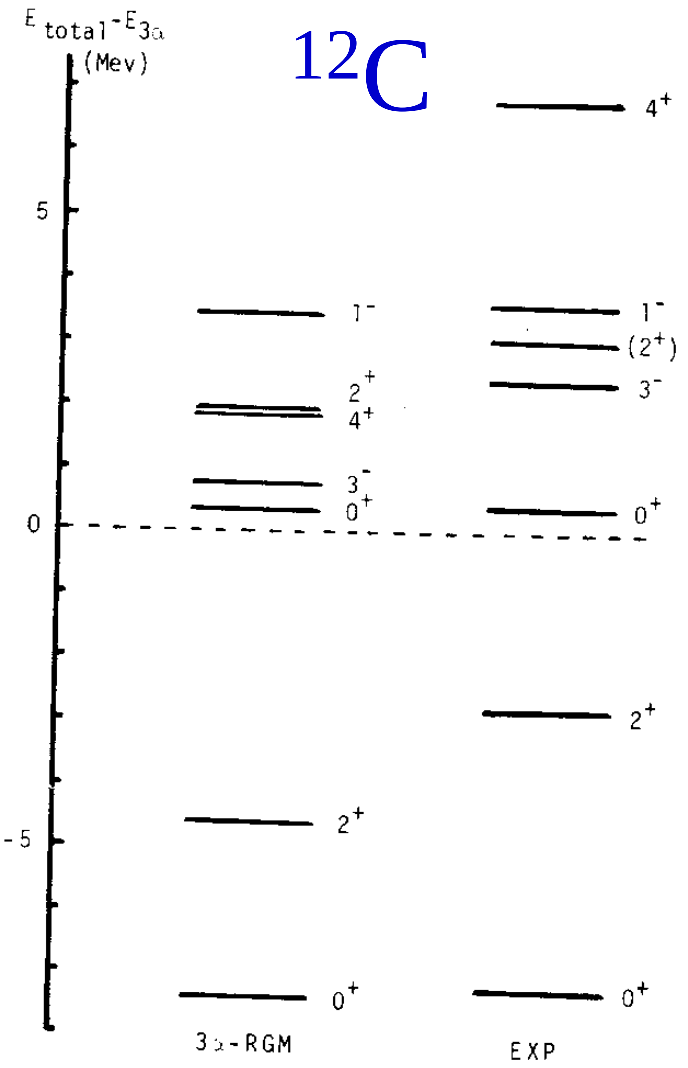


Fig. 1. Relative coordinates of the 3α system.



2004

Hoyle stateのdilute propertyの実験的検証

Rainbow, prerainbow

Bose-Einstein凝縮と核虹のエアリー構造

RAPID COMMUNICATIONS

PHYSICAL REVIEW C **70**, 041602(R) (2004)

Bose-Einstein condensation of α particles and Airy structure in nuclear rainbow scattering

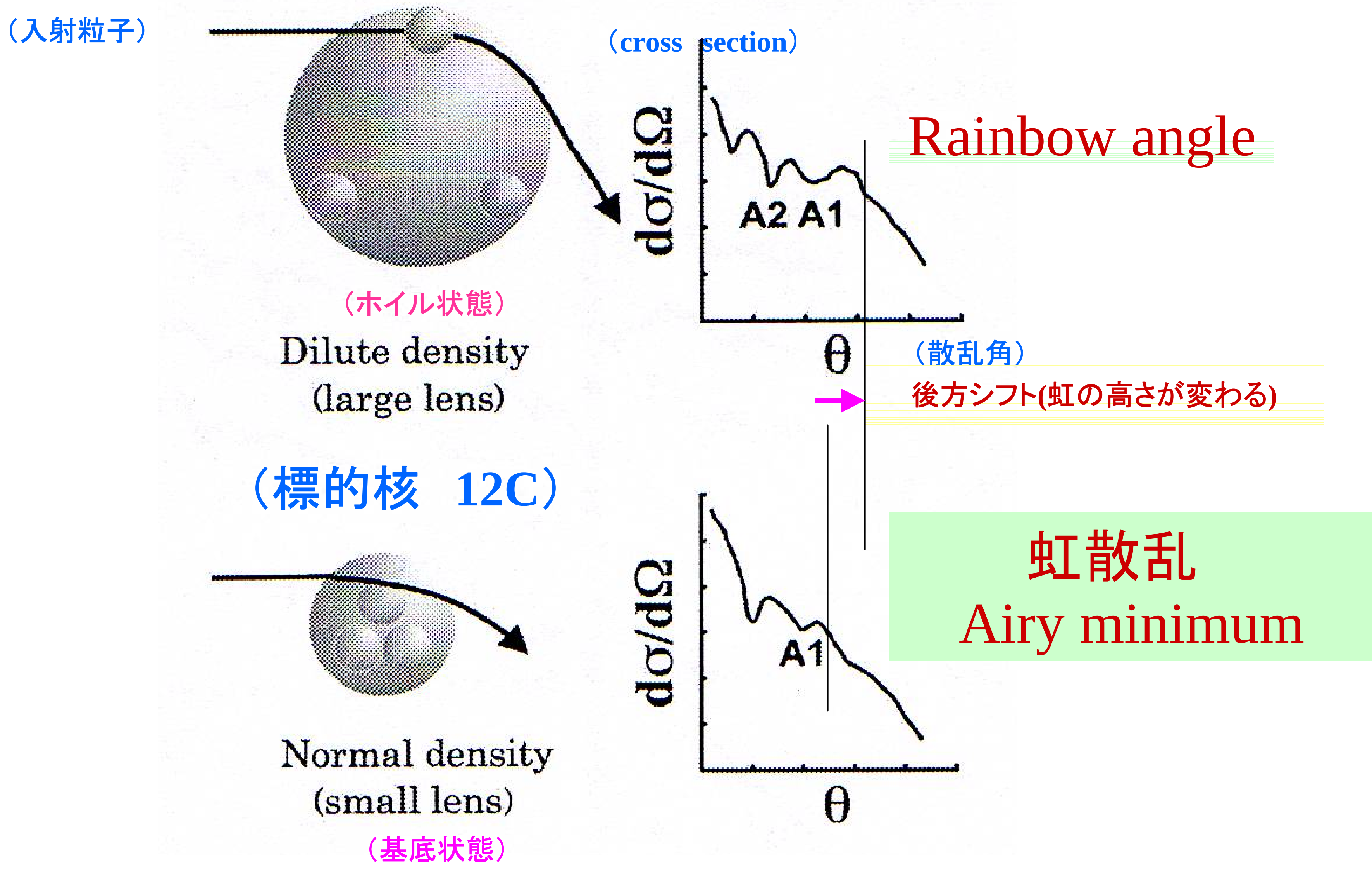
S. Ohkubo[1] and Y. Hirabayashi[2]

[1]*Department of Applied Science and Environment, Kochi Women's University, Kochi 780-8515, Japan*

[2]*Information Initiative Center, Hokkaido University, Sapporo 060-0810, Japan*

(Received 4 December 2003; published 25 October 2004)

予想：Illustrative Figure of Airy structure and scattering



解析：
Hoyle 状態 の構造とエアリー構造

$\alpha + {}^{12}C$ 散乱のチャネル結合法による解析

- ${}^{12}C$の波動関数 3α RGM~ボーズ凝縮の波動関数
- 密度依存DDM3Y有効相互作用による畳込み

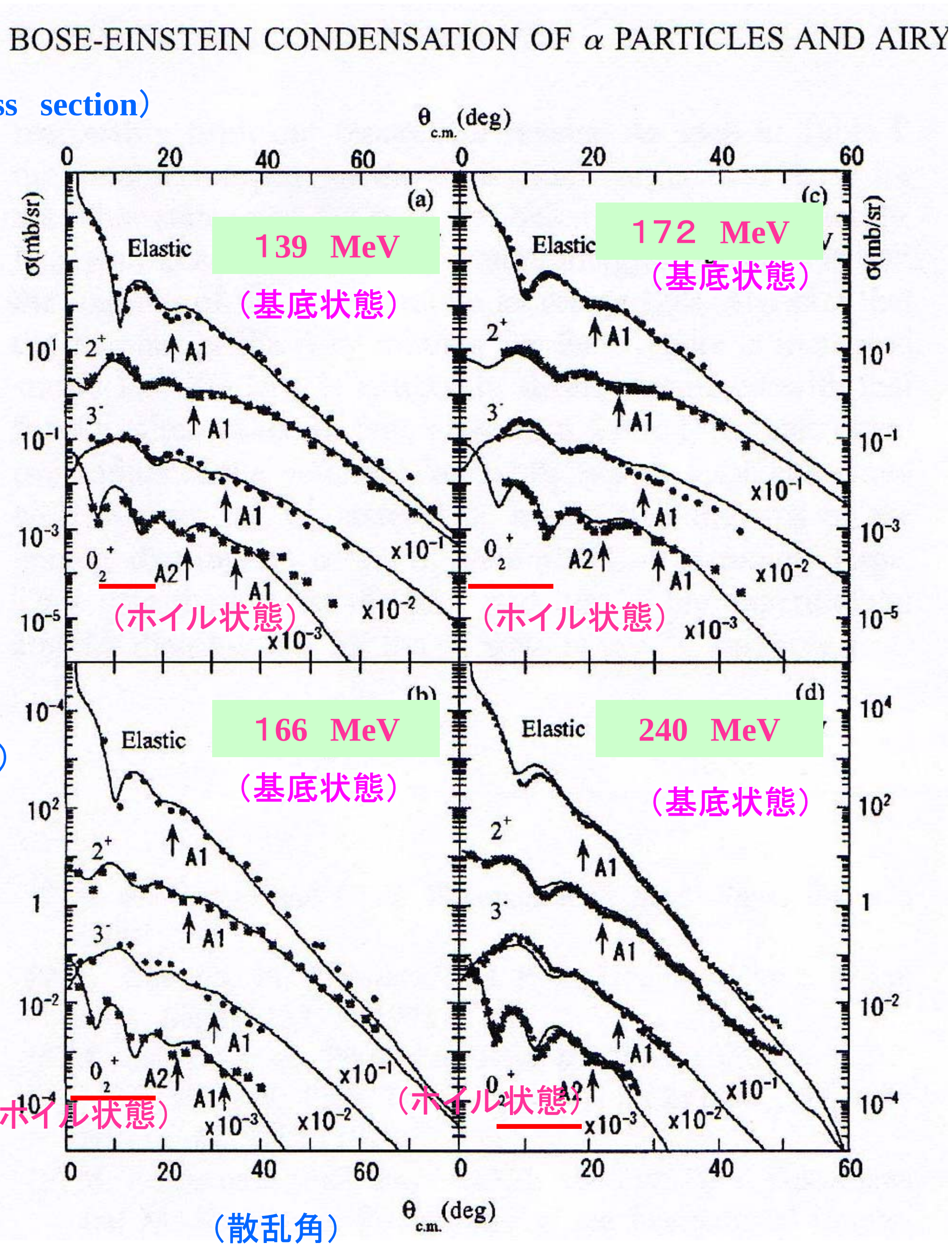
2004

$\alpha + {}^{12}C$ scattering

rainbow

Airy minimum

（cross　section）



2010.9.1

Potential parameters, rms, and volume integrals

TABLE I. The normalization factor N_R, volume integral per nucleon pair J_V, rms radius $\langle R^2 \rangle^{1/2}$, of the folding potential, and the strength of the imaginary potential. The radius R_W=4.7 fm and diffuseness a_W=0.7 fm of the imaginary potentials are used.

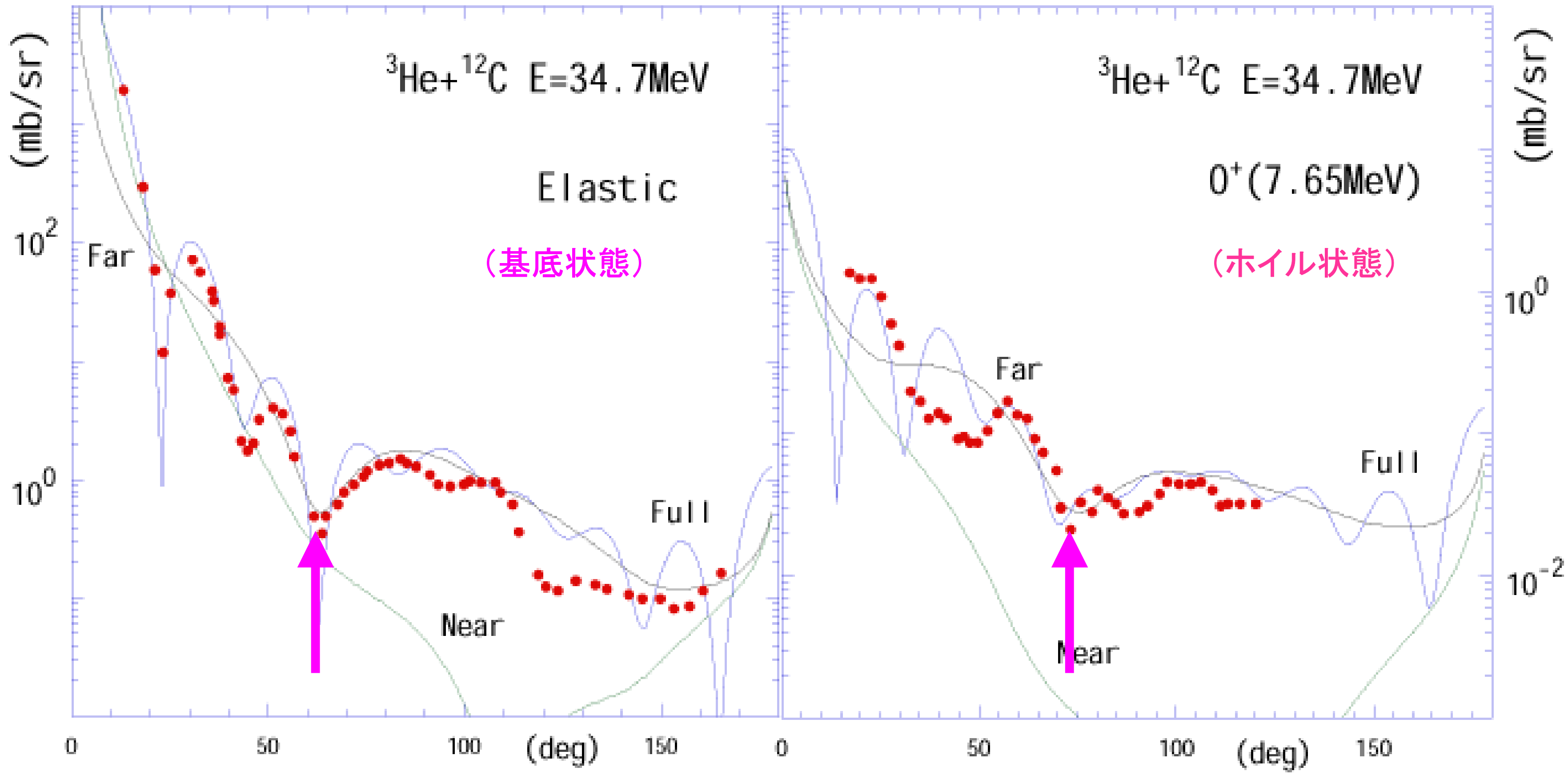
	E_L (MeV)	N_R		J^π	J_V (MeV fm^3)	$\langle R^2 \rangle^{1/2}$ (fm)	W (MeV)
（基底状態）	139	1.23		0_1^+	294	3.484	8.0
				2^+	291	3.469	10.0
				3^-	327	3.742	14.0
			（ホイル状態）	0_2^+	366	4.304	28.0
（基底状態）	166	1.26		0_1^+	286	3.499	7.0
				2^+	283	3.485	10.0
				3^-	320	3.752	14.0
			（ホイル状態）	0_2^+	358	4.310	27.0
（基底状態）	172.5	1.26		0_1^+	292	3.506	7.5
				2^+	289	3.493	9.0
				3^-	327	3.758	12.0
			（ホイル状態）	0_2^+	367	4.315	25.0
（基底状態）	240	1.42		0_1^+	264	3.532	7.5
				2^+	261	3.519	12.0
				3^-	295	3.777	17.0
			（ホイル状態）	0_2^+	330	4.328	30.0

2007

^{3}He+^{12}C scattering E=34.7 MeV

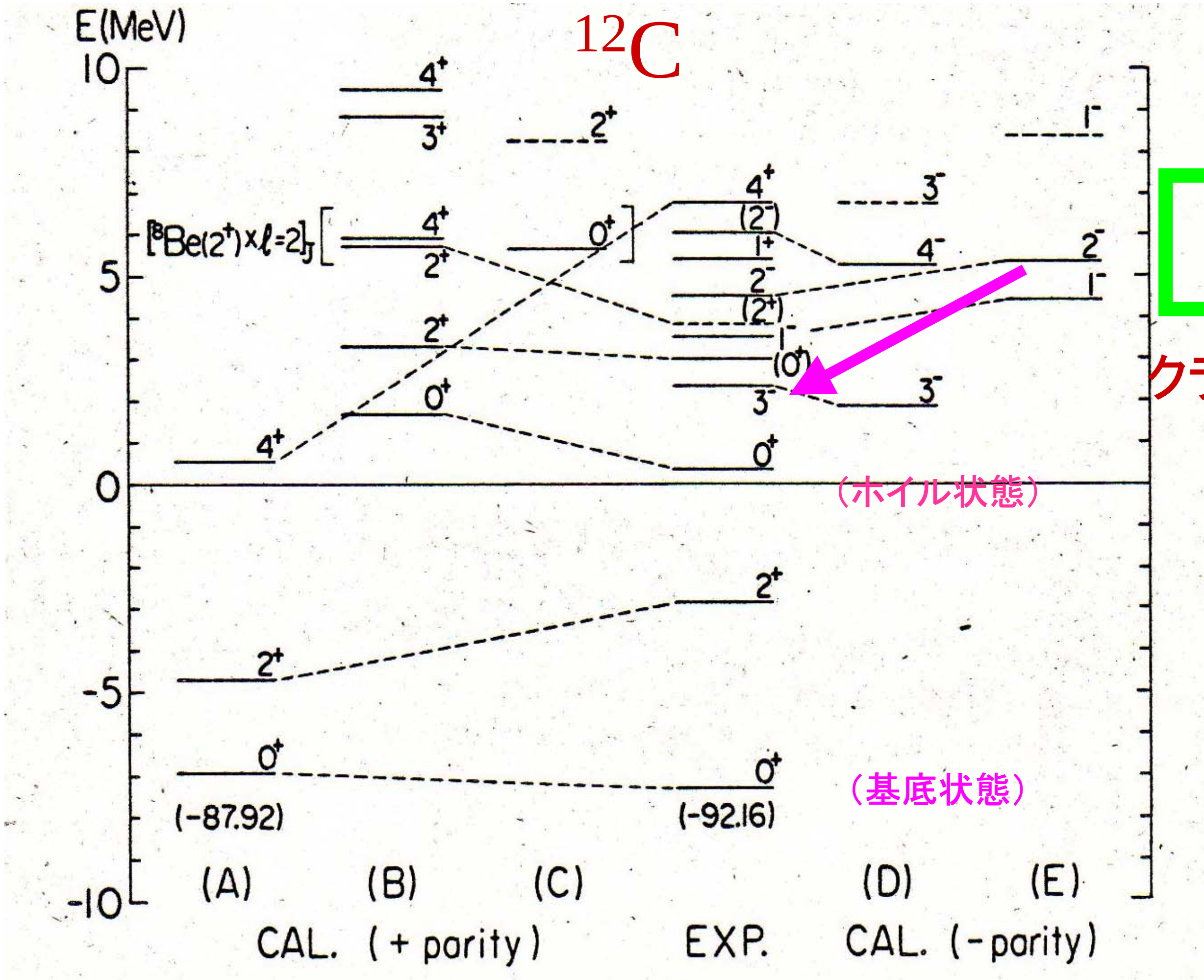
prerainbow N/F decomposition

（cross section）　　　　　　（cross section）



（散乱角）　　　　　　（散乱角）

^{12}Cには量子渦状態は存在しない



3$^-$は渦状態ではない

クラスターと殻構造の中間的構造をもつ

: of angular momentum on rotational fre-
id lines indicate the variational result, and
resent the fully numerical results for the
ne), 10 (dashed line), and 8 (dotted line).

α粒子はBose･Einstein凝縮しているか？
実体的な物の論理　？

- ^{12}CのHoyleの3α系の密度が希薄であることは実験的に確認

- しかし、超流動や渦は確認されずα粒子Bose･Einstein凝縮している実験的な直接的証拠はない。

4α系:
^{16}Oにおける4αボーズ凝縮

確かな実験的証拠？　？

束縛状態でなく散乱状態として解くべき

閾値近傍の状態でクラスターの発達した状態は

1） 散乱条件を正しく取り入れて、

2） 散乱状態で適切な有効相互作用を用いて解かれるべき。

（有効相互作用のstarting energy dependence

有効相互作用と模型空間の相互規定性）

Bose-Einstein　α粒子凝縮にともなう実体的な固有のモードは見られないのか？

３α系では　dilute　property　は実験的にも確認されるが、 Bose－Einsteinα粒子凝縮による実体的な物の論理（超流動、量子渦など）は実験的には確認できてない。

^{16}Oの4α構造

有限系の原子核のα粒子ではどうか？

１．０$^{+}$のみでなく　励起状態もともに理解されるべき。

（部分のみでなく全体を見るべき：　部分と全体の弁証法）

２．束縛状態近似ではなく共鳴状態として正確に解くべき。

1967

^{16}Oの4α構造の研究状況：
Chevallier et. al. 4α linear chain model

VOLUME 160, NUMBER 4

Breakup of O^{16} into Be^8+Be^8†

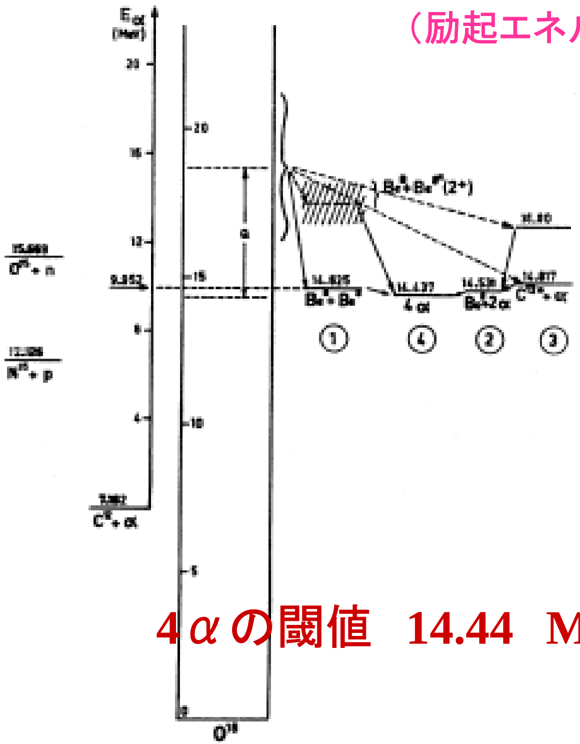
P. Chevallier and F. Scheibling
Institut de Recherches Nucléaires, Strasbourg-Cronenbourg, France

and

G. Goldring, I. Plesser, and M. W. Sachs*
The Weizmann Institute of Science, Rehovoth, Israel

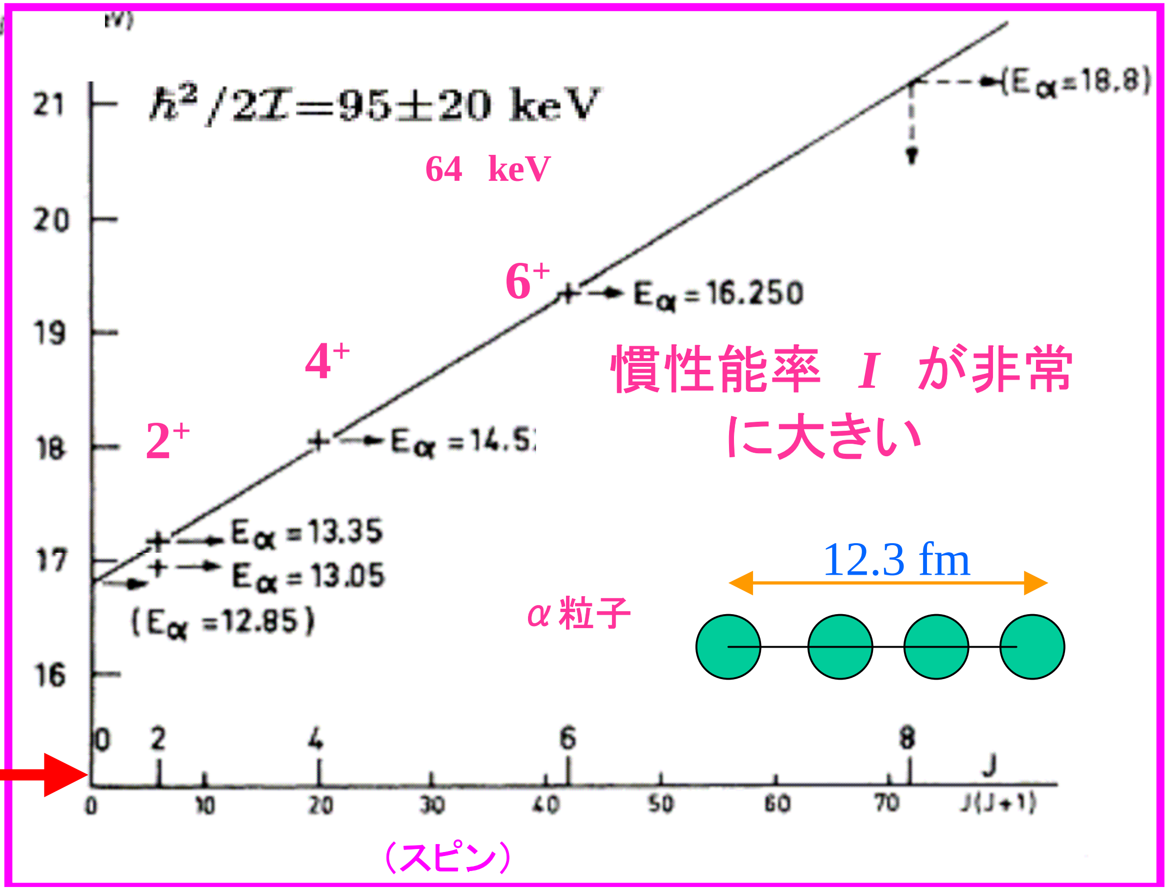
(Received 27 January 1967)

1. $O^{16}\rightarrow Be^8+Be^8$
   $Be^8\rightarrow 2\alpha$
   $Be^8\rightarrow 2\alpha$
2. $O^{16}\rightarrow Be^8+2\alpha$
   $Be^8\rightarrow 2\alpha$
3. $O^{16}\rightarrow C^{12*}(0^+;\,7.66\text{ MeV})+\alpha$(and higher states)
   $C^{12*}\rightarrow Be^8+\alpha$
   $Be^8\rightarrow 2\alpha$
4. $O^{16}\rightarrow 4\alpha$.



（励起エネルギー）

4αの閾値 14.44 MeV



^{16}Oの $\alpha + ^{12}$C(Hoyle) クラスター構造

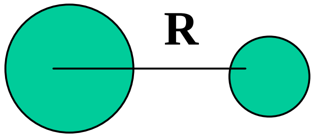
チャネル結合法による$\alpha + ^{12}$C散乱の解析

- ^{12}Cの波動関数　3α RGM~ボーズ凝縮の波動関数
  - 密度依存DDM3Y有効相互作用による畳込み

Coupled channel equations

$$\Psi = \sum_i \varphi(\alpha)\varphi_i(^{12}\mathrm{C})\chi_i(\mathbf{R}), \qquad (1)$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2 + U_{ii}(\mathbf{R}) - (E-\epsilon_i)\right]\chi_i(\mathbf{R}) \qquad (2)$$
$$= -\sum_{j\neq i} U_{ij}(\mathbf{R})\chi_j(\mathbf{R}).$$



Cluster 1

Cluster 2

Double folding potential

$$V_{i,j}(\mathbf{R}) = \int \rho_\alpha(\mathbf{r}_\alpha)\rho_{i,j}(\mathbf{r}_T)v(\mathbf{R}-\mathbf{r}_T+\mathbf{r}_\alpha)d\mathbf{r}_T d\mathbf{r}_\alpha, \qquad (3)$$

renormalization factor N_R+iN_I

$$U_{i,j}(\mathrm{R}) = N_R V_{i,j}(\mathrm{R}) + iW(\mathrm{R})\delta_{i,j}, \qquad (4)$$

DDM3Y effective interaction

$$v_{NN}(E,\rho;s) = g(E,s)f(E,\rho).$$

$$f(E,\rho) = C(E)[1+\alpha(E)e^{-\beta(E)\rho}],$$

取り入れる ^{12}C のchannel

g.s., 2_1^+(4.44 MeV), 3^-(9.65 MeV), 0_2^+(7.65 MeV) and 2_2^+(10.3 MeV). The absorption due to the coupling to all the other

Imaginary potential

E_L=18 MeV

open channels, i.e., $p + {}^{15}N$, $n + {}^{15}O$ and $d + {}^{14}N$ channels

$$N_I = 0.045$$

Real potential

$E_\alpha = 139$, 166 and 172.5 MeV

$$N_R = 1.23\text{–}1.26$$

E_L=18 MeV

$$N_R = 1.398$$

High energy alpha + scattering
E_L=172.5MeV 166MeV

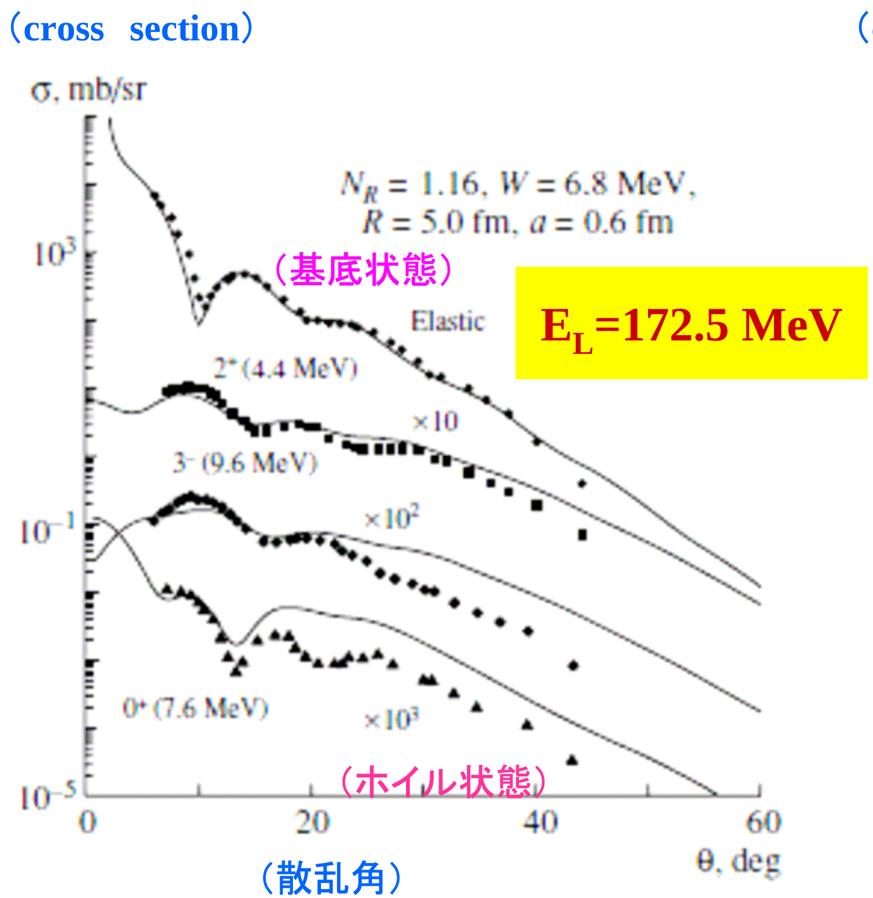


Fig. 1. The experimental data [13] of elastic and inelastic α scattering from ^{12}C at E_α = 172.5 MeV are compared with the coupled-channel calculations (solid curves).

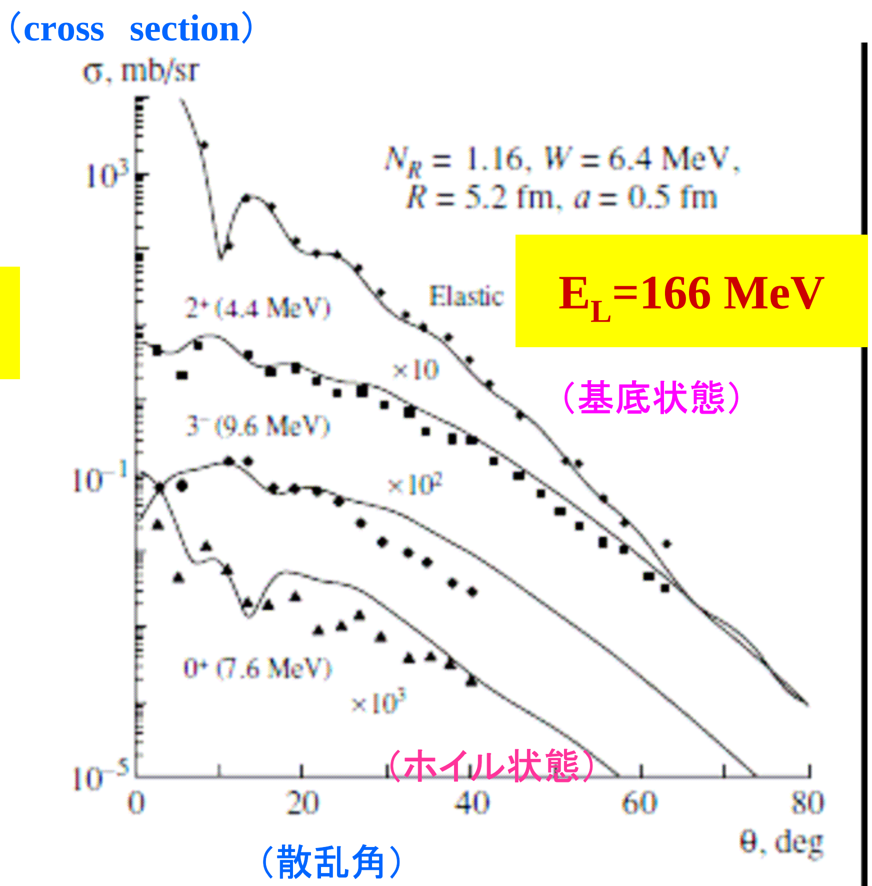


Fig. 2. The experimental data [14] of elastic and inelastic α scattering from ^{12}C at E_α = 166 MeV are compared with the coupled-channel calculations (solid curves).

High energy alpha + scattering
E_L=139MeV 106MeV

（cross section）

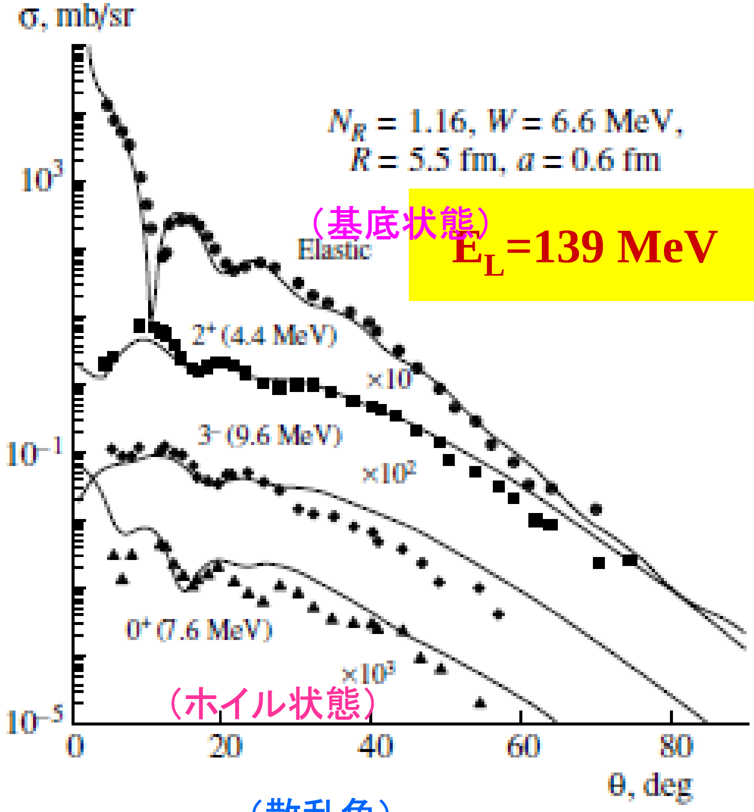


Fig. 3. The experimental data [15] of elastic and inelastic α scattering from ^{12}C at E_α = 139 MeV are compared with the coupled-channel calculations (solid curves).

（cross section）

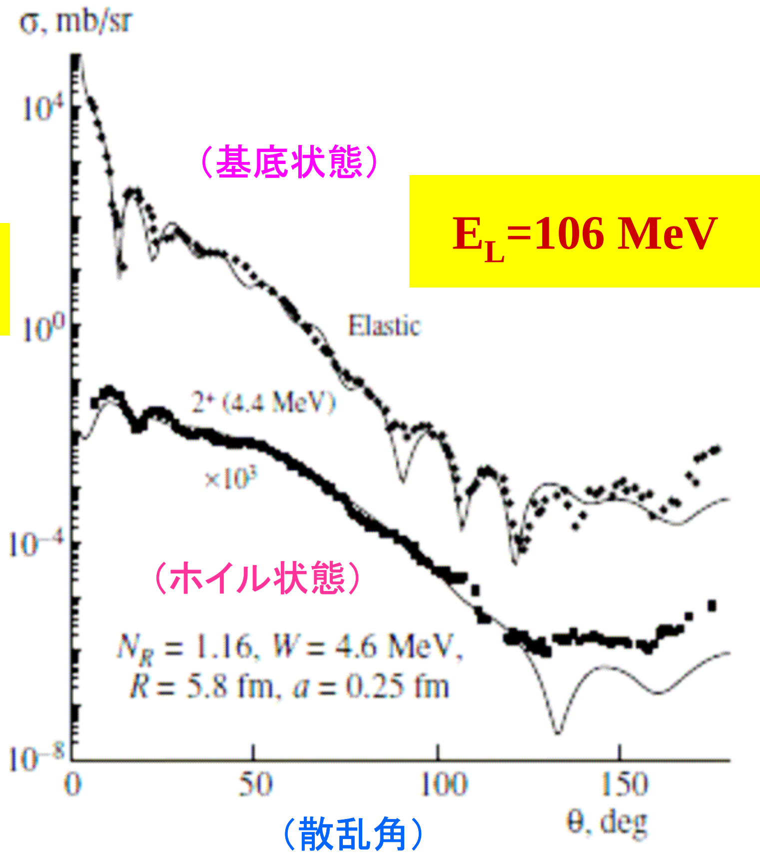


Fig. 4. The experimental data [17] of elastic and inelastic α scattering from ^{12}C at E_α = 104 MeV are compared with the coupled-channel calculations (solid curves).

High energy alpha + scattering
E_L=82MeV 65MeV

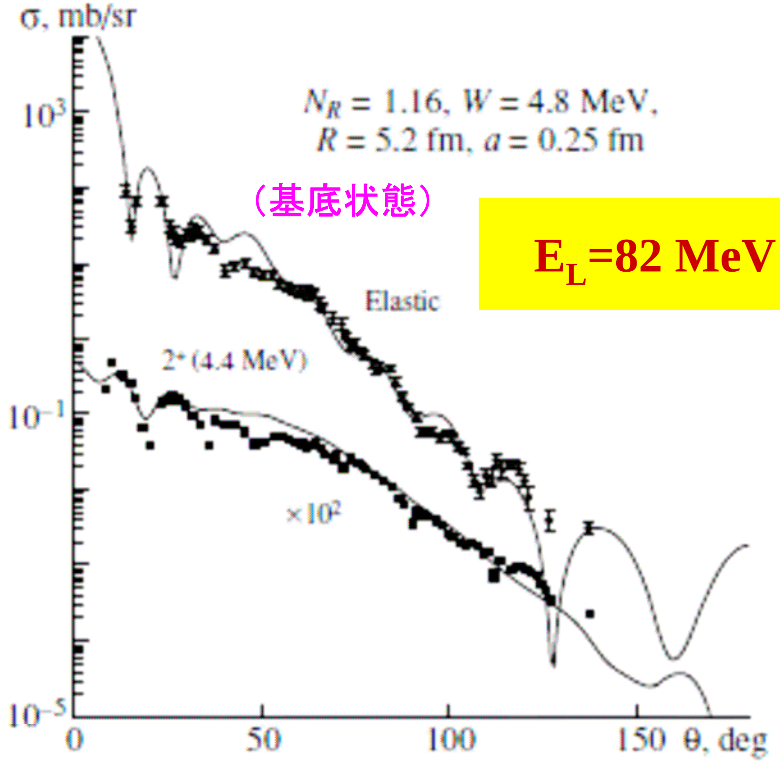


Fig. 5. The experimental data [19] of elastic and inelastic α scattering from ^{12}C at E_α = 82 MeV are compared with the coupled-channel calculations (solid curves).

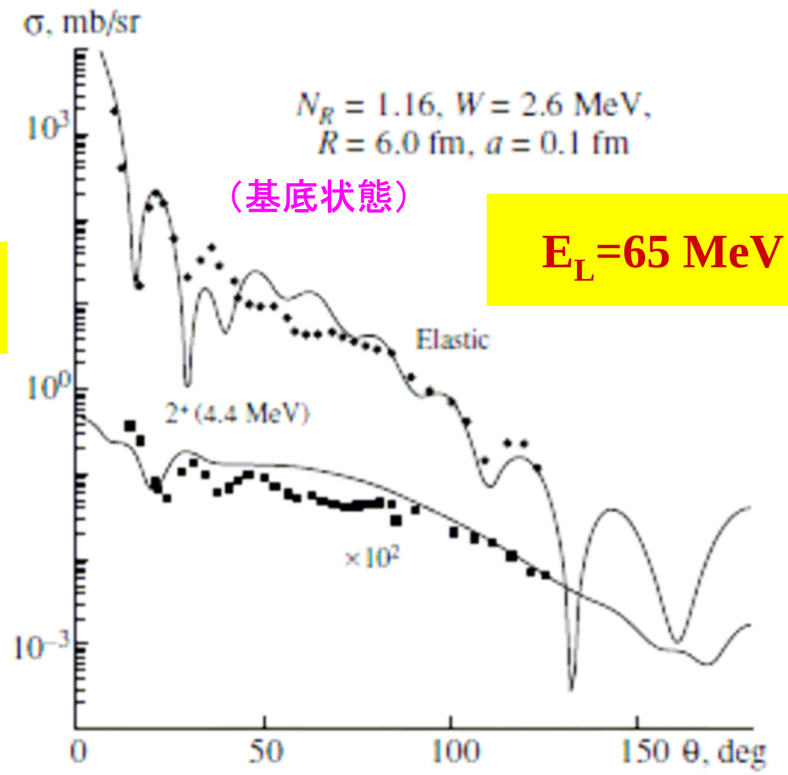
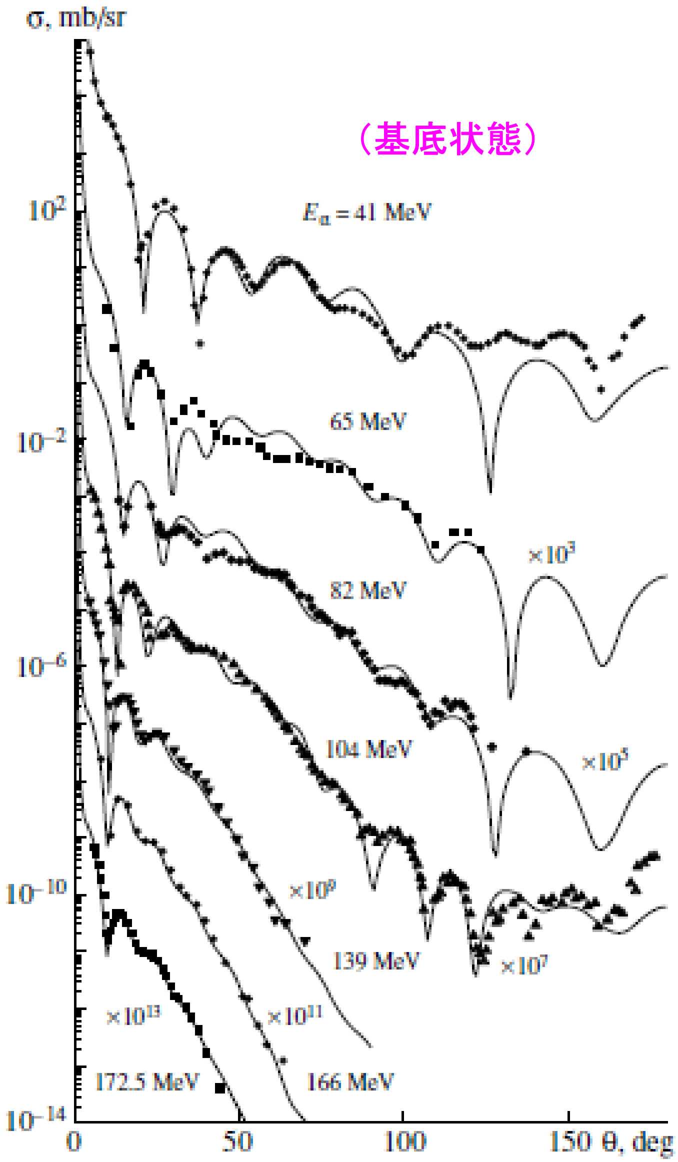


Fig. 6. The experimental data [20] of elastic and inelastic α scattering from ^{12}C at E_α = 65 MeV are compared with the coupled-channel calculations (solid curves).

High energy alpha + scattering
E_L=172MeV - 41MeV (elastic)

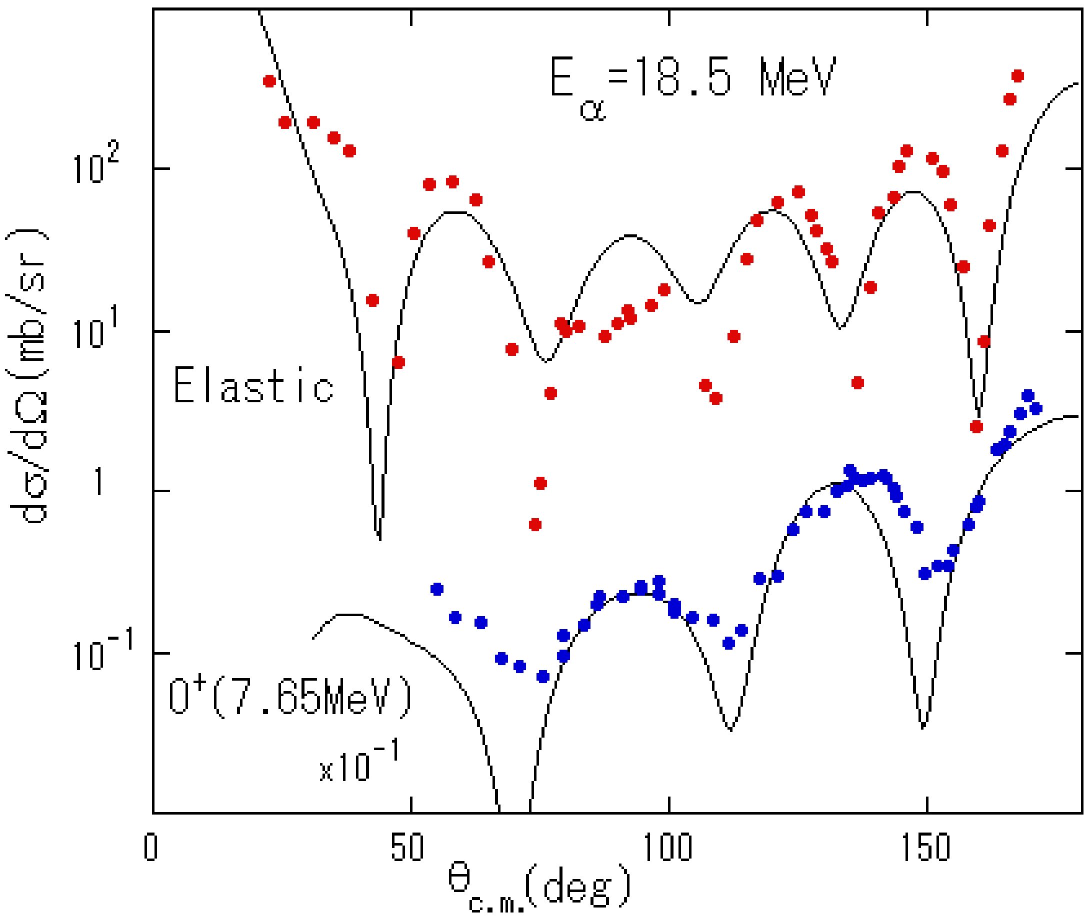


Normalization factor N_R and volume integral per nucleon pair J_V (in MeV fm^3)

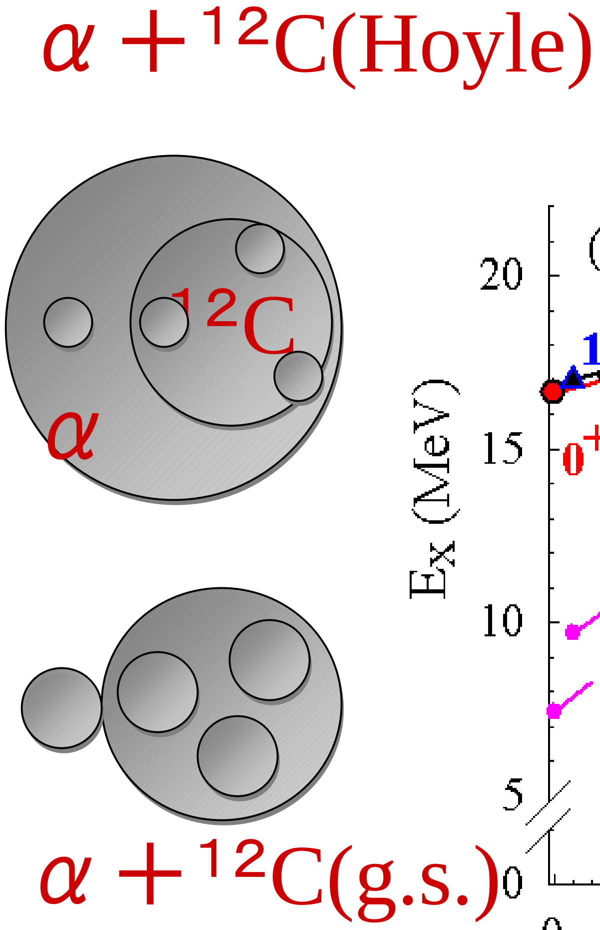
E_α, MeV	N_R	J_V	J_V [28]	J_V [15]
41	0.90	246		
65	1.16	313		
82	1.16	305		
104	1.16	298	393	319
139	1.16	286	353	278
166	1.16	279	326	
172.5	1.16	286		277

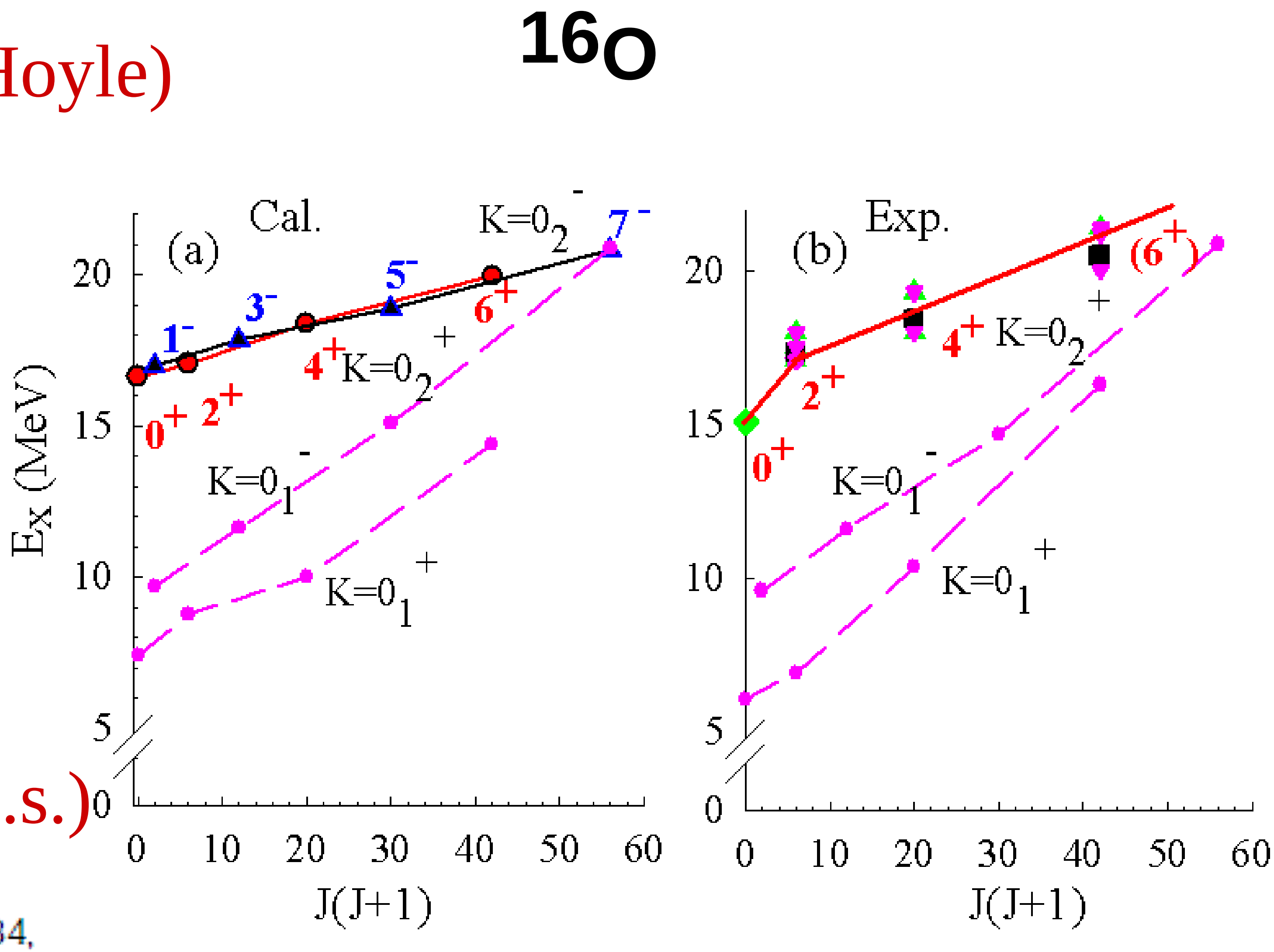
Fig. 7. The experimental angular distributions of elastic α scattering from ^{12}C are compared with the coupled-channel calculations (solid curves).

E_L=18.5 MeV (lowest energy) $\alpha + {}^{12}C$散乱の解析



^{16}Oの $\alpha+^{12}$C(Hoyle) クラスター構造をもつエネルギー準位

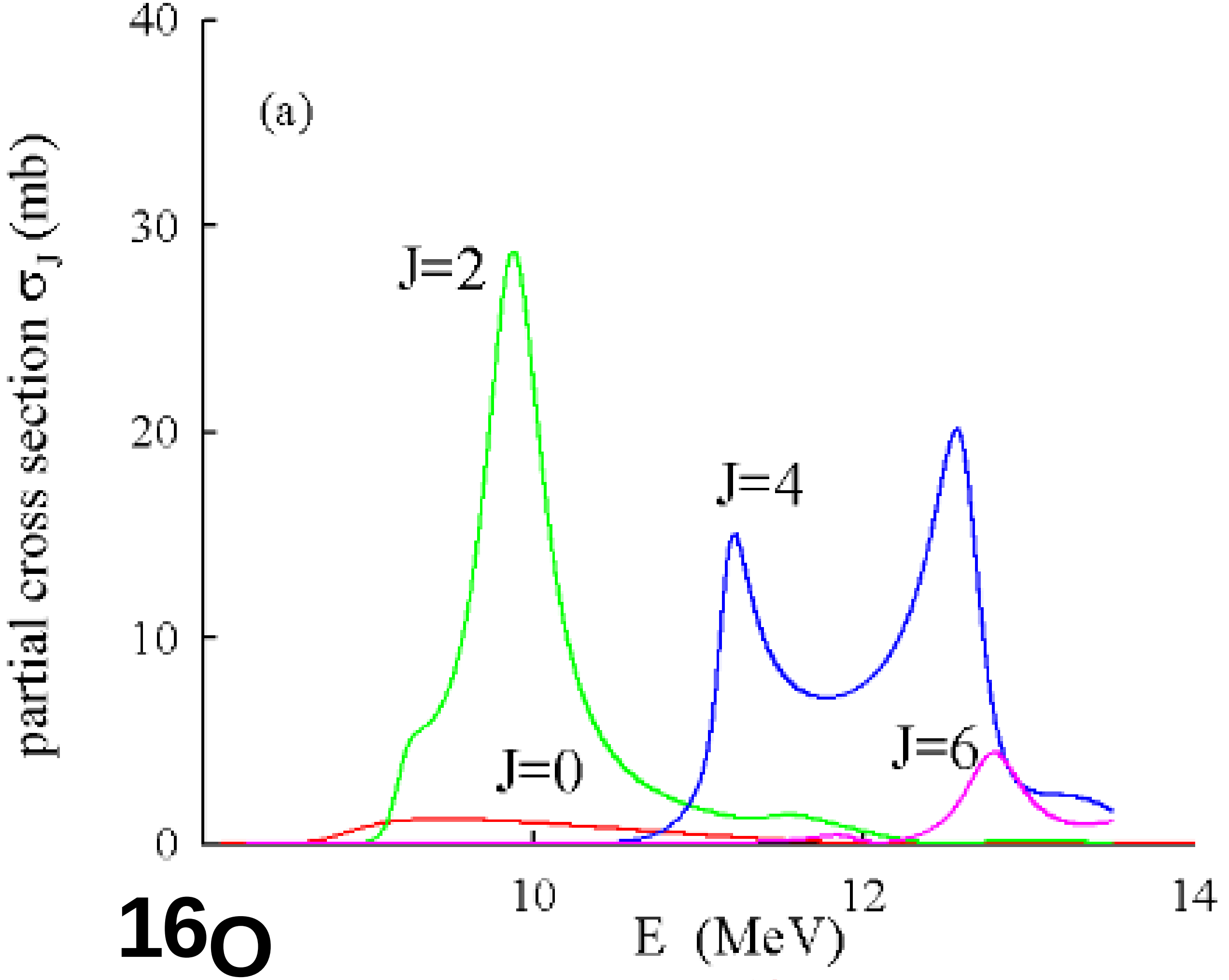




2010.9.1

$N_R = 1.34,$

partial cross sections to the Hoyle state



^{16}O

$\alpha + {}^{12}C$の閾値(7.16MV)からのエネルギー

$K=0_1^+$, $K=0_1^-$ band widths

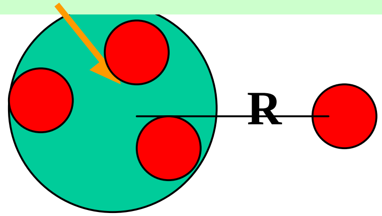
		cal.					exp.				
	J^π	E_x	Γ_α	$\theta^2_\alpha(a)$			E_x	Γ_α	$\theta^2_\alpha(a)$		
		(MeV)	(keV)	a (fm)			(MeV)	(keV)	a (fm)		
				5.2	5.6	6.0			5.2	5.6	6.0
$K=0_1^+$	4^+	10.00	5	0.15	0.09	0.06	10.36	26±3	0.35	0.22	0.14
	6^+	14.37	34	0.10	0.06	0.04	16.28	420±20	0.36	0.26	0.20
$K=0_1^-$	1^-	9.67	778	1.02	0.87	0.79	9.59	480±20	0.71	0.61	0.54
	3^-	11.61	822	0.64	0.54	0.48	11.60	800±100	0.63	0.53	0.47
	5^-	15.09	440	0.26	0.21	0.18	14.66	672±11	0.49	0.38	0.31
	7^-	20.86	1790	0.77	0.59	0.49	20.86	904±55	0.39	0.30	0.25

$K=0_2^+$, $K=0_2^-$ band widths

	J^π	E_x (MeV)	Γ (MeV)		J^π	E_x (MeV)	Γ (MeV)
$K=0_2^+$	0^+	16.61	1.14	$K=0_2^-$	1^-	16.98	0.57
	2^+	17.04	0.45		3^-	17.83	0.27
	4^+	18.38	0.23		5^-	18.86	0.24
	6^+	19.95	0.39		7^-	20.81	1.17

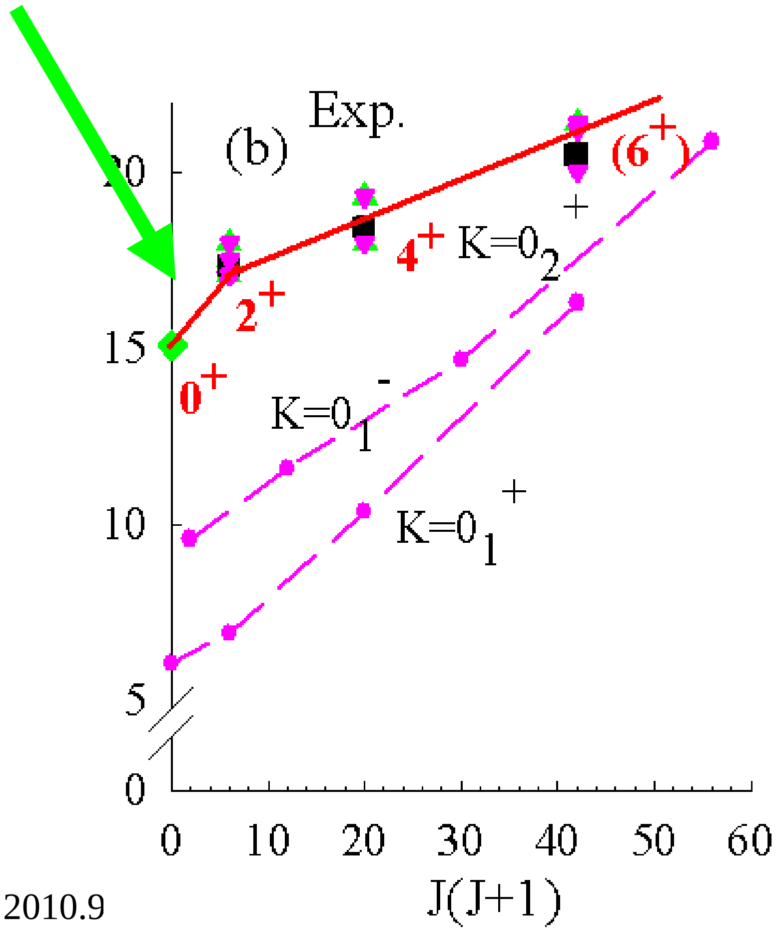
superfluidity

Local α condensation



$^{12}C(0_2^+)$ α

Reduction of moment of inertia



Large moment of inertia I

$I = I(\alpha) + I(^{12}C(0_2^+)) + I(\text{rel})$

56% 40%

→ **R=5.9 fm**

cf. 4 α linear chain model
R=12.3 fm

15.1 MeV 0^+ state (Γ =186 keV)

Γ_α / Γ =0.35

0^+ states:

15.1 MeV 0+

17.6MeV (0+,1-)

18.1 MeV(0+, spin tentative)

まとめ

1）1）^{16}O　の4α閾値近傍に　local　condensed
α＋^{12}C(Hoyle)クラスター構造をもつ状態が存在する
（4 α chainにあらず）

2）大きい慣性能率：大きい半径をもつ

3）　15.1MeV O^{+}　状態：　慣性能率が4分の1に減少
　　α凝縮状態の可能性、　超流動の特徴

4）Local　α condensation　が広く存在する可能性