

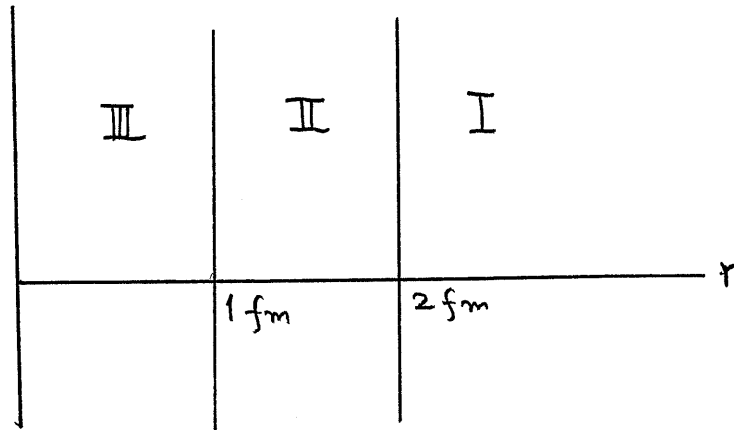
船橋ポテンシャルとその後の発展

和田正信

(I) 歴史的背景 船橋ポテンシャルのルーツ

「湯川中間子論に基づく核力」

3領域 (I, II, III) 武谷・中村・佐々木 (TNS) 理論



(1) OPEP に基づく非静的核力の提案 玉垣・和田・亘 (1964)

$$V = V_C + S_{12}V_T + (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})V_{LS} + W_{12}V_W + L^2V_{LL}$$

$$V_C(r) = \frac{f^2}{4\pi} \mu \frac{(\boldsymbol{\tau}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2)(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)}{3} Y(1 + a_C Y + b_C Y^2) : Y = \frac{e^{-x}}{x}, \quad x = \mu r$$

Hard Core ($r_C \doteq 0.3 \sim 0.4 \text{ fm}$)

$$S_{12} = \frac{3(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r})(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r})}{r^2} - (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1), \quad S = \frac{(\boldsymbol{\sigma}_1 + \boldsymbol{\sigma}_2)}{2}$$

$$W_{12} = \frac{1}{2} [(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{L})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{L}) + (\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{L})(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{L})] - 3(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_1)L^2$$

(2) 基本粒子の多体系に基づく芯領域 (領域Ⅲ) のポテンシャル

大槻・玉垣・和田 (1964)

ガウス型コアポテンシャルの提案

$$V_{CORE} = G \exp[-(r/r_G)^2]$$

$$V_{NN} = V \{1 - \exp[-(r/r_C)^4]\} + G \exp[-(r/r_G)^2]$$

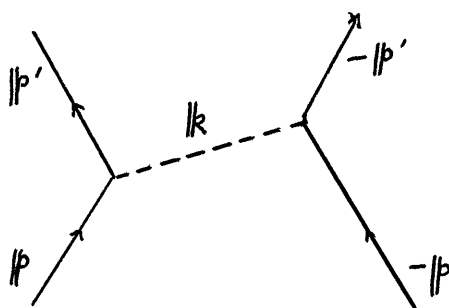
湯川型コアポテンシャル (ω 中間子) との比較

$$V_{CORE} = V_G \exp(-mr)/r$$

((1), (2) 和田修士論文)

(3) 非静的効果の解明 和田 (1967)

OBEP の運動量表示 (p 表示)



$$V(p', p) = V_0 + i(\mathbf{S} \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})V_1 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k})V_2 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{q})V_3 \\ + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})V_4 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)V_5$$

$$V_i(p', p) = V_i(k^2, q^2, (\mathbf{k} \times \mathbf{q})^2), \quad \mathbf{k} = \mathbf{p}' - \mathbf{p}, \quad \mathbf{q} = (\mathbf{p}' + \mathbf{p})/2$$

$$\bar{\Delta}(\mathbf{k}) = \frac{1}{k^2 + m^2 - (E' - E)^2} \frac{\Lambda^2 - m^2}{k^2 + \Lambda^2 - (E' - E)^2}$$

$$= \frac{1}{2p'p} \left[\frac{1}{(z_0 - z)} - \frac{1}{(z_1 - z)} \right]$$

$$z_0 = \left[\frac{p'^2 + p^2 + m^2 - (E' - E)^2}{2p'p} \right], \quad z_1 = \left[\frac{p'^2 + p^2 + \Lambda^2 - (E' - E)^2}{2p'p} \right]$$

$$\int_{-1}^1 \frac{P_\ell(z) dz}{z_0 - z} = 2Q_\ell(z_0), \quad \int_{-1}^1 \frac{z P_\ell(z) dz}{z_0 - z} = 2z_0 Q_\ell(z_0) - 2\delta_{\ell 0}$$

$$V_\ell(p', p) = -\frac{g_1 g_2}{4\pi} [(z_0 - \eta_\pi) Q_\ell(z_0) - \delta_{\ell 0}]$$

交換中間子 PS ($\pi(139), \eta(549)$), S ($\delta(962), \sigma(550)$),
V ($\rho(765), \omega(785)$)

2体散乱問題の解析：

(1)非静的効果の評価, (2)遅延効果の分析, (3)斥力芯の解析
(和田博士論文)

(4) クォーク模型による核力 (幻)

芯領域 (qqq)+(qqq) を V_{qq} , $M_q \approx (2-3)M_N$ を仮定して Resonating Group Method で解き, 外部は V_{OBE} で計算する. M_q をパラメータとして計算した結果, $M_q \approx 300\text{MeV}$ となり, 当時の常識からかけ離れていたため研究を放棄.

(II) 船橋ポテンシャル 日大船橋校舎での研究(1967以後)

(1) 遅延効果の解明 和田・大日方 (1975)

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}(\mathbf{k}) &= \frac{1}{\mathbf{k}^2 + m^2 - (E' - E)^2} \approx \frac{1}{\mathbf{k}^2 + m^2} + \frac{(E' - E)^2}{(\mathbf{k}^2 + m^2)^2} \\ &\approx \frac{1}{\mathbf{k}^2 + m^2} + \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{q})^2}{2M^2} \frac{1}{(\mathbf{k}^2 + m^2)^2} \Rightarrow \frac{e^{-mr}}{r} - \frac{(\nabla \mathbf{q})(\nabla \mathbf{q})}{2M^2} e^{-mr},\end{aligned}$$

ここで $E = \sqrt{M^2 + \mathbf{p}^2} \approx M + \frac{\mathbf{p}^2}{2M}$, $E' = \sqrt{M^2 + \mathbf{p}'^2} \approx M + \frac{\mathbf{p}'^2}{2M}$.

交換中間子 PS ($\pi(139), \eta(549)$), S ($\delta(962), \sigma(550)$),
V ($\rho(765), \omega(785)$)

$$V = (V_{OBE} + U_{OBE}) \{1 - \exp[-(r/r_c)^2]\}^4 + V_{CORE}$$

$$V_{OBE} = V_C + S_{12}V_T + (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})V_{LS} + W_{12}V_W + L^2V_{LL} + \vec{\nabla}^2V_p;$$

Yukawa potential

$$U_{OBE} = U_C + S_{12}U_T + (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})U_{LS} + W_{12}U_W + L^2U_{LL} + \vec{\nabla}^2U_p;$$

Retarded potential

$$V_{CORE} = G \exp[-(r/r_G)^2]; \quad \text{Gaussian Core potential}$$

(大日方博士論文)

少数多体系国際会議 (Karlsruhe: 1984) de Swart (Nijmegen)

Review Talk において Funabashi Potential と命名

(2) 少数多体系,核物質への適用 中川・大日方・和田 (1975-1989)

船橋ポテンシャルを用いて ${}^3_1\text{H}, {}^3_2\text{He}$ の結合エネルギーを北大で開

発された ATMS 法を用いて計算

(中川博士論文)

(4) p-space OBEP

和田・大日方 (1979)

$$V(\mathbf{p}', \mathbf{p}) = V_0 + i(\mathbf{S} \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})V_1 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k})V_2 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{q})V_3 \\ + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})V_4 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)V_5$$

交換中間子 PS (π, η), S (δ, σ), V (ρ, ω)

$$\bar{\Delta}(\mathbf{k}) = \frac{1}{k^2 + m^2 - (E' - E)^2} \frac{\Lambda^2 - m^2}{k^2 + \Lambda^2 - (E' - E)^2} \\ = \frac{1}{2p' p} \left[\frac{1}{(z_0 - z)} - \frac{1}{(z_1 - z)} \right] \\ z_0 = \left[\frac{\mathbf{p}'^2 + \mathbf{p}^2 + m^2 - (E' - E)^2}{2p' p} \right], \quad z_1 = \left[\frac{\mathbf{p}'^2 + \mathbf{p}^2 + \Lambda^2 - (E' - E)^2}{2p' p} \right]$$

2体散乱, 重陽子問題, 核物質計算を行い

(1) 遅延効果 (2) 相対論的效果 等を解明

(3) 船橋ポテンシャルのガウス基底展開表示

和田・中川・大日方・有坂 (1994)

$$\frac{e^{-\mu r}}{r} = \sum_{n=1}^N g_n \exp[-(r/r_n)^2], \quad r_{n+1} = b \cdot r_n, \quad b = (r_N/r_1)^{1/(N-1)}:$$

($N = 2, 3, \dots, 10$); geometric progression

原子核計算を容易にするため湯川型ポテンシャルをガウス型基底関数で展開したポテンシャル模型を提案. 少数多体系の計算を行う

(Ⅲ) 船橋—岐阜ポテンシャル 日大・岐阜大の共同研究

(1) NN, YN, YY系への拡張 Two Octet Baryons Interaction
和田・中川・有坂・新村 (2000)

Octet Baryon ($p, n, \Lambda, \Sigma^{+-0}, \Xi^{-0}$)

		{27}, {10*}, {10}, {8a}, {8s}, {1}
NN, YN	{27}	$^1E(^1S_0), ^3O$
	{10*}	$^1O, ^3E(^3S_1)$
YN	{10}	$^1O, ^3E(^3S_1)$
	{8a}	$^1O, ^3E(^3S_1)$
	{8s}	$^1E(^1S_0), ^3O$
YY	{1}	$^1E(^1S_0)$

Nonet Meson PS($\eta'; \pi, \eta, K$), S($\sigma; a_0, f_0, K_0^*$), V($\omega; \rho, \phi, K^*$)

PS	質量(MeV)	V	質量(MeV)	S	質量(MeV)
η'	957.77	ω	761.94	σ	600 (760)
π^\pm	139.57	ρ^\pm	768.5	a_0^\pm	980 (983.5)
π^0	134.98	ρ^0	768.5	a_0^0	980 (983.5)
η	547.45	ϕ	1019.41	f_0	980 (980)
K^\pm	493.68	$K^{*\pm}$	891.59	$K_0^{*\pm}$	900 (1429)
K^0	497.67	K^{*0}	896.1	\bar{K}_0^{*0}	900 (1429)

$SU(3)$ Symmetric Lagrangian: $SU(3)$ パラメータ : g_1, g_8, α, θ

$$L = -g_1^{(1)} Tr(\bar{\Psi}^8 \Psi^8) \Phi^1 - g_8^{(1)} Tr(\bar{\Psi}^8 \Phi^8 \Psi^8) - g_8^{(2)} Tr(\bar{\Psi}^8 \Psi^8 \Phi^8)$$

$$V = (V_{OBE} + U_{OBE}) \{1 - \exp[-(r/r_c)^2]\}^4 + V_{CORE}$$

$$V_{OBE} = V_C + S_{12}V_T + (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})V_{LS} + (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}_-)V_{ALS} + W_{12}V_W + \mathbf{L}^2V_{LL} + \vec{\nabla}^2V_p ;$$

Yukawa potential

$$U_{OBE} = U_C + S_{12}U_T + (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S})U_{LS} + (\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}_-)U_{ALS} + W_{12}U_W + \mathbf{L}^2U_{LL} + \vec{\nabla}^2U_p ;$$

Retarded potential

$$V_{CORE} = G_{ij} \exp[-(r/r_G)^2] ;$$

$SU(3)$ Symmetric Gaussian Core potential

$$\mathbf{S} = \frac{(\boldsymbol{\sigma}_1 + \boldsymbol{\sigma}_2)}{2}, \quad \mathbf{S}_- = \frac{(\boldsymbol{\sigma}_1 - \boldsymbol{\sigma}_2)}{2}$$

(2) OBEP arising from Gaussian Source Function [GSOBEP(r)]

和田・中川・有坂・新村(2001)

Gaussian source function:

$$\rho_1(\mathbf{k}) = g_1 \exp[-(\mathbf{k}/\Lambda_1)^2], \quad \rho_2(\mathbf{k}) = g_2 \exp[-(\mathbf{k}/\Lambda_2)^2].$$

Propagator with Two Gaussian sources:

$$\bar{\Delta}(\mathbf{k}) = \frac{\exp[-(\mathbf{k}/\Lambda_1)^2] \exp[-(\mathbf{k}/\Lambda_2)^2]}{k^2 + m^2 - (E' - E)^2} = \frac{\exp[-(\mathbf{k}/\Lambda)^2]}{k^2 + m^2 - (E' - E)^2}$$

$$\Lambda = \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{\sqrt{\Lambda_1^2 + \Lambda_2^2}} : \text{ size parameter}$$

$$V_C(r) = -\frac{g_1 g_2}{4\pi} \frac{e^{(m/\Lambda)^2}}{2} \left[\frac{e^{-mr}}{r} \text{Erfc}(z) - \frac{e^{mr}}{r} \text{Erfc}(z_+) \right],$$

$$z = -\frac{\Lambda}{2}r + \frac{m}{\Lambda}, \quad z_+ = \frac{\Lambda}{2}r + \frac{m}{\Lambda}.$$

(3) p-space OBEP arising from Gaussian Source Function

[GSOBEP(p)]

和田・中川・有坂・新村(2001)

$$\begin{aligned}
 V(p', p) = & V_0 + i(\mathbf{S} \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})V_1 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k})V_2 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{q})V_3 \\
 & + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})V_4 + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \boldsymbol{\sigma}_2)V_5 + [(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{q}) + (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k})]V_6 \\
 & + i(\mathbf{S}_- \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{q})V_7 + [(\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{k})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{q}) - (\boldsymbol{\sigma}_1 \cdot \mathbf{q})(\boldsymbol{\sigma}_2 \cdot \mathbf{k})]V_8
 \end{aligned}$$

$$\bar{\Delta}(\mathbf{k}) = \frac{\exp[-(\mathbf{k}/\Lambda)^2]}{\mathbf{k}^2 + m^2 - (E' - E)^2} = \frac{\exp[-(\mathbf{p}'^2 + \mathbf{p}^2)/\Lambda^2]}{2p'p} \frac{\exp[(2p'p/\Lambda^2)z]}{(z_0 - z)}$$

$$z_0 = \left[\frac{\mathbf{p}'^2 + \mathbf{p}^2 + m^2 - (E' - E)^2}{2p'p} \right],$$

$$\int_{-1}^1 \frac{e^{az} z^n P_\ell(z) dz}{z_0 - z} = z_0^n P_\ell(z_0) E_0(a, z_0) - \sum_{m=0}^{[\ell/2]} \frac{(-1)^m (2\ell - 2m)!}{2^\ell m! (\ell - m)! (\ell - 2m)!} \sum_{r=0}^{k+\ell-2m-1} z_0^r f_{k+\ell-2m-1}(a)$$

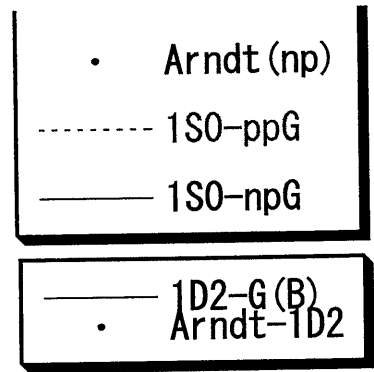
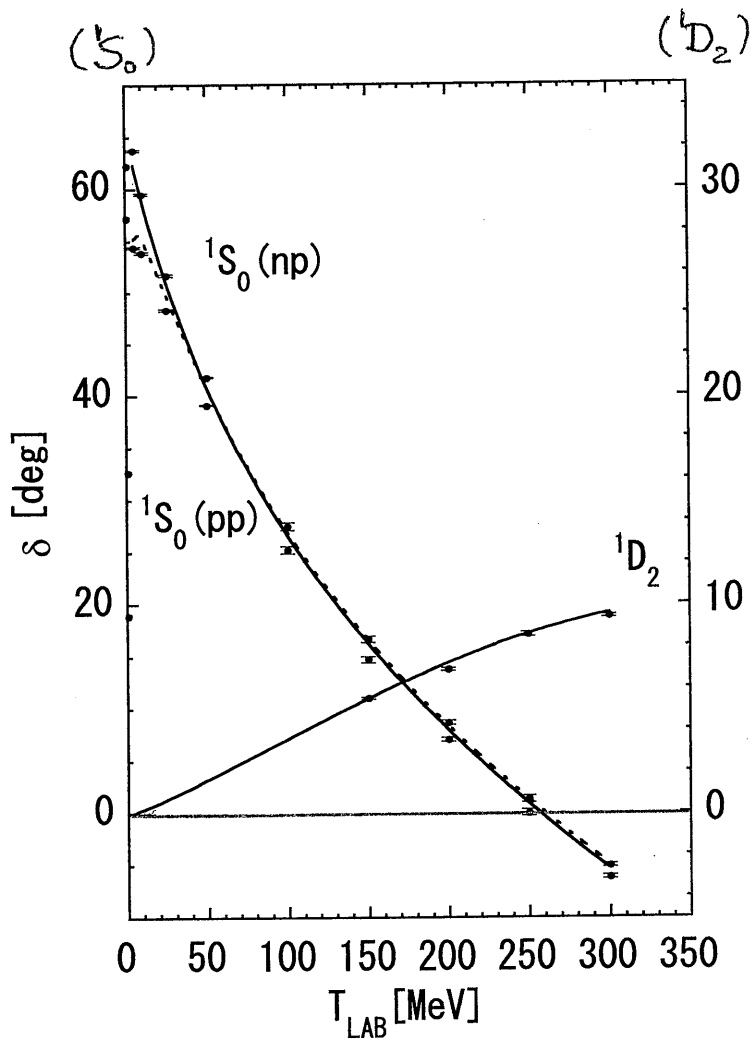
$$\equiv B_\ell^{(n)}(z_0)$$

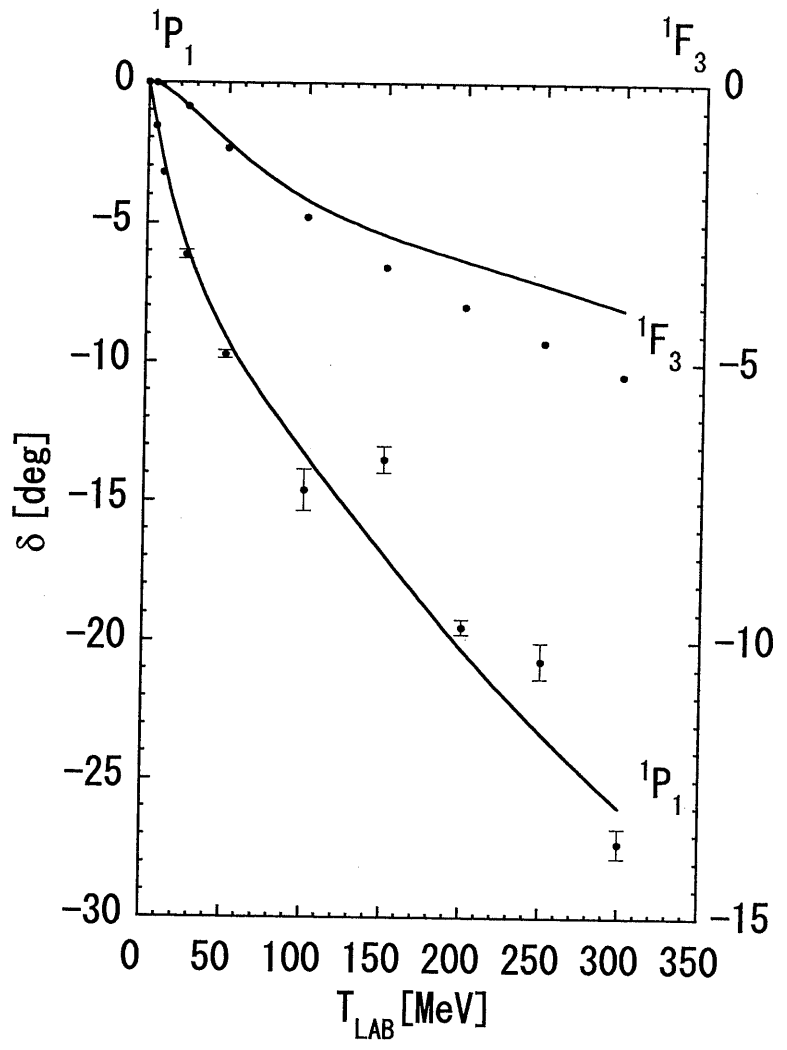
$$E_0(a, z_0) = e^{az_0} [E_i(-(az_0 - a)) - E_i(-(az_0 + a))],$$

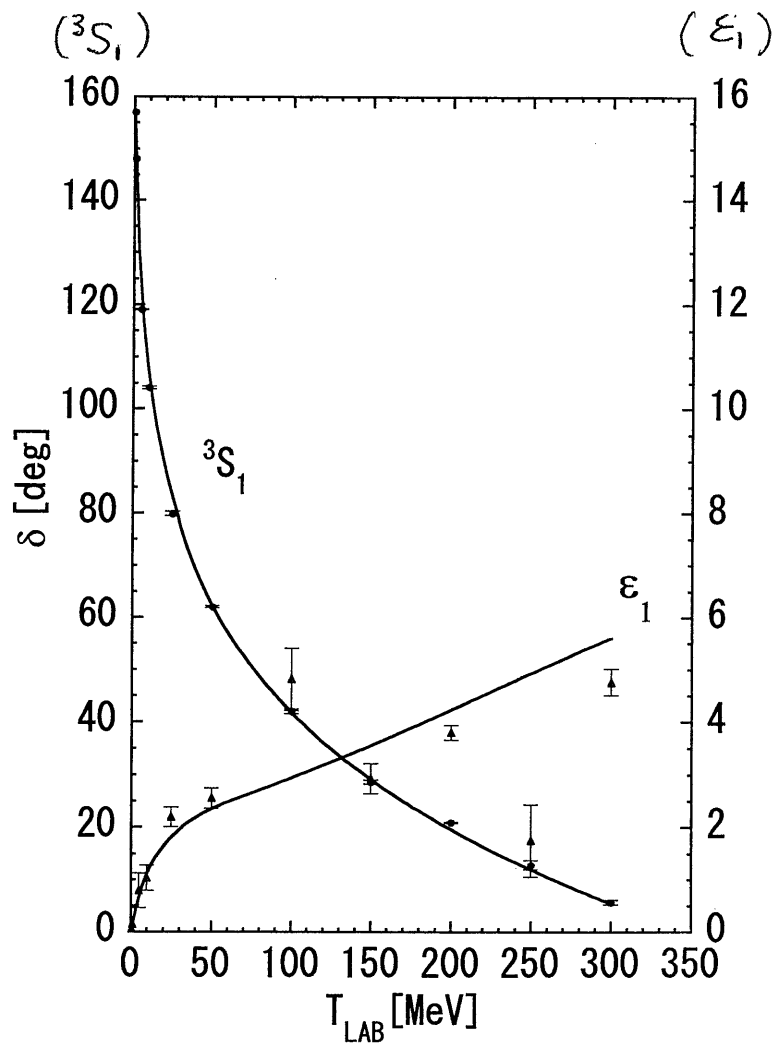
$E_i(-x)$: exponential integral function

$$f_0(a) = \frac{2}{a} \sinh(a), \quad f_1(a) = \frac{2}{a^2} [a \cosh(a) - \sinh(a)], \quad \dots$$

$$V_\ell(p', p) = \frac{g_1 g_2}{4\pi} [(v_0 - v_1 p'^2 p^2) B_\ell^{(0)}(z_0) + v_1 B_\ell^{(1)}(z_0)]$$







• Arndt-3S1
 — 3S1-G

— ep1-G
 ▲ Arndt-ep1

