

# 核子間三体力について



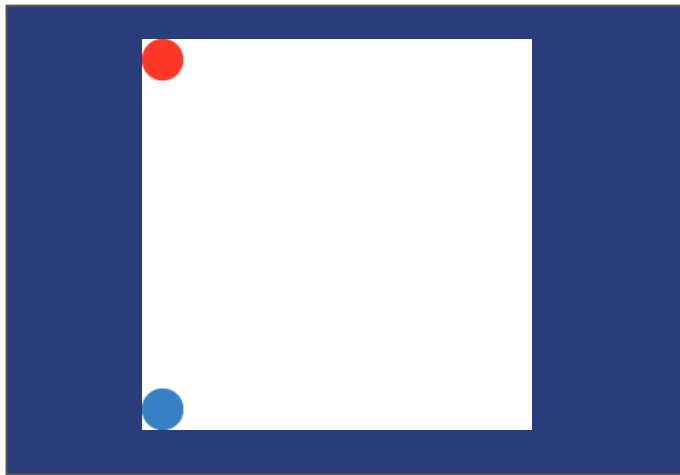
理研仁科加速器研究センター

関口 仁子

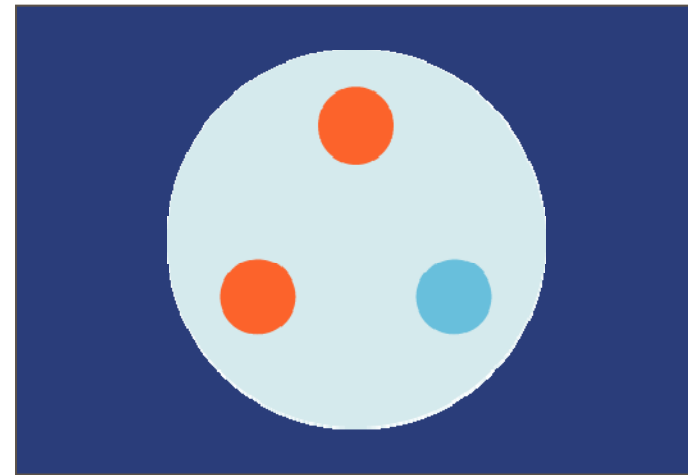
# 核子間三体力 ( Three Nucleon Force )

- ▶ 核子と中間子場の最もシンプルな過程の一つ。
- ▶ 核力の統一的な理解には欠かせない。

二体力



三体力



1990年代 中間子論+現象論

3000~4000の核子-核子散乱

データを $\chi^2 \sim 1$ の精度で再現

e. g. CD Bonn, AV18, Nijmegen I&II



# 2π 交換型の三体力

## 藤田-宮沢型の三体力 (1957)

- ⇒ Tucson-Melbourne (TM) 3NF
- ⇒ Urbana -IX 3NF
- ⇒ Brazil, Texas, Ruhr, etc.

## 一般的なポテンシャルの表現

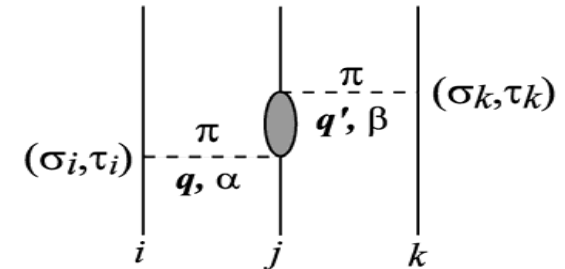
- ▶ Low Momentum Expansion of πN Scattering
- ▶ Cut-off パラメータ Λ は <sup>3</sup>H の束縛エネルギーを再現するように決める

$$V_{3NF}^{(j)} = \frac{g^2}{4m_N^2} \frac{\vec{\sigma}_i \cdot \mathbf{q}}{q^2 + m_\pi^2} \frac{\vec{\sigma}_k \cdot \mathbf{q}'}{q'^2 + m_\pi^2} F_{\pi NN}^2(q^2) F_{\pi NN}^2(q'^2) \times \left\{ \xi^{\alpha\beta} \left[ a + b\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}' + c(q^2 + q'^2) \right] - d(\tau_j^\gamma \epsilon^{\alpha\beta\gamma} \vec{\sigma}_j \cdot \mathbf{q} \times \mathbf{q}') \right\} \tau_i^\alpha \tau_k^\beta$$

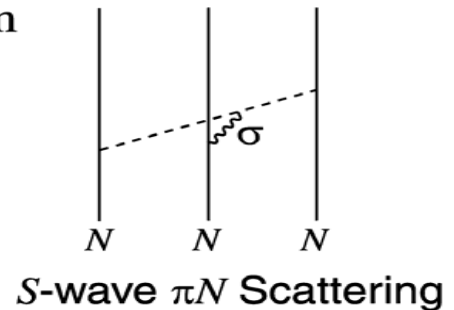
$$F_{\pi NN}(q^2) = \frac{\Lambda^2 - m_\pi^2}{\Lambda^2 + q^2}$$

3NF	$a(a') [m_\pi^{-1}]$	$b [m_\pi^{-3}]$	$c [m_\pi^{-3}]$	$d [m_\pi^{-3}]$
藤田-宮沢	0	-1.15	0	-0.29
TM	1.13	-2.58	1.0	-0.753
TM'	(-0.87)	-2.58	0	-0.753
Urbana IX	0	-1.20	0	-0.30

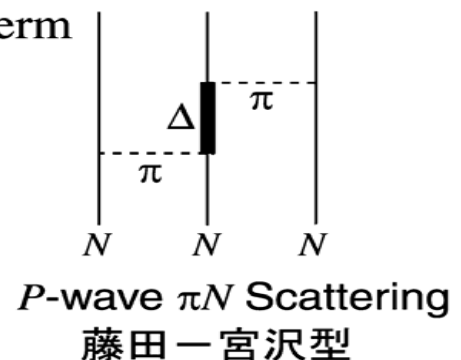
## ◆ General Form



## ◆ a-term



## ◆ b, d-term



# 中間子論以外のアプローチ

## - カイラル摂動理論による核力の構築 -

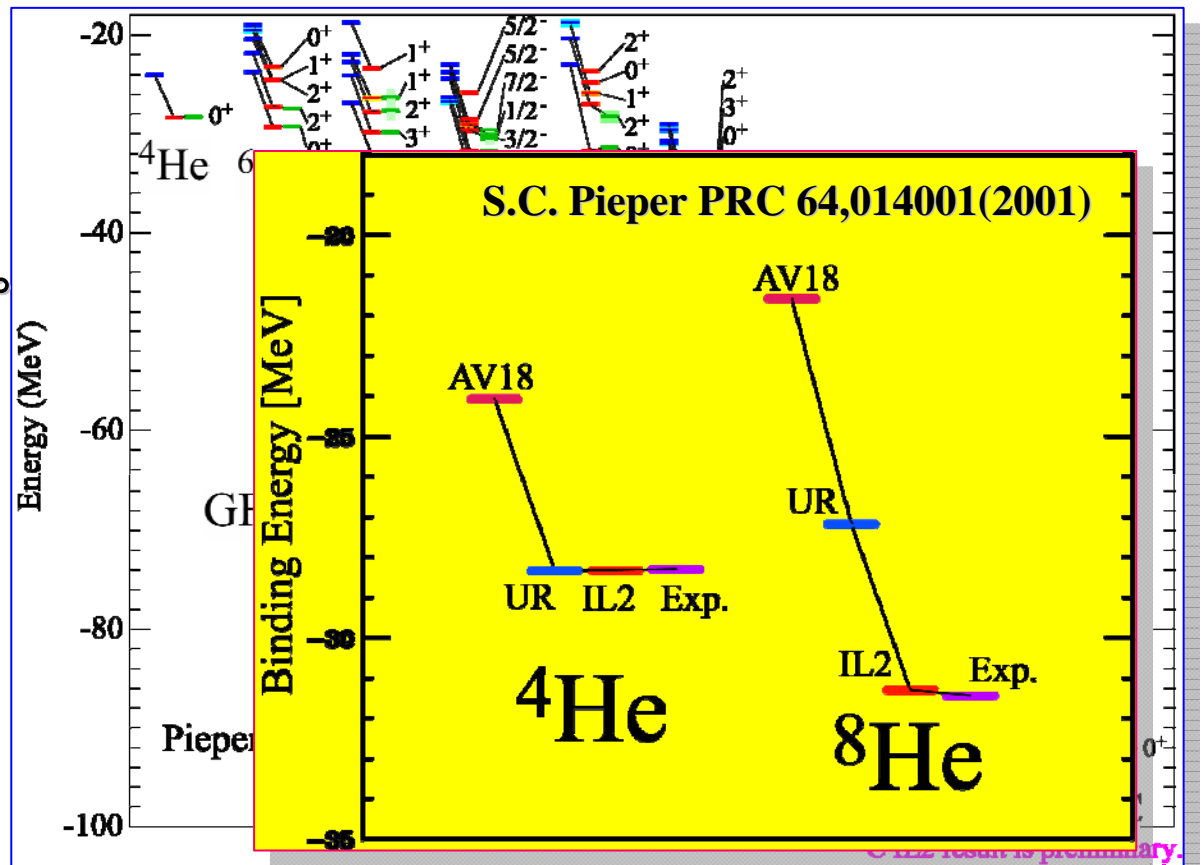
- 低エネルギーQCDの記述
- QCDラグランジアンとの接点  
カイラル対称性を考慮した有効場
- カイラル対称性の破れ  
べき展開 $\sim \pi$ 中間子の質量程度 (高々 $3\text{fm}^{-1}$ )
- 相互作用:  
  - $\pi$ 中間子 (Goldstone ボゾン)
  - + 核子
  - + 接触相互作用 (重い中間子,  $\Delta$  etc..)
- 二体力、三体力、四体力...  
を統一的に導き出すことができる
- 二体力 > 三体力 > 四体力 ...  
を説明. 三体力は、 $N^2\text{LO}$ で現れる.

	2N forces	3N forces	4N forces
LO		—	—
NLO			—
$N^2\text{LO}$			—
$N^3\text{LO}$			
	+ ...	+ ...	+ ...

# 三体力の効果はどこに現れるか？-その1-

## 原子核の結合エネルギー (GFMC, NCSM ...)

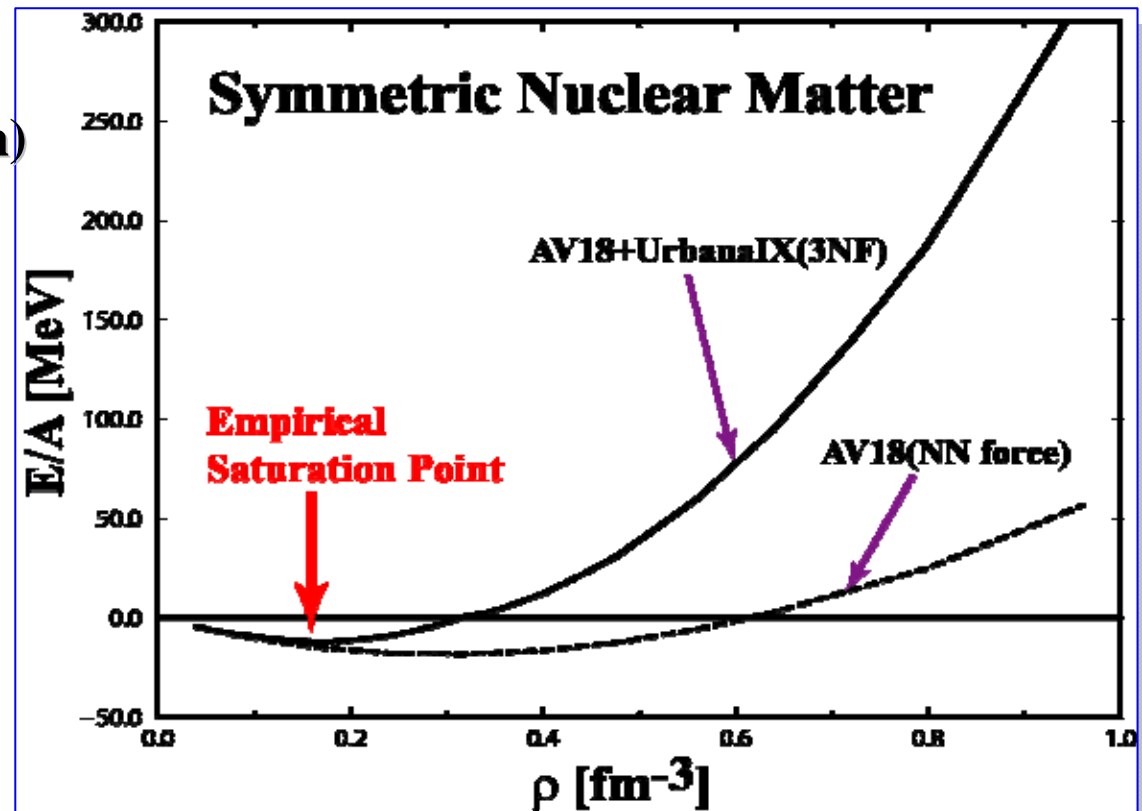
- 二体力だけでは、実験値を説明できない。
- 三体力(藤田・宮沢型)の導入により、実験値を再現。
- 結合エネルギーにおいて核子間三体力の効果が占める割合
  - 10 - 25 %
  - 引力



# 三体力の効果はどこに現れるか？-その2-

## 核物質の状態方程式

- 二体力  
(AV18, Nijmegen I,II, CD Bonn)  
では、核物質の飽和性を説明できない。
- 三体力(藤田・宮沢型)
  - 飽和性の説明に成功
  - 高密度状態では三体力が重要か？



A. Akmal et al., PRC 58, 1804('98)

三体力の重要性が原子核の基本的な性質  
(結合エネルギー、原子核の飽和性)を説明する上で  
指摘され始めている。

## ～少数核子系～ 重陽子・陽子散乱

- ✓ 運動量依存性
- ✓ スピン量子数の依存性
- ✓ アイソスピン依存性： $T=1/2$

# 重陽子・陽子散乱による三体力の検証方法

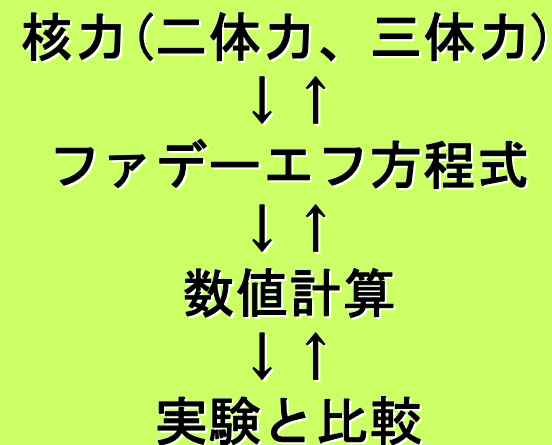
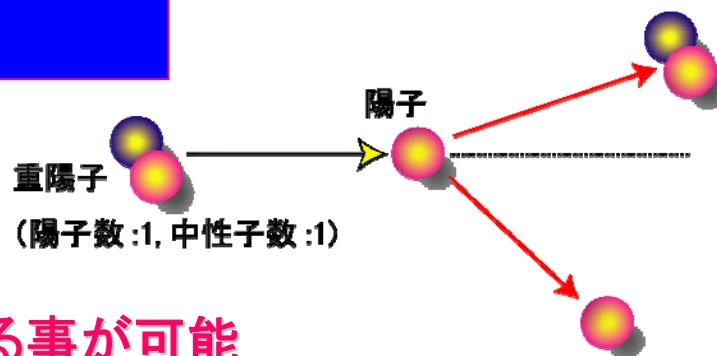
## 重陽子・陽子散乱

### - 三つの核子で構成される系(三核子系)

- 確立された二体力を用いた三体系の厳密計算
- 高精度な三体系の実験データを比較

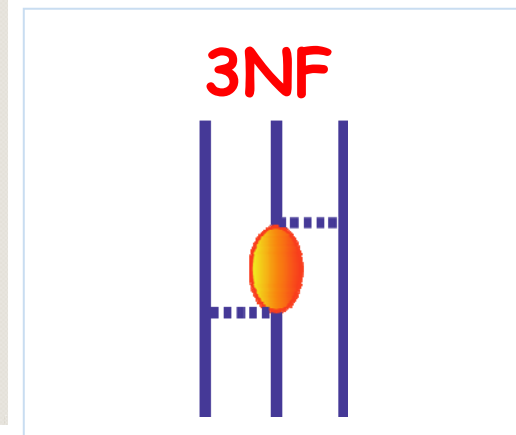
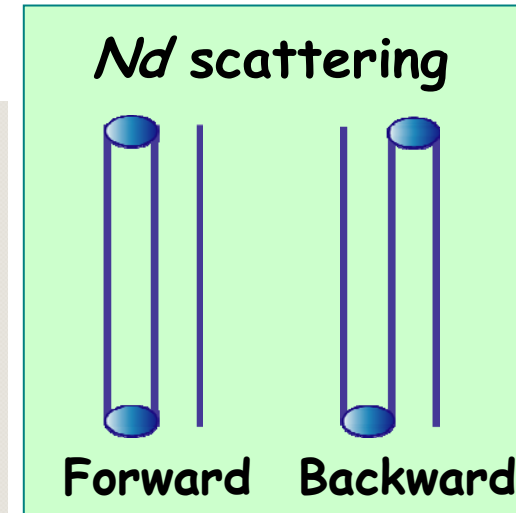
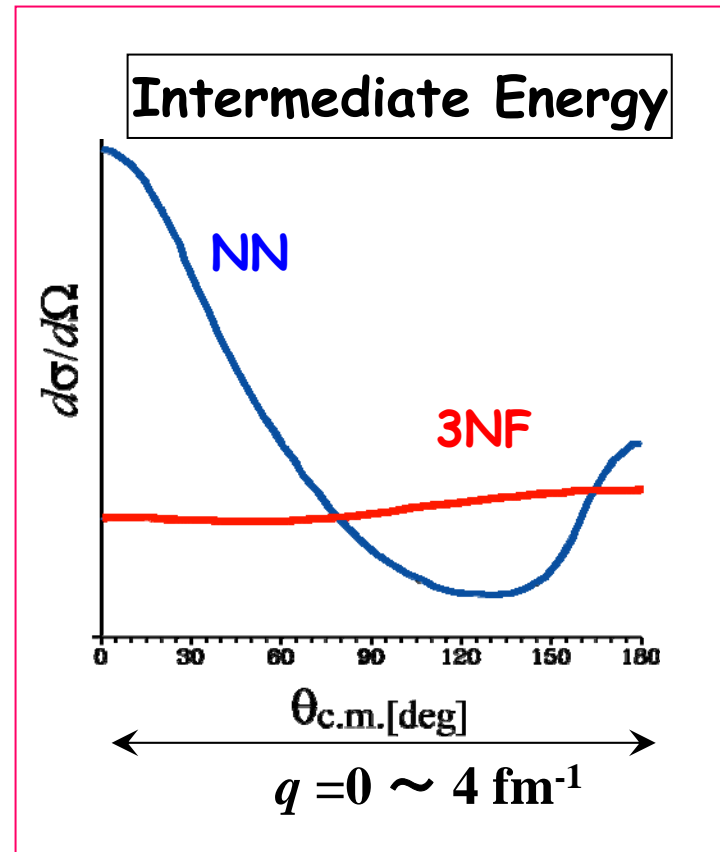
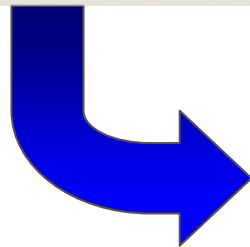
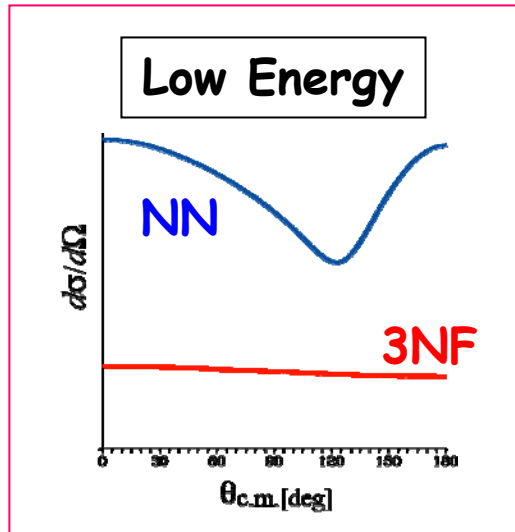
⇒ 三体力の効果を直接、定量的に議論する事が可能

- 三体系の厳密理論：ファデーエフ理論 (1961年)
  - ：三体系を二体力を用いて厳密に記述
  - －但し、数値計算はとても大変。
  - －コンピュータの高速化で近年実現可能に。
- 実験：高精度データ
  - 散乱微分断面積  $d\sigma/d\Omega$
  - スピン観測量
    - 偏極分解能  $A_{ij}$
    - 偏極移行量  $K_{ij}$
    - スピン相関係数  $C_{ij}$





# Picture of 3NF Effects in *Nd* scattering






# *p-d* elastic scattering at 70 – 250 MeV/A

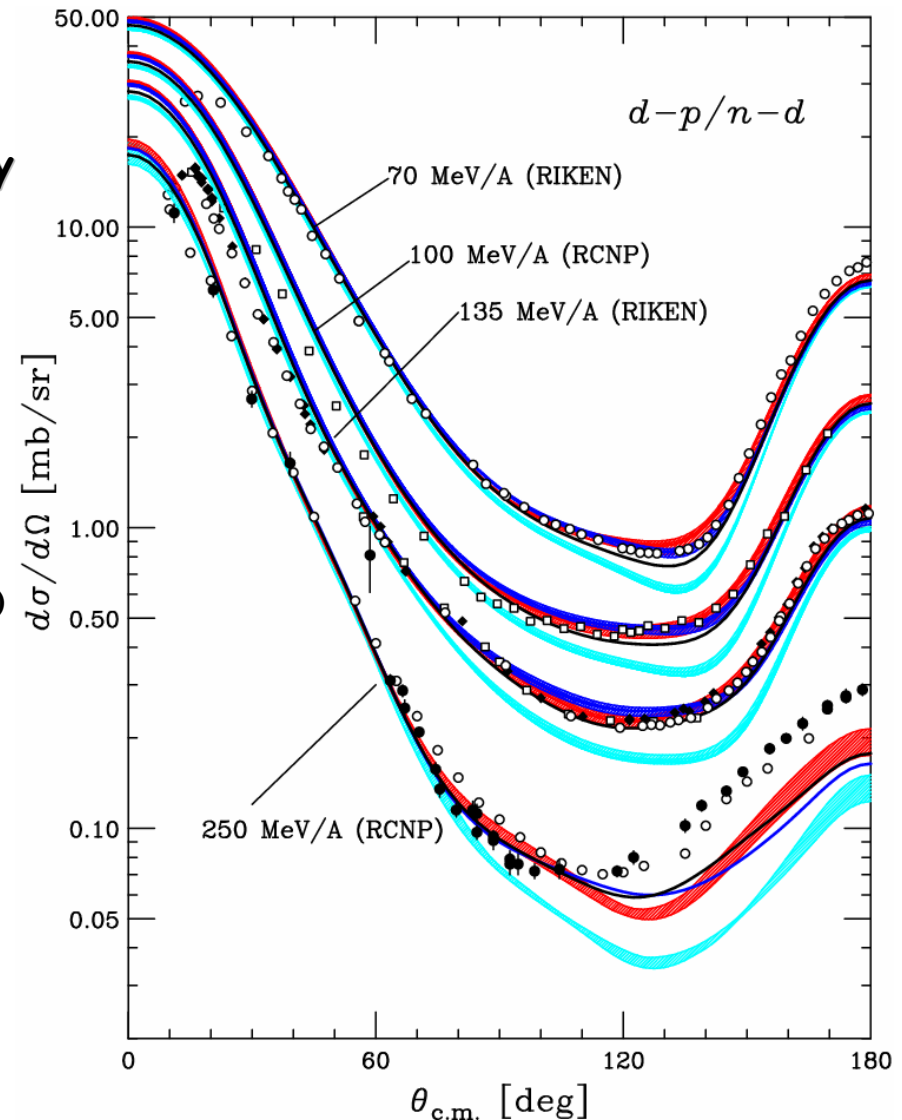
Discrepancies between the data and the calculations based on 2NF only

- Backward angles
- Large as an Energy Increases

3NF Effect ?

- Agreement is improved by  $2\pi$ -3NF
- but not enough at higher energies

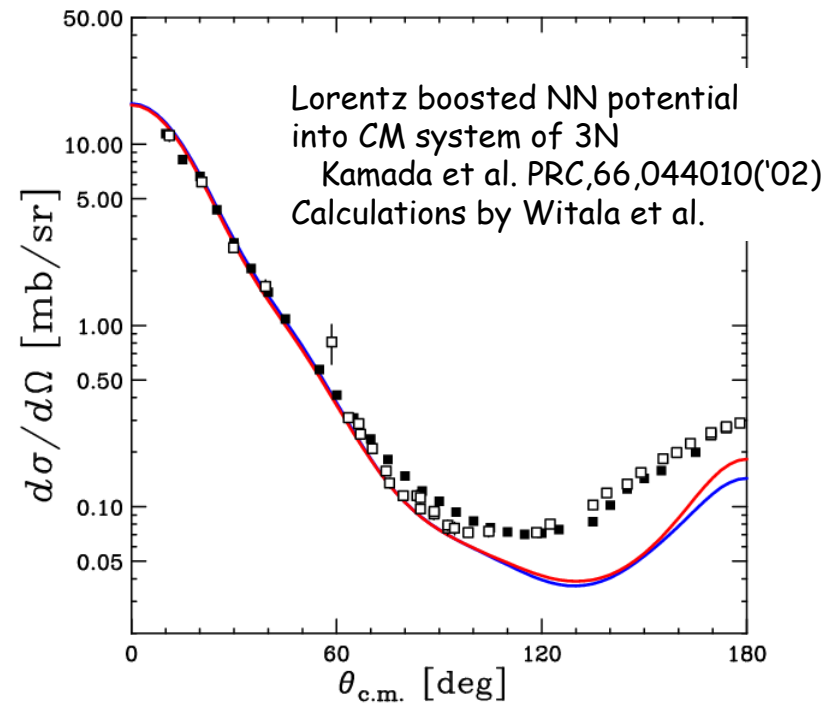
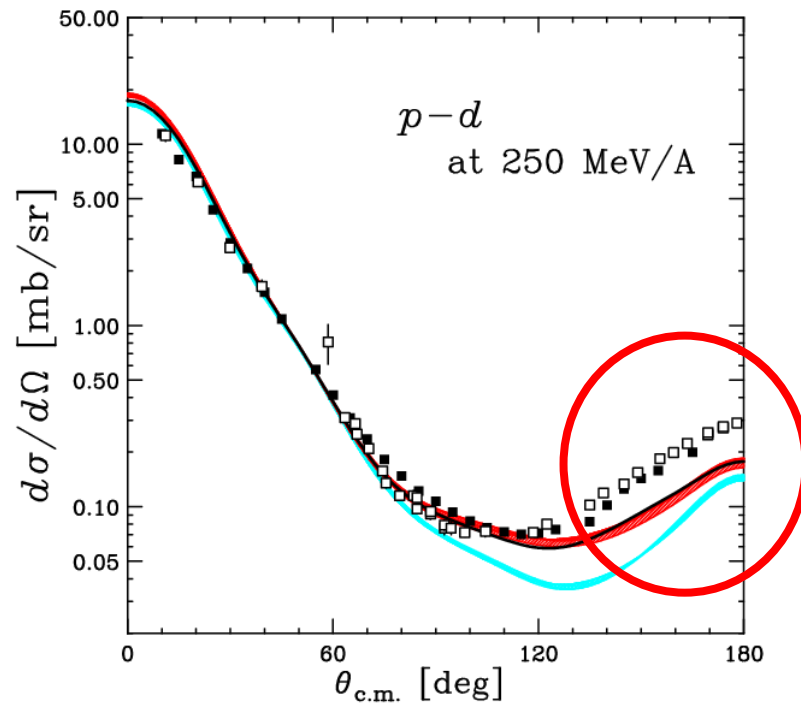
-  NN Only (CD Bonn, AV18, Nijmegen I,II)
-  with TM99 with 3NF
-  with Urbana IX 3NF



$d\sigma/d\Omega$  : go to higher energies

K. Hatanaka et al. PRC 65, 034003(2002);  
Y. Maeda et al. PRC76, 014004 (2007)

$p-d$  /  $n-d$  elastic scattering at 250 MeV



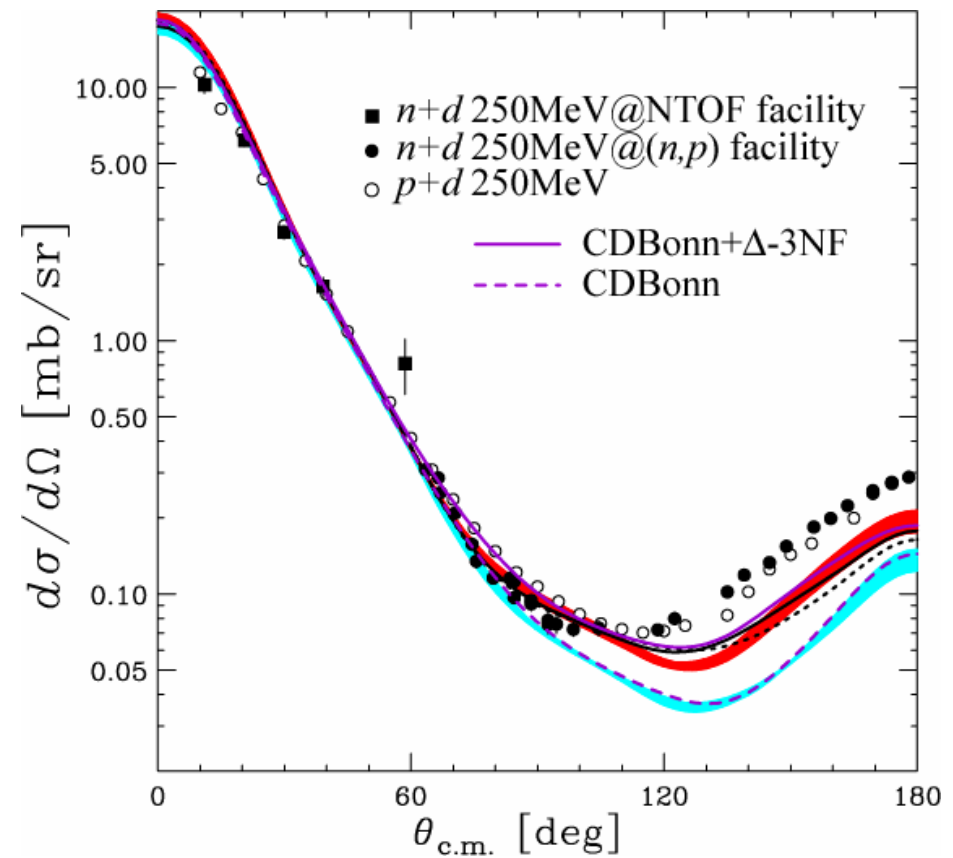
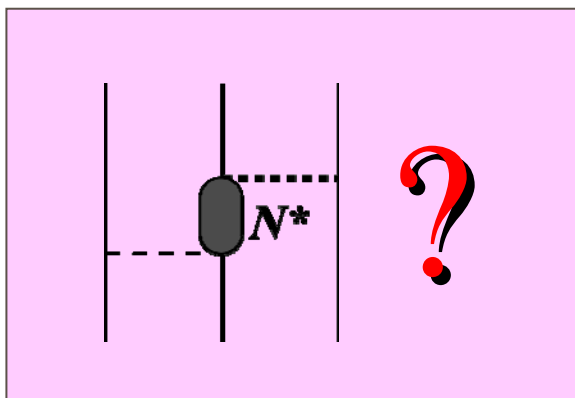
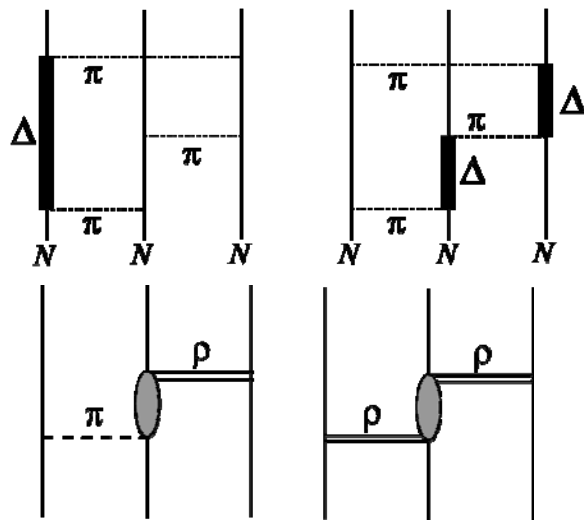
NN+3NF calc. still underestimates  
the data at backward angles  
by 50 %.

Relativistic Effects :  
only visible at very backward angles

**New Challenge**

## Small effects of the $\Delta$ -isobar excitations

with any mesons ( $\pi$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $\omega$ )



# B.E. of ${}^3\text{H}$

**Exp. = - 8.482 MeV**

SHORT-RANGE THREE-NUCLEON FORCES AND LOW...

**Adam et al. PRC 69, 034008('04)**

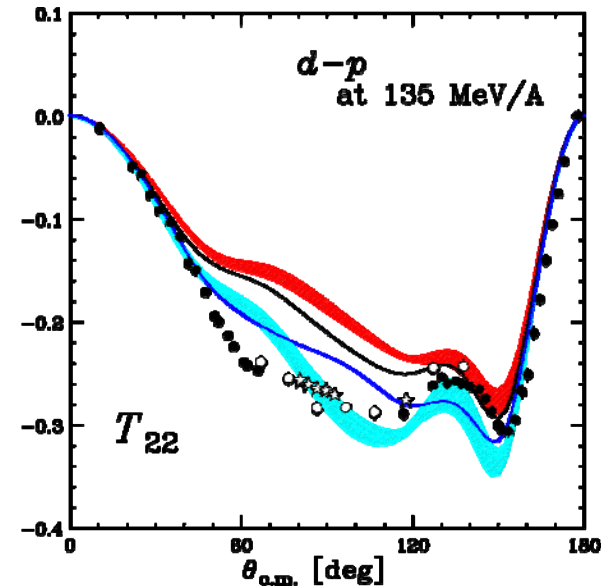
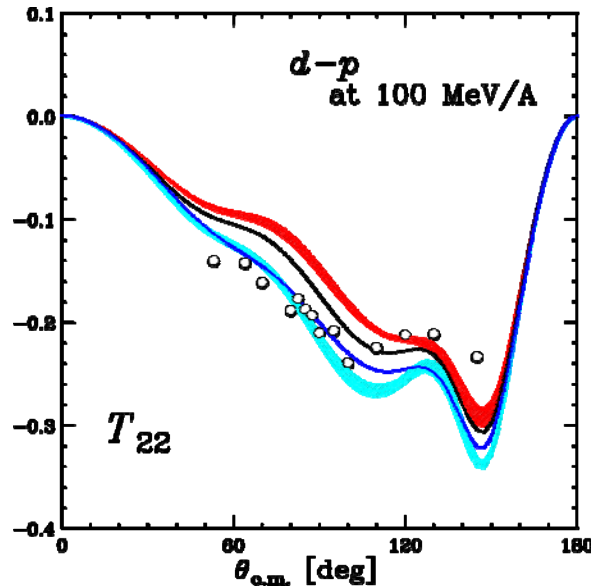
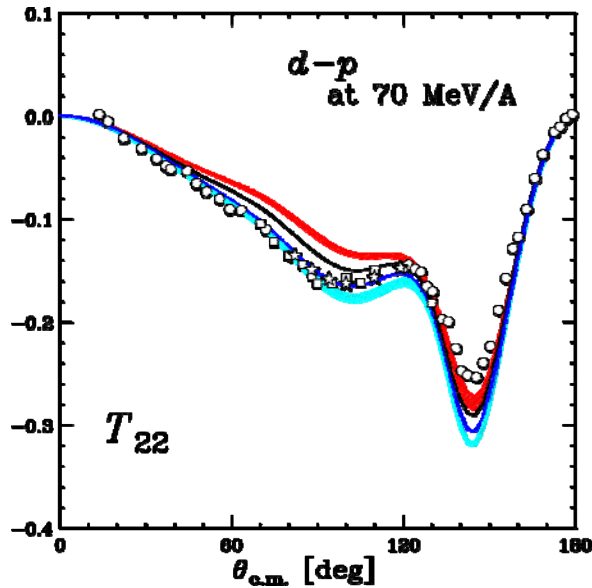
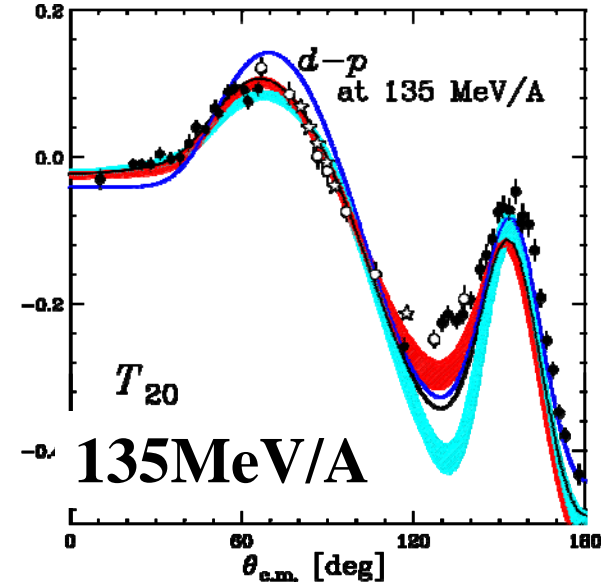
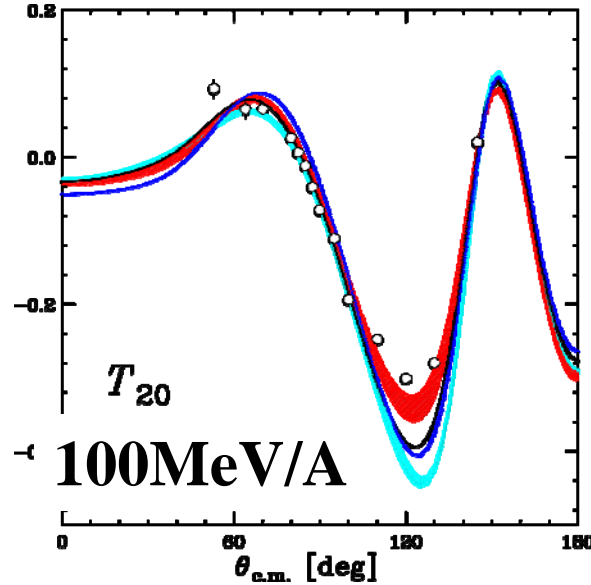
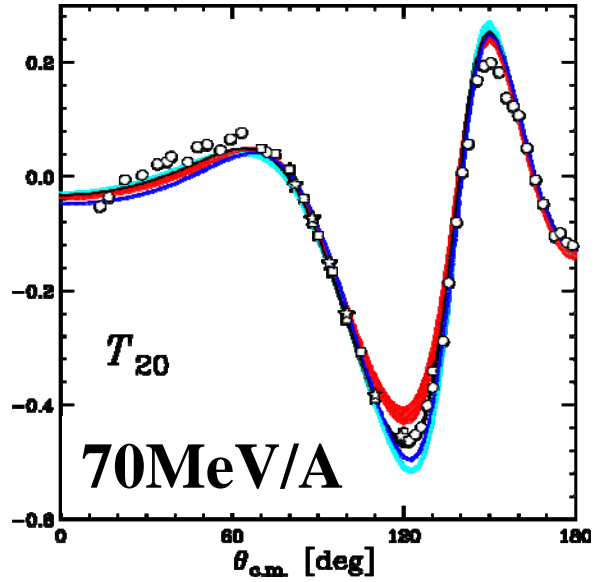
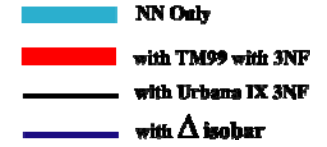
TABLE IV. Triton binding energies and their differences (in MeV) calculated for various model Hamiltonians with different  $NN$  potentials and contributions to the  $3N$  force added consecutively. All  $\pi NN$  vertices in the  $3N$  forces of this table are calculated in PV coupling. The columns labeled  $E_t$  show the triton binding energies, while the ones labeled  $\Delta E_t$  indicate the differences between the binding energies of consecutive rows, indicating the effect of the corresponding  $3N$  force component.

3NF	Reid		Paris		Nijmegen 93		Bonn B	
	$E_t$	$\Delta E_t$	$E_t$	$\Delta E_t$	$E_t$	$\Delta E_t$	$E_t$	$\Delta E_t$
No 3NF	-7.230		-7.383		-7.756		-8.100	
+ $\pi\pi(a')$	-7.279	-0.049	-7.439	-0.056	-7.811	-0.055	-8.159	-0.059
+ $\pi\pi(b)$	-8.739	-1.460	-8.939	-1.500	-9.471	-1.660	-9.624	-1.465
+ $\pi\pi(d)$	-9.100	-0.361	-9.220	-0.281	-9.782	-0.311	-9.847	-0.223
+ $\pi\rho(\text{KR})$	-9.017	0.083	-9.118	0.102	-9.635	0.147	-9.672	0.175
+ $\pi\rho(\Delta^+)$	-8.849	0.168	-8.961	0.157	-9.464	0.171	-9.506	0.166
+ $\pi\rho(\Delta^-)$	-8.747	0.102	-8.821	0.140	-9.285	0.179	-9.325	0.181
+ $\pi\rho(T)$	-8.772	-0.025	-8.850	-0.029	-9.316	-0.031	-9.352	-0.027
+ $\pi\sigma(Z)$	-8.273	0.499	-8.213	0.637	-8.663	0.653	-8.658	0.694
+ $\pi\sigma(N^*)$	-8.711	-0.438	-8.610	-0.397	-9.145	-0.482	-9.055	-0.397
+ $\pi\omega(Z)$	-9.213	-0.502	-9.380	-0.770	-9.977	-0.832	-9.956	-0.901
+ $\pi\omega(N^*)$	-8.735	0.478	-8.898	0.482	-9.370	0.607	-9.524	0.432

coupling. The columns labeled  $E_t$  show the triton binding energies, while the ones labeled  $\Delta E_t$  show the differences between the binding energies of consecutive rows, indicating the effect of the corresponding  $3N$  force comp

3NF	Reid		Paris		$E_t$
	$E_t$	$\Delta E_t$	$E_t$	$\Delta E_t$	
No 3NF	-7.230		-7.383		-7.7
$+\pi\pi(a')$	-7.279	-0.049	-7.439	-0.056	-7.8
$+\pi\pi(b)$	-8.739	-1.460	-8.939	-1.500	-9.4
$+\pi\pi(d)$	-9.100	-0.361	-9.220	-0.281	-9.7
$+\pi\rho(KR)$	-9.017	0.083	-9.118	0.102	-9.6
$+\pi\rho(\Delta^+)$	-8.849	0.168	-8.961	0.157	-9.4
$+\pi\rho(\Delta^-)$	-8.747	0.102	-8.821	0.140	-9.2
$+\pi\rho(T)$	-8.772	-0.025	-8.850	-0.029	-9.3
$+\pi\sigma(Z)$	-8.273	0.499	-8.213	0.637	-8.6
$+\pi\sigma(N^*)$	-8.711	-0.438	-8.610	-0.397	-9.1
$+\pi\omega(Z)$	-9.213	-0.502	-9.380	-0.770	-9.9
$+\pi\omega(N^*)$	-8.735	0.478	-8.898	0.482	-9.3

# Spin 観測量の現状







# まとめ

## Three Nucleon Force

- 核子、中間子場の最もシンプルな過程の一つ。
- 原子核の基本的な性質を説明する上で重要。
- 核力の統一的な理解に欠かせない。

## Nd Scattering

三核子間力の諸性質を定量的に調べる上で有効。

- 運動量依存性. スピン量子数依存性. アイソスピン依存性は  $T=1/2$ .

運動量移行 :  $< 3\text{fm}^{-1}$  DCS :  $2\pi$  3NF good agreement

:  $> 4\text{fm}^{-1}$  DCS : 短距離型の三体力が必要か？

スピン観測量 :  $2\pi$  3NF では説明できない。

## *Energy Dependence of Nd Scattering for 3NF study.*

⇒ 三体力ポテンシャルの精緻化

: 軽イオン(偏極、非偏極  $p, d$ ) Energy 領域  $< 1\text{ GeV}/A$

⇒  ${}^3\text{He}$  も面白いかも。

: 2NF の確立も必要になってくる。