

核子間三体力について



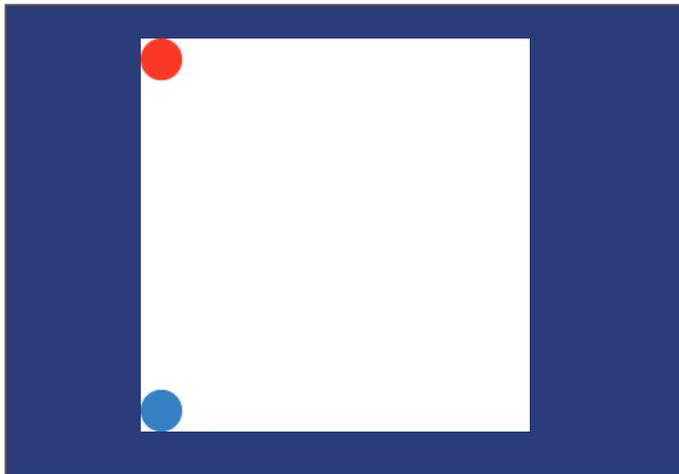
理研仁科加速器研究センター

関口 仁子

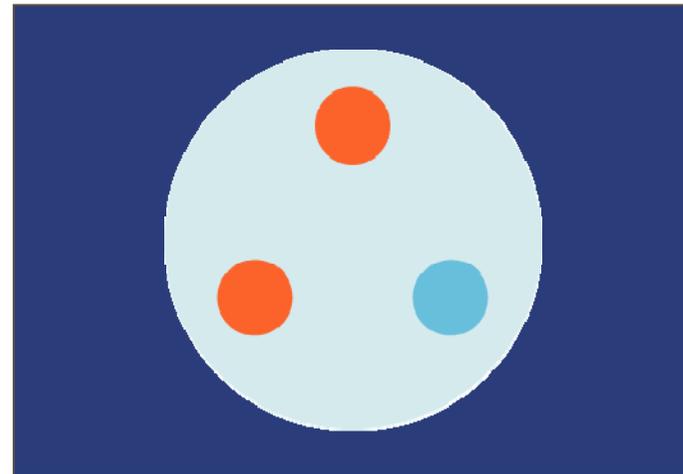
核子間三体力 (Three Nucleon Force)

- ▶ 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

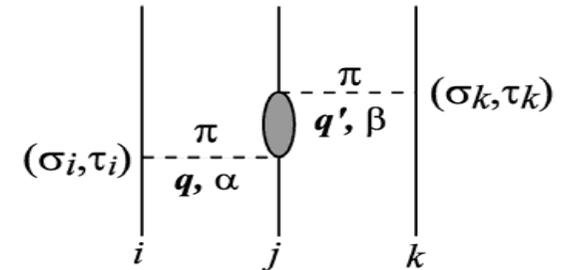
- ▶ Low Momentum Expansion of πN Scattering
- ▶ Cut-off パラメータ Λ は ³H の束縛エネルギーを再現するように決める

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

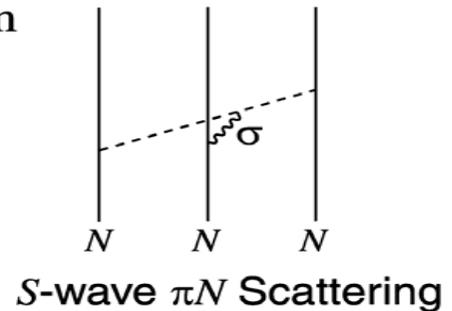
$$F_{\pi NN}(q^2) = \frac{\Lambda^2 - m_\pi^2}{\Lambda^2 + q^2}$$

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

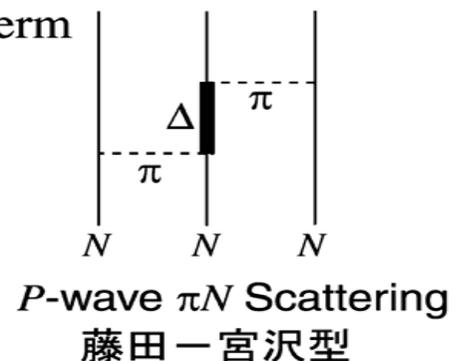
General Form



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 -

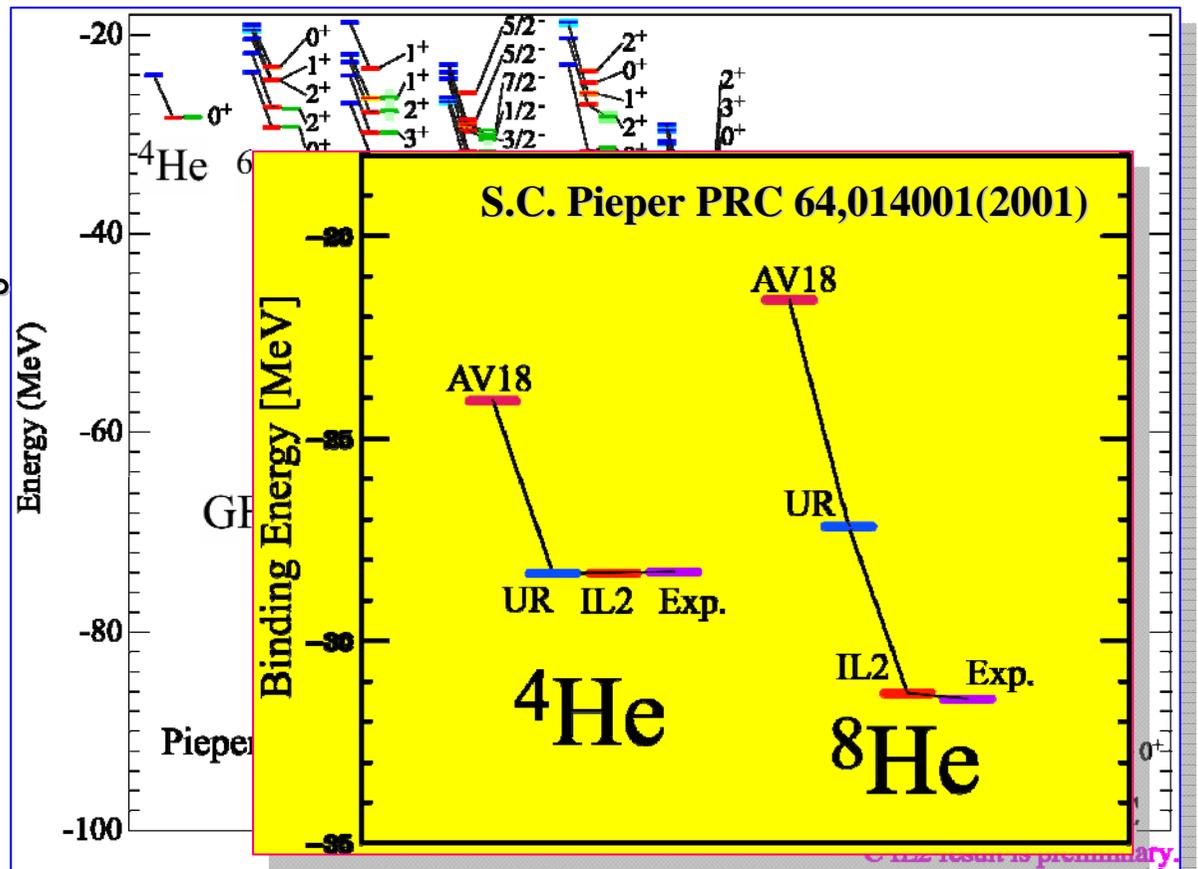
- 低エネルギーQCDの記述
- QCDラグランジアンとの接点
カイラル対称性を考慮した有効場
- カイラル対称性の破れ
べき展開 $\sim \pi$ 中間子の質量程度 (高々 3fm^{-1})
- 相互作用:
 - π 中間子 (Goldstone ボゾン)
 - + 核子
 - + 接触相互作用 (重い中間子, Δ etc..)
- 二体力、三体力、四体力...
を統一的に導き出すことができる
- 二体力 $>$ 三体力 $>$ 四体力 ...
を説明. 三体力は、 $N^2\text{LO}$ で現れる.

	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 ...)

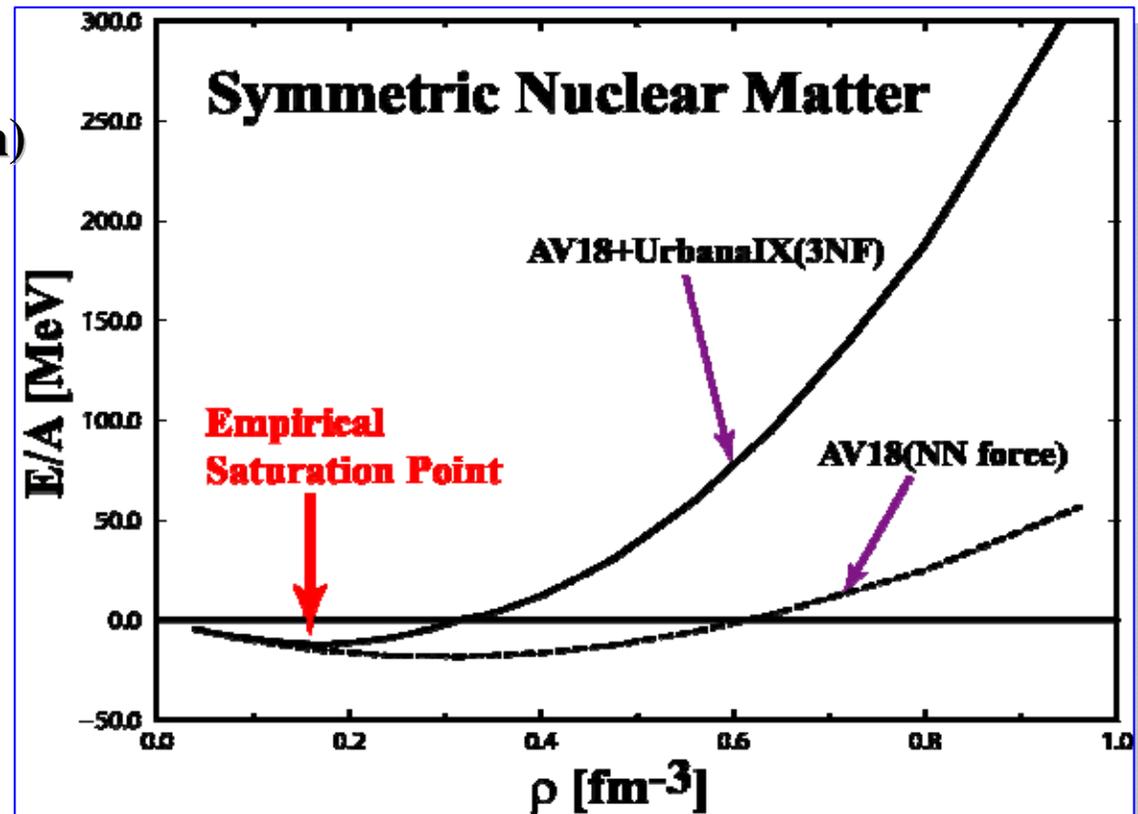
- 二体力だけでは、実験値を説明できない。
- 三体力(藤田・宮沢型)の導入により、実験値を再現。
- 結合エネルギーにおいて核子間三体力の効果が占める割合
 - 10 - 25 %
 - 引力



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

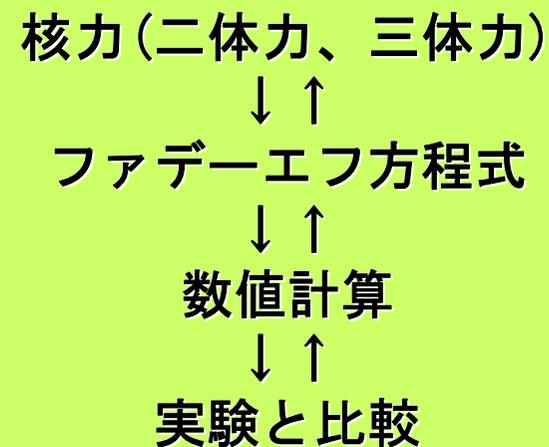
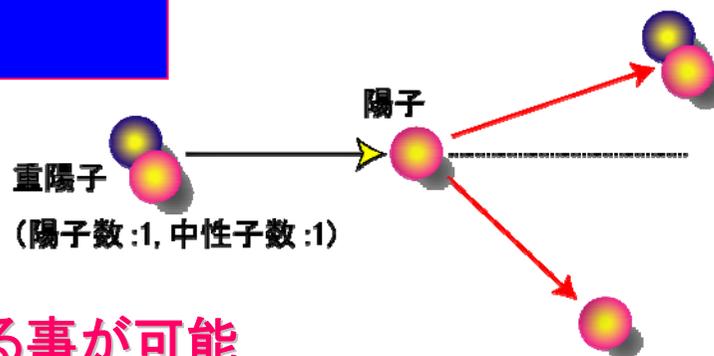
重陽子・陽子散乱

- 三つの核子で構成される系(三核子系)

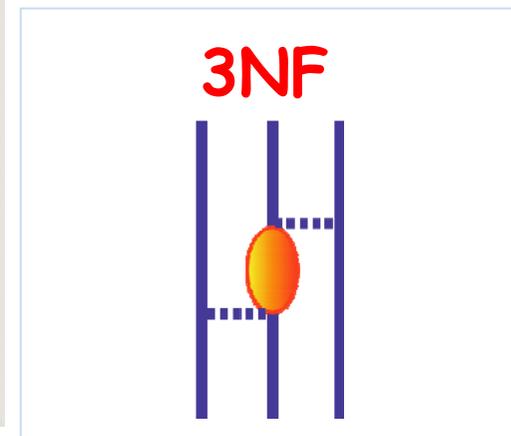
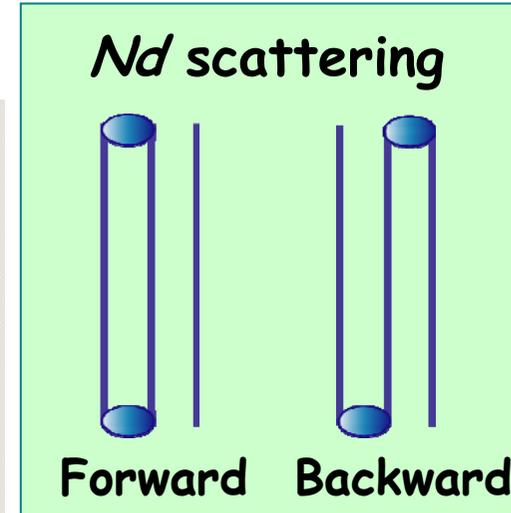
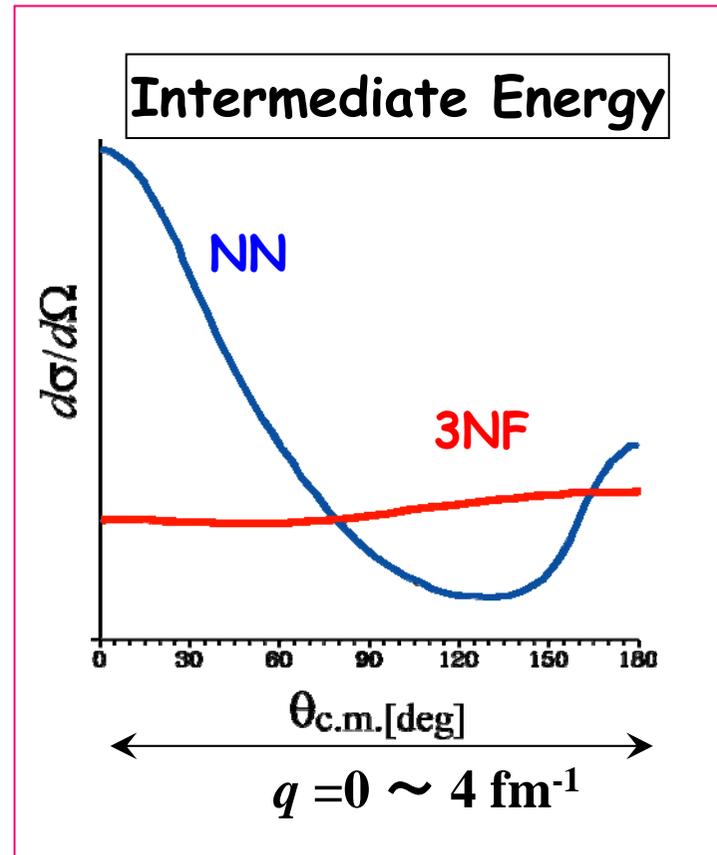
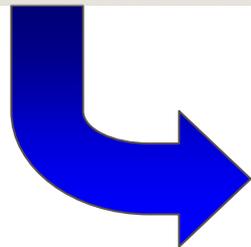
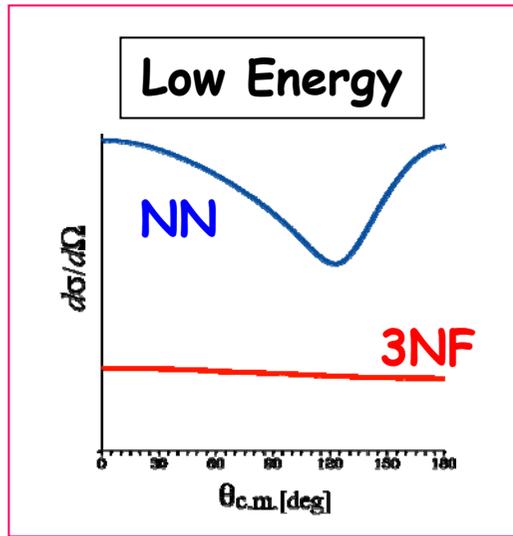
- 確立された二体力を用いた三体系の厳密計算
- 高精度な三体系の実験データを比較

⇒ 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

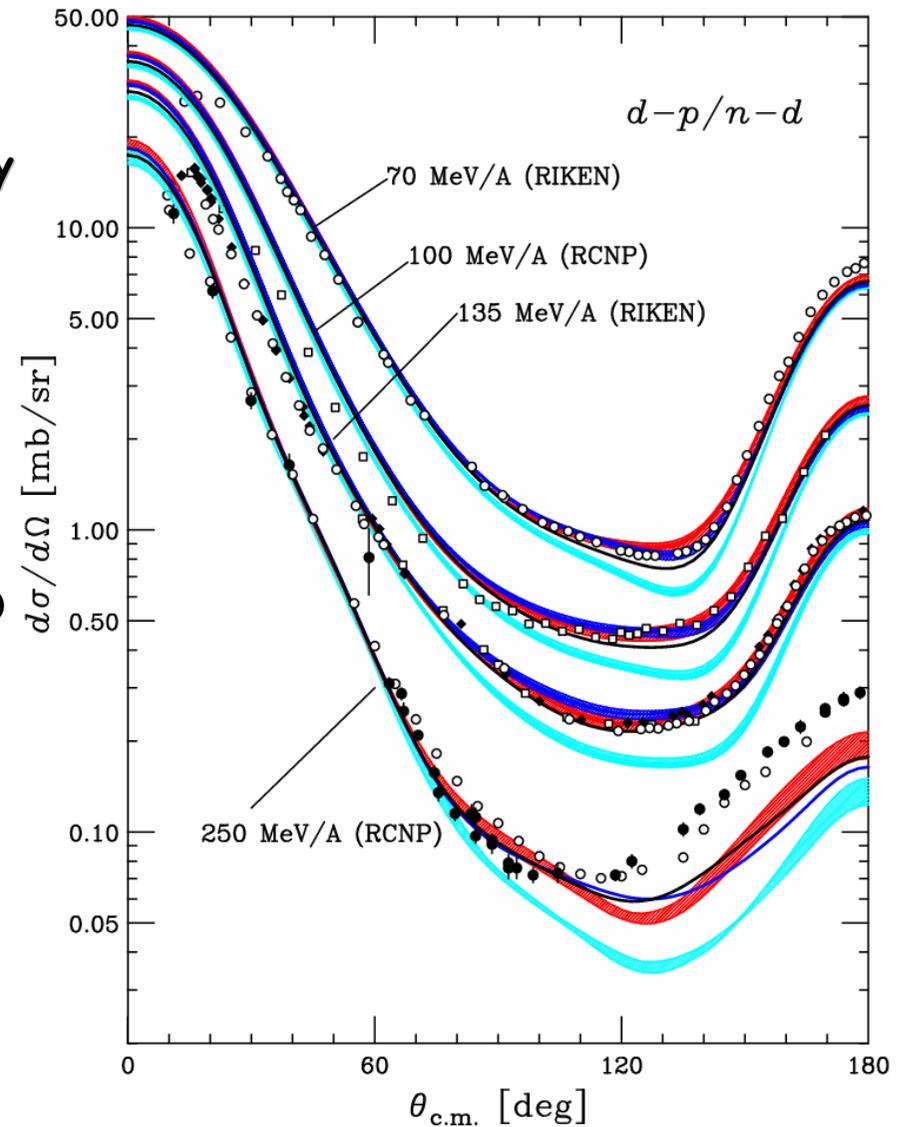
Discrepancies between the data and the calculations based on 2NF only

- Backward angles
- Large as an Energy Increases

3NF Effect ?

- Agreement is improved by 2π -3NF
- but not enough at higher energies

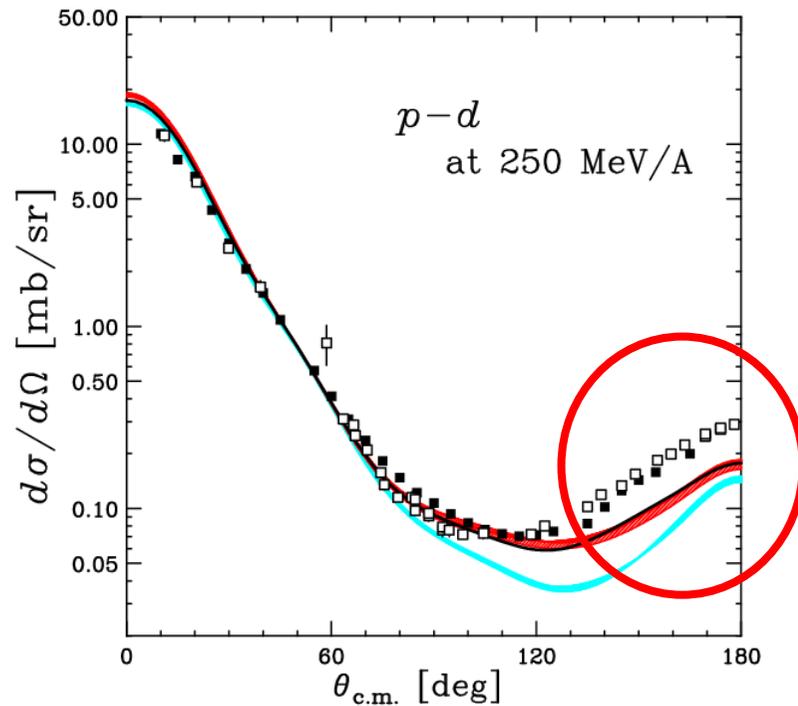
-  NN Only (CD Bonn, AV18, Nijmegen I,II)
-  with TM99 with 3NF
-  with Urbana IX 3NF



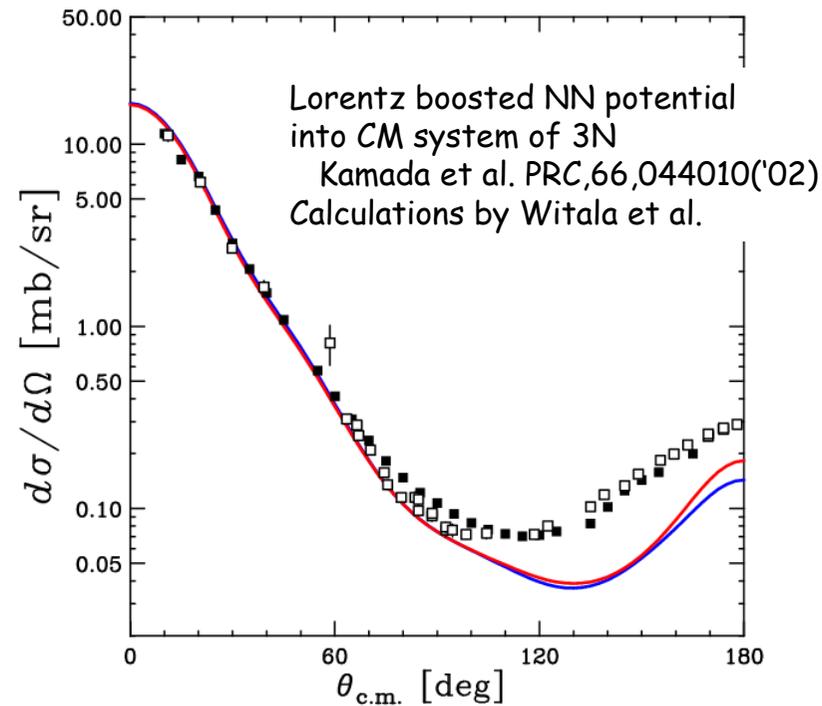
$d\sigma/d\Omega$: go to higher energies

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 %.

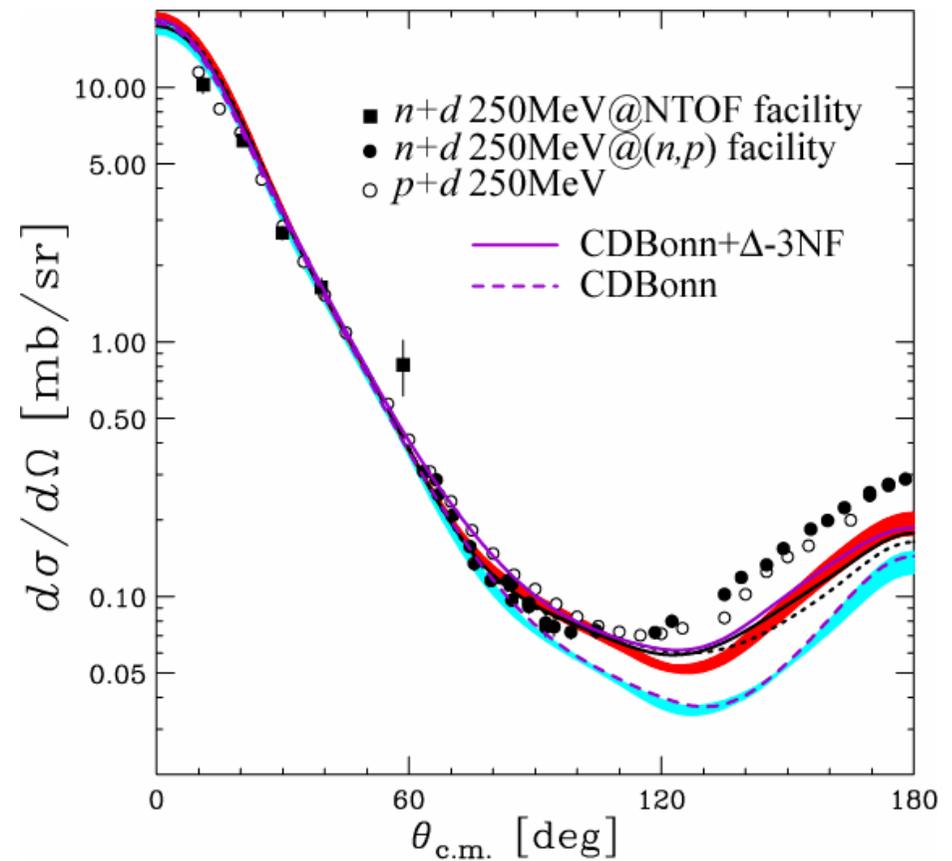
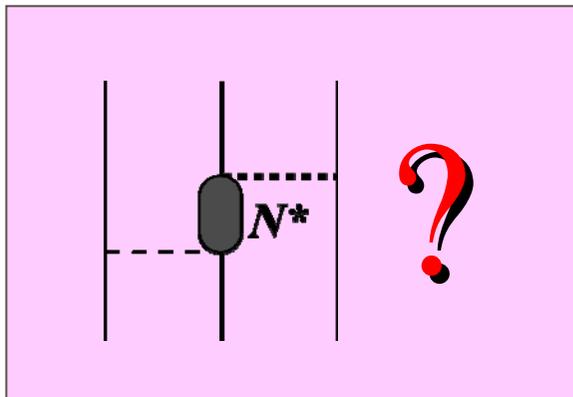
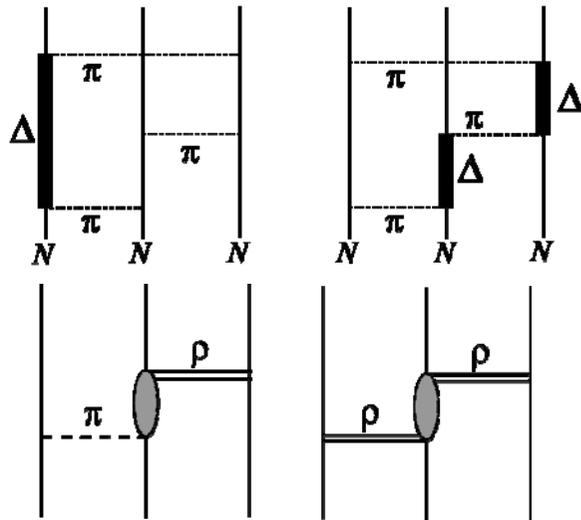


Relativistic Effects :
only visible at very backward angles

New Challenge

Small effects of the Δ -isobar excitations

with any mesons (π , ρ , σ , ω)



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

Exp. = - 8.482 MeV

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

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

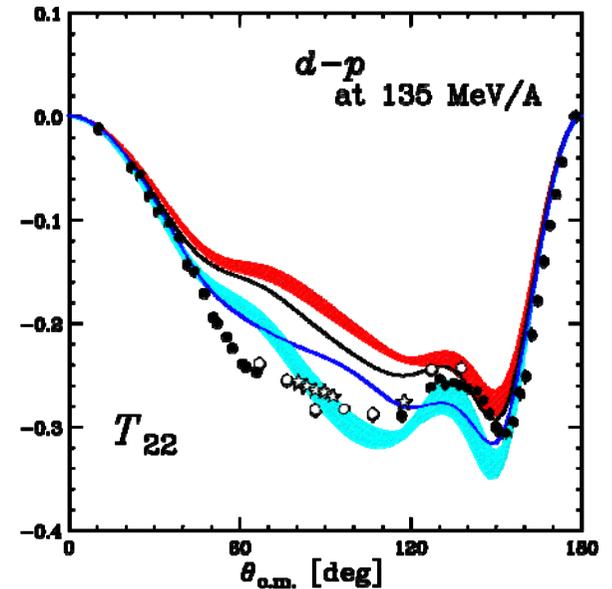
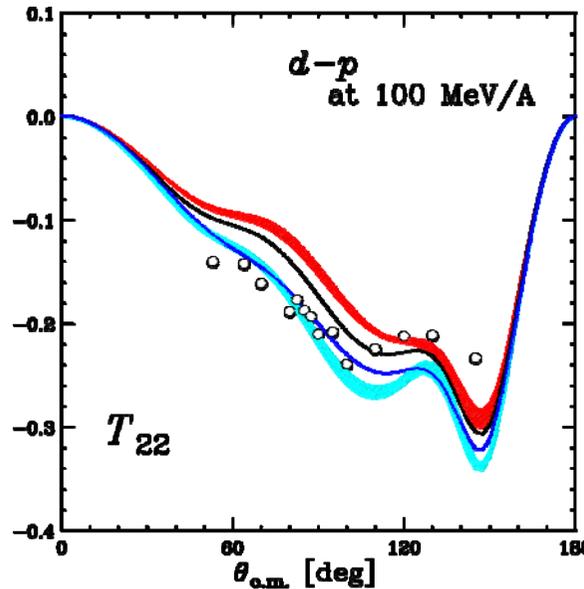
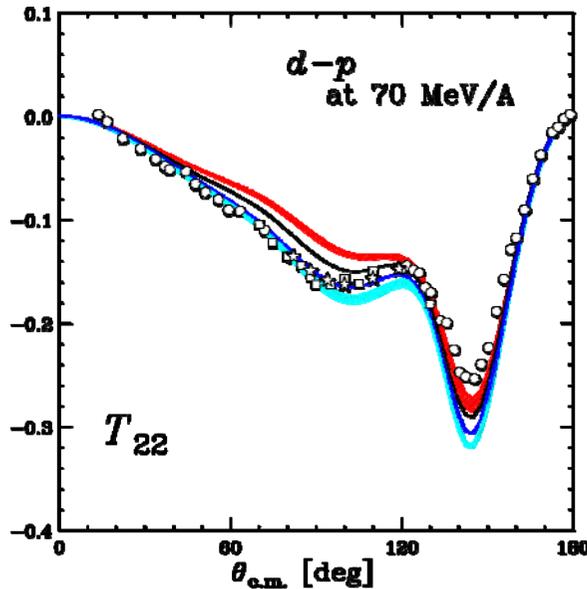
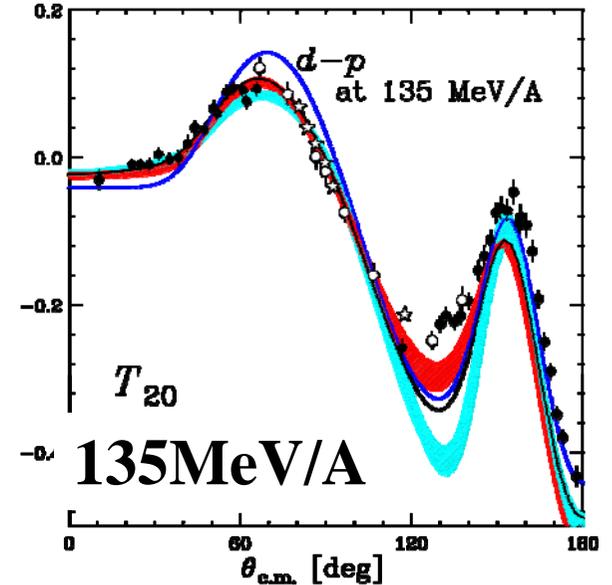
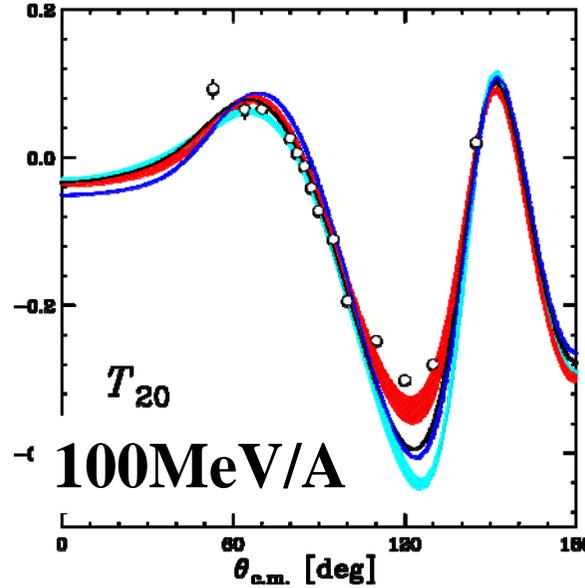
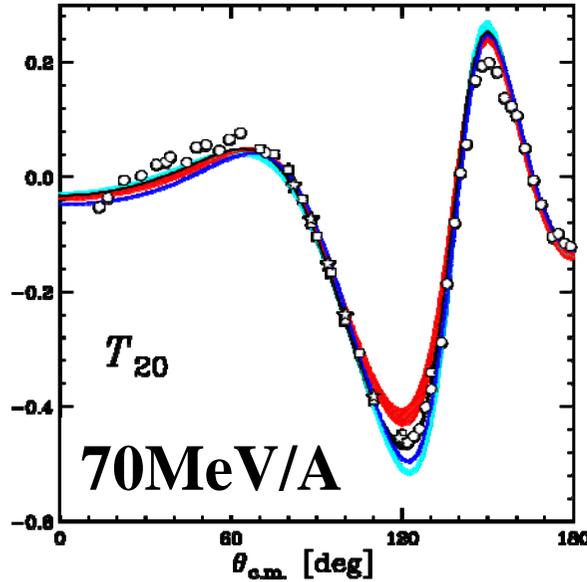
TABLE IV. Triton binding energies and their differences (in MeV) calculated for various model Hamiltonians with different NN potentials and contributions to the $3N$ force added consecutively. All πNN vertices in the $3N$ forces of this table are calculated in PV coupling. The columns labeled E_t show the triton binding energies, while the ones labeled ΔE_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	ΔE_t	E_t	ΔE_t	E_t	ΔE_t	E_t	ΔE_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 ΔE_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	ΔE_t	E_t	ΔE_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 : 2π 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 : 2π 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 $< 1\text{ GeV}/A$

⇒ ^3He も面白いかも。

: 2NF の確立も必要になってくる。