

KIDS DFT in CENuM



대구대학교
현창호

Korea-IBS-Daegu-SKKU

순서

- KIDS DFT의 개발
- KIDS DFT의 정립
- CENuM에서 KIDS의 성과
- 후속 과제: 차별화와 첨단화

KIDS DFT의 개발과 활용 연구에 함께 하신 분들

P. Papakonstantinou, 박태선, 임연환,

오용석, 길하나,

이창환, 김영민, 최용범,

김경식, 남승일, P. Hutaurok,

천명기, E. Hiyama, 최순철,

K. Yoshida, N. Hinohara,

소운영, 최기석, 허경수,

D. Sen, A. Guha

모든 분들께 깊은 감사 드립니다.

KIDS DFT의 개발

2015년 10월 20일

- PP: why not use $\alpha=1$. (유효성 제한을 복잡하게)
- CHH: Is it possible to have counting rules for the interactions in nuclear matter?
- TSP: Direct application of pionless theory?
- YL: Possible to obtain 3B free in general form?

① Strategy

- └ Indirect
- └ Direct

① Indirect

- Input E/A from pionless EFT
- Fit parameters to some data
- Apply to other problems: PNM, NSM

② Direct

- Fix counting rule: Issue is 3B free
- Do calculation increasing order by order
- Check convergence
- Apply to other problems

November 10: next meeting

KIDS DFT의 개발

고밀도 핵물질 연구

- RMF 모형: 1993년부터 (박사 과정)
- QMC 모형: 2001년부터 (성균관대 포닥)
- Skyrme force: 2012년부터 (임연환 교수 대구대 포닥)

RMF 모형

- 기존 모형이 데이터를 맞추지 못하면 중간자의 고차항 추가
- 새로운 항의 형태와 범위에 대한 뚜렷한 규칙이 없음

Skyrme force

- 두 핵자 간 상호작용을 평균장으로 기술
- 다 핵자 상호작용은 밀도 의존항으로 표현
- 밀도 의존항의 지수가 임의적 ($\alpha=1, 1/3, 1/6\cdots$ 등 모형에 따라 다름)

$$\begin{aligned}\mathcal{V}_{i,j}(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = & t_0(1 + x_0P_\sigma)\delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \\ & + \frac{1}{2}t_1(1 + x_1P_\sigma)[\delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)\mathbf{k}^2 + \mathbf{k}'^2\delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)] \\ & + t_2(1 + x_2P_\sigma)\mathbf{k}' \cdot \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)\mathbf{k} \\ & + \frac{1}{6}t_3(1 + x_3P_\sigma)\rho^\alpha\delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \\ & + iW_0\mathbf{k}' \times \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)\mathbf{k} \cdot (\boldsymbol{\sigma}_i - \boldsymbol{\sigma}_j),\end{aligned}\quad (7)$$

KIDS DFT의 개발

핵구조 이론의 체계적 전개

- 대략난감: 어디에서 어떻게 시작해야 할까?
- 힌트: Skyrme force의 운동량 전개
- 작은 운동량에 의한 섭동 전개: chiral perturbation theory
- 무엇을 전개할 것인가?: density functional theory
- 새로운 이론: EFT와 DFT의 결합

전개 규칙

- 핵물질의 페르미 운동량 ~ 300 MeV
- ρ 중간자의 질량 ~ 800 MeV
- k_F/m_ρ 에 대해 지수 전개: 밀도 의존항의 일반화

$$\mathcal{E}(\rho, \delta) = \frac{E(\rho, \delta)}{A} = \mathcal{T}(\rho, \delta) + \sum_{i=0}^3 c_i(\delta) \rho^{1+i/3}$$

KIDS DFT의 개발

전개 규칙

- 정말 최초인가: 아님
- 어떻게 차별화 할 것인가?

모형 상수 결정 규칙

- 기존 모형: 주어진 데이터(원자핵 데이터가 대부분, 핵물질은 없거나 일부)를 한꺼번에 동시에 맞춤
- KIDS DFT: 우선과 후순을 도입
- 제1단계: 7개의 모형 상수를 핵물질 상태방정식에 맞춤
- 제2단계: 2개 또는 그 이상의 추가 상수를 원자핵 데이터에 맞춤
- 장점: 핵물질과 원자핵에 대한 피팅을 분리. 핵물질과 원자핵을 통합해서 기술하는 이론을 완성

$$\begin{aligned} V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = & t_0(1 + x_0 P_\sigma) \delta(\vec{r}) \\ & + \frac{1}{2} t_1(1 + x_1 P_\sigma) [\delta(\vec{r}) \vec{P}^2 + \vec{P}^2 \delta(\vec{r})] \\ & + t_2(1 + x_2 P_\sigma) \vec{P}' \cdot \delta(\vec{r}) \vec{P} \\ & + \sum_i t_{3i} \rho^{\alpha_i} (1 + x_{3i} P_\sigma) \delta(\vec{r}) \\ & + i W_0 \vec{\sigma} \cdot [\vec{P}' \times \delta(\vec{r}) \vec{P}], \\ = & 1, 2, 3, \dots \text{ and } \alpha_i = i/3. \text{ In Eq. (1), } \vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2, \end{aligned}$$

PRC73 (2006): GSk 모형

KIDS DFT의 정립

대칭에너지

핵구조

경입자 산란

하이퍼핵

중성자별과 상전이

핵반응

KIDS DFT의 정립 [1]

대칭에너지 [길하나, P. Papakonstantinou, 현창호]

$$\mathcal{E}(\rho, \delta) = \mathcal{T}(\rho, \delta) + E(\rho) + S(\rho)\delta^2 + O(\delta^4); \rho = \rho_n + \rho_p, \delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$$

$$E(\rho) = E_B + \frac{1}{2}K_0x^2 + \dots; x = \frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0}$$

$$S(\rho) = J + Lx + \frac{1}{2}K_{\text{sym}}x^2 + \dots$$

제1단계

- $K_0 = 220, 225, \dots 260$ (9), $J = 30, 30.5, \dots 34$ (9)
- $L = 40, 45, \dots 70$ (7), $K_\tau = -420, -400, \dots -240$ ($K_{\text{sym}} = -300 \sim 96$) (10)
- $(K_0, J, L, K_{\text{sym}})$ 이 서로 다른 5,670개의 상태방정식

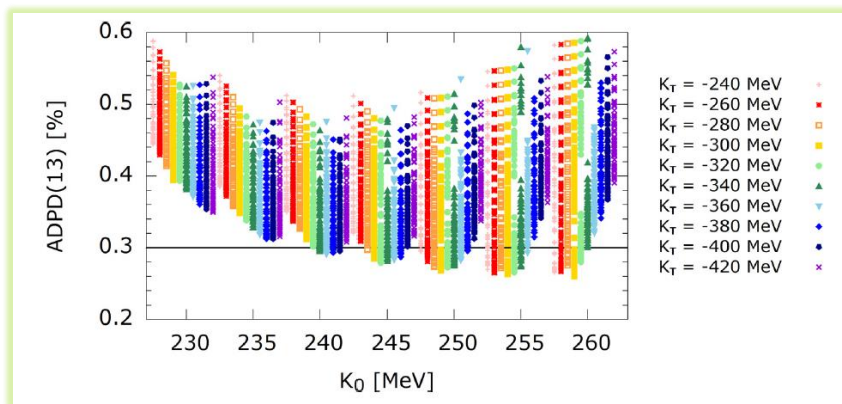
제2단계

- 2개의 추가 상수를 13개의 원자핵 데이터에 피팅
- 에너지와 전하 반경: ^{16}O , ^{40}Ca , ^{48}Ca , ^{90}Zr , ^{132}Sn , ^{208}Pb (12)
- 에너지: ^{218}U (1)
- 5,670개의 스کم 힘 모형 결정

KIDS DFT의 정립 [1]

제2단계

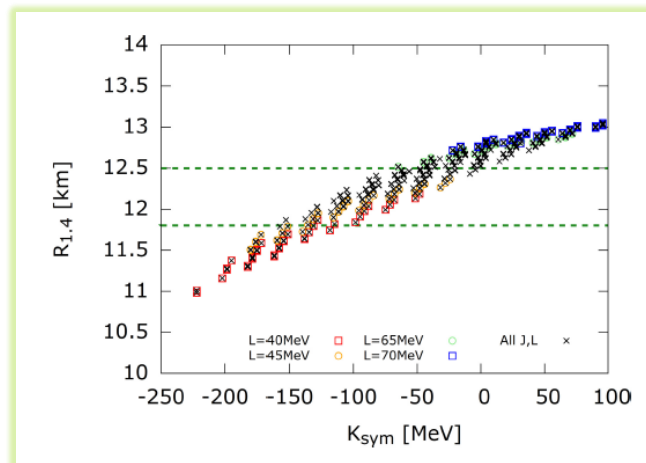
- 결과: 0.3% 이하의 모형 358개 (ADPD03)



$$ADPD(N) \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i^{\text{exp}} - O_i^{\text{cal}}}{O_i^{\text{exp}}} \right|$$

제3단계

- 중성자별 관측 자료: LMXB, NICER, GW의 질량-반경 관계
- $1.4 M_{\odot}$ 인 별의 반경: 11.8-12.5 km
- 결과: 158개 모형이 조건 만족 (R14)



KIDS DFT의 정립 [1]

핵대칭에너지

	ADPD03		R14	
	mean	s.d.	mean	s.d.
K_0	252.0	5.6	251.1	5.3
J	30.9	0.7	30.7	0.6
L	54.7	9.7	49.8	5.2
K_{sym}	-52.4	72.0	-82.4	33.7

- 기존 범위: $K_0=220-260$, $J=30-34$, $L=40-76$ (MeV)
- 모든 상수의 범위를 획기적으로 축소
- K_0 , J 는 원자핵 데이터만으로도 정확하게 결정가능
- L , K_{sym} 에는 중성자 별의 데이터가 결정적인 역할을 함

KIDS DFT의 정립 [2]

핵구조

- 원자핵 차트: 길하나, N. Hinohara, K. Yoshida, 현창호
- 알파 붕괴: 최용범, 길하나, 현창호, 이창환

원자핵 차트

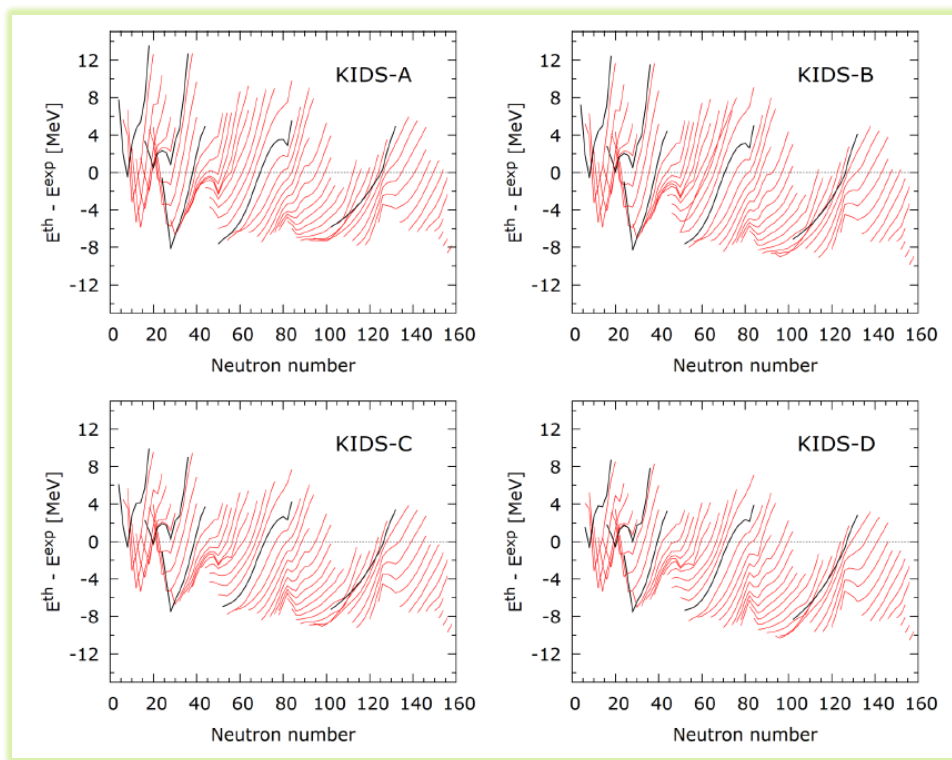
- $(K_0, J, L, K_{\text{sym}})$ 이 서로 다른 4개 모형: 대칭에너지의 효과에 주목
- 양성자 방울에서 $N=3Z$ 까지 Hartree-Fock 풀이: 결합 에너지, 전하 반경, 이중극자 변형, 에너지 준위 등 계산

	KIDS-A	KIDS-B	KIDS-C	KIDS-D
K_0	230	240	250	260
J	33	32	31	30
L	66	58	58	47
K_{sym}	-139.5	-162.1	-91.5	-134.5

KIDS DFT의 정립 [2]

원자핵 차트

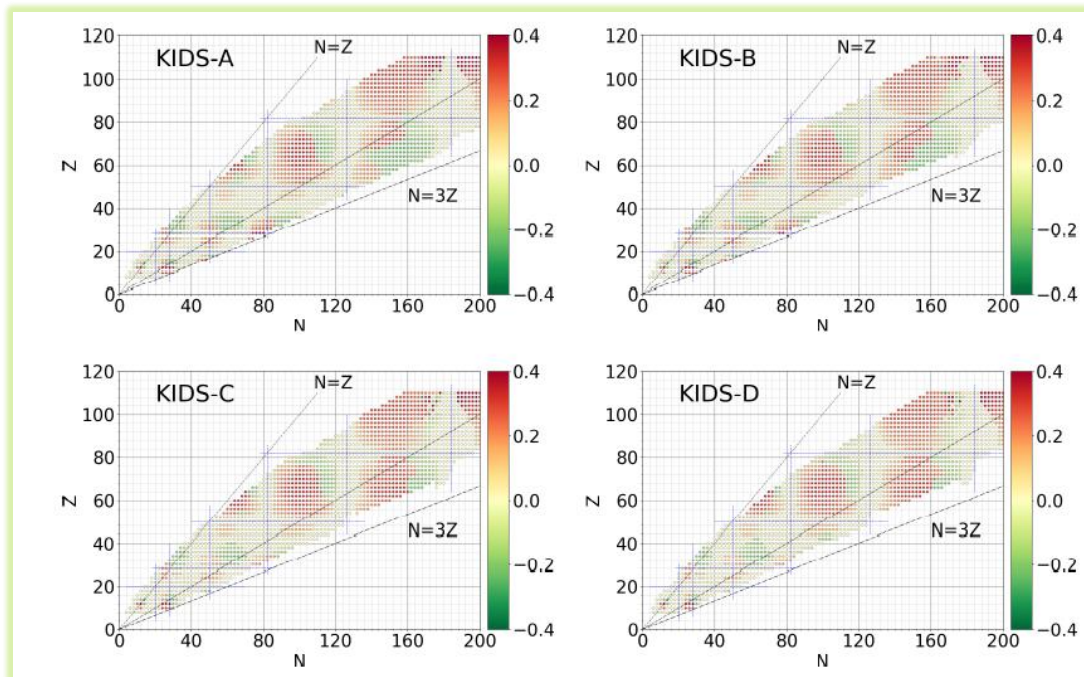
- 결과: 에너지
 - 630 여 개 핵 에너지의 RMSD: 4.5-5.0 MeV (SLy4: 5.3 MeV)
 - KIDS의 피팅 규칙(핵물질에 보다 큰 비중)이 기존의 방법(원자핵 데이터에 거의 전적으로 의존)에 비해 손색이 없음을 입증



KIDS DFT의 정립 [2]

원자핵 차트

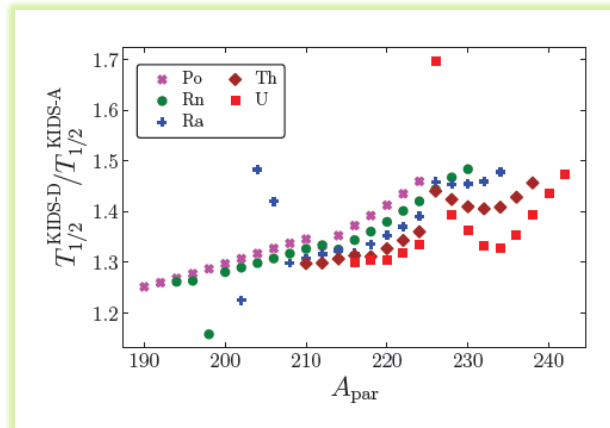
- 결과: 이중극자 변형
 - 양성자 방울선은 모형 간의 차이가 거의 없고 실험과 일치
 - 중성자 방울선은 상당한 격차를 보임: L 과 K_{sym} 이 주요 원인
 - $N=160$ 부근에서는 변형도가 반대인 경향을 보임



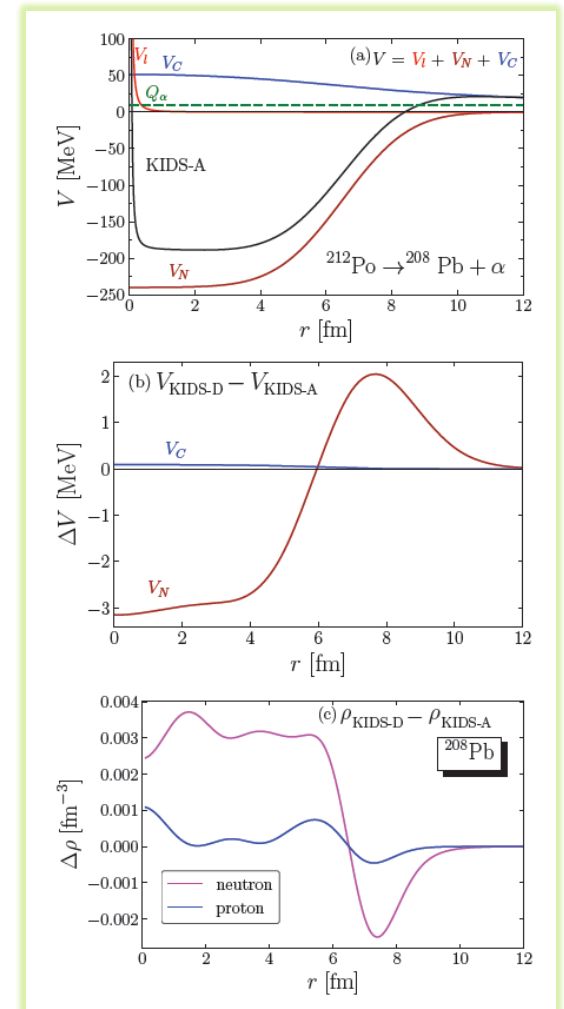
KIDS DFT의 정립 [2]

알파 붕괴

- KIDS-A, B, C, D를 이용하여 알파 붕괴 반감기와 대칭에너지의 상관 관계 조사
- Po, Rn, Ra, Th, U 동위원소의 반감기 계산
- 결과: 반감기 비율



- 차이의 원인
 - L이 클수록 중성자 껍질이 두꺼워짐
 - 껍질이 두꺼우면 장벽은 얇고 얇아짐: 반감기가 짧아짐



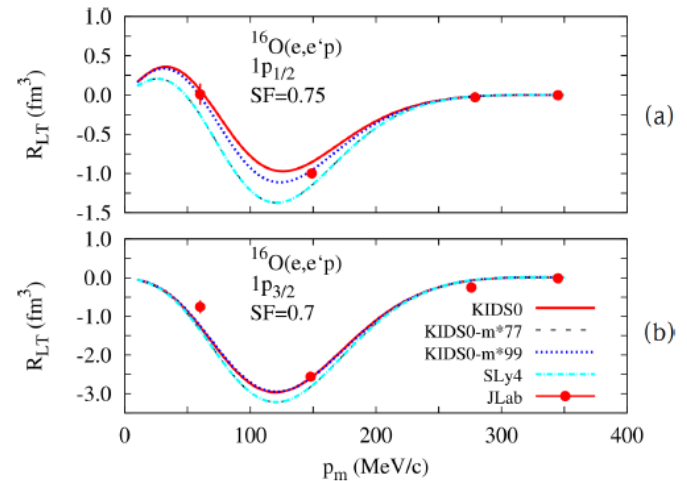
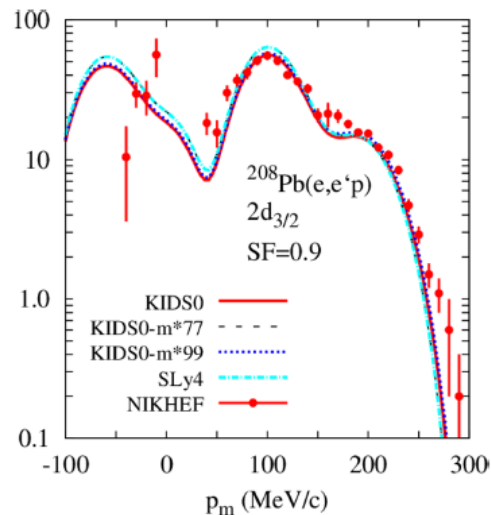
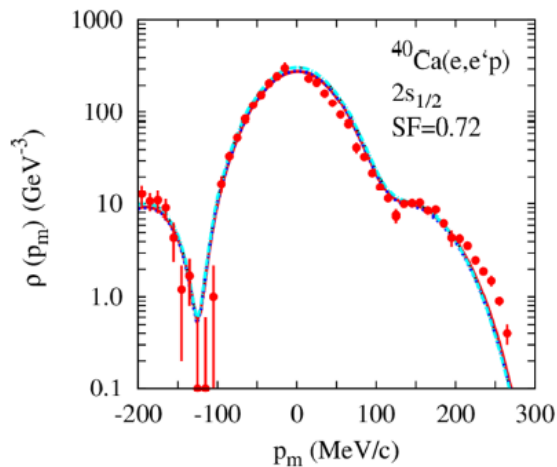
KIDS DFT의 정립 [3]

경입자 산란

- 핵자의 유효질량 효과
- 전자, 중성미자-원자핵 산란: 길하나, 현창호, 김경식
- 중성미자 핵물질 산란: 길하나, P. Hutaeruk, 남승일, 현창호

Exclusive 전자-원자핵 산란

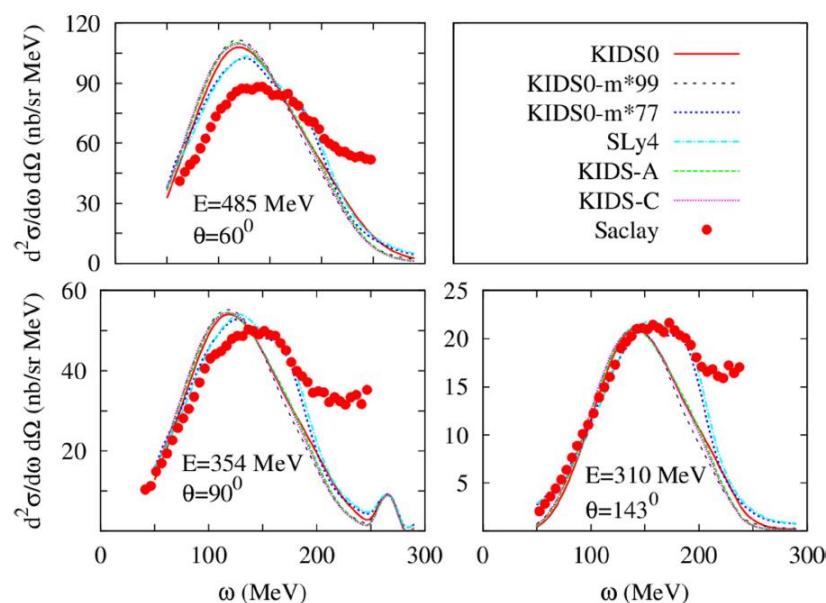
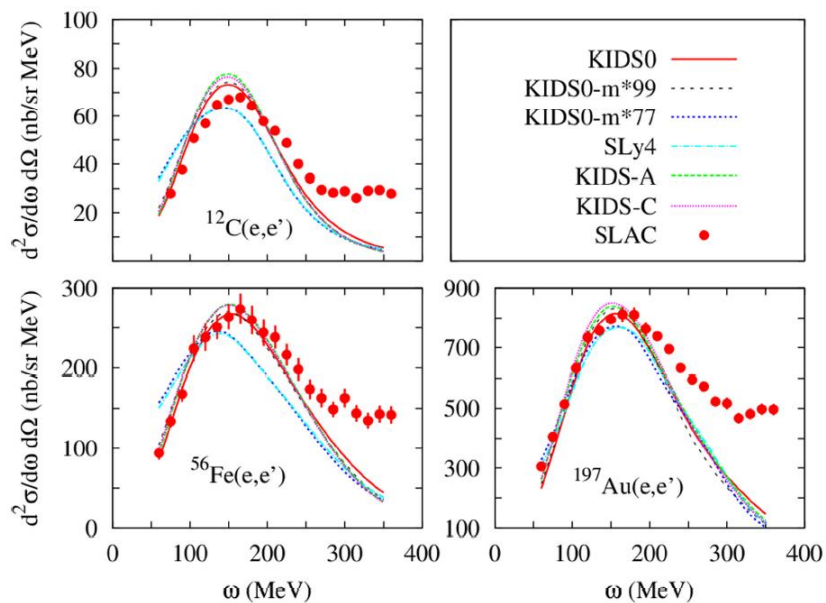
- 모형의 추가적인 조정없이 실험과 정확하게 일치: 핵반응 문제 적용에 자신을 가짐
- 유효질량의 효과는 미약. 하지만 차이가 나타나는 징후를 포착



KIDS DFT의 정립 [3]

Inclusive 전자-원자핵 산란

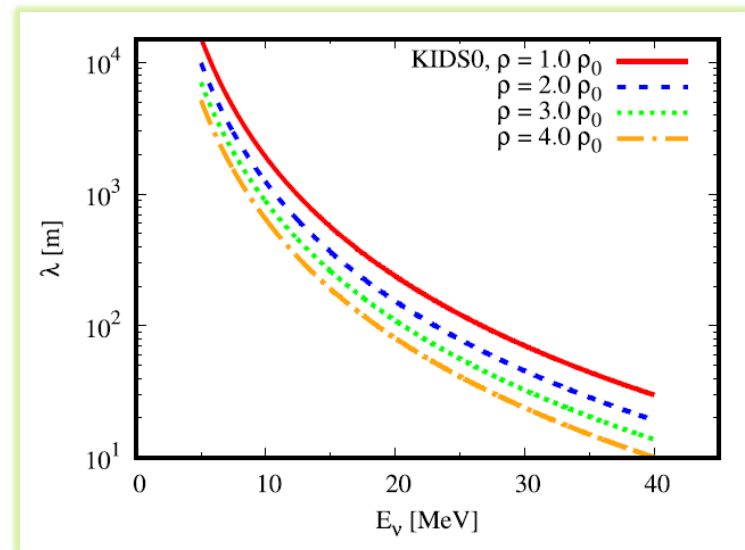
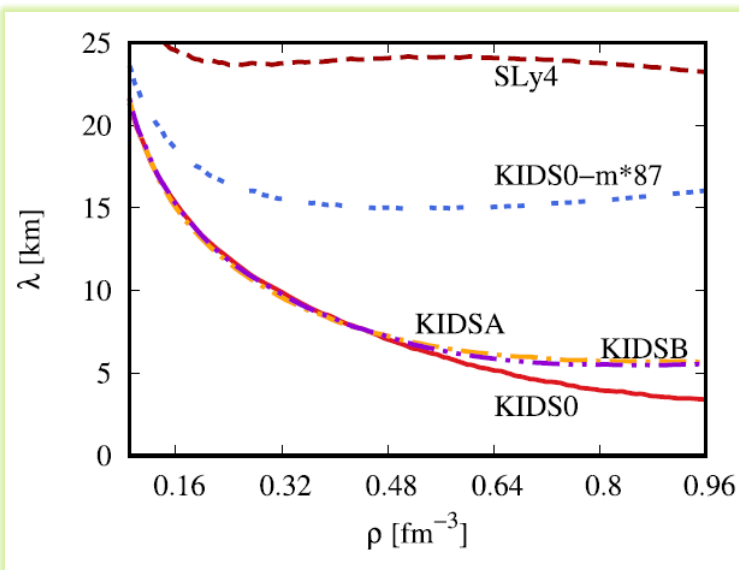
- SLAC: isoscalar 질량이 자유입자 질량과 비슷할 때 실험과 잘 일치
- Isovector 질량의 효과는 대수롭지 않음
- Saclay: 현재까지 제대로 설명하는 이론이 없음
- 유사한 결과를 중성미자-원자핵 산란에서도 얻음



KIDS DFT의 정립 [3]

중성미자 핵물질 산란

- 중성자별 내부는 베타 평형: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$, $p e^- \rightarrow n \nu$ 에서 중성미자 방출
- Isoscalar, isovector 유효질량이 중성미자의 mean free path에 미치는 영향
- 중성자별의 반경은 $\lesssim 13\text{km}$ 이므로 λ 가 작으면 이차산란, trapping 발생
- 중성자별 냉각, 초신성 폭발에서 면밀히 고려되어야 함



$E_\nu = 5 \text{ MeV}$

CENuM에서 KIDS의 성과

학술지 게재

	학술지(년도)	저자	피인용 수
1	PRC97 (2018)	P. Papakonstantinou, 박태선, 임연환, 현창호	59
2	PRC99 (2019)	길하나, P. Papakonstantinou, 현창호, 오용석	38
3	PRC100 (2019)	길하나, 김영민, 현창호, P. Papakonstantinou, 오용석	28
4	EPJA56 (2020)	김영민, 광규진, 현창호, 길하나, 이창환 [Review]	4
5	PRC103 (2021)	길하나, 김영민, P. Papakonstantinou, 현창호 [대칭에너지]	30
6	새물리71 (2021)	길하나, 현창호 [대칭에너지]	16
7	PRC104 (2021)	길하나, 현창호, 김경식 [경입자 산란]	13
8	JKPS81 (2022)	길하나, N. Hinohara, 현창호, K. Yoshida [핵구조]	4
9	PRC105 (2022)	길하나, 현창호, 김경식 [경입자 산란]	10
10	EPJA58 (2022)	최순철, E. Hiyama, 현창호, 천명기 [하이퍼핵]	8
11	IJMPE31 (2022)	길하나, P. Papakonstantinou, 현창호 [대칭에너지]	32
12	새물리72 (2022)	현창호 [핵구조]	8
13	PLB833 (2022)	김경식, 길하나, 현창호 [경입자 산란]	12
14	PRC106 (2022)	P. Hutaurok, 길하나, 남승일, 현창호 [중성미자]	14
15	PTEP2023 (2023)	P. Hutaurok, 길하나, 남승일, 현창호 [중성미자]	3
16	Symmetry15 (2023)	P. Papakonstantinou, 현창호 [Review]	9
17	PRC108 (2023)	길하나, N. Hinohara, 현창호, K. Yoshida [핵구조]	4

CENuM에서 KIDS의 성과

학술지 게재

	학술지(년도)	저자	피인용 수
18	MPLA39 (2024)	길하나, 현창호, 김경식 [핵구조]	0
19	JKPS85 (2024)	P. Hutaurok, 길하나, 남승일, 현창호 [중성자별]	5
20	CPC48 (2024)	김경식, 최순철, 길하나, 현창호 [경입자 산란]	0
21	PRC110 (2024)	허경수, 길하나, 최기석, 김경식, 현창호, 소운영 [핵반응]	0
22	Frontiers in Astron. Space Sci.11 (2024)	D. Sen, 길하나, 현창호 [중성자별]	2

투고 중인 논문

제목	저자	학술지
$\Lambda\Lambda$ interaction in a nuclear density functional theory and hyperon puzzle of the neutron star	최순철, E. Hiyama, 현창호, 천명기 [하이퍼핵]	PRC
Correlation between alpha-decay half-lives and symmetry energy	최용범, 길하나, 현창호, 이창환 [핵구조]	PRC
Non-radial oscillation of hadron neutron stars, quark stars and hybrid stars: Estimation of f, p and g modes	A. Guha, D. Sen, 현창호 [중성자별]	PTEP

후속 과제: 차별화와 첨단화

- CENuM 기간의 연구 성과: 핵구조 이론을 체계적으로 전개하고 향상시키는 방법 (전개 규칙+피팅 규칙)을 정착 시킴
- 대칭에너지, 유효질량, 그 외 여러 상호작용 (pairing, tensor, spin symmetry energy 등)의 불확실성을 최대한 줄이는 연구 추진
- 핵반응에도 불확실성의 정량화를 구현하는 연구 추진
 - 저에너지 핵반응
 - 유별난 핵의 핵반응
 - 전자-방사성 동위원소 산란
- 유한 온도 상태방정식
 - 초신성 폭발
 - 중성자별 냉각
 - 유한 온도 강입자-쿼크 상전이

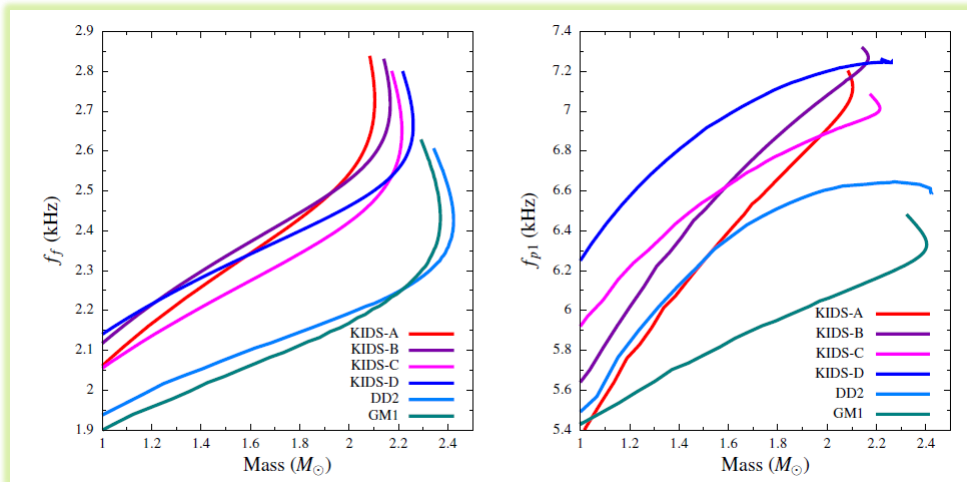
후속 과제: 차별화와 첨단화

- 질량 모형 개발 (KIDS-M)
 - KIDS 모형의 상수를 50개 이상의 원자핵 데이터에 global fitting
 - 목표 정확도: $\text{RMSD}(E) \lesssim \text{MeV}$
 - 천체 핵반응 (r-process) 적용
 - 초중핵의 특성과 생성 또는 분열
- 고에너지 천체물리
 - 암흑물질
 - 하이퍼론 퍼즐
 - 상전이
 - 중력파

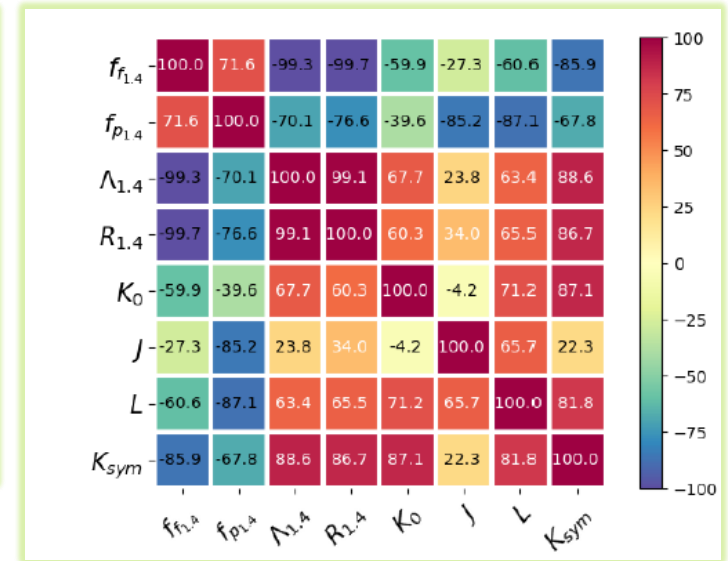
후속 과제: 차별화와 첨단화

최신 연구

- Non-radial oscillations of hadronic neutron stars, quark stars, and hybrid stars : Estimation of f, p, and g modes, D. Sen, A. Guha, 현창호, 2024.18569
- 문제: 대칭에너지의 정확도 ($J=30.7 \pm 1.2$ 만족, $L=49.8 \pm 10.4$ 불만)
- 중성자별의 지진: f, p, g, ... 등의 진동 모드 (f: 1-3 kHz, p: ≥ 5 kHz, g: $\lesssim 1$ kHz)



- f 모드: 상태방정식의 stiffness를 가장 잘 반영
- p 모드: L과 가장 강하게 연관됨



후속 과제: 차별화와 침단화

- 목표를 달성하기 위해서
 - 다양한 분야와의 교류
 - 실험-이론의 긴밀한 연락과 협력
 - 고마움과 은혜에 보답