

# M1 用課題論文リスト

京都大学原子核理論グループ

2024 年 4 月

下記のカテゴリー [A],[B] から各一課題ずつ選び、それぞれ前期、後期のコロキウムで発表すること：

- 各課題は (1), (2),,, の番号が付いている。
- [A], [B] の発表順序は自由。
- 発表時間は各自 20 分程度。

ただし、各自の課題選択において発表課題が重ならないよう互いに調節すること。  
また過去 2 年に報告された論文については、今年度は選択しないようにすること。

---

## [論文リストと解説]

### [A] 核多体分野

#### ☆ 核構造/核反応

##### (1) 共鳴状態とその取り扱い

A,B のいずれかを選択すること。

(A) “Resonances in Complex-Scaled Orthogonality Condition Model of Nuclear Cluster System”,  
A. T. Kruppa and K. Kato, Prog. Theor. Phys. Vol. 84 No. 6 (1990) pp. 1145-1159

中性子過剰核は、 $\beta$  崩壊に対して不安定というだけでなく、強い相互作用の観点からも「弱結合系」という特色を持つ。量子力学系では、束縛状態よりもエネルギー的に上な非束縛状態が存在するが、中性子過剰核ではこの非束縛状態の数学的な記述が重要である。非束縛状態では連続状態の中にいくつかの(物理的に重要な)共鳴状態が含まれている。連続状態の中からいかにして共鳴状態を取り出すか、ここで用いられている Complex Scaling 法は座標を複素回転し、回転角に依存しないエネルギー解を探すことで共鳴状態を見つけ出す方法である。ただし、この論文は中性子過剰核に適用する以前のものであり、安定核のクラスター状態が主に議論されている。

(B) “Gamow shell model description of neutron-rich nuclei”,

N. Michel, W. Nazarewicz, M. Ploszajczak, and K. Bennaceur, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 042502

非束縛状態および共鳴状態を取り入れて多体問題を解くために、複素エネルギー平面で定義される Berggren 基底を用いて波動関数を展開して殻模型計算を行った初めての論文。この手法は Gamow shell model と呼ばれ、(A) の複素スケーリング法とも密接に関連する。 $^{18}\text{O}$  核および  $^6\text{He}$  核に対して計算が行われ、弱束縛系における連続状態との結合の重要性が指摘された。この論文の詳細版である

N. Michel, W. Nazarewicz, M. Ploszajczak, and J. Okolowicz, Phys. Rev. C67 (2003) 054311  
も合わせて読むとよい。

## (2) クラスター構造におけるパリティ二重項

A,B のいずれかを選択すること。

(A) “A Molecule-like Structure in Atomic Nuclei of  $^{16}\text{O}^*$  and  $^{20}\text{Ne}$ ”,

Hisashi Horiuchi and Kiyomi Ikeda, Prog.Theor.Phys. Vol. 40 No. 2 (1968) pp.277-287

$^{16}\text{O}$  と  $^{20}\text{Ne}$  のクラスター構造に関する論文で、sd-shell におけるクラスター構造を提案した初期の頃の代表的な論文である。原子核の内部状態が2つのクラスターから成る非対称な構造を持つ場合にパリティ二重項(正パリティと負パリティの組)が現れると考え、 $^{16}\text{O}$  における  $^{12}\text{C}+\alpha$  構造、 $^{20}\text{Ne}$  における  $^{16}\text{O}+\alpha$  構造によって正・負パリティのエネルギーレベルと説明している。クラスター構造の概念と、非対称構造に起因した正・負パリティ状態、エネルギー差を決定する要因などを理解するのがポイント。

(B) “Structure of Intrinsic States of  $K^\pi = 0^+$  Bands in  $^{20}\text{Ne}$ : Study of Transient Character”,

Fumiki Nemoto, Yasuo Yamamoto, Hisashi Horiuchi, Yasuyuki Suzuki, Kiyomi Ikeda, Prog Theor Phys (1975) 54 (1): 104-118.

$^{20}\text{Ne}$  のクラスター構造に関する論文で、パリティ二重項(正パリティと負パリティの組)をクラスター模型で記述した論文。原子核の内部状態が2つのクラスターから成る非対称な構造を持つ場合にはパリティ二重項が現れることが、Horiuchi and Ikeda (Prog.Theor.Phys. Vol. 40 No. 2 (1968) 277) で指摘されている。本論文では、 $^{20}\text{Ne}$  における  $^{16}\text{O}+\alpha$  構造についてパリティ反転状態への量子遷移としての二重項の概念を示し、 $^{16}\text{O}$  の内部構造の変化も考慮した議論を行っている。

参考文献: 朝倉物理学体系「原子核構造論」(高田、池田著)の4章にもわかりやすく説明されている。

## (3) 分子軌道模型

“The Structure of  $^9\text{Be}$  Nucleus by a Molecular Model. I”,

S. Okabe, Y. Abe and H. Tanaka, Prog. Theor. Phys. 57 (1977), 866.

Be 同位体など軽い中性子過剰核では、いくつかのクラスターの周りを過剰中性子が分子軌道的に分布する場合がある。もっとも簡単な例が  $^9\text{Be}$  であり、この原子核は2つの  $\alpha$  クラスターと1中性子という模型で非常によく記述される。原子・分子系と異なり、分子軌道を占有する粒子(中性子)は、クラスターを構成する粒子と同種粒子であり、 $\alpha$  クラスターと過剰中性子の反対称化を考慮する必要がある。そのため、原子・分子系とは異なり過剰中性子の  $\sigma$  軌道が  $\Pi$  軌道よりも励起して現れるが、この  $\sigma$  軌道(1/2+軌道)はクラスター間の距離の増大(原子核の変形)とともに低いエネルギー状態に下がってくる。さらに、この状態はこの後発見されることになる中性子ハローの物理の先駆けとなっている。

## (4) 時間依存ハートリー-フォック理論と核融合

A,B のいずれかを選択すること。

(A) “Three-dimensional time-dependent Hartree-Fock calculations: Application to  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$  collisions”,

H. Flocard, S. E. Koonin, and M. S. Weiss, Phys. Rev. C 17, 1682 (1978)

(今年度は選択しないこと。)

時間に依存した Hartree-Fock 法 (TDHF) を重イオン反応に適用した初期の代表的な論文。TDHF に基づいて系を時間発展させて O+O の反応を記述する。衝突エネルギー一定でいろいろなインパクトパラメータで衝突させると、角運動量に依存して融合反応や非弾性散乱が起こる様子がシミュレートされている。冒頭で TDHF という理論的手法を説明しているが、より詳細は Ring-Schuck などの教科書を参照するとよい。

(B) “One-dimensional nuclear dynamics in the time-dependent Hartree-Fock approximation”,

P. Bonche, S. Koonin, and J. W. Negele, Phys. Rev. C 13 (1976), 1226 - 1258

時間に依存した Hartree-Fock 法 (TDHF) を原子核ダイナミクスに適用した最初の論文。板状の核物質という系を考え、まずは一枚の板の静的な性質や、弱い外場をかけた時の小振幅集団運動の分析がなされる。HF 法や TDHF 法が持つ基本的な性質をまとめるとともに、複雑な大振幅集団運動を記述、理解するために必要な概念について議論する。続いて、二枚の板を衝突させた時の時間発展を入射エネルギーを変化させながら記述する。

## (5) 原子核変形、Nilsson-Struntinsky 法

“Potential-energy surfaces for the doubly even  $N = Z$  nuclei”,

G. Leander, S.E. Larsson, Nucl. Phys. A239 (1975) 93.

“Shell effects in the properties of the heaviest nuclei”,

Z. Patyk, A. Sobiczewski, P. Armbruster, and K.-H. Schmidt, Nucl. Phys. A491 (1989) 267.

原子核の変形を理解する手法の一つに、Nilsson-Struntinsky 法がある。巨視的エネルギーにシェル効果からくる補正 (微視的なエネルギー密度のゆらぎ) を加えた方法で、Macroscopic-microscopic model とも言われる。巨視的なエネルギーだけを考えれば液滴のように球形が最もエネルギーが安定と考えられるがシェル効果によって変形構造がより安定になる場合があるというのが核変形の考え方である。この論文は、sd シェル領域の原子核の変形 Nilsson-Struntinsky 法で調べた研究である。Struntinsky 法の formalism は書かれていないが、原子核の代表的な手法であるので Nilsson モデル (変形シェルモデル) と合わせて原子核の教科書で勉強する。変形が生じるメカニズムや変形共存の現象を巨視的エネルギー+シェル効果で理解するのがポイント。2 本目の論文は、殻効果のために超重元素の核分裂障壁が高くなることを指摘した論文である。

## (6) 2 中心のシェル模型

“The asymmetric two center shell model”,

J. Maruhn and W. Greiner, Z. Physik 251, 431-457(1972)

(3) の分子軌道の考え方をもっと重い原子核まで拡張するとどうなるであろうか? ここでは、2 つの中心を考える two-center shell model を開発しており、重い原子核が 2 つの異なった原子核に分裂する際を考え、原子核の形状の変化と共に核子の一粒子軌道がどう変化するかを議論している。特に、スピン・軌道力、 $L^2$  力の寄与がどう変化するかを分析している。核分裂を微視的に理解する上では古典的な文献である。

## (7) 中性子過剰核における魔法数の消滅、モンテカルロ殻模型

“Varying shell gap and deformation in  $N=20$  unstable nuclei studied by the Monte Carlo shell model”,

Y.Utsuno, T.Otsuka, T.Mizusaki, M.Honma, Phys.Rev. C60, 054315 (1999) [8 pages]

(今年度は選択しないこと。)

および

“Quantum Monte Carlo diagonalization with angular momentum projection”,

T. Mizusaki, M. Honma, and T. Otsuka, Phys. Rev. C 53, 2786 (1996) (8 pages).

前者は中性子過剰核における  $N=20$ (中性子魔法数) の破れ現象の先駆的な研究。大規模なシェルモデル計算を行い、中性子過剰な  $^{32}\text{Mg}$  において魔法数が消滅することを示した。この研究が発表された後に、実際に  $^{32}\text{Mg}$  の魔法数破れが実験で観測され、不安定核における魔法数の生成、消滅は、現代の核物理の注目されたテーマの一つとなっている。後者は大規模シェルモデル計算を効率よく行うために確率論的な最適化を利用した計算方法を提案した論文で、前者の研究に用いられている手法である。

## (8) 中性子ドリップ線近傍原子核の魔法数

(今年度は選択しないこと。)

“Kinetic energy and spin-orbit splitting in nuclei near neutron drip line”,

I. Hamamoto, S. V. Lukyanov, X. Z. Zhang, Nucl. Phys. A683 (2001) 255-265.  
“Single-particle and collective properties of drip-line nuclei”,

I. Hamamoto, H. Sagawa, and X.Z. Zhang, Phys. Rev. C53 (1996) 765.

不安定核における殻構造は、安定核とは異なることが実験的に明らかになり、そのメカニズムの理解が大きな研究テーマの一つとなっている。中性子の弱束縛性・波動関数の空間的広がりという見地から、簡単なモデル計算により魔法数 8 や 20 の破れ、新魔法数 16 の出現メカニズムを明快に分析した論文。2 本目の論文では、共鳴状態や集団励起の議論も合わせて行われている。

### (9) $3\alpha$ クラスタモデルと $\alpha$ 反応による元素合成

A,B のいずれかを選択すること。

(A) “Microscopic theory of the  ${}^8\text{Be}(\alpha,\gamma){}^{12}\text{C}$  reaction in a three-cluster model”,  
P. Descouvemont and D. Baye, PHYSICAL REVIEW C36, 54-59 (1987).

(B) “The triple-alpha-reaction at low temperatures”,

K. Langanke, M. Wiescher, F. -K. Thielemann, Zeitschrift für Physik A Atomic Nuclei Volume 324, pp 147-152 (1986)

星の中での元素合成において、重要な反応の一つが  $3\alpha$  捕獲による  ${}^{12}\text{C}$  生成である。比較的温度の高い環境では閾値近傍の共鳴状態である  ${}^{12}\text{C}(0_2^+)$  (Hoyle 状態と呼ばれる) が重要な役割を果たす一方、低い温度環境下では  $3\alpha$  の直接反応が重要となる。1 本目の論文は、 ${}^{12}\text{C}$  核について  $3\alpha$  クラスタを仮定し Generator Coordinate Method (GCM) を用いて記述した論文である。Second  $0_2^+$  状態は星の中での 3 つの  $\alpha$  からの  ${}^{12}\text{C}$  の元素合成において決定的に重要な役割を果たす状態で、 $3\alpha$  反応の反応率を  $3\alpha$ -GCM で求めている。2 番目の論文は、 $3\alpha$  反応の反応率を現象論的立場から導出している。クラスタ構造をもつ励起状態の微視的記述、低エネルギー核反応の記述に加え、星の中での元素合成において閾値近傍の共鳴状態の重要性が理解できる。

### (10) 線型応答理論、連続状態 RPA

A,B,C のいずれかを選択すること。

(A) “Linear response theory in the continuum for deformed nuclei: Green’s function vs time-dependent Hartree-Fock with the absorbing boundary condition”,

Takashi Nakatsukasa and Kazuhiro Yabana, Phys. Rev. C 71, 024301 (2005).

不安定核の新しい振動モードを研究する上で、一粒子状態の”連続状態”を取り込んだ理論的枠組みの開発を行い、中性子過剰核の振動モードに適用した論文である。弱束縛系である不安定核の振動モードの記述では、連続状態の境界条件を適切に課して一粒子放出を取り入れることが重要となる。この論文では、Green’s function を用いた Random phase approximation (RPA) 法と、吸収境界条件 (ABC) を課した時間依存 Hartree-Fock (TDHF) 法の 2 つの手法による結果を比較した上で、球対称性を課さない 3 次元 TDHF 法を中性子過剰核に適用し、低エネルギーの電気的雙極子 (E1) 励起強度を調べている。最近の不安定核物理において、注目されている電気的雙極子 (E1) モードの現象に触れつつ、理論的枠組みの発展 (連続状態の取り扱い、3 次元 TDHF) を勉強する。

(B) “Nuclear response in the continuum”,

S. Shlomo and G. F. Bertsch, Nucl. Phys. A243 (1975), 507-518

巨大共鳴状態は、原子核集団振動モードの典型例であるが、その励起エネルギーは核子の分離エネルギーよりも高いため、一粒子放出の効果を取り入れる必要である。散乱の境界条件を満たすグリーン関数を用いて、原子核の応答関数を計算した先駆的な論文である。電子多体系の計算にも応用され、また近年は、不安定核に

おける低励起状態の記述にも広く用いられる。なお、RPA については、  
G. F. Bertsch and S. F. Tsai, Phys. Rep. 18 (1975) 125-158.  
の第2章に、初学者にとって分かりやすく丁寧に書かれている。

(C) “Finite amplitude method for the solution of the random-phase approximation”,  
T. Nakatsukasa, T. Inakura, and K. Yabana, Phys. Rev. C76 (2007) 024318

RPA の計算において、残留相互作用の計算が煩雑になりがちである。この論文は、数値的に残留相互作用を計算することができる「有限振幅法」を提案した論文である。この方法により RPA 計算を簡単にできるようになり、大規模計算が可能になった。

## (11) 中性子ハロー、2 中性子相関、break-up 反応

“Pair Correlations near the Neutron Drip Line”,  
G. F. Bertsch and H. Esbensen, Annals of Physics 209, 327-363 (1991).

中性子ドリップライン近傍の原子核で 2 中性子が緩く束縛された場合、強い 2 中性子相関をもつ場合がある。その典型例である  $^{11}\text{Li}$  について 3 体模型 ( $^9\text{Li}+n+n$ ) を用いて研究し、基底状態の 2 中性子相関を解析した論文である。中性子過剰核における 2 中性子相関は近年注目された課題であり、実験・理論の両面でさかんに研究が進められる中で、代表的な論文である。基底状態での 2 中性子相関の解析に加え、低エネルギーの双極子強度についても議論している。ややページ数の多い論文であるが、基本的なことから丁寧に説明しつつ、ハロー核における中性子相関の本質と一般的知識がうまくまとめられているレビューで、理解しやすい論文である。

## (12) 変形ハロー核

“Deformed nuclear halos”,  
T. Misu, W. Nazarewicz, and S. Aberg, Nucl. Phys. A614 (1997) 44  
“Dominance of low- $l$  component in weakly bound deformed single-neutron orbits”,  
I. Hamamoto, Phys. Rev. C69 (2004) 041306(R).

弱束縛核において、ハロー構造は最外殻中性子の一粒子軌道角運動量が  $l=0$  または  $l=1$  のときのみ生じることが知られている。これ以上の角運動量では、遠心力障壁が高すぎて弱束縛になっても半径の広がりはない。ところが、原子核が変形すると、回転対称性の破れのために様々な一粒子角運動量状態が波動関数に混ざる。この 2 つの論文では、変形した原子核では、たとえ変形がわずかであっても束縛エネルギーがゼロの極限では  $l=0$  または  $l=1$  の成分がドミナントになってハロー構造を取りうることを初めて指摘された。1 番目の論文では井戸型ポテンシャルを用いた解析、2 番目の論文では変形 Woods-Saxon ポテンシャルを用いた解析が行われている。このような変形ハロー核の存在は、その後実験的にも  $^{31}\text{Ne}$  核や  $^{37}\text{Mg}$  核などで確かめられた。

## (13) 中性子過剰核の分解反応に対するアイコンナル近似

“Breakup reactions of the halo nuclei  $^{11}\text{Be}$  and  $^8\text{B}$ ”,  
K. Hencken, G. Bertsch, and H. Esbensen, Phys. Rev. C54, 3043 (1996).

弱束縛中性子過剰核の核力分解反応をアイコンナル近似を用いて解析した論文。ここでは多体系としての取り扱いはずに、3 体模型を用いた記述を行っている。 $^{11}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{Be}+n$  及び  $^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be}+p$  反応が特に議論されている。フラグメントの運動量分布や中性子剥離断面積など中性子過剰核の反応を考える際に重要な観測量を理解する上で参考になる論文である。



#### (14) 中高エネルギーにおける2中性子ハロー核の反応

“Glauber model analysis of the fragmentation reaction cross sections of  $^{11}\text{Li}$ ”,  
Y. Ogawa, K. Yabana, and Y. Suzuki, Nucl. Phys. A543, 722 (1992).

2中性子ハロー核  $^{11}\text{Li}$  の分解反応をグラウバー近似を用いて解析した初期の論文。2中性子剥離過程に関する詳細な議論があり、中性子過剰核の反応を考える際の基本論文の1つ。グラウバー近似の計算でよく用いられる光学極限近似があまりよくないという重要な指摘をはじめとした論文である。

#### (15) 分解反応に対する CDCC 法

“Elastic scattering and breakup of  $^6\text{Li}$ ”,  
Y. Sakuragi, M. Yahiro, and M. Kamimura, Prog. Theo. Phys. 70, 1047 (1983).

弱束縛原子核の分解反応に対する CDCC 法を初めて提案した論文。CDCC 法は、2体系で記述される入射核が分解する過程を記述する際に、2体系の連続状態を適当に離散化し結合チャンネル方程式を解くというアイデアに基づくものである。この論文では  $^6\text{Li}$  を  $\alpha + d$  構造を持つものとして議論が進められているが、この方法はその後中性子過剰核の分解反応に適用され大きな発展を遂げた。

#### (16) 平均場理論を超えた枠組み, 非軸対称変形

A,B いずれかを選択すること。

(A) “Triaxial angular momentum projection and configuration mixing calculations with the Gogny force”,  
T.R.Rodriguez, J.L.Egido, Phys.Rev. C 81, 064323 (2010).

平均場を越えた相関を取り入れた理論的枠組みにおいて最近の発展についての論文。非軸対称変形あるいは変形に対してソフトな原子核の記述には、static な変形場に基づく従来の平均場モデルは適さず、角運動量射影や状態の重ね合わせなど平均場を越えた相関を取り入れた理論的枠組みが必要とあり、そうした平均場近似の拡張は世界的に大きな流れの一つとなっている。この論文は代表的なグループの最新の発展の一つであり、平均場近似の発展を知り、および、 $^{24}\text{Mg}$  への適用例において非軸対称変形という物理現象の特徴を学ぶのが目的である。手法に関する詳細と中性子過剰な Mg 同位体への適用に関しては、参考論文をあげるので参照することを推奨する。

(B) “Generator coordinate calculations of giant resonances with the Skyrme interaction”,  
H. Flocard and D. Vautherin, Nucl. Phys. A264 (1976) 197.

原子核の集団運動を生成座標法 (GCM) を用いて微視的に計算した論文。生成座標は、多数のスレーター行列式の重ね合わせとして多体系の波動関数を表現するものであり、この論文は平均場計算でよく用いられる Skyrme 力を用いた初期の計算を報告した論文である。ハートリー・フォック計算では取り入れられていない量子的なゆらぎの効果を生成座標法で取り入れることにより、集団運動のよりよい記述が可能になる。また、この手法は RPA が適用できない大振幅の運動に対しても適用できるものになっている。

#### 参考文献

“Correlations Beyond the Mean Field in Magnesium Isotopes: Angular momentum projection and configuration mixing”,  
R.Rodriguez-Guzman, J.L.Egido, L.M.Robledo, Nucl.Phys. A709, 201 (2002).

#### (17) シェル構造、一粒子レベルにおける核力の寄与

(今年度は2本とも選択しないこと。)

“Evolution of Nuclear Shells due to the Tensor Force”,  
T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, H. Grawe, and Y. Akaishi, Phys. Rev. Lett. 95, 232502 (2005).

“Three-Body Forces and Limit of Oxygen Isotopes”,

Takaharu Otsuka, Toshio Suzuki, Jason D. Holt, Achim Schwenk, and Yoshinori Akaishi, Phys. Rev. Lett. 105 032501 (2010).

核力の特徴(テンソル力や3体力)が原子核のシェル構造(一粒子エネルギー)に与える影響について議論した2つの論文を合わせて読む。

1本目は、シェル模型における一粒子軌道がテンソル力から与える影響を調べた論文である。これまでシェル模型計算では陽には扱われていなかったテンソル力が、実際には一粒子軌道を変化させていることを明らかにした。テンソル力は通常2次摂動的に作用するが、ここでは1次摂動のわずかな効果に着目し、特に軌道角運動量とスピンの組み合わせでその引力、斥力の効果に変化する点について分析している。核構造におけるテンソル力の役割に関する膨大な論文の出発点になった論文である。

2本目は、酸素同位体のドリップラインに関する論文。酸素同位体の束縛限界が酸素 $^{24}$ ( $N=16$ )であることが実験的に確認され、それまでの理論予想である酸素 $^{28}$ ( $N=20$ : 二重閉殻)と矛盾することがわかった。このことは安定核での魔法数 $N=20$ が中性子過剰酸素同位体で $N=16$ にシフトしている可能性を示すもので注目された課題となった。この現象を、3体力の果たす役割から理解しようというのが本論文の趣旨である。

### (18) 第一原理計算と核力: 量子モンテカルロ法

A,B いずれかを選択すること。

(A) “Quantum Monte Carlo calculations of  $A=8$  nuclei”,

R. B. Wiringa, Steven C. Pieper, J. Carlson, and V. R. Pandharipande, Phys. Rev. C 62, 014001 (2000).

(今年度は選択しないこと。)

現実的な核力に基づく原子核計算(第一原理計算)について近年の代表的な手法の一つである量子モンテカルロ法を用いた軽い原子核の研究。この手法および拡張した手法によって現代にいたるまで精力的な第一原理計算が行われている。また、 $^8\text{Be}$ における $2\alpha$ 構造を模型でなく第一原理計算によって初めて確認した論文であり、クラスター物理の観点でもマイルストーンとして重要な意義をもつ。現実的な核力における斥力芯、テンソル力の特徴および、その効果による強い核子相関が波動関数においてどのように記述されるか勉強できる。また、拡張した手法(GFMC:Green function Monte Carlo)として、波動関数を虚時間発展させ、その期待値計算をGreen's function Monte Carloで行うことでより精密に計算する手法についてもレビューされている。

(B) “Nucleon and nucleon-pair momentum distributions in  $A \leq 12$  nuclei”,

R.B.Wiringa, R.Schiavilla, S.C.Pieper, J.Carlson, Phys.Rev. C 89, 024305 (2014)

第一原理計算の一つであるNo-core shell modelに基づき核反応計算を行った先駆的研究。核子-核子散乱を再現する核力に基づく第一原理計算は、近年、世界的に進歩しており、少数系( $A \leq 10$ )の核構造計算が可能となりつつある。一方で、核反応の第一原理計算については散乱問題の取り扱いにおける難しさの問題から、非常に限られている。この論文では核-核散乱を扱うために、No-core shell modelとresonating group method(RGM)(共鳴群法と呼ばれるクラスター散乱理論)を合わせた手法を提案している。すなわち、一つの核の構造をNo-core shell modelで記述しつつ、核-核散乱問題はRGM法によって解く。先に発表したLetterにおいて核-核散乱の主要結果が発表され、手法の詳細についてはLetterに続き発表されたoriginal paperで説明されている。

### (19) $\alpha$ - $\alpha$ 散乱, Resonating Group method, Orthogonal Condition Model

A,B のいずれかを選択すること。

(A) “Repulsive Core of Effective  $\alpha$ - $\alpha$  Potential and the Pauli Principle”,

Ryozo Tamagaki, Prog. Theor. Phys. Suppl. Extra Number 242 (1968).

$\alpha$ - $\alpha$  散乱を微視的な  $2\alpha$  クラスター模型で研究し、近距離での短距離斥力を  $\alpha$  粒子同士の核子間のパウリ原理によって理解できることを明らかにした論文。それまでの核物理では、原子核-原子核間の散乱は、内部の微視的構造を考えないポテンシャル模型によって現象論的に記述されていたのに対し、1960年代以後、Resonating Group Method(RGM: 共鳴群法) 等を用いて核子の反対称化と有効核力を取り入れた微視的な研究へと発展していった。その流れの中で重要な意義をもつ論文であり、現象論的に知られていた斥力的芯の起源を明らかにした。核-核のダイナミクスにおいて非常に重要である核子間のパウリ原理について、 $\alpha$ - $\alpha$  散乱問題においてどのような役割を果たすか具体的に学ぶ。原著論文は

R. Tamagaki, H. Tanaka, Prog. Theor. Phys. 34, 191 (1965)

で、2ページの”Letters to the Editor”としてエッセンスが簡潔にまとめられているので、ぜひ、そちらも参照して欲しい。

(B) “Interaction between Clusters and Pauli Principle”,  
Sakae SAITO, Prog. Theor. Phys. 41, 705 (1969)

$\alpha$ - $\alpha$  散乱などの2クラスター間の散乱(相互作用)には、クラスターを構成する核子同士の反対称化の効果が非常に重要な寄与を果たす。1960年代以後、核子自由度を微視的扱うモデルとして Resonating Group Method(RGM: 共鳴群法) 等が発展し、クラスター間相互作用の斥力的芯の起源が明らかされたが、この論文で、Saitoは直交条件模型(OCM:orthogonal condition model)を提案し反対称化の効果を半微視的に扱う有効理論を構築した。OCMでは、クラスター間の相対運動に核子の反対称化に起因して現れるパウリ禁止状態のみを考慮し、禁止状態に直交したモデル空間でポテンシャル問題を解く。この論文ではOCMの定式化、 $\alpha$ - $\alpha$  散乱への適用、パウリ禁止状態が $\alpha$ - $\alpha$  間相互作用における斥力芯にどのような寄与を果たすかが示されている。簡単な2体ポテンシャルモデルに焼き落としした有効理論であり、その簡便性と有用性から現在にいたるまで様々な安定核・不安定核の計算に適用されており、クラスター模型に関する代表論文の一つといえる。

参考文献: 朝倉物理学体系「原子核構造論」(高田、池田著)の4章にもOCMの概念がコンパクトにまとめられている。

## (20) 巨大単極子共鳴と核物質の非圧縮率

“Nuclear compressibility and monopole resonances”,

J.P. Blaizot, D. Gogny, B. Grammaticos, Nucl. Phys. A 265, 315-336 (1976)

原子核の代表的な巨大共鳴の一つである巨大単極子共鳴(GMR)と核物質の非圧縮率(K)の関連を議論した論文。有限系である原子核の実験値から、無限系である核物質の性質をいかに引き出すかという点において最も代表的な仕事の一つ。核物質の非圧縮率は高密度核物質の性質を知る上で基本的かつ重要な量である。GMRは密度の変化するモードであり、そのエネルギーは密度変化に対する復元力を反映する。この論文では、微視的な計算であるRPA計算に基づきGMRが一粒子レベルの詳細に依存しない巨視的な集団運動であることを示した上で、Skyrm, Gogny力など複数の相互作用を用いた計算で原子核のGRMエネルギーと非圧縮率の関係を議論し、 $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ のGMRエネルギーの実験値から $K=210$  MeVという値を導出した。

## (21) 自己無撞着平均場理論による原子核変形の記述

“Nuclear deformations in the pairing-plus-quadrupole model (I). The single-j shell”,

M. Baranger and K. Kummer, Nucl. Phys. 62 (1965), 113-132

(今年度は選択しないこと。)

簡単なモデルハミルトニアンと単純な系を考えることより、微視的な立場で、原子核が「変形する」とはどういうことかを明快に示した論文。また、種々の原子核集団現象を微視的に記述した一連の論文の最初であるので、モデルの説明も丁寧にされている。BCS理論を勉強しながら式のフォローを行えば、原子核集団運動の微視的理論の基本が身につく。



## (22) 原子核反応における非局所ポテンシャル

“A non-local potential model for the scattering of neutrons by nuclei”,  
F. Perey and B. Buck, Nucl. Phys. 32, 353 (1962).

原子核反応において、核間ポテンシャルは本来様々な効果によって非局所的になる。この論文では、今では Perey-Buck 型とよばれる簡単なモデルを用いて中性子散乱に対するポテンシャルの非局所性の効果が議論されている。また、ポテンシャルを局所近似したときに出てくるいわゆる「Perey 効果」の議論も丁寧に行われている。

## (23) 超重元素生成反応に対する拡散模型

“A new mechanism for synthesis of superheavy elements”,  
Y. Abe, Y. Aritomo, T. Wada, and M. Ohta, J. Phys. G23, 1275 (1997).

拡散模型を使って超重元素生成反応の断面積を見積もった初期の論文。この考え方が後のランジュバン方程式を使ったアプローチにつながる。拡散中の中性子放出も統計模型を用いて取り扱われている。複合核の統計崩壊に関する議論はないものの、複合核形成過程に対する基本的な考え方を示す論文である。この論文の後に出版された

Y. Aritomo, T. Wada, M. Ohta, and Y. Abe, Phys. Rev. C59 (1999) 796  
では多次元への拡張が行われている。合わせて読むとよい。

## (24) 誘起核分裂のランダム・ウォークによる記述

(今年度は選択しないこと。)

“Brownian shape motion on five-dimensional potential-energy surfaces: nuclear fission-fragment mass distributions”,

J. Randrup and P. Möller, Phys. Rev. Lett. 106, 132503 (2011).

“Fission-fragment mass distributions from strongly damped shape evolution”,

J. Randrup, P. Möller, and A.J. Sierk, Phys. Rev. C84, 034613 (2011).

5次元ポテンシャル平面内のランダム・ウォークとして核分裂の問題をとらえ、核分裂の分裂片の質量分布の実験データを再現することに成功した論文。同様のアプローチはランジュバン方程式を用いられているが、ここではより簡略化した overdamped の仮定をおくことによって高次元化をするとともに、系統的な研究を可能にした。

## ☆ 核力、核物質関係

### (1) 核子-核子散乱の位相差解析

“Phase-Shift Analysis of 310-Mev Proton-Proton Scattering Experiments”,

H.P. Stapp, T.J.Ypsilantis and N. Metropolis, Phys. Rev. 105, 302 - 310 (1957).

核力は短距離力であることから、部分波展開が大変有効である。初期の放射線元素による原子核散乱実験はその後の加速器を用いた陽子・陽子散乱実験に引き継がれ、陽子の入射エネルギーが上がるにつれて徐々に核力の全貌が明らかになっていった。この論文はそうした研究の初期の phase shift analysis の論文であり、三重散乱実験から求めた微分断面積や散乱偏極量を用いて、如何にして核力の位相差を導くかを示した記念碑的な論文である。

### (2) 核物質理論: ブリュックナー理論と変分法

“Brueckner-Bethe and variational calculations of nuclear matter”,

B. R. Day and R. B. Wiringa, Phys. Rev. C32, 1057 - 1062 (1985).

対称核物質の飽和性の変分計算と Brueckner 理論に基づく G-行列計算の結果は、核力相互作用が複雑なことから長らく一致しなかったが、この論文に至ってようやく一致の兆しが見え始めた。この論文では Argonne v14 potential を用いて、両者の結果を比較している。参考論文として、  
B.R. Day, Rev. Mod. Phys. 50, 495-521 (1978).  
では、現実的核力を用いた対称核物質の飽和性が議論されている。この時点での到達点しか書かれていないが、変分法による解法と Brueckner 理論 (G-行列計算) による解法とが要領よくまとめられている。

### (3) 中性子星物質および対称核物質中の超流動

“Superfluidity in neutron star matter and symmetric nuclear matter”,  
T.Takatsuka and R.Tamagaki, Prog. Theor. Phys. Suppl. 112 (1993) 27.

中性子物質あるいは核物質中での現実的核力に基づく超流動現象についての基本文献。核力中の強いスピン-軌道力やテンソル力のために S 波以外のペアリングが起こることの明快な解説、取り扱いとその中性子星などの現象への反映について議論している。我が国の研究者による先駆的な研究の総合報告であり、現在活発に議論されている中性子過剰核における中性子物質の S 波ペアリングや陽子過剰核での 3S1-3D1 ペアリングを考察する上でも基礎となるものである。

### (4) 超新星物質状態方程式

“Relativistic equation of state of nuclear matter for supernova and neutron star”,  
H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu, K. Sumiyoshi, Nucl. Phys. A637 (1998) 435-450.

中性子星や超新星爆発などのコンパクト天体現象は高密度核物質の状態方程式 (EOS) を探る試金石である。実験的に直接 (低温) 高密度を探索することは非常に困難であるため、低密度、あるいは標準核密度近辺で得られた EOS を理論的に外挿し、その EOS をコンパクト天体現象や高エネルギー重イオン衝突 (有限温度ではあるが) に適用し、観測量との比較を通じて情報を得ることとなる。この論文において提案された EOS は、これまで超新星爆発計算に広く利用されているものである。中性子過剰核の情報まで考慮した相対論的平均場理論 (RMF) から出発して与えた一様物質の EOS と低密度での有限原子核の混在を取り入れ、実際に爆発天体現象に適用できる形で提案された。

関連する論文としては、現実的核力から出発して対称 ( $N = Z$ )・非対称 ( $N > Z$ ) 核物質の EOS を求めた Akmal, Pandharipande, Ravenhall ('91)、droplet 模型を用いて広い温度・密度領域における状態方程式を与えた Lattimer, Swesty ('91)、等がある。これらも参照することにより、現在爆発天体現象に利用されている EOS の概観がつかめる。さらに、Brueckner, Gammel ('58) による有効相互作用の理論までさかのぼると、核力から出発して核物質の EOS を求めるという原子核多体問題の基礎に迫れるだろう。

#### 参考文献

“The Equation of state of nucleon matter and neutron star structure”,  
A. Akmal, V.R. Pandharipande, D.G. Ravenhall, Phys.Rev. C58 (1998) 1804-1828.  
“Properties of Nuclear Matter”,  
K.A. Brueckner, J.L. Gammel, Phys. Rev. 109 (1958) 1023-1039.  
“A Generalized equation of state for hot, dense matter”,  
J.M. Lattimer, F.D. Swesty, Nucl.Phys. A535 (1991) 331-376.

### (5) 中性子星外殻でのパスタ構造

“Structure of matter below nuclear saturation density”,  
D.G. Ravenhall, C.J. Pethick, J.R. Wilson, Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 2066-2069.

中性子星の外殻での奇妙な形の“原子核”(通称パスタ) から構成される非一様周期的構造の存在を議論し、その後の研究に大きなインパクトを与えた論文。一般的に非整数次元に拡張して密度変化に対応する幾何学的構造の変化を議論した。外殻での状態方程式については次の論文も参考にする。

## 参考文献

“Neutron star matter”,

G.Baym, H.A. Bethe and C.J. Pethick, Nucl. Phys. A175 (1971) 221-271.

### (6) 中性子物質におけるダイニュートロン相関

“Spatial structure of neutron Cooper pair in low density neutron matter”,

M. Matsuo, Phys. Rev. C73, 044309 (2006).

中性子過剰核の構造を議論する際重要となる対相関に起因するダイニュートロン相関を中性子物質において詳細に議論した論文。クーパー対の空間的なサイズが密度とともに変化し、低密度領域においてコンパクトになることを示した。BCS-BEC クロスオーバーの問題も議論されており、中性子過剰核との関係で重要な論文である。

## [B] クォーク・ハドロン多体系分野

### ☆ 高密度核物質、Compact Star、状態方程式

#### (1) 中間子凝縮

“Pion fields in nuclear matter”,

A.B. Migdal, Rev.Mod.Phys. 50 (1978) 108.

核物質中での $\pi$ 中間子凝縮 ( $\pi$ 凝縮) に関する包括的レビュー。 $\pi$ 凝縮は物性物理でいう自由ボース気体のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) とは大きく異なったユニークな概念であり、核物質研究の歴史の中でも独特の地位を占めている。 $\pi$ 中間子はもっとも軽いハドロンであり、カイラル対称性との関連でも基本的な粒子であり、核物質中での振る舞い (媒質効果) も非常に興味深い。

$\pi$ 凝縮は、核子との相互作用が駆動力として生じる一種の BEC であり、そこでの様々なアイデアは、原子核中でのハドロンの性質の変化の研究や最近の QCD 相図での非一様カイラル凝縮の研究でも生かされている。また、アイソスピン非対称 QCD の相図の議論でも、しばしば「 $\pi$ 凝縮」という言葉が用いられるが、両者の類似点と相違点を正しく理解しておくことは重要である。このレビューは、 $\pi$ 凝縮の最初の提唱者によるもので、多くの興味深いアイデアが含まれている好論文である。しかし、長いので最初の IV 章まで (pp. 108-145) を読む。そこまででも基本的なアイデアは理解できるはずである。

#### (2) 多成分系の 1 次相転移: マクスエル理論を超えて

“First-order phase transitions with more than one conserved charge: Consequences for neutron stars”,

N.K.Glendenning, Phys. Rev. D46(1992) 1274.

核物質や中性子星内部のような多成分系での一次相転移は水-蒸気の場合とは根本的に相違している。この論文はそれまでの多くの著者による相転移の議論が正しくないことを指摘し、それ以後の研究に大きな影響を与えた。また、重イオン衝突にみられる多重破碎反応のスピンオーダー分解理論とも関係している。その直後の重要な発展は

H.Heiselberg, C.J.Pethick, E.F.Staubo, “Quark matter droplets in neutron stars” Phys.Rev.Lett. 70 (1993) 1355

で議論された、クーロン相互作用、表面効果であり、これによって幾何学的構造をもつ混合相の描像が確立した。できればこの論文にも目を通して欲しい。

#### (3) 核子超流動を考慮したニュートリノ放出による中性星冷却

(今年度は選択しないこと。)

“Neutrino emission due to Cooper pairing of nucleons in cooling neutron stars”,  
D.G. Yakovlev, A.D. Kaminker, K.P. Levenfish, *Astron. Astrophys.* 343 (1999) 650.

中性子星の冷却現象は高密度物質の性質を引き出す上で重要な現象の一つである。この論文は中性子星内部の核子超流動、超伝導での非平衡過程として生じるニュートリノ対生成(弱い相互作用)によるエネルギー散逸率を導出するとともに、中性子星の冷却を議論したものである。最初のアイデアは(参考論文) E. Flowers, M. Ruderman, P. Sutherland, “Neutrino pair emission from finite-temperature neutron superfluid and the cooling of young neutron stars” *Ap. J.*, 205 (1976) 541  
で与えられ、その後長い間忘れられていたものであるが再発見され、現時点では基本的な、現象論的にも重要な過程であることが認識されている。また、最近の Cas A と呼ばれる天体の表面温度の観測との関係でも話題になっている。

## ☆ QCD 相図

### (1) PNJL 模型: ポリアコフープを取り入れたカイラル有効模型

(今年度は選択しないこと。)

“Phase diagrams in the three-flavor Nambu-Jona-Lasinio model with the Polyakov loop”,  
Kenji Fukushima, *Phys.Rev.* D77 (2008) 114028 [Erratum: *Phys.Rev.* D78 (2008) 039902].

QCD 相転移はカイラル相転移・非閉じ込め相転移の 2 つの側面をもつ。ゼロ密度の QCD 相転移は、格子 QCD のモンテカルロ・シミュレーションによる研究が進んでおり、現実的なクォーク質量においては秩序変数が滑らかに変化するクロスオーバー転移であることが示されている。ところが有限密度領域では符号問題のため格子 QCD の MC シミュレーションが困難となり、何らかの近似、あるいは QCD の対称性に基づく有効模型による研究が必要となる。現在 RHIC の Beam Energy Scan プログラムにおいて、より低エネルギー領域の重イオン衝突による有限密度領域の系統的研究と臨界点の探索が試みられており、そこでの観測量の予言は理論の今日的課題である。この論文では、QCD 有効模型の一つである Polyakov loop extended Nambu-Jona-Lasinio (PNJL) 模型に基づいて QCD 相図を調べている。著者により提案された PNJL 模型は、強結合極限でのポリアコフープ作用、およびクォークとポリアコフープの結合を NJL 模型に取り入れ、カイラル相転移と閉じ込め相転移の秩序変数をもとに含む有効模型であり、現在 QCD 相図研究の基本的な道具立てとなっている。

関連する論文としては、PNJL 模型提案の論文 [Fukushima ('04)], PNJL 模型の前身となる Gocksh-Ogilvie 模型が提案された論文 [Gocksch, Ogilvie('85)], NJL 模型の QCD 物質熱力学への適用のレビュー [Hatsuda, Kunihiro ('94)] 等が挙げられる。NJL の原著論文 [Nambu, Jona-Lasinio('61)] までたどることにより、カイラル相転移についての源泉に触れることができる。

#### 参考文献

K. Fukushima, *Phys. Lett. B* 591 (2004) 277-284.  
A. Gocksch, M. Ogilvie, *Phys. Rev. Phys. Rev. D* 31 (1985) 877-884.  
T. Hatsuda, T. Kunihiro, *Phys. Rept.* 247 (1994) 221-367.  
Y. Nambu, G. Jona-Lasinio, *Phys.Rev.* 122 (1961) 345-358; *ibid* 124 (1961) 246-254.

### (2) カラー超伝導

(今年度は選択しないこと。)

“Color-flavor locking and chiral symmetry breaking in high density QCD”,  
M. Alford, K. Rajagopal, F. Wilczek, *Nucl. Phys.* B537 (1999) 443-458.

高密度クォーク物質でのカラー超伝導の論文で、この subject を牽引したグループの論文である。カラー超伝導は通常の超伝導と類似の概念であるが、クォークはフレーバー、カラーなどの内部対称性をもつ点が特徴的である。この論文ではフレーバーとカラーの特別な組み合わせ(現在 CFL と呼ばれている)によるクーパー

対を考察し、カラー超伝導相での対称性の破れ、それに伴う南部ー Goldstone ボソン、Higgs 機構などを議論しており、カラー超伝導としては一つの典型になっている。

この論文はカラー超伝導の最初の論文ではない。より BCS に近いカラー超伝導に関する初期の論文として D. Bailin and A. Love, Phys. Rep. 107 (1984) 325.

がある。カラー超伝導に関しては多くの研究がなされてきたが、最近の Review としては “Color superconductivity in dense quark matter”,

M. Alford, A. Schmitt, K. Rajagopal, T. Schaefer, Rev.Mod.Phys.80 (2008) 1455. があり、研究の歴史的な過程をたどることができるとともに参考文献を探すことができる。

### (3) QCD 臨界点の動的臨界点普遍類とソフトモード

A,B のいずれかを選択すること。

(A) “Sigma and hydrodynamic modes along the critical line”,

H. Fujii and M.Ohtani, Phys. Rev. D 70 (2004) 014016.

(B) “Dynamic universality class of the QCD critical point”,

Dam T. Son, M.A. Stephanov, Phys.Rev. D70 (2004) 056001.

QCD 相図において有限温度且つ有限密度において低温側から伸びる 1 次相転移線が終わる点 (臨界点) が存在する可能性がある。そこでは相転移は 2 次になるが、問題はそこでのソフトモードは何かということである。一般に、2 次相転移点付近では秩序変数のゆらぎに結合した集団モードが存在し、そのエネルギー (質量) は臨界点でゼロになる。そのような集団モードはその臨界点の「ソフトモード」と呼ばれる。QCD 臨界点でのソフトモードは、素朴には、カイラル秩序変数のゆらぎであるシグマ中間子的なモードと考えられていたが、これらの論文において、密度ゆらぎ (フォノン) やエントロピーゆらぎなどの流体モードが QCD 臨界点のソフトモードであることが明快に示された。また、これらの論文によって QCD 臨界点の Hohenberg-Halperin (“Theory of dynamic critical phenomena”, Rev. Mod. Phys. 49 (1977), 435) による動的普遍類の同定について決着した。現在 RHIC で行われている臨界点探索実験に関係した基本的論文。

参考文献

“Signatures of the tricritical point in QCD”,

M.A.Stephanov, K.Rajagopal and E.V.Shuryak, Phys. Rev. Lett. 81 (1998), 4816; Phys. Rev. D60 114028 (1999).

QCD 臨界点はカイラル極限 (カレントクォーク質量が無視できる極限) では、三重臨界点 (tricritical point) である。(水-氷-水蒸気の三重点と三重臨界点は異なる概念。)QCD 相図上の QCD 臨界点/三重臨界点の存在の重要性の指摘とその実験による検証可能性を議論した最初の論文。しかし、動的臨界点の普遍類の同定には不十分な点があり、それは Dam T. Son らの研究で訂正、整理された。

“Universality, the QCD critical / tricritical point and the quark number susceptibility”,

Y.Hatta and T.Ikeda, Phys. Rev.D67(2003) 014028.,

QCD 臨界点における密度揺らぎ (クォーク数感受率) の増大を指摘し、その振る舞いから臨界領域の検証可能性を議論した先駆的論文。上記の Fujii-Ohtani や Dam T. Son-Stephanov の研究に繋がった。

### ☆ クォーク・グルーオンプラズマと高エネルギー重イオン衝突

#### (1) 重イオン衝突におけるブースト不変描像/Bjorken flow

“Highly Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions: The Central Rapidity Region”,

J.D. Bjorken, Phys.Rev. D27 (1983) 140.

高エネルギー重イオン衝突において、ビーム軸方向にブースト不変な時空間発展を提唱した論文である。衝突時、原子核中の価クォークは大部分すり抜け、中心ラピディティー付近にクォーク・グルーオンプラズマが生成されるという描像は現在の標準的理解になっている。また、この論文で導かれた、Bjorken flow と呼ば



れる一次元膨張を表す流体方程式の厳密解や、終状態の粒子数から初期のエネルギー密度を見積もる公式は大変有名である。

## (2) QGP 生成のシグナル

“J/psi Suppression by Quark-Gluon Plasma Formation”,  
T.Matsui and H. Satz, Phys. Lett. B 178 (1986) 416.

高エネルギー重イオン衝突による非閉じ込め相転移実現のシグナルとして重いクォークからなるハドロンである J/ψ の生成率の減少を見ることを提唱した歴史的論文。その後、重イオン衝突の実験はこのシナリオの正否の検証を大きな目的の一つとして遂行されたと言って過言ではない。また、この論文で議論されている重イオン衝突についての直感的な議論は深く、教育的価値を持つ。

参考文献

T. Hashimoto, K. Hirose, T.Kanki and O. Miyamura, Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2123.

## (3) 強結合 QGP: カラーグラス凝縮とエネルギー損失

(A), (B), (C) のいずれかを選択すること。

(A) “Computing quark and gluon distribution functions for very large nuclei”,  
L. McLerran and R. Venugopalan, Phys. Rev. D49 2233 (1994)

(B) “Energy loss in perturbative QCD”,  
R. Baier, D. Schiff, B.G. Zakharov, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 50 (2000) 37-69.

(C) “New forms of QCD matter discovered at RHIC”,  
Miklos Gyulassy, Larry McLerran, Nucl.Phys. A750 (2005) 30-63.

ブルックヘブン国立研究所の相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) は 2000 年に稼働し、カラーが開放されたクォーク・グルーオン物質 (QGP) と推定される物質が生成されていることが実験データから強く示唆されている。ここで大きな驚きであったのが、QGP が強結合の性質を示すことであった。高エネルギー反応であるため弱結合プラズマの生成が期待されていたにもかかわらず、実験データは早い段階で熱化し、ジェットが大きくエネルギーを失うことを示す。これを理解する一つの鍵は、高いグルーオン密度である。高エネルギーの原子核には低い運動量 (small  $x$ ) 領域で多数のグルーオンが存在し、カラーグラス凝縮と呼ばれる状態で記述され、原子核衝突後にも古典的な場を作る。またこれらの多くのグルーオンの存在によって、結合定数自体は小さくても、ジェットは大きくエネルギーを損失する。ここで挙げた論文はそれぞれ、(A) カラーグラス凝縮、(B) エネルギー損失、および (C) これらの両面について議論している。それぞれ難しい論文であるが、重イオン衝突の実験データの理解を支える理論の概観をつかんで欲しい。

## (4) 再結合模型

“Hadron production in heavy ion collisions: Fragmentation and recombination from a dense parton phase”,  
R.J. Fries, Berndt Muller, C. Nonaka, S.A. Bass, Phys.Rev. C68 (2003)044902 (23 pages).

高エネルギー重イオン衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成の同定と、QGP の性質探求は近年の核物理の大きなテーマである。RHIC における QGP 生成の証拠として、ジェット抑制・流体模型の成功・統計模型の成功・楕円フローのクォーク数スケーリング・光子による初期温度測定などがあげられる。これらの観点は、その後 AdS/CFT から予測される粘性、流体+ジェットのダイナミクス、エキゾチックハドロン生成等研究に繋がっており、また現在 LHC で生成される物質の性質や熱平衡化するまでの前平衡過程の議論も活発に行っている。この論文は、クォークの再結合模型により楕円フローのクォーク数スケーリングを自然に説明し、ハドロンが生成される前にクォークが閉じ込めから開放されて運動していたことを強く示唆したものである。再結合模型は当初、中間運動量領域での大きなバリオン生成率を説明するために導入されたが、再結合により運動量空間での非対称度が構成子の非対称度の和で現れることを明快に示し、QGP 生成の強い証拠の一つとなった。

関連する論文としては、同様のアイデアを出した他のグループの論文 (Hwa, Yang ('04)、Greco, Ko ('03)) 等が挙げられる。RHIC で得られた結果からクォークの動力学を引き出そうとしている発見過程が体感できる。定量的に進んだ研究としては、Hirano et al.('06) がある。流体模型とハドロン輸送を組み合わせることにより、RHIC データが見事に説明できることを示した論文である。

#### 参考文献

R. C. Hwa, C.B. Yang, Phys.Rev. C70 (2004) 024905 (11 pages).  
V. Greco, C.M. Ko, Phys.Rev. C68 (2003) 034904 (12 pages).  
T. Hirano, U.W.Heinz, D. Kharzeev, R. Lacey, Y. Nara, Phys. Lett. B636 (2006) 299-304.

### ☆ 量子色力学基礎

※原則として呈示されている論文から1つ選びそれをもとに発表を行う。関連する物理の背景やその後の発展なども調べて発表するのが望ましい。

#### (1) 量子色力学の漸近的自由性 原論文

“Ultraviolet Behavior of Nonabelian Gauge Theories”,  
D.Gross and F.Wilczek, Phys. Rev. Lett. 30, 1343 (1973).  
“Asymptotically Free Gauge Theories. 1, 2”,  
D.Gross and F.Wilczek, Phys. Rev. D8, 3633 (1973); Phys.Rev.D9, 980 (1974).  
“Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?”,  
H.D. Politzer, Phys. Rev. Lett. 30, 1346 (1973).

強い相互作用の基礎理論である量子色力学は、高エネルギー領域では弱結合となり摂動論が適用できる。これは漸近的自由性と呼ばれ、非可換ゲージ理論にユニークな性質であり、歴史的には陽子のミューオン深非弾性散乱におけるスケールリング則から導かれた。本課題では1ループでのファインマン図の計算と、くりこみ群的な考察から、量子色力学における漸近的自由性を導出し、その物理的な意味を考察して欲しい。

参考文献『ゲージ場の量子論 I』(九後著)の該当する章

#### (2) 格子ゲージ理論 原論文

いずれかの論文を選択して報告すること。

“Confinement of Quarks”,  
K.G.Wilson, Phys. Rev. D10, 2445 (1974).  
“Hamiltonian Formulation of Wilson's Lattice Gauge Theories”,  
J.B.Kogut and L.Susskind, Phys. Rev. D11, 395 (1975).  
“Confinement and the Critical Dimensionality of Space-Time”,  
M.Creutz, Phys. Rev. Lett. 43, 553 (1979).  
“Monte Carlo Study of Quantized SU(2) Gauge Theory”,  
M.Creutz, Phys. Rev. D21, 2308 (1980).

量子色力学(QCD)は、低エネルギー領域では強結合性を示し、真空の性質までも変化させてしまう。この領域でももちろん摂動論は適用できず、非摂動的な解析方法が必要である。格子ゲージ理論は、量子色力学に直接的に基礎を置く非摂動的解析方法である。本課題ではフェルミオン場も含めて格子ゲージ理論の定式化を行い、クォークの閉じ込め・くりこみ群的な考察・QCD 相転移も含めてレビューして欲しい。

#### 参考文献

M.Creutz, “Quarks, Gluons and Lattices (Cambridge Univ. Press, 1985).

### (3) カイラル対称性の自発的破れ 原論文

(今年度は選択しないこと。)

“Dynamical Model of Elementary Particles Based on an Analogy with Superconductivity. I, II”,  
Y.Nambu and G.Jona-Lasinio, Phys. Rev. 122, 345(1961);ibid.124, 246, (1961).  
“Field Theories with Superconductor Solutions”,  
J. Goldstone, Nuovo Cim.19, 154 (1961).

カイラル対称性の自発的破れは、量子色力学の基本的性質の1つであり、クォーク・ハドロン物理学において非常に重要な役割を演じる。「対称性の自発的破れ」という概念自体が、超伝導・磁性体などの物性系から電弱統一理論まで広範に現れる重要な概念である。本課題では、非ゲージ理論での対称性の自発的破れを概観し、南部・ゴールドストーンの定理や低エネルギー定理を非摂動的に導出し、その物理的意味を考察して欲しい。

参考文献

T.Hatsuda and T.Kunihiro, Phys. Rept. 247, 221 (1994);  
『ゲージ場の量子論 II』(九後著)の該当する章

### (4) アノマリー釣り合い条件

“Naturalness, chiral symmetry, and spontaneous chiral symmetry breaking”,  
G. 't Hooft, in “Recent Developments in Gauge Theories”, Proceedings, Nato Advanced Study Institute, Cargese, France, August 26 - September 8, 1979, vol. 59, pp. 135-157. 1980. (今年度は選択しないこと。)  
“The Axial Anomaly and the Bound State Spectrum in Confining Theories”,  
Y. Frishman, A. Schwimmer, T. Banks, and S. Yankielowicz, Nucl. Phys. B177 (1981) 157171.  
“Anomalies and Fermion Zero Modes on Strings and Domain Walls”,  
C. G. Callan, Jr. and J. A. Harvey, Nucl. Phys. B250 (1985) 427436.

QCDにおいて近似的なカイラル対称性は自発的に破れているため、パイオンといった擬スカラー粒子の質量が他のハドロンに比べ非常に軽くなっている。't Hooftが提案したアノマリー釣り合い条件は、QCDのダイナミクス以前の問題として、カレント・クォーク質量をゼロに取る極限では質量ゼロの粒子が存在しなくてはならない、ということを示唆する。また、CallanとHarveyによるアノマリー流入の考え方はドメインウォールフェルミオンと呼ばれる格子フェルミオンの元になっただけでなく、近年でも対称性で守られたトポロジカル相(SPT相)との関連で注目されており、非摂動的物理を調べる上で重要な考え方の一つとなっている。

### (5) パートン発展

“Asymptotic freedom in parton language”,  
G. Altarelli and G. Parisi, Nucl. Phys. B126 (1977) 298

この論文は、QCDの漸近的自由性に基づき、ハドロン内部のパートン(クォーク、グルオン)の分布がエネルギー分解能とともにどのように変化するかを決定した論文である。得られた方程式は現在Altarelli-Parisi方程式(あるいはDGLAP方程式)と呼ばれており、摂動QCDの最も基本的な方程式である。

## ☆ ソフト領域の QCD/ハドロン物理学

### (1) カイラル摂動論と有効場の理論

“Phenomenological Lagrangians”,  
S. Weinberg, Physica A96 (1979) 327.

(今年度は選択しないこと。)

カイラル摂動論は、低エネルギー QCD でカイラル対称性の自発的破れに基づいて pion の動力学を記述する有効場の理論である。この論文では、有効場の理論に power counting を導入することでループ計算を含めて系統的な改良が可能であることを示し、その後の具体的計算 [Gasser, Leutwyler (1984)] の理論的基盤を与えた。原子核物理において、カイラル摂動論は核力 [Epelbaum, Hammer, Meissner (2009)] および核物質 [Holt, Kaiser, Weise (2013)] の系統的な研究方法として活用されているほか、有効場の理論の考え方は、重いクォーク系での非相対論的 QCD [Brambilla, Pineda, Soto, Vairo (2005)]、ローレンツ共変性を持たない系での南部・ゴールドストーンの定理の研究 [Watanabe, Murayama (2014)] など、幅広く応用されている。

#### 参考文献

“Chiral Perturbation Theory: Expansions in the Mass of the Strange Quark”,

J. Gasser, H. Leutwyler, Nucl. Phys. B250 (1985) 465.

“Modern Theory of Nuclear Forces”,

E. Epelbaum, H.-W. Hammer, U.-G. Meissner, Rev. Mod. Phys. 81 (2009) 1773-1825.

“Nuclear chiral dynamics and thermodynamics”,

J.W. Holt, N. Kaiser, W. Weise, Prog. Part. Nucl. Phys. 73 (2013) 35-83.

“Effective field theories for heavy quarkonium”,

N. Brambilla, A. Pineda, J. Soto, A. Vairo, Rev. Mod. Phys. 77 (2005) 1423

“Effective Lagrangian for Nonrelativistic Systems”,

H. Watanabe, H. Murayama, Phys. Rev. X4 (2014) 031057.

## (2) $1/N_c$ 展開

“Baryons in the  $1/N$  expansion”,

E. Witten, Nucl. Phys. B160 (1979) 57-115.

't Hooft (1974) によって提案された、QCD のカラー数  $N_c$  が大きい極限とそこからの  $1/N_c$  展開は QCD の系統的展開法であり、大久保-Zweig-飯塚 (OZI) 則をはじめとする低エネルギー現象を自然に説明することができる。この論文では、低エネルギー領域でのバリオンが large  $N_c$  極限でどのように記述されるかが初めて議論された。前半は  $1/N_c$  展開のレビューにもなっている。ハドロン物理に関連した  $1/N_c$  展開のその後の発展として、バリオンのスキルミオンとしての記述 [Adkins, Nappi, Witten (1983)]、スピン・フレーバー対称性の発現 [Dashen, Manohar (1993)]、ハドロン内のクォーク構造の研究 [Pelaez (2004)] などが挙げられる。

#### 参考文献

“A Planar Diagram Theory for Strong Interactions”,

G. 't Hooft, Nucl. Phys. B72 (1974) 461.

(今年度は選択しないこと。) “Static Properties of Nucleons in the Skyrme Model”,

G.S. Adkins, C.R. Nappi and E. Witten, Nucl. Phys. B228 (1983) 552.

“Baryon - pion couplings from large  $N(c)$  QCD”,

R.F. Dashen, A.V. Manohar, Phys. Lett. B315 (1993) 425-430

“On the Nature of light scalar mesons from their large  $N(c)$  behavior”,

J.R. Pelaez, Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 102001

## (3) カイラル・ソリトン (スキルミオン)

“Static Properties of Nucleons in the Skyrme Model”,

G.S. Adkins, C.R. Nappi and E. Witten, Nucl. Phys. B228 (1983) 552-566.

“The Skyrme Model with Pion Masses”,

G.S. Adkins and C.R. Nappi, Nucl. Phys. B233 (1984) 109-115.

カイラル・ソリトン (スキルミオン) 描像は、フェルミオンである核子をボゾンであるパイオンのソリトンとして記述するという驚くべき描像であり、1960 年頃に Skyrme によって提案された。長く顧みられなかったこの描像は、1980 年頃 Witten らにより large  $N_c$  の QCD という観点から見直され注目を集めるようになった。これは核子などのバリオンをカイラル対称性の自発的破れに伴う南部-ゴールドストーン (NG)・ボゾン場の古典的ソリトンとして記述する描像であり、有効模型としては NG ボゾン場の非線形表現で表されるスキルム模型が有名である。これらの論文で扱っているのは、スキルム模型、及び、それによるバリオンの諸量 (質量、構造、電磁的性質等) の定量的解析であるが、他にもバリオンの励起スペクトル、バリオン・メソン相互作用、バリオン間相互作用などもある程度定量的に記述できる。また、スキルミオンは非線形ソリトンとしての普遍性を有し、例えば、物性系の量子ホール効果などにも適用される。尚、large  $N_c$  かつ強結合の QCD においてスキルム模型が導かれる事が、近年、超弦理論での D-brane と AdS/CFT 対応を用いて示されている。

#### 参考文献

- レビューとしては、例えば、  
“The Skyrme Model”, I. Zahed and G.E. Brown, Phys.Rept.142 (1986) 1-102.
- 量子ホール効果でのスキルミオンについては、例えば、  
「量子ホール効果」, 吉岡大二郎 (岩波書店・新物理学選書)
- D-brane と AdS/CFT 対応で定式化されるホログラフィック QCD との関連では、  
T.Sakai and S.Sugimoto, “Low energy hadron physics in holographic QCD”,  
Prog.Theor.Phys.113 (2005) 843-882;  
“More on a holographic dual of QCD”, Prog.Theor.Phys.114 (2005) 1083-1118.

#### (4) ハドロンの複合性

“Evidence That the Deuteron Is Not an Elementary Particle”,  
S. Weinberg, Phys. Rev. 137 (1965) B672-B678

標準模型の確立前は、加速器で次々と発見される粒子について、素粒子か複合粒子かを識別することが盛んに議論されていた [Weinberg (1963)]。この論文では、束縛エネルギーの小さい極限を考えることで、束縛状態の構造をモデルに依存しない形で観測量と関連付ける公式を導いた。応用例として、重陽子の束縛エネルギーと低エネルギー核子散乱のデータのみから、ポテンシャルや波動関数を用いることなく、重陽子の複合性が理解された。現在のハドロンの物理では、スカラームeson [Baru et al., (2004)] や重いクォークセクターのエキゾチック粒子 [Brambilla et al. (2010)] などのハドロンの分子的 (クラスターの) 構造を解明する上で重要な概念となっている。

#### 参考文献

- “Elementary particle theory of composite particles”,  
S. Weinberg, Phys. Rev. 130 (1963) 776-783.
- “Evidence that the  $a(0)(980)$  and  $f(0)(980)$  are not elementary particles”,  
V. Baru, et al., Phys. Lett. B586 (2004) 53-61.
- “Heavy quarkonium: progress, puzzles, and opportunities”,  
N. Brambilla et al., Eur. Phys. J. C71 (2011) 1534.

#### (5) クォーククラスター模型

“Short Range Part of Baryon Baryon Interaction in a Quark Model. 1. Formulation”,  
M. Oka and K. Yazaki, Prog. Theor. Phys. **66** (1981) 556.

“Short Range Part of Baryon Baryon Interaction in a Quark Model. 2. Numerical Results for S-Wave”,  
M. Oka and K. Yazaki, Prog. Theor. Phys. **66** (1981) 572.



核子を3つのクォークからなる複合粒子として核力の性質を議論した論文である。核力の斥力コアをクォーク間のパウリ排他率から説明する試みは Neudachin, Smirnov, Tamagaki ('77) で行われた。この論文ではグルーオン交換を加えることにより斥力コアが定性的に説明できることを示している。精緻化されたクォーク模型核力 (Fujiwara, Suzuki, Nakamoto ('07)) はバリオン間力を系統的に説明する有力な模型となっている。また近年の格子 QCD を用いた核力の研究 (Aoki, Hatsuda, Ishii ('10)) でも同様のクォーク間パウリ効果が斥力芯の性質を与えることを示しており、核力の短距離部分を理解する上で基本的な描像を与える考え方となっている。

#### 参考文献

- “An Explanation of  $n-n$  Repulsive Core in Terms of Forbidden States Based on the Quark Model”,  
V. G. Neudachin, Y. F. Smirnov and R. Tamagaki, *Prog. Theor. Phys.* **58** (1977) 1072.
- “Baryon-baryon interactions in the SU(6) quark model and their applications to light nuclear systems”,  
Y. Fujiwara, Y. Suzuki and C. Nakamoto, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **58** (2007) 439.
- “Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations”,  
S. Aoki, T. Hatsuda and N. Ishii, *Prog. Theor. Phys.* **123** (2010) 89.

#### (6) 強磁場中におけるカイラル対称性の破れ

“Dimensional reduction and dynamical chiral symmetry breaking by a magnetic field in (3+1)-dimensions”,  
V.P. Gusynin, V.A. Miransky, I.A. Shovkovy, *Phys.Lett.* B349 (1995) 477-483

強磁場中の低エネルギー領域では、いかに相互作用が弱い理論でも必ずカイラル対称性が破れることを、有限密度系との類推と共に指摘した論文。強磁場中、及びフェルミ面近傍の低エネルギー励起はいずれも (1+1) 次元的な分散関係を持ち、残りの二次元位相空間は縮退している。強磁場中におけるカイラル対称性の破れ、及び超伝導はこの低次元性を理由として起こる故に、相互作用の強さに依らず発現すると言える。

#### 参考文献

- 強電磁場中のカイラル対称性の初期の研究として、  
“On the Behavior of Symmetry and Phase Transitions in a Strong Electromagnetic Field”,  
Hideo Suganuma and Toshitaka Tatsumi, *Annals Phys.* 208 (1991) 470-508
- 上記論文ではギャップ方程式を解析しているが、繰り込み群の方法でもとらえることもできる。強磁場中では、4体フェルミ演算子が常にマージナルなスケーリング次元を持つことが言え、赤外領域にランドウポールが出現する。  
“Magnetic catalysis in hot and dense quark matter and quantum fluctuations”,  
Kenji Fukushima and Jan M. Pawłowski, *Phys.Rev.* D86 (2012) 076013.  
“Anatomy of the magnetic catalysis by renormalization-group method”,  
Koichi Hattori, Kazunori Itakura, Sho Ozaki, *Phys.Lett.* B775 (2017) 283-289.
- 超伝導を繰り込み群の方法で議論した有名な講義ノートとして  
“Effective field theory and the Fermi surface”,  
Joseph Polchinski, arXiv:hep-th/9210046.