

第1回研究戦略ワークショップ（理研 2008年9月25-26日）のまとめ（案）

総評

理研 RIBF は、現実的・潜在的な実験課題の多様性と可能性において、**r-process** と超新星爆発の物理を中心とする天体核物理研究の国際的なセンターになりうる能力を有する。国際的なセンターとして機能するために、**I. r-process** 研究における実験課題を明確にするための初期研究の開始と、**II. 実験・理論の研究体制の戦略的整備**を行うことを奨める。また、**III. 他**の研究施設でもユニークな実験的研究が可能であり、理研と連携して相補的な役割を果たすことが期待される。以下、**I, II, III**について現状分析と提言を行う。

I. r-process 研究における実験課題の戦略的位置づけ： r-process 元素存在量の原子核物理量に対する sensitivity

現状分析

このテーマは本ワークショップで最も重視した点であり、そのため Meyer (Clemson) に基調講演を依頼した。重要な議論と計算ツールが紹介されたが、議論は未だ一般論の域を出ず、今後計算ツールを使って具体的な作業が必要である。

Meyer は講演「**r-process** 計算に必要な核データ」で、4つの重要な要素として、適切なモデル、**r-process** 観測量、観測量の核データ依存性、核データを取得するための実験的戦略の重要性を指摘した。**r-process** には、低エントロピー、高エントロピー、高エントロピー+急速膨張の3つの regimes があり、100程度の中性子一種核比が必要で、それは電子捕獲、ニュートリノ核相互作用に依存し、初期条件として α や重核の生成が抑制され自由な n, p が多く残ることで実現する。**r-process** による重元素合成は、主として準平衡状態を決める物理量（原子核質量と励起状態の分配関数）に依存し、最終的な存在比の詳細は質量、中性子捕獲断面積、ベータ崩壊率、原子核スピンと分配関数、核分裂生成量に依存する。**r-process** のモデル計算結果が参照値として示され、観測量の核データ依存性についていくつかのケーススタディ（中性子捕獲断面積、ベータ崩壊率、スピンと分配関数）の結果が示された。とくにベータ崩壊率に対する依存性は大きく中心的な実験課題となりうる。Meyer が開発しているオンライン元素合成ネットワーク計算のための計算ツール libnucnet が紹介された。

提言

理研内もしくは外に作業チームを作り、計算ツール libnucnet を使って **r-process** 元素存在量の原子核物理量に対する sensitivity のスタディを詳細に行うことを提言する。この作業は実験テーマ毎に重要な対象核種を明確にし、研究を戦略的に行うために不可欠である。

たとえば Meyer を理研に短期間（たとえば夏季 1 カ月）招聘し彼をヘッドとし、博士研究員と国内の研究者の協力を得て作業チームを作りケーススタディを行う。具体的な作業内容は、**r-process** 経路をいくつかの領域、たとえば定説の **magicity: N=50,82,126** の垂直経路とその前後の水平経路に分け、各領域に属する原子核の物理量（質量、ベータ崩壊率、中性子捕獲断面積、スピン、分配関数）を変化させ、**r-process** 元素の存在量分布を計算する。定説の **magicity** を変更したときの **r-process** 経路の変更とそれに伴う **r-process** 元素の存在量分布を計算する。

r-process 元素の太陽組成は多くの超新星爆発の寄与の和であり、**r-process** 元素の存在量は 3 つの **regimes** のエントロピーに強く依存する（Meyer）ため、必ずしも **r-process** の原子核物理量に対する **sensitivity** スタディに適しているとは言えない。特定の超新星爆発の核合成を反映していると考えられる金属欠乏星の **r-process** 元素の観測データが重要である。今後、金属欠乏星の観測データが **sensitivity** スタディに利用できるようになることが望まれる。

II. 実験・理論の研究体制

はじめに理研 RIBF で実施可能な実験について概観し、次に主要な実験テーマについて実験・理論の共同研究体制の観点からコメントする。

1. 理研 RIBF の実験的能力

現状

櫻井（理研）の基調講演と本林（理研）の講演により、**r-process** 研究と超新星爆発に関する理研 RIBF 施設の実験的な実現能力と潜在能力が提示された。内容は多岐にわたるが、天体核物理の視点から、345 MeV U ビームの核分裂片を利用した現時点での実現能力として、以下に注目する。

装置	実験内容	測定量
BIGRIPS/ZD	ベータ・ガンマ分光	$T_{1/2}$, β -branchings
	(p,p'), Coulomb 励起	J^π , E_x , B(E2), B(E1)
SAMURAI	Coulomb 分解	(n, γ) cs, GDR, PDR
	Multi fragmentation	EOS
SHARAQ	荷電交換反応 ($^3\text{He}, t$)	B(GT)
	非弾性散乱 (p,p')	PDR, GDR, B(E1), B(M1)

一方、**r-process** 研究と超新星爆発・EOS の物理に重要な不安定核の質量測定は、SLOWRI

と Rare RI-ring のどちらか（または両方）の実現を待たねばならない。現時点では、理研の潜在能力である。

提言

理研RIBFで質量測定が行えるかどうかは、SLOWRI（高精度測定装置）とRare RI-ring ($\Delta M/M \sim 10^{-6}$) のどちらか（または両方）が実現するかどうかにかかっている。実現に向けて理研の戦略的判断が問われる。天体核物理における質量測定の重要性に鑑み、SHARAQ($\Delta M/M \sim 3 \times 10^{-5}$)の質量分析能力を利用した質量測定の可能性を検討することが望まれる。

2. ベータ崩壊

現状

橘（早稲田）の現象論的なGT(Gross Theory)によるベータ崩壊率の計算は、質量公式（たとえばKTUY<小浦－橘－宇野－山田>質量公式）があれば、核図表全体に亘る不安定核について行うことができることが最大の利点である。r-processの経路上の重要な核種と考えられる ^{79}Ni , ^{77}Co のベータ崩壊率の計算結果が示された。本間（会津）のshell model計算は、平均場近似のRPA計算に比べて精度の高い微視的モデルと位置づけられる。しかし現時点では数値計算負荷のためモデルスペースを限定しているため、計算対象核種は $N, Z=26-50$ に限定されている。r-processの経路上の重要な核種と考えられる $N=49, 50$ 核について、 Q_β , $T_{1/2}$, single-particle levels, β -branchings等の計算結果を与えた。

提言

理研でベータ崩壊実験を戦略的に行う上で、国内のベータ崩壊の理論家のサポートを得ることは不可欠である。橘の計算は、実験課題を明確にするための初期研究（r-processのケーススタディ）の他、測定計画を立案する上でまた測定結果と比較する上で実践的に役に立つと思われる。実験家にとっては測定計画の立案および実験結果との比較において即戦力としての役割が期待される。本間は守備範囲の核種について実践的な役割と同時に、今後、モデルスペースを大きくとり中性子過剰核に対する計算精度および計算対象核種をNZ平面で拡大することが期待される。武藤（東工大）他、国内のベータ崩壊の理論家の協力を得て、理研の実験をサポートする体制を構築することが望まれる。また、後述するように（II.7及びIII）、ベータ崩壊測定は($^3\text{He}, t$)反応によるB(GT)測定とcoherentに行う意義がある。

3. 質量

現状

小浦（JAEA）が扱っているKTUY質量公式は現象論的であるので、質量、分離エネルギー（ $S_{1n}, S_{2n}, S_{1p}, S_{2p}$ ）における既存実験データとの比較では最も良い精度を誇る。質量、分離エネルギー、核分裂障壁等のr-process元素合成に関与する物理量を核図表全体に亘って与えることができる。実験課題を明確にするための初期研究（r-processのケーススタディ）の

他、質量測定計画の立案や測定値との比較等、実験家にとって即戦力として実践的な役割が期待できる。反面、微視的モデル（GorielyのSkyrme Hartree-Fock）計算に比べて、ベータ安定線から離れた不安定核に対する予言力を批判されることがある。

提言

r-process 元素の存在量は、第 1 義的な分布は熱平衡条件（NSE: nuclear statistical equilibrium）で決定され、非平衡条件によって修正され最終的な分布が決まる。熱平衡条件下での支配的な物理量は質量であるので、理研で中性子過剰核の質量測定ができるかどうかは研究戦略上重要である。できるだけ早く理研内において質量測定の位置づけを、SLOWRI, Rare RI-ring 装置との関連で、明確にすることが望まれる。小浦の現象論的質量公式は、ベータ崩壊実験における橋の役割と同様、実験家にとっては即戦力としての役割が期待される。一方、ベータ崩壊における本間に該当する、微視的質量公式を扱う理論家は国内に見当たらない。微視的モデルを扱う理論家が理研の質量測定にどのように係わるかは今後の課題である。

4. 中性子捕獲反応および統計的物理量（ガンマ線強度関数と核準位密度）

現状

Hauser-Feshbach(HF)統計モデルはr-processに係わる中性子過剰中重核の中性子捕獲反応を計算する有力な手段である。r-processに係わる数千の核種に対して実験的核データを取得することは不可能であることは明白であるため、統計モデル計算の予言力を向上させることは必要不可欠である。河野（LANL）は、中性子捕獲反応を低エネルギーの複合核(CN)反応と直接準直接(DSD)反応に分け、チャンネル結合法を組み込んだHF計算コードで変形核のCN反応を、Hartree-Fock BCS 理論で 10 MeV領域のDSD反応を扱い、 ^{238}U , $^{122,124}\text{Sn}$ 核を例として計算結果を示した。

ガンマ線強度関数(γSF)と核準位密(NLD)度は HF 計算の重要な統計的原子核物理量である。中務（理研）は偶-偶核に対する $E1 \gamma\text{SF}$ の密度汎関数理論（DFT）計算の結果を、中田（千葉大）は NLD に対する殻模型モンテカルロ (SMMC)理論計算の結果を示した。

提言

中性子過剰核では中性子スキンのコア核に対する双極子集団振動に由来するpigmy共鳴が中性子しきい値近傍に現れることが期待される。従来の中性子捕獲反応に対するHF統計モデル計算においては、巨大双極子共鳴(GDR)の効果は入っているが、pigmy 双極子共鳴(PDR)の効果は取り入れられていない。実験的にPDRのglobal systematicsを確立することは重要な研究課題である。最近GSIでクーロン分解法によって ^{132}Sn 核のPDRが測定された。HF統計モデル計算におけるPDR効果は大きいと考えられるので、河野の協力を得て ^{132}Sn 核に対して定量的な研究を行うことを奨める。

^{132}Sn 核はr-processの $N=82$ に沿った垂直経路のtopに位置する核であるので、安定な ^{124}Sn から ^{132}Sn までのSn同位体のPDRを系統的に測定することが望まれる。また、同様に、安定

な ^{64}Ni から $N=50$ に位置する ^{78}Ni までのNi同位体についてPDRの系統的測定は興味深い。このような系統的な測定は、BIGRIPS/ZDやSHARAQでの (p,p') 反応またはSAMURAIでのクーロン励起、クーロン分解を用いて行うことができる。

中務の時間依存DFT(TDDFT)は、原子核の諸応答関数を計算する有力な手段である。原子核全体を対象とするglobal approachは元来天体核物理に向いている。今後の進展に期待したい。中田のSMMC理論計算は、もっとも微視的なNLDの計算であり、IAEA核データライブラリーRIPLの将来バージョンであるRIPL-4に収録されることが期待されている。反面、NLDの実験的直接情報が、低励起準位、s-波中性子共鳴準位のエネルギー間隔に限定されているのが弱点である。連続状態の核準位密度に対しては、Oslo methodが有名であるが、これはガンマ線強度関数と核準位密度の積に対するプローブであり、新たな実験的研究手段の考案が望まれる。この点、宇都宮（甲南大）が ^{180}Ta 核の 9^- 核異性体で示したように、複合核連続状態から高スピン核異性体へのガンマ遷移は連続状態の高スピン核準位密度に対する良いプローブとなることを付記する（III光核反応）。

5. バリオン物質と状態方程式

現状

高塚（岩手大）は、バリオン物質の観測量として中性子星の質量とルミノシティ（表面温度）の2つがあること、中性子星の高密度（ $\rho/\rho_0 \gtrsim 5$ ）中心部ではハイペロン（ Λ 、 Σ ）が混ざるため核物質の状態方程式がsoftになり過ぎる（中性子星の質量が小さすぎる）こと、softになり過ぎるのを抑制する因子としてハイペロンを含む核力の3体斥力の効果、表面温度の低い中性子星はパイペロン超流動と結合したハイペロン冷却が効いている可能性、高密度核物質の対称エネルギー、非圧縮率の重要性を指摘した。

佐川（会津大）は、平均場近似で経験的に得られた核物質の非圧縮率 K はSkyrme-HF(Hartree-Fock)モデルとGogny-HFモデルの場合230 MeV, RMF(relativistic mean field)モデルの場合250 MeVであること、中性子星核物質の状態方程式、原子核の中性子スキンの厚さ、および、対称エネルギーの体積項の3つには相関があること、中性子スキンの厚さを荷電交換SD(spin dipole)励起の和則を用いて決定すること、その例として $^{90}\text{Zr}(p,n)(n,p)$ 反応測定結果を示した。

小野（東北大）は、核物質の状態方程式を重イオン衝突から決定することについて、AMD(Antisymmetrized Molecular Dynamics)によって、核衝突（多重破砕）のダイナミクスと液相気相転移が核物質の熱化学平衡状態のアンサンブルとして記述されること、したがって、状態方程式、現象（中間段階の物理量）、観測量の3つが原理的に結びつけられることを示した。今後の課題として状態方程式と観測量の定量的な関係を研究することが指摘された。

提言

高塚の講演は、中性子星核物質の研究は、ハイパー核（ハイペロンと核子、ハイペロン同

士の相互作用)、少数多体系 (ハイペロンに適用可能な核子 3 体斥力)、高エネルギー重イオン衝突 (BNL-RHIC実験) の分野との学際領域であることを示している。いずれも重いテーマであるが、このうち理研RIBFで実行可能なものはd+p弾性散乱による 3 体力の研究であろう。ただし、この研究で達成可能と思われる密度範囲は $\rho/\rho_0 \leq 2$ と考えられる。なお、阪大RCNPの 400 MeV陽子ビームを用いても同様の研究が実行可能である。

佐川は状態方程式の対称エネルギーに対する現実的なプローブとして、荷電交換SD励起実験による中性子スキン厚さの決定を提案した。例として挙げられた $^{90}\text{Zr}(p,n)(n,p)$ 実験の結果 ($\delta_{np}=0.07 \pm 0.04 \text{ fm}$) は、現状では実験誤差が大きすぎる。理研RIBFで実験を行うとすると、他の荷電交換反応での中性子スキン厚さの測定を検討すべきであろう。

小野のAMD法は、重イオン衝突を記述する有力な方法であり原子核物理としてはそれ自体価値があるだろう。その反面、状態方程式の研究に利用する際のポイントは、小野自身が今後の研究課題として挙げている観測量 (たとえばclusters/fragments組成比) の状態方程式に対するsensitivityである。この点を明らかにすることが望まれる。また、理研RIBFで重イオン衝突を行うとすると、BNL-RHICの高エネルギー重イオン衝突と違って、達成できる密度はむしろ液相気相相転移での低い領域 ($\rho/\rho_0 \leq 1.5$) であるという限界がある。

6. 核分裂

現状

r-processは中性子過剰な最も重い核合成まで進行すると核分裂によって循環 (cycling) すると考えられる。千葉 (JAEA) はこのr-processのfission cyclingがr-process元素の存在量に及ぼす影響を示した。計算結果は、 β 遅延核分裂、自発核分裂、核分裂片の質量分布等、関連する原子核物理量の不定性が大きく、また、核合成のエントロピー依存性が強いが、高エントロピー ($S=500$)、低核分裂障壁 (3 MeV) では $A \sim 130$ の第 2 ピーク (Xe) 付近の領域 ($A=100 \sim 180$) に核分裂に特有の元素存在量が現れることを示した。湊 (東北大) は、r-processのfission cyclingに関連して、ベータ遅延核分裂で顕著になると考えられる核分裂障壁の温度 (励起エネルギー) 依存性を有限温度 (Finite Temperature) HFBモデルによって、 ^{236}U , ^{266}U , ^{286}Fm 核の核分裂反応率の温度依存性を計算し、ゼロ温度 (基底状態) に比べて反応率が著しく減少することを示した。

提言

r-processのfission cyclingを観測データ ($A \sim 130$ の存在量) に基づいて確認することが重要である。この確認作業では太陽組成ではなく、個別の超新星爆発を反映している金属欠乏星の観測データが重要な役割を果たすであろう。fission cyclingの効果を直接示す観測データが出れば、r-process元素合成のモデルだけでなく原子核物理量 (r-processで合成される最も重い中性子過剰核の核分裂障壁や核分裂片の質量分布) に制限がつけられる可能性がある。一方、原子核物理学として、重い原子核の核分裂に関する物理量を測定することは重要である、しかし理研RIBFにおいても、少なくとも現時点では、r-processで合成され

る最も重い中性子過剰核が研究対象になることはない。現時点でできることは、 $^{235,238}\text{U}$ 核周辺で湊等の微視的モデルに実験的制限を与えることである。これは中性子過剰なより重い核に対する微視的モデルの予言力を向上させる上で重要な実験課題である。 $^{235,238}\text{U}$ を標的核とした $(n,f)(\gamma,f)$ 実験が考えられるが、理研RIBFでは ^{238}U ビームによる実験が可能であろう。

7. ニュートリノ原子核相互作用

現状

超新星爆発ではニュートリノが大量に発生するため、爆発で吹き飛ぶ外層中でニュートリノ(ν)と原子核の相互作用による元素合成は進行する。これはニュートリノプロセスと呼ばれる。鈴木(日大)は、SFOハミルトニアンを用いて ν とp-shell核($^4\text{He}, ^{12}\text{C}$)の反応断面積のshell-model計算を行い、He層での ν プロセスは ^7Li , ^{11}B の合成をenhanceすることを示した。また、GZPF1相互作用を用いた ν とfp-shell核(Fe, Ni同位体)の反応のshell-model計算は、藤田(阪大)による ^{58}Ni 核のB(GT)をよく再現すると同時に、Pop. III星(金属欠乏星)では ν プロセスにより ^{55}Mn 合成がenhanceすることを示した。

提言

ν -原子核charged current反応断面積はB(GT)値によって、neutral current反応断面積はB(M1)値によって決定される。鈴木は ν -原子核反応のshell model計算に対しては、藤田がRCNPで得ているB(GT)測定値が実験的な制約を与える。理研RIBFでは、SHARAQにおいて不安定核ビームを用いた($^3\text{He}, t$)逆運動力学実験が可能である。RIBFでは、藤田の手法を用いて(Ⅲ参照)、不安定核のベータ崩壊、($^3\text{He}, t$)実験を組み合わせることでB(GT)を決定すること、また、不安定核を用いた(p, p')逆運動力学実験によってB(M1)を決定することも期待できる。このように、RIBFではベータ崩壊、($^3\text{He}, t$)、(p, p')の異なるプローブを組み合わせ、 ν プロセスに関する原子核物理量、 ν -原子核反応断面積の決定は良い研究課題となる。

Ⅲ. 他の研究施設

現状

藤田(阪大)はRCNPの ^3He ビームを用いた($^3\text{He}, t$)反応の高分解能測定によって、 β 崩壊データと組み合わせることでB(GT)値を決定する手法をfp-shell核に対する実験例を元に紹介した。この手法によるB(GT)の決定精度は、ベータ崩壊データの精度に依るが20%程度である。宇都宮(甲南大)は、光中性子核反応を用いてHFモデルの重要な統計的原子核物理量(ガンマ線共同関数、核準位密度)を決定すること、特に中性子捕獲断面積に大きな影響を及ぼす、巨大共鳴の低エネルギーのすそ(中性子しきい値付近)に現れるpigmy E1 resonanceとgiant M1 resonanceの研究の重要性を示した。久保野(CNS)はCRIBでの核反応を利用した低エネルギーRIビームの生成の現状とその研究利用、また発展として核融合・核分裂反応を利用したfp-shell RIビームの生成とそのvp-processでの水素燃焼過程研究への

feasibilityを議論した。今井（KEK）は、J-PARCで2次粒子として生成される π 中間子の崩壊で得られる ν ビームを使って ν -原子核反応断面積の直接測定の可能性について議論した。

提言

藤田の手法は、II.7 提言で述べたように、RIBFにおいて不安定核ビームによるベータ崩壊と($^3\text{He}, t$)反応実験を組み合わせたB(GT)の決定に応用できる手法であり、この手法に基づく研究戦略を検討することは重要である。統計的物理量（ガンマ線強度関数）に大きな影響を及ぼすpigmy E1 resonanceとgiant M1 resonanceの研究は、SAMURAIでのクーロン励起、分解実験の他、SHARAQでの不安定核ビームを用いた(p, p')実験により可能である。RCNPでの($^3\text{He}, t$)(p, p')反応等の実験、放射光施設での光核反応実験は、RIBFでの不安定核ビームによる研究を補完する役割がある。

低エネルギーRI ビームは、今後、特に十分な実験成果が得られるビーム強度の実現性と研究利用の重要性についてさらに検討することが望まれる。

J-PARC での ν -原子核反応断面積の直接測定は、SNS（米）での同計画の経緯を別にして、天体核物理および原子核物理上の実験の意義を明らかにすることが望まれる。