

研究代表者	大阪大学・核物理研究センター・教授
	野海 博之 (のうみ ひろゆき) 研究者番号:10222192
研究課題情報	課題番号: 22H04940 研究期間: 2022年度~2026年度 キーワード: チャームバリオン、強い力、クォーク対相関、重いクォーク

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

我々は「素粒子であるクォークからどのように物質が形成されたか」という、宇宙における物質階層の形成と進化の根幹部分にある自然科学の重要な課題に取り組んでいる。ビッグバンとともに誕生した高温の初期宇宙はクォークが自由に飛び交う世界であったが、宇宙が膨張し冷却する過程で、クォークは互いに結合し、ハドロンと呼ばれる粒子群を形成した。ハドロンはメソンとバリオンに大別される。メソンはクォークと反クォークからなり、バリオンは3つのクォークからなる。陽子や中性子(以下、総称して核子という)は最も安定なバリオンである。核子は核力によって集し様々な原子核を作る。原子核はまわりに電子を纏って原子(元素)となり、身の回りの様々な物質を形成する。このように、物質形成の起源をたどると、バリオンは素粒子から組み立てられた最初の複合物質と言える。よって、冒頭に掲げた課題は、「クォークからバリオンがどのようにできているか」という問いに行きつく。クォーク間には「強い力(強い相互作用)」が作用する。強い力は文字通り大変強く、真空の性質を変えてしまうほど、その振舞いは複雑である。強い力によってバリオンの質量が生成され、クォークはバリオン内部に閉じ込められて単体では取り出せなくなっている。そのため、バリオンを励起させて、それがどんな質量をもち、どのように作られ、どのように崩壊するかを調べることによって、バリオン内部のクォークの振る舞いを知る手がかりを得る。バリオンを形成する強い力の性質を解明することにより、強い力が織りなす未知の極限物質、たとえば、中性子星の中心部で実現されているとされる原子核のそれをはるかに超える高密度物質やバリオンから解放されたクォークからなるクォーク星のような超高密度クォーク物質の性質解明につながる。

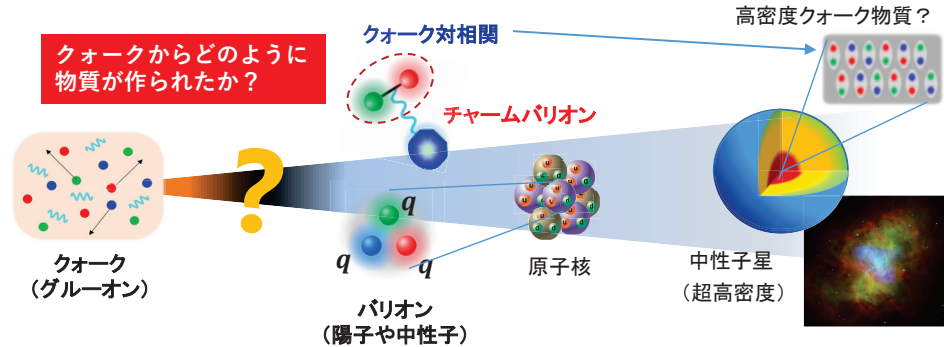


図1 宇宙の物質形成と進化

●チャームバリオン内部におけるクォークの運動

核子のようにほぼ同じ質量をもつクォークからなる通常のバリオンは、3つのクォークが絡み合いクォークの運動を分離することが困難である。我々は、1つのクォークを、それより5倍重いチャームクォーク(c)に置き換えることでこの絡み合いが解けることに着目した。重いクォークに対して残りの軽いクォーク対が集团的に運動するモードをλモードといい、軽いクォーク間の相対運動をρモードという。図2に示す通り、重いクォークを含むバリオンの励起状態において、前者の励起エネルギーが後者のそれに対して下がる事が示される。これは、同位体シフトと呼ばれ、多体系に普遍的にみられる現象である。(つづき)

●チャームバリオン内部におけるクォークの運動 (つづき)

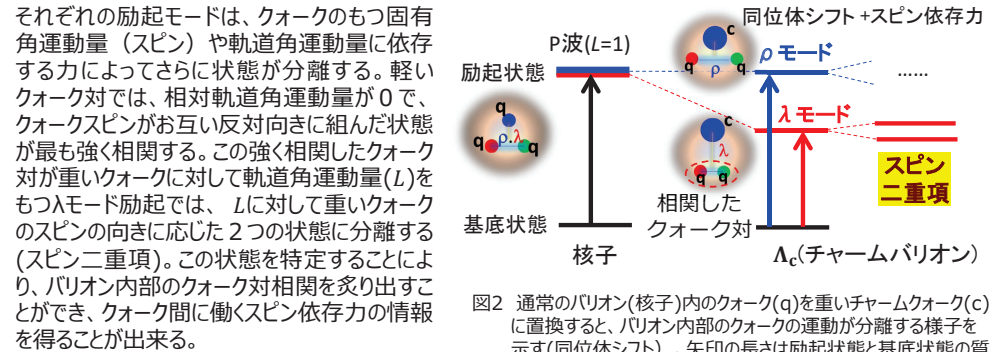


図2 通常のバリオン(核子)内のクォーク(q)を重いチャームクォーク(c)に置換すると、バリオン内部のクォークの運動が分離する様子を示す(同位体シフト)。矢印の長さは励起状態と基底状態の質量差(励起エネルギー)の大きさを表す。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●チャームバリオン高励起状態の生成と崩壊から内部構造を明らかにする

図3に示す通り、本研究では、J-PARCの大強度・高運動量パイ中間子(π^-)ビームを陽子(p)に衝突させ、反チャームクォーク(\bar{c})を含む D^{*-} 中間子とともにチャームバリオン励起状態(Y_c^{*+})を生成する。本研究の特徴は、 π^- が持ち込むエネルギーと D^{*-} が持ち出すエネルギー収支を測定して、生成された Y_c^{*+} 質量を測定する手法(欠損質量法)を用いることである。これにより、広い質量領域にわたって、チャームバリオン励起状態の質量分布を取得できる。さらに、内部構造を反映する生成や崩壊の様子を系統的に測定する。チャームバリオンの同位体シフトに特有の励起モードを確認し、バリオン内部に閉じ込められたクォークの動きを詳しく調べる。図3に示す生成反応図によると、陽子内のクォーク1つがチャーム(c)クォークに置き換わる反応の際、相関したクォーク対(ud)とcクォークの間に角運動量が持ち込まれやすいことが示唆される。これは、図2で説明したような、λモードの励起が起こりやすいことを示す。図4に、理論計算による生成率を基にした、チャームバリオン質量分布(スペクトル)の予想を示す。左端のピークは基底状態のチャームバリオン(Λ_c)である。また、軌道角運動量 $L=1, 2$ を持つ Λ_c^* のスピン二重項が強く励起される。スピン二重項は、特定の生成比や崩壊傾向を示す。スピン二重項を特定することにより、クォーク間のスピンに依存する相互作用の情報を得る。本研究によって、バリオン内部で発達するクォーク対相関の存在を初めて明らかにする。このクォーク対相関は、超高密度クォーク物質の性質を特徴づけるとされるクォーク対凝縮(超伝導物質におけるクーパー対のようなもの)を引き起こす重要な相関である。中性子星芯部のような極限状態の物質の性質を理解するための重要な知見を与えると期待される。

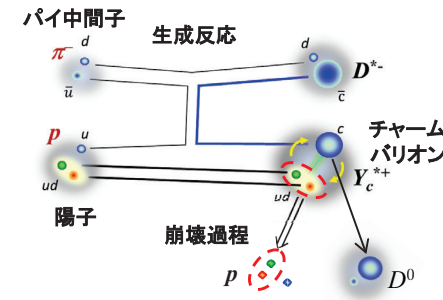


図3 チャームバリオンの生成反応と崩壊過程

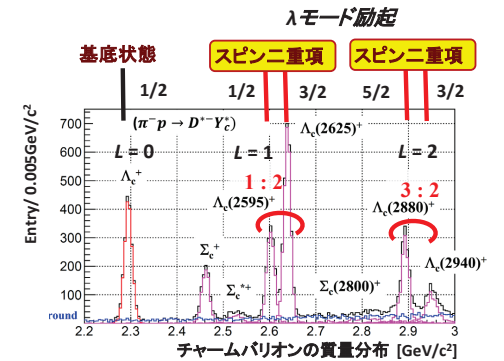


図4 予想されるチャームバリオン(Y_c^{*+})の質量分布(スペクトル)。 Y_c^{*+} は内部量子数が異なる Λ_c と Σ_c がある。