

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03978

研究課題名(和文) グルーオン飽和描像に基づく幾何学スケーリング現象と小さな系の熱平衡過程

研究課題名(英文) Geometrical scaling by the gluon saturation picture and thermalization of small systems

研究代表者

長田 剛 (Osada, Takeshi)

東京都市大学・理工学部・教授

研究者番号：50366845

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 700,000円

研究成果の概要(和文)：熱平衡化前の小さな系として、衝突エネルギーが核子あたり2.76TeVと7.00 TeVの陽子・陽子衝突及び、核子あたり5.02 TeVの陽子・鉛衝突によって生成される高温・高密度核物質を研究対象としてグルーオンの飽和描像に基づく幾何学スケーリングが成立するか否かを詳細に調べた。また、その描像に基づくカラーチューブ模型に立脚した実験データの解析を行った。その結果、非常に幅広い多重度の横運動量分布に対して幾何学スケーリング現象を確認することができた。またそれより得られた飽和運動量は、荷電中間子の多重度の1/6乗に比例し、反応領域のサイズは多重度の1/3乗に比例することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人類が作り出せる最小の熱平衡系は何か？それは、どのように作ることができるのか？この問いへの回答はおそらく高エネルギー陽子・陽子衝突によって生成され、強い力で相互作用するハドロン物質の系であることが推測されている。この系の生成や時間発展は、原理的には量子色力学によって支配されているが、低運動量領域において摂動的な取り扱いが困難なため、明確な回答を引き出すことはできてない。一方、本研究課題はクォークやグルーオンのダイナミクスの本質を取り入れた現象論的模型でこの問題に取り組んだ。本研究課題が提唱する模型の成功は、取り扱いの困難な量子色力学の理解にも役立つはずであり学術的にも意義が大きいと思われる。

研究成果の概要(英文)：We have studied high-temperature, high-density nuclear matter produced by proton-proton collisions with collision energies of 2.76 TeV and 7.00 TeV per nucleon and proton-lead collisions with 5.02 TeV per nucleon as a small system in pre-thermal equilibrium, and examined in detail whether the geometric scaling based on the saturation picture of gluons is valid or not. The color tube picture of the gluon is also investigated in detail. We also analyzed the experimental data based on the color tube model. As a result, we confirmed the geometric scaling phenomenon for a wide range of multiplicity of transverse momentum distributions. The obtained saturated momentum is proportional to the multiplicity of charged mesons to the 1/6th power, and the size of the reaction zone is proportional to the multiplicity to the 1/3rd power.

研究分野：理論物理学

キーワード：クォーク・グルーオン・プラズマ グルーオン飽和描像 ハドロン多重発生 高エネルギー陽子・陽子衝突 高エネルギー原子核衝突

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

「陽子・陽子衝突で生成される核物質は、衝突エネルギーの大きさに依らず熱平衡に到達できない。これは、高エネルギーハドロン物理学、原子核物理学のコミュニティの主流の考え方であった。なぜならば、陽子同士の衝突では生成される物質系のサイズは小さく、その系を構成するクォークやグルーオンは熱力学的に平衡となるために十分な回数(相互作用)が期待できないからだ。しかし、高エネルギー陽子・陽子衝突においても熱平衡に到達した粒子の集団運動と解釈される楕円フローなどの現象が実験によって見出されると、この考え方自体に修正の検討が議論されるようになっていた。

### 2. 研究の目的

現状では、陽子・陽子衝突で生成される小さな系でも局所熱平衡は実現しているのか、それとも楕円フローが熱平衡のシグナルとして不完全であるのか、決定的な証拠はない。しかし、熱平衡状態の出現を示唆するストレージクォーク生成量の増加も報告されており、小さな系での熱平衡の可能性と平衡過程の解明に大きな注目が集まり始めている。このような学術的背景のなかで、研究の目的を『最小スケールの熱平衡状態、そのスケールを支配する物理は何か?』と設定した。特に、原子核の衝突直後から、局所熱平衡に基づく相対論的流体模型が成立すると考えられるまでの時間は  $1 \text{ fm} (10^{-23} \text{ s})$  程度のオーダーである。この非常に短い時間に強い相互作用が支配するコヒーレントな場から熱平衡状態を導くことは、高エネルギー重イオン衝突の物理の理論研究の重要な課題であり、また非常に難問でもある。そこで、有効理論に基づく現象論的な手法を採用することで、熱平衡化に本質的な役割を担う多重度が支配するハドロン多重発生の物理的機構を解明することを本研究の課題とした。

### 3. 研究の方法

人類が作り出せる最小の熱平衡系は、おそらく高エネルギー陽子・陽子衝突によってであろう。ただし、実際に系が局所熱平衡になるか否かの鍵を握るのは衝突エネルギーではなく、生成された粒子の数、多重度が重要である。高エネルギーの陽子と陽子を同じエネルギーで衝突させても、同じ数の粒子がいつも生成される訳ではなく、その多重度は揺らぐ。これは衝突前の陽子もつエネルギーのうちどの程度が粒子生成に使われ、平均的にどの程度が生成粒子の運動エネルギーに転化するかは、厳密には量子色力学のダイナミクスによって支配されているはずである。すなわち、ハドロン化や衝突により生成されるクォークやグルーオンは、閉じ込め機構を経て最終状態粒子(ハドロン)となると想像される。しかし、このシナリオは、量子色力学が主に低運動量領域において摂動論的な取り扱いが困難である理由により、現時点では量子色力学の理論そのもの自体が多重度を予言することは不可能であるのが現状である。

多重度を支配する物理的機構として本研究が着目したアイデアは、グルーオンの飽和描像であった。LHC などの加速器で相対論的な速度まで加速された原子核や陽子は、激しくローレンツ収縮して、薄い円盤状の形状の中に構成粒子が詰め込まれることになる。それらの構成粒子のうち、ビーム方向に小さな運動量成分を持つグルーオンが多重度では圧倒的多数を占める。特に、グルーオンは横運動量に応じて(不確定性原理に従って横方向の空間領域を占めることになり)、この薄い円形内でグルーオンの重なりあう程度までオーバーラップすると、それ以降はグルーオン間の相互作用(非線形の効果)が主要となりグルーオンの多重度自体は飽和するという模型である。このグルーオンの飽和描像は、局所平衡を考える上で重要な系の大きさと多重度を非常に単純かつ明瞭に結びつける描像である。さらに、飽和運動量と観測されるハドロンの横運動量の比をスケーリング変数とすると、様々な衝突エネルギーの陽子・陽子衝突の横運動量分布にスケーリング則が存在することが知られている。申請者のそれまでの研究で、この飽和運動量スケールと、いわゆる系の温度パラメータに関係があることを示していた。そこで、系の熱平衡に関わる重要な物理量、サイズ、多重度、温度を包含する現象論的な模型として、飽和運動量描像に基づく幾何学スケーリング模型を用いて、この模型を小さな系の熱平衡化問題に適用した。

### 4. 研究成果

(1) 本研究では、研究対象となる熱平衡化前の小さな系として、衝突エネルギーが核子あたり  $2.76 \text{ TeV}$  から  $7.00 \text{ TeV}$  の陽子・陽子衝突に加えて、核子あたり  $5.02 \text{ TeV}$  の陽子・鉛衝突によって生成される高温・高密度核物質を取り上げた。まず、グルーオンの飽和描像が

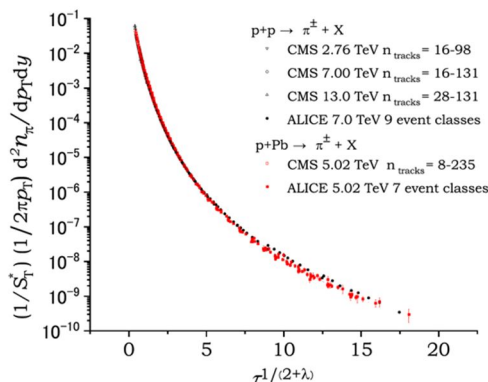


図 1: 荷電 中間子の幾何学スケーリング

成立しているか否かを確認するため、陽子・陽子及び陽子・鉛原子核衝突の様々な多重度に対する荷電パイ中間子の幾何学スケーリングを調べた(図1)。その結果、非常に幅広い多重度の横運動量分布にいたして、著しいスケーリング現象を確認することができた。

(2) 幾何学スケーリングにより、陽子・陽子、または陽子・鉛衝突で生成された系のサイズに関する情報を引き出した(図2)。その結果、系のサイズは生成された荷電パイ中間子の多重度の1/3乗に比例することがわかった。システムが等方的な場合、系のサイズスケールの3乗は系の体積に比例し、これは多重度に比例すると考えられ、サイズスケールが多重度の1/3乗に比例することは容易に解釈することができる。すると、衝突直後の円筒形状に伸びた強いグルーオン場が反応の終状態でのハドロ化の際には、等方的なシステムになっていることを示唆する可能性がある。なお、陽子・鉛衝突では、多重度  $dn/dy$  が20を超えたあたりから、明らかに陽子・陽子衝突とは異なる振る舞いが見られることも発見した。

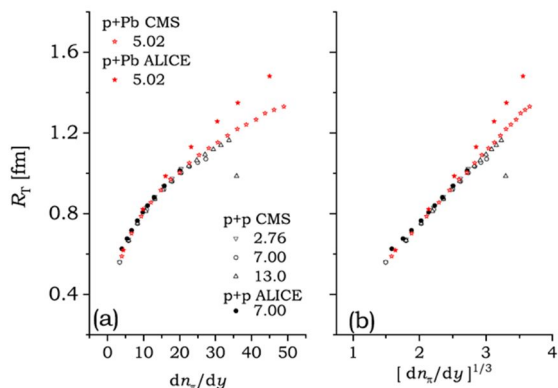


図2：反応領域サイズスケール

(3) 陽子・陽子及び、陽子・鉛衝突反応において、衝突初期に生成が期待されるグルーオンの飽和状態を特徴づける飽和運動量の詳細な解析結果を得ることができた。今回の解析により、得られた飽和運動量は荷電中間子の多重度の1/6乗に比例することが明らかになった(図3)。これは、飽和運動量の逆数は、衝突初期に形成されるカラーフラックスチューブのサイズスケールであるという解釈を明確に裏付ける結果である。また、本研究課題の結果から、形成されるカラーフラックスチューブのサイズは、生成される多重度が大きくなると、反応領域の横方向サイズが限られているため、チューブサイズの直径が小さくならなければならない(圧縮される)様子が伺える。さらに、反応サイズと同様に飽和運動量に関しても陽子・鉛衝突では  $dn/dy$  が20以下では、陽子・陽子衝突と同じ振る舞いをするのに対し、 $dn/dy$  が20以上では、明らかに陽子・陽子衝突とは異なる振る舞いをするを見出した。

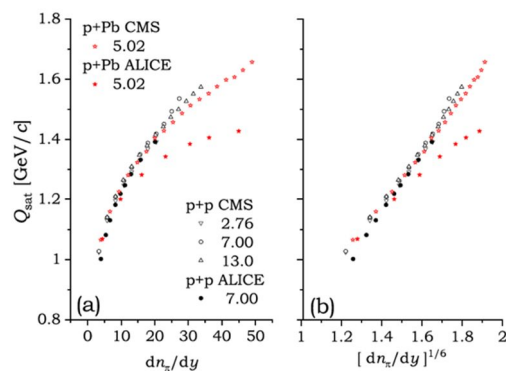


図3：飽和運動量の多重度依存性

(4) 陽子・鉛衝突事象で抽出された飽和運動量を、ソフト運動量成分(0.5-1.5 GeV/c)を持つ荷電中間子に限って解析した結果と、ハードな成分(3.0-19.0 GeV/c)に限った分布に対して分離し、それぞれの多重度依存性を調べた(図4)。すると、ソフトな成分は陽子・陽子衝突と非常に類似した多重度依存性を示すが、ハードな運動量に限った場合は、陽子・陽子衝突とは異なる振る舞いを見出すことができた。また、ハードな場合は、飽和運動量の多重度依存性は前述の  $dn/dy$  の1/6乗から外れることが明らかとなった。その結果、上記の結果(2)及び結果(3)で明らかとなった陽子・鉛系での特異な振る舞いは、比較的大きな横運動量をもつ荷電中間子を生み出す、カラーフラックスチューブによる寄与であると考えられる。

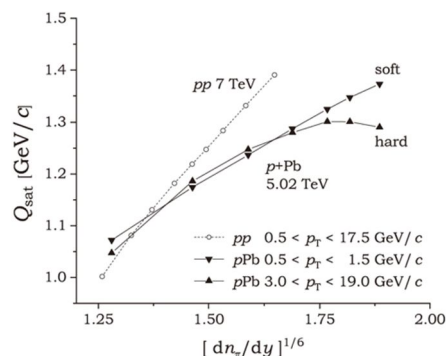


図4：ハード・ソフト横運動量に対する飽和運動量の多重度依存性

(5) 飽和運動量スケールと終状態ハドロンの横運動量は比例することが幾何学スケーリングによって示唆されることに鼓舞されて、観測で得られている横運動量の多重度依存性のデータを、多重度の1/6乗でプロットし、より直接的に幾何学スケーリング描像の確認を行った(図5)。その結果、平均横運動量の多重度依存性は、陽子・陽子衝突においては、7.00 TeV, 13.0 TeVにおいて、類似の傾向が見られた。一方、陽子・鉛衝突においては、 $dn/dy$  の1/6乗の値が約1.7程度( $dn/dy \approx 20$ )以下では、陽子・陽子衝突と非常に似た振る舞いを見出すことを見出した。一方、それよりも大きな多重度では、陽子・陽子衝突か

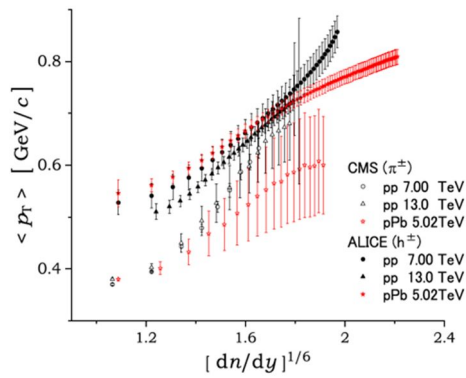


図 5 : 平均運動量に対する多重度 1/6 プロット

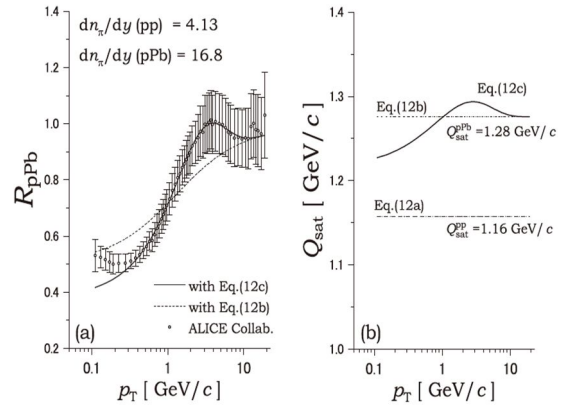


図 6 : pPb 衝突に対する補正因子

ら大きく異なる振る舞いとなっていることを読み取ることができた。陽子・陽子衝突では特に振る舞いを変える粒子密度が存在しないが、陽子・鉛衝突では、本研究で取り組んだ様々な解析結果に、 $dn/dy \approx 20$  を境に、飽和運動量をはじめ、重要な物理量の振る舞いに変化が見られることを見出した。

(6) 本研究課題では、陽子・陽子衝突および陽子・鉛衝突における飽和運動量を詳細に調べた(図 6)。その結果は、いわゆる修正因子と呼ばれる観測量に関して、より精密に横運動量スペクトルの違いを検討することができる。幾何学スケーリングで決められた飽和運動量のパラメータにより、修正因子をどの程度説明することができるが検討した結果、グルーオン飽和描像に基づく幾何学スケーリングモデルで、陽子・鉛衝突に対する修正因子を非常によく再現できることが明らかとなった。さらに、幾何学スケーリング描像と関わりの深い、カラーフラックス描像に関して、ストリング・パーコレーションモデルとの比較を行い、互いの描像の対応関係を見出した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Osada Takeshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Multiplicity-dependent saturation momentum in p-Pb collisions at 5.02 TeV	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.103.024911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長田 剛
2. 発表標題 高エネルギー陽子・陽子および陽子・鉛衝突における飽和運動量の多重度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長田 剛
2. 発表標題 陽子・鉛衝突における飽和運動量の多重度依存
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------