

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 13 日現在

機関番号：32685

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740175

研究課題名（和文） 有限エネルギー和則を用いたハドロン前方散乱振幅の決定

研究課題名（英文） Determination of Forward Amplitudes of Hadron-Hadron Scatterings by Finite Energy Sum Rule.

研究代表者

石田 宗之 (ISHIDA MUNYUKI)

明星大学・理工学部・准教授

研究者番号：80366913

研究成果の概要（和文）：超高エネルギー散乱の全断面積が重心エネルギーの対数の自乗で増加しその係数があらゆる種類のハドロンの散乱で同一の値になる普遍性が確認された。係数の値 0.3mb は強い相互作用から予想される自然な大きさであり、この事実は新しい解釈での散乱のユニタリティー限界の Saturation を示唆するもので、1960 年の Froissart-Martin の解釈を修正する大きな成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：We have confirmed that the rise of the Hadron-Hadron total cross sections is described by the log squared of center of mass energy with the universal coefficient in all hadron systems. The size of the coefficient, 0.3mb, is naturally expected from the size of strong interaction, and this fact suggests that the unitarity limit of scattering amplitude is saturated in the new interpretation. This is a major progress since the Froissart unitarity bound was established in 1960.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	400,000	120,000	520,000
2012 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：散乱全断面積

1. 研究開始当初の背景

ハドロン-ハドロン全散乱断面積は散乱のもっとも基本的な物理量であるが、その超高エネルギー領域での振る舞いはよくわかっていなかった。ユニタリティー（確率の保存）の制限からこれが重心エネルギーの対数の自乗以下に抑制されることはわかっていたが、その係数は π 中間子交換の Dominance が仮定された大きな値（Froissart 限界）し

か知られていなかった。近年この係数があらゆる種類のハドロン散乱で同一の値をとるという普遍性(Universality)が成立することが、カラーグラス凝縮の議論等から推測されその妥当性を検討することが課題となった。

2. 研究の目的

この超高エネルギー散乱全断面積の増加（対数自乗係数 B）の普遍性を全く予見なく

実験データのみを用いて客観的に確認する。そして、あらゆるハドロンの前方散乱振幅の中間エネルギー領域まで有効な公式を作る方法を与える。

3. 研究の方法

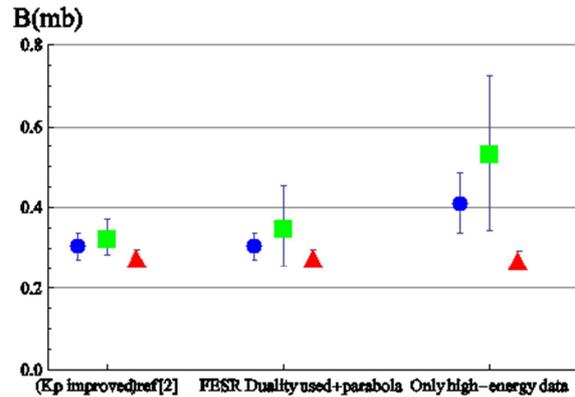
豊富な低エネルギー散乱のデータを用いれば、双対性を用いて、散乱振幅の高エネルギーでの振る舞いに強い制限を与えることができる。我々は有限エネルギー和則を用いて陽子陽子、陽子反陽子、 πp 、 $K p$ 散乱の全断面積、および ρ 比の解析を行った。

4. 研究成果

有限エネルギー和則を用いて低エネルギー散乱の情報を高エネルギー散乱のパラメータ間の拘束条件としてとりこんだ結果、 $\pi\pi$ 散乱、 $p p$ 散乱では対数自乗係数 B の一致が誤差 1σ 以内で確認されていた。 $K p$ 散乱の増加の B 係数もこの値と無矛盾となる結果が得られていたが、不定性が大きく確かな結論を得るには至らなかった。 $K p$ 散乱には非物理的領域の不定性の問題があり、低エネルギー散乱の豊富な実験結果を取り込むことが出来ない問題があった。これは見えない $\Lambda(1405)$ 共鳴の問題として古くから知られていた。

この問題を解決すべく Wisconsin 州立大 Madison 校の Barger 教授と共同研究を行った。非物理的領域の巨大な $\Lambda(1405)$ 共鳴の寄与は他のチャンネルの解析から K 行列法を用いて確からしく決められており、その結果をそのまま用いることで閾値からの $K p$ 散乱のデータをそのまま解析に用いることができるようになった。

この結果得られた有限エネルギー和則を用いて決定した B 係数の値を以下の図に示す。赤が $pp, p\bar{p}$ 散乱、緑が $K p$ 散乱、青が $\pi\pi$ 散乱の B 係数の値であり、一番右が高エネルギーデータのみを用いてフィットした場合、真中が有限エネルギー和則を用いた当初の解析結果、一番左が $K p$ について改善した本研究の結果である。



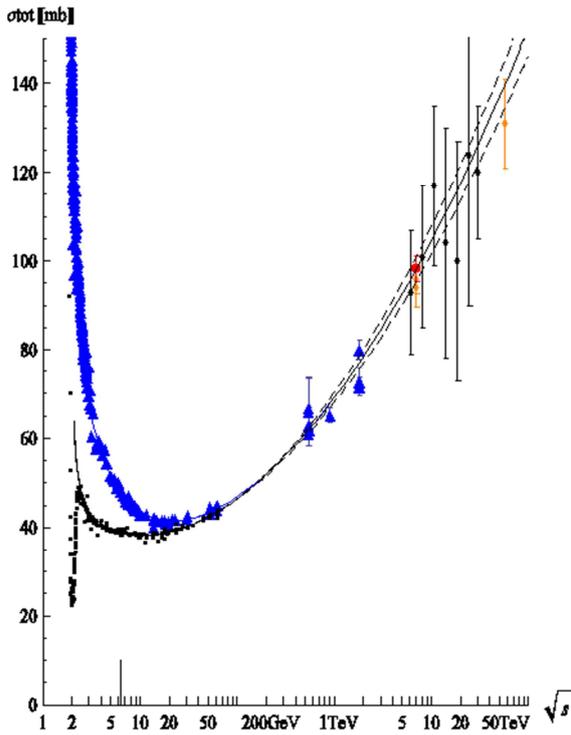
本研究での成果である緑の値の改善は目覚ましい。

対数自乗の係数 B の値は 3 つのプロセスで独立なフリーパラメータとしてフィットしたにもかかわらず、結果は誤差 1 シグマ以内で三つの値が一致した。このことは中間子、バリオンを問わず、あらゆるハロン散乱で普遍性が成立することを強く示唆している。

決定された超高エネルギー領域での前方散乱振幅の B 係数の値から $p p$ 全散乱断面積の値を予言することが出来る。予言値は欧州 Large Hadron Collider (LHC) の TOTEM グループによる全断面積の測定によって直接検証される。

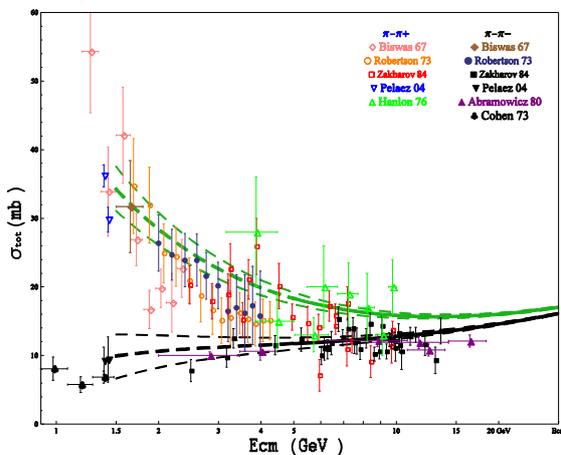
我々の予言した対数自乗係数の値は最新の欧州 Large Hadron Collider の TOTEM グループの実験や、超高エネルギー宇宙線 (Auger) の結果と一致した。2011 年夏に報告された TOTEM の結果は我々の予言と無矛盾であり、これは超高エネルギー散乱振幅の普遍性に対する有力な証拠を与えるものとなった。

逆に普遍性を仮定し、TOTEM の結果と併せて、 B 係数を可能なすべてのプロセスを用いて精密に決定することが出来る。結果を図に示す。図は横軸が重心エネルギーであり、青が $p\bar{p}$ 、黒が pp 散乱の全断面積を与える。エネルギー 7 TeV の赤とオレンジの点が TOTEM を含む LHC の結果であり、一番右のオレンジが Auger による超高エネルギー宇宙線の実験結果である。



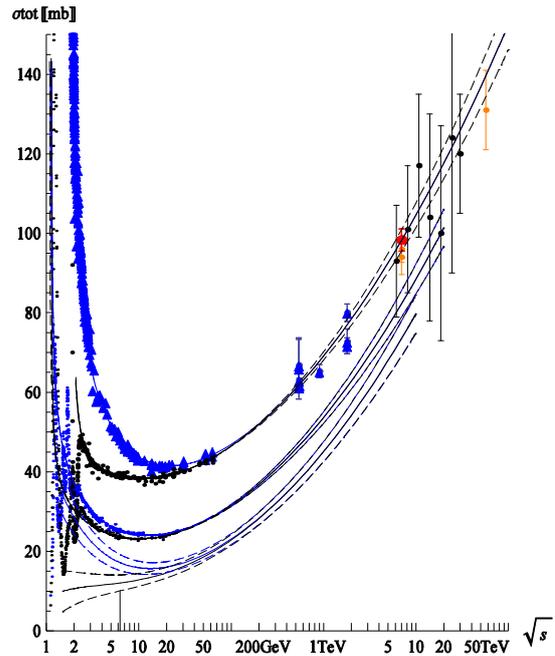
解析の結果は実験データをよく再現していることがわかる。

この普遍性と従来の Regge 理論を組み合わせると、中間エネルギー領域から有効な前方散乱振幅の形が決定できる。Reggeon 交換振幅の結合定数が因子化されるという伝統的な手法を用いて、他のプロセスの結合定数の値から、あらゆる種類のハドロン散乱で Regge 結合の値が予言される。これに普遍的な対数自乗振幅を加えればよい。この仮定に基づいて $\pi\pi$ 前方散乱振幅の形を決め、全断面積の予言を行った。あらゆる実験データを集め、比較検討したのが次の図である。



図に示すように実験結果は大きな誤差を含むが、我々のフリーパラメータを含まない予言は実験結果とほぼ一致し、ここで示した方法が基本的に正しいことが確認された。すなわち、本研究の成果により中間エネルギー以上の領域であらゆる種類のハドロン散乱の全断面積を精度よく予言する方法が確立された。

決定された $p p$ 、 πp 、 $\pi\pi$ 散乱の全断面積の振る舞いを重ねて一枚の図に示したのが次の図である。



上から順に $p\bar{p}/pp$ 、 πp 、 $\pi\pi$ 散乱の全断面積の予言を示す。全断面積は中間エネルギー領域で最少値を示し、その値の比はおよそ、9対6対4になる。これはクォーク模型が予言する比率に一致する。それに対し、高エネルギーでの上昇はすべてのプロセスで共通であり、対数自乗係数 $B=0.3$ mb によって決定される。これは超高エネルギーでは散乱がハドロン内のグルーオン成分どうしによるグルーオン-グルーオン散乱によって共通に起こっていることを示唆していると考えられる。このように高エネルギー散乱について非常に簡単な描像が得られた。

以上の結果の重要性はこの分野の研究者に広く認識され、最新版(2013年) Particle Data Group 発行の Review of Particle Properties における解説記事「Plots of Cross Sections and Related Topics」第9ページには全引用文献14編のうち我々の4編の論文が引用されている。

とくに対数自乗係数の値はハドロン相互作用の典型的なスケールである1 GeVから自然に予言される0.4mbに極めて近いおよそ0.3mbであり、新しい解釈でのユニタリティー限界のSaturationが示されたことになる。これはこの分野では1960年のFroissartのユニタリティー限界の確立以来の大きな進歩である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

- ① F. Halzen, K. Igi, 石田宗之, C. S. Kim, "Total Hadronic Cross Sections and ppi Scattering," 査読有、Physical Review D 85, 2012年 74020.
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.099902,
10.1103/PhysRevD.85.074020
- ② 石田宗之, V. Barger, "Rise of Kp Total Cross Section and Universality," 査読有、Physical Review D 84, 2011 014027.
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.014027
- ③ 石田宗之、猪木慶治 "Test of Universal Rise of Hadronic Total Cross Sections Based on pip, Kp, pbarp and pp Scatterings"
Progress of Theoretical Physics Supplement (Proc. Of HESI2010 Ed. By Itakura et al) 査読有、187巻 2010年 pp. 297-304

[学会発表] (計 1件)

- ① 石田宗之 "Test of universal rise of hadronic total cross sections based on pip, Kp and anti-pp and pp scatterings"
2010年8月13日「High Energy Strong Interaction(HESI2010)」、京都大学基礎物理学研究所

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石田 宗之 (ISHIDA MUNYUKI)
明星大学・理工学部・准教授
研究者番号：80366913

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：