

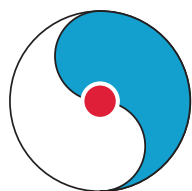
核子重如牛對撞產生新態
李政道



Li Keran

Nuclei as heavy as bulls
Through collision
Generate new states of matter.
T.D. Lee

©CASTA



RBRC

RIKEN BNL Research Center

理研BNL研究センター

ビッグバン

私たちの宇宙は、今から約130億年前におこった宇宙創生の大爆発ビッグバンから始まったといわれています。ビッグバン直後の宇宙の温度は、約1兆度Kという超高温でした(太陽の表面温度は約6000度K)。現在の宇宙の温度は、3度Kになっています。ビッグバンのあと温度が下がっていく過程では、まずクォークや電子が形成され、そのクォークから陽子や中性子が形成されました。そしてさらに、軽い原子核、軽い原子が形成され、星々(恒星)が誕生したのです。その後超新星の爆発などによって、地球などの惑星を形成する重い原子核と重い原子が生成されて来ました。ビッグバンから100億年も経ってから私たちの地球は誕生し、そしてさらに長い時間を経て現在の我々が存在しているということになります。

では、ビッグバン直後の世界でこのような物質が形成されていく過程では、実際にどのようなことが起こっていたのでしょうか？

理研BNL研究センター(RBRC)は、この現代基礎物理学の究極のテーマである「宇宙、物質の起源の謎」に迫ります。

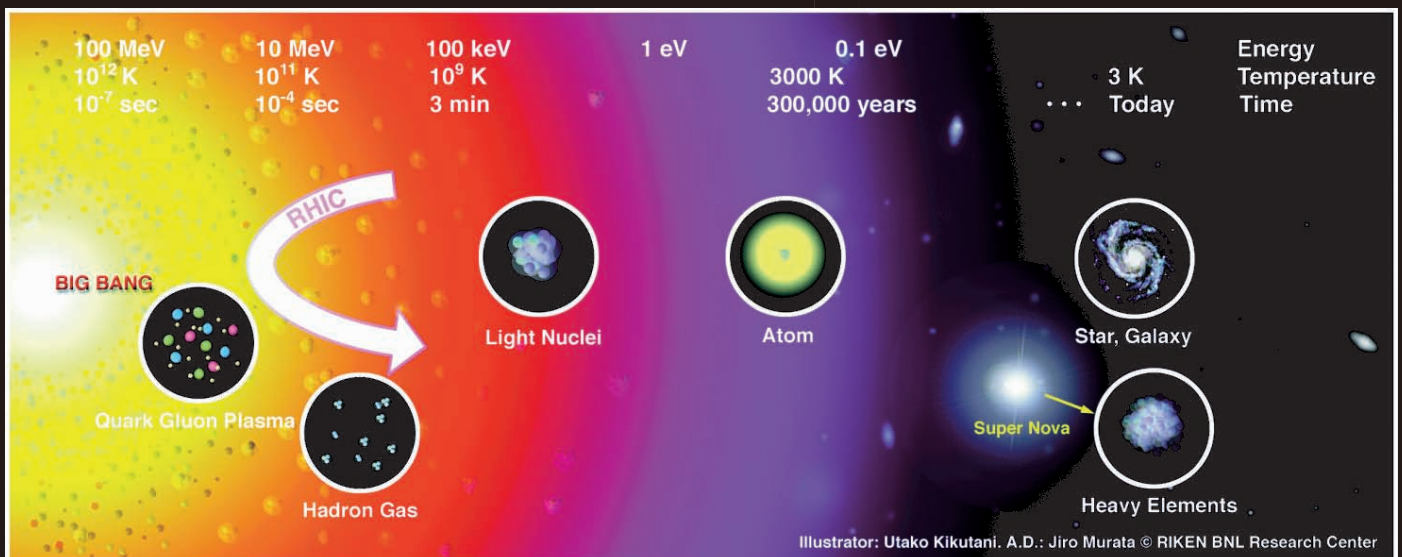
Big Bang

Physicists believe that our universe began with a huge explosion about thirteen billion years ago, called the Big Bang.

Immediately after, the temperature is believed to have been approximately one trillion degrees K, which can be compared to the temperature at the surface of our sun, approximately six thousand degrees K. Currently, the temperature of the universe is three degrees K. During the cooling period, after the Big Bang explosion, quarks and electrons were formed, followed by protons and neutrons from the quarks, then light atomic nuclei and light atoms. Stars formed later which then, in novas and the explosions of stars called supernovas, led to heavier nuclei and atoms. Our Earth was formed approximately ten billion years after the Big Bang. We are here now, long after these events.

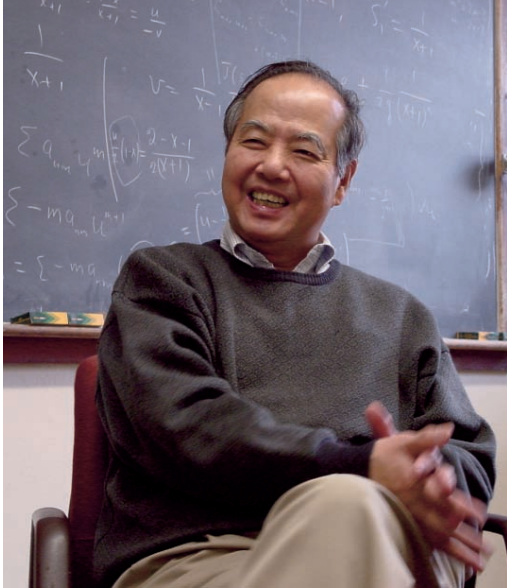
How was matter formed after the Big Bang?

We at the RIKEN BNL Research Center (RBRC) are pursuing this ultimate theme of modern fundamental physics to understand the origin of matter and the universe.



21世紀の新しい物理を切り拓く理研BNL研究センター

RIKEN BNL Research Center, where new studies in physics for the 21st century are being pursued



名誉センター長（理化学研究所顧問） 李 政道

コロンビア大学名誉教授。

1957年「パリティの非保存に関する研究」によりノーベル物理学賞を受賞。

Director Emeritus Tsung-Dao Lee

Emeritus Professor at Columbia University. Nobel laureate in physics (1957) for his study of “Parity Violation.”

理研BNL研究センター（RBRC）では、「スピン物理」、「格子QCD（量子色力学）計算物理」、「クォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）の物理」の3つのテーマを中心にして、理論研究と実験研究の密接な連携により21世紀の新しい物理を切り拓くことを目指して研究を進めています。

20世紀の物理は、“Reductionism＝還元主義”が主流でした。私たちは物質の最小単位である究極の粒子を見つけることによって、自然に広い世界が理解できると信じていたのです。この還元主義の考え方は、量子論の確立によって、驚くほど高精度の理論予測を可能にし、その予測は後に正確な実験計測によって確認されました。還元主義は私たちに、物質が6種類のクォークと6種類のレプトンからなる12の素粒子によって出来ていることを発見させてくれたのです。ところが、20世紀の後半に、私たちは2つの重大なパズルに行き当たってしまいました。ひとつは、6種類のクォークがいずれも単独で観測されていないという事。そしてもうひとつは、私たちの理論は物質の対称性に基づいているにもかかわらず、実験計測では“対称性の破れ”を発見してしまうという矛盾です。これら2つのパズルは、私たちに新しい物理の方向を考える契機を与えてくれました。

私は、21世紀の物理はホーリズム（Holism＝“総合主義”）が主流になると考えています。これは小さな世界を理解するためには大きな世界を理解しなくてはならないという考え方です。なぜクォークが単独で観測されないのかを理解するために、私たちは真空中におけるクォークの“閉じ込め”の構造を探求しなくてはなりませんし、私達の理論の持つ基本的な対称性と現在の宇宙における非対称性との関連を理解するためには、一見完全な対称であった宇宙の始まり（ビッグバン）から非対称の状態である現在の宇宙までの、宇宙全体の対称性の変移を厳密に調べなくてはなりません。それゆえに、素粒子の研究は広い世界のマクロなシステムの研究と切り離すことができないのです。RHICは物質の新しい状態を作り出し、真空の構造を探求するためにデザインされた世界初の高エネルギー加速器です。RBRCの研究はこのような新しい物理の方向にその目標を集中しています。

20世紀の物理がそうであったように、科学の進歩はいつの時も若い研究者によって実現されて来ました。アルバート・アインシュタインは特殊相対性理論を20代で完成させ、一般相対性理論を発表したのは35歳でしたし、ニールス・ボーアが原子の量子力学的モデルを発表したのは27歳の時でした。また、量子力学をさらに一歩進めたのは、ワーナー・ハイゼンベルグやポール・ディラック、エンリコ・フェルミ、仁科芳雄など次の世代の若者であったし、1930年代から40年代にかけて原子核物理学や量子力学の中心的な問題を解いたのも、若い湯川秀樹や朝永振一郎らでした。

いつの時代でも、シニアな研究者が重要な役割を担っている事はもちろんですが、よりチャレンジングでより重要な問題は若い人たちによって解かれて来たのです。またそのような人たちは、突然、現れるのではなく、二、三の重要な研究所に集中的に現れています。ニールスボーア研究所、理化学研究所、プリンストン高等研究所やコロンビア大学などがその例としてあげることが出来ます。

RBRCは、若い才能ある科学者を世界中から集結し、若いエネルギーをすべて新しい研究に集中できるような素晴らしい環境を整えて、21世紀の新しい物理を切り拓く拠点となることを目指しています。

At the RIKEN BNL Research Center (RBRC) our research focus is on "Spin physics," "Lattice QCD (Quantum Chromodynamics) computational physics" and "QGP (Quark-Gluon-Plasma) physics." The goal is to establish a new field of physics for the 21st century by closely coordinating our theoretical and experimental research efforts.

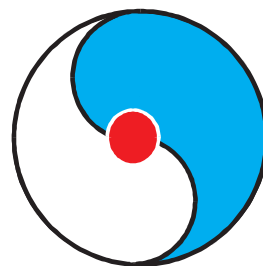
In the 20th century, physics was dominated by "reductionism." We believed by finding the smallest unit of matter, the understanding of the large would naturally follow. This belief in reductionism, aided by the success of quantum theory, made it possible for us to achieve extraordinary precision in theoretical predictions, which are in turn confirmed by accurate measurements. This led us to discover that all known matter is made of 12 elementary particles, 6 quarks and 6 leptons. However, in the second half of the last century we encountered two serious puzzles; one is our inability to observe any of the 6 quarks individually, and the other is the dichotomy between the concept of symmetry that our theory is based upon and the violation of symmetry observed by experiments. These two puzzles brought us to a threshold of a new direction.

I think the physics in the 21st century will be dominated by "Holism." The understanding of the small cannot be separated from the examination of the large. To understand why quarks cannot be seen individually we must explore the confinement mechanism of the physical vacuum state. To connect the symmetry violations of our present universe with the fundamental symmetry principles in our theory, we must again probe the evolution of symmetry change of the entire universe, from a seemingly perfect symmetrical beginning (big bang) to the present asymmetrical state. Thus the study of elementary particles cannot be separated from the macroscopic system at large. RHIC is the first high energy accelerator designed to explore the structure of the physical vacuum as well as possible forms of new states of matter. The research effort at RBRC is concentrated on this new direction of physics.

As the history of 20th century physics indicates, scientific progress has always been made by younger researchers. Albert Einstein was in his 20's when he published his special theory of relativity and began his quest for the general theory of relativity. Niels Bohr was 27 when he introduced the quantization rule of atomic orbits. Quantum mechanics was created by young scientists of the next generation including Werner Heisenberg, Paul Dirac, Enrico Fermi, and Yoshio Nishina. During the 1930's and 1940's, young Hideki Yukawa and Shinichiro Tomonaga were among those who solved major problems of nuclear physics and quantum electrodynamics.

At any given period, the older generation is, of course, playing a significant role. However, more challenging and more important problems have always been solved by the younger researchers. Such talent does not appear suddenly. We see concentration of such talents at a few selective centers such as the Niels Bohr Institute, RIKEN, the Institute for Advanced Study in Princeton, and Columbia University.

At RBRC, we provide a special environment dedicated to talented young scientists from around the world, so that they can concentrate their energy on their research. Our goal is to become a facility where a new field of physics for the 21st century will be developed.



李 道 通

T.D. Lee

理研BNL研究センターのロゴについて

理研BNL研究センターのロゴは、T. D. Lee名誉センター長がデザインしました。

中央の赤い丸は日本を表し、赤青白の3色でアメリカの国旗をもイメージしています。青と白の模様は、老子の思想による「太極（タイチー）」を意味し、宇宙の万物が持つ2元性（例えば陰と陽）を表しています。ここでは、青と白のタイチーにより第3の新しいもの（赤い丸）が創り出され、さらにこれら3つのものが三位一体となって無限に新しい物を創り出していくという精神が表されていて、RBRCの目標である新しい物理を次々に創出するということに通じています。

RIKEN BNL Research Center Logo

This logo was designed by Director Emeritus T. D. Lee.

The red sun is the emblem of Japan, and the colors of the American flag are red, white and blue. The red center in the new design represents unity, the one. The blue and white denote the duality, which is the two called Tai Chi. Together, they form the trinity which is the three. From the three, all else follows. The concept and the aim of the RBRC are harmony with Lao Tse's philosophy.

名誉センター長 **Nicholas P. Samios**

元ブルックヘブン国立研究所(BNL)所長

Director Emeritus **Nicholas P. Samios**

Former Director of Brookhaven National Laboratory (BNL)



理研BNL研究センター(RBRC)の研究活動はいまや成熟の段階にあります。優れた理論・実験研究者を集め、最先端のコンピュータ環境とブルックヘブン国立研究所の傑出した研究施設に囲まれ、RBRCは活気にあふれた歩みを続け、数多くの成果を輩出してきました。RBRCのメンバーはRHICにおける偉大な発見に貢献しました。その最たるものは、新しい物質相、強く結合したクォーク・グルーオン・プラズマ (sQGP) に関連していると思われる高エネルギー密度(核子系の10倍から30倍)状態の発見です。

RBRCの研究活動をより強化するために、装置の大規模な改善を近いうちに行う予定です。RHICの光度改善、200GeVの偏極プロトンと同様に500GeVでの相当量の検出、検出器の様々な改良、低エネルギー (10GeV/Am) の重イオンでの実験などです。これらの改善を行うことで、sQGPの詳細な検証や、プロトンスピンの研究の深化、臨界点の探索の開始、核子の中における反クォークの分布状況の検出が、可能になります。RHICでの重イオンプログラムで蓄積してきたデータは、カラーガラス凝縮やグラスマなどの興味深い理論的予測に繋がっています。これら期待されるデータをさらに蓄積することで、理論の妥当性をより明らかにすることができそうです。

また理研の10テラ・フロップスのQCDOCコンピューターは、2006年以来95%以上の効率で稼動しています。このコンピューターは、格子上における非摂動論的量子色力学 (QCD)の計算を効率よく実行することができます。相転移や臨界点を含むQCDの熱力学やハドロンとクォークメソン、弱い崩壊におけるCKM行列、陽子崩壊などの多くの重要な結果を導いてきました。

以上のように、RBRCは多様で豊かな研究プログラムと、若く卓越したフェロー・研究者を擁しており、今後とも多くの優れた研究成果を生み出していくでしょう。

The RIKEN BNL Research Center (RBRC) is now a mature enterprise. Its complement of outstanding theoretical and experimental physicists, forefront computer capabilities and proximity to the extraordinary facilities at BNL, has assured its vibrancy, relevance and productivity. RBRC personnel have contributed to the great discoveries at RHIC, the foremost being the finding of a new form of matter, a hot highly dense medium (10 – 30 times that of a nucleon) that seems to have the characteristics of a strongly interacting quark gluon plasma sQGP. Of almost equal significance has been the demonstration that the gluon contribution to the spin of the proton is very small, consistent with zero, adding to the puzzle of the origin of its spin.

There are several major upgrades that are forthcoming in the next years that should serve to greatly enhance the RBRC program. These include: a luminosity upgrade of RHIC, appreciable running at 500 GeV as well as 200 GeV polarized protons, numerous detector additions, and low energy (10 GeV/Am) heavy ion running. This should allow for a detailed examination of the sQGP, continued exploration of the proton spin, initiate a search for the critical point, and a measurement of the anti-quark distribution of the nucleon. The present data accumulated in the heavy ion program at RHIC has given rise to several interesting theoretical conjectures namely that of a color glass condensate and a glasma. The expected substantial increase in information should greatly clarify their validity.

The RIKEN 10 Teraflop, QCDOC computer, dedicated in 2006, has been operating at greater than 95% efficiency. This has facilitated calculations in non-Perturbative Quantum Chromodynamics (QCD) on a lattice. Important results have emerged on a variety of issues, including the thermodynamics of QCD (phase transitions and critical point) hadron and quark mesons, the CKM matrix in weak decays, and proton decay.

With such a rich and varied program and a group of young and outstanding fellows and postdocs, RBRC can look forward to an exciting and productive future.

Nicholas P. Samios

センター長 **Samuel H. Aronson**

元ブルックヘブン国立研究所(BNL)所長

Director **Samuel H. Aronson**

Former Director of Brookhaven National Laboratory (BNL)



RBRCには、明るい未来が開かれています。相対論的重イオン衝突型加速器RHICや最新の高性能計算機から物理学の新しい成果が次々に導きだされることが期待され、新たな研究目標が加わる可能性もあります。RBRCは優秀な理論及び実験物理学者を引き寄せ続けています。彼らこそがRBRCを活気づけ、その存在意義と学問的生産性の源となっているのです。RBRCの研究者はRHICで新しい現象の(実験的)発見と(理論的)解釈、そして(計算)シミュレーションに主導的な貢献を果たしています。このように学問的生産性が高くあり続けているのは次のような重要な改良が行われたからです。

加速器： RHIC-IIにおけるスピン物理

・RHICのRun 13が終了し、RHIC II時代は実験2年目迎えました。いくつかの重要な改良がなされた結果、RHICでは255 GeVのビームエネルギーの偏極陽子を、記録的な強度と偏極度で走らせることが可能になりました。これらの改良とは、ビーム相互の擾乱効果を相殺する二つの新しい電子レンズ(eレンズ)や、RHIC加速器とAGS加速器のRF改良などです。

検出器： PHENIX実験でのRun 13

・PHENIX実験は、スピン物理プログラムのための高エネルギーで高偏極p-p衝突データを大量に蓄積するというRun 13における主要目的を達成しました。

・RHIC IIの性能を最大限に活用するため、s-PHENIXの設計開発が進行中です。

格子ゲージ計算: 本センターでは、新たに導入・稼働したQCDOC：新型IBMのBlue Gene/Qスーパーコンピューターをフルに活用しています。

・ハドロンの質量や崩壊定数のような量子色力学QCDの基礎的な物理量を、これまでにない正確さで算出しました。これらはCP対称性を破る中性K中間子の混合パラメータ ϵ'/ϵ を含んでいます。この成果に対して、2012年度のケン・ウィルソン格子賞が与えられました。

・QCD熱力学については、RHICにとって重要な有限 T/μ での相移転が、カイラル対称性の回復を見るためにカイフェルミ粒子を使って計算されています。これらの計算結果の多くは、軽いクォークの質量をその現実世界での値に近い値を使って初めて計算したものです。

今後のRBRCは、e-RHICの研究をさまざまな側面から行います。そして関連分野、特に宇宙物理学への研究機会の拡大の可能性を理研とBNLともに探って行きます。今年、理研の天体物理学グループの博士研究員がBNLの宇宙物理学グループと共に大型全天総観望遠鏡LSSTの研究を本センターで開始することになるでしょう。

RBRC has a very bright future, with the prospect of continuing new physics results from RHIC, from new high performance computing capabilities and the possibility of an expanded set of research goals. RBRC continues to attract outstanding theoretical and experimental physicists and they are the basis of RBRC's vibrancy, relevance and productivity.

RBRC personnel are making leading contributions to the discovery, interpretation and simulation of new phenomena at RHIC. The continued productivity is due to important performance improvements:

Accelerators: Spin Physics at RHIC-II –

•The recently completed RHIC Run 13 marks the second year of running in the “RHIC II” era. Several important upgrades enabled RHIC to run polarized protons at 255 GeV beam energy at record intensity and polarization, including two new electron lenses to compensate beam-beam effects (e-lenses), a new polarized proton source and several RF upgrades in RHIC and the AGS.

Detectors: Run 13 at PHENIX –

•PHENIX achieved its Run 13 goals of accumulating a large data set of high energy, high polarization p-p collisions for the spin program.

•Progress continued in the design and development of s-PHENIX for full exploitation of RHIC-II capabilities.

Lattice Gauge Computing: QCDOC: RBRC is taking advantage of new IBM Blue Gene/Q computers now operational at BNL –

•Basic QCD quantities such as hadron masses and decay constants have been computed with unprecedented accuracy. These include CP violating neutral kaon mixing, ϵ'/ϵ , which resulted in the 2012 Ken Wilson Lattice Award.

•QCD thermodynamics: transitions at finite T/μ , relevant for RHIC, are computed using chiral fermions to see chiral symmetry restoration. Many of these results are now being produced for the first time with nearly physical light quark masses.

For the future, RBRC is working on aspects of e-RHIC and is exploring with RIKEN and BNL research opportunities in related fields – in particular cosmology. This year post docs from the RIKEN Astrophysics Group will start working at RBRC with BNL's Cosmology Group on LSST.

副センター長
Deputy Director
R. Pisarski



理研BNL研究センターでは、物理学の実験と理論の両面において、精力的な研究が行われています。

実験研究分野では、相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC)で、超相対論的エネルギーでの重イオン衝突、陽子・陽子衝突におけるスピン物理などの研究が行われており、将来的には計画中のe-RHIC実験で電子・原子核衝突の研究も始まる予定です。

格子ゲージ理論関連では、電弱相互作用の行列要素の計算等のハドロン物理学や量子色力学の熱力学的振る舞いの計算等の研究が精力的に行われています。

さらに、高エネルギー原子核物理学も非常に興味がある分野です。このなかには、グルーオン飽和とカラーグラス凝縮、重イオン衝突の現象学、転移温度付近でのクォーク・グルーオン・プラズマの性質、低温高密度クォーク物質、さらにAdS/CFT対応の応用等の研究も含まれています。

Research at the RIKEN BNL Research Center includes vigorous activities in both experimental and theoretical physics.

Experimental research includes studies at the Relativistic Heavy Ion Collider: the collisions of heavy ions at ultrarelativistic energies, spin physics in proton-proton collisions, and eventually into electron nucleus collisions at a proposed eRHIC facility.

There is a large and vigorous effort in Lattice Gauge Theory. This includes the study of hadronic physics, such as the computation of weak matrix elements, and computing the thermodynamic behavior of Quantum Chromodynamics.

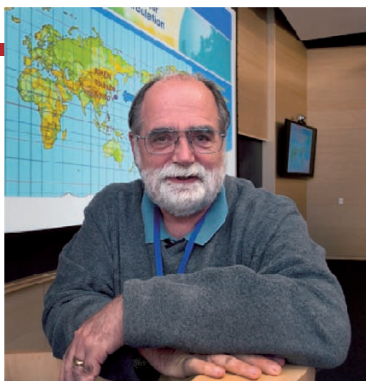
There is also a strong interest in the theory of High Energy Nuclear Physics, including: saturation and the Color Glass Condensate; the phenomenology of heavy ion collisions; the nature of the Quark Gluon Plasma near the transition temperature (the “semi” QGP); cold dense quark matter (“quarkyonic”); and applications of the AdS/CFT correspondence.

理論研究グループ

Theory Group

グループリーダー
Group Leader

L. McLerran



理論研究グループは、フェローと呼ばれる専任研究員やRHICフィジックスフェローと呼ばれる兼任研究員、そして若手常勤研究者からなる約20名の研究員で構成されています。このうちRHICフィジックスフェロー研究員は理研BNL研究センター (RBRC) と他の研究機関とのジョイントアポイントメントで、大学のテニユアトラック職またはBNLでの職を有しています。

理論研究グループの若手研究者たちは、BNLの理論グループの研究者のみならず、外部よりM.Gyulassy (コロンビア大)、E.Shuryak (ニューヨーク州立大)ら各教授を招聘し、密接な連携をとることにより研究を進めています。

理論研究グループが扱う研究分野は、RHIC重イオン物理、クォーク・グルーオン・プラズマ、カラーグラス凝縮そしてスピン物理をカバーしています。

The RIKEN BNL Research Center (RBRC) Theory Group currently consists of about twenty researchers. Positions include the following : full-time RBRC Fellow, half-time RHIC Physics Fellow, and full-time, post-doctoral Research Associate. The RHIC Physics Fellows hold joint appointments with RBRC and other institutions and have tenure track positions at their respective universities or BNL.

RBRC theorists interact closely with members of the BNL Nuclear Theory, High Energy Theory and Lattice Gauge Theory groups as well as with visiting senior theorists such as M. Gyulassy of Columbia, E. Shuryak of SUNY Stony Brook.

The broad range of QCD related research conducted by the Theory Group and discussed in what follows includes RHIC heavy ion physics, the quark gluon plasma, the color glass condensate, and hard QCD/spin physics.

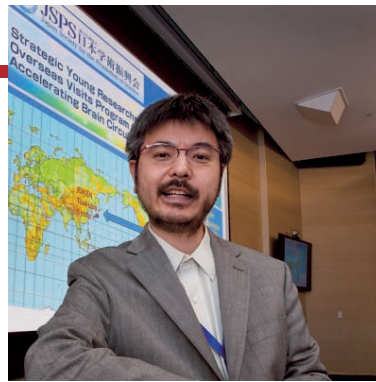
計算物理研究グループ

Computing Group

グループリーダー

Group Leader

T. Izubuchi



計算物理研究グループは2011年に理論研究グループから枝分かれした新しいグループで、専任フェロー研究員、兼任研究員、及び若手博士研究員より構成されています。グループはBNLの素粒子、原子核、格子ゲージの3つの理論グループと連携関係を持ち、さらに日本、米国、英国の大学・研究機関との緊密な共同研究を行っています。外部の招聘研究者にはN. Christ, R. Mawhinney (コロンビア大), T. Blum (コネチカット大), Y. Aoki (名古屋大)がいます。

グループの主なミッションは第一原理に基づいた格子シミュレーションを通じて量子色力学などの強い相互作用のダイナミクスを解くことで、素粒子・原子核物理の様々な実験結果の解釈に欠かすことの出来ない計算結果を与えることです。そのために、QCDCQ (1997-2004), QCDOC (2004-2012), and QCDCQ(2012-) というインハウスのQCD専用計算機を3世代にわたって設置しています。

The RBRC Computing Group was bifurcated from the Theory Group in 2011, and consists of a full-time RBRC Fellow, half-time RHIC Physics Fellows, and full-time post-doctoral Research Associates. It has close interactions with BNL High Energy Theory groups, Nuclear Theory, and Lattice Gauge theory groups as well as collaborations with Japanese, U.S., U.K. Universities and Laboratories with visiting scientists such as N. Christ and R. Mawhinney of Columbia, T. Blum of Connecticut, and Y. Aoki of Naogoya.

The main mission of the group is to solve dynamics of QCD and alike from the first principle lattice simulation and to provide important numerical information which is indispensable in interpreting experimental data by theories of particle and nuclear physics. It has three generations of in-house computer resources, QCDCQ (1997-2004), QCDOC (2004-2012), and QCDCQ(2012-).

実験研究グループ

Experimental Group

グループリーダー

Group Leader

Y. Akiba



実験研究グループは、フェロー研究員や大学と兼任のRHIC フィジックスフェロー、若手常勤研究員、そして理研研究員と理研若手研究員からなる約15名の研究員によって構成されています。さらに、これらのRBRC研究員による指導のもと、数名の日本人大学院生が実験に参加しています。

実験研究グループは、RHICの偏極陽子衝突により陽子のスピン構造の研究を行い、またRHICの重イオン衝突で作られるクォーク・グルーオン・プラズマの性質を研究しています。私達はPHENIX実験の各種検出器の開発するとともに、陽子の偏極度を測定する方法を開発しています。



副グループリーダー

Deputy Group Leader

A. Deshpande

The RBRC Experimental Group currently consists of about fifteen researchers. Positions include the following : full-time RBRC Fellow, RHIC Physics Fellow (joint position with the University), and full-time, post-doctoral Research Associate. At the Center there are also RIKEN Researchers and Research Associates. These positions are joint appointments of RBRC and RIKEN. In addition, several doctoral students from Japan are mentored by RBRC researchers.

The Experimental Group studies the spin structure of proton via polarize p+p collisions at RHIC and the properties of quark gluon plasma produced in heavy ion collisions at RHIC. We also develop various detectors for PHENIX experiment as well as polarimeters for RHIC.

物質の根源を探る指針: QCD(量子色力学)

QCD(Quantum Chromodynamics) for the search of the origin of matters

自然界には次の4つの力が存在しています。

天体の運動を司る「重力」は一般相対性理論により記述されます。原子は原子核と電子でできていますが、その間には「電磁気力」が働いています。また、原子核が壊れて電子が飛び出すβ崩壊は「弱い力」によって引き起こされます。この2つの力は電弱理論として統一的に記述されています。そして陽子や中性子を構成するクォークやグルーオンの間で作用している「強い力」です。

このうち理研BNL研究センター(RBRC)の研究対象は「強い力」によって起こる様々な現象で、それはビッグバン直後の物質創生過程をも含む多彩な現象です。この「強い力」はQCD(量子色力学)という理論によって記述されます。RBRCはこの「強い力」によって生ずる様々な物理現象を、QCDのレベルから解明することを目的として研究を進めています。

物質を形成する原子の中心にあるのは原子核です。そしてその原子核を構成するのは核子(陽子や中性子)と呼ばれる粒子です。さらに、この核子はクォークとそれらを結びつける糊の役目をするグルーオンによって構成されています。通常の真空中では、クォークやグルーオンは強い力によって結びついていて、核子の中に「閉じ込め」られた状態で安定しています。

この「強い力」は非常に不思議で多彩な性質を持っています。クォーク同士の距離が長い程強くなり短いほど弱くなるという「漸近的自由性」(D.J. Gross, H.D. Politzer, F. Wilczek 2004年ノーベル賞)は、本研究センター名誉所長李政道が楊振寧と共に予言した「パリティ対称性の破れ」(1957年ノーベル賞, 7頁参照)と共に現代の素粒子、原子核物理の基礎を切り開きました。

質量の起源を解き明かす南部陽一郎の「自発的対称性の破れ」(2008年ノーベル賞, 8頁参照)及び重力をも含む究極の基礎理論発見に大きな役割を果たしている小林誠、益川敏英による「荷電パリティ対称性の破れ」(2008年ノーベル賞, 9頁参照)と併せて、これらQCD(量子色力学)における「対称性の破れ」の研究は本研究センターの大きなテーマとなっています。

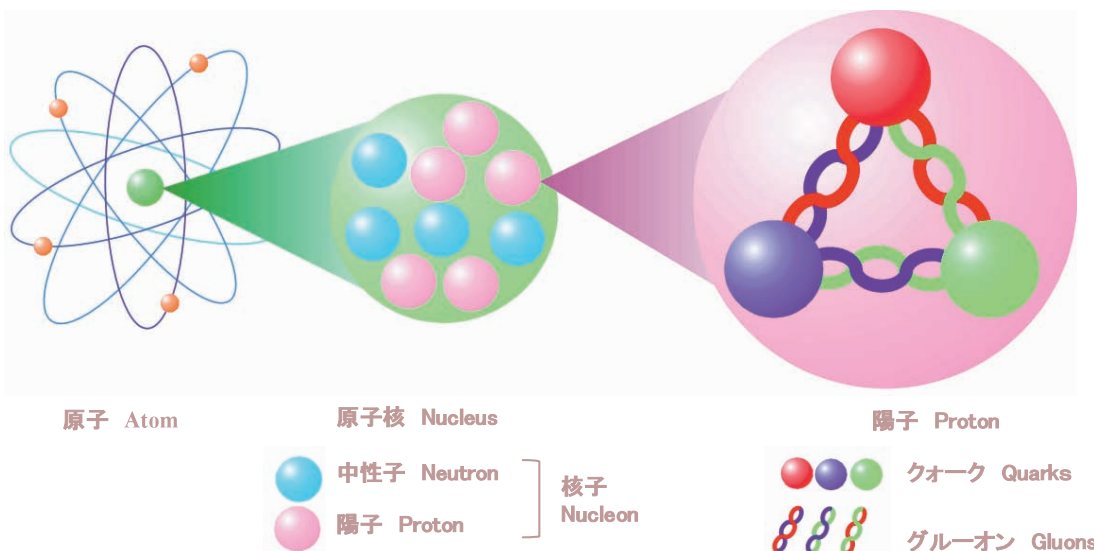
There are four types of forces in Nature: "Gravity" as seen in celestial motion and described by the general theory of relativity; "Electromagnetic Force" as seen in the interaction between the nucleus and electrons; "Weak Force" which describes the beta decay of a nucleus (the "Electromagnetic Force" and the "Weak Force" are unified into the electro weak theory); and the "Strong Force" that acts between the quarks and gluons that form protons and neutrons.

Our research effort at the RIKEN BNL Research Center (RBRC) focuses on a wide variety of phenomena caused by the "Strong Force." These various and complex phenomena include the matter-creating process after the Big Bang. This "Strong Force" is described through a theory called QCD (Quantum Chromodynamics). We at RBRC are pursuing our research projects in order to elucidate various physical phenomena brought by the "Strong Force" from the principles of QCD.

The nucleus is at the center of the atoms that form all matter. The nucleons (protons and neutrons) are the components of the nucleus. This nucleon consists of quarks and gluons, the function of the gluons is to be the glue that binds the quarks. In a normal vacuum, quarks and gluons are bound by the Strong Force and "confined" in the nucleon.

This Strong Force has many very interesting characters; Property called "asymptotic freedom" is that the force is relatively weak when quarks are close together, and becomes stronger and stronger when they are further and further apart, found by D.J. Gross, H.D. Politzer, and F. Wilczek (Nobel Prize in 2004). This property along with the prediction of "parity symmetry breaking" (Nobel Prize in 2008, see page 7) by T.D. Lee, the Director Emeritus of RBRC, with C.N. Yang, are two of the foundations of contemporary particle and nuclear physics.

Other prominent properties of Strong Force include "Spontaneous symmetry breaking" (Nobel Prize in 2008, see page 8) found by Y. Nambu, as well as M. Kobayashi and T. Maskawa's "Charge-Parity symmetry breaking" (Nobel Prize in 2008, see page 9), which plays essential roles in search for the ultimate law of physics comprising gravity. All of these "symmetry breakings" in QCD (Quantum Chromodynamics) continues to be the grand theme of researches conducted at RBRC.



スピン物理研究

Spin physics

陽子や中性子などの核子は何ら“方向”を持っていないように見えますが、核子にも“方向”はあります。それは自転という性質によって決まっています。この自転によって右と左を定義することが出来るのです。この核子の自転のことを「スピン」と呼んでいます。

自然界の法則は従来から右と左について対称だと信じられてきました。つまり鏡の中の世界を記述する物理法則と、我々の世界を記述する物理法則は同じであろうとされていたのです。

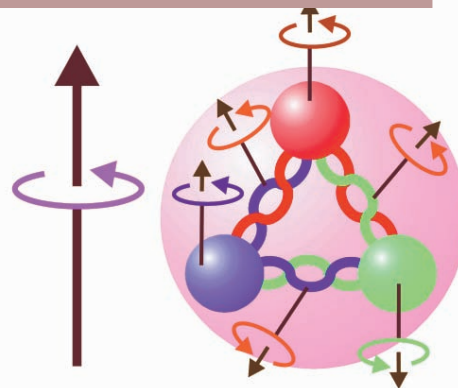
1956年に李 政道(理研BNL研究センター名誉センター長、コロンビア大名誉教授)と楊 振寧(ニューヨーク州立大・名誉教授)は鏡の中の世界は我々の世界とは違っている可能性があるという衝撃的な発言を発表しました。この発言は直ちに実験的に確認され、翌年にT.D.LeeとC.N.Yangはノーベル物理学賞を受賞しました。この実験では、鏡の中の世界と我々の世界とが違っていることを示すために、「右回転」と「左回転」というように逆の方向に「スピンしている」原子核が用いられたのです。

このようにスピンは空間のなかで、「左右」を決定する重要な役割をもっています。

核子は3つのクォークとそれらを結びつける糊の役目をする粒子グルーオンによって構成されていますが、核子の様々な性質はクォークのもつ性質によって説明されてきました。

例えば、陽子の電荷(+1)は2/3の電荷をもつアップ・クォークが2個と-1/3の電荷をもつダウン・クォークが1個が集まって合計+1の電荷になっていると説明されています。陽子のスピンも当然クォークのスピンによって説明できるものと信じてきました。しかし、1980年代の終わりに欧州素粒子原子核研究所CERNで行われた実験では、クォークのスピンを足しても陽子全体のスピンには足りないことがわかりました。このことは当時「スピンの危機」といわれ、大事件となりました。そのため、「足りない残りのスピンを何が担っているのか？」という謎を解明することが重要となります。

理研BNL研究センター(RBRC)のスピン物理研究では、摂動的QCD過程という精密な計算が可能なプロセスを利用します。厳密な理論的計算を進めるとともに、核子の構成要素それぞれのスピンからの寄与(偏極度)、特にグルーオン偏極度を実験によって測定し、核子構造のより詳細な理解を目指しています。



は、各物質の持つスピンについて、回転方向と回転軸の方向を表しています。

indicates the direction and rotation axis of the spin of each particle of matter.

Although protons and neutrons do not seem to have any “direction,” they actually do. The “direction” is determined by the rotation on its axis. We can define left and right by using this rotation. This rotation of an elementary particle is called “spin.”

Laws of nature had been believed to be symmetric with respect to “left” and “right.” In other words, the physical laws in the mirror world are thought to be the same as in our world.

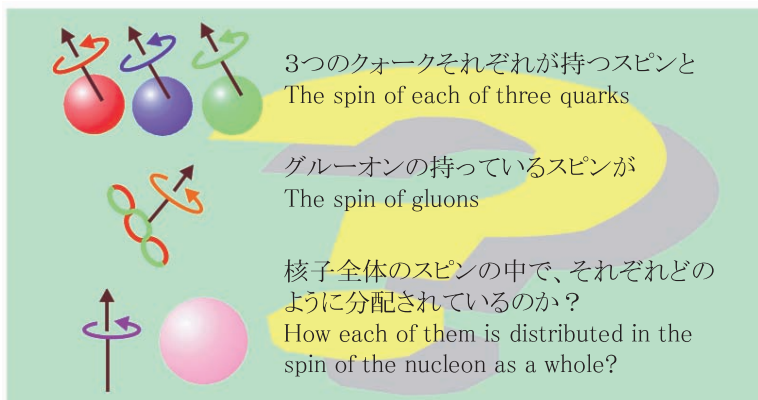
In 1956, Prof. T.D. Lee of Columbia University, the Director Emeritus of RIKEN BNL Research Center, published a shocking prediction of the possibility that the mirror world might be different from ours. This was immediately verified through experiments, and Prof. Lee was awarded the Nobel Prize in Physics the following year together with Prof. C.N. Yang of the State University of New York at Stony Brook. In this confirmation experiment, “spinning” nuclei were used to distinguish “left” and “right” in order to reveal that the mirror world is not the same as the world we live in.

As this example suggests, spin plays an important role in determining “left” and “right” in space.

The nucleon consists of three quarks and gluons which glue the quarks together. Various properties of the nucleon have been explained by the properties of quarks.

For example, a proton’s electric charge (+1) is explained by means of the sum of 2 up quarks with +2/3 of electric charge and 1 down quark with -1/3. It has been generally accepted that the proton’s spin could be naturally explained by quark spin. However, experiments conducted at the European Laboratory for Particle and Nuclear Physics (Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire, CERN) in the later 1980s showed that the total of quark spins was less than the total spins of protons. This was called “the proton spin crisis,” and was an event in modern particle and nuclear physics. Therefore, it is important to solve the puzzle of “What is carrying the remaining spin?”

Research on spin at the RIKEN BNL Research Center (RBRC) includes a theoretical computation process called Perturbative QCD by means of a reliable computing method. Also, RBRC’s researchers aim to experimentally measure the spins, especially those of gluons, so that they may achieve a more detailed understanding of the nucleon structure.



3つのクォークそれぞれが持つスピンと
The spin of each of three quarks

グルーオンの持っているスピンのが
The spin of gluons

核子全体のスピンの中で、それぞれの
ように分配されているのか？
How each of them is distributed in the
spin of the nucleon as a whole?

格子QCD計算物理研究

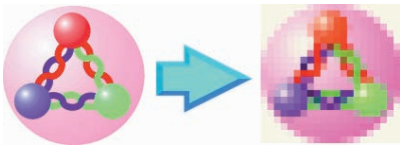
Lattice QCD computational physics

クォーク-グルオン間に働く力は、非常に強く複雑です。質量のないクォークの持つ「カイラル対称性」と呼ばれる対称性は、この強い力によって自然に破れることが知られており(「カイラル対称性の自発的破れ」: 南部陽一郎氏の2008年度ノーベル物理学賞の受賞理由)、クォーク-グルオンの複合粒子であるハドロン(陽子、中性子などの核子及び π 、 K などの中間子)が質量を獲得するなど、その性質に大きな影響を及ぼしています。

格子QCDは、この複雑な現象を基礎理論QCDに則って数値計算する手法です。「カイラル対称性の自発的破れ」のメカニズムを正しく数値計算で扱うためには、用いる格子理論にカイラル対称性があることが必須です。

長い間、実現不可能であると考えられていたカイラル対称性を持った格子理論は、1990年代後半に理論的理解が進み、当理研BNL研究センター(RBRC)において大規模数値計算により実行可能であることが初めて示されました。その代表的な理論形式が、ドメインウォールフェルミオン法(DWF)という格子QCD理論です。

理研BNL研究センター(RBRC)の格子QCDプロジェクトチームは、DWFを用いた格子QCDによる数値計算を開拓してきました。10年以上に渡る蓄積—専用スーパーコンピュータの構築から、計算アルゴリズムの改良など—により、様々なQCDにまつわる物理現象をQCDからの仮定のない(第一原理)計算により解明するという研究者達の長年の夢が実現されようとしています。



格子QCD計算上の核子(イメージ)連続無限の時空を格子上の点で近似する。

*The image of a nucleon on the lattice QCD computation.
The infinitely continuous time-space is approximated by dots on the lattice.*

格子QCD専用スーパーコンピュータ

格子QCDの数値計算にはこれまでその時点で世界最速クラスのスーパーコンピュータが使われてきています。RBRC格子QCDプロジェクトチームは、1998年にQCDSPP(QCD with DSP: 米コロンビア大学との共同)、2005年にQCDOC(QCD on a chip: 米コロンビア大学、IBMと共同)と、独自の格子QCD専用スーパーコンピュータを開発し利用してきました。

初代機QCDSPPの成功をうけ、設計、構築された QCDOCは最新のsystem-on-a-chip技術を用いて小型化、高速化が図られており、QCDSPPとほぼ同じ設置面積で約20倍の高速化を実現しています。

さらに同様な2つの主要システムが、米エネルギー省、英UKQCDによって導入され、我々の日米英共同研究に用いられています。

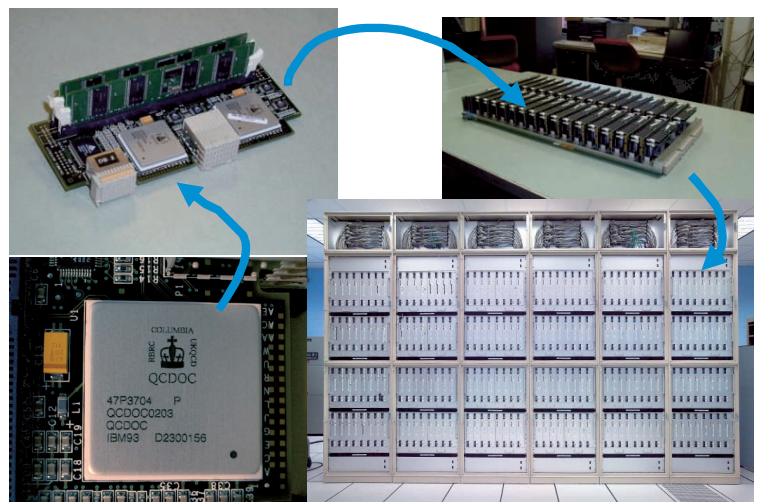
The interaction between quarks and gluons is very strong and complicated. Especially at low energy region, quarks interact so strongly that they involuntarily break a symmetry called “chiral symmetry” of massless quark. This spontaneously broken symmetry (Yoichiro Nambu was awarded the 2008 Nobel Prize for his discovery of it) largely manifests itself in various aspects of the proton and neutron, as well as mesons (pions, kaons), which are constituted from quarks and gluons. For example, the origin of the mass of proton could be understood as a consequence of the broken symmetry.

Lattice QCD is a theoretical method to investigate this complicated strong dynamics of QCD based on the first principles. In late 90's, RBRC researchers with others made a breakthrough in this area: realizing chiral symmetry on lattice using the domain-wall fermion (DWF) method, which turns out to be very useful to investigate QCD.

Since then, the lattice QCD project team at RBRC has been investigating QCD using DWF for more than ten years. Our studies, which are not only theoretical investigations on QCD but also include constructing high performance supercomputers specialized for QCD computations, or developments for better algorithms to accelerate calculations, are about to lead us to achieve solid understandings about various facets of QCD without any compromise.

QCDOC Supercomputer

Lattice QCD calculations have been performed on the world fastest supercomputers at the time of their installations. The lattice QCD team at RBRC has been developing the special purpose supercomputers. The first machine, QCDSPP (QCD with DSP), was installed in 1998 collaborating with Columbia University, whose success led to the current QCDOC (QCD on a chip), with a collaboration with Columbia University and IBM, operating from 2005. QCDOC is about 20 times faster than QCDSPP yet it has smaller footprint and lower power consumption. Two other QCDOCs are also installed by the Department of Energy and the University of Edinburgh.



12,288個の演算ユニットからなるQCDOCスーパーコンピュータ
。1秒間に約10兆回の演算が可能。
QCDOC supercomputer consisting of 12,288 processing units is
able to perform 10 trillions of arithmetics in a second.

標準模型の精密検証

自然界の「電磁気力」、「弱い力」、「強い力」をまとめた基本理論に素粒子「標準模型」があります。ごく一部の例外を除き、これまで実験で発見されている物理現象はすべて「標準模型」の予言と合致しています。しかし「世代数の問題」「質量階層問題」「真空角度問題」など「標準模型」では理論的に説明しきれない謎があり、自然を記述する究極の理論ではないだろうと多くの研究者が考えています。

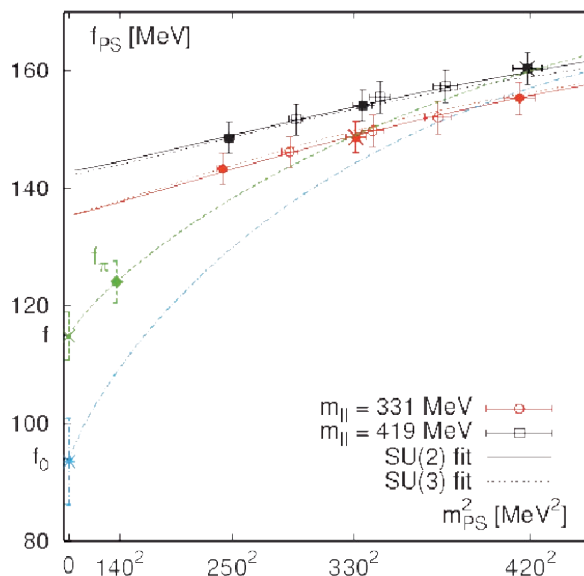
原子核や中間子に働く「強い力」の動力学を記述する標準理論の一部分が、量子色力学 QCD です。格子QCDをはじめとするQCDの理論計算は、標準模型を検証し、残された謎を解き明かす「標準模型を超える物理」を探索する上で欠かせない役割を果たしています。

現在、RBRC格子QCDプロジェクトにおいては、格子QCDを用いた素粒子標準模型の詳細な検証が行われています。格子QCD専用スーパーコンピュータQCDOCを用いた大規模シミュレーションにより、アップ、ダウン、ストレンジの3種類の軽いクォークの動力学効果を完全に取り入れた理論計算が可能になりました。系統誤差の大きかった旧来のクエンチ近似に依存する必要がなくなり、真の意味での第一原理計算に基づいた物理現象の予言が可能になりつつあります。

まずはハドロンの質量の格子QCD計算と実験値との比較により、標準模型の基本定数である、3種類のクォークの質量を高い精度で決定することが出来ます。さらにはクォーク間の混合を記述するキャビボ-小林-益川理論(2008年度ノーベル物理学賞)の混合行列を決定するのに欠かせない、中間子の崩壊定数(π 中間子の例:右図)、K中間子のレプトン対を含む三体崩壊(K_{l3})の形状因子、K中間子とその反粒子の間での遷移行列要素などを信頼できる精度で決定することで世界の研究をリードし、最新の結果は理論・実験両面に影響を与えています。

また、 $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊なども通して、観測されるCP非保存は標準模型を超える新しい物理の発見につながる非常にエキサイティングな課題として研究が進んでいます。

今後、ミューオンの異常磁気モーメントや $B_s - \bar{B}_s$ 混合などを探索することによって標準模型を超える新しい物理の発見が期待されています。



π 中間子崩壊定数の中間子質量への依存性
Pion decay constant as function of pion mass squared

Precision Test of the Standard Model

The “Standard Model” (SM) describes the electromagnetic, weak, and strong interactions in the nature. Almost all the theoretical predictions based on the SM have been successfully confirmed by experiments so far. Many researchers, however, doubt the SM is the ultimate theory because of a few mysteries that can't be explained by the SM, examples of which include problems of "number of particle generations", "mass hierarchy", or "vacuum angle".

QCD, a part of the SM, describes the dynamics in the atomic nucleus which consists of the quarks and gluons. Theoretical investigations for QCD, such as lattice QCD, play indispensable roles in testing the SM and also in exploring the mysteries that could be solved by a theory beyond the SM.

In RBRC, researchers are inspecting the SM using precise calculation from lattice QCD. A large scale computation on QCDOC, RBRC's super computer devoted for QCD calculation, finally allows us a complete QCD simulation including dynamical effects of up, down and strange quarks. We no longer suffer from unknown systematic error from the omission of the vacuum's polarization due to quarks, and can make a step ahead to the truly ab initio prediction for the physics.

By comparing theoretical predictions and experimental results on various properties of QCD particles (hadrons), we are now able to determine the quark masses and other fundamental parameters of the SM precisely. In particular, we investigate on properties of pion(π) and kaon(K), such as the decay constants (see top figure), kaon's semi-leptonic three body decay, K_{l3} form factor, and QCD matrix elements called B_K , all of which can be used to determine the quark mixing predicted by Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) matrix (the Nobel prize in 2008). We are also having for a very exciting opportunity to investigate a signal of the new physics via the CP violating processes such as $K \rightarrow \pi\pi$, as well as other hints for physics beyond SM by studying anomalous magnetic momentum of muon, and $B^+ - B^0$ mixing and more. These precise and reliable determinations lead the world-class science, and the state-of-the-art calculations affects both theory and experiment of particle physics.



理研-BNLの関係者とQCDOC
RIKEN-BNL Collaboration and QCDOC

核子の構造

RBRCの研究者によって核子の構造についても強い相互作用の第一原理計算である格子QCD数値計算を用いた研究が行われており、着実に精度が向上しています。

特に3種類の軽いクォークの自由度を含む格子QCD数値計算では、軸性電荷の体積依存性が大きいことを指摘し、その補正を注意深く行うことにより実験値を再現することを示しました(右図, $N_f=2+1$)。軸性電荷は中性子の寿命を決定する基本的かつ重要な物理量で、この結果は、より精密な計算、さらに複雑な核子構造の計算に向けて格子QCD法の予言能力を裏付ける重要な成果です。

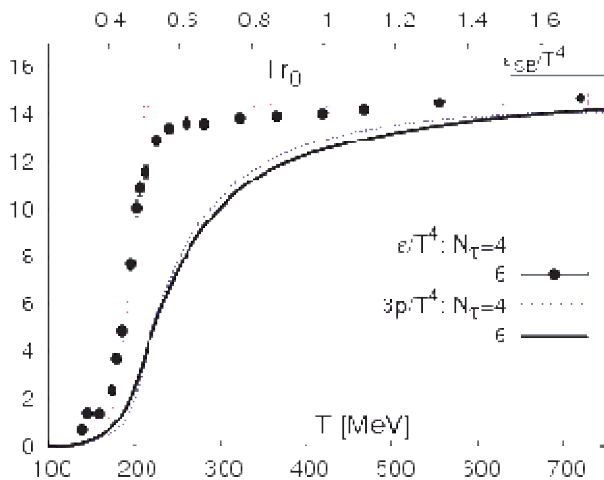
これをうけて、核子構造関数の最低次のモーメントに対応する核子内のクォークの数密度、スピン縦偏極密度、スピン横偏極密度についても研究が始まっています。さらに、陽子崩壊に関する遷移行列要素や中性子の電気双極子モーメントなど、標準模型を超える新しい物理の探求に不可欠な物理量の数値計算も実施しています。

有限温度量子色力学

十分に高温な環境では、強い相互作用するハドロン物質は相転移により新しい物質状態、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)状態に変質することが期待されています。そのような状態では、ハドロンの内部に閉じ込められていたクォークやグルーオンが解放されるでしょう。そこではいったい、この状態の変質の特徴は何か？(例えば、そもそも相転移かどうか?)といったどのくらいの温度でそれが起こるか?そのときのQGPの状態方程式はどのようなものか?このような重要な問題の解決に多くの努力が払われましたが、これまで基本理論QCDに則った計算による解答が得られていませんでした。

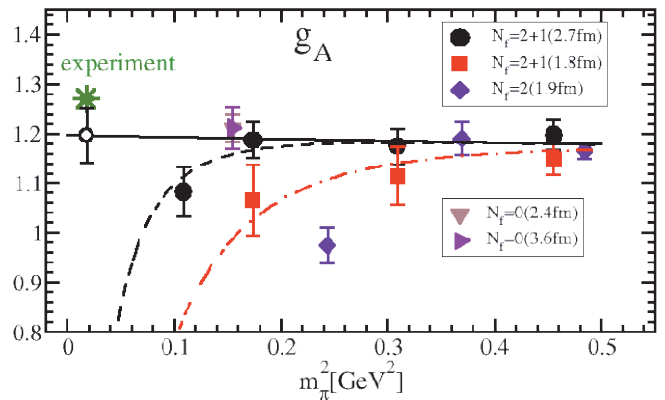
RBRCの格子QCDプロジェクトチームは、スーパーコンピュータQCDOCを用いた精密な数値計算によりこれらの問題に取り組んでいます。これまでに状態方程式(エネルギー密度と圧力の温度依存性:下図)、新物質状態への転移温度は 192^{+7}_{-4} MeV (約2兆°C)であることなどの成果が得られています。

現在までカイラル対称性の一部を保つスタaggerドフェルミオン法を使ってきましたが、ドメインウォールフェルミオン法による解析も検討されています。



格子QCDによるエネルギー密度と圧力の温度依存性

Lattice QCD results of energy density and pressure as function of temperature



核子軸性電荷の π 中間子質量依存性

Nucleon axial charge as function of pion mass squared

Nucleon Structure

RBRC physicists pursue theoretical research on the structure of the nucleon through a first principles calculation, i.e. lattice QCD simulation. The computation of nucleon properties in lattice QCD is now progressing with steadily increasing accuracy.

The calculation using the three light quarks revealed that the axial charge suffers from volume effect. With carefully treating the volume correction, the obtained axial charge appeared to be consistent with the experiment (top figure). The axial charge is a basic quantity, that determines the neutron lifetime. The result shows that the lattice QCD method possesses prediction power also for the nuclear physics.

Their next project is to calculate moments of nucleon structure functions, such as the quark density, helicity and transversity, which are being studied now. The RBRC researchers are now starting to explore new quantities such as hadronic matrix elements of nucleon decay and the neutron electric dipole moment, which should give important contributions to explorations of new physics beyond the standard model.

Finite Temperature QCD

It is expected that strongly interacting matter undergoes a transition to a new state, called the Quark Gluon plasma at sufficiently high temperatures. In this new form of matter quarks and gluons are no longer confined in hadrons. An important question then is what is the nature of this transition (e.g. whether it is a phase transition), at what temperature it happens and what is the equation of state of Quark Gluon Plasma. Despite many efforts these questions are still not answered with full confidence.

With the help of the QCDOC supercomputer the researchers in RBRC have calculated the QCD Equation of state (left figure) and studied the aspects of the transition related to deconfinement and chiral symmetry restoration. The transition temperature has been determined to be $T_c=192(7)(4)$ MeV in the continuum limit in the region of the physical quark masses.

Another fermion formulation which realizes a part of full chiral symmetry and is called staggered fermions have been used for these studies. Analysis with DWF is under development.

QGP(クォークグルーオンプラズマ)の研究

Physics research on QGP (Quark Gluon Plasma)

現在私たちの住んでいる世界では、核子や π 中間子などのハドロンを構成しているクォークやグルーオンは非常に強く結びついて外に取り出すことはできません。これを「カラーの閉じ込め」と言います。ところが、核子同士が重なりあうくらいに物質の密度を非常に高くしたり、温度を高くしたりするとこの力が弱くなり、ハドロンに縛り付けられていたクォークやグルーオンが一つの核子だけにとどまらなくなると考えられています。このような状態は、普通の原子から電子が離れてできるプラズマに似ているため、「クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)」と呼ばれています。この状態は、遥か昔、ビッグバン直後の高温の時代に存在したと考えられています。

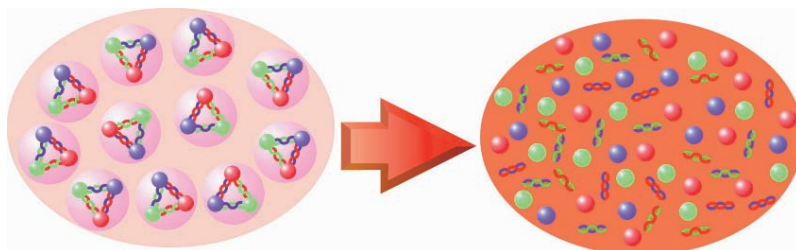
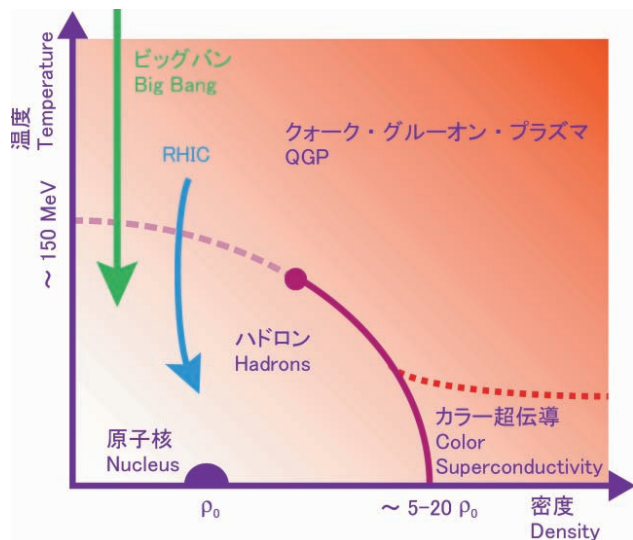
理研BNL研究センター(RBRC)は、人類にとっては目新しい物質形態であるQGPの性質の解明を目指しています。特に、ブルックヘブン国立研究所(BNL)では2000年からこのQGPを実験的に創り出すべく、「相対論的重イオン衝突型加速器(RHIC)実験」が始まり、世界的に注目されています。RBRCもこのRHICでの実験に参加し、理論・実験の両面からQGP状態の解明に挑戦しています。最近では、低温で高密度のクォーク物質が質的に新しい状態を示すことが理論的に予言されています。この状態は金属の超伝導で電子がクーパー対を作るのと同じように、クォークがペアを組んで一種の超伝導状態をつくることから「カラー超伝導」と呼ばれています。この状態の理論的な解明は、現在急速に発展しており、RBRCの研究者も重要な貢献をしています。

最近では、RHICにおいて高いエネルギーをもった重イオン同士が衝突する過程において、その初期状態が別の新しい物質形態である「カラーガラス凝縮(CGC)」によってよく記述される可能性を示唆する実験データが得られています。エネルギーが極端に高くなると、核子やその集合体としての原子核をクォークを単位として記述する低エネルギーの描像とは対照的に、ゆったりと運動したグルーオンが互いに歩調を合わせながら高い密度で飽和した状態として、核子や原子核を普遍的に記述することができます。これがCGCの正体です。重イオン衝突の初期状態がCGCで記述されるか否かを確認するべく、RBRCの研究者も理論研究を続けています。

In the world we live in, the quarks and gluons that form hadrons such as nucleons and pions are quite strongly bound together so that we are not able to break them apart. This is called color confinement. When the density of matter is increased a great deal so that nucleons are piled up, or the temperature is raised, it is predicted that a new state will appear in which quarks and gluons do not stay within the one hadron to which they are bound. By analogy to the usual plasma that is made when electrons are separated from the normal atom, we call it quark-gluon plasma (QGP). This state is thought to have existed immediately after the Big Bang, a long time ago when the temperature was very high.

Researchers at the RIKEN BNL Research Center (RBRC) are trying to elucidate the nature of the new state of matter, QGP. During 2000 at Brookhaven National Laboratory (BNL), a new experiment at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) began to create QGP under the world's watchful eyes. We at RBRC are the part of this experimental project at RHIC so that we will be able to elucidate the QGP state theoretically and experimentally. Recently, it was theoretically predicted that in the deconfined phase at low temperature and extremely high density, there will exist a qualitatively new phase called "Color Superconductivity." Similar to the usual superconductivity in metals, quarks in this phase form "Cooper pairs" that have color and show super-conductivity. RBRC's researchers have been giving important contributions to the investigation of this new state.

Recently, some experimental data suggested that the initial state in highly energetic heavy ion collisions may be well described by another new state of matter, color glass condensate (CGC). As the energy becomes extremely high, nucleons and even nuclei can be universally viewed as a state in which gluons moving slowly and coherently are saturated at high density, in contrast to the conventional low energy picture of nucleons in terms of the constituent quarks. This is what CGC is like. RBRC's researchers are theoretically trying to make sure of the CGC description of the initial state in the heavy ion collisions.



QCDの高エネルギー極限とカラーグラス凝縮

High energy limit of QCD and the Color Glass Condensate

強い相互作用をする核子や中間子等のハドロンを高エネルギーで衝突させると、ハドロンの構成要素であるクォークとグルーオンの自由度が重要になってきます。特に、衝突に関与するハドロン中のグルーオンの数はエネルギーとともに急激に増加することが理論、実験の両方から示されており、高エネルギー極限でハドロンは高密度のグルーオン多体系のように振舞うことが予想されます。カラーグラス凝縮(CGC)形式は、この高密度のグルーオン系を記述することを目的とした理論的枠組みです。過去10年間でCGCの物理は飛躍的に発展をとげ、今日では多くの物理学者によって支持されています。

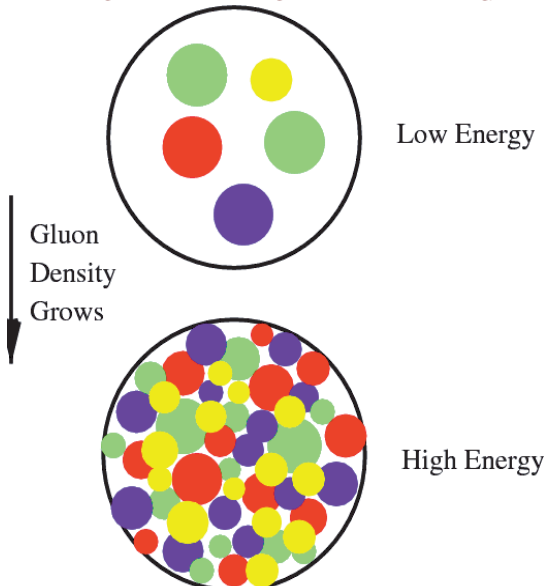
この理論では、高エネルギー衝突に寄与するカラー(Color)を持ったグルーオンをガラス(Glass)のようにゆっくり変化するボーズ凝縮(Condensate)状態として記述し、さまざまな観測量を計算します。

理研BNL研究センター(RBRC)理論グループはCGCの考えに基づいてBNLの原子核理論グループと交流、共同研究をしながら高エネルギーでのハドロンの性質を研究しています。2つのグルーオンから成るポメロンや3つのグルーオンからなるオデロンといったCGCでの集団励起モードや、高エネルギー散乱でのグルーオンの飽和現象、ユニタリティー(確率の保存)の回復などのハドロン物理の重要な問題に取り組み、この分野の発展に着実に貢献してきました。

RHICで行われている原子核衝突実験で生成されると期待されるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)の熱平衡へ達する初期条件は、CGCによって与えられると考えられています。

RHICでの実験において、前方領域を観測することによって、CGCの存在を強く示唆するデータが得られたこともあって、CGCの物理は理論、実験とも世界的な盛り上がりを見せており、RBRCグループもこの新しいQCDの領域を開拓すべく研究を続けています。

衝突のエネルギーを上げると核子中のグルーオンの数が増加する。
The number of gluons inside a nucleon grows with the collision energy.



In high energy hadron-hadron collisions, the important degrees of freedom are quarks and gluons inside the hadrons. In particular, it has been established both theoretically and experimentally that the number of gluons participating in the collision rapidly increases as a function of energy. Therefore, at high energy hadrons behave like a densely packed many-body system of gluons. The Color Glass Condensate (CGC) formalism is a theoretical framework aimed at describing this high density gluon system. During the last decade, the CGC formalism has achieved impressive development, and it is now widely accepted by many physicists.

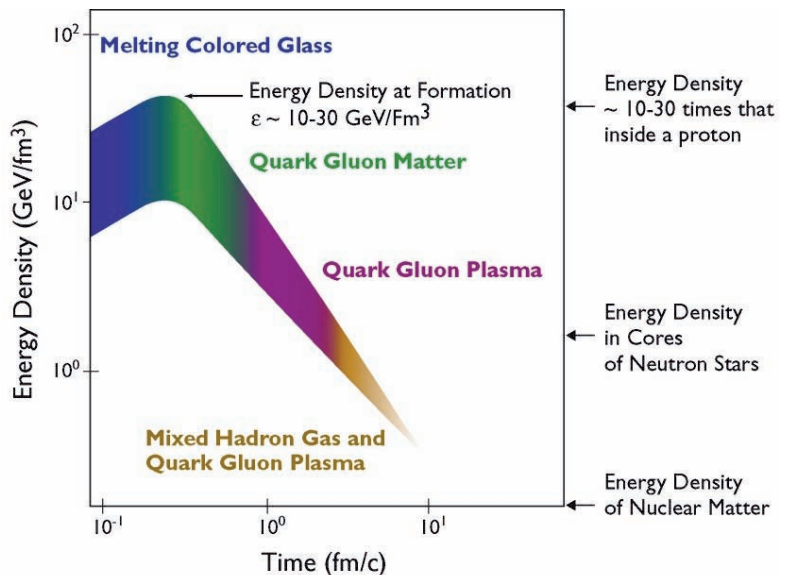
In this theory, gluons relevant for high energy processes are Colored, evolve slowly like Glass, and are forming a Bose Condensate.

The RBRC group has investigated the consequences of the CGC for various properties of hadrons, and made important contributions to the advancement of high energy hadron physics. These include the problems of gluon saturation, unitarity restoration at high energies, and collective excitations of the CGC such as the Pomeron (bound state of two gluons) and the Odderon (bound state of three gluons), and so on.

The CGC is also important since it provides the initial condition for the thermalization of the Quark Gluon Plasma (QGP) as produced in ultra-relativistic heavy-ion collision experiments currently ongoing at RHIC and in the near future at LHC.

Strong evidence for the CGC was found by looking at forward rapidity at RHIC. This further boosted the interest and activity in the physics of the CGC among both theoreticians and experimentalists. The RBRC group will continue its efforts for the understanding of this largely unexplored regime of QCD.

重イオン衝突直後からの時間と生成された物質のエネルギー密度の関係。
カラーグラスがクォーク・グルーオン・プラズマへと時間発展していく。
Energy density of the matter created in heavy-ion collision experiments.
The initial Color Glass Condensate evolves into the Quark-Gluon Plasma.



RHIC加速器とPHENIX検出器

RHIC accelerator and PHENIX detector

ブルックヘブン国立研究所 (BNL) に建設されたRHIC (相対論的重イオン衝突型加速器) は、QCD研究のために作られた世界で唯一の専用衝突型加速器です。そこでは金イオン同士や、偏極された陽子同士の衝突が行われています。

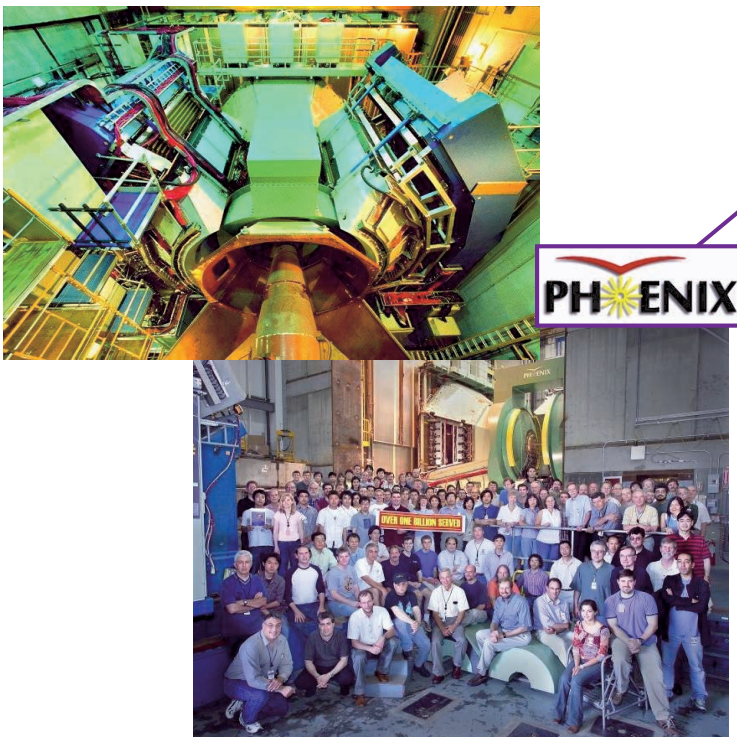
イオン化された金の原子核は、前段加速器で加速されてエネルギーを高め、RHICメインリングへ注入されます。全長約3.8キロメートルのRHICメインリングには超伝導磁石を備えた2本のビームパイプがあり、それぞれに分かれて注入されたビームを反対向きに加速します。最終的には、光の速度の99.99%以上にまで加速した後、メインリングに6ヶ所ある衝突点で原子核同士の衝突が起こります。衝突時の温度は約1兆度以上にも昇り、核子に閉じ込められていたクォークとグルーオンが切り離された高温高密度の状態が再現されると考えられています。

RHICに設置された大型検出器のひとつであるPHENIXには理研を初めとして世界各国から多くの研究機関が参加しています。PHENIXは高さ10メートル幅18メートル奥行13メートルにも及ぶ巨大な検出装置で、参加各機関が製作した検出器群が複雑に組み合わされ、重イオンや陽子の衝突によって起こる現象をあらゆる観点から精密に測定します。

理研BNL研究センター (RBRC) は、衝突により発生したミュオンを測定するミュオン飛跡検出器とミュオン識別検出器、希少な現象だけをオンラインで選び出す高機能トリガー回路、さらに発生した電子・光子のエネルギーを測定する電磁カロリメータの読み出し回路等を担当しています。現在私たちはPHENIXのシリコン飛跡検出器アップグレードと新しいミュオントリガーシステムを建設しています。これらはPHENIX実験の能力を拡大します。

PHENIX実験には世界中から400人以上の人々が参加しています。

Over four hundred collaborators from around the world are participating in the PHENIX project.

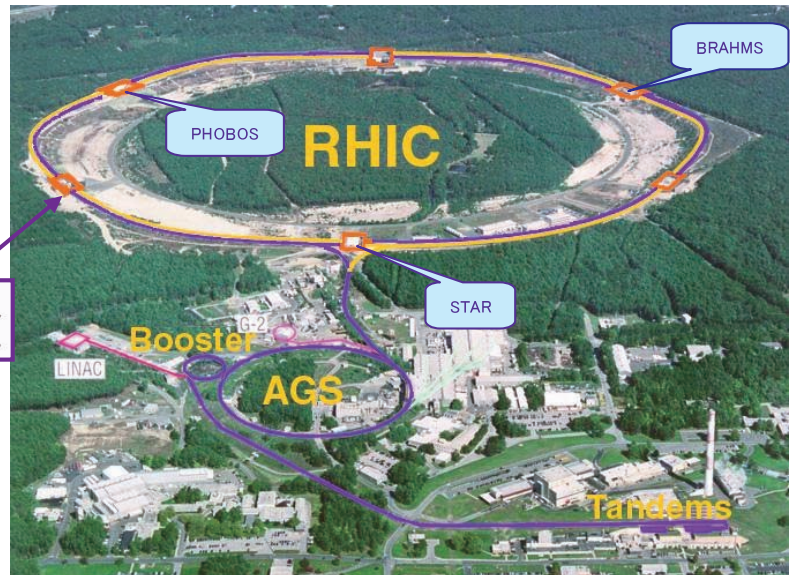


RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) is the unique collider in the world developed for dedicated study of QCD by Brookhaven National Laboratory (BNL), where collisions between gold ions or polarized protons are achieved.

After the ionized gold nuclei are accelerated through former-stage accelerators, they are sent to the RHIC main ring. The RHIC main ring, with a total length of about 3.8 km, is equipped with two beam pipes with superconducting electromagnets, these beams being in opposite directions. In the end, the acceleration reaches speeds of 99.99% or more of the speed of light. Then, collisions occur at six intersections designated on the main ring. The temperature at the collision reaches one trillion degrees or more. It is expected that a sufficiently high-temperature, high-density condition will be attained to allow quarks and gluons that have been confined to the nucleus to be deconfined.

Physicists representing worldwide institutions, including RIKEN gathered to construct one of the large-scale detectors called PHENIX. The PHENIX is a huge detector : 10 m high, 18 m wide, and 13 m long, and includes detector sub-systems from collaborating institutions. It will provide precision measurements of a variety of phenomenon in both heavy ion and proton collisions.

The RIKEN BNL Research Center (RBRC) has developed and constructed the following detector sub-systems in collaboration with other institutions: Muon Identifier and Muon Tracker to measure muons produced in collisions with the position, a High Performance Trigger to select rare and important events online, and the front end electronics to read the electromagnetic calorimeter for the measurement of photon and electron energies. We are currently constructing Silicon Vertex Tracker (VTX) and new muon trigger systems. They will expand the capability of the experiment.



RHICメインリングには6箇所の衝突点があり、現在は4箇所に検出器 (PHENIX, STAR, PHOBOS, BRAHMS) が設置されています。

There are six collision points on the RHIC main ring. Currently, there are four detectors (PHENIX, STAR, PHOBOS, and BRAHMS) installed.

RHICでのQGP物理の成果

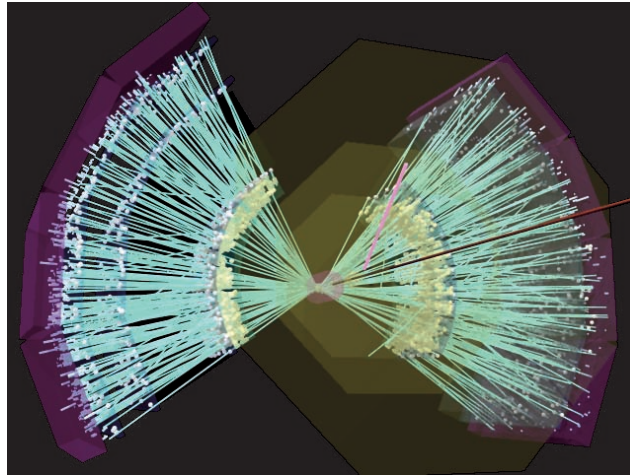
Achievement of QGP physic at RHIC

RHIC ではこれまで金イオン同士、重陽子と金イオン、銅イオン同士の衝突が行なわれ、様々な実験成果が報告されています。大きな成果のひとつは金イオン衝突実験において高い横方向の運動量を持つ粒子の生成が抑制されていることの発見です。この現象は初め、PHENIX 実験により報告され、その後 RHIC のすべての実験により確認されました。また、STAR実験は二つのジェットの相関を調べることで、この現象が逆側ジェットの抑制として顕著に現れることを示しました。

さらに重陽子-金イオン衝突反応との比較によって、金イオン衝突反応ではこれまで観測されたことのない非常に高密度の物質が生成されていることが確立されています。この高密度物質を粒子およびジェットが通過する際にエネルギーが吸収され、抑制となって現れるのです。

これに加え、楕円形フローと呼ばれる集団運動を調べると、この物質が熱平衡に達していることが示唆されています。宇宙の初期状態に存在していたと信じられているこの物質の性質を調べるため、さらに重いクォーク生成、 J/ψ 粒子、直接光子などの測定などを進めています。

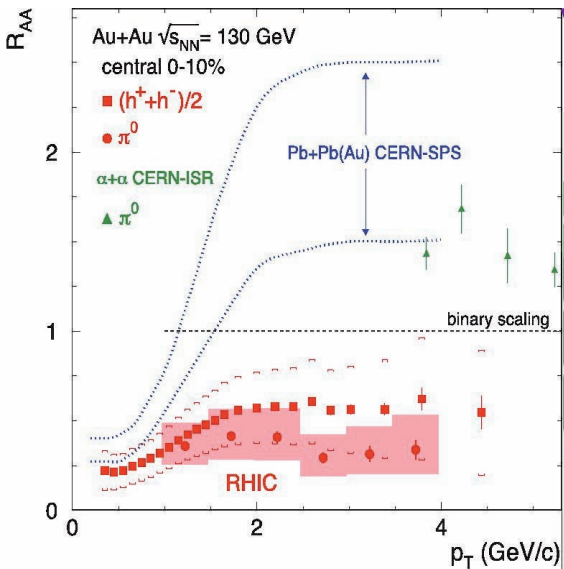
Thus far collisions between gold ions, with deuteron and gold ions, and copper ion collisions have been performed at RHIC and various experimental results have been reported. One of the most significant results is a discovery of suppression in particle production at large transverse momentum in gold-ion collisions. This phenomenon was first reported by the PHENIX experiment, and confirmed by all other RHIC experiments. The STAR experiment also reported by investigating the correlation between the leading jet and the away-side jet this phenomenon appears as the prominent suppression of the away-side jet.



PHENIX 実験で捉えられた金-金衝突の事象のひとつ。
One Au-Au collision event detected by the PHENIX detector.

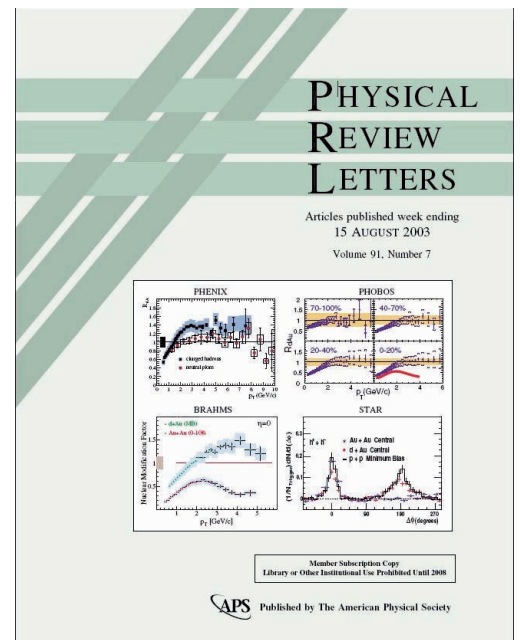
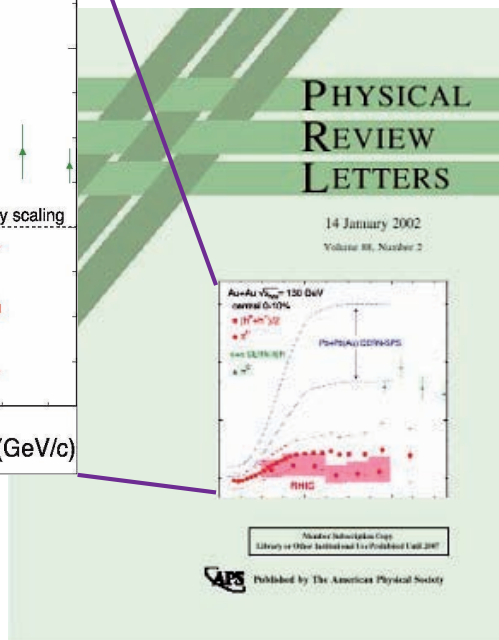
The formation of very high-density matter in gold-ion collisions, which had never been seen before is confirmed by the absence of suppression in deuteron and gold-ion collisions. The energy of the particles is absorbed by passing through high-density matter, and this results in the suppression of particles.

In addition, by investigating collective motion, so called elliptic flow, it is indicated that this high-density matter is in a thermal equilibrium state. To characterize this matter, which is believed to have existed at an early phase of the universe, we are measuring other reactions such as heavy quark production, J/ψ production, and direct photon production.



PHENIX実験により報告された高横運動量粒子の抑制。

Suppression in high- p_T particle production reported by the PHENIX experiment.



Physical Review Letter 誌の表紙を飾ったRHICから得られた成果。

Achievements at RHIC which are shown in front pages of Physical Review Letters.

RHICにおける偏極陽子加速および衝突

Polarized proton acceleration and collision at RHIC

クォークやグルーオンのスピンを測定するためには衝突する陽子のスピンを一定方向にそろえる(偏極する)必要があります。

理研BNL研究センター(RBRC)はブルックヘブン国立研究所(BNL)と協力して、磁場により陽子のスピンを揃えたまま加速することができるサイベリアンスネークマグネットと加速された陽子のスピンの向きをコントロールできるスピンローテーターを開発しました。これにより、偏極させた陽子を高エネルギーで衝突させることが可能となり、スピン解明のための重要なデータを得ることができるのです。

RHICではたくさんの陽子が集まったビームを加速して衝突させます。サイベリアンスネークは、ねじれた磁場の力でビーム中の陽子を回転させることにより陽子のスピンの向きを揃えています。AGS加速器に2箇所、2本のRHICメインリングにそれぞれ2箇所サイベリアンスネークが設置され、約70%の偏極度(偏極の度合い)を実現します。

達成された偏極度を測定するために、様々なポラリメータ(偏極度計)の開発も行われました。高精度の偏極度の測定は、決定的なスピン物理の結果をえるためには必要不可欠のものです。RHICのポラリメータは±5%の精度で偏極度を測定します。

RHIC施設のために開発、設置された様々なスネークマグネットと偏極度計。

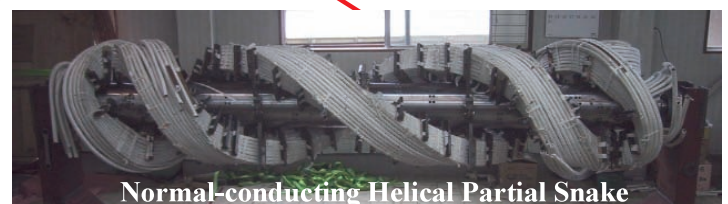
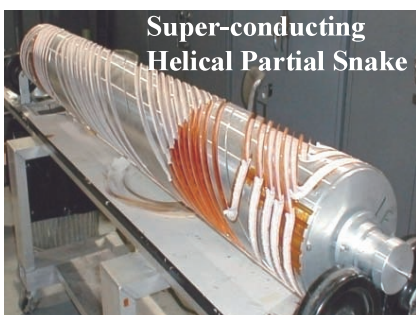
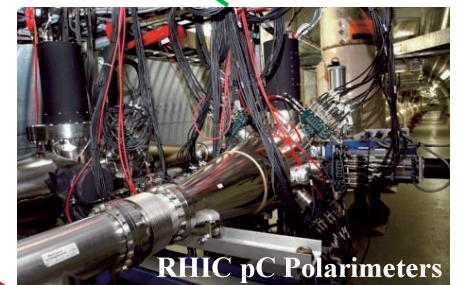
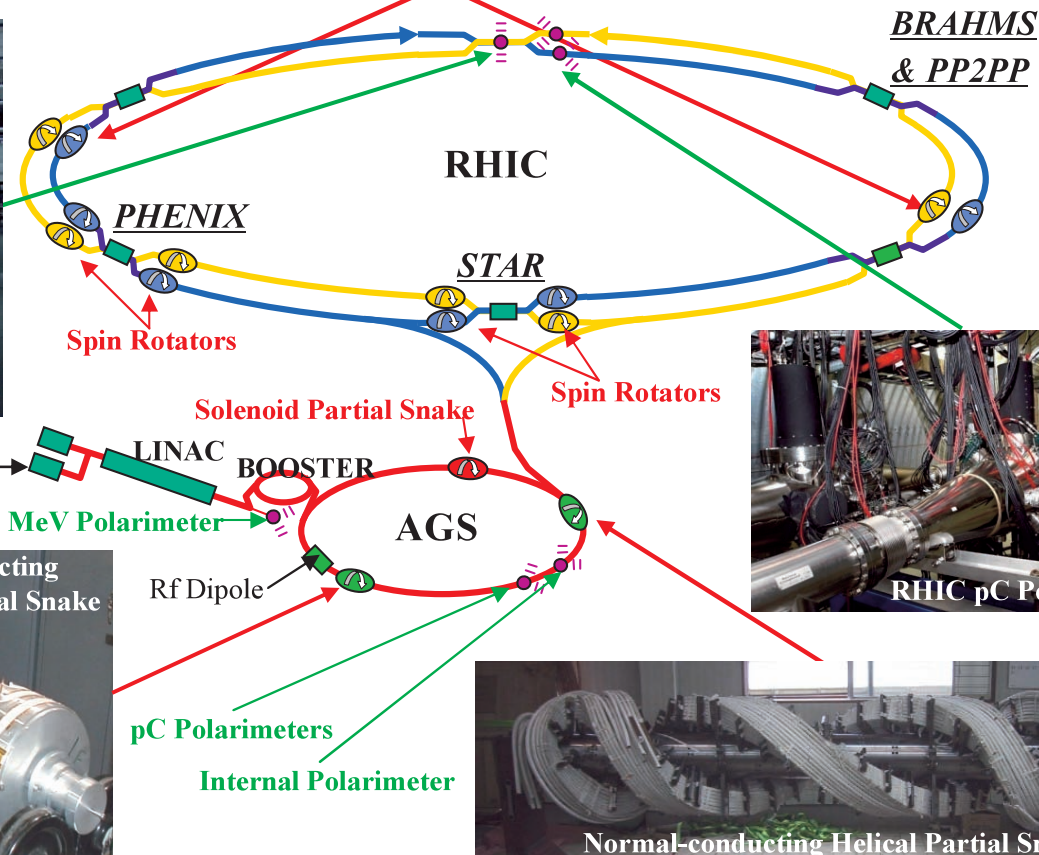
various types of snake magnets and polarimeters developed and installed in the RHIC facility.

It is necessary to make the colliding proton's spin direction uniform (to polarize) in order to measure the spin of quarks and gluons.

The Siberian Snake magnet and Spin Rotator have been developed by the RIKEN-BNL Collaboration to maintain the proton's spin direction during its acceleration and to control the spin direction for experiments. These enable us to collide the polarized protons at high energy and obtain important data to understand the spin of the proton.

At RHIC, huge number of protons are gathered to make beams of protons to collide. The Siberian Snakes flip the spin direction of the protons with a spiral magnetic field to align spin directions. Two Siberian Snakes are installed at AGS ring and two sets of Siberian Snakes are installed on each ring in RHIC to achieve the polarization of 70%.

Various polarimeters have been developed and operated to measure achieved polarization. Precise measurement of the polarization is indispensable for decisive results of the spin physics. RHIC polarimeters will measure the polarization with ±5% precision.



RHICでのスピン物理の成果

Achievement of spin physic at RHIC

RHICでのスピン物理の最初の目標は、陽子のスピン1/2に対するグルーオンのスピンの寄与 ΔG を調べることであります。衝突エネルギー200GeVでの偏極した陽子同士の衝突実験は2001年より始まり、PHENIX実験ではこの ΔG をビーム方向に偏極(縦偏極)した陽子の衝突で生成される中性 π 粒子(π^0)の示す A_{LL} という縦偏極非対称度を測定することにより調べてきました。2005-06年(Run5-6)の実験データは、 π^0 の A_{LL} が非常に小さいことを示し、 ΔG の値を予想する摂動論的QCDに基づく理論に対し厳しい制限を与えました。

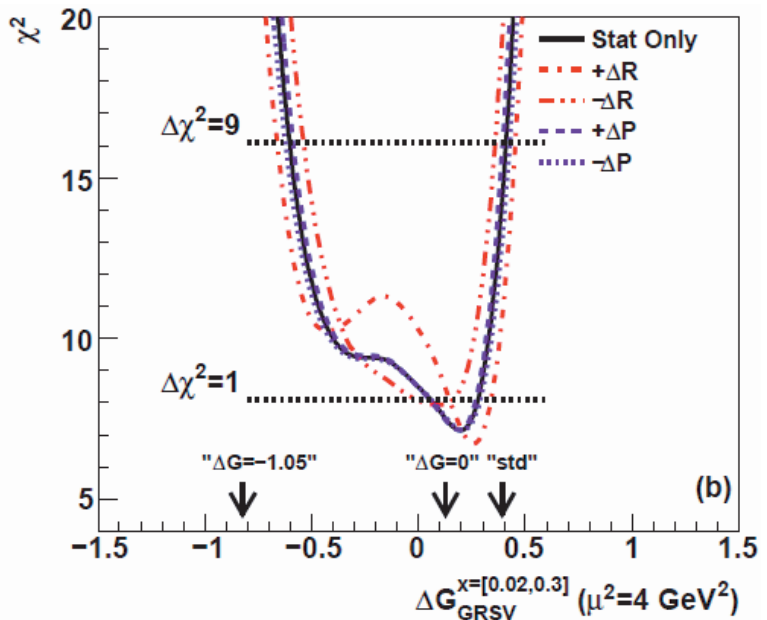
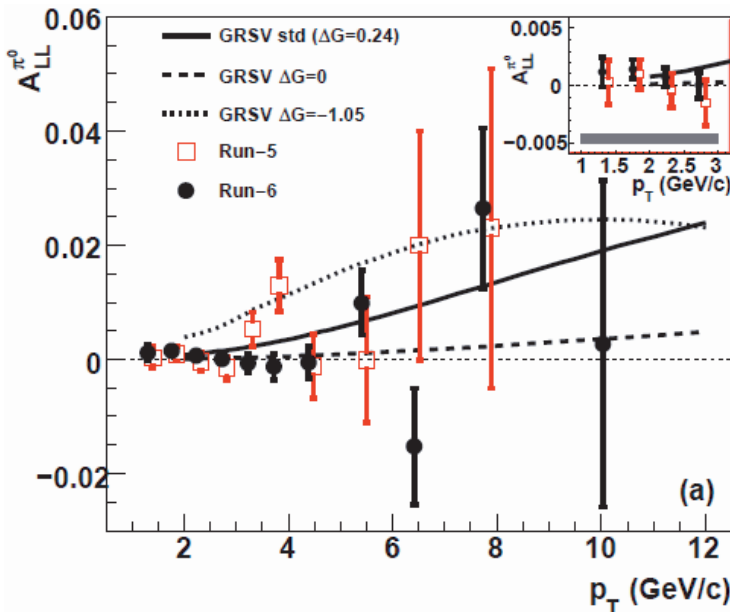
2009年からは衝突エネルギー500GeVでの衝突実験を開始し、そこで生成されるウィークボソンにより陽子スピンに対するクォークのスピンの寄与を、クォークの種類(フレーバー)ごとに調べます。PHENIX実験では、より高い衝突エネルギー、輝度に対応するための事象選択トリガー検出器のアップグレードが進んでいます。さらに光子の直接生成過程や重いフレーバーのクォークの生成も用いた ΔG のより精密な測定を合わせて、陽子スピンに対するクォークとグルーオンのスピンの寄与の精度は格段にあがります。

陽子スピンを理解する上で最後に必要となるのは、クォークとグルーオンの持つ軌道角運動量の寄与です。ビームと垂直方向に偏極(横偏極)した陽子の衝突では、陽子内部でクォークとグルーオンの持つ運動量分布とスピンとの相関を調べ、軌道角運動量も含めた陽子スピンの理解を目標とします。RHICでは既に、横偏極した陽子の衝突で前方に生成される多様な粒子(π 粒子、K粒子、反陽子、中性子)に対して大きな非対称度が測定されています。今後さらに横偏極非対称度を調べることにより、実験、理論双方からの陽子のスピン構造の完全な理解を目指します。

Contribution of the gluon spin (ΔG) to the proton spin 1/2 has been investigated as the first goal of spin physics at RHIC. Polarized proton collision experiments at a collision energy 200GeV started in 2001. The PHENIX experiment has investigated the ΔG by measuring a longitudinal-spin asymmetry A_{LL} of neutral pions (π^0) produced in longitudinally polarized proton collisions. Experimental results from data taken in 2005-06 (Run5-6) showed that the A_{LL} of π^0 is very small and they strongly restricted ΔG in the theoretical calculations based on perturbative QCD.

From 2009 polarized proton collisions at a collision energy 500GeV start and we investigate flavor-sorted contribution of the quark spin to the proton spin with weak-boson production. Upgrade of event-trigger detectors has been underway at PHENIX to deal with higher collision energy and luminosity. Higher precision measurements of ΔG with direct-photon and heavy-flavor production in addition dramatically improve the determination of quark-spin and gluon-spin contributions to the proton spin.

The final remaining piece of information to understand the proton spin is orbital-angular momenta of quarks and gluons inside the proton. Correlation between momentum-distribution of quarks and gluons inside the proton and their spin direction in transversely-polarized proton collisions will be investigated to understand the spin structure of the proton including the orbital-angular momentum. RHIC experiments have already found large asymmetries in forward production of various particles (pion, kaon, anti-proton, and neutron) from transversely-polarized proton collisions. Further investigation of transverse-spin asymmetries will be pursued both experimentally and theoretically.



PHENIX実験により行なわれた中性 π 粒子(π^0)の縦偏極非対称度(A_{LL})の測定結果を、陽子スピンに対するグルーオンスピンの寄与(ΔG)を示す摂動論的QCDに基づく理論計算(GRSV計算)と比較する。 χ^2 検定により ΔG に対する制限を与える。

Measurement of the longitudinal-spin asymmetry A_{LL} in neutral pion production performed by the PHENIX experiment are compared with theory calculations based on perturbative QCD related to gluon-spin contribution (ΔG) to the proton spin. ΔG is restricted by χ^2 test.

最近のハイライト

The latest highlight

とても高温の物質は光、あるいは光子、を放射します。物質の温度は、放射される光の色から測定できます。PHENIX実験はRHICでの金イオン同士の衝突で作られる高温物質からの熱的光子を測定しました。この測定から高温物質の温度は4兆度に達していることを示しています。これはこれまで人工的に作られた温度としては最高で、通常物質からクォークグルーオンプラズマへの転移温度をはるかに超えています。

スピン物理ではPHENIX実験はW粒子(「弱い相互作用」を媒介する素粒子であるWゲージ粒子が偏極陽子衝突で作られる際のスピンの非対称性を測定しました。測定結果は、理論が予想したとおりの負の非対称性を示しています。これから陽子内の反クォークのスピンの偏極度を測定できます

この測定のどちらにおいても、理研BNL研究センターの研究者が主導的な役割を果たしています。

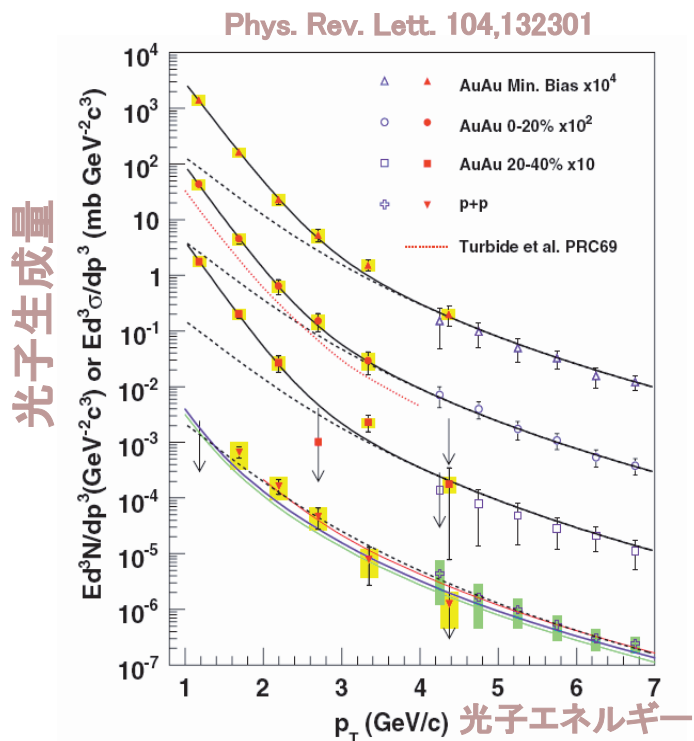
Very hot matter emits light, or photon, and the temperature of the matter can be measured from the color of light emitted from it. PHENIX experiment measured thermal photons from the hot matter created in collisions of gold ions at RHIC. The measurement indicates that the initial temperature of the matter is approximately 4 trillion degrees Celsius, the hottest temperature ever reached in the laboratory, and is well above the transition temperature from normal nuclear matter to the quark gluon plasma.

In Spin Physics, PHENIX measured single spin asymmetry of W gauge boson, an elementary particle that mediates the weak interactions, in polarized p+p collisions at RHIC. The measurement shows a large negative asymmetry as it is predicted by theoretical calculations. From this measurement, the polarization of anti-quarks in proton can be determined.

In both of these measurements, researchers of RBRC have the leading role.

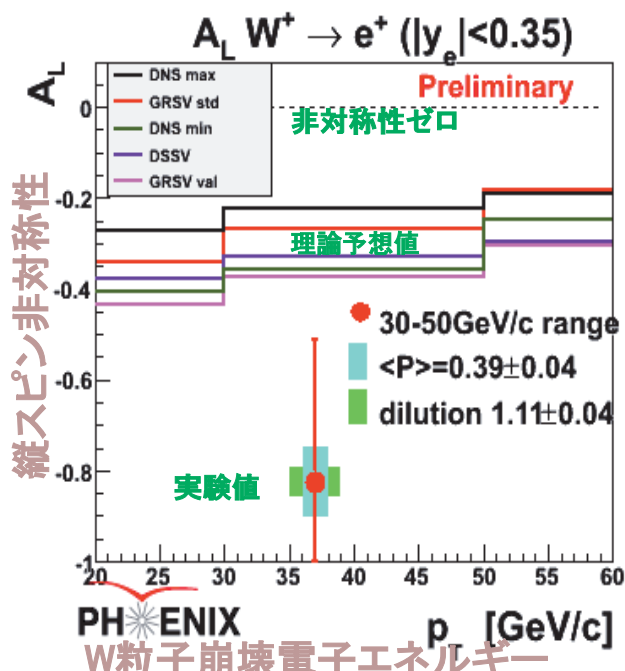
QGPからの熱光子を測定し、4兆度の高温が実現したことを確認

Thermal photon measurement indicates that very hot state at 4 trillion degree C is realized at RHIC



W粒子のスピンの非対称性を測定

Single spin asymmetry A_L of W boson production is measured for the first time.



新しい物理を導き出すデータ解析

The data analysis that carry out the new physics

RHIC/PHENIX実験から得られるデータは毎秒100MB以上、1年間でペタバイト(PB)に迫るほど膨大です。この膨大なデータの中から新しい物理を見つけ出すための解析にはたくさんのコンピュータが必要です。そのため2000年に「理研スピ物理CC-J」を理研和光研究所に設置しました。

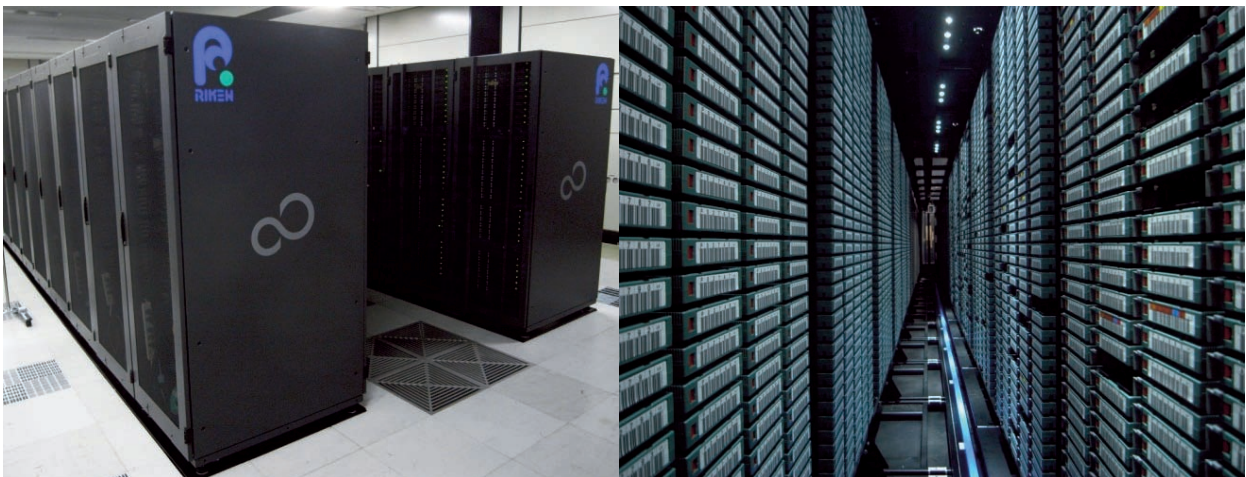
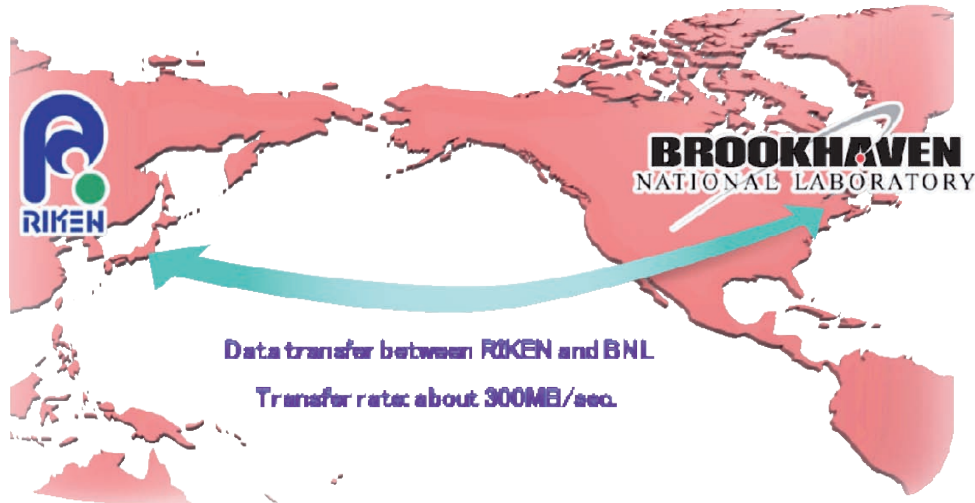
PHENIX実験に対する理研CC-Jの使命はアジア地域の拠点計算機センターであること、そしてスピ物理にとっての計算機センターであることです。理研CC-Jはその後の更新により、現在では約400CPUコアの計算パワーと High Performance Storage System (HPSS)による4PBのデータ保存能力を持ちます。

PHENIX実験で得られたデータは、ネットワーク(WAN)接続を用いて可能な限りCC-Jへ送られます。BNL-理研間のWAN接続によるデータ転送能力は毎秒300MBに達しており、2005年の約300TBを皮切りに毎年100TB以上のデータをBNLから転送し、多くの研究者に提供しています。

The amount of data that comes from an experiment at PHENIX is enormous, more than 100MB per second, and being approach petabyte (PB) in one year. Many computers are being used to analyze all of these data and find a new field of physics. We have established RIKEN Spin Physics CC-J at our Wako main campus in 2000.

The main missions of the CC-J for the PHENIX experiment are an Asian regional computing center and a computing center for the spin physics. By renewal of subsequent, the CC-J has about 400 CPU cores of the calculation power and 4 PB of the data storage capability with High Performance Storage System (HPSS) at the present.

Data taken at PHENIX are sent to the CC-J as much as possible using a network (WAN) connection. A transfer rate of the WAN connection between BNL and RIKEN reaches 300 MB/s. 100TB or more of data is sent from BNL every year starting with about 300TB in 2005, and it is provided to many researchers.

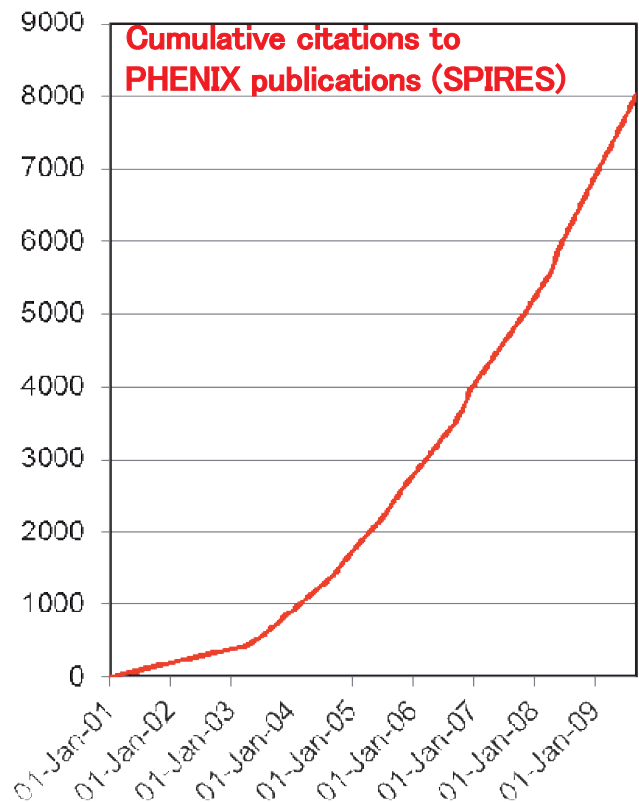
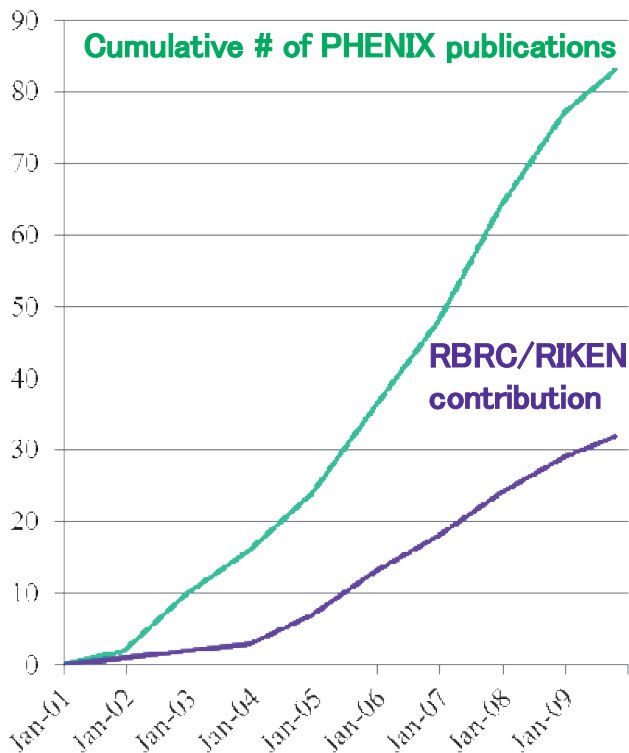


データ解析用計算機として利用しているRIKEN Integrated Cluster of Clusters(RICC) (左) と、10,000本、4PBのデータテープを収納するテープロボット(右)。

RIKEN Integrated Cluster of Clusters(RICC) used as data analysis computer system (left), and the Data Tape Repository(4PB) which controls, 10,000 data tapes(right).

PHENIXの論文とRBRC・理研の貢献

Papers from PHENIX and RBRC/RIKEN contributions



RHICでの実験が2000年に開始されて以来、PHENIXから多くの研究論文がPhysical Review Letters, Physical Review, Physics Letters, Nuclear Physics Aなどの学術雑誌に出版されており、その数は80篇以上になります。

これらの論文の多くは、他の学術論文に多数回引用されています。被引用回数が500回を超えるものが2論文、100回を超えるものは20論文以上あります。PHENIXからの論文全ての被引用回数の総数は、8,000回を超えています。

RBRCと理研の研究者は、こうしたPHENIXの論文出版に大きな貢献をしています。30篇以上のPHENIX論文について、一人またはそれ以上のRBRCまたは理研の研究者が、その論文を準備する委員会のメンバーになっています。こうしたRBRCの貢献の大きい論文は、グルーオンのスピンの陽子スピンへの寄与度の測定の論文、重いクォーク、 J/ψ 粒子、直接光子の測定の論文、それにPHENIXの最初の3年間の成果をまとめた論文などです。

Since RHIC has started its operation in year 2000, a large number of research papers of physics results have been published by PHENIX on scientific journals, including Physical Review Letters, Physical Review, Physics Letters B and Nuclear Physics A. More than 80 papers have been published to date.

Many of them are highly cited papers. Two of them are cited more than 500 times, and more than 20 papers were cited more than 100 times. The total number of citations to PHENIX publications is now more than 8000.

Researchers from RBRC and RIKEN have made large contributions to PHENIX publications. More than 30 PHENIX papers have one or more RBRC or RIKEN researchers as members of the paper writing committee. These papers includes papers on measurements of gluon spin contribution to proton spin, heavy quark production, J/ψ production, and direct photon production, and a paper that summarize the results of the first three years of PHENIX, the most cited paper of PHEINX.

セミナー、国際会議

Seminars and International Conferences

理研BNL研究センター(RBRC)では定期的にセミナーや国際会議を開催し、世界中から研究者を集めて研究成果の発表、各分野の研究情報や意見の交換等を行っています。毎回多くの参加者を集めて、新しい物理に関するハイレベルな議論を繰り広げています。

また、RBRCの研究者も世界中で開催される学会に積極的に参加して、議論や情報交換等を通じて研究交流を行っています。



Seminars and international conferences are held regularly at the RIKEN BNL Research Center (RBRC) and are attended by researchers from around the world. We host such meetings to actively facilitate the exchange of information and opinions.

Many participants attend each seminar or workshop where they are engaged in a high level of discussion on the new physics.

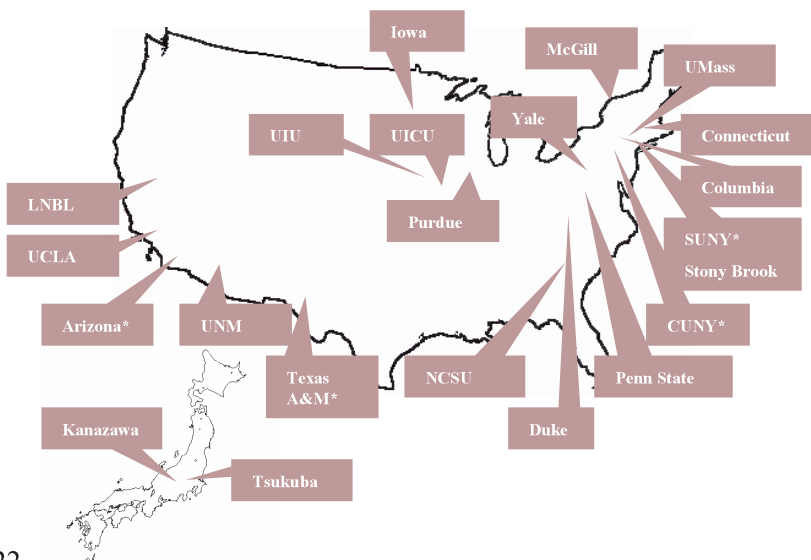
RBRC's researchers in return, actively attend academic conferences around the world to participate in the discussion and exchange of information.

RHICフィジックスフェロー制度

RHIC Physics Fellow System

理研BNL研究センター(RBRC)では、米国、カナダ及び日本の大学等とのジョイントアポイントメントであるRHICフィジックスフェロー制度を実施しています。各大学等のテニュアトラックのポジションとRBRCでのフェローとしてのポジションを併せ持ち、優秀な研究者がRBRCでフェローとして一定期間研究するというシステムです。このシステムはRBRCの研究ポテンシャルを高めることと、その研究活動と成果を広めることを目的として創設されました。この新しいシステムは内外からも高い評価を得ています。

RHICフィジックスフェローのうち、すでに9人が米国エネルギー省の Outstanding Junior Investigator (OJI)賞を受賞しています。



The RIKEN BNL Research Center (RBRC) offers a RHIC Physics Fellow system, allowing joint appointments with US, Canadian and Japanese universities. This system enables a talented researcher to maintain a tenure track position at each university as well as a Fellow Position with RBRC for a certain period of time. This system was established in order to increase the research potential of RBRC and to disseminate its research activities and results. We have received high praise for this new arrangement across the board.

Nine of the RHIC Physics Fellows have already received U. S. Department of Energy Outstanding Junior Investigator (OJI) Awards.

理研－BNL研究協力の枠組

RIKEN – BNL Collaboration

【1988年】科学技術分野における研究開発のための協力に関する日本国政府とアメリカ合衆国との間の協定

[1988] Agreement between the Government of Japan and the Government of The United States of America on Cooperation in Research and Development in Science and Technology

【1996年】基礎科学技術分野における共同プロジェクトに係る協力のための日本国政府科学技術庁とアメリカ合衆国エネルギー省との間の実施取り決め

[1996] Implementing Agreement between the Science and Technology Agency of Japan and the Department of Energy of the United States of America for Cooperation on Joint Projects in the Field of Basic Science and Technology

【1995-1996年】ブルックヘブン国立研究所と理化学研究所との相対論的重イオン衝突施設(RHIC)におけるスピンの物理プログラムに関する共同研究覚書

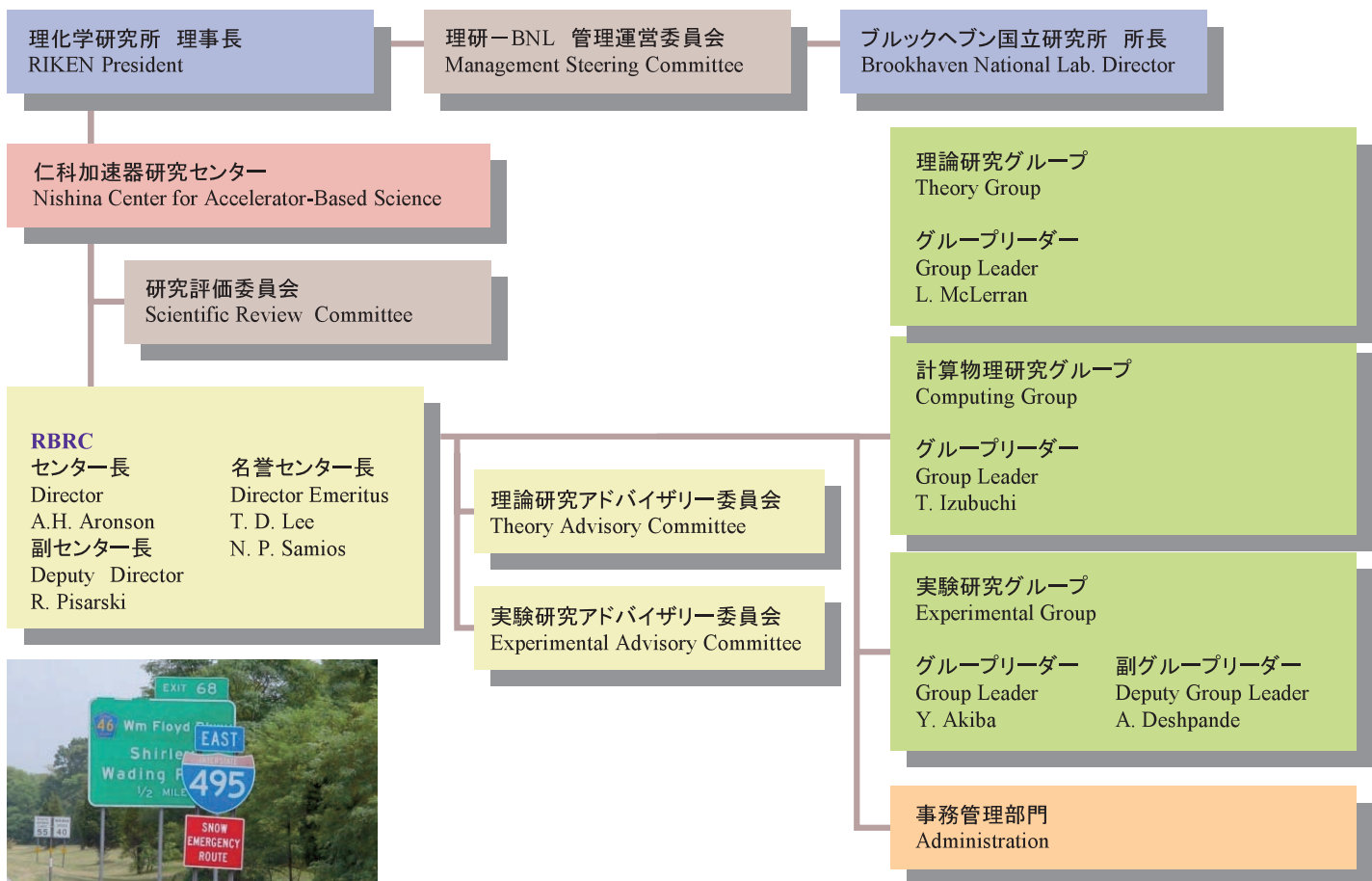
[1995-1996] Memorandum of Understanding between RIKEN and Brookhaven National Laboratory concerning the Collaboration on the Spin Physics Program at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

【1997年】理研BNL研究センター設置に関する実施合意書

[1997] RIKEN BNL Research Center Implementation Agreement

組織

Organization

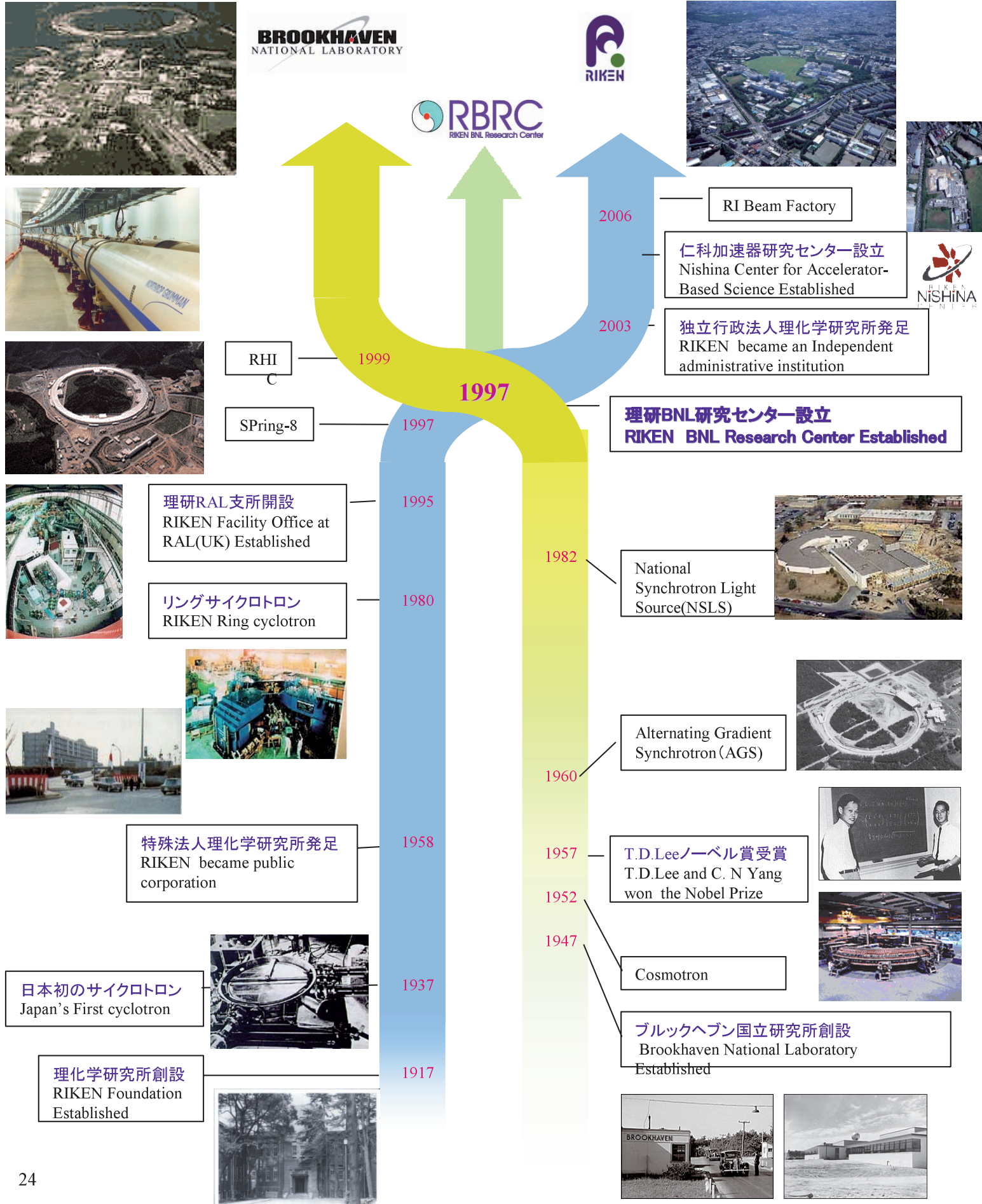


理研とBNLの歴史

History of Both Institutes

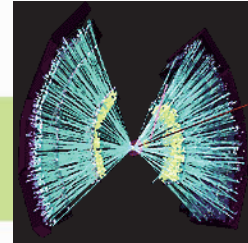
Upton NY, USA 11973

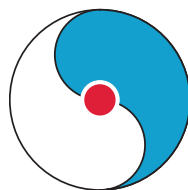
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, Japan 351-0198



History of RBRC

- 1995 「ブルックヘブン国立研究所と理化学研究所との相対論的重イオン衝突施設(RHIC)におけるスピン物理プログラムに関する共同研究覚書」締結
Conclusion of the "Memorandum and Understanding between RIKEN and Brookhaven National Laboratory Concerning the Collaboration on the Spin Physics Program at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)"
PHENIX建設開始
Started construction of the PHENIX
- 1997 理研BNL研究センター設立(センター長T. D. Lee)
Established RIKEN BNL Research Center(First Director T. D. Lee)
「QCD並列計算機の整備に関する理化学研究所とコロンビア大学との研究協力同意書」締結
Conclusion of the "Collaboration Agreement between RIKEN and Columbia University for construction of QCDSP parallel supercomputer"
- 1998 QCDSP完成
Install the QCDSP
QCDSPがGordon Bell 賞受賞
QCDSP was awarded the Gordon Bell Prize for Price Performance
- 1999 RHIC 完成(BNL)
RHIC Dedication (BNL)
RHICフィジックスフェロー制度開始
Established the "RHIC Physics Fellow system"
- 2000 RHIC金イオン同士の衝突に成功(BNL)
RHIC First collision of gold ions (BNL)
「QCDSP2の開発に関する理化学研究所とコロンビア大学との研究協力同意書」締結
Conclusion of the "Collaboration Agreement in the Development of QCDSP2 between RIKEN and Columbia University in the City of New York"
- 2001 和光実験データ解析センター完成
Dedication of the WAKO CC-J
偏極陽子ビームの加速・衝突に世界で初めて成功
First Collision of High-Energy Polarized Protons at RHIC
- 2002 「QCDOCの開発に関する理化学研究所とコロンビア大学との研究協力同意書」締結
Conclusion of the "Agreement for the Development of QCDOC between RIKEN and Columbia University in the City of New York"
「ブルックヘブン国立研究所と理化学研究所との相対論的重イオン衝突施設(RHIC)におけるスピン物理プログラムに関する共同研究覚書」更新
Renewal of the "Memorandum and Understanding between RIKEN and Brookhaven National Laboratory Concerning the Collaboration on the Spin Physics Program at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)"
- 2003 スピンローテーター電磁石を用いた縦偏極陽子衝突を開始
Collision of longitudinally-polarized protons with spin rotator magnets in operation
センター長にN. P. Samiosが就任
N. P. Samios as New RBRC Director
- 2004 AGSスネーク電磁石の導入により偏極陽子の偏極度45%を達成
45% polarization of polarized proton was achieved by installing the AGS snake magnet
- 2005 QCDOC完成
Install the QCDOC
- 2007 「ブルックヘブン国立研究所と理化学研究所との相対論的重イオン衝突施設(RHIC)におけるスピン物理プログラムに関する共同研究覚書」更新
Renewal of the "Memorandum and Understanding between RIKEN and Brookhaven National Laboratory Concerning the Collaboration on the Spin Physics Program at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)"
- 2009 500 GeV偏極陽子衝突を開始
Collision of longitudinally-polarized protons at a collision energy 500GeV
- 2012 「ブルックヘブン国立研究所と理化学研究所との相対論的重イオン衝突施設(RHIC)におけるスピン物理プログラムに関する共同研究覚書」更新
Renewal of the "Memorandum and Understanding between RIKEN and Brookhaven National Laboratory Concerning the Collaboration on the Spin Physics Program at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)"
QCDCQ完成
Install the QCDCQ
- 2013 センター長にS. H. Aronsonが就任
S. H. Aronson as New RBRC Director





理研BNL研究センター
RIKEN BNL Research Center

Bldg. 510A, Brookhaven National Laboratory
Upton, LI, NY 11973 USA
TEL +1- 631-344-8095
FAX +1- 631-344-8260
URL <http://www.bnl.gov/riken/>



理化学研究所
〒351-0198
埼玉県和光市広沢2-1
TEL 048-462-1111(代表)
FAX 048-462-4613

RIKEN
2-1 Hirosawa, Wako-shi,
Saitama 351-0198 Japan
TEL +81-(0)48-462-1111
FAX +81-(0)48-462-4613
URL <http://www.riken.jp/>

