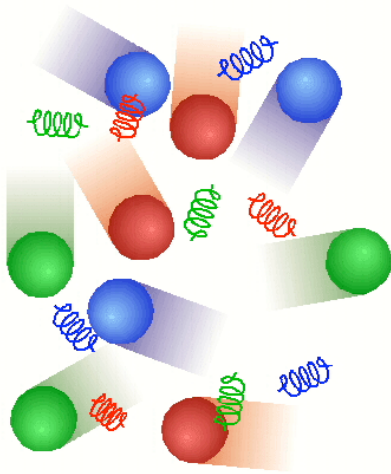


クォーク・グルオンプラズマ

～高エネルギー原子核・原子核衝突で見る初期宇宙～

筑波大学数理物質科学研究科 物理学専攻
三明康郎



5/17 高エネルギーと低エネルギー、クォーク模型、
クォークグルオンプラズマ

5/24 クォークグルオンプラズマの手掛かり、RHIC実験からわかったこと

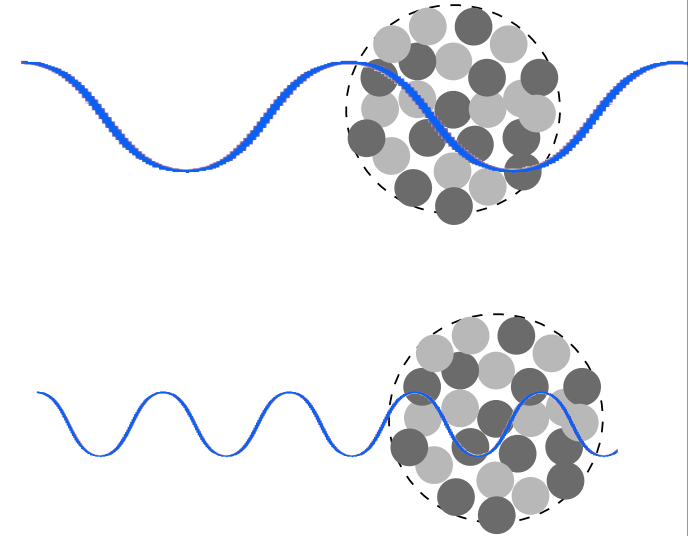
<http://utkhii.px.tsukuba.ac.jp/>

原子核衝突における 高エネルギー と 低エネルギー

- 何を基準にして高エネルギー、低エネルギーと言うのか？
 - 原子核固有の物理量を基準に

基準 1) 原子核の大きさ

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{deBroglie}} &= \frac{h}{p} = \frac{(\hbar)(2\pi)}{p} \\ &\sim \frac{(200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}/c)(2\pi)}{p [\text{MeV}/c]} \\ &\sim \frac{1.2 [\text{fm}]}{p [\text{GeV}/c]}\end{aligned}$$



- 原子核の大きさと入射ビームのdeBroglie波長の関係
 - 原子核； $\sim 10 \text{ fm}$ 、核子； $\sim 1 \text{ fm}$
 - $p \sim 100 \text{ MeV}/c$
 - $\lambda_d \sim 12 \text{ fm} \rightarrow$ すべての核子に同一位相 \rightarrow 原子核全体を見る
 - $p \sim 10 \text{ GeV}/c$
 - $\lambda_d \sim 0.1 \text{ fm} \rightarrow$ 各核子で位相が異なる \rightarrow 核子を見る
- Rutherford散乱実験で電子の影響を無視した理由は？

基準 2) 原子核の固有時間

$$\begin{aligned}\tau_{\text{int}} &\equiv \frac{R}{c\beta_{\text{fermi}}} \\ &\sim \frac{R}{c(p_{\text{fermi}}/m\gamma_{\text{fermi}})} \\ &\sim \frac{10 \text{ [fm]}}{c \cdot 0.2} \sim 50 \text{ [fm/c]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau_{\text{col}} &\equiv \frac{R/\gamma_{\text{beam}}}{c\beta_{\text{beam}}} \\ &\sim \frac{10 \text{ [fm]}/10}{c} \\ &\sim 1 \text{ [fm/c] for } 10 \text{ GeV/c proton}\end{aligned}$$

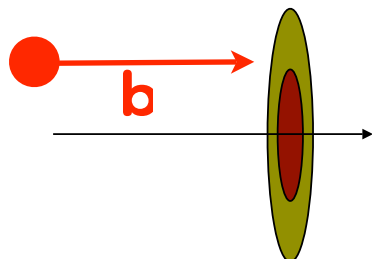
• 原子核の固有時間と衝突時間の関係

- 原子核の固有時間 τ_{int} ~ 核子のフェルミ運動による周回時間
 - フェルミ運動量は原子核のAによらず $\sim 200 \text{ MeV/c}$
 - 原子核の直径 $\sim 10 \text{ fm}$
- 衝突時間 τ_{col} ~ 原子核の表面が接触して離れるまでの時間
 - $\sim (\text{原子核の直径}) / (\text{ビーム速度})$
 - ローレンツ収縮!
- 高エネルギー; $\tau_{\text{col}} \ll \tau_{\text{int}}$
- 低エネルギー; $\tau_{\text{col}} \gg \tau_{\text{int}}$

高エネルギー衝突の特徴

- (衝突時間) \ll (核の固有時間)
 - ”スナップショット”
- 持ち込む角運動量 $\gg \hbar$
 - Partial Wave Analysis \rightarrow Impact Parameter
- 非常に多くの直交した終状態
 - 非干渉
- (deBroglie波長) \sim (平均自由行程) \sim (核力到達距離)
- 核子核子散乱レベルで種々の量子力学的効果
- 粒子の生成時間 $\sim 1 \text{ fm} / c$

基準3) 角運動量の量子化



$$\begin{aligned} L_{\max} &= (A \cdot p_N) \times 2R \\ &= \left(\frac{2.4 \times A^{4/3} p_N}{\hbar} \right) \hbar \\ &\sim (10 A^{4/3} p_N [\text{GeV}/c]) \hbar \end{aligned}$$

- 低エネルギー原子核衝突では衝突で持ち込む角運動量が小さいので角運動量の量子化が必須であった
 - Partial Wave Analysis
 - s-wave、p-waveなど量子状態間の干渉効果が重要
- 高エネルギーでは衝突で持ち込む角運動量が圧倒的に大きい
 - Impact Parameterを古典力学的に取り扱える
 - Impact Parameterが少し変わると、終状態が大きく異なるため、**～非干渉**

高エネルギー原子核衝突の難しさ



$$\begin{aligned}\lambda_{\text{m.f.p}} &= \frac{1}{n\sigma_{\text{nn}}} = \frac{1}{\frac{A}{\frac{4\pi}{3}R^3}\sigma_{\text{nn}}} \\ &= \frac{4\pi}{3} \frac{(1.2 \times A^{1/3})^3}{A\sigma_{\text{nn}}} \sim 2 \text{ [fm]} \\ &\quad \text{with } \sigma_{\text{nn}} \sim 40 \text{ mb} = 4 \text{ fm}^2\end{aligned}$$

- (平均自由行程) \sim (核力の到達距離)
 - $\lambda_{\text{m.f.p.}} \sim \lambda_{\text{NN}}$
- 生成粒子の生成時間 (Hadronization time)
 - 有限の大きさ($\sim 1 \text{ fm}$)を持つ多体系が真空から生成され、その基底状態に落ち着くまでの緩和時間 ($\tau_{\text{had}} \sim 1 \text{ fm}/c$)
 - 相対論的效果により τ_{had} の間に $R \gg c\tau_{\text{had}}$ を飛ぶ

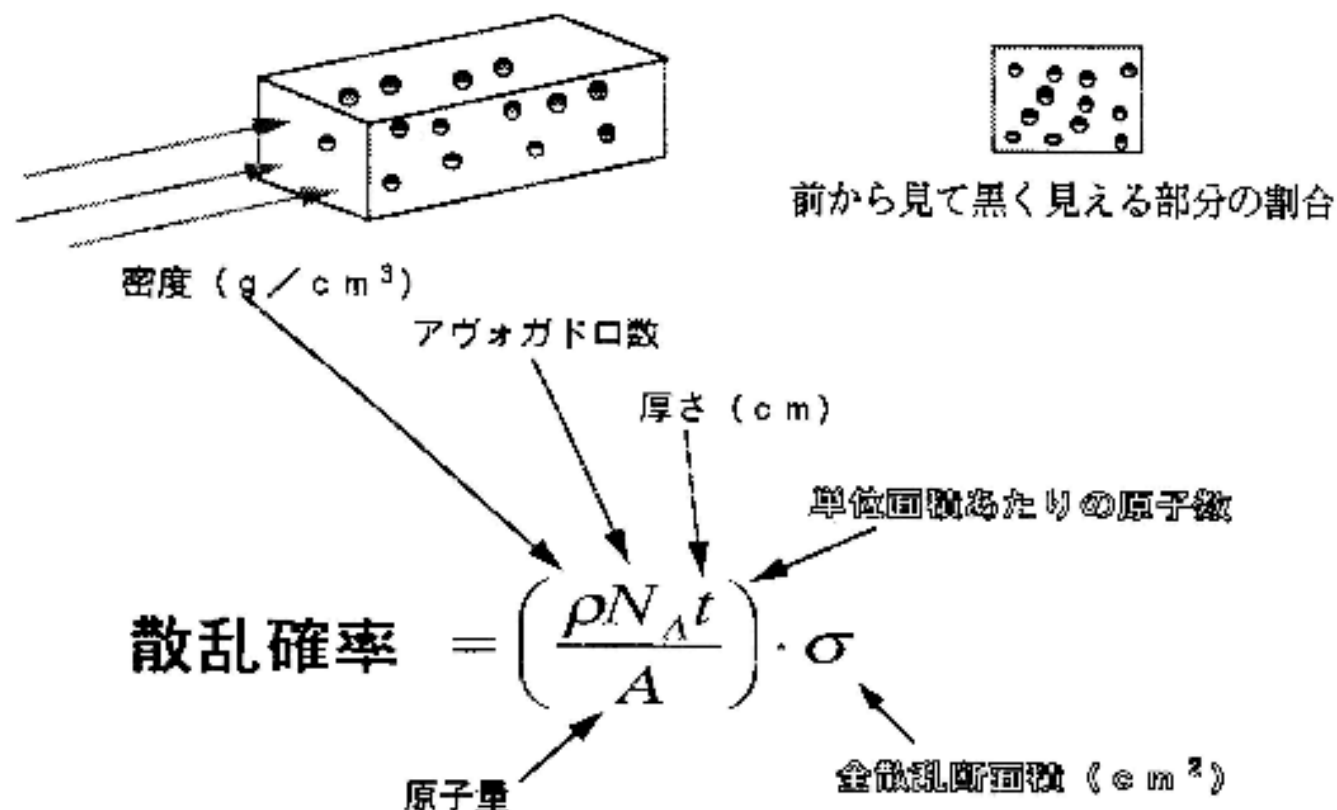
衝突断面積から高エネルギーの本質を眺める

全散乱断面積

散乱確率を面積で表現

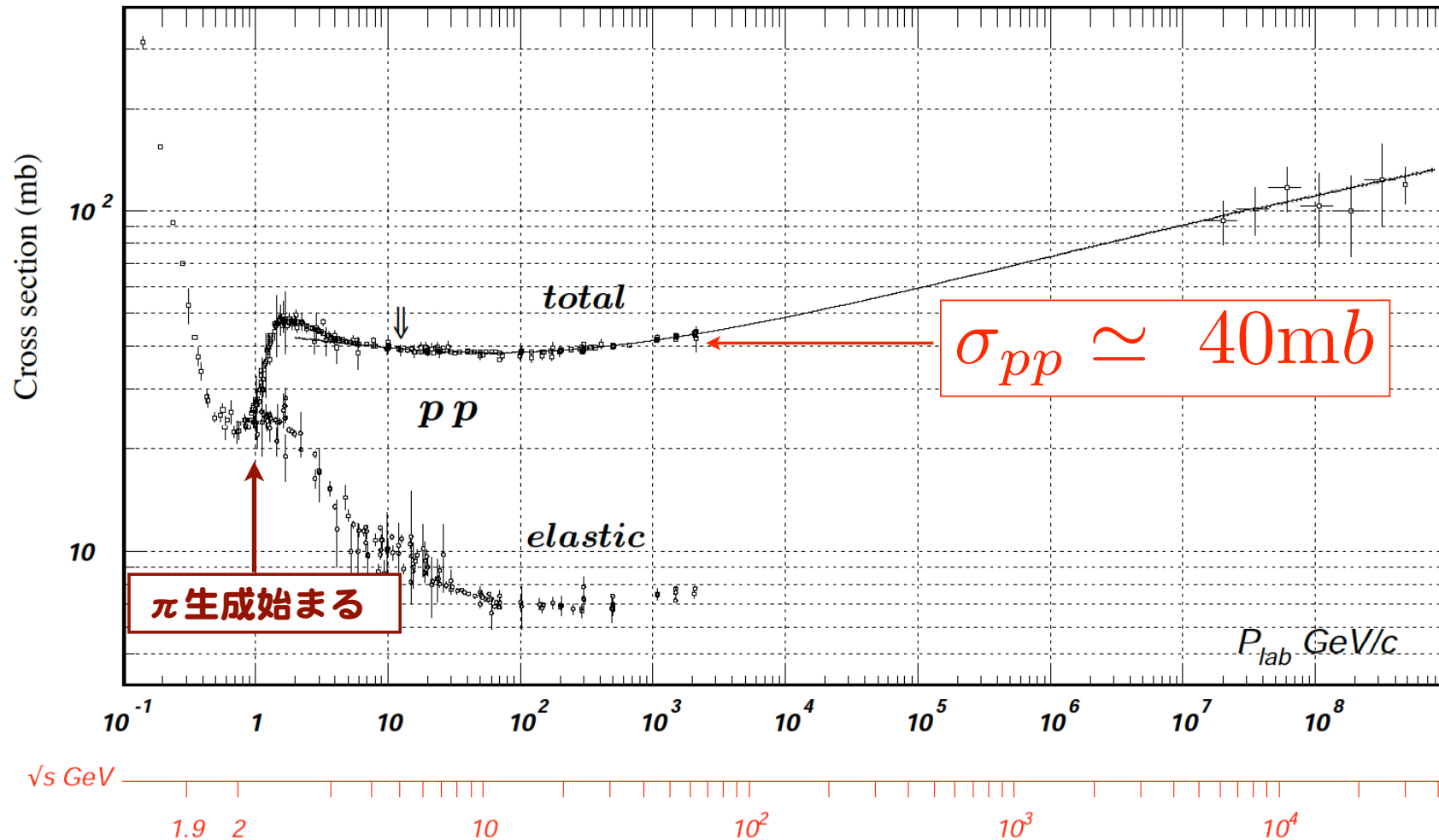
散乱中心が重なり合う確率を無視

1 barn = 10^{-24} cm^2 (原子核程度)



陽子・陽子衝突

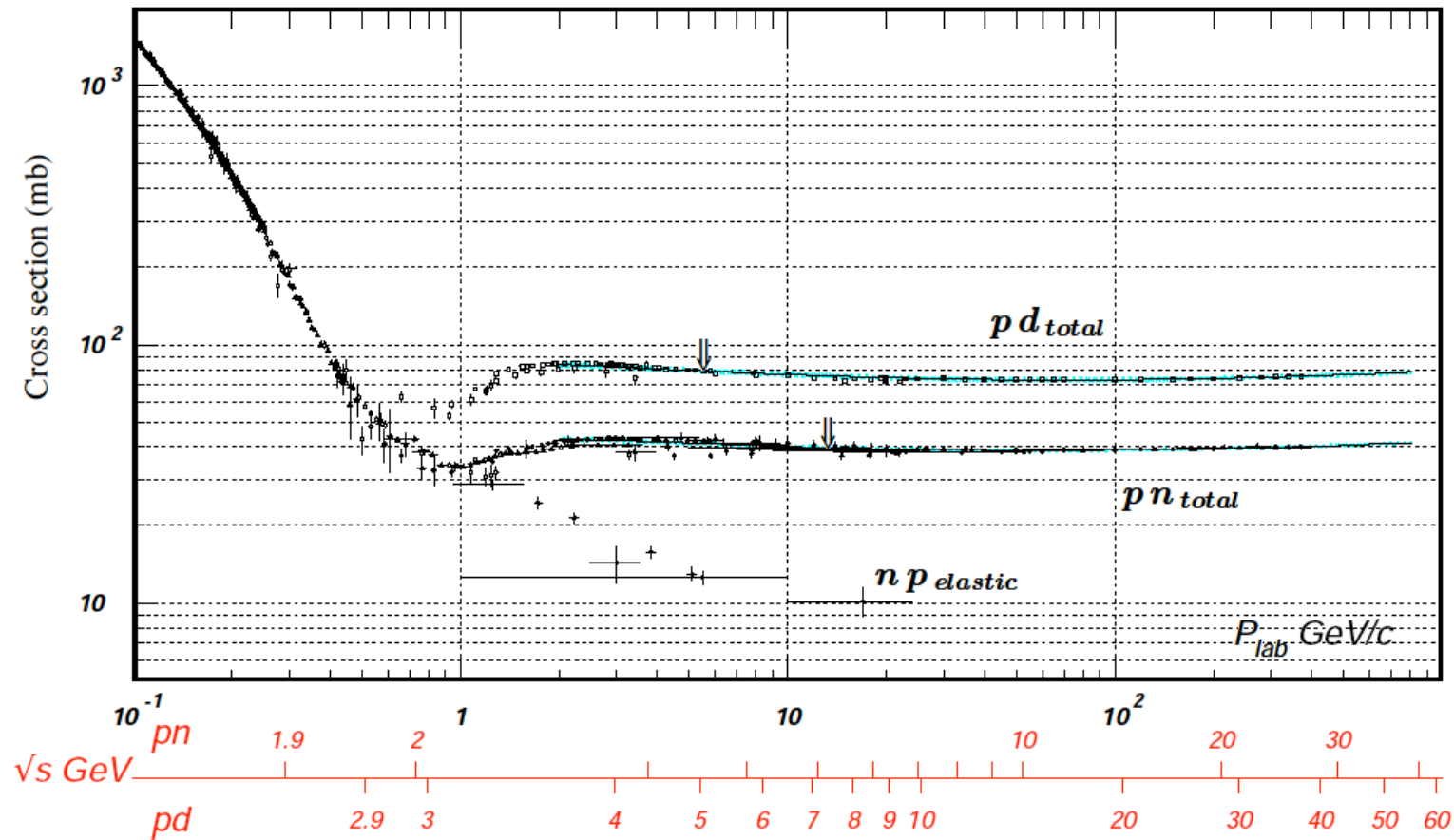
Review of Particle Physics,
W.-M. Yao et al., J. Phys. G33, 1 (2006)



- 高エネルギーでは、ほぼ一定

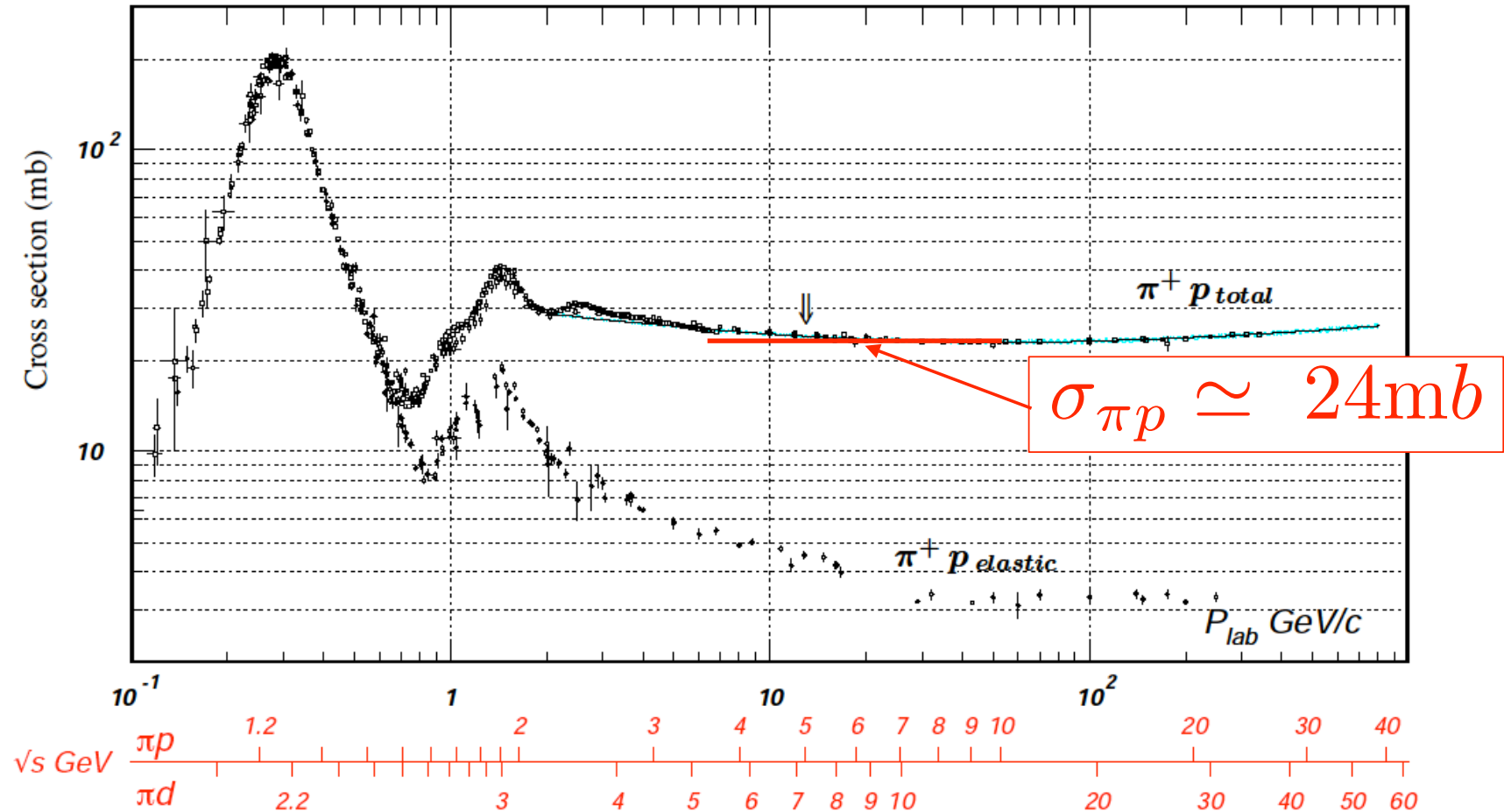
陽子・中性子、陽子・重陽子

Review of Particle Physics,
W.-M. Yao et al., J. Phys. G33, 1 (2006)



π 中間子・陽子衝突断面積

Review of Particle Physics,
W.-M. Yao et al., J. Phys. G33, 1 (2006)



- 高エネルギーでやはり一定、 $\sim 20 \text{ mb}$

幾何学的断面積

beam



陽子

1つの陽子

重陽子

陽子と中性子

$$\frac{\sigma_{pn}}{\sigma_{pd}} = \frac{40 [mb]}{80 [mb]} = \frac{1}{2}$$

beam



qqq

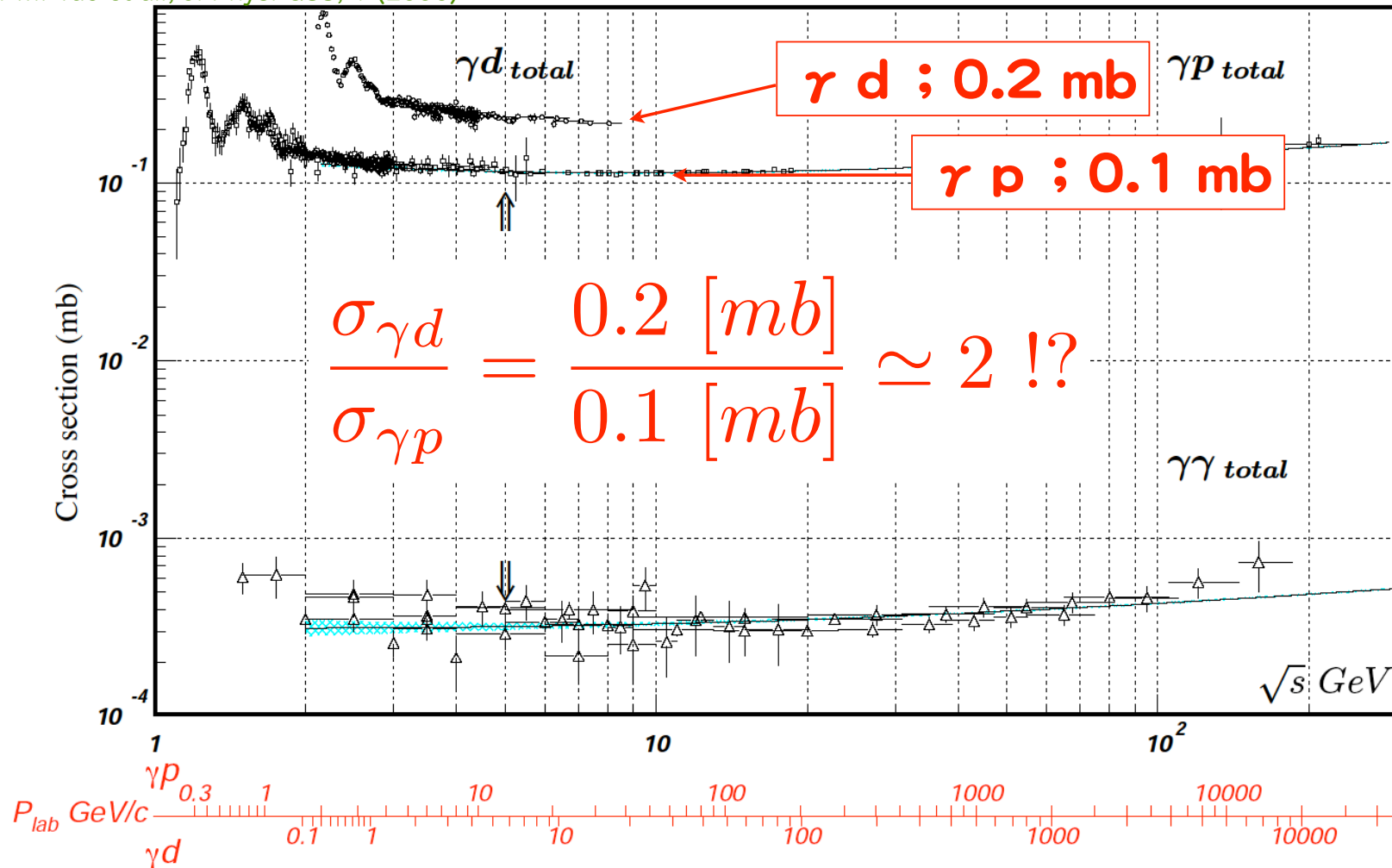
3つのクォーク

q \bar{q}

$$\frac{\sigma_{pp}}{\sigma_{p\pi}} = \frac{40 [mb]}{24 [mb]} \sim \frac{3}{2}$$

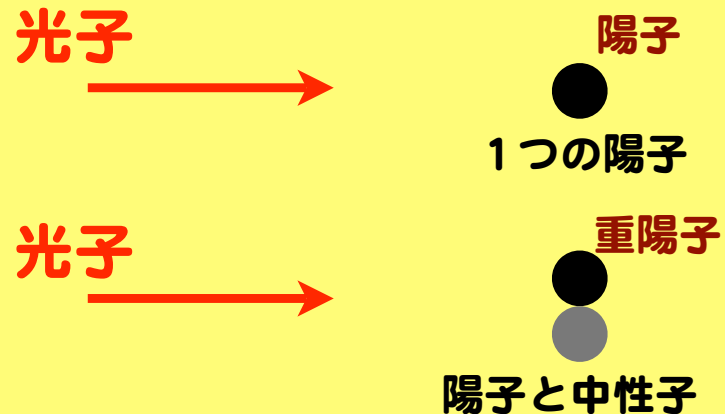
光子・陽子と光子・重陽子の怪

Review of Particle Physics,
W.-M. Yao et al., J. Phys. G33, 1 (2006)



- 光子は電磁波 (電磁相互作用を中性子と?)

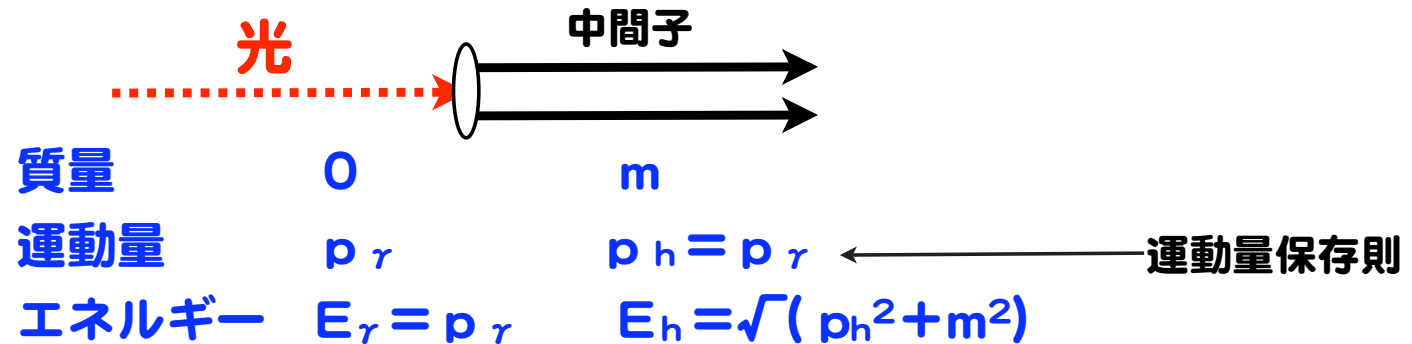
光子・陽子と光子・重陽子の怪とは



$$\frac{\sigma_{\gamma d}}{\sigma_{\gamma p}} = \frac{0.2 \text{ [mb]}}{0.1 \text{ [mb]}} \simeq 2$$
$$\rightarrow \sigma_{\gamma p} \simeq \sigma_{\gamma n}$$

- 光子は電磁波、電荷と相互作用する
- 電荷を持たない中性子と電荷を持つ陽子と断面積が同じなのはなぜか？
- 断面積は陽子・陽子の約 100分の1

不確定性原理による仮想粒子

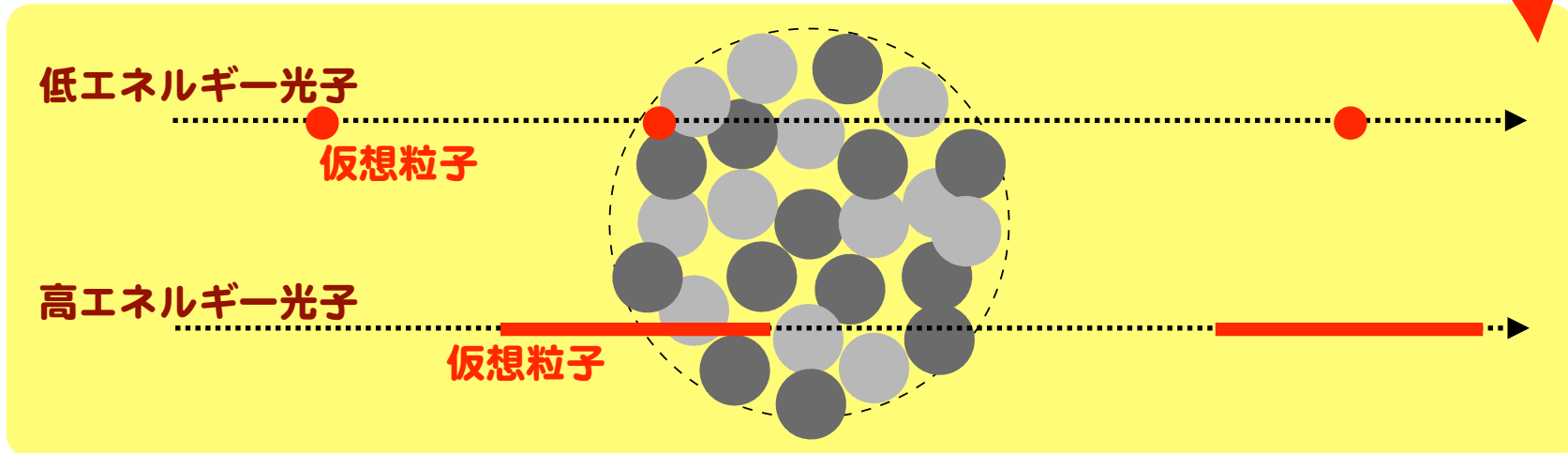


- 光子は自由空間において対生成を起こすことは出来ない。
 - エネルギー保存則と運動量保存則を同時に満たせない
- 不確定性原理 ($\Delta E \cdot \Delta t \sim h$) で許される範囲で、中間子対を作ることは可能
 - ベクター中間子模型(vector dominance model)の成功

$$\begin{aligned}
 \Delta E &= 2\sqrt{p^2 + m^2} - E_\gamma \\
 &= 2\sqrt{E_\gamma^2 + m^2} - E_\gamma \\
 &= 2m\sqrt{(E_\gamma/m)^2 + 1} - E_\gamma \\
 &\sim 2m
 \end{aligned}$$

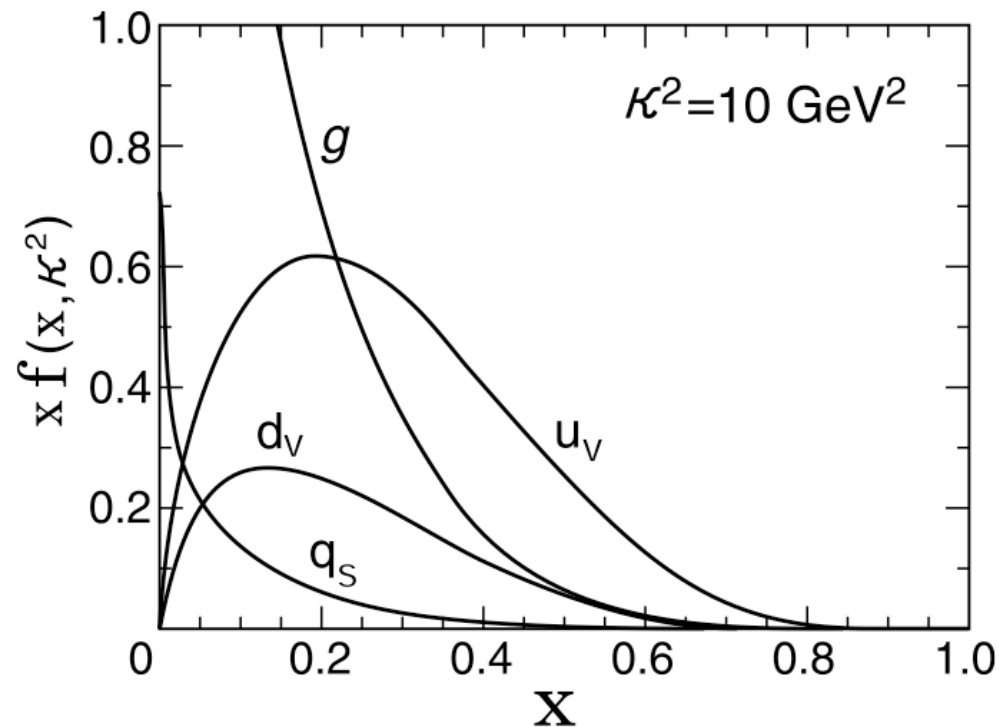
$$\begin{aligned}
 \Delta t &\sim \frac{h}{\Delta E} \\
 &\simeq \frac{h}{mc^2} \\
 L = c\Delta t &\simeq \frac{h}{mc} = \lambda_h^{\text{compton}}
 \end{aligned}$$

高エネルギー衝突の本質のひとつ



- 仮想粒子の実体化
 - エネルギーが高くなると仮想粒子の生存時間が γ 倍される
 - 光子・原子核衝突；光子がベクター中間子に化け、ハドロン衝突を起こすために、中性子とも同じ相互作用
- 相対論的効果により、衝突時間が著しく短い
 - 不確定性原理によりエネルギー不確定性が時間に反比例して大きくなる
- 超高エネルギーの原子核・原子核衝突の場合、原子核を構成している根源の力、強い相互作用の媒介粒子のグルオンが実体化
 - →強い相互作用の媒介粒子であるグルオンの実体化

Virtual ParticleがMain Player



- 核子の構造
 - 陽子中のParton分布
 - Valence quarkとSea quark
 - Gluonが多い
- “Wee Parton”

物質の階層構造と クォーク模型

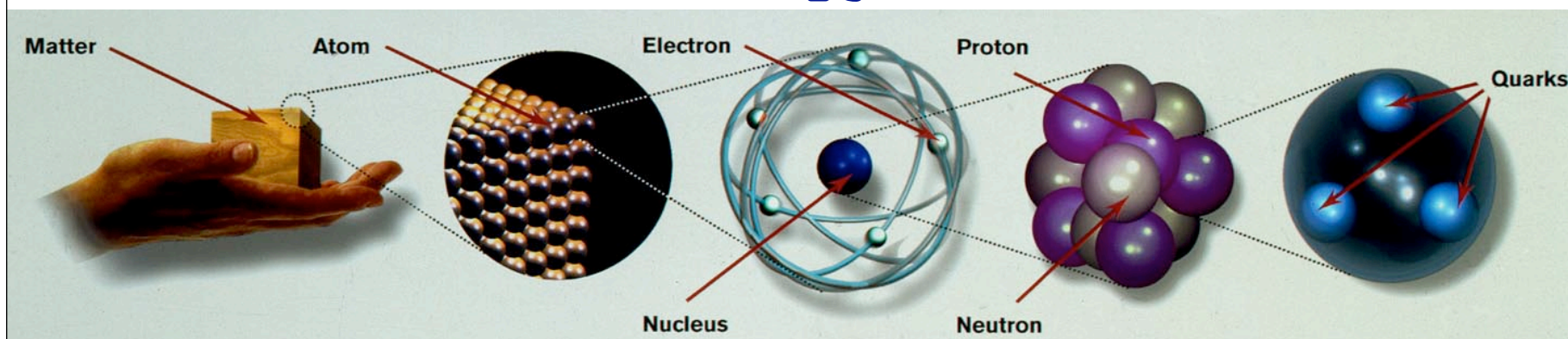
分子・原子

原子核

電子

陽子・
中性子

クォーク



10 cm

10^{-6} cm

10^{-8} cm

10^{-12} cm

$<10^{-18}$ cm

様々なハドロン (クォーク多体系)

色の自由度

物質粒子			ゲージ粒子
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 ν_e eニュートリノ	 ν_μ μニュートリノ	 ν_τ τニュートリノ
	 e 電子	 μ ミューオン	 τ タウ
ヒッグス場に伴う粒子 (未発見)			 H ヒッグス粒子

強い力

 g
グルーオン

電磁力

 γ
光子

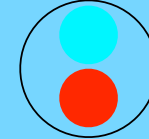
弱い力

 W^+, W^-, Z
W ボゾン Z ボゾン



バリオン

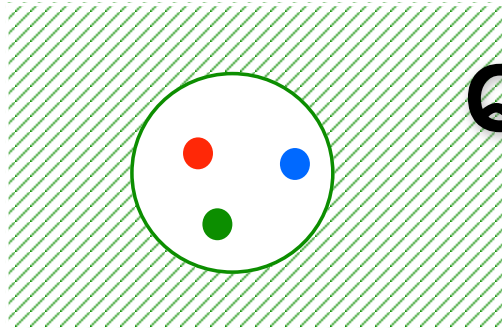
陽子 ; (uud)
 反陽子 ; $(\bar{u}\bar{u}\bar{d})$
 中性子 ; (udd)
 Λ ; (uds)
 Ω ; (sss)
 ⋮



メソン

π^+ 中間子 ; $(u\bar{d})$
 π^- 中間子 ; $(\bar{u}d)$
 K^+ 中間子 ; $(u\bar{s})$
 ϕ 中間子 ; $(s\bar{s})$
 J/ψ 中間子 ; $(c\bar{c})$
 ⋮

- バリオン (重粒子) は、3個のクォーク、メソン (中間子) クォーク・反クォーク対から構成される
- クォークはフェルミ統計に従う
 - 色の自由度が無いと、 Ω 粒子はあり得ない
 - ハドロンは中性色
- 他の組み合わせは？
 - ペンタクォーク??、シングルクォーク???
 - 対称性だけから考えると (u,u,d,d,s,s) が存在してもいいはず

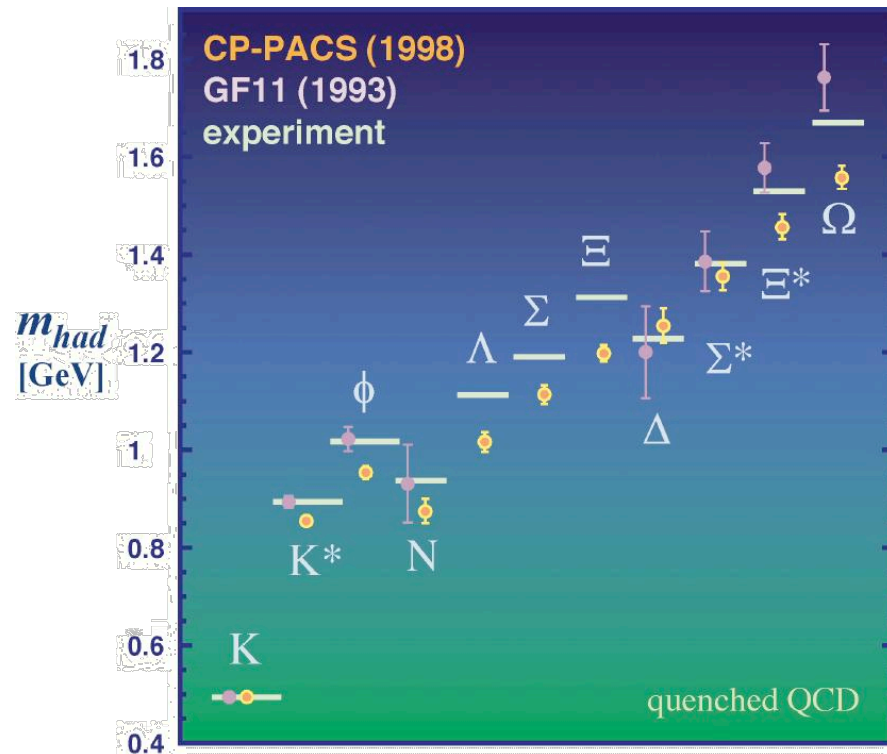
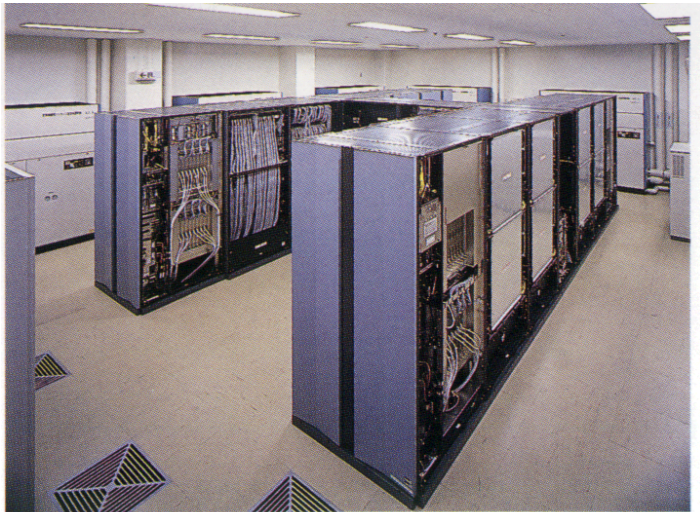


QCDとBag Model

- QCDの2大特徴
 - Asymptotic Freedom (漸近的自由) ; 1 fm以下で自由粒子
 - Confinement (閉じ込め)
- 他の力と全く異なった性質の起源を真空中に求める
 - 真空は一定のエネルギー密度Bを持ち、ハドロン粒子は真空中に出来た特殊な空間 (Bag) に閉じ込められた状態と記述。
- ハドロンのエネルギー = (Bag内での運動エネルギー) + (真空のエネルギー)
 - 第一項 ; 基底状態では不確定性原理 ($\Delta p \cdot \Delta x \sim \hbar$) により
 - 零点エネルギー $\varepsilon = p \sim 1/R$
 - 第二項 ; 体積に比例
- 安定点 ; $dE/dR = 0$
- バッグ定数B
 - $E = 4BV$ に $E \sim 1 \text{ GeV}$ 、 $R \sim 1 \text{ fm}$ を代入
 - 自然単位系を利用 ($1 \text{ fm} \rightarrow 5.07 \text{ GeV}^{-1}$)

Lattice QCDによるハドロンの説明

筑波大学・計算物理学センター
CP-PACS



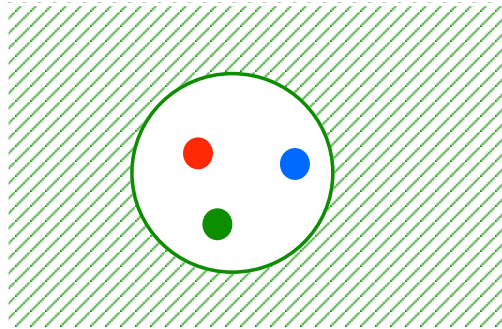
ハドロン質量の計算

- 様々なハドロンの質量の計算に成功
- ハドロン以外のクォーク多体系の存在形態は？

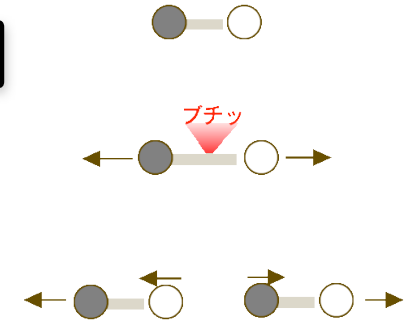
クォーク模型を支持する事柄



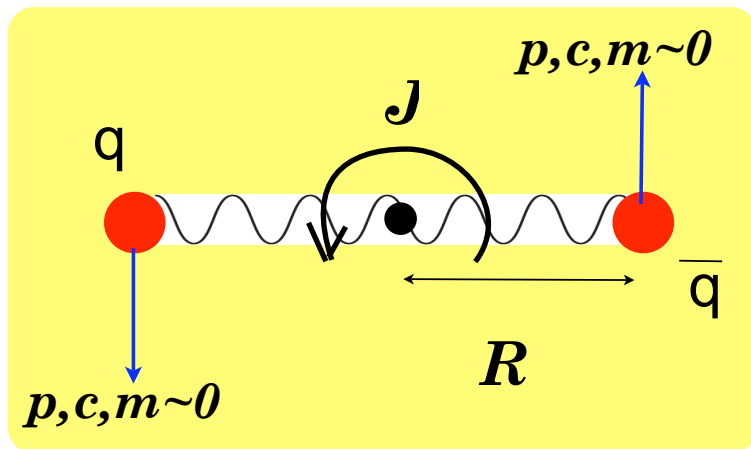
- ハドロンの質量
- 陽電子・電子消滅過程の比
- 核子の異常核磁気モーメント
- メソンとバリオンの断面積比
- メソンの質量とスピンの関係 (Regge軌跡)
-
-
-



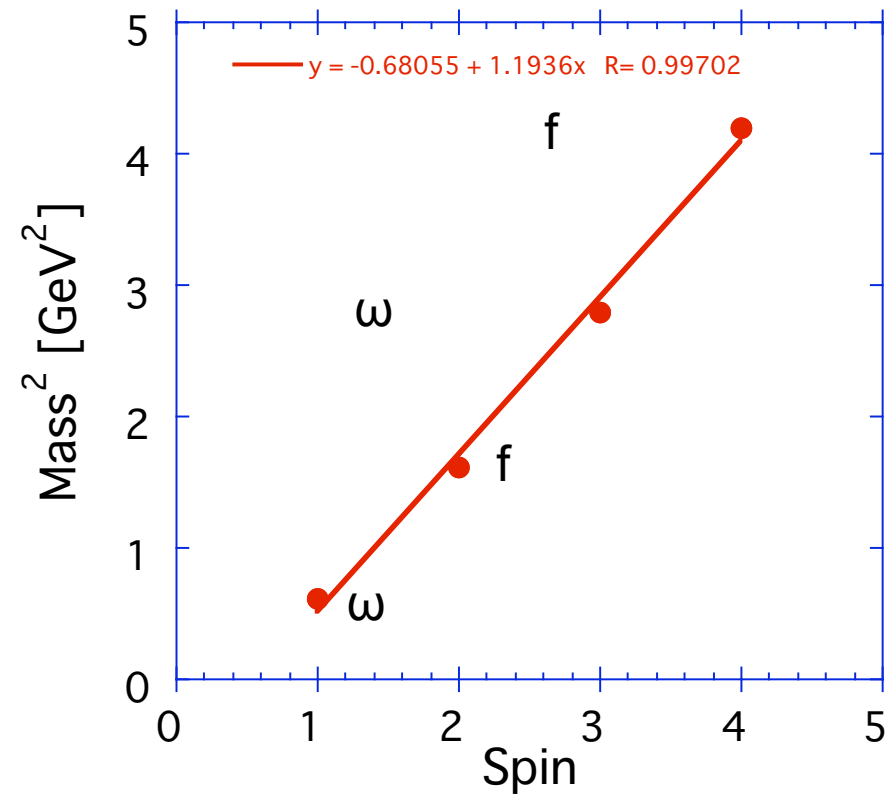
QCDとBag Model



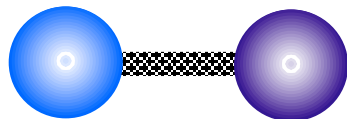
- QCDの2大特徴
 - Asymptotic Freedom (漸近的自由) ; 1 fm以下で自由粒子
 - Confinement (閉じ込め)
- 他の力と全く異なった性質の起源を真空に求める
 - 真空は一定のエネルギー密度Bを持ち、ハドロン粒子は真空中に出来た特殊な空間 (Bag) に閉じ込められた状態と記述。
- ハドロンのエネルギー = (Bag内での運動エネルギー) + (真空のエネルギー)
 - 第一項 ; 基底状態では不確定性原理 ($\Delta p \cdot \Delta x \sim h$) により
 - 零点エネルギー $\varepsilon = p \sim 1/R$
 - 第二項 ; 体積に比例
- 安定点 ; $dE/dR = 0$
- バッグ定数B
 - $E = 4BV$ に $E \sim 1 \text{ GeV}$ 、 $R \sim 1 \text{ fm}$ を代入
 - 自然単位系を利用 ($1 \text{ fm} \rightarrow 5.07 \text{ GeV}^{-1}$)
 - $B^{1/4} \sim 0.17 \text{ GeV}$



クォーク間に働く力 (中間子のスピンと質量)



- Regge軌跡



Charm

反Charm

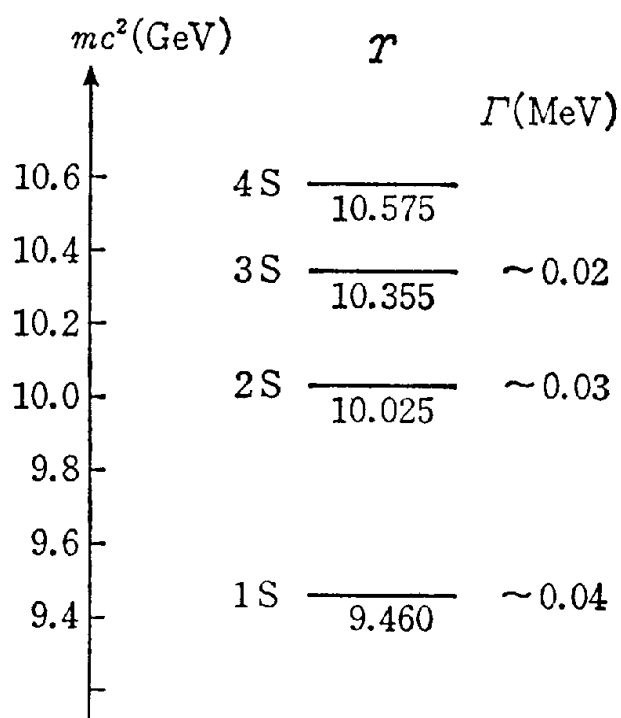
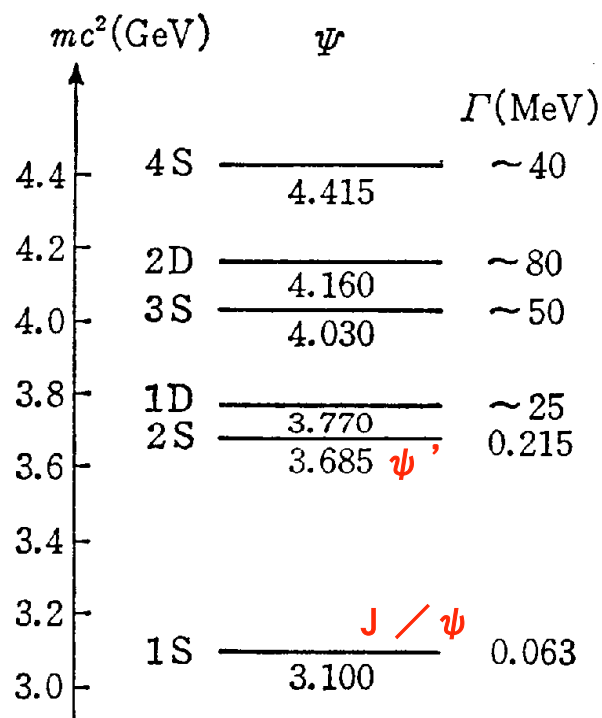
J/ψ粒子

QCDの Bohr Atom

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \Delta + V(r) \right) \psi = \varepsilon \psi$$

$$V(r) = \frac{c}{r} + \sigma \cdot r$$

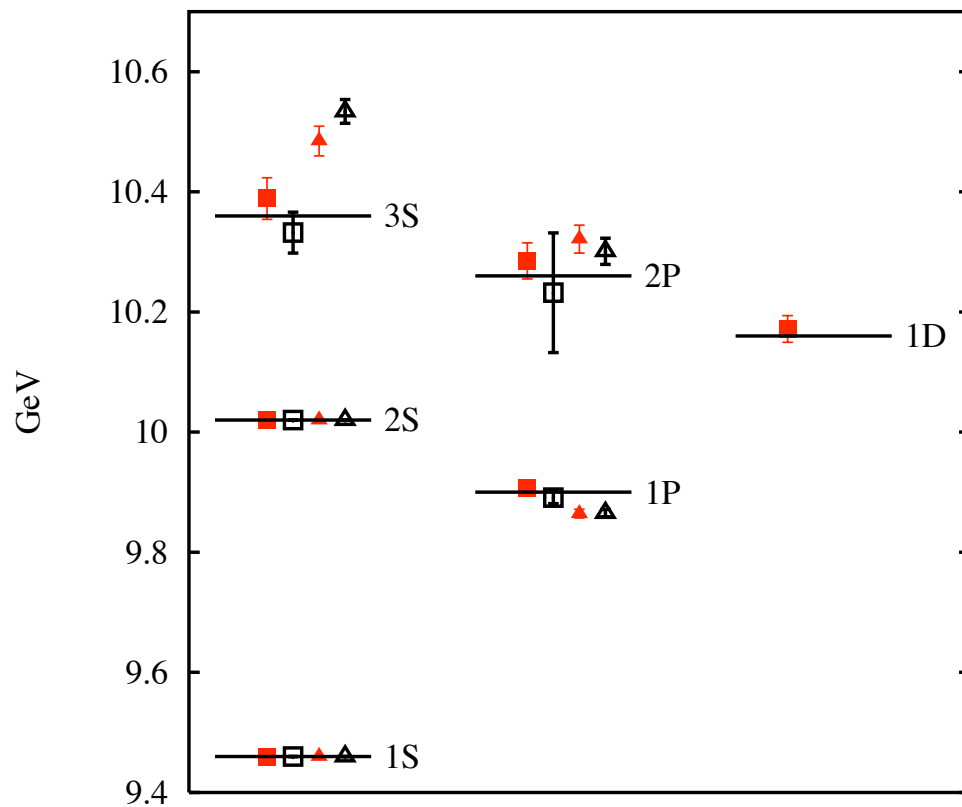
$$M_{J\psi} c^2 = 2m_c c^2 + \varepsilon$$



- $\sigma \sim 1 \text{ GeV/fm}$, $c \sim 0$. 1 GeV fm で良い一致

Υ (ウプシロン) の例

Review of Particle Physics,
W.-M. Yao et al., J. Phys. G33, 1 (2006)



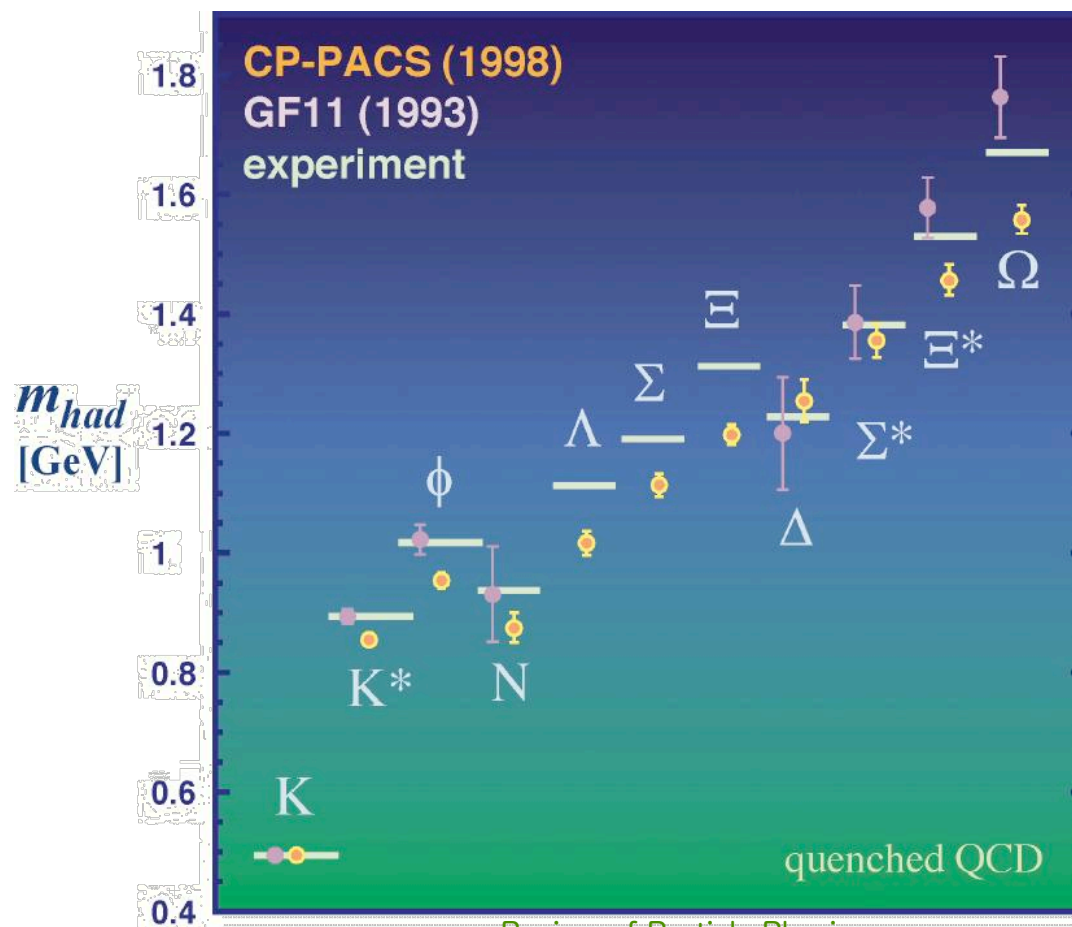
- Lattice QCD計算
- Bohr Atomと同じ
-

クォーク模型の成功

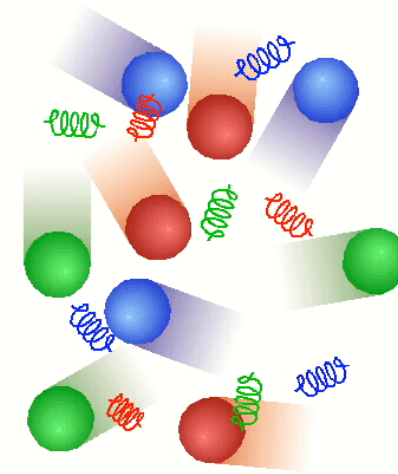
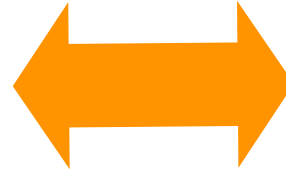
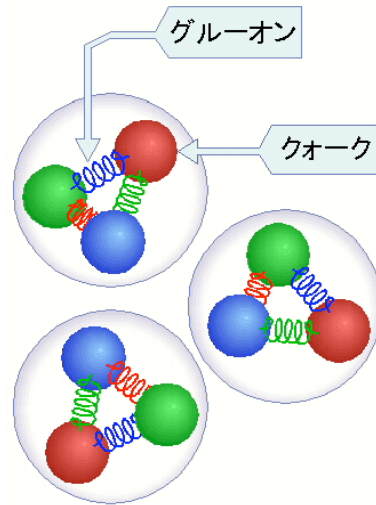
筑波大学・計算物理学センター
CP-PACS



ハドロン質量の計算

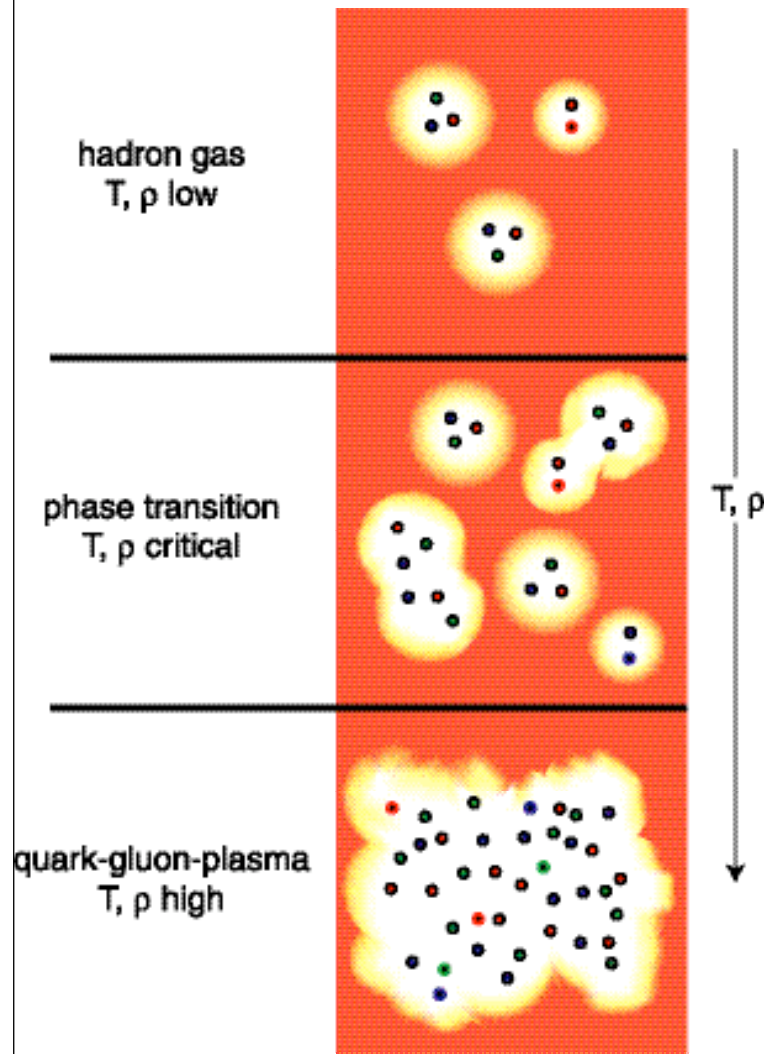


Review of Particle Physics,
W.-M. Yao et al., J. Phys. G33, 1 (2006)



クォーク・グルオン プラズマ(QGP)

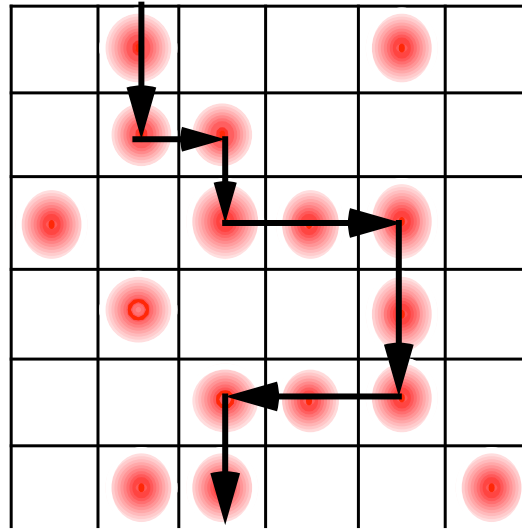
クォーク・グルオンプラズマ (QGP) とは



- ハドロンの構造；
 - ハドロン（陽子、中性子や中間子）は、1fm程度の大きさを持ちクォークと媒介粒子グルオンから構成されている。
 - 3つのクォークかクォーク・反クォーク対
 - 量子色力学 (QCD) の世界
 - クォークの閉じ込め
 - 漸近的自由度
 - バッグ模型によるハドロンの構造の理解
- 大きさを持つハドロンを狭い空間に多重発生させると（高温・高密度状態）、ハドロンが連結状態した状態が起こる？
 - クォーク・グルオンが比較的大きな体積中を自由に飛び回る状態が実現する。
 - クォーク・グルオンプラズマ状態

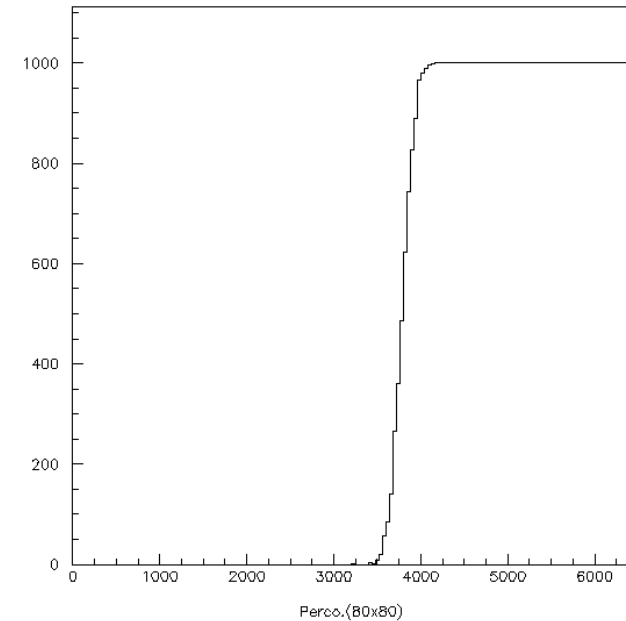
巨視的連結によるQGP相転移

Toy Model



- 有限の大きさを持つパイ中間子が多重発生し、巨視的連結が起こる
 - クォークが隣のセル（中間子）に移動が可能
 - QGP生成
 - 巨視的連結(Percolation)が起こる確率
パイ中間子の密度に対し、1次相転移的の振舞

巨視的連結の起こる頻度



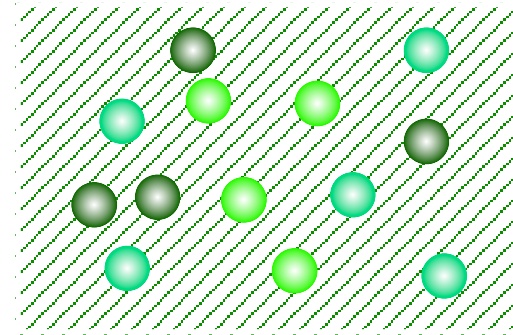
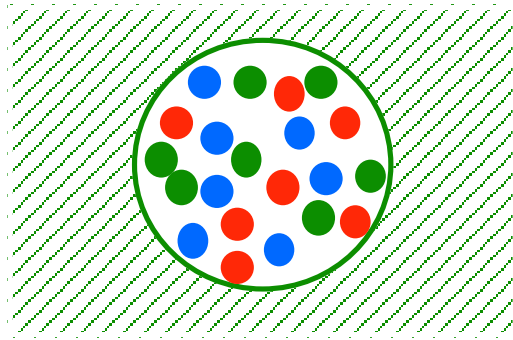
$$\sigma_{pp} \approx 40mb \xrightarrow{\times \frac{2}{3}} \sigma_{p\pi} \approx 24mb$$

$$\sigma_{p\pi} \approx 24mb \xrightarrow{\times \frac{2}{3}} \sigma_{\pi\pi} \approx 16mb$$

$$\therefore r_{\pi\pi} = 0.7 \text{ fm} (\because \sigma_{\pi\pi} = \pi \cdot r_{\pi\pi}^2)$$

$$\varepsilon = \frac{m_{\pi} \times 0.57}{r_{\pi\pi}^3} \approx 230 \text{ MeV} / \text{fm}^3$$

Bag ModelによるQGP相転移 (1)



理想フェルミ、ボーズ気体の自由度あたりのエネルギー密度

$$\varepsilon_{boson} = \frac{\pi^2}{30} T^4 \quad \varepsilon_{fermi} = \frac{7\pi^2}{240} T^4 \quad \text{Stefan-Boltzmann's law}$$

クォーク、グルオンの自由度

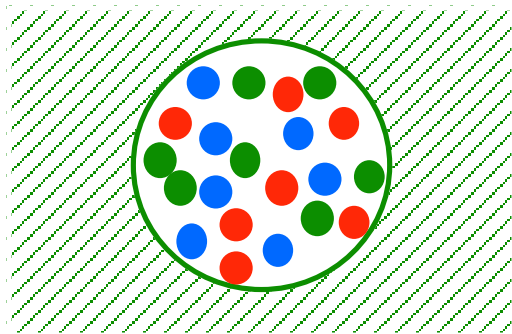
$$f_{quark} = 2 \times \overset{\text{spin}}{3} \times \overset{\text{color}}{3} \times \overset{q, q\text{-bar}}{2} \times 2 = 24$$

$$f_{gluon} = 2 \times \overset{\text{spin}}{8} = 16$$

パイオンガスの自由度

$$f_{\pi} = 3$$

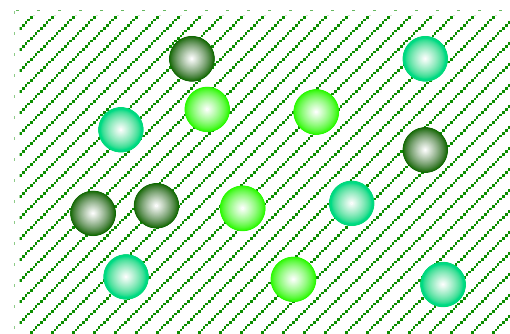
Bag ModelによるQGP相転移 (2)



QGPのエネルギー密度

$$\begin{aligned}\epsilon_{QGP} &= f_{gluon} \cdot \epsilon_{boson} + f_{quark} \cdot \epsilon_{fermi} \\ \therefore \epsilon_{QGP} &= \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B\end{aligned}$$

$$\begin{cases} \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B \\ p_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B \end{cases}$$



高温パイオンガスのエネルギー密度

$$\begin{aligned}\epsilon_{\pi} &= f_{\pi} \cdot \epsilon_{boson} \\ \therefore \epsilon_{\pi} &= \frac{\pi^2}{10} T^4\end{aligned}$$

$$\begin{cases} \epsilon_{\pi} = \frac{\pi^2}{10} T^4 \\ p_{\pi} = \frac{\pi^2}{30} T^4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \epsilon_\pi = \frac{\pi^2}{10} T^4 \\ p_\pi = \frac{\pi^2}{30} T^4 \end{cases} \quad \begin{cases} \epsilon_{\text{QGP}} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 + B \\ p_{\text{QGP}} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B \end{cases}$$

相転移 のときは $T_\pi^{\text{crit}} = T_{\text{QGP}}^{\text{crit}} \quad p_\pi^{\text{crit}} = p_{\text{QGP}}^{\text{crit}}$

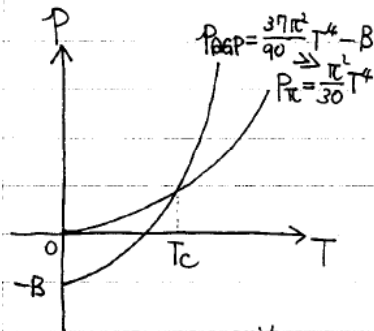
$$\therefore \frac{\pi^2}{30} T_c^4 = \frac{37\pi^2}{90} T_c^4 - B$$

$$\left(\frac{\pi^2}{30} - \frac{37\pi^2}{90}\right) T_c^4 = -B \quad \therefore T_c^4 = \frac{90}{34\pi^2} B$$

$$\text{転移のおこる温度 } T_c = \left(\frac{90}{34\pi^2}\right)^{1/4} B^{1/4}$$

$$= 0.72 B^{1/4} \cong 0.12 \text{ GeV}$$

$$(\because B^{1/4} \sim 0.17 \text{ GeV})$$

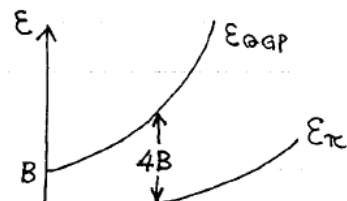


$T = T_c$ のときの energy density をそれぞれ計算する。

$$\begin{cases} \epsilon_\pi^{\text{crit}} = \frac{\pi^2}{10} T_c^4 = \frac{\pi^2}{10} \frac{90}{34\pi^2} B = \frac{9}{34} B \\ \epsilon_{\text{QGP}}^{\text{crit}} = \frac{37\pi^2}{90} T_c^4 + B = \frac{37\pi^2}{90} \left(\frac{90}{34\pi^2} B\right) + B = \frac{145}{34} B \end{cases}$$

$$\epsilon_{\text{QGP}}^{\text{crit}} > \epsilon_\pi^{\text{crit}} \text{ である!!!}$$

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{\text{QGP}}^{\text{crit}} - \epsilon_\pi^{\text{crit}} = \frac{136}{34} B = 4B : \text{潜熱}$$



Bag Model で $\epsilon = 4BV$ と対比.

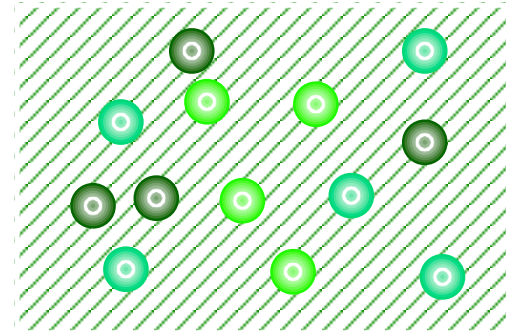
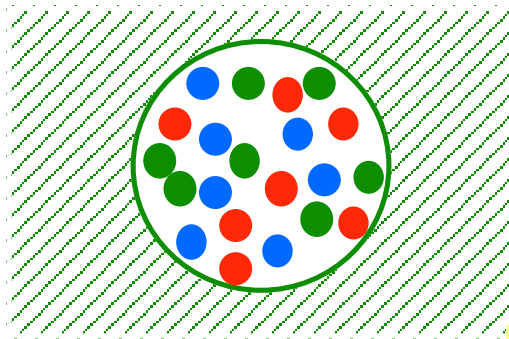
$$\epsilon = 4B$$

巨大 Bag \approx QGP を作るのに 4B 必要!!!

Bag ModelによるQGP相転移 (3)

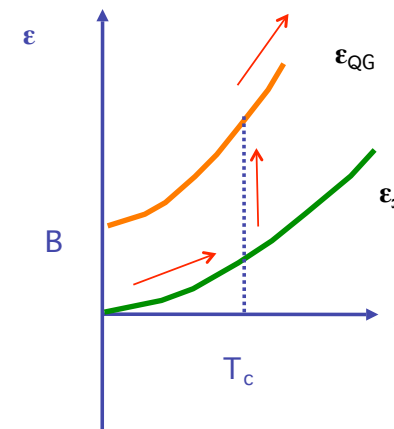
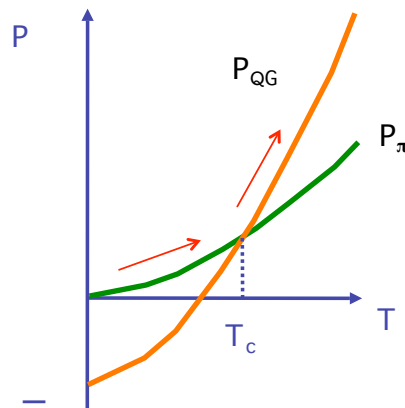
μ 、 $m=0$ の理想フェルミ、ボーズ気体の場合

Toy Model



$$\begin{cases} \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B \\ p_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B \end{cases}$$

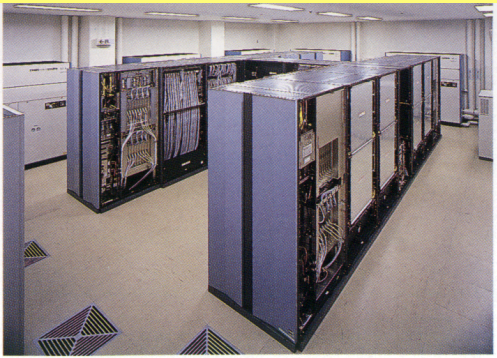
$$\begin{cases} \epsilon_\pi = \frac{\pi^2}{10} T^4 \\ p_\pi = \frac{\pi^2}{30} T^4 \end{cases}$$



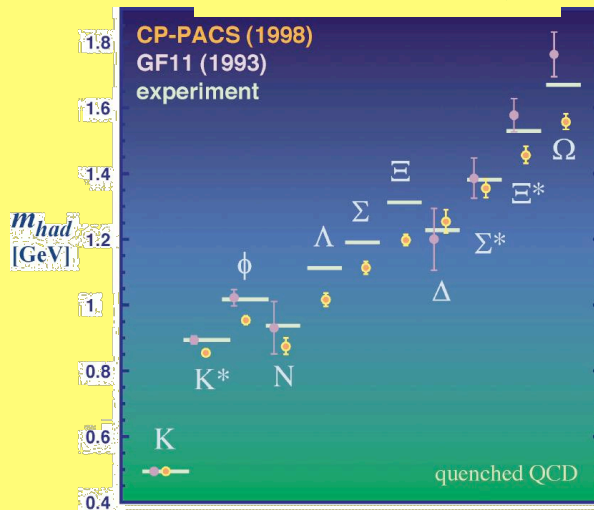
- 相転移点では温度、圧力が等しくなる
- 低温ではハドロンガス状態、高温ではQGP状態
- 潜熱の発生

Lattice QCDによるQGP相転移

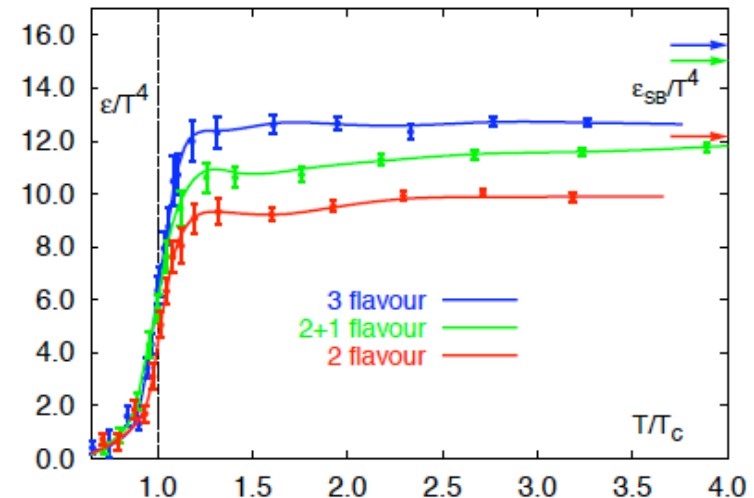
筑波大学・計算物理学センター
CP-PACS



ハドロン質量の計算

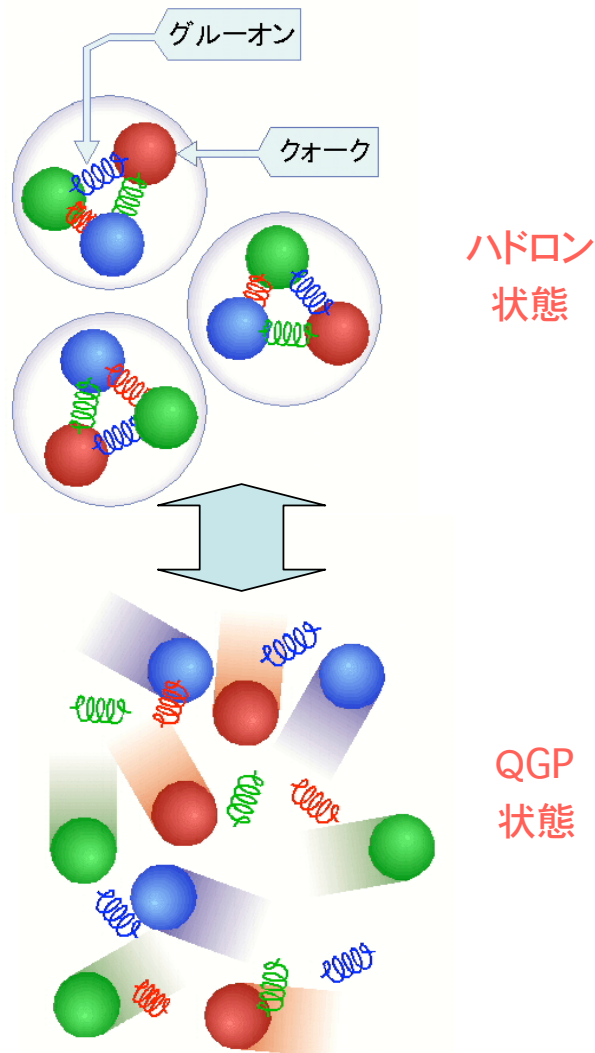


F. Karsch, Lect. Notes Phys. 583 (2002) 209.



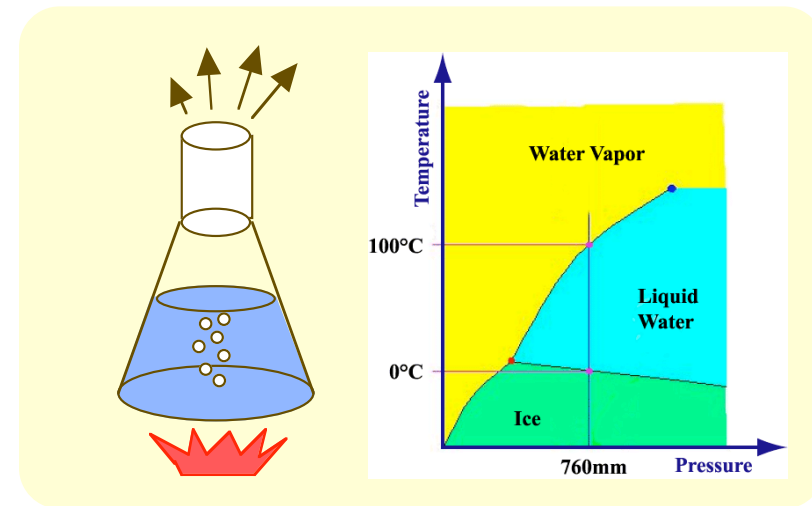
- 1次相転移かも！？
- $\epsilon_c \sim 0.6 - 1.2 \text{ GeV/fm}^3$

クォーク・グルオンプラズマ相転移



• QGP

- 物質の存在の仕方として全く未知
- クォークとグルオンが比較的大きな体積を自由に飛び回り、その振る舞いを統計力学的に取り扱うことが出来る
- 相転移



QGPの生成により期待される性質

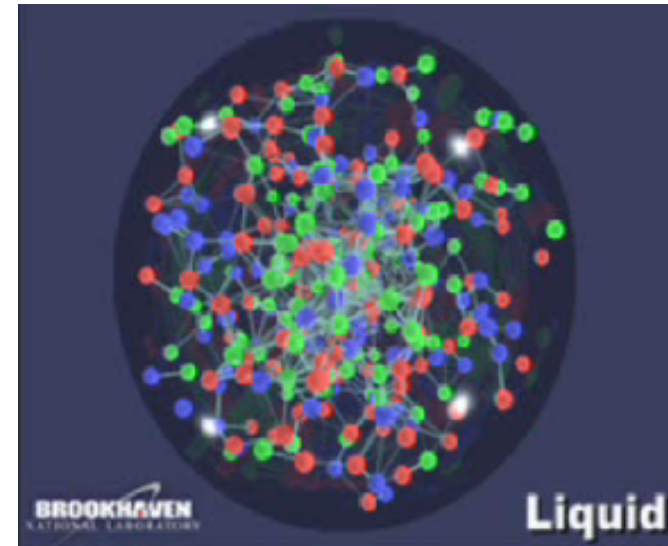
$\epsilon_{\text{QGP}} \sim 2 \text{ [GeV/fm}^3\text{]}$ ← 例えば、Lattice QCDなど

$$\langle n_{q,\bar{q}} \rangle \sim \frac{\epsilon_{\text{QGP}}}{\langle m_T \rangle} \sim \frac{2\text{GeV}}{0.4\text{GeV}} \sim 5$$

$$\lambda_q = \frac{1}{n\sigma_{qq}} \\ \sim \frac{1}{5 \times 0.4} = 0.5 \text{ [fm]}$$

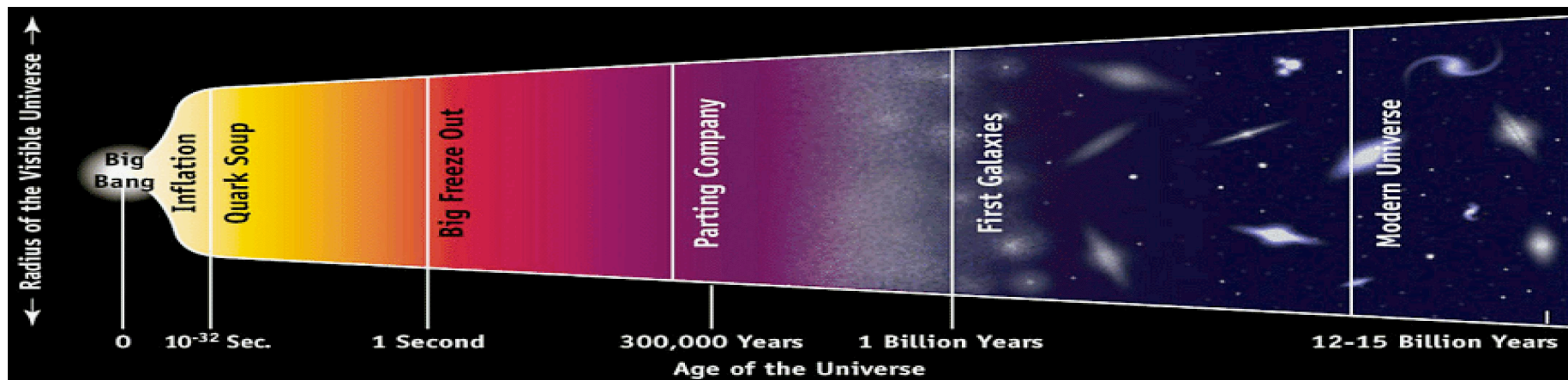
$$\lambda_q \ll R_{\text{system}}$$

$$\therefore \sigma_{qq} \sim \frac{\sigma_{NN}}{3 \times 3} \sim \frac{4[\text{fm}^2]}{9} \sim 0.4$$

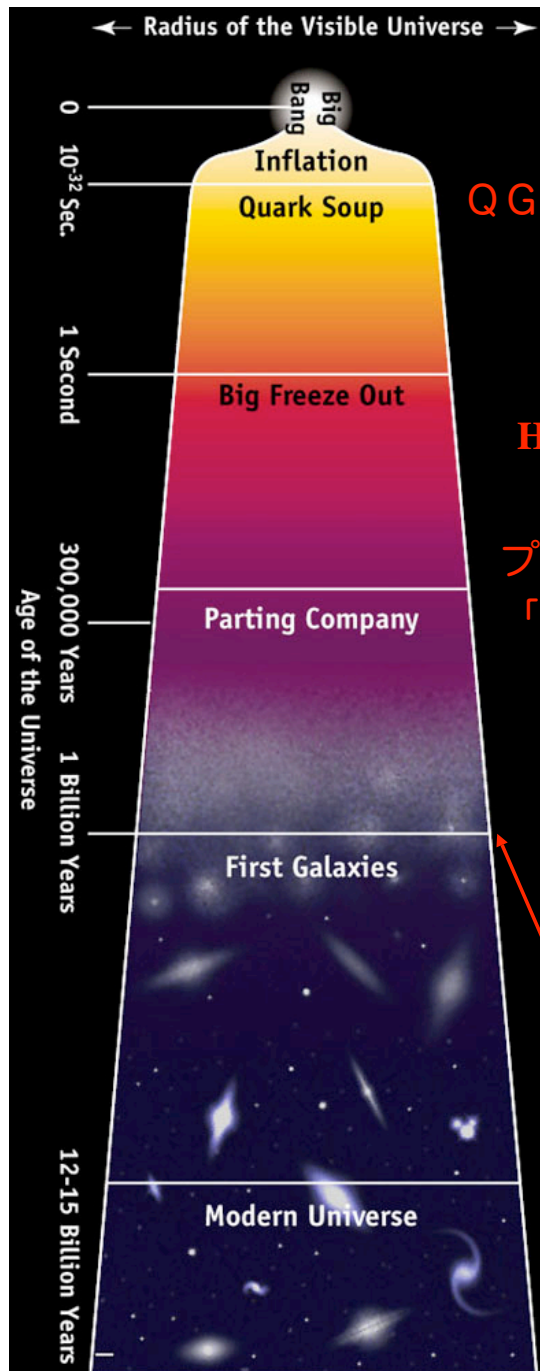


Animation by Jeffery Mitchell (Brookhaven National Laboratory). Simulation by the UrQMD Collaboration

- クォークレベルの統計力学的性質
- クォークレベルの流体力学的性質



ビッグバン宇宙論



ビッグバン宇宙論

QGP → ハドロンガス

Heなどの元素合成

プラズマ → 中性原子
「宇宙の晴れ上がり」

電離状態から中性
に変化し、光が散乱
されなくなった

原始銀河の形成

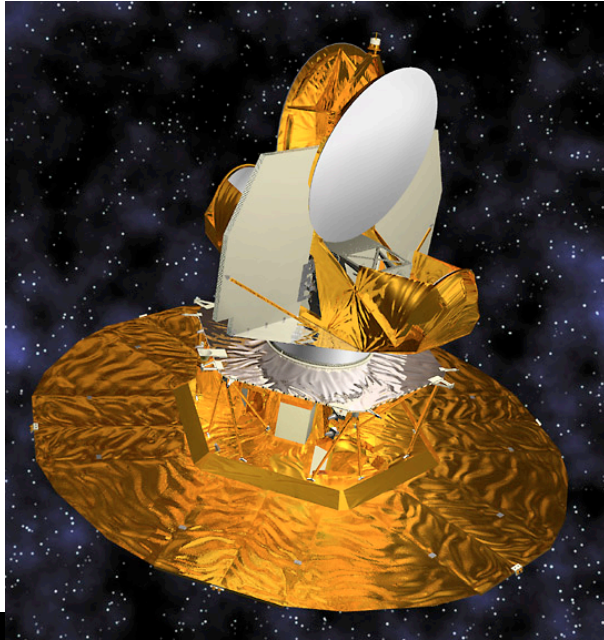
• ビッグバン宇宙論

- 約140億年前に大爆発とともに私たちの宇宙が発生
- 想像もつかない高温・高密度状態から膨張し、膨張と共に温度が低下してきた

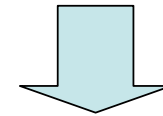
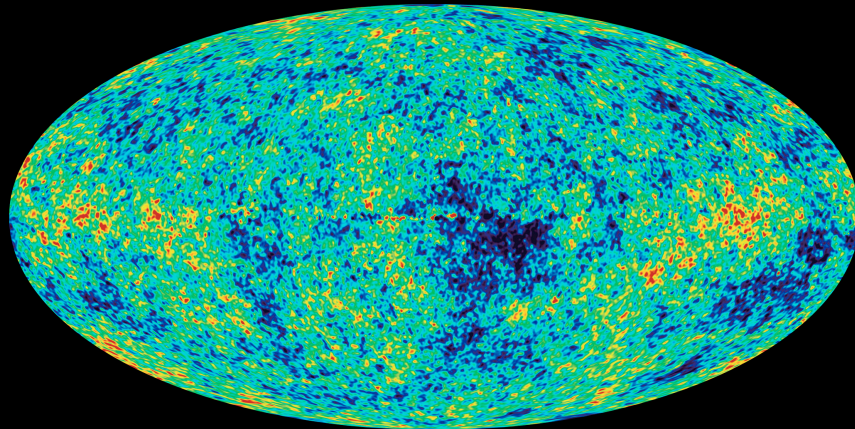
• 宇宙の進化を遡る研究

- (10億年)遠方銀河の赤方偏移
 - Hubble則
- (30万年)宇宙の晴れ上がり
 - 宇宙背景放射
- (3min)元素合成
 - 元素の存在比
 - →ビッグバン宇宙論を支持する証拠

宇宙背景放射観測によるビッグバンの研究



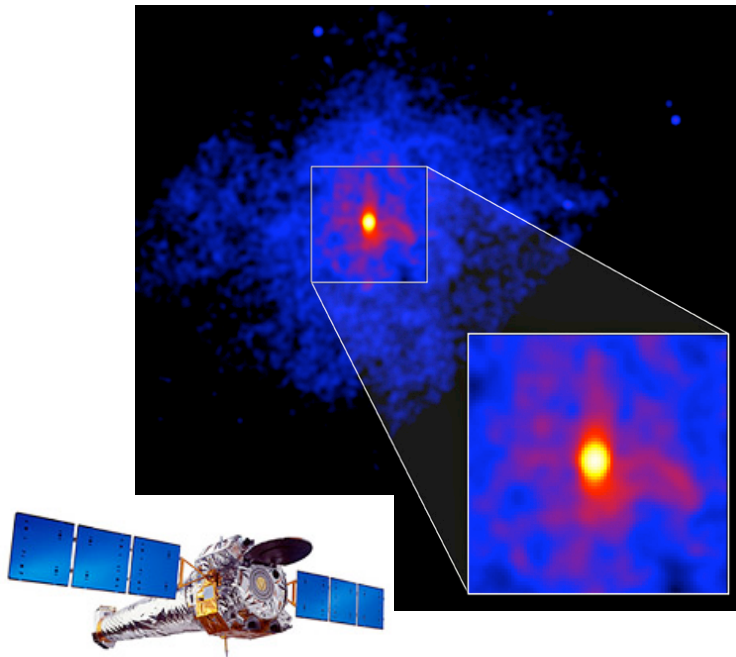
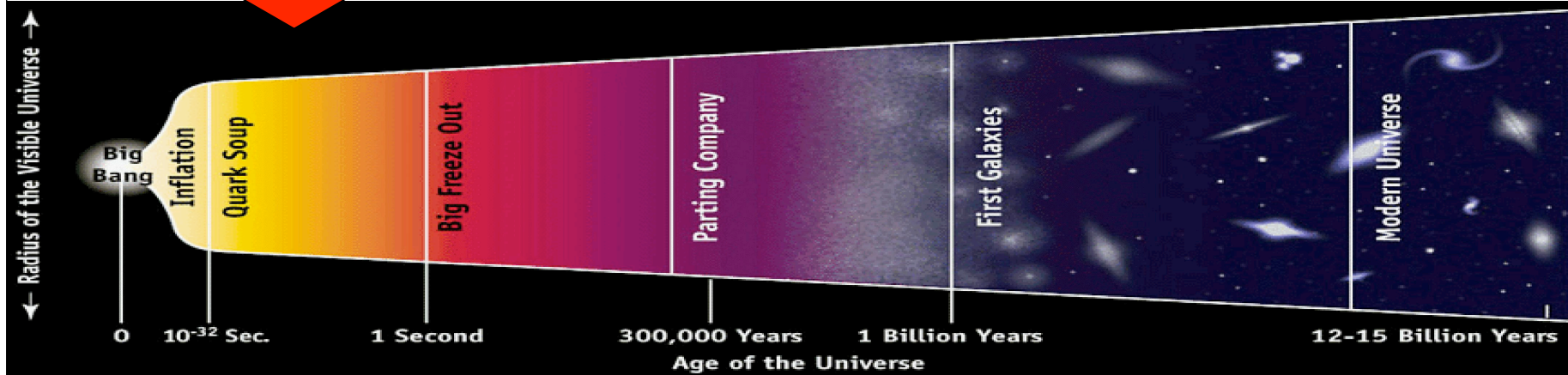
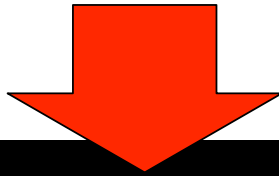
- WMAP観測衛星による宇宙背景放射の精密測定
 - 宇宙進化の様子が明快に
 - 「宇宙の晴れ上がり」時のスナップショット
- 「宇宙の晴れ上がり」より前の高温・高密度状態を再現し、極初期宇宙まで遡ろう



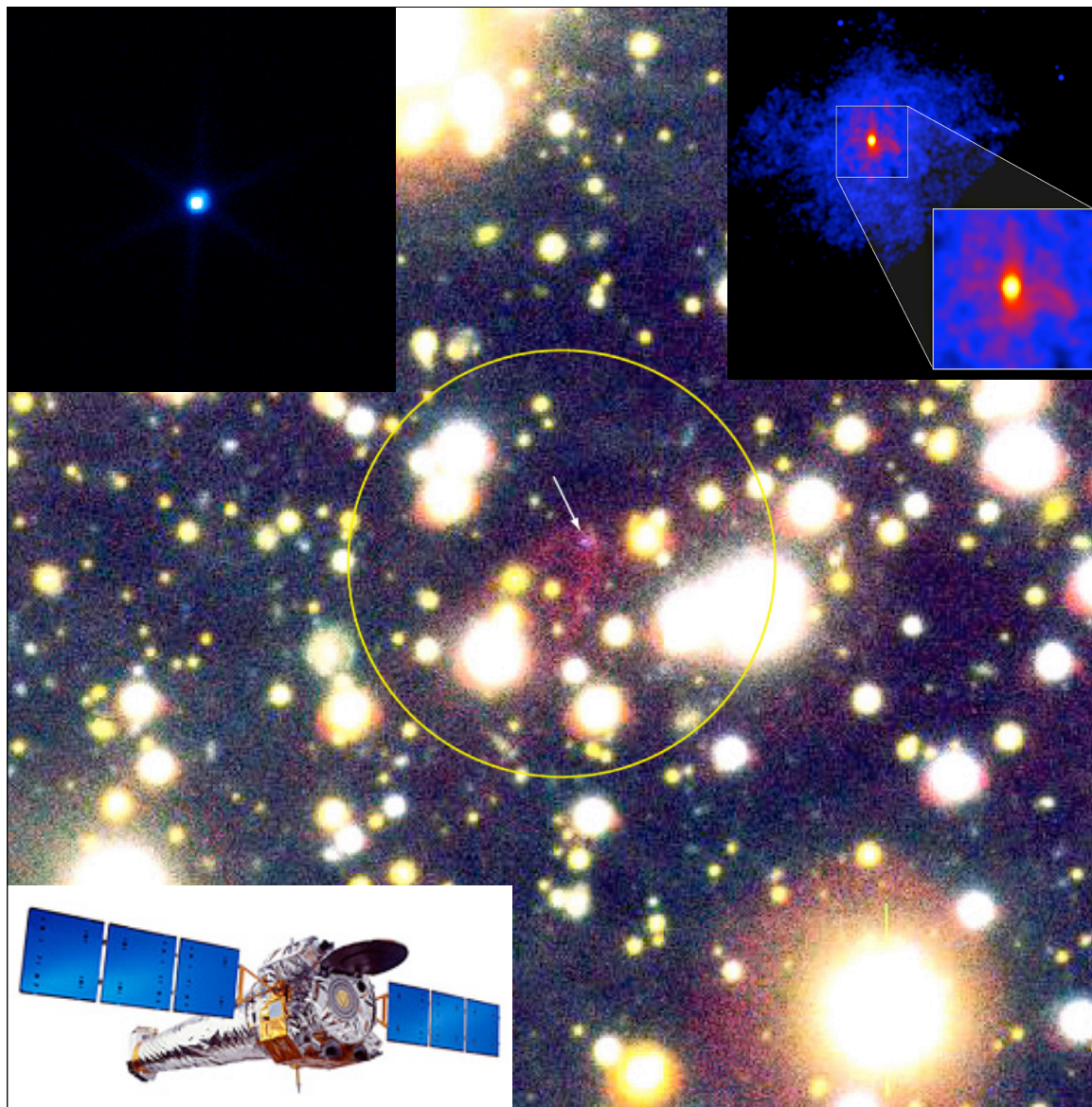
高エネルギー原子核・原子核衝突実験
(リトルバン)

宇宙論とQGP

QGP相転移?



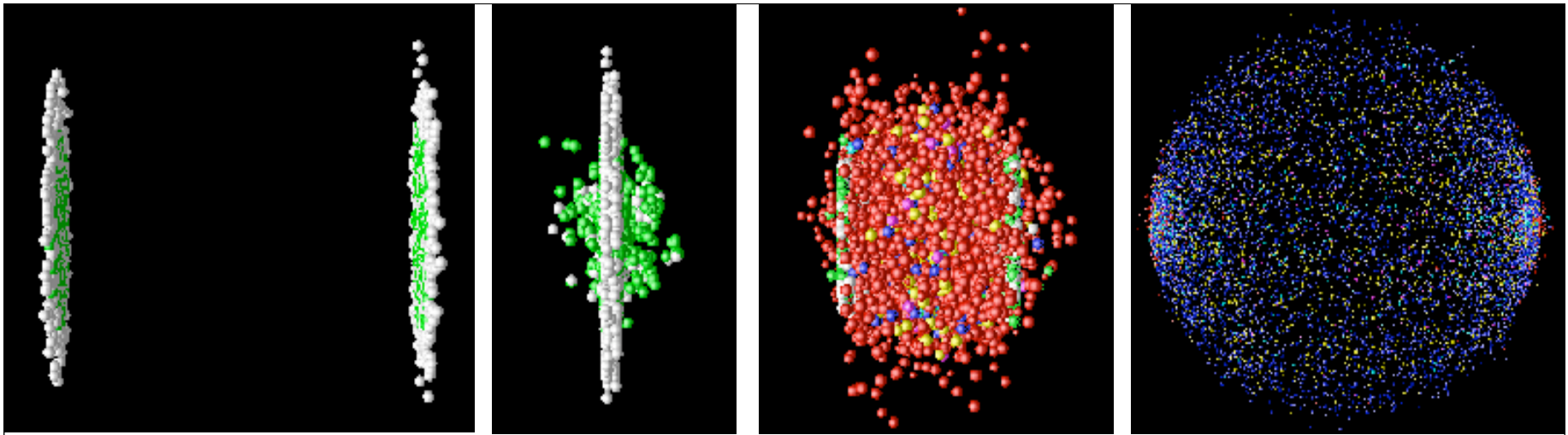
- ビッグバン直後の宇宙
 - ビッグバンから10マイクロ秒後にQGP相からハドロン相への相転移
 - 1次の相転移であれば以降の宇宙の進化に影響か
- クォーク星？
 - Chandra X線観測衛星とハッブル観測衛星による観測から発見か？
 - 中性子星とブラックホールの間を埋める存在
- **QGPの性質の解明は根元的課題**



A Bowshock Nebula Near the Neutron Star RX J1856.5-3754 (Detail)
(VLT KUEYEN + FORS2)

クォーク星発見か？

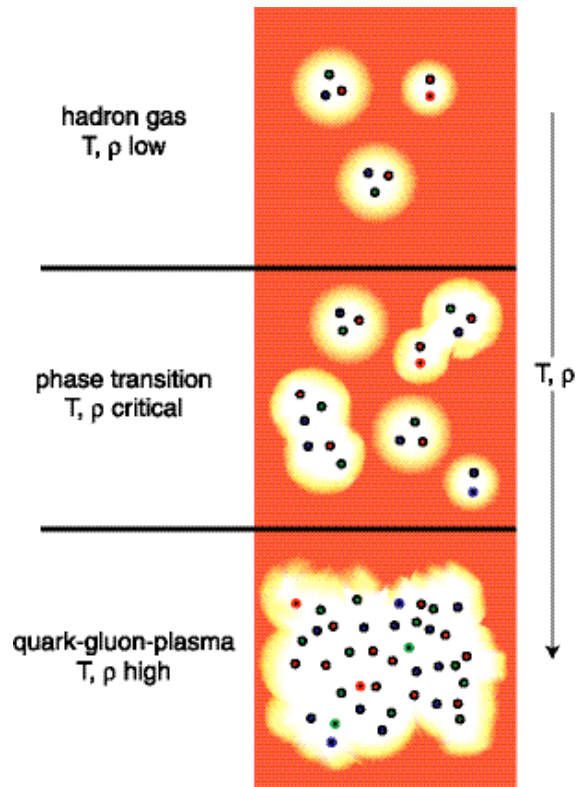
- Chandra X線観測衛星とハッブル観測衛星による観測
 - RX J 1856
 - 中性子星としては小さすぎる星半径
 - 3C 58
 - 中性子星としては低すぎる温度
- ストレンジ・クォーク・マター状態の星か？
- 中性子星とブラックホールの間を埋める存在



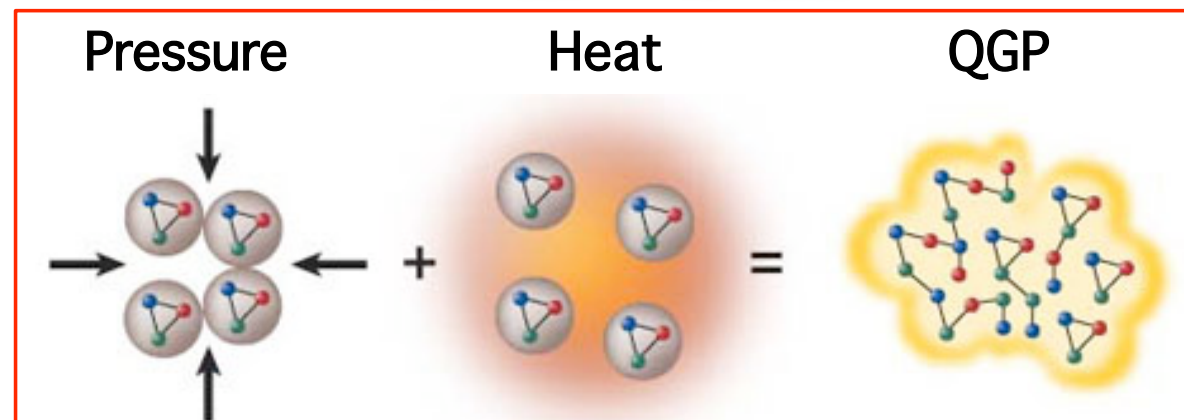
高エネルギー原子核・ 原子核衝突 「リトルバン」

QGPを実験室で作る方法

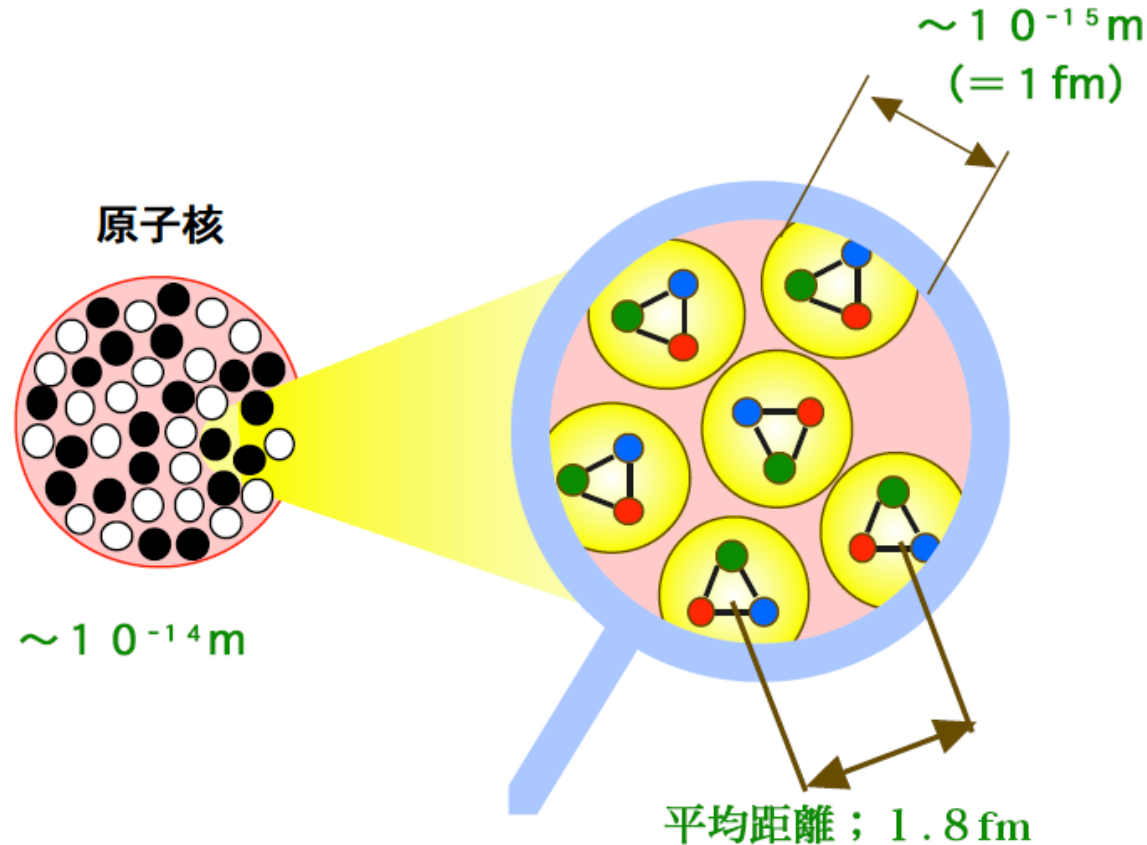
- 有限の大きさを持つハドロンを狭い空間に多重発生させるとハドロンが連結状態した状態、QGPが生まれる



圧縮と加熱



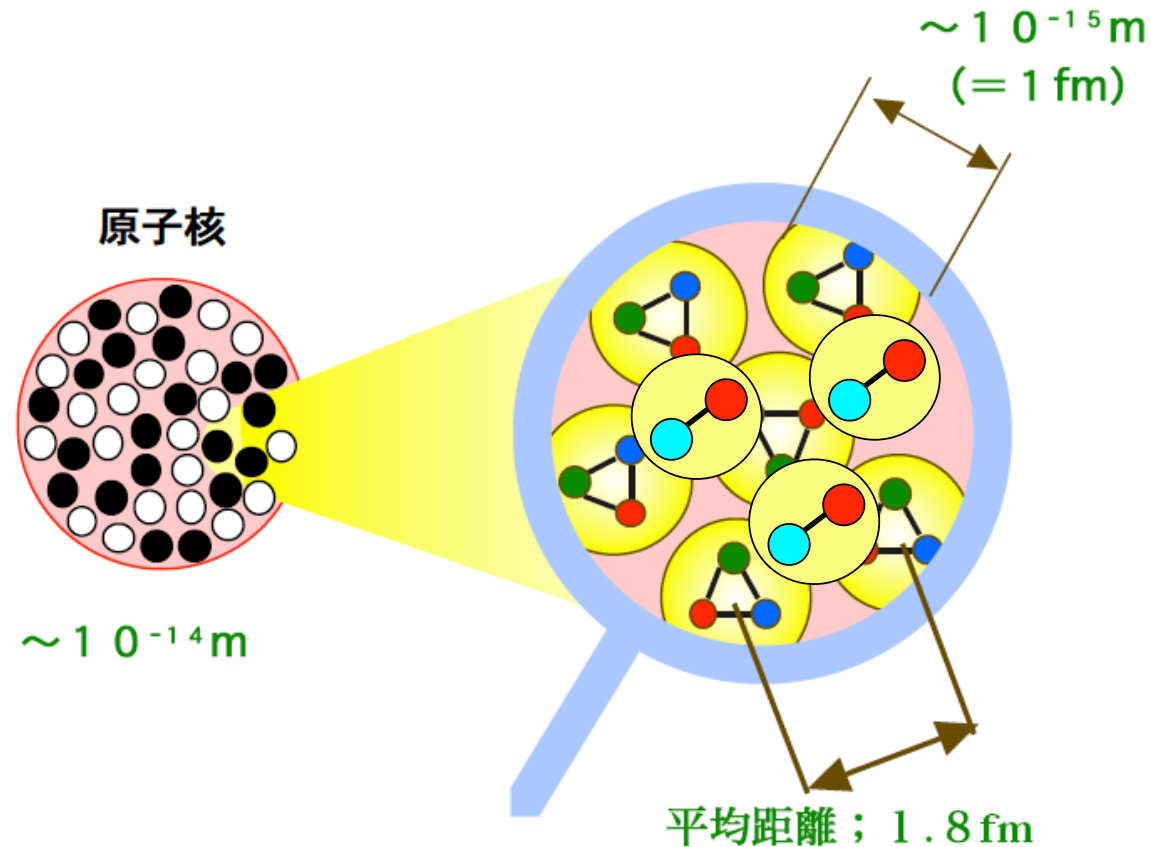
原子核は最も身近な高密度物質



→ちよいと圧縮すると、核子が互いにオーバーラップしてQGPへ！？

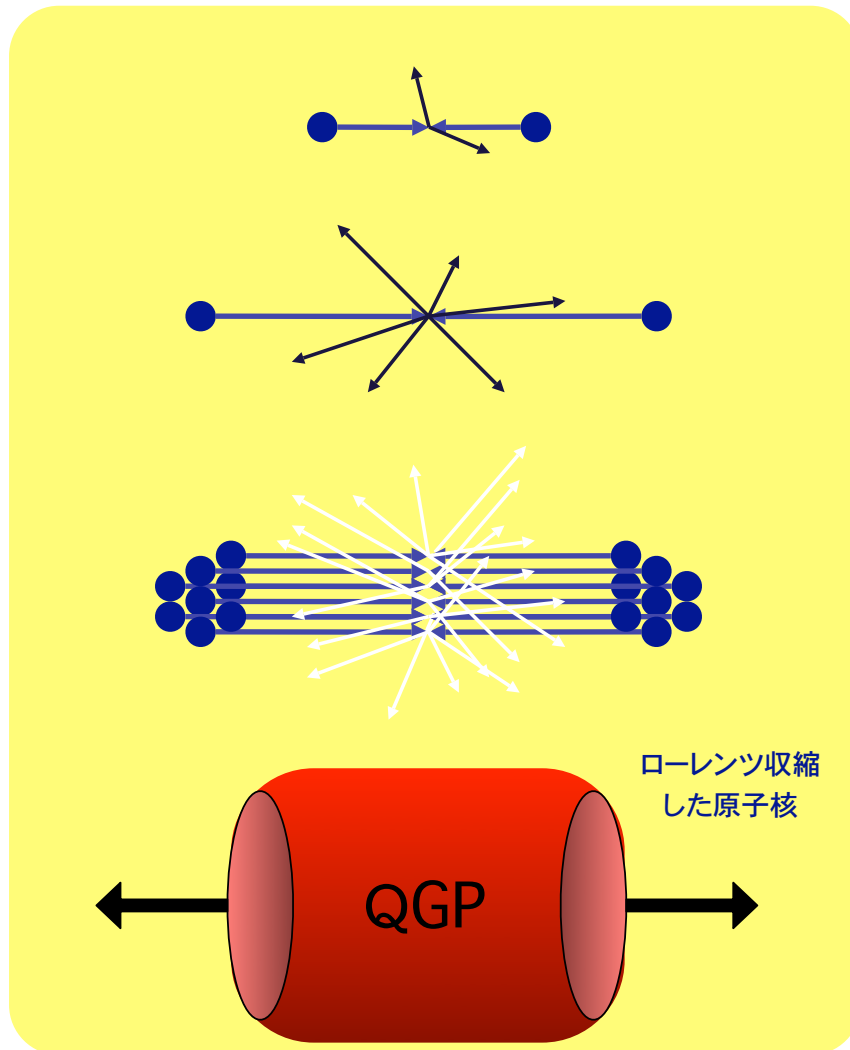
- 物質の密度； $\sim \text{g/cm}^3$
- 原子核密度； $\sim 10^{12}$ 倍 ~ 100 万トン/ cm^3
- 原子核内の核子の平均距離は意外と近い

原子核を加熱する



- 加熱すると核子と核子の間に中間子が発生
- 互いにオーバーラップしてQGPへ！？

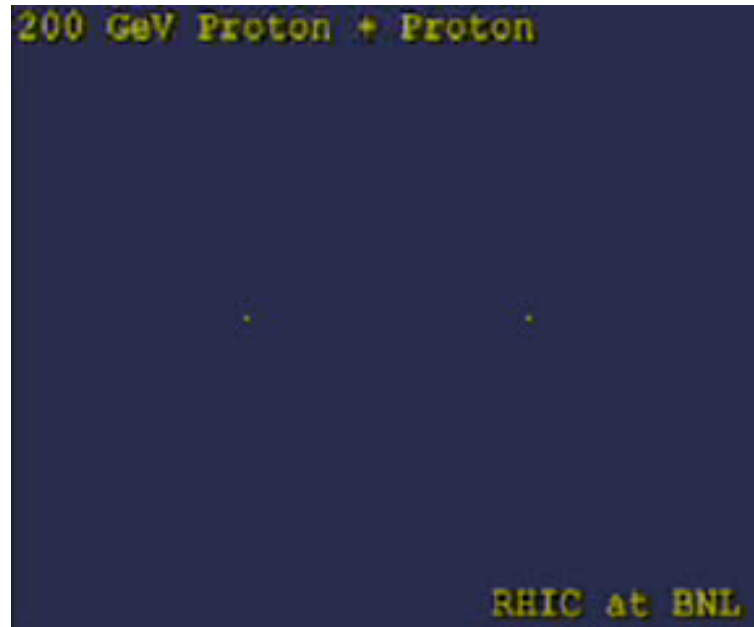
加熱して多数の中間子発生させる



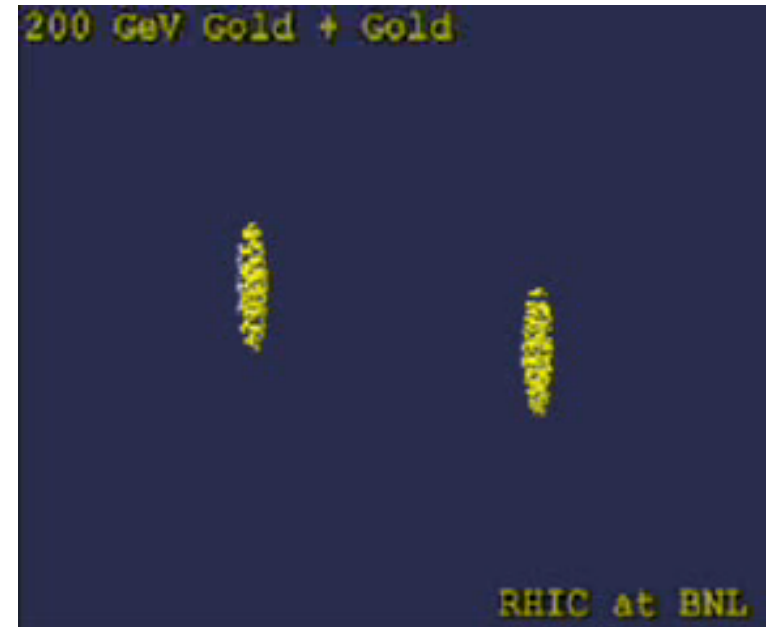
- **高エネルギー粒子の衝突**
 - より高エネルギー衝突ほど多数のハドロン粒子（主に π 中間子）が発生する
 - ビームの運動エネルギーの一部がハドロンの質量エネルギーに転化
- **原子核と原子核を衝突させると原子核程度の大きさに多数のハドロン粒子を発生**
 - **多重発生**密度が十分高いと QGP 生成が可能
- **相対論的高エネルギー原子核同士の衝突により QGP を生成し、その物理的性質を解明しよう**

高エネルギー衝突の様子

核子あたり200GeVの陽子・陽子衝突

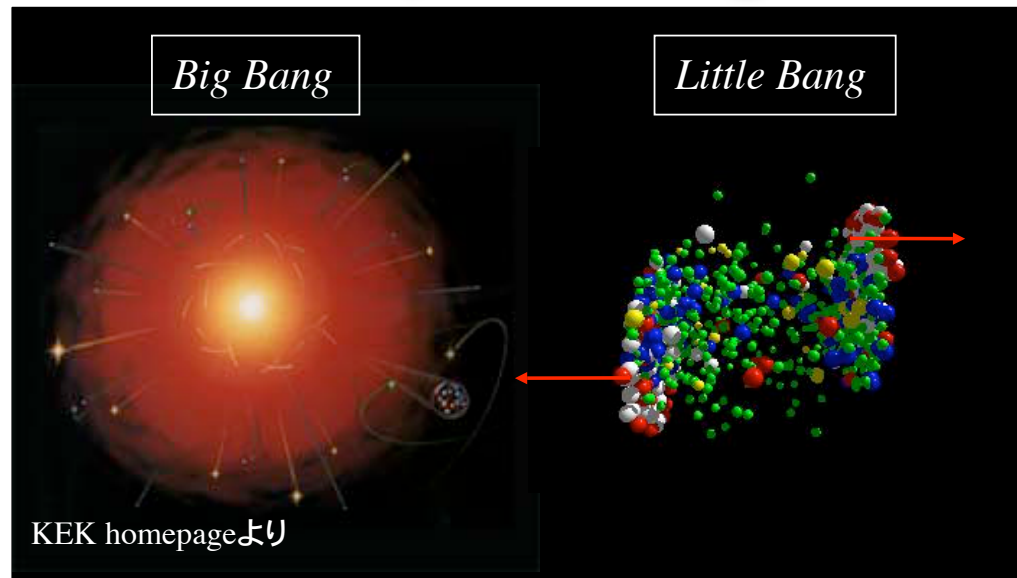


核子あたり200GeVの金原子核同士の衝突



Animation by Jeffery Mitchell (Brookhaven National Laboratory). Simulation by the UrQMD Collaboration

「ビッグバン」と「リトルバン」



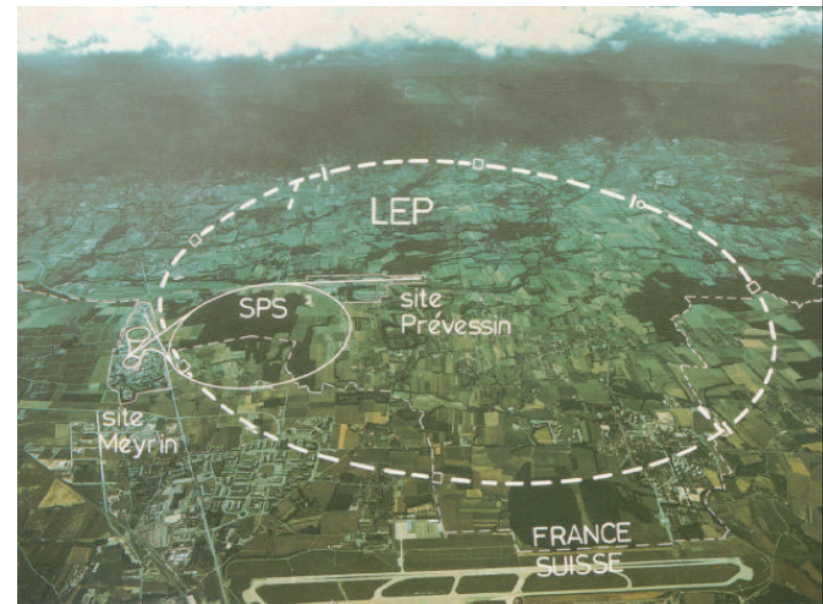
- ビッグバン
 - 宇宙
 - 3次元的膨張
 - 再現不可能
- リトルバン
 - 高エネルギー原子核・原子核衝突
 - 1次元的膨張
 - 実験可能
- 1987年以来～5年ごとに新しい加速器建設
 - 急速に発展している研究分野

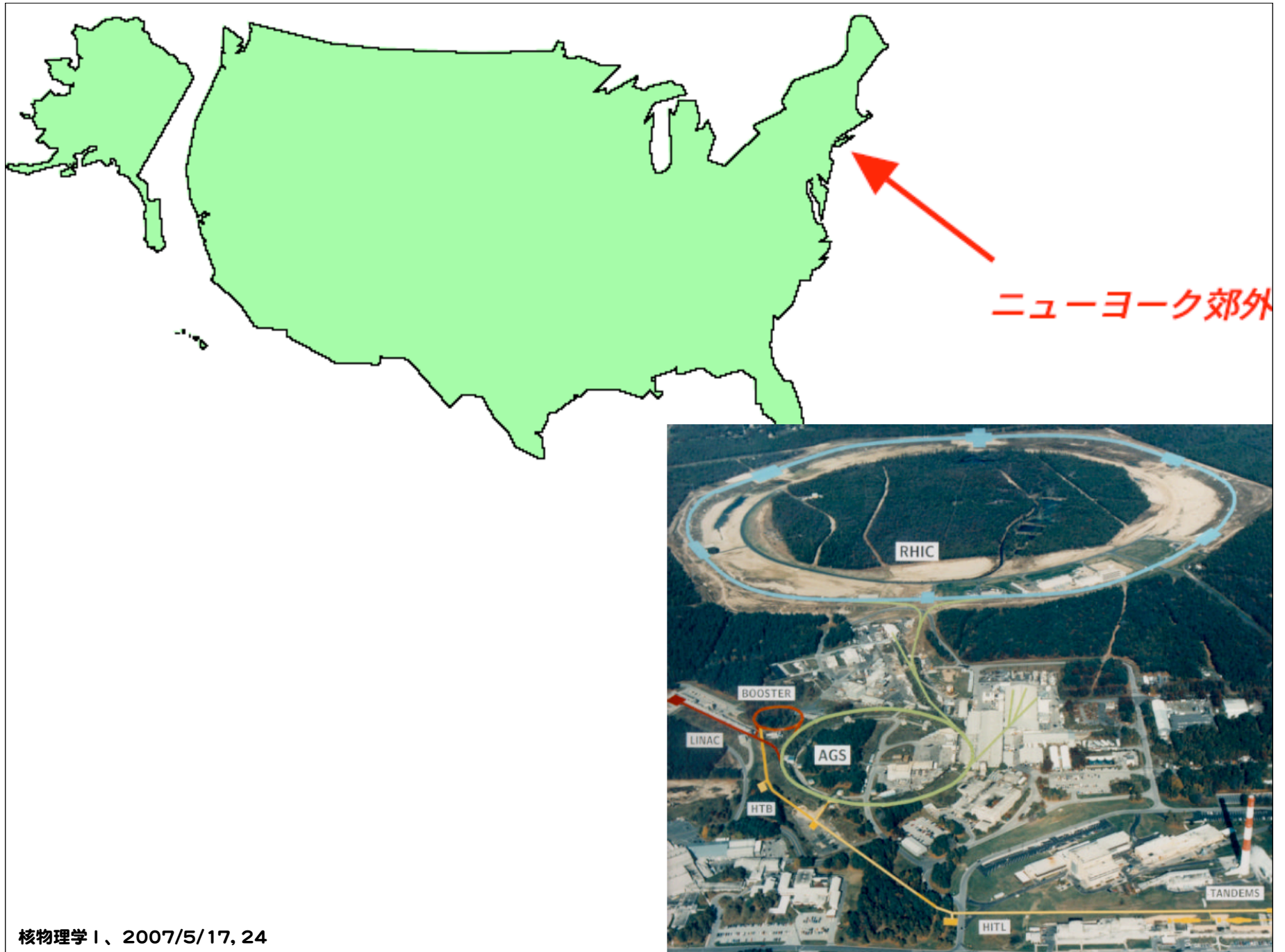
	Machine	Beam + Target	Ecm [GeV]
1987 -	AGS	Si+Au	5A
1987 -	SPS	S + Pb	20A
1992 -	AGS	Au + Au	4A
1994 -	SPS	Pb + Pb	17A



ジュネーブ郊外

フランスとスイスの国境

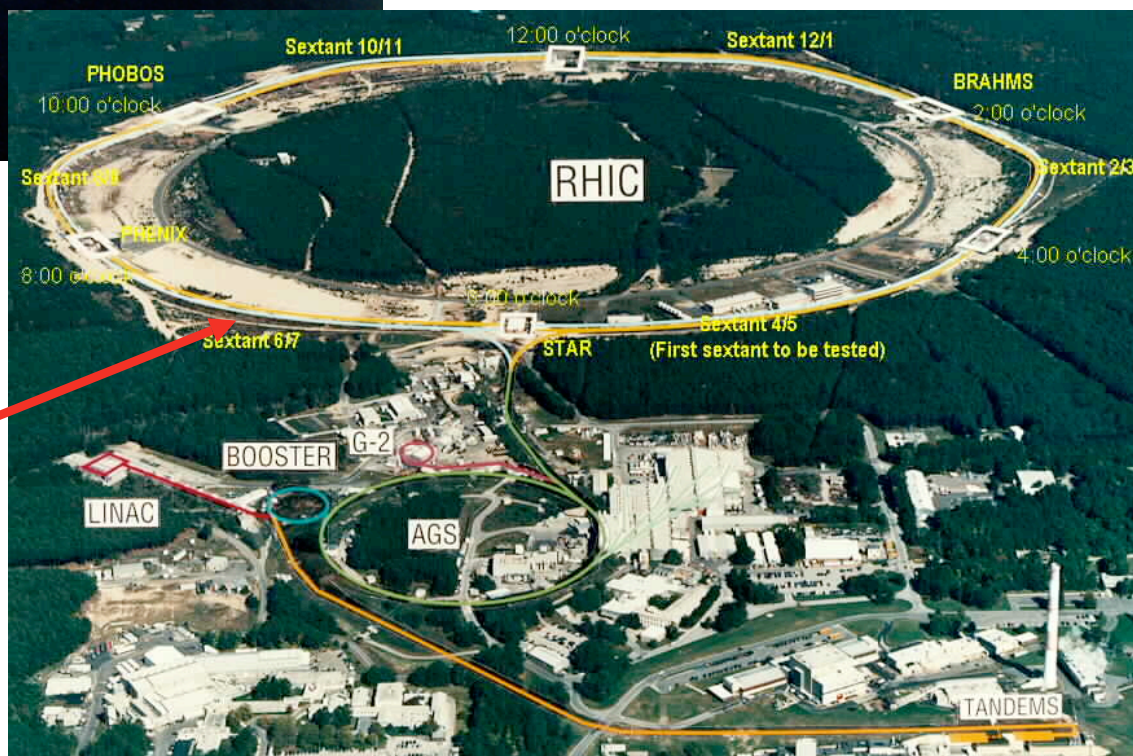


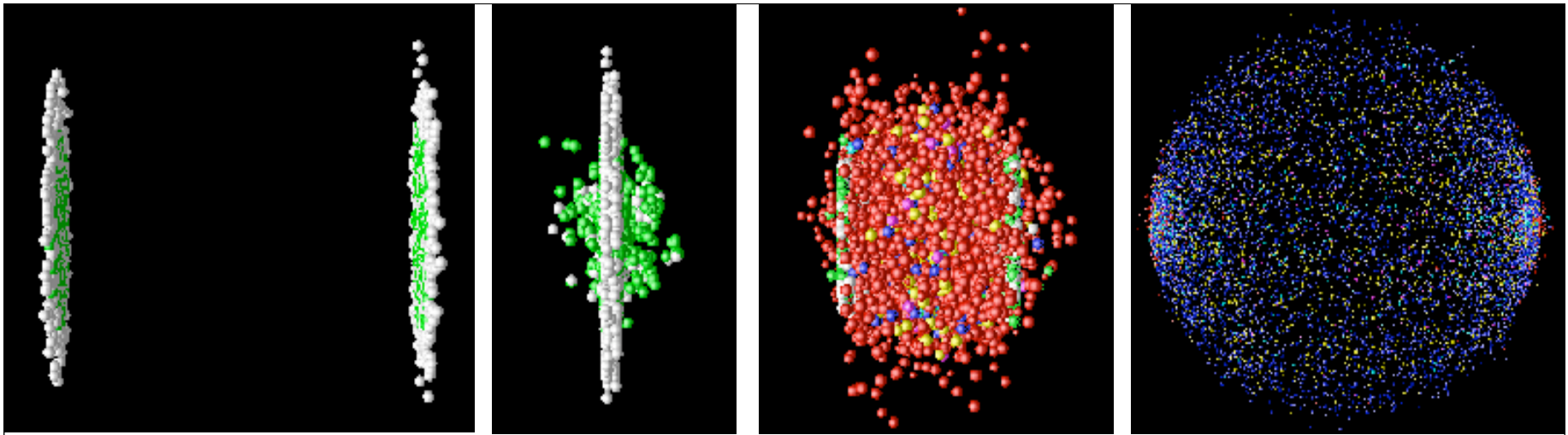


Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)



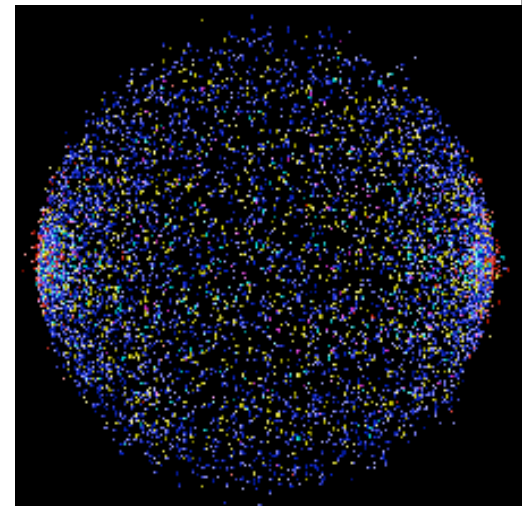
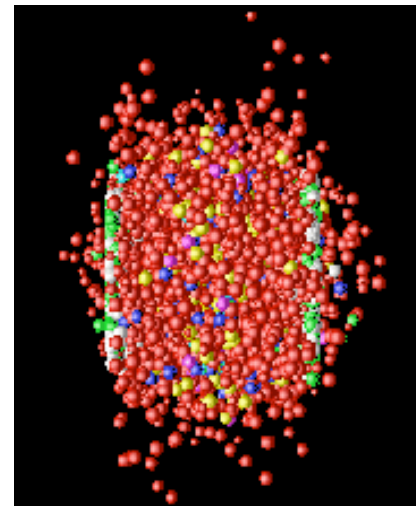
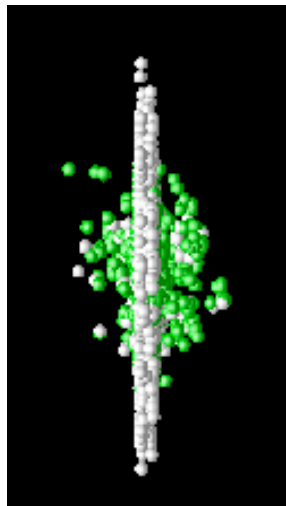
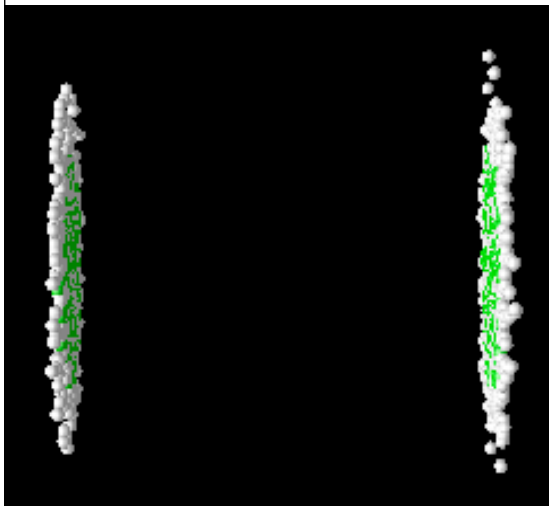
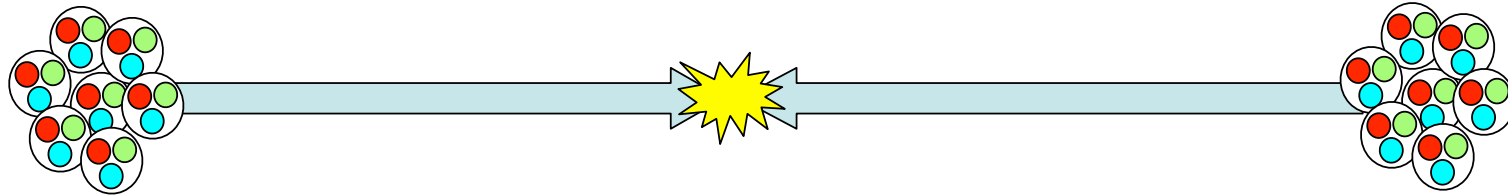
- 1周約3.8 km
- 右回り用と左回り用それぞれのビームライン
- 計864個の電磁石
- 実験室中央で右回りと左回りのビームが衝突





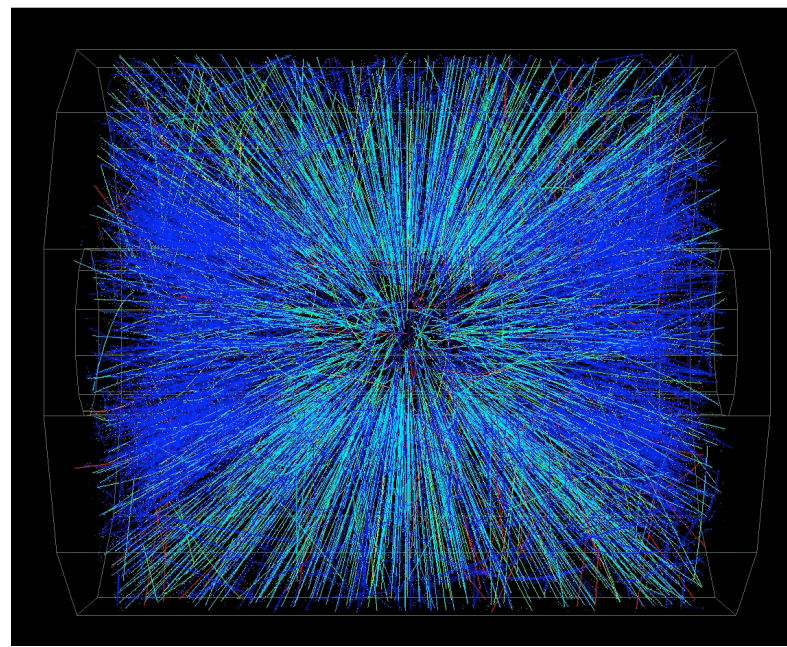
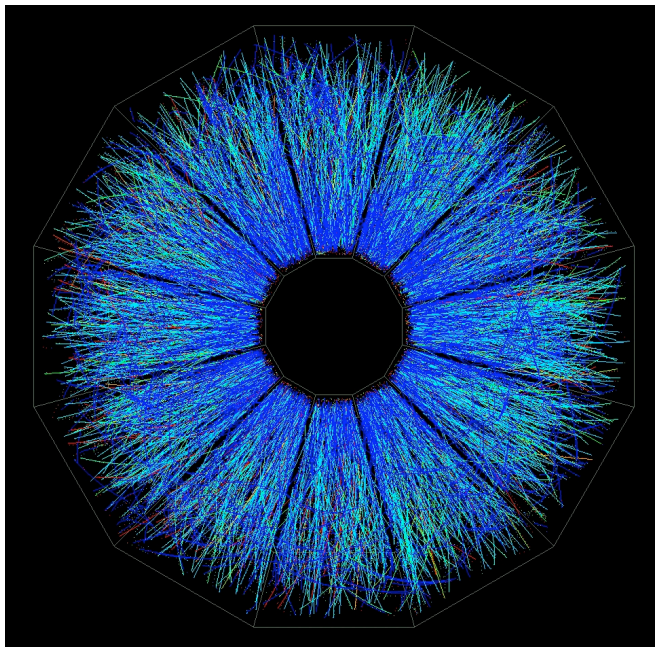
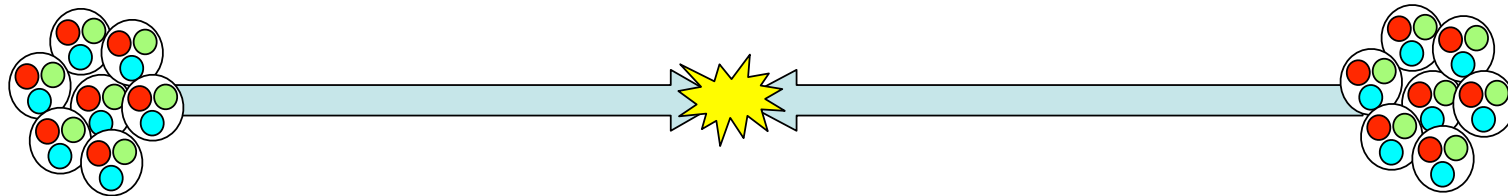
如何にQGP生成の 証拠を得るか

高エネルギー重イオン衝突の様子



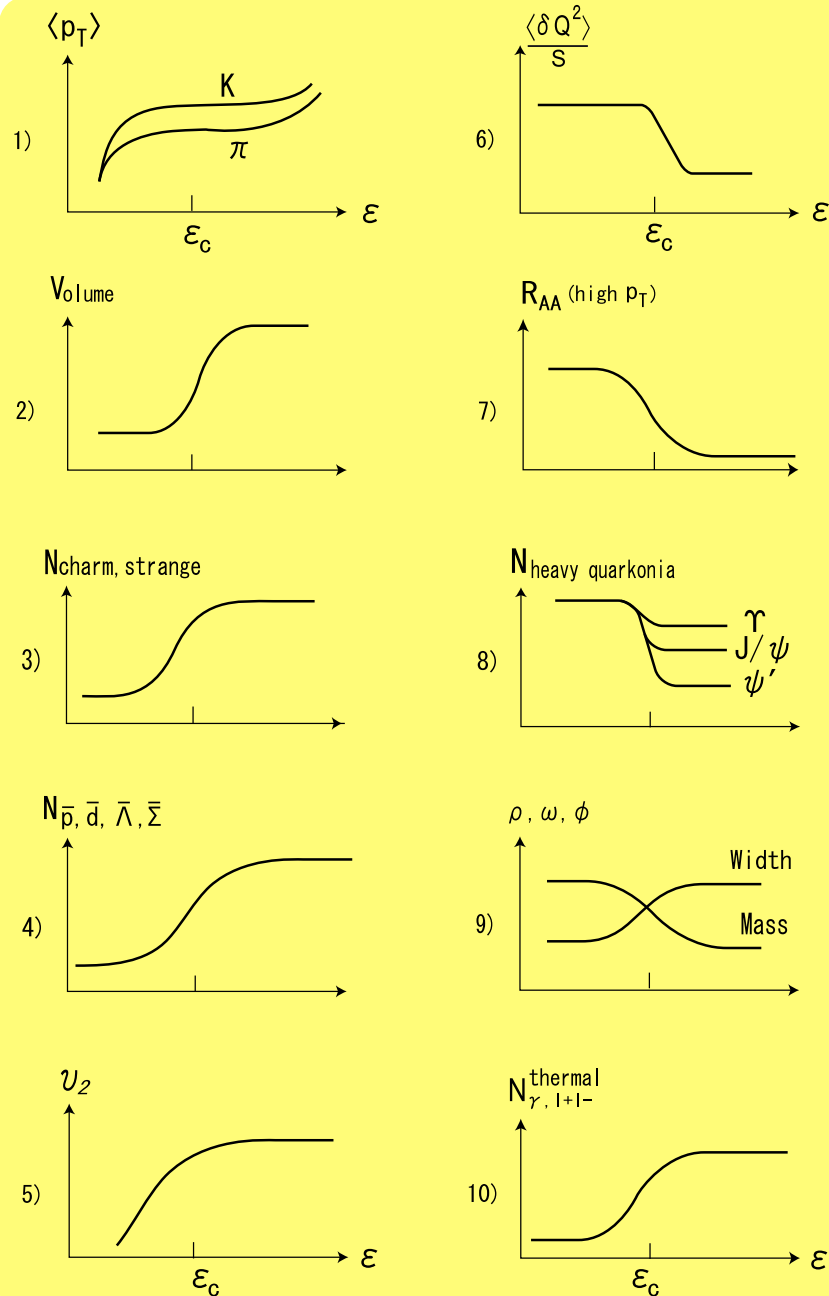
- 衝突の極めて短時間の間に何が起こっているのか！
 - 10 - 20 fm/cの間に多数の衝突
 - 運動学的熱平衡・化学平衡が起こっているらしい
 - クォーク・グルオンプラズマの生成も？

高エネルギー重イオン衝突の様子



- 衝突の極めて短時間の間に何が起こっているのか！
 - 10 - 20 fm/cの間に多数の衝突
 - 運動学的熱平衡・化学平衡が起こっているらしい
 - クォーク・グルオンプラズマの生成も？

QGP生成の Signature



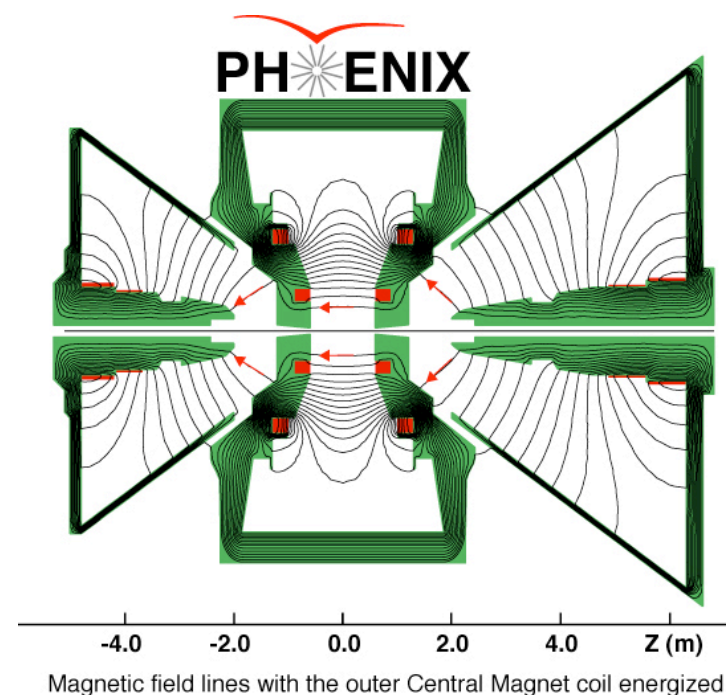
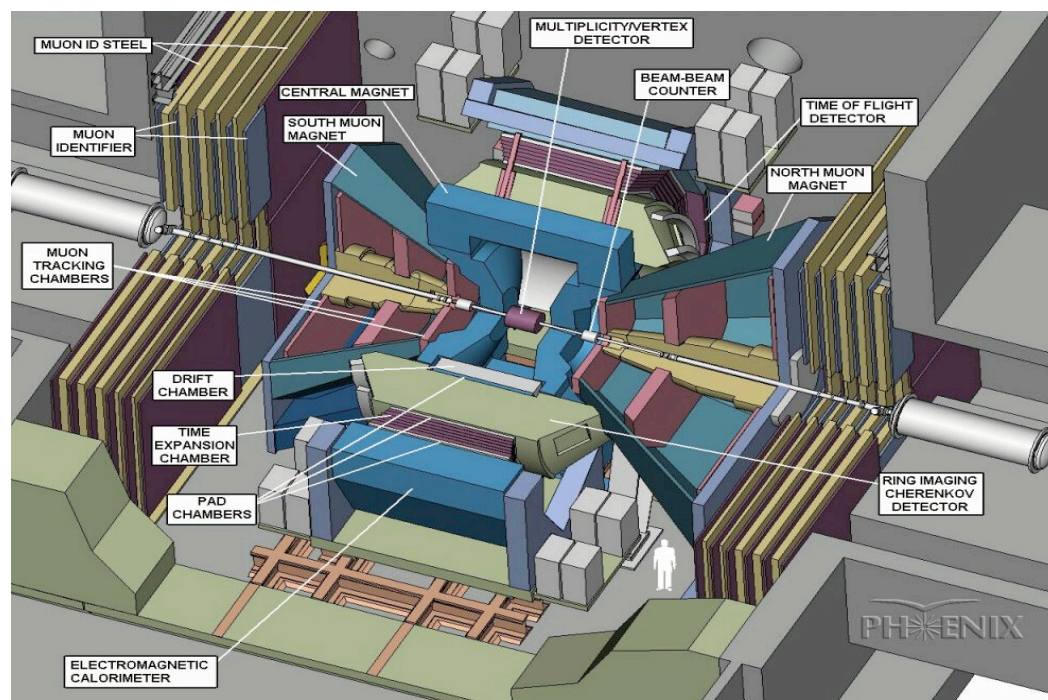
• 様々な実験的証拠(Signature)が 理論家から提案された

- Strangeness Enhancement
- 巨大ハドロンガスの出現
- デバイ遮蔽効果 (J/ψ抑制効果)
- EoSのSoftening (1次の相転移)
- 熱的光子による高温状態の直接観測
- 質量の変化 (前駆現象として)

• 私の見方

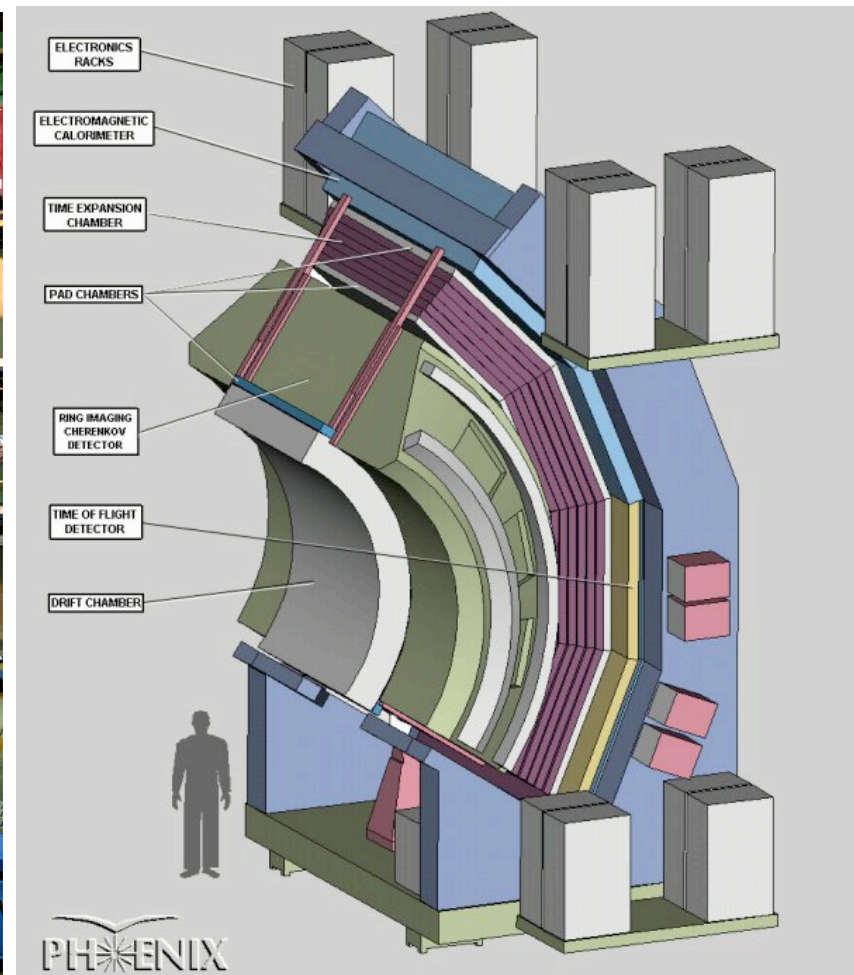
- クォークレベルで統計力学的に取り扱
いすることが可能であり、かつ、思
考経済的にも得すること。
- クォークレベルの導入が不可欠な現
象が見られること

衝突型加速器におけるPHENIX実験



- (衝突検出器) + (電磁石) + (飛跡検出器) + (粒子識別装置)

PHENIX実験 (写真)



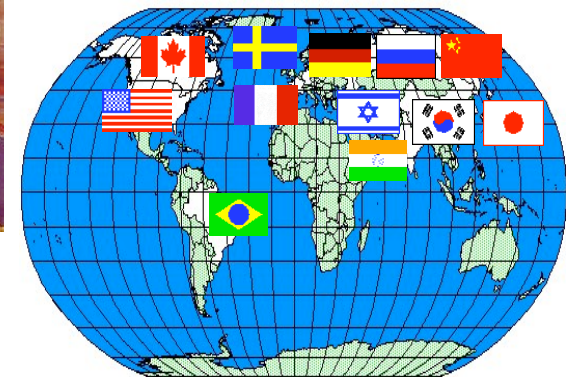
PHENIX実験 (写真)



多国籍国際協力研究P H E N I X



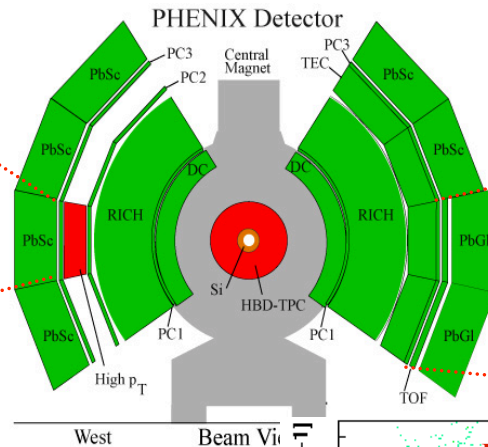
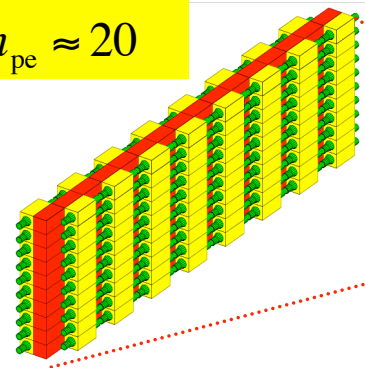
- 11ヶ国
- 440名余の研究者



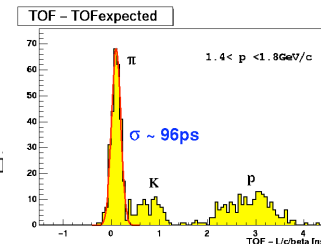
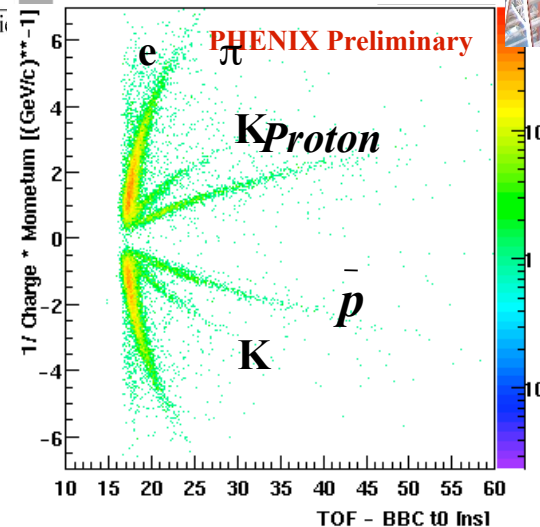
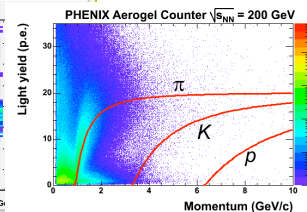
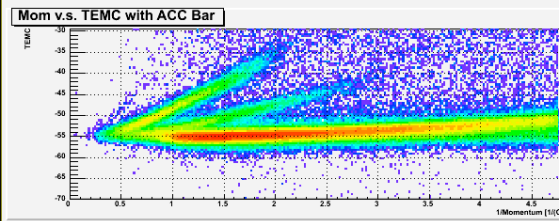
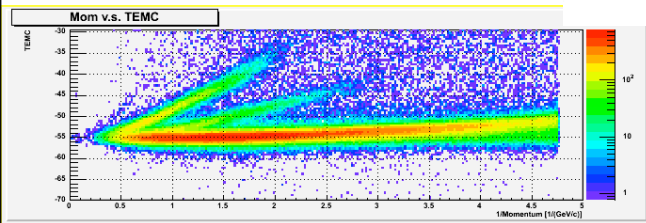
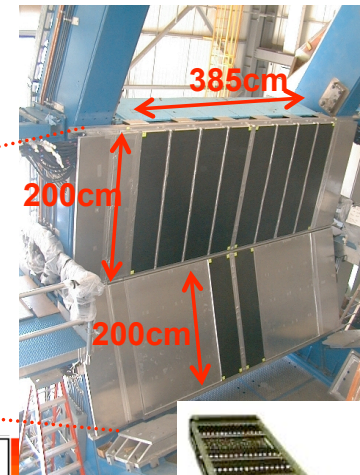
研究は競争 ～筑波大学グループの戦略～

$$n_{\text{index}} = 1.012$$

$$n_{\text{pe}} \approx 20$$



$$\sigma_{\text{TOF}} \leq 100\text{ps}$$



- High resolution TOF and low index of 1.01 Aerogel Cherenkov
 - Both Tsukuba contribution

新聞記事

「究極の粒子」探し新局面

米欧研究機関が火花

物質を限りなく細かくし、核の殻を破ってばらばらに分解し、そこから取り出すことに世界で初めて成功したと発表。今年に入ってから新実験装置が稼働する米ブルックヘブン国立研究所は、「CERNの結果は、状況証拠」。直接証拠構成要素であるクォークは我々がつかむ」と意気込

みを見せている。

原子核は、陽子と中性子という2種類の粒子で構成されており、それらはさらにクォークと呼ばれる究極の粒子でできている。原子核同士を光速に迫る猛スピードでぶつけると、3個のクォークが結び付いた陽子や中性子、2個が結び付いた中間子は生成されるが、単独のクォークはまだ確認されていない。ビッグバンで宇宙が誕生してから10万分の1秒後までは、クォークは単独で存在していたと考えられており、2個と3個に固まった状態以外のクォークを探すことは、宇宙の物質の成り立ちを知ること、極めて重要だ。

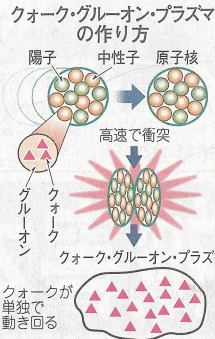
CERNでは、鉛の原子

今回のCERNの発表は、RHICの稼働前に「プラズマ状態初確認」の公表を目指したライバル意識の表れとみる関係者もいる。ブルックヘブン側も「CERNは間接証拠を積み上げて、我々が直接証拠をつかむことになるプラズマ状態への期待を高めてくれた」とのメッセ

ビッグバン直後を再現

宇宙の始まりであるビッグバン直後のように、物質を構成する基本粒子のクォークが、単独で動き回る状態「クォーク・グルーオン・プラズマ」を実験で作りに出すことに成功した、と欧州合同原子核研究所（CERN）本部ジュネーブが1日発表した。ビッグバンから十万分の一秒たった状態を再現したとされ、宇宙の初期を解明する第一歩として注目される。

欧州原子核研究が発表



宇宙の初期解明へ 物質の基本粒子 プラズマ実験に成功

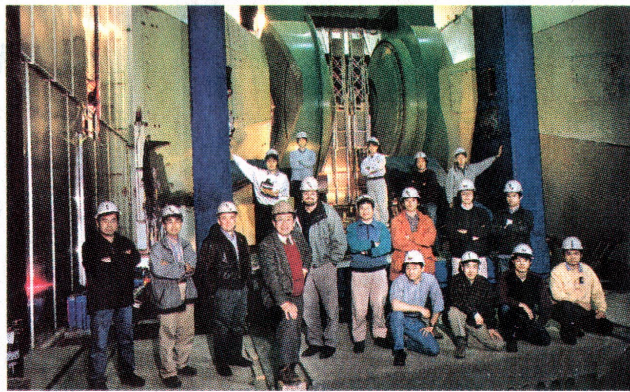
CERNのルチアノ・マイヤ二所長は発表文の中で「物質の新しい状態の実験がはじまりました。宇宙の初期を理解する上でも重要なステップだ」と意義を強調。計画中の大型加速器によるプラズマの性質解明に意欲をみせた。

【解説】初のクォーク・グルーオン・プラズマ実験を宣言した欧州合同原子核研究所（CERN）だが、その発表文は「そう考えるしかない証拠を得た」と慎重なトーンだ。関係者によれば、実験に参加した学者の中には発表に反対した人もいたという。

【状況証拠のみの弱点も】プラズマ実験を直接証明するには、プラズマになったクォークから光を出し、それを検出する必要がある。この光は他の現象の出す光に邪魔される。現状では、状況証拠を集めるしか手がないのだが、そうした足元の弱さがあったとしても、これまでの証拠だけでは、他の現象である可能性が完全に排除されたとは言えない。時期尚早で

は、核の殻を破ってばらばらに分解し、そこから取り出すことに世界で初めて成功したと発表。今年に入ってから新実験装置が稼働する米ブルックヘブン国立研究所は、「CERNの結果は、状況証拠」。直接証拠構成要素であるクォークは我々がつかむ」と意気込

欧州合同原子核研究所 1954年に欧州諸国が共同で設立した素粒子・原子核分野の研究所。略称CERN（セルン）。加盟国は20カ国で、それ以外に日本や米国などがオブザーバー参加している。フランスとスイスの国境に複数の大型加速器を持ち、素粒子の重さの基になっている「ヒッグス粒子」を探る実験も進んでいる。



「流れを見える」休みましと話している。教授は「今年中に最初の成果を発表したい」と話している。

RHICの測定装置「フエニックス」。日本人研究者も多数参加している（三明教授提供）

「おこわ」

いる。

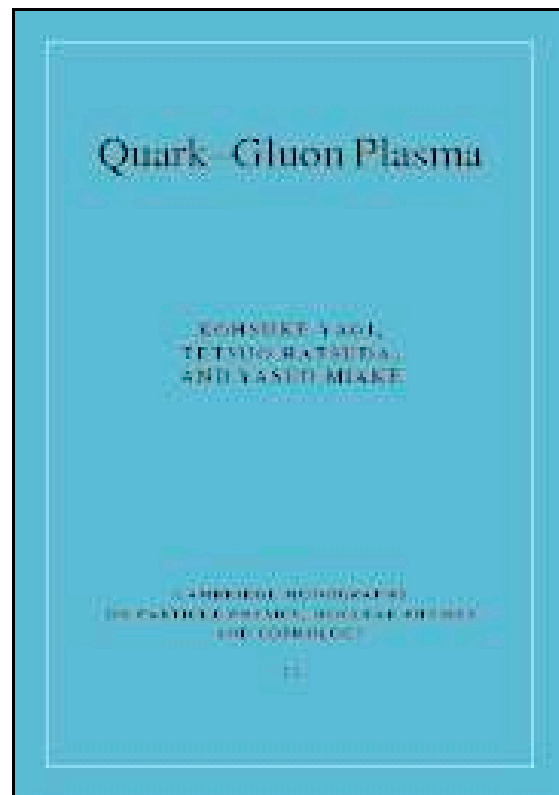
米ブルックヘブン研の重イオン衝突型加速器（RHIC）は、今年4月ごろから稼働の予定。CERNの実験の10倍以上のエネルギーで金の原子核同士を正面衝突させる。うまく行けば、プラズマ状態から出てくる電磁波を、直接測定できるかもしれない。CERNとRHICの両方の実験に参加している三明康郎・筑波大物理学系教授は、「CERNの結果が本物なら、RHICではもっとはつきりとプラズマ状態の証拠が見つかるはず」と説明する。

今回のCERNの発表は、RHICの稼働前に「プラズマ状態初確認」の公表を目指したライバル意識の表れとみる関係者もいる。ブルックヘブン側も「CERNは間接証拠を積み上げて、我々が直接証拠をつかむことになるプラズマ状態への期待を高めてくれた」とのメッセ

大学院生向けのQGPの教科書！

CAMBRIDGE | Catalogue

[Home](#) > [Catalogue](#) > [Quark-Gluon Plasma](#)



Quark-Gluon Plasma

Series: [Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics, and Cosmology](#)

Kohsuke Yagi

Urawa University, Japan

Tetsuo Hatsuda

University of Tokyo

Yasuo Miake

University of Tsukuba, Japan

Hardback (ISBN-10: 0521561086 | ISBN-13: 9780521561086)

For price and ordering options, inspection copy requests, and reviews, please contact your nearest Cambridge University Press bookseller or visit our website at [www.cambridge.org/9780521561086](#)

[UK, Europe, Middle East and Africa](#) | [Americas](#) | [Australia and New Zealand](#)