

講義4

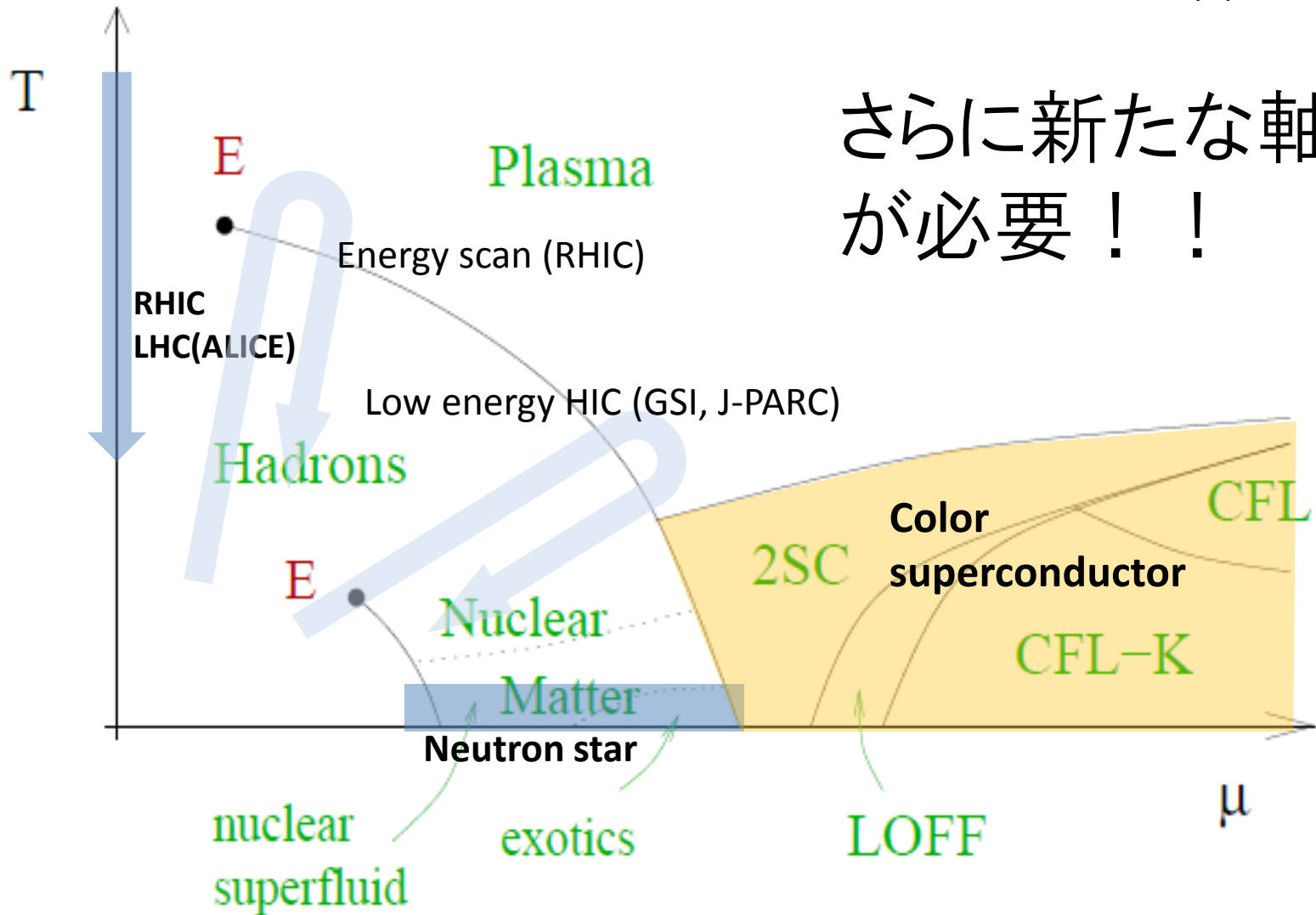
未解決問題群

- 強磁場中の媒質の応答
 - 磁場中の超伝導の例
 - カイラル相転移の変化
 - 強磁場中の核物質
- 重イオン衝突における早期熱平衡化問題
 - プローブとしての強い場の物理
 - 平衡化を起こす機構としての強い場の物理
 - QED雪崩
- 初期宇宙におけるQGPの理解
- 強磁場天体における様々な効果
 - (渦、磁気ループ、放射、偏光)

強磁場中における 媒質の応答

QCD Phase diagram

T.Schafer, hep-ph/0304281



さらに新たな軸
が必要！！

磁場中で超伝導転移温度 T_c は下がる

- Meissner effectにより、超伝導体に磁場が侵入するのを妨げる。磁場を強くすると(可能なら)渦が混入し、その本数が増え、常伝導状態がバルクに達成される
- Cooper対はスピンゼロ状態で、up, downの電子から成る。一方、磁場はスピンを同じ向きにそろえようとするので、Cooper対を破壊する方向に働く

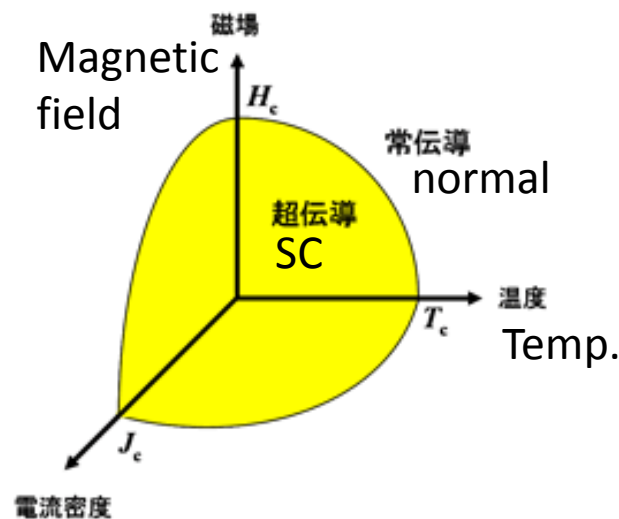
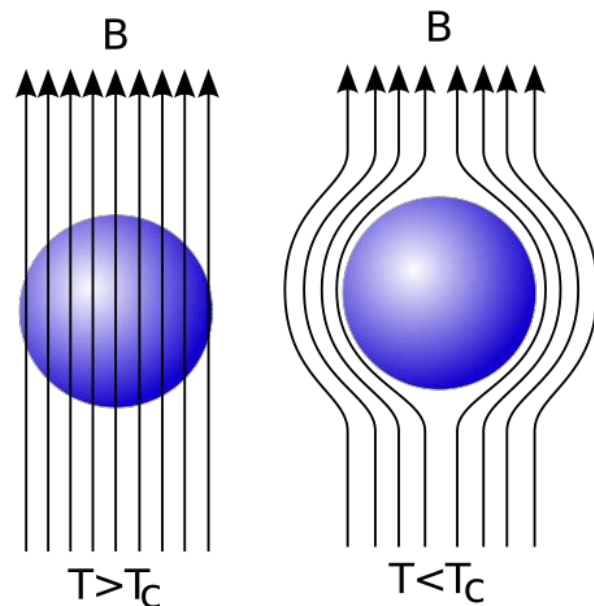
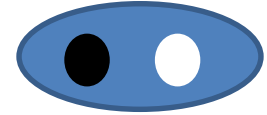


Fig.5 超伝導領域

QCDではどうか？

- カイラル凝縮:



spin 0 quark-antiquark pair

Spin up quark and spin down antiquark feel the same Lorentz force

→ decrease or increase T_c ?

cf) enhancement of symm. br.

(magnetic catalysis)

flavored meson will be broken

- 閉じ込め (Polyakov loop) :

quark loopを通じてのみ磁場と相互作用

T_c は減少するのだろうか？

カイラルと閉じ込めが同時に起こらなくなる？

有効模型を用いた計算 2012年まで

- **Tc decreases**

- **Chiral perturbation theory** for two flavors : Agasian, Fedorov, PLB (2008)
- **Linear sigma model** : Mizher, Chernodub, Fraga, PRD (2010)
- **Sakai-Sugimoto model** with nonzero chemical potential :
Preis, Rebhan, Schmitt, JHEP (2011)
- **Bag model** : Fraga, Palhares, arXiv:1201.5881 [hep-ph]

and more

- **Tc increases**

- **Fermionic models**

Linear sigma model coupled to quarks and Polyakov loops:

Mizher, Chernodub, Fraga, PRD (2010)

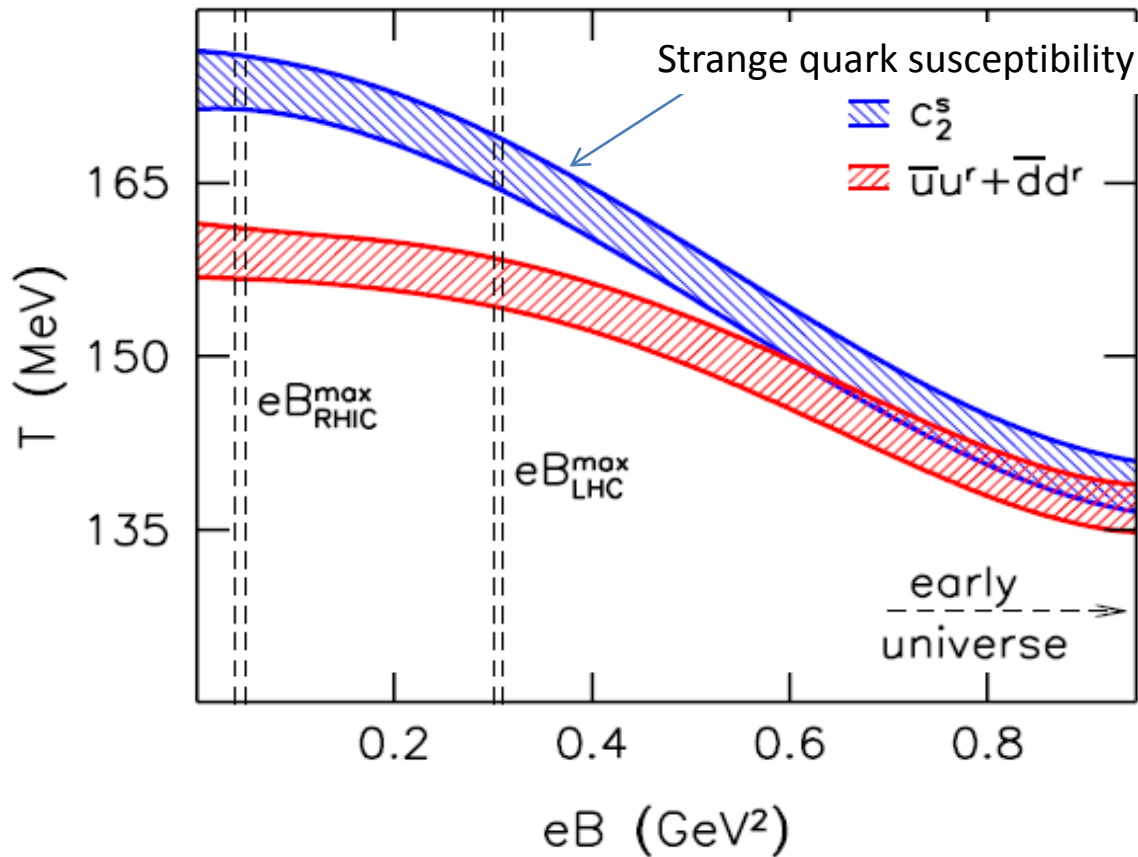
NJL, EPNJL, PNJL, nonlocal PNJL: Gatto, Ruggieri, PRD(2010),(2011), etc

Schwinger-Dyson in QED3 : Alexandre, et al. PRD (2001)

- **Sakai-Sugimoto model** : Johnson, Kundu, JHEP (2008)

and more

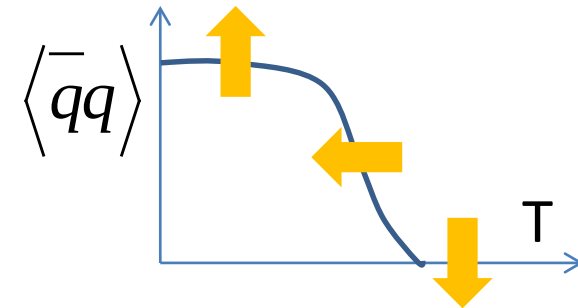
Lattice results



G.S.Bali, F.Bruckmann, G.Endrodi,
Z.Fodor, S.D.Katz, S.Krieg, A.Schafer
and K.K.Szabo, JHEP 02 (2012) 044

この結果を説明する
納得のいく描像は今の所ない

- T_c **significantly decreases** with increasing B
- Chiral condensates enhanced
- No splitting of chiral sym. br. and deconfinement
- transition seems to **be still crossover**



強磁場中の核物質

- 中性子星、マグネター内部の核物質の性質理解に非常に重要な側面だが、よく分かっていない。(何故だかあまり研究されていない)
- 考えるべき効果は幾つもある

核子の質量変化 (ベータ平衡の変化 電子の質量変化も)

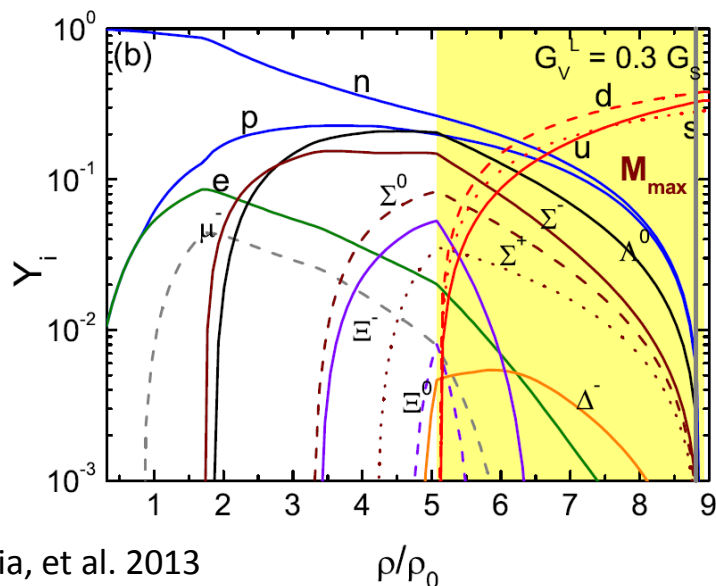
崩壊モードの変化

ランダウ量子化による異方性

パイ中間子の性質変化と核力に対する影響

(到達距離の変化、異方性の出現、カイラル凝縮の変化)

などなど



例えば、中性子星内部の組成比が
磁場と共にどう変化するのか

中性子星の内部構造を知るのにも
必要な情報

重イオン衝突における 早期熱平衡化問題

Heavy-ion Collisions: Little Bang

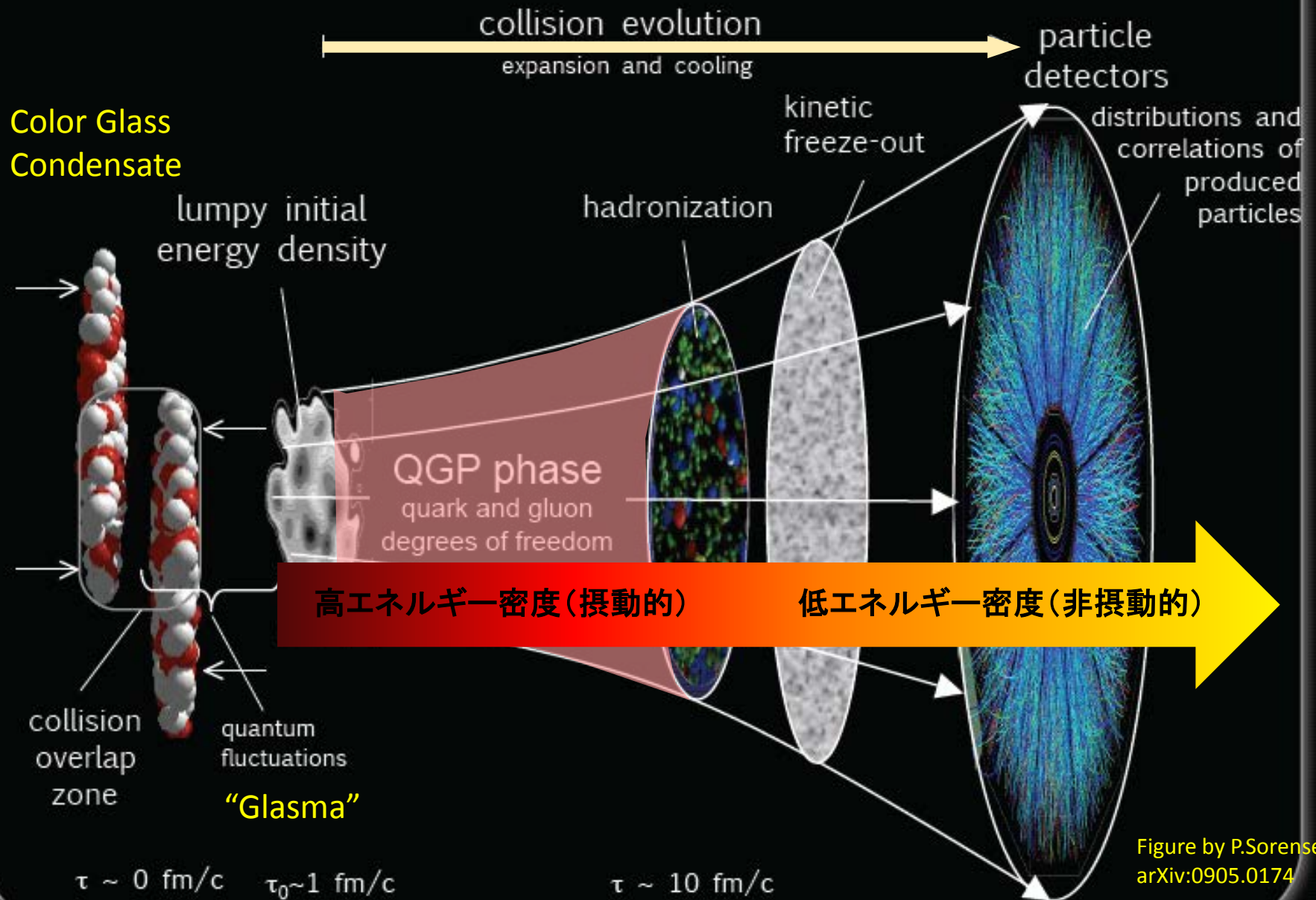
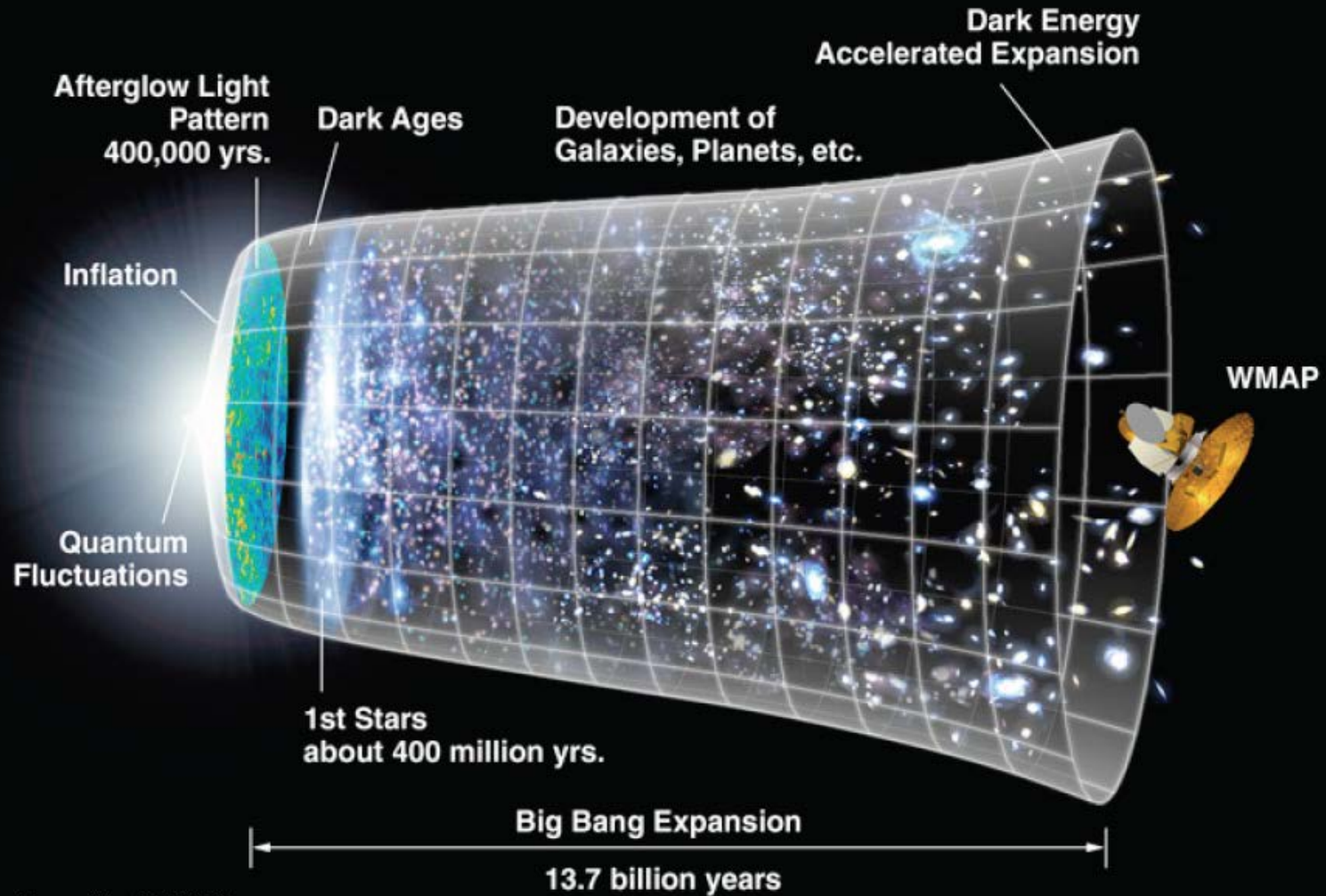


Figure by P.Sorensen
arXiv:0905.0174

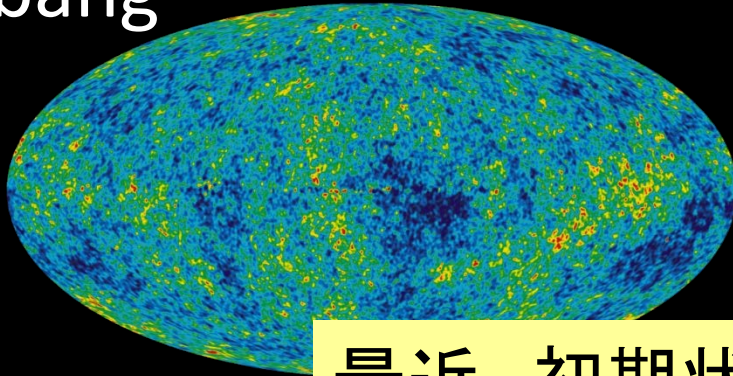
The Universe: Big Bang



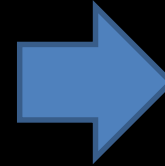
Credit: NASA

Analogy

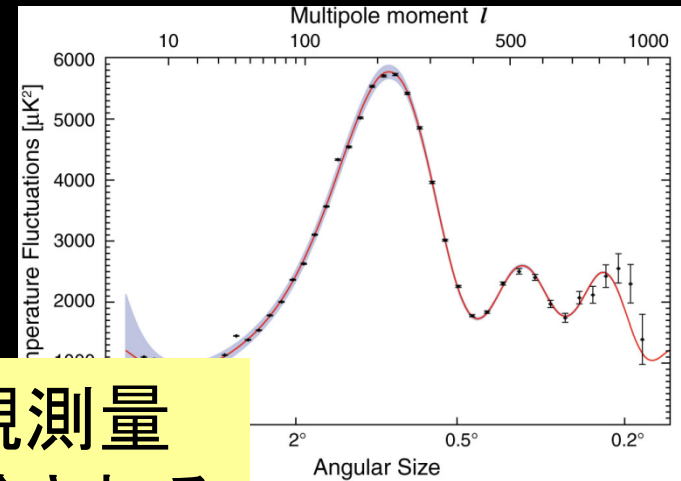
Big bang



WMAP, Astrophys

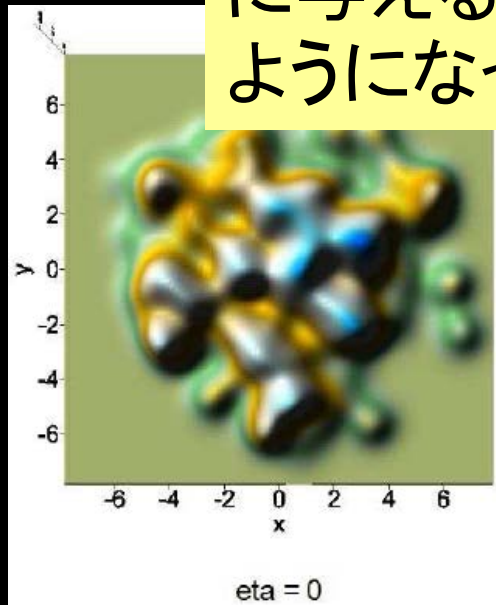


Fluctuation spectrum



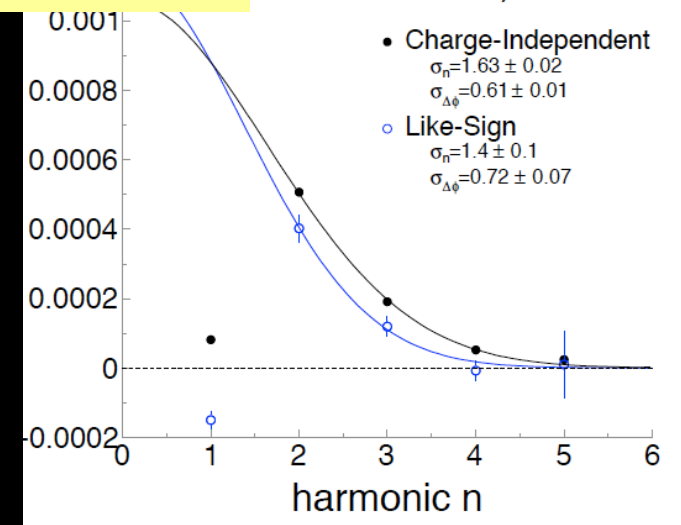
最近、初期状態の観測量
に与える影響が議論される
ようになってきた。

Little
bang



result @
QM2011

0-2.5% Central)



I.C. generated
by NeXSPheRIO

Early thermalization problem

- RHIC, LHC等の重イオン衝突に於いて、QGP生成(局所熱平衡化)が「非常に短い時間」で達成されているように考えられる事。

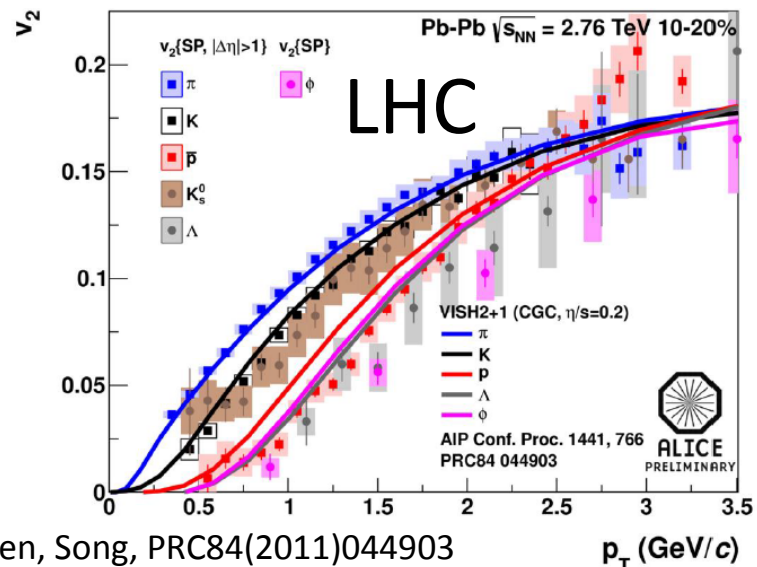
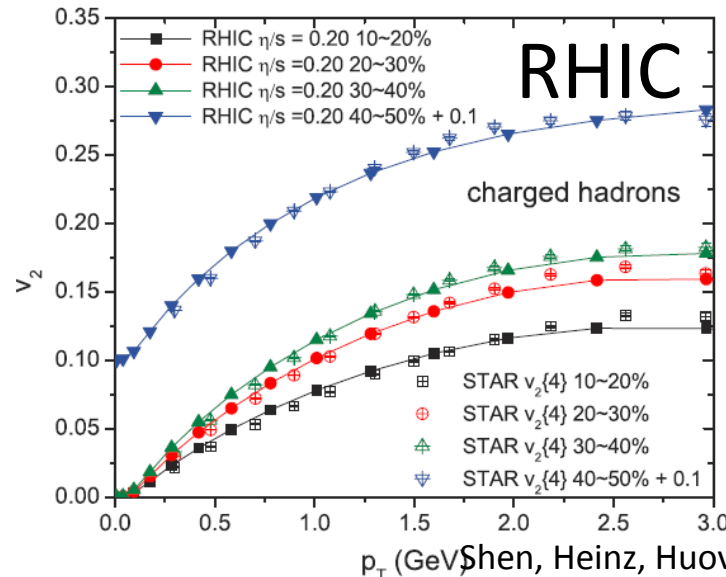
- QGPの時間発展: 粘性の小さい相対論的流体力学

流体計算の初期時間(熱平衡化時間) $\tau_0 = 0.6 \text{ fm/c}$

「楕円流れ(elliptic flow)」の強さ v_2 が流体模型で記述される

(摂動的QCDの2体散乱では、2-3 fm/c が必要 (bottom-up thermalization))

- QGPの「生成過程」、生成した時の「初期条件」を理解しないまま、QGPの物理が進んでいる！



現状は混沌としている

- 「早い」熱平衡化を説明する理論は、今のところ無い！ 非平衡過程。

(例えば、板倉、原子核研究vol.52 suppl.1 (2008)「衝突から熱平衡まで:強ゲージ場、不安定性、粒子生成」を参照)

Boltzmann方程式	十分希薄なグルオンを粒子として記述、衝突項で熱化
Vlasov方程式	ソフトな場と粒子の相互作用、プラズマ不安定性 (Weibel)
古典Yang-Mills方程式	衝突直後で場が強いとき、場“Glasma”のみがあるとして記述

- 理論的に、熱平衡状態が本当に必要なのか、可能なのか？

流体力学の初期条件は等方的であるだけでOK？

孤立系でそんなに早く熱平衡化が可能なのか？

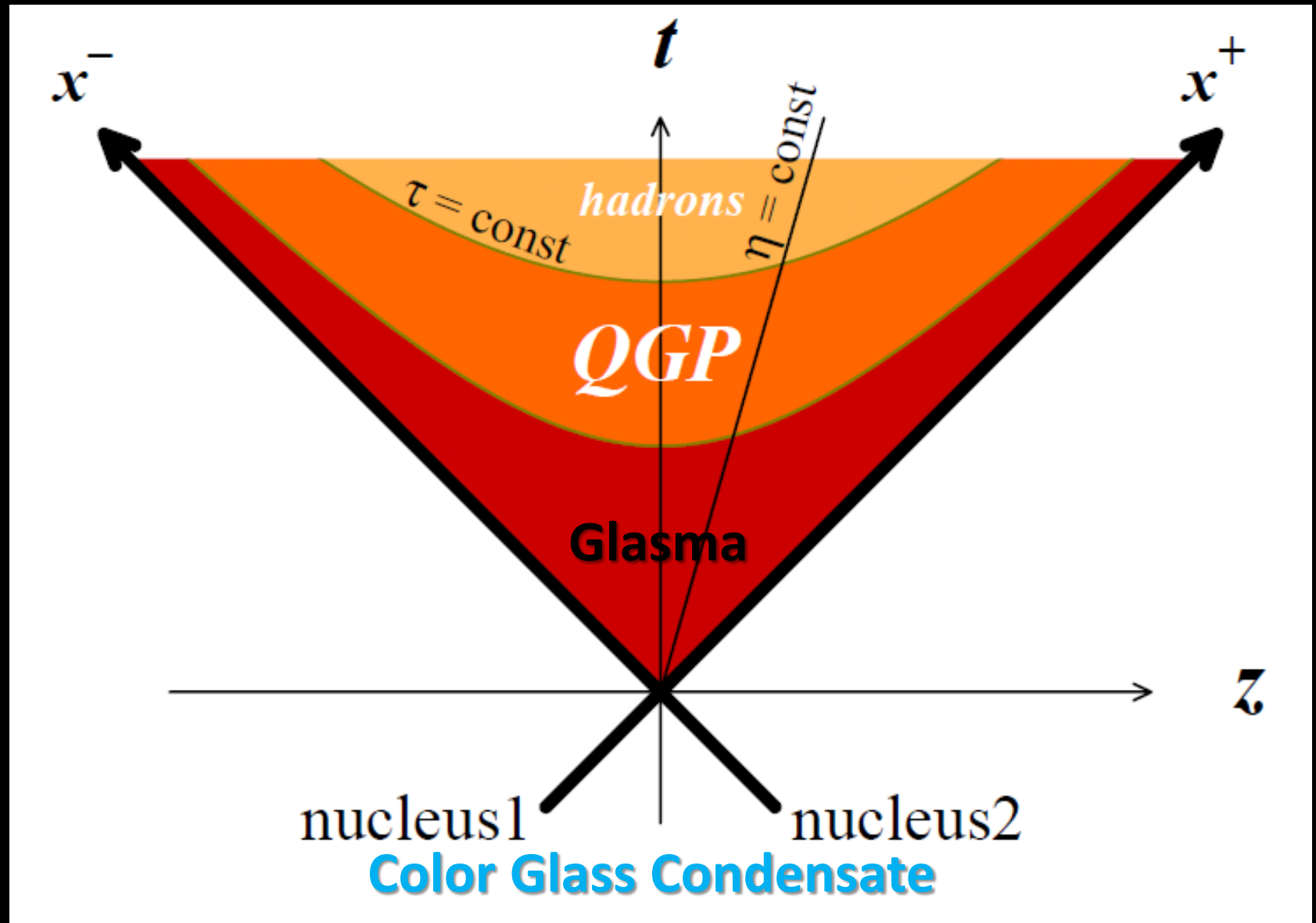
- そもそも、本当に熱平衡に達しているのか？

他の「証拠」：光子の低横運動量分布が熱光子と解釈可能

- 熱化過程を実験的に知ることはできないか？

- それでも、衝突直後に「Schwinger機構」は働いていたと考えるのは自然。

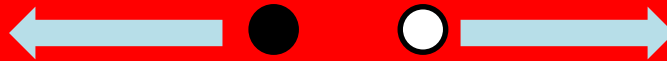
「理想的」な時間発展



Glasmaは不安定

カラー電束 Tanji, Iwazaki

クォーク・反クォーク対生成 「物質生成」!
グルオン対生成



カラー磁束 Fujii-Itakura, Iwazaki 2008

グルオン最低ランダウレベルの増大

Nielsen-Olesen不安定性



カラー電場と磁場の共存 Tanji-Itakura2012

Nielsen-Olesen不安定性で増大した
グルオン対の生成



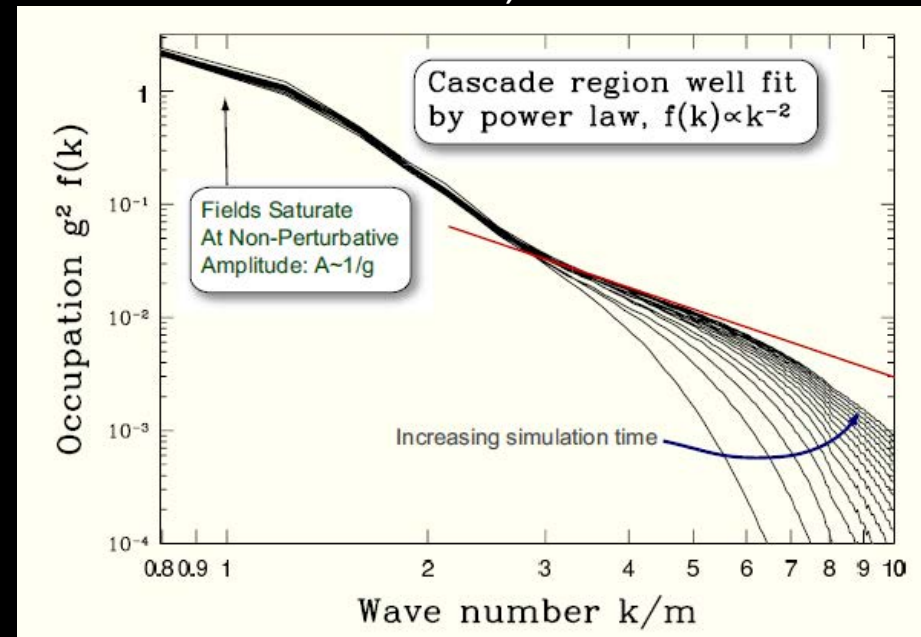
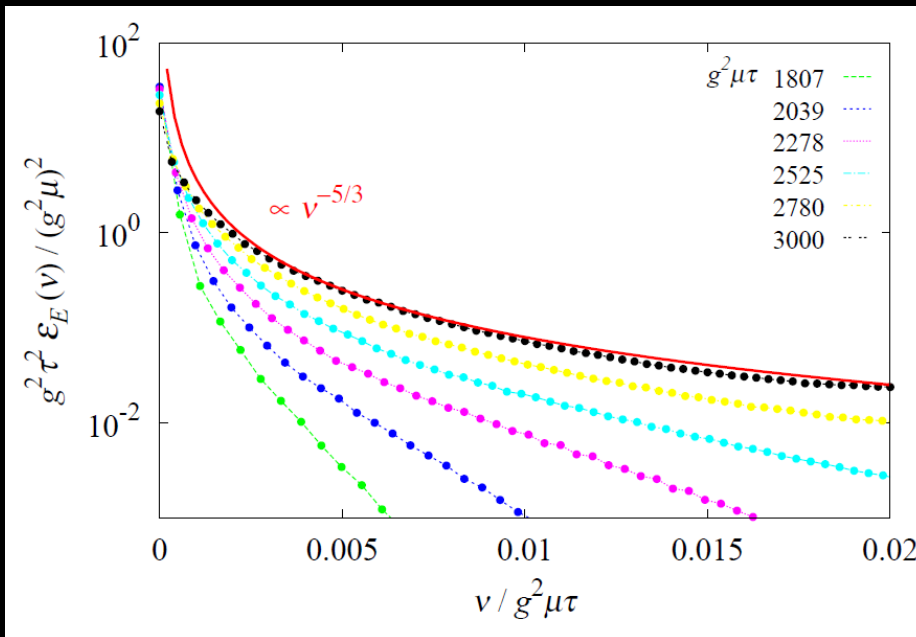
Glasmaの非線形時間発展 → 乱流的スペクトル (≠ 熱平衡)

Fukushima-Gelis, Berges, et al.

長時間シミュレーション

- 乱流的振る舞いの出現

Vlasov simulation でも見られる
Arnold-Moore, 2006



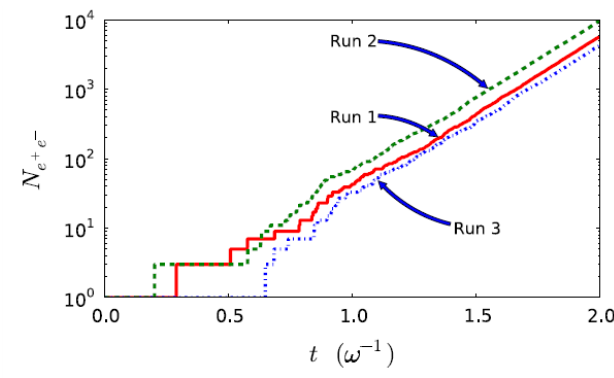
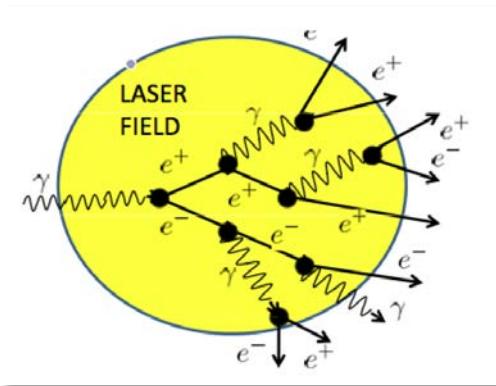
Fukushima Gelis 2012

しかし、これでは熱平衡状態ではない

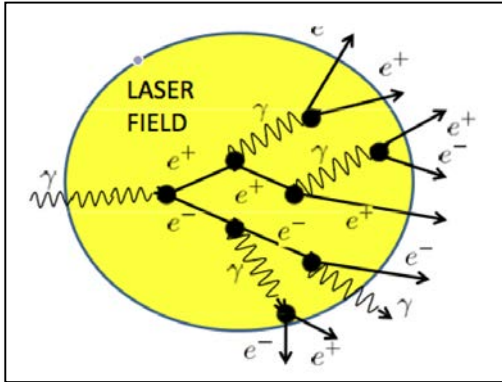
素朴な不安定性描像を超える

- 衝突直後に強いカラー電場があるからSchwinger機構が起こるのはもっともそうだ。しかし、**素朴なSchwinger機構(1ループ, 場は時間空間一定)を適用するのは正しくない。**
- 重イオン衝突で現れる場は、複雑だが、Schwinger機構の**粒子対生成確率をenhanceする効果**が幾つもある
 1. カラー電場のゆらぎ、時間変化 assisted Schwinger
 2. カラー磁場による粒子生成増大 unstable Schwinger
 3. 結合定数大きいことによる、高次効果 higher order Schwinger
- 一方で、粒子対が生成したあとの劇的な過程も考慮すべき。

ex) QED cascading Fedotov, Narozhny, Mourou, Korn PRL 2010



QED cascade



PRL 105, 080402 (2010)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
20 AUGUST 2010

Limitations on the Attainable Intensity of High Power Lasers

A. M. Fedotov and N. B. Narozhny

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow 115409, Russia

G. Mourou

Institut de la Lumière Extrême, UMS 3205 ENSTA, Ecole Polytechnique, CNRS, 91761 Palaiseau, France

G. Korn

Max Planck Institute for Quantum Optics, Garching 85748, Germany

(Received 30 April 2010; published 18 August 2010)

It is shown that even a single e^-e^+ pair created by a superstrong laser field in vacuum would cause development of an avalanchelike QED cascade which rapidly depletes the incoming laser pulse. This confirms Bohr's old conjecture that the electric field of the critical QED strength $E_S = m^2c^3/e\hbar$ could never be created.

- We cannot go beyond Schwinger's critical field $E_S = m^2/e$.
- Once an e^+e^- pair creation occurs, electrons/positrons are accelerated by the laser field to emit hard photons (brems), which then decay into e^+e^- pairs. The original laser field will be screened by this cascade.
- Very short period < Schwinger mechanism
- Cascade itself occurs at lower electric field $E > \alpha E_S$ ($\alpha = 1/137$). Thus injection of an energetic electron will be enough for the cascade to occur even in subcritical electric field.

Prototype of cascade

- Observation of photon emission and its decay in laser field

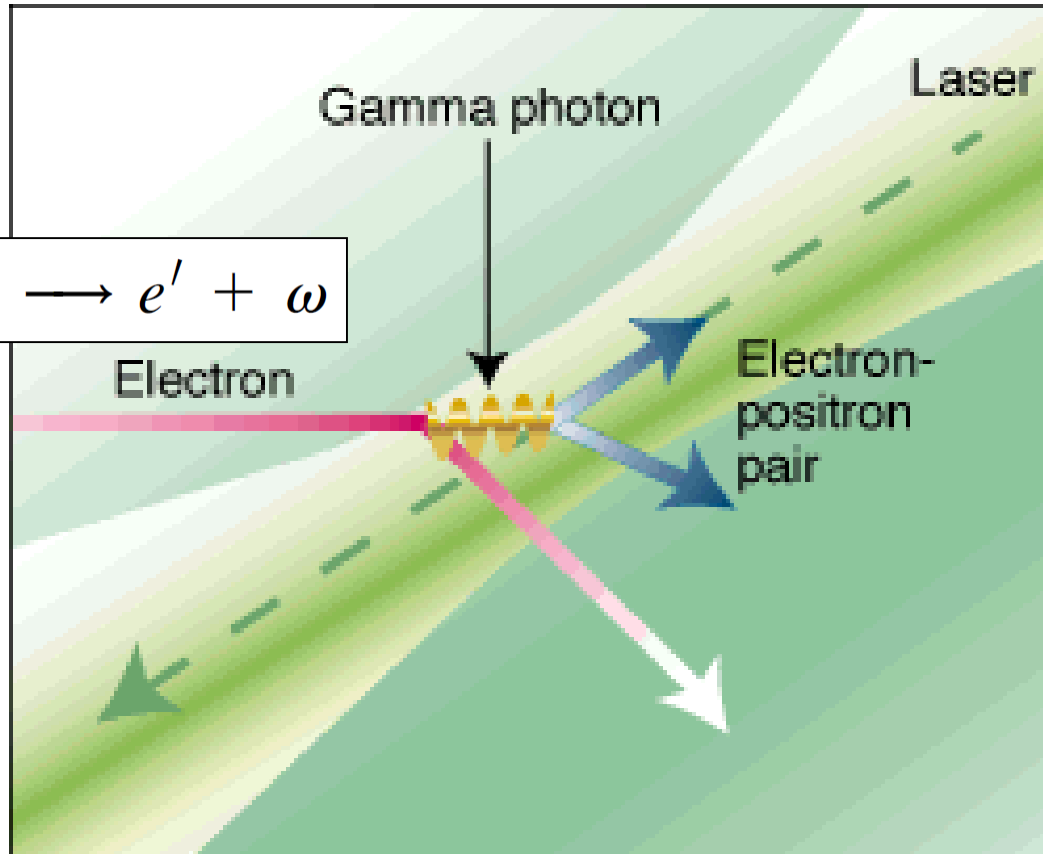
E144 @ SLAC

PRL76 (1996)

PRL79 (1997)

$$e + n\omega_0 \longrightarrow e' + \omega$$

Confirmed up to $n=4$



$$\omega + m\omega_0 \longrightarrow e^- + e^+$$

Electron energy 46.6 GeV

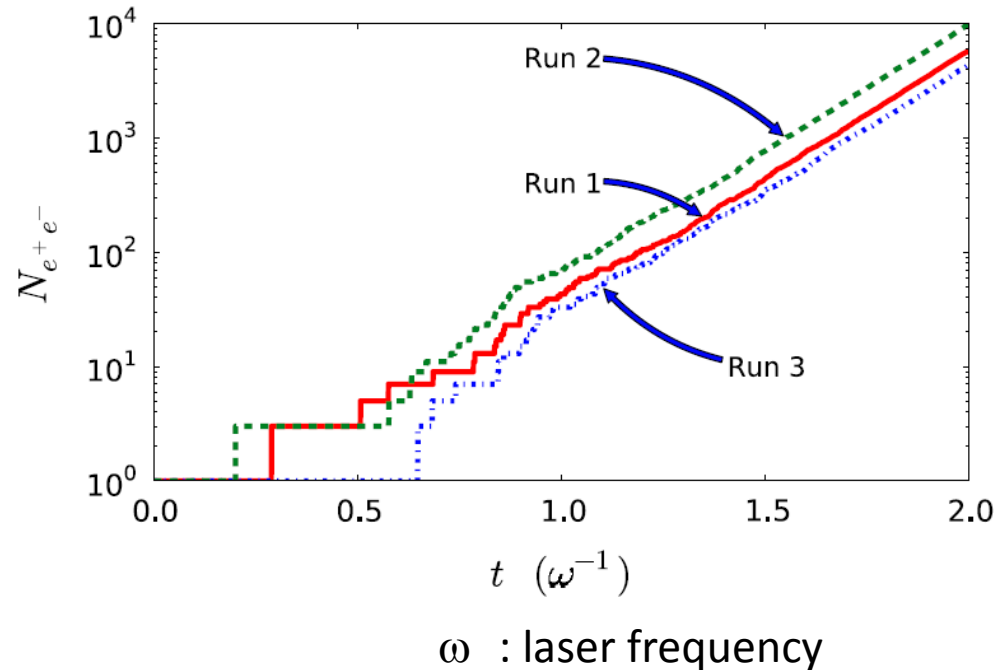
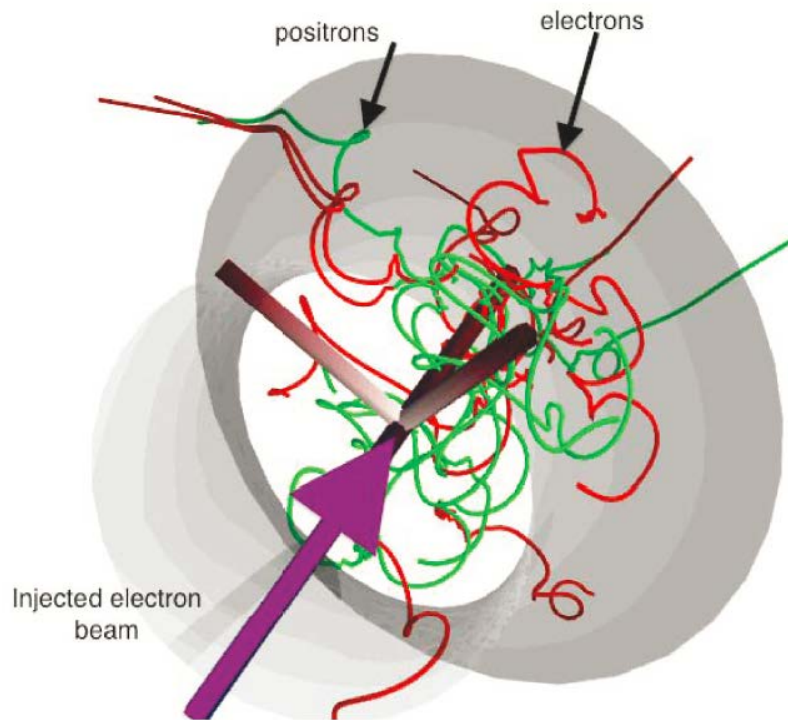
Laser Nd:glass 1054 and 527 nm

Peak intensity 10^{18} W/cm²

Numerical simulation

Elkina, et al. PRST 14 (2011)

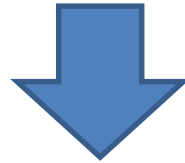
Monte-Carlo simulation of *cascade equations*



Number of e^+e^- pairs grow exponentially in time.

Glasmaに対する強い場の物理は、熱平衡化問題を解くうえで重要な視点(不安定性、雪崩)を提供するという立場だった

しかし、
最も「強い電磁場」は衝突イベントの最初期にこそ存在する！



「強い場の物理」は最初期のみで出現
つまり、強い場の物理に特化した物理量を見れば、
重イオン衝突の最初期の情報を知り得るはず！

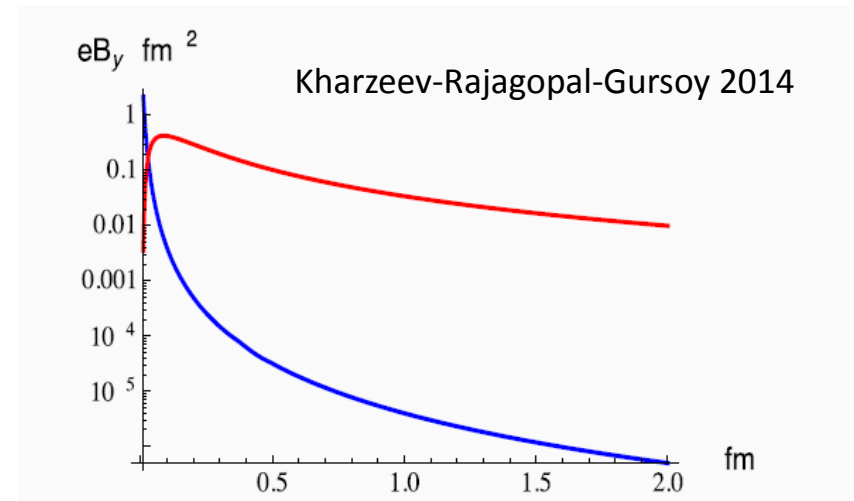
そのためには、重イオン衝突で
出現する場の理解を深める必要

電磁場の時間変化をもっとよく理解しよう

- 素朴な古典電磁氣的描像は正しいか？
- 超臨界電場も生成 $\Rightarrow$ 有限時間、有限サイズ効果を含めたSchwinger機構（あるいは摂動的粒子対生成？）
- QGP生成の効果？QGPは比較的大きな電気伝導度を持つ
- これらを考慮した計算はされていない。MHD計算の必要性。

衝突直後からQGPが存在し、
電気伝導率を一定として計算

磁場の急激な変動を嫌う効果
(磁場を増大させるのはない)



このような考察を通じてはじめて重イオン衝突初期の
情報を得るための定量的に信頼のいく議論ができる

初期宇宙における QGP

QGP in Early Universe

重イオン衝突でのQGP形成は、しばしば宇宙初期のQGPの再現と言われる。

本当か？

QGPの生成過程・状況は重イオン衝突と初期宇宙とで全く異なる

もう一度真剣に検討しなおす必要があるのでは？

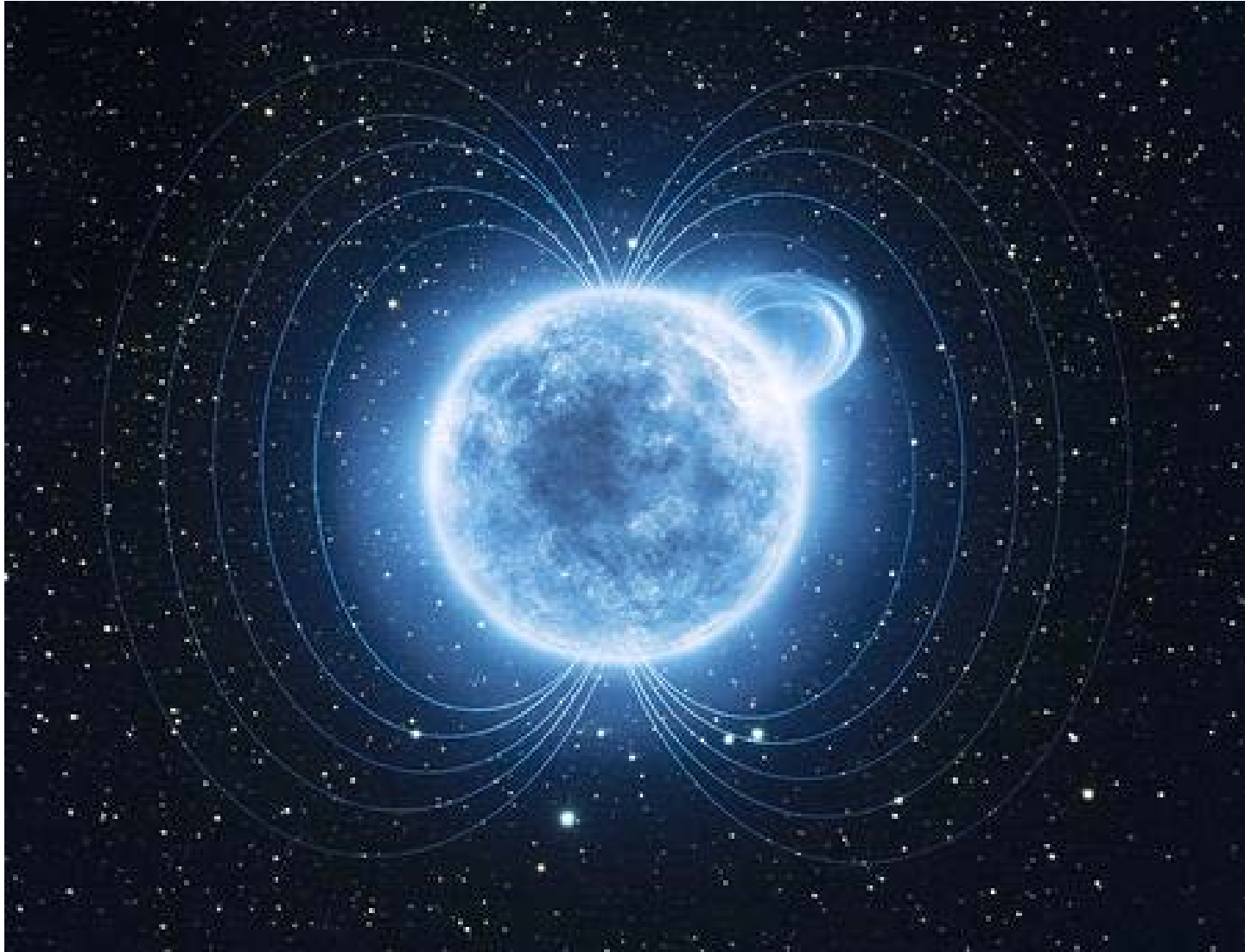
QGP in Early Universe

- **生成過程が本質的に異なる:**
超高温の熱的な背景のもとで、あるいは再加熱過程でクォークやグルオンが生成
$$\text{EW plasma} + \text{QGP} \rightarrow \text{QGP}$$
- **超巨大なQGPの生成:**
QGPからEM的自由度が逃げていかない
QGPとQED plasmaの共存
incoherentな強い光子場の存在
quarkは電荷を持つ
(EWPTの前は、EW plasma + QGP + QED plasma)
- **そもそも最初から強い電磁場が存在した可能性**
← 電弱相転移で超強磁場生成？ cf) Vachaspati (1991)

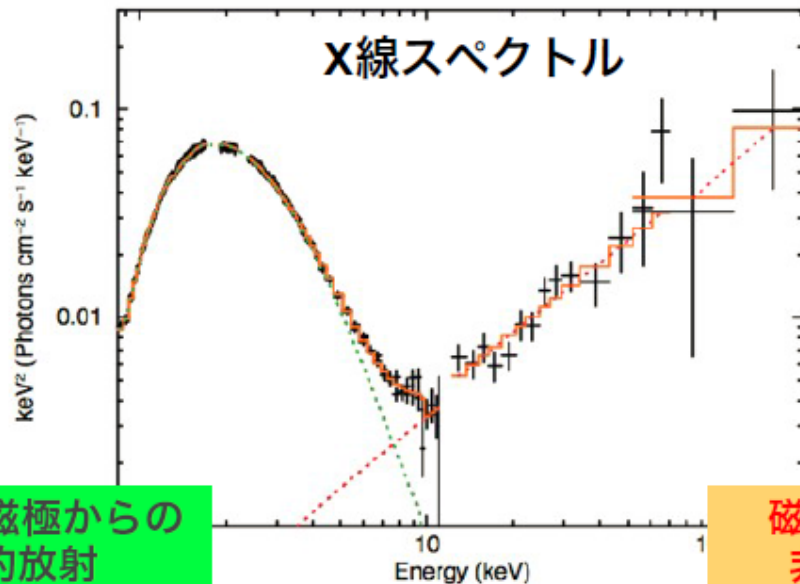
少なくとも、光子場と強く結合したQGPを扱う必要あり

強磁場天体に
おける様々な効果

magnetar



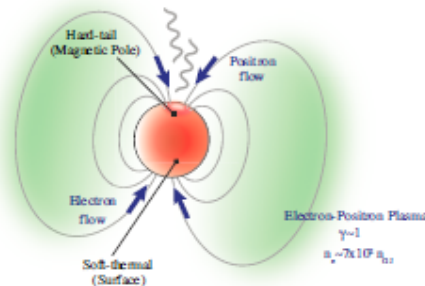
マグネターの特徴1



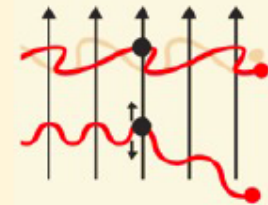
表面の磁極からの
熱的放射

磁気圏からの
非熱的放射

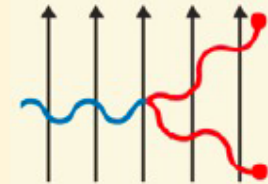
From the slide of
Enoto 2013



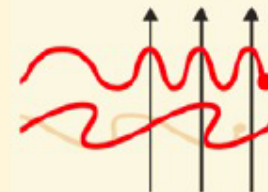
散乱断面積の抑制



光子の自然分裂



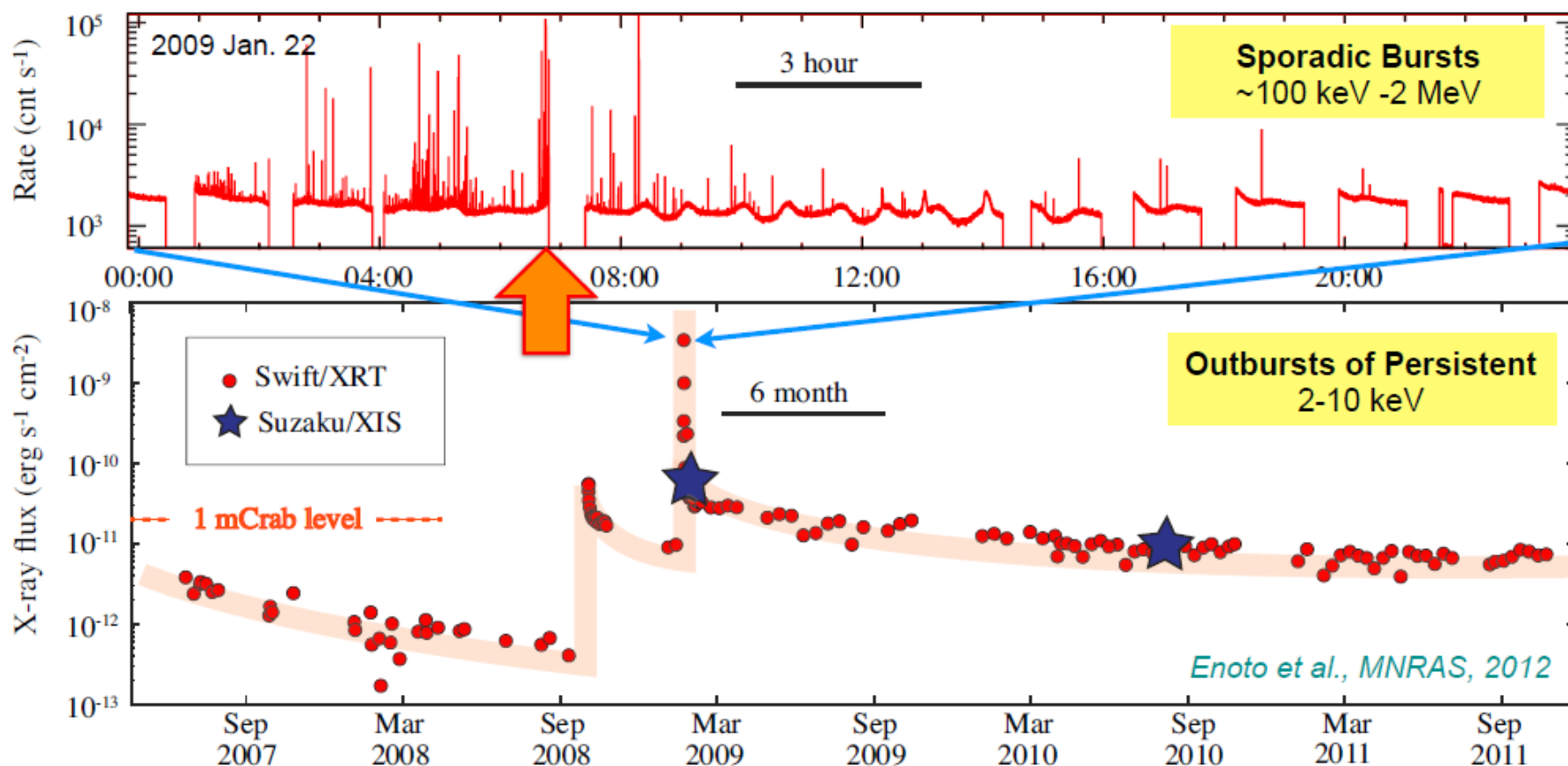
真空の複屈折



Magnetic field → anisotropy in photon spectrum → effects of polarization
High energy photons ($E > 500 \text{ keV}$) split into low energy photons

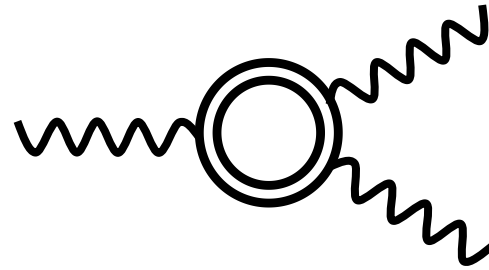
マグネターの特徴2

- Outbursts and short bursts



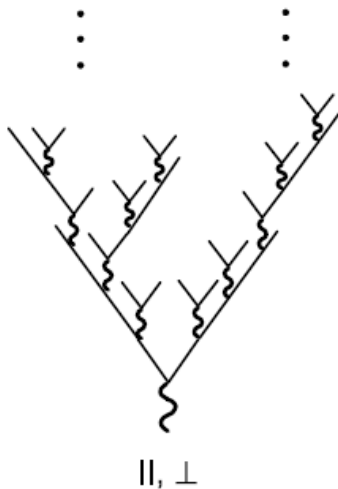
Photon splitting

Impossible in vacuum



LOW FIELD CASCADES

$$B < 0.1 B_{cr}$$



HIGH FIELD CASCADES

$$B > 0.1 B_{cr}$$

No Splitting

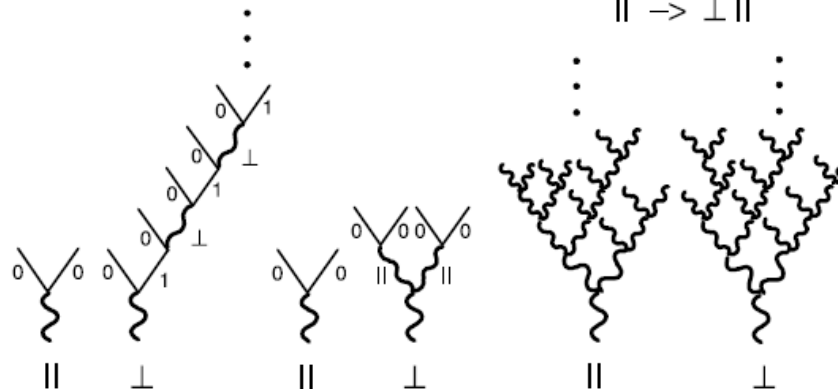
$\perp \rightarrow \parallel \parallel$
Splitting Only

3 Splitting Modes

$\perp \rightarrow \parallel \parallel$

$\perp \rightarrow \perp \perp$

$\parallel \rightarrow \perp \parallel$



Baring, Harding
ApJ 547 (2001)

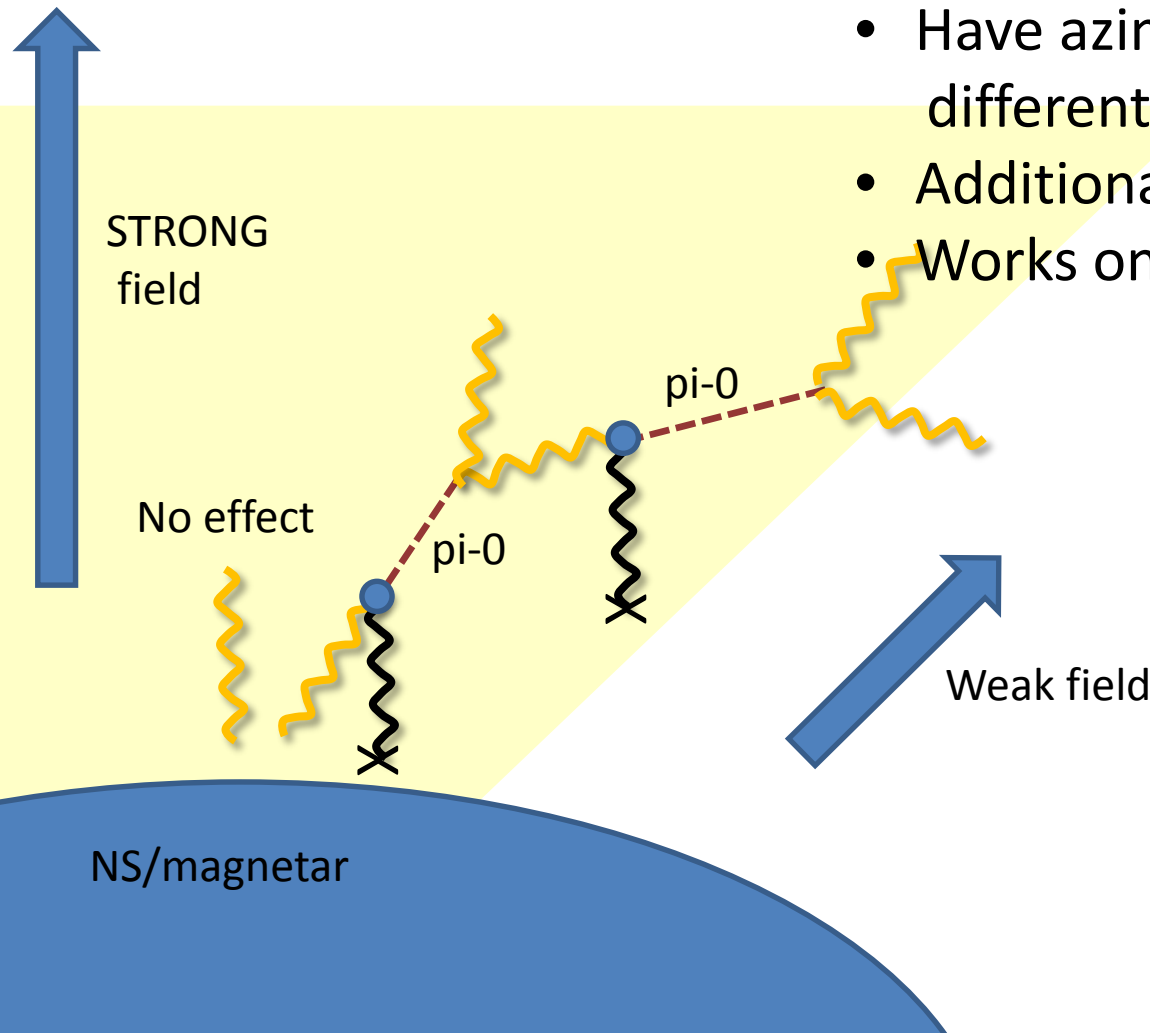
Jet production
around magnetic
poles

超強磁場で可能な新しいカスケード

Photon conversion into π^0 and π^0 2gamma decay

Hattori, KI, Ozaki 2013

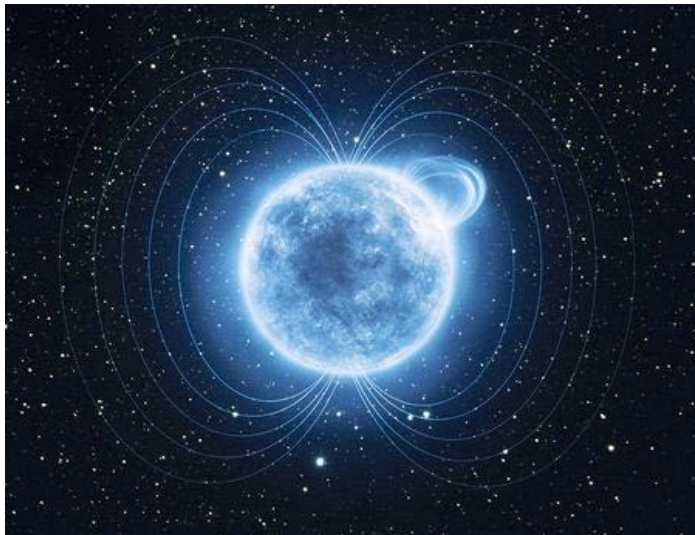
- Have azimuthal distribution different from photon splitting
- Additional source of photons
- Works only in VERY strong B



驚くべき SGR 0418+5729 の観測

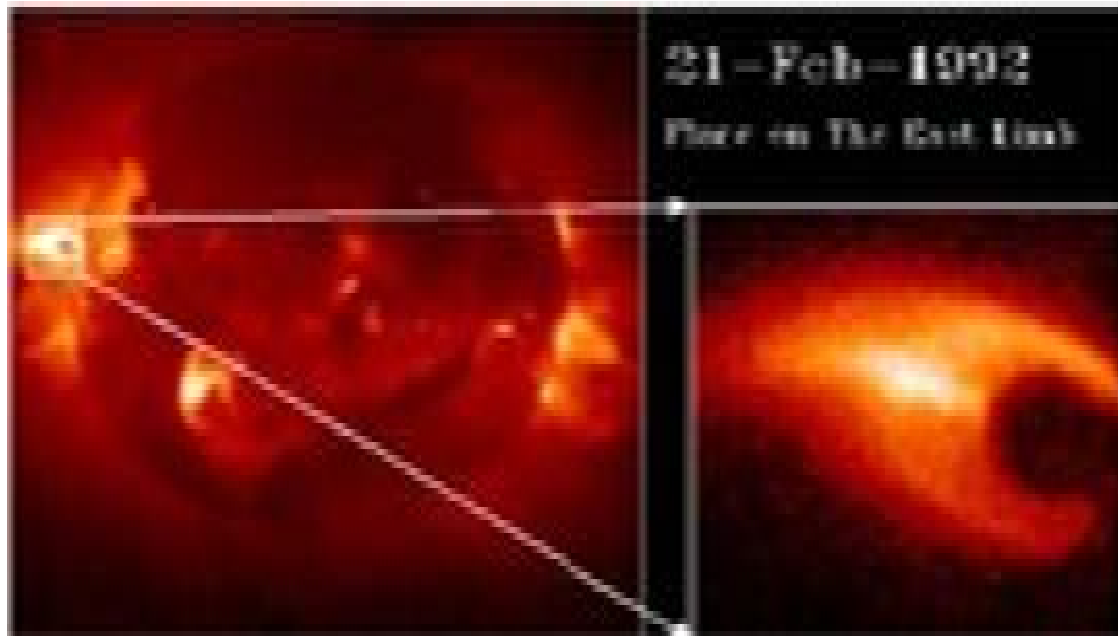
Nature 500 (2013) 312 15 August 2013

- Magnetic dipole model suggests moderate value of magnetic fields 6×10^{12} Gauss. But this object shows bursts, a property typically seen in magnetars.
- “Phase dependent” X-ray measurement suggested “***proton synchrotron resonance***” and spots with very high magnetic fields $> 2 \times 10^{14}$ Gauss.

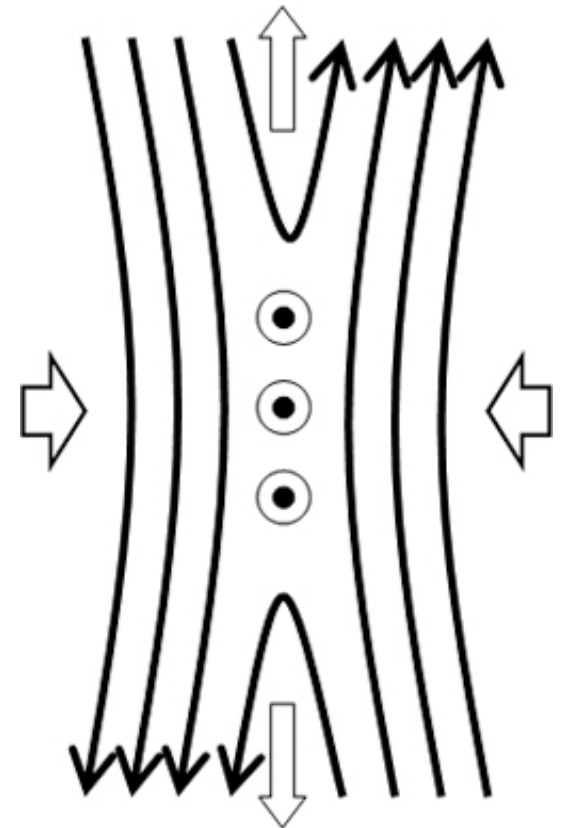


太陽における「磁気再結合」

- 太陽磁場は、強力ではないが、詳細な観測が可能
- 特に「磁気再結合」が観測されている

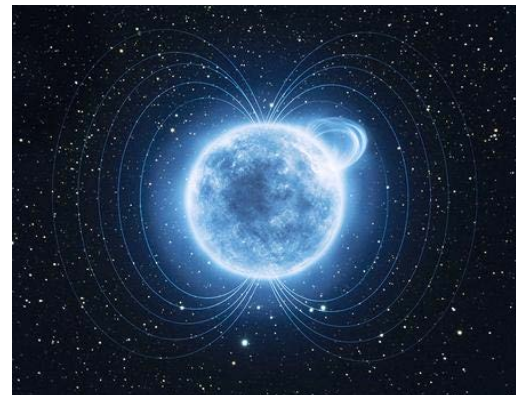


1992年、フレアに「カस्प構造」の発見



バーストは磁気再結合か？

- 強磁場スポット → 黒点との類似
- 太陽との相違点
 1. 電子とイオンではなく、電子・陽電子(もしかしたら陽子)
← 陽子のcomposition rateを変化させてみるべき
 2. 磁場が異常に強い 太陽 0.1-0.4 Tesla (黒点)
マグネター 10^{11} Tesla
← 単なるMHDではなく、非線形QEDを含めるべき
 3. サイズ 太陽 直径 140万km
マグネター 直径 10km 程度



その他の面白い問題

- **強磁場中での非自明な光子ガス**

光子のn点相互作用が可能

→ n点相互作用を持つ有効作用cf: Euler-Heisenberg
磁場が強くなるにつれ、高次項が効く

3点まで photon splitting and merging

増殖 vs 融合 → 飽和? 光子のBEC的状态?



photon liquid?

- **Nonabelian Magnetic Reconnection**

重イオン衝突: カラー磁場を持つflux tube がふんだんに存在
flux tubeどうしの相互作用の中で最も劇的なものが磁気再結合?

→ 熱平衡化? 系の等方化?

などなど、面白い問題はたくさんあります

まとめ

- 強い場の物理は、様々な物理系の極限的状況で現れる重要かつ新しい視点。とくに、各分野のフロンティアを開拓する際に必要。
- 系に対する微小な摂動ではなく、系のダイナミクスを本質的に変えるほどの「強い」場を扱う。そこで議論するのは、場自体の非自明なダイナミクス、場の中での粒子の性質変化、また多体系としての媒質の性質変化。
- ハドロン・原子核物理に関係しては、重イオン衝突の初期過程の理解、中性子星・マグネターの内部構造という、未解明の問題と密接に関係がある。
- そのほかにも重要でやりがいのある面白い問題(基礎的なものから現象論的なものまで)がたくさん存在するので、若いフレッシュな方々の参戦をお待ちしております。

宣伝 KEKには委託学生制度があります。興味のある人は帰ったら指導教員に相談すること。