

宇宙理論研究室ガイダンス

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2007j.html

2007年2月7日

教授： 佐藤勝彦

(素粒子的宇宙論、天体核物理)

助教： 向山信治

(相対論、ブレイン宇宙論)

教授： 須藤 靖

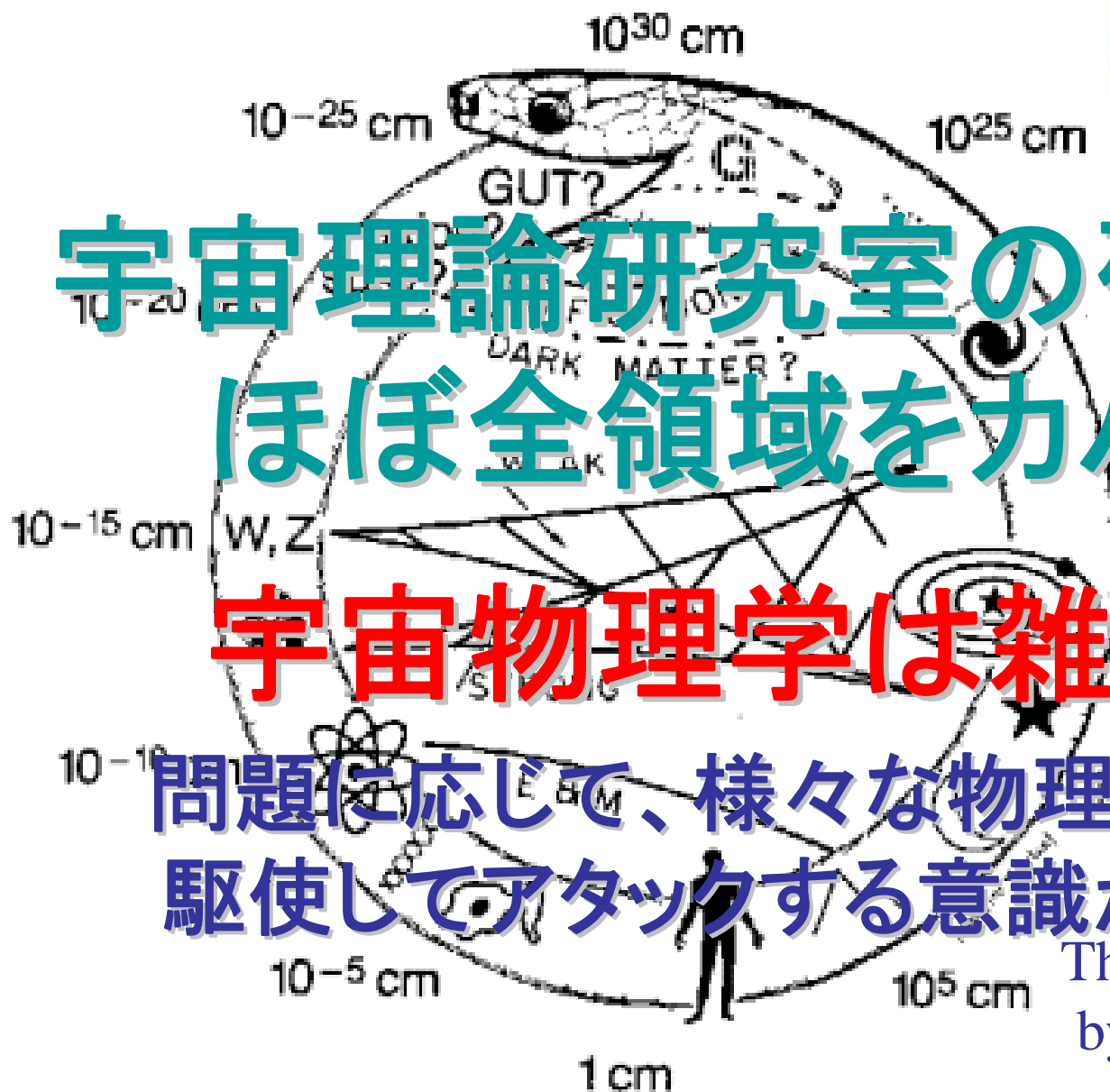
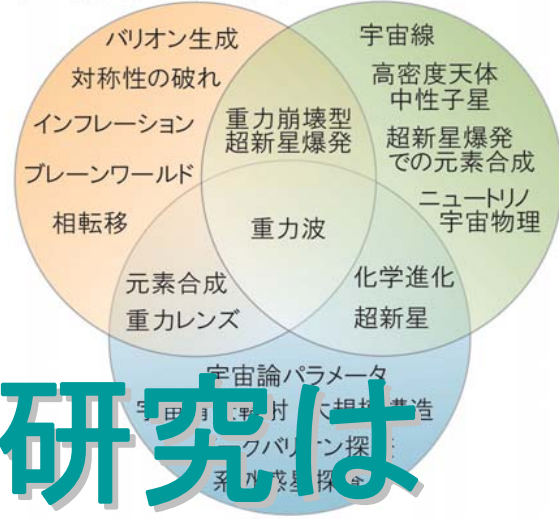
(観測的宇宙論、太陽系外惑星)

助教： 樽家篤史

(観測的宇宙論、重力波)

宇宙理論研究室での研究内容

- **初期宇宙論・相対論**
 - インフレーション理論
 - 多次元/ブレーン宇宙論
 - 重力波
- **高エネルギー天体物理学・高密度星**
 - 中性子星の構造と状態方程式
 - 超新星爆発シミュレーション
 - 超新星ニュートリノ
 - 高エネルギー宇宙線の起源と伝播
- **観測的宇宙論**
 - 宇宙のダークエネルギー探査
 - 宇宙のダークバリオン探査衛星(DIOS)
 - 太陽系外惑星



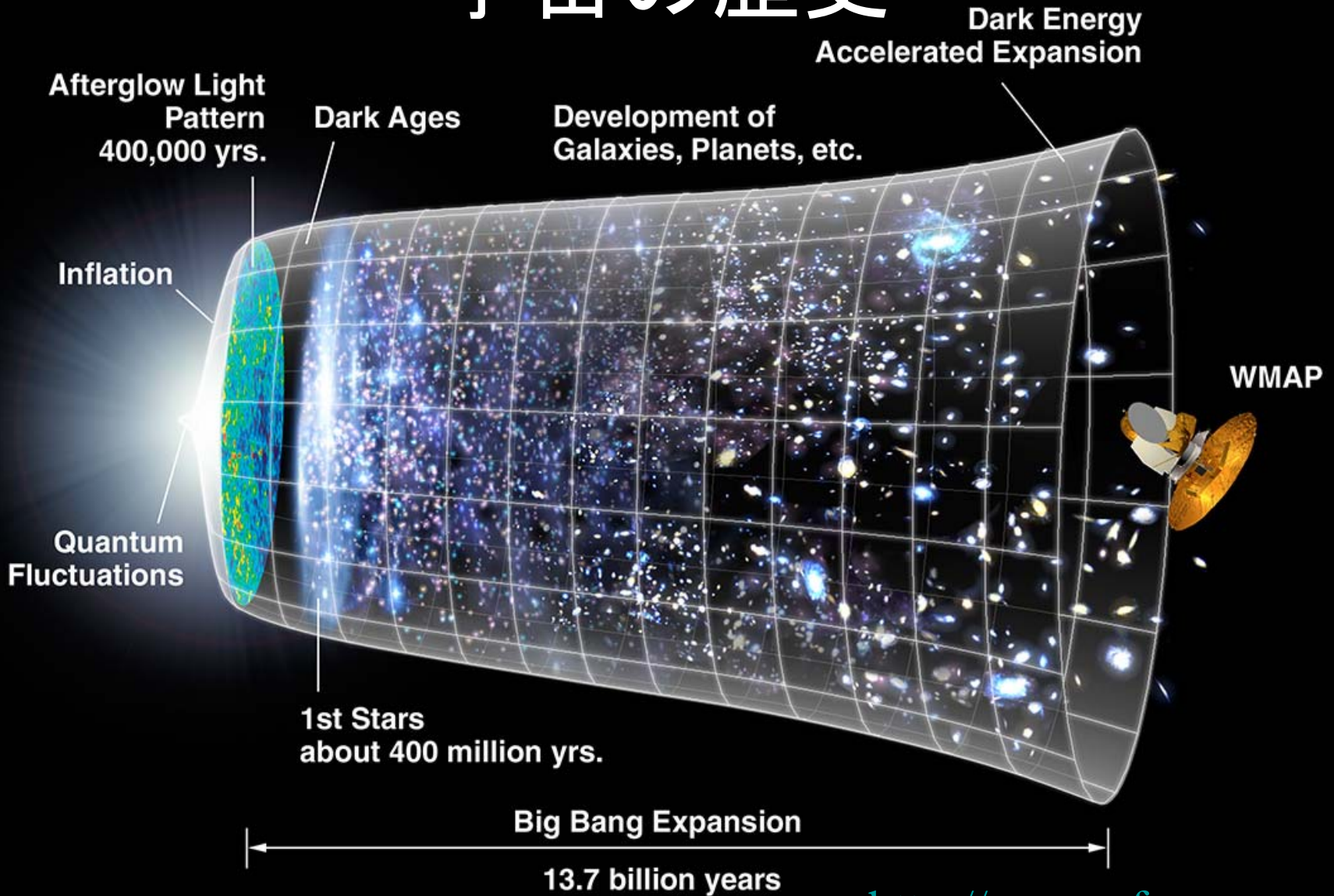
宇宙理論研究室の研究は ほぼ全領域をカバー

宇宙物理学は雑学！

問題に応じて、様々な物理法則を
駆使してアタックする意識が大切

The Cosmic Uroboros
by Sheldon Glashow

宇宙の歴史





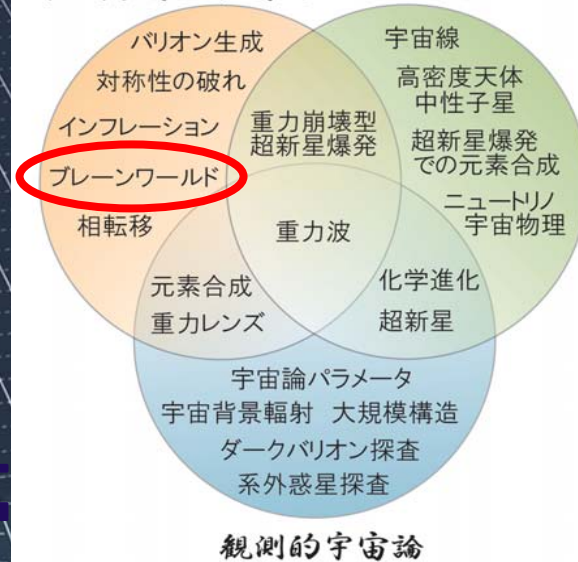
ブレーンワールド

アインシュタインの夢



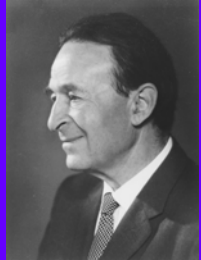
- ・重力は一般相対性理論によって幾何学によって記述
- ・他の力も幾何学で重力と一緒に統一的に理解できないか？

初期宇宙・相対論 天体核物理



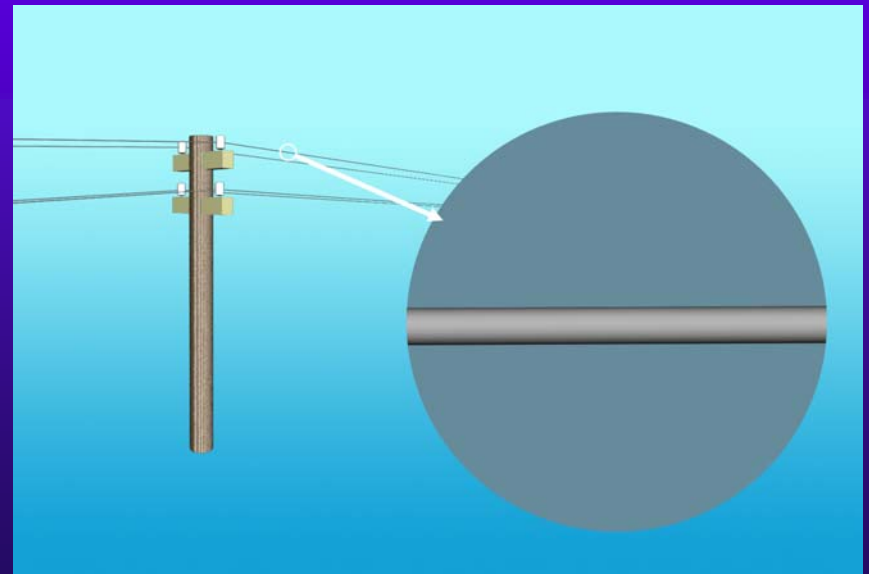
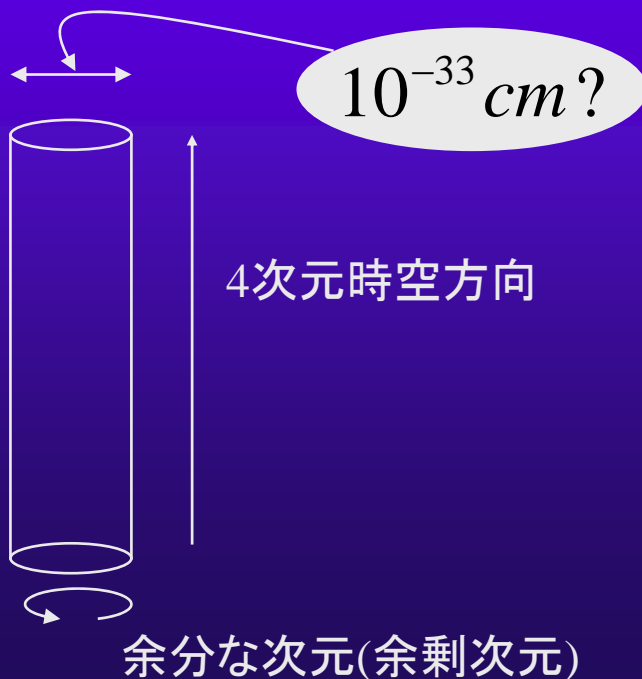
カルツァ・クライン理論

カルツァ クライン

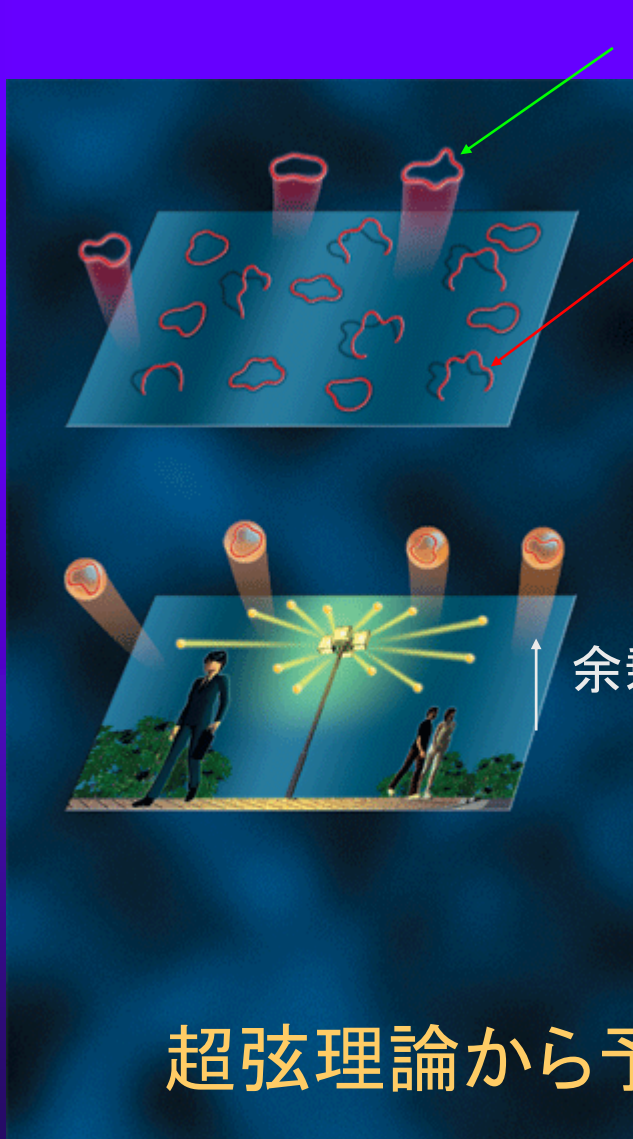


～ 重力と電磁気力を5次元時空で統一 ～

- ◆ 5次元時空で重力と電磁力を**平等**に扱う
- ◆ 4次元時空は、余分な1次元(余剰次元)を小さくコンパクト化することで実現される。



ブレーン上の世界(宇宙)



重力

物質

物質はブレーン上に張り付いている

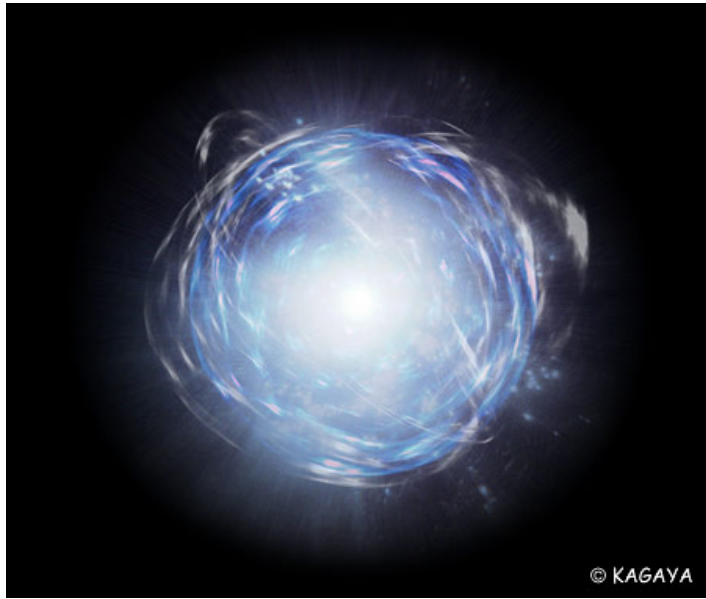
余剰次元方向

我々の3次元宇宙は高次元空間
を運動するブレーン

超弦理論から予想される自然な宇宙像



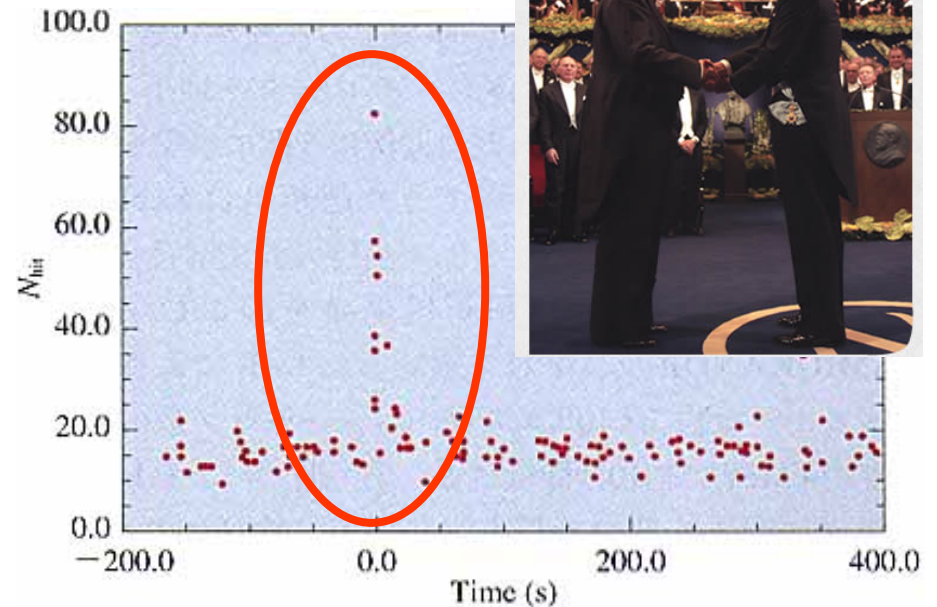
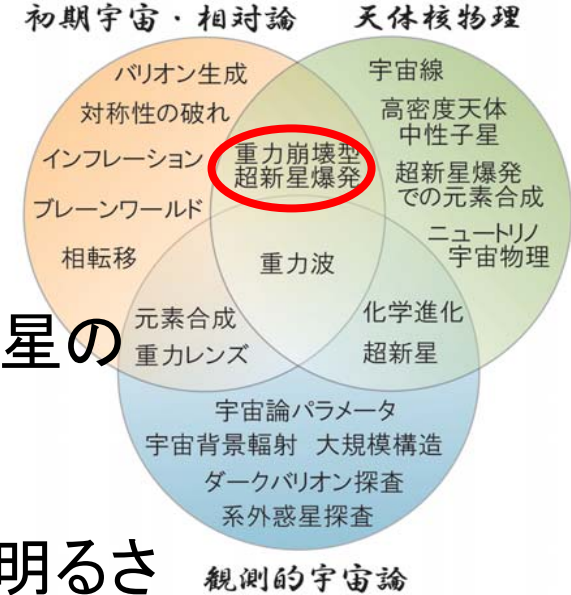
超新星爆発の研究



核燃焼を終えた重い星の
最期の大爆発

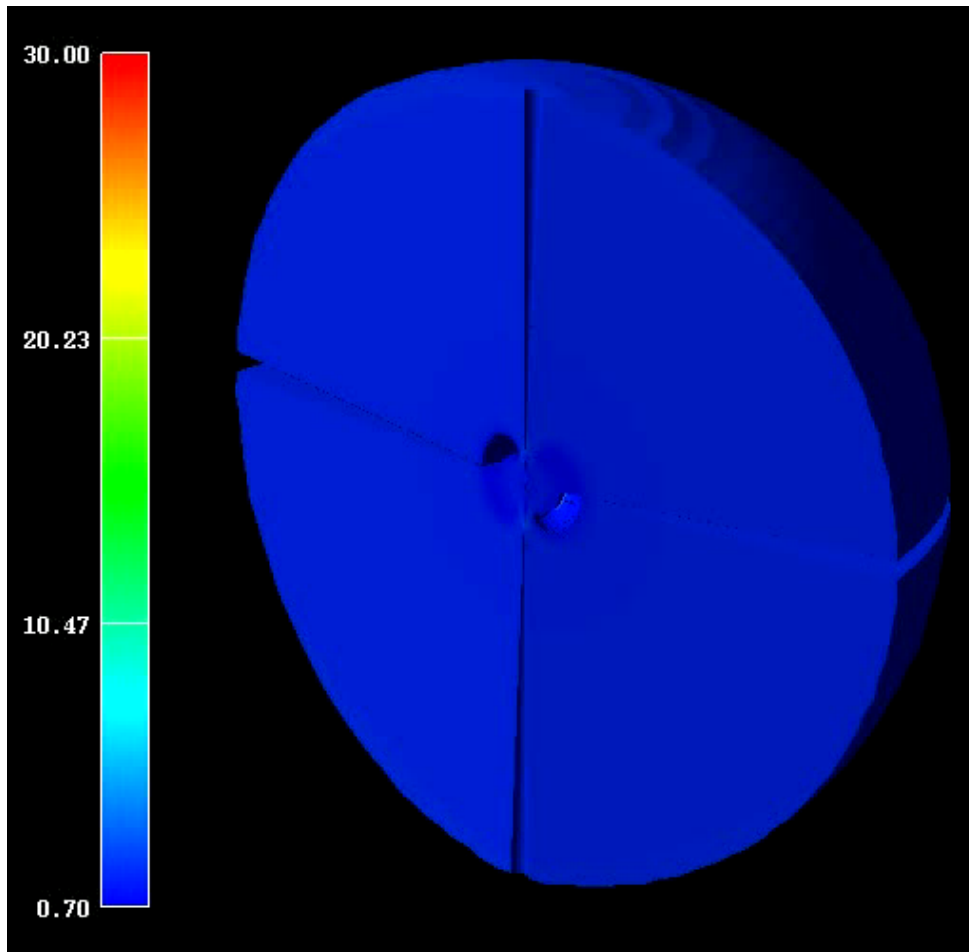
太陽の100億倍もの明るさ

核反応でニュートリノが放出
高エネルギー物理の実験場



超新星1987Aからのニュートリノ検出

超新星爆発の磁気流体シミュレーション



超新星爆発の原理の解明

自転、磁場など形状が重要

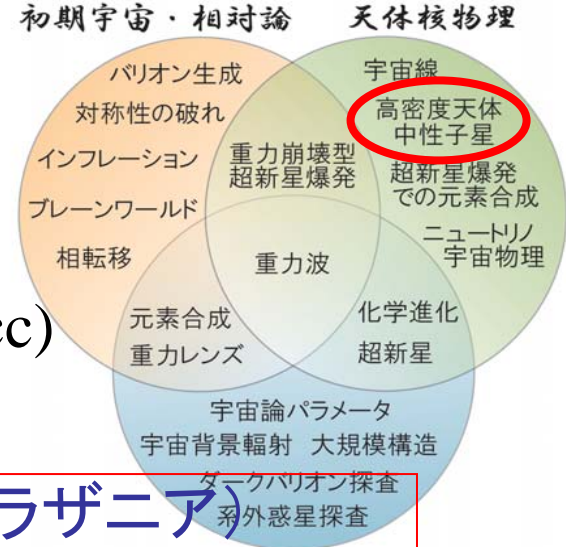
大規模シミュレーションが必要

強磁場中性子星が残される
ような計算でジェット状の爆発
が生じることを示した

星の断面 エントロピー(温度の高いところ)

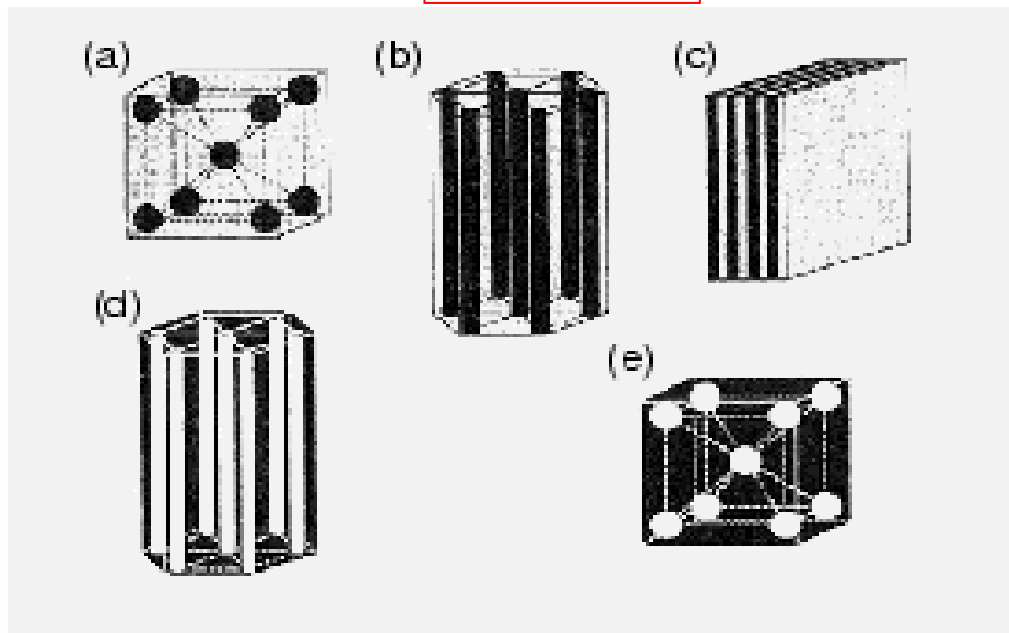
超新星・中性子星内の核物質 質パスタ相

超新星・中性子星などの高密度領域($\sim 10^{13}$ g/cc)
では原子核の形状が変化する



球(ミートボール) → 棒(スパゲティ) → 板(ラザニア) → 棒状バブル(アンチスパゲティ) → 球状バブル(チーズ) → 一様核物質

パスタ相



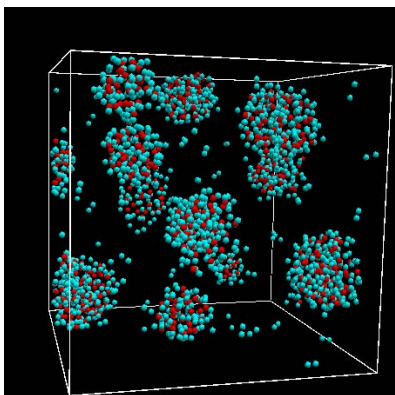
パスタ相の
イメージ図
(K. Oyamatsu
Nucl. Phys. A
561, 431(1993))

シミュレーションで再現する 原子核 pasta 相の姿

量子分子動力学法による高密度核物質のシミュレーション

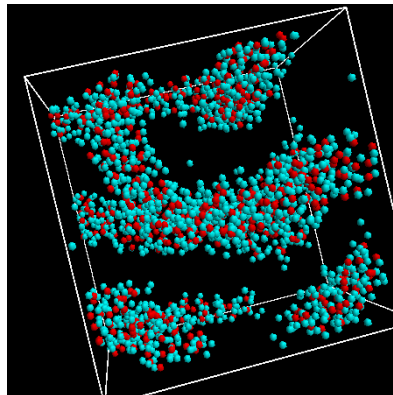
球

$0.100 \rho_0$



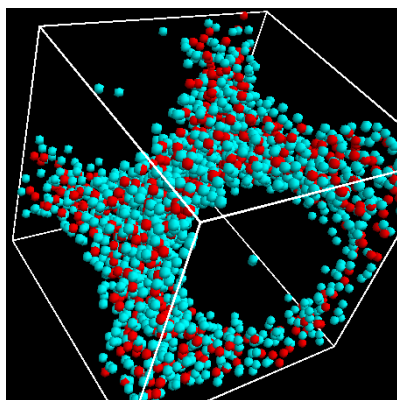
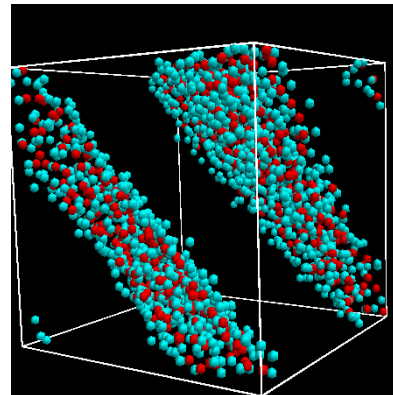
棒

$0.200 \rho_0$



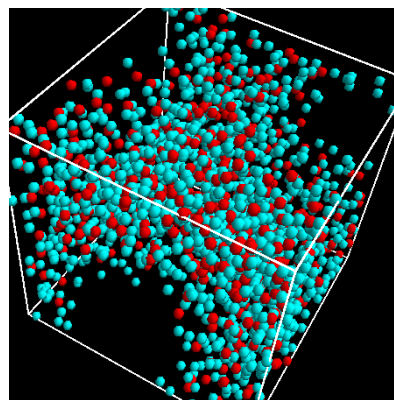
板

$0.393 \rho_0$



棒状バブル

$0.490 \rho_0$



球状バブル

$0.575 \rho_0$

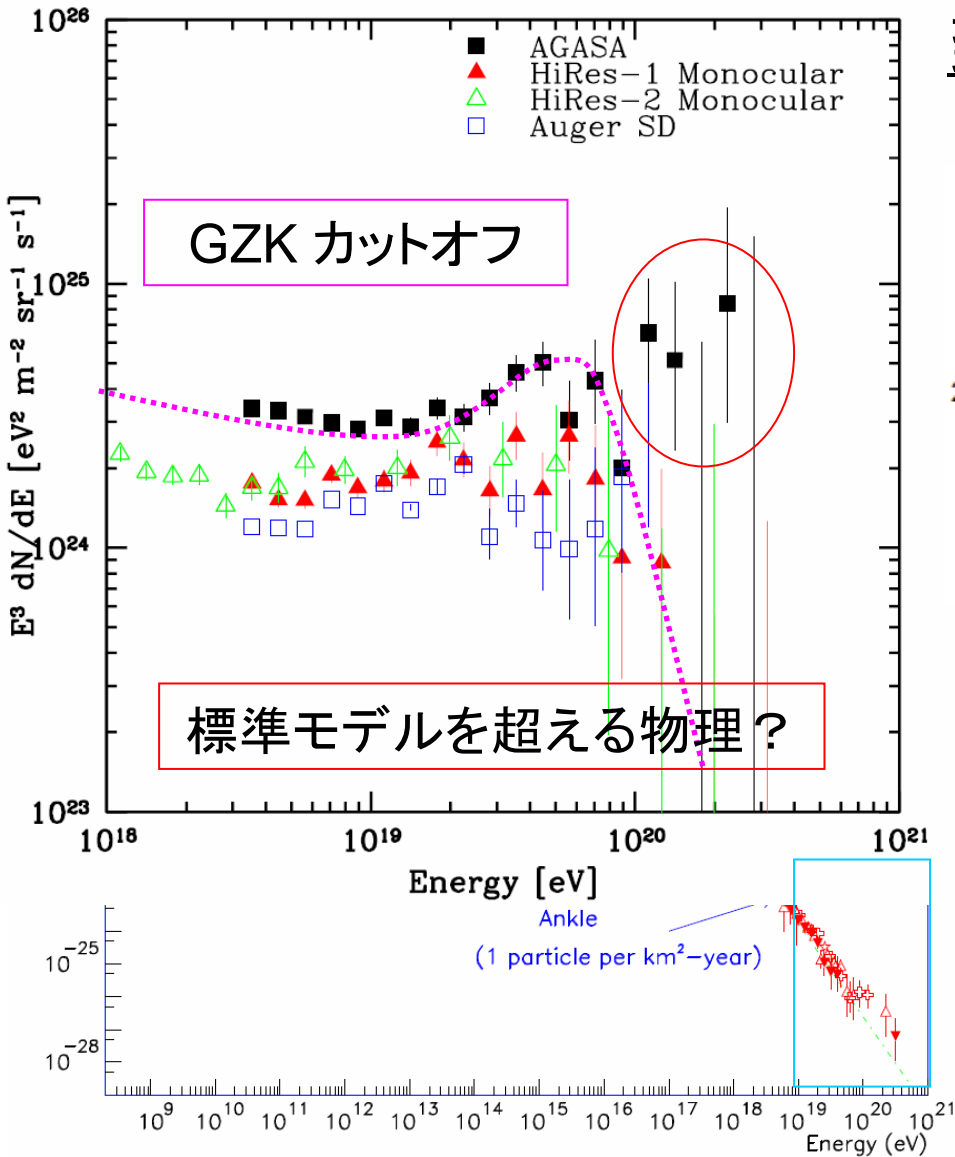
赤: 陽子

青: 中性子

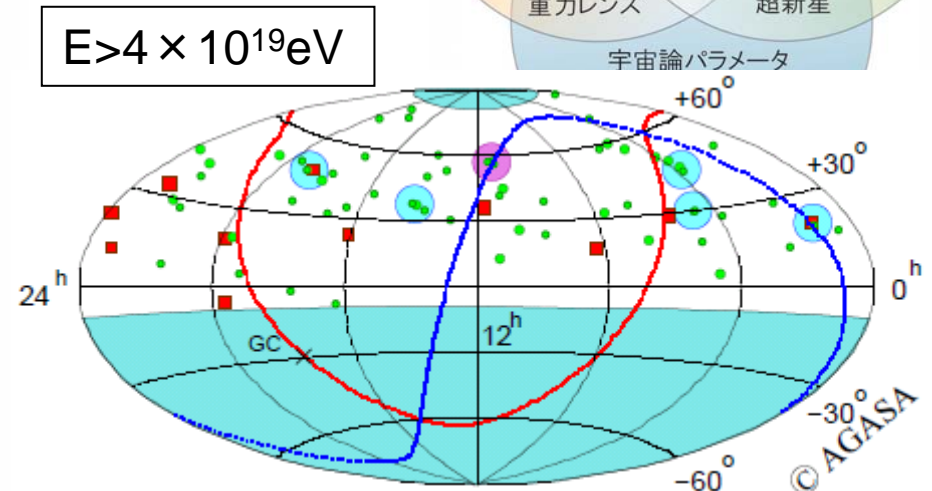
$\rho_0 = 0.168 \text{ fm}^{-3}$
(核子の数密度)

最高エネルギー宇宙線

エネルギースペクトル



到来方向分布

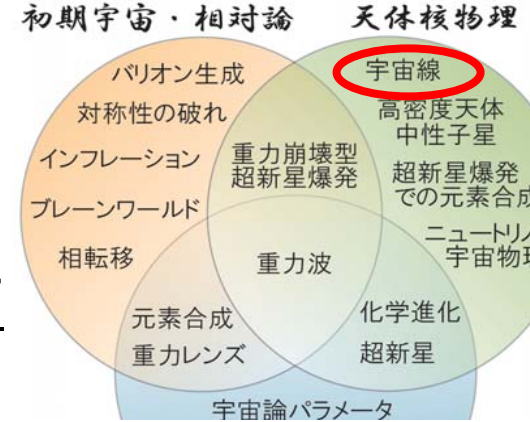


最高エネルギー成分で
小スケールの非等方性

➡ ソースの情報?

荷電粒子での最高エネルギー
天文学が議論されつつある

(Takami H. & Sato K., 2007)



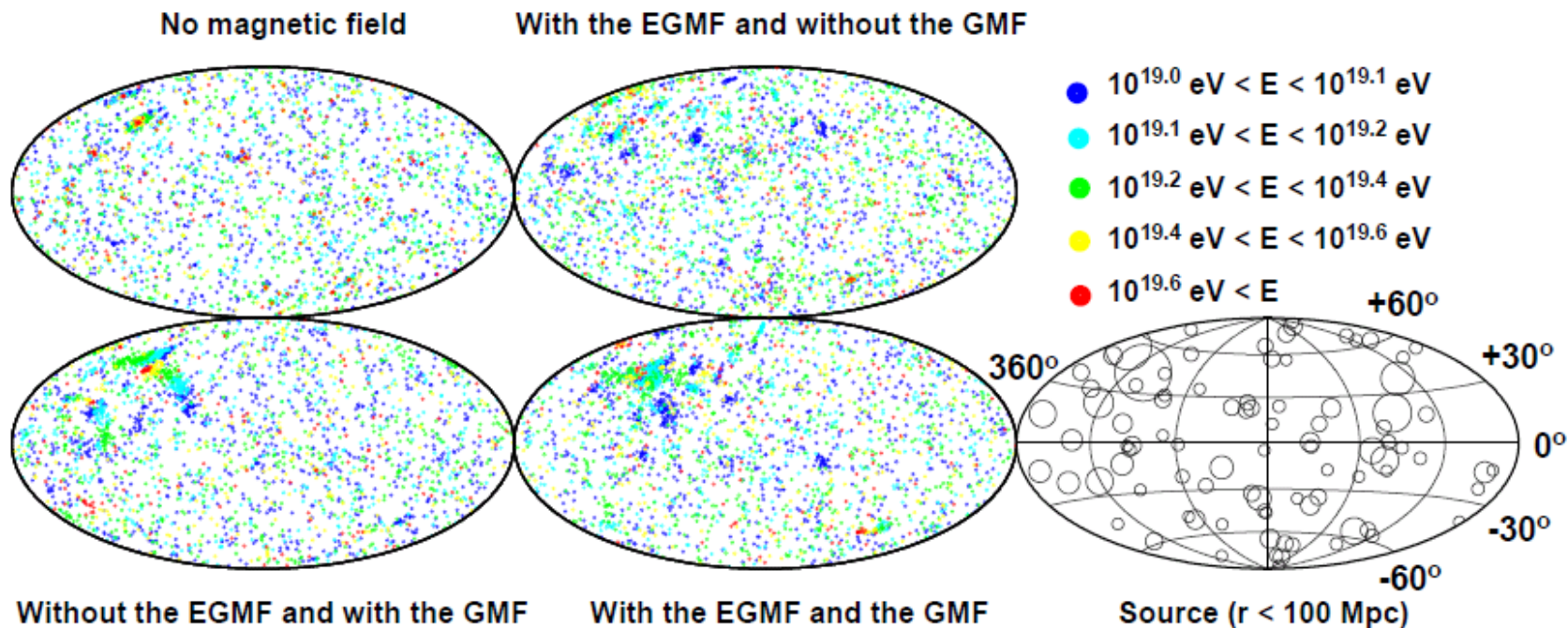
宇宙線の伝播

- 宇宙線の伝播過程に注目し、ソースに関する物理を探究
- 最高エネルギー粒子による天文学の模索

到来方向分布



$$n_s \sim 10^{-4} - 10^{-5} \text{ 個 Mpc}^{-3}$$



(Takami et al. 2006)

すばる観測所の昼



(すばる観測所、田中壱氏撮影)

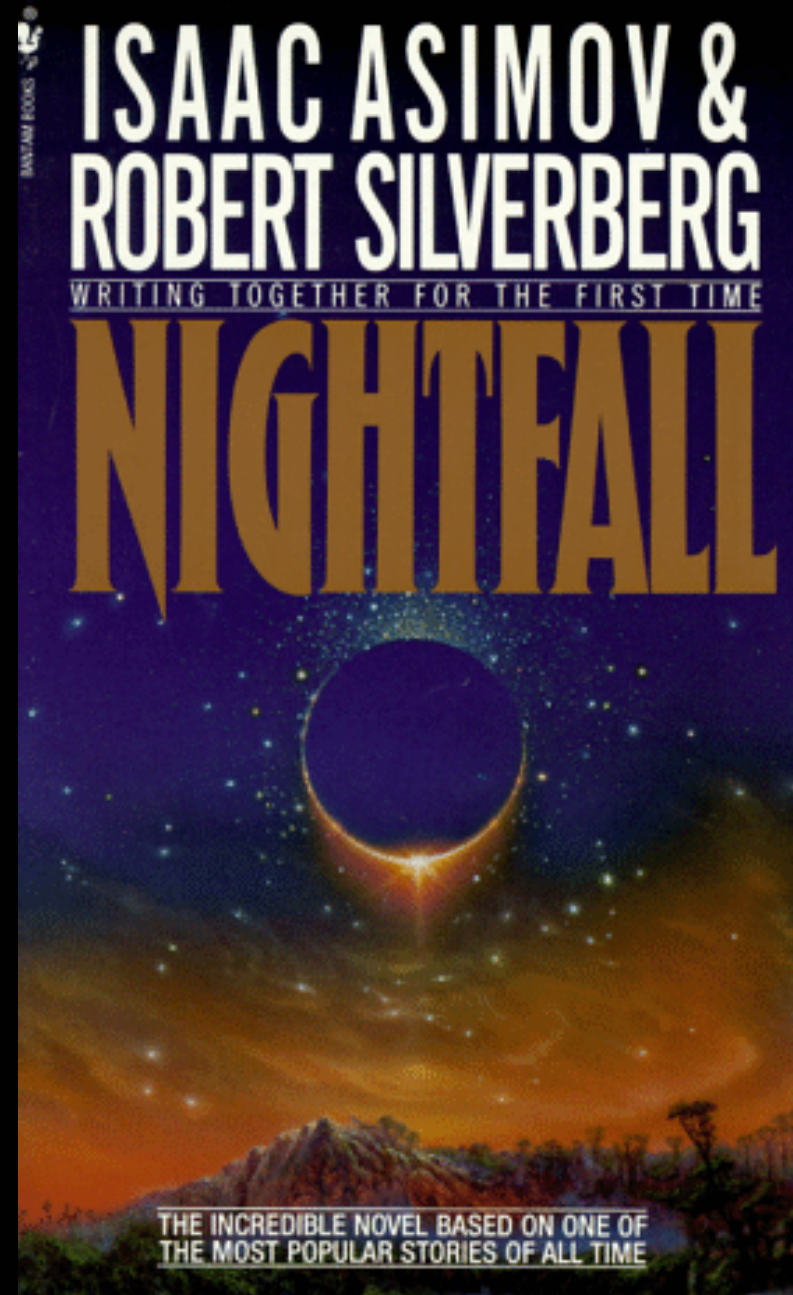
一日中昼だったら？

- 地球・太陽の外に、別の世界が広がっているという認識に果たして到達し得ただろうか？
 - 太陽系、銀河系、銀河団、宇宙の階層構造の存在までは観測的に確認されている
 - これは夜空に輝く星の存在が促した思考
- ではその夜空の先にもさらに別の世界が広がっているのでは？
 - 宇宙を満たす成分の大部分はバリオンか？
 - 第2の地球はあるか？
 - 宇宙のバリオンはすべて見えているか？
 - 我々以外の宇宙はあるか？

夜来たる



- 6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに2049年に一度の夜が訪れる



すばる観測所の夜

A night sky filled with stars, with the silhouette of the Subaru Telescope dome in the foreground. The stars are densely packed, creating a rich field of light points against the dark background. The telescope dome is a dark, rounded structure with a cylindrical upper section, positioned in the lower center of the frame.

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

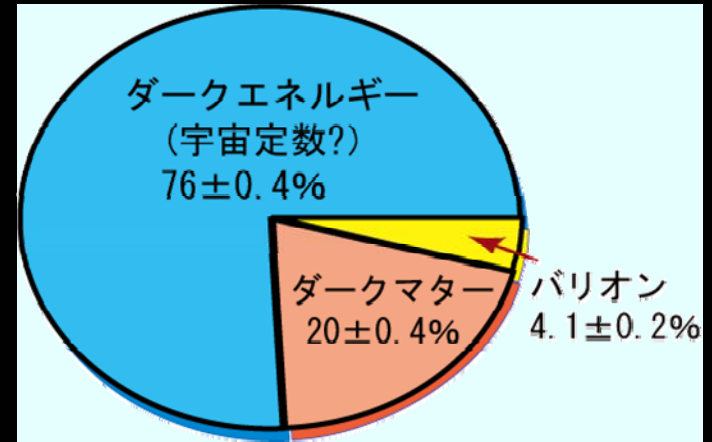
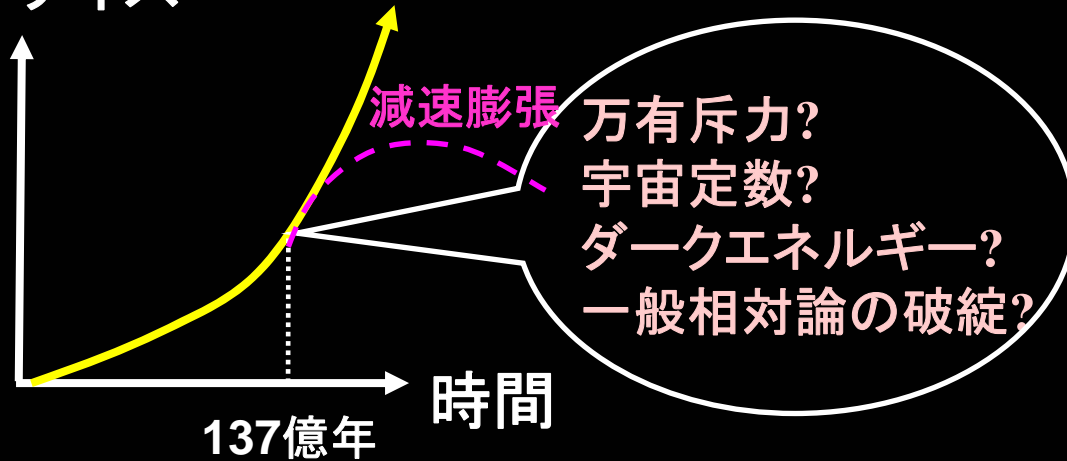
現在行っている研究テーマの例

- **SDSS銀河・クエーサーを用いた観測的宇宙論**
 - 矢幡和浩、西道啓博＋名古屋大学・松原グループ 他
- **宇宙論的スケールでの重力の逆自乗法則の検証**
 - 白田晶人＋東工大＋名古屋大
- **すばる望遠鏡を用いたダークエネルギー探査**
 - 国立天文台＋東大(相原研)他
- **ダークバリオン探査専用軟X線衛星DIOS**
 - 吉川耕司、河原創＋都立大＋宇宙研(満田和久、山崎典子)＋名古屋大＋東工大 他
- **太陽系外トランジット惑星の精密分光観測**
 - 成田憲保、太田泰弘＋国立天文台＋プリンストン大＋マサチューセッツ工科大＋セントアンドリュース大 他

ダークエネルギーと21世紀の物理

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



■ 宇宙の加速膨張の原因は何か？

- 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数(1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?

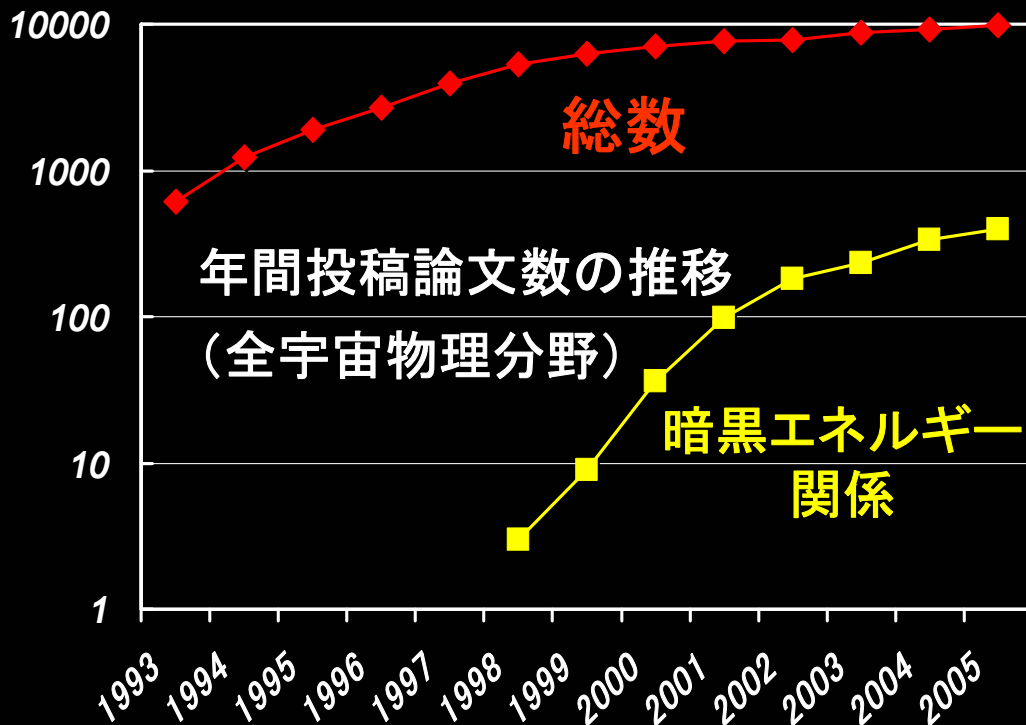
■ 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻

■ いずれであろうと21世紀の物理学を切り拓く鍵

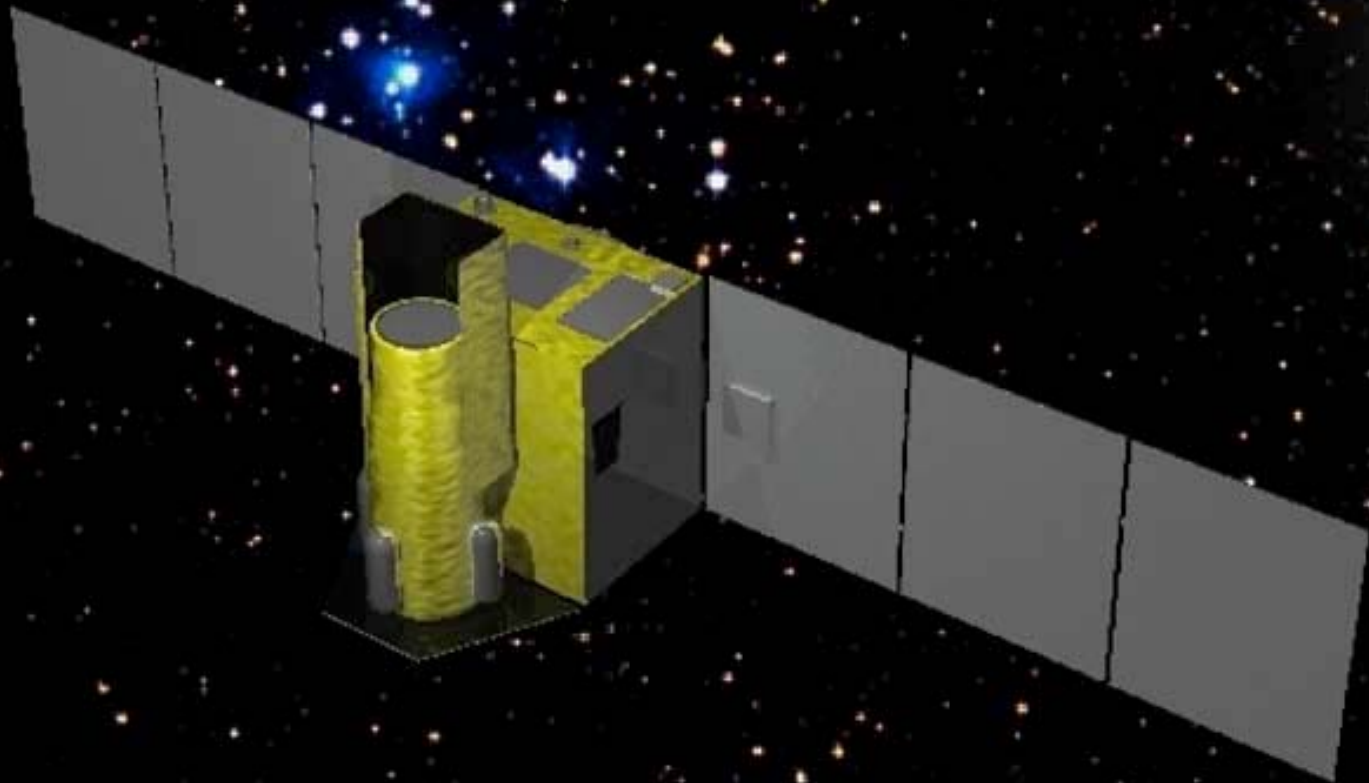
暗黒エネルギー—研究の意義

- 7割以上を占める宇宙の主要成分の解明
- 新たな物質階層か？一般相対論の限界か？
- 未知の物理学への道を拓く鍵
- 天文学と素粒子物理学の融合

- “Right now, not only for cosmology but for elementary particle theory this is the bone in the throat”
- Steven Weinberg (1979年度ノーベル物理学賞)
- “Would be number one on my list of things to figure out”
- Edward Witten (1990年度フィールズ賞)
- “Maybe the most fundamentally mysterious thing in basic science”
- Frank Wilczek (2004年度ノーベル物理学賞)



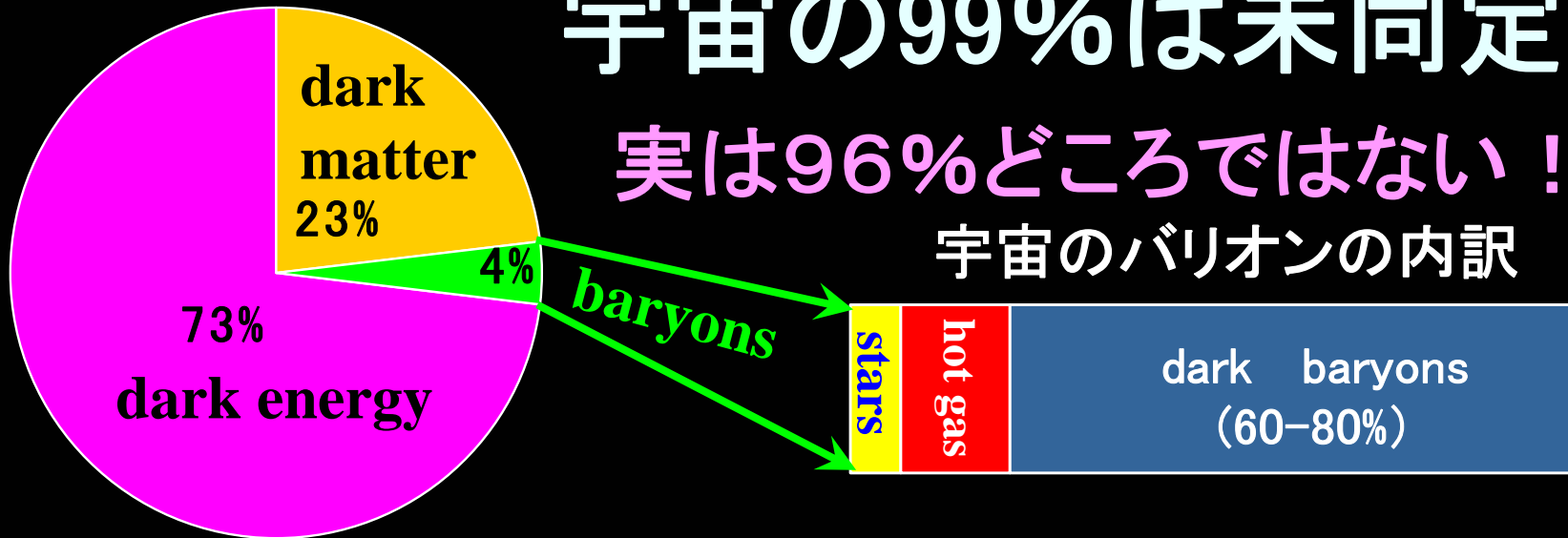
Searching for cosmic missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)



宇宙の99%は未同定

実は96%どころではない！

宇宙のバリオンの内訳



Component

Central

Maximum

Minimum

Grade^a

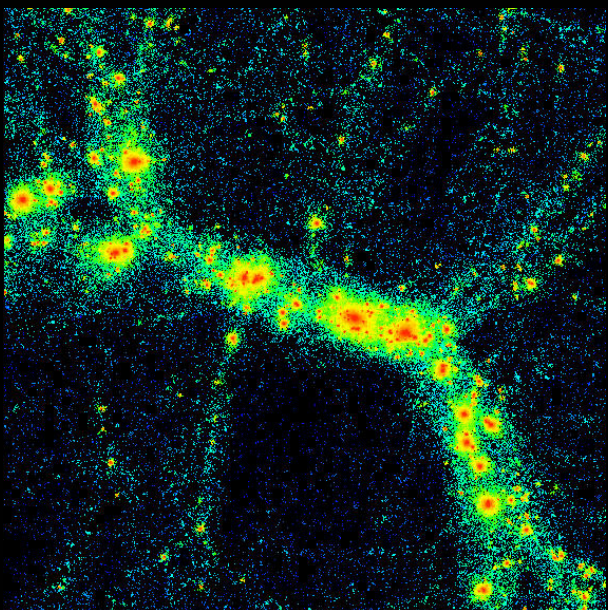
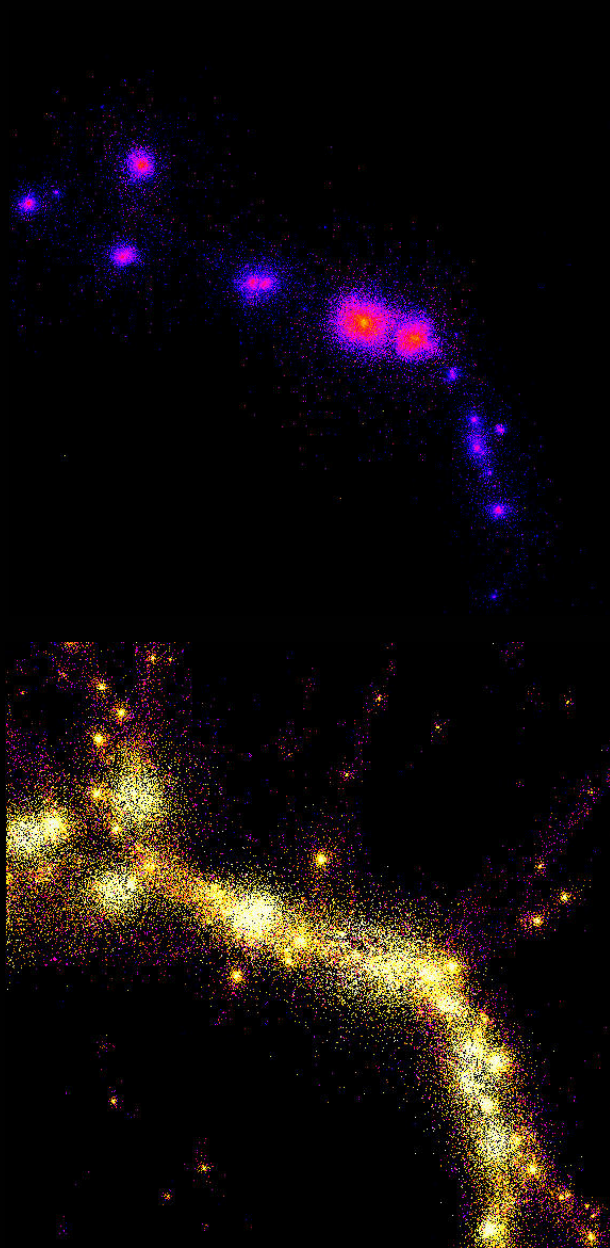
Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518

1. Stars in spheroids	0.0026 h_{70}^{-1}	0.0043 h_{70}^{-1}	0.0014 h_{70}^{-1}	A
2. Stars in disks	0.00086 h_{70}^{-1}	0.00129 h_{70}^{-1}	0.00051 h_{70}^{-1}	A-
3. Stars in irregulars	0.000069 h_{70}^{-1}	0.000116 h_{70}^{-1}	0.000033 h_{70}^{-1}	B
4. Neutral atomic gas	0.00033 h_{70}^{-1}	0.00041 h_{70}^{-1}	0.00025 h_{70}^{-1}	A
5. Molecular gas	0.00030 h_{70}^{-1}	0.00037 h_{70}^{-1}	0.00023 h_{70}^{-1}	A-
6. Plasma in clusters	0.0026 $h_{70}^{-1.5}$	0.0044 $h_{70}^{-1.5}$	0.0014 $h_{70}^{-1.5}$	A
7a. Warm plasma in groups	0.0056 $h_{70}^{-1.5}$	0.0115 $h_{70}^{-1.5}$	0.0029 $h_{70}^{-1.5}$	B
7b. Cool plasma	0.002 h_{70}^{-1}	0.003 h_{70}^{-1}	0.0007 h_{70}^{-1}	C
7'. Plasma in groups	0.014 h_{70}^{-1}	0.030 h_{70}^{-1}	0.0072 h_{70}^{-1}	B
8. Sum (at $h = 70$ and $z \simeq 0$).....	0.021	0.041	0.007	...

宇宙の物質分布 (SPH simulation)

銀河団高温ガス

ダークバリオン

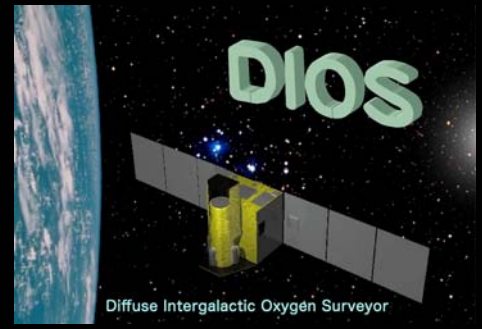


ダークマター

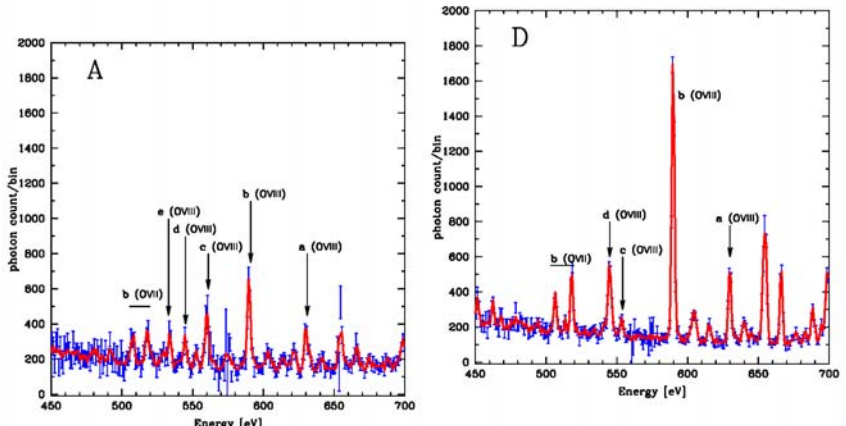
銀河

Yoshikawa et al. (2001)

Searching for cosmic missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)

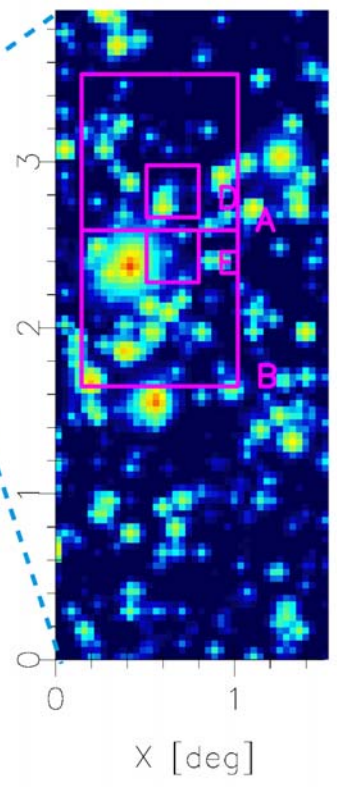
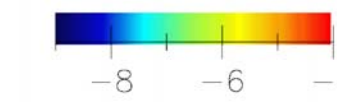
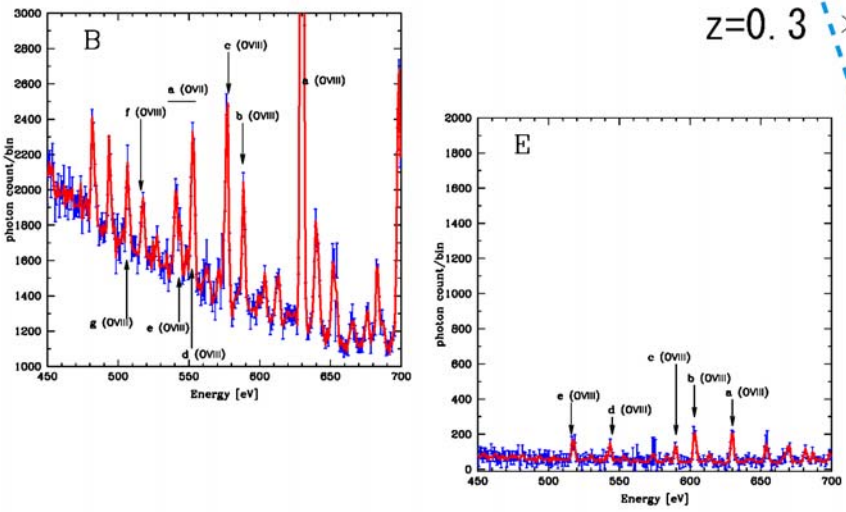
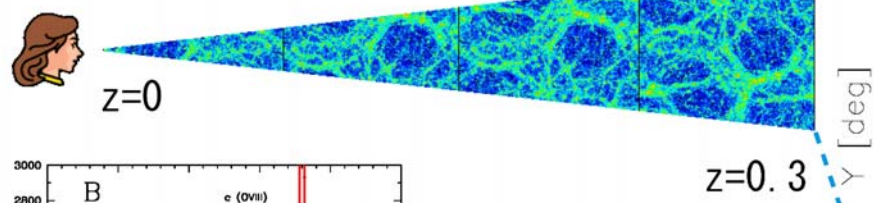


PASJ 55 (2003) 879
PASJ 56 (2004) 939



$\text{Log } S_x \text{ [erg/s/cm}^2\text{]}$

Mock simulations



Tokyo Metropolitan Univ.:

T. Ohashi

JAXA/ISAS:

N. Yamasaki

K. Mitsuda

Nagoya Univ.:

Y. Tawara

Univ of Tokyo:

K. Yoshikawa

Y. Suto

宇宙のダークバリオン探査の重要性

- **ダークマターやダークエネルギーの探査・研究と極めて相補的**
 - バリオンは宇宙の物質階層の中でもっとも重要な成分
 - その存在形態を突き止めるためには未知の物理学を必要としない
 - 天文・宇宙物理学を適切に組み合わせることで必ず答えが出る確実なテーマ
 - その検出手段を確定すれば新たな宇宙観測の窓を開拓することになる
- **計画の準備状況(観測可能性と科学的意義の検討、衛星の具体的仕様)において、現時点では日本が世界のトップの位置にいる**
 - 日本独自あるいは他の国も参加するスタイルで国際協力を主導できるプロジェクト

太陽系外惑星発見の歴史

- 1995年: 主系列星周りの系外惑星の発見 (51Peg)
- 1999年: 系外惑星のトランジット発見(HD209458)
- 2001年: トランジット惑星大気の新検出(ナトリウム)
- 2003年: トランジット惑星から蒸発する水素大気の新発見
- 2003年: 公転周期1.2日のトランジット惑星発見(OGLE)
- 2004年1月: トランジット惑星大気中に炭素と酸素を検出
- 2004年4月: 公転周期1.4日、1.7日のトランジット惑星発見
- 2005年6月: 6~8倍地球質量の惑星発見(地球型?)
- 2005年7月: 超巨大コアを持つ灼熱惑星の新発見(佐藤文衛ほか)
- 2005年10月: 惑星公転軸の傾きの発見
- 2006年10月19日時点で210個の系外惑星(21の多重惑星系)

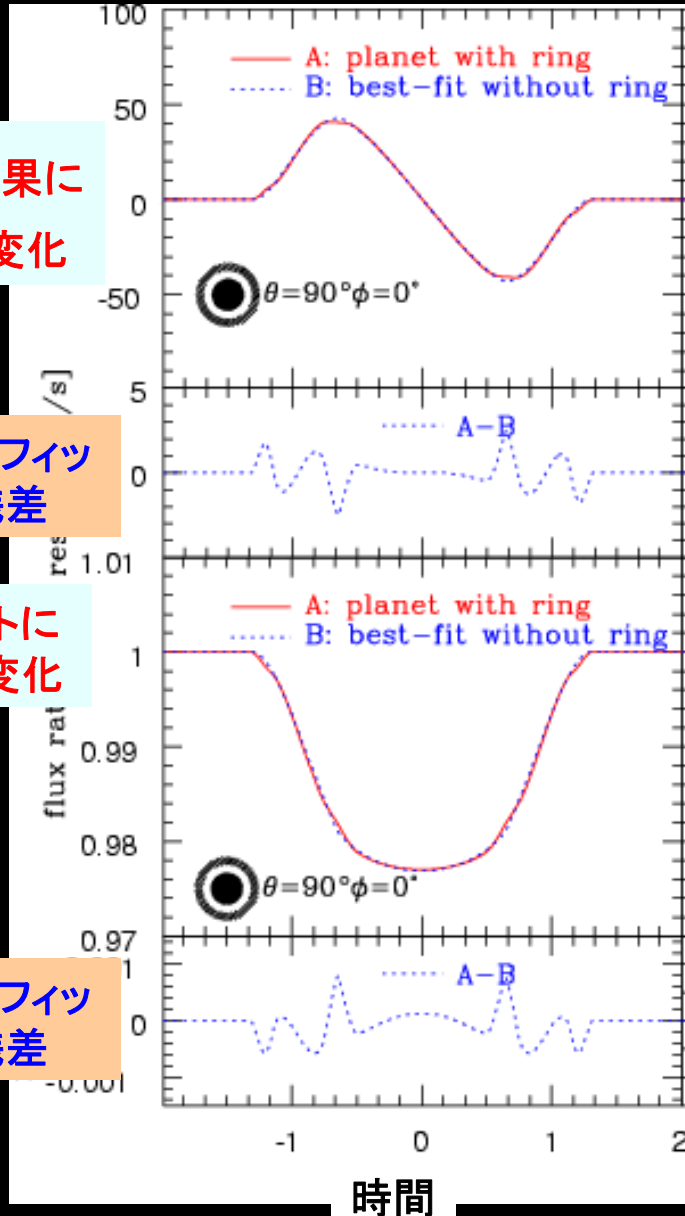
系外惑星リングの検出可能性(太田泰弘D論)

ロシター効果による速度変化

リングなしフィットとの残差

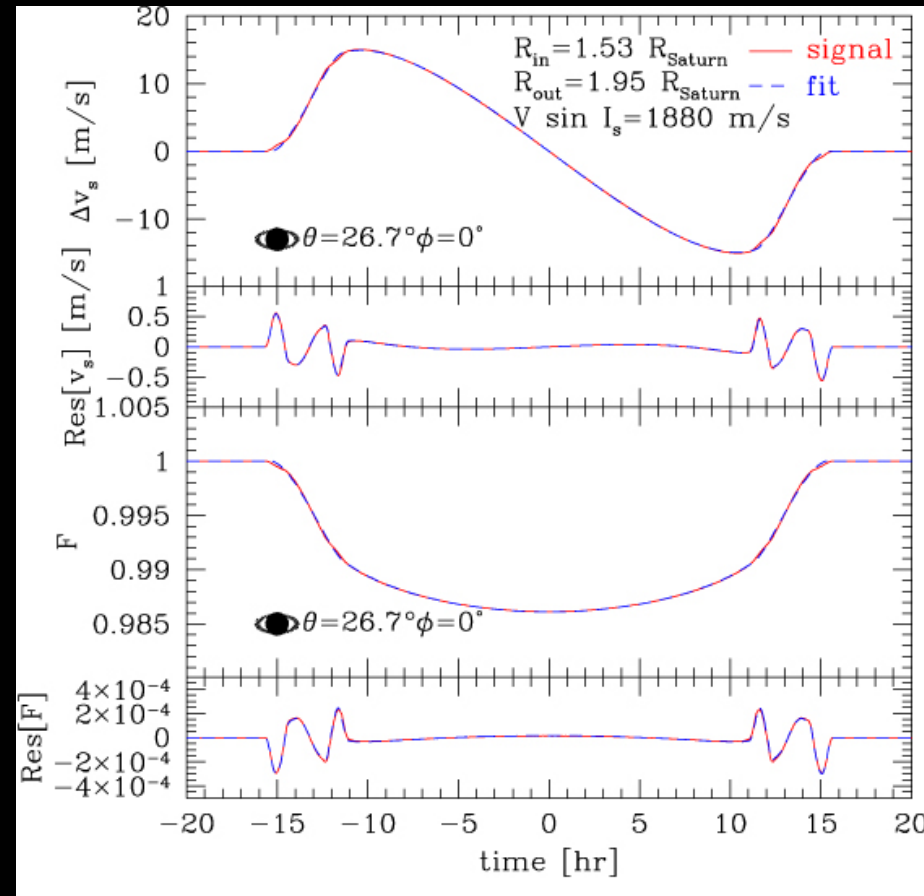
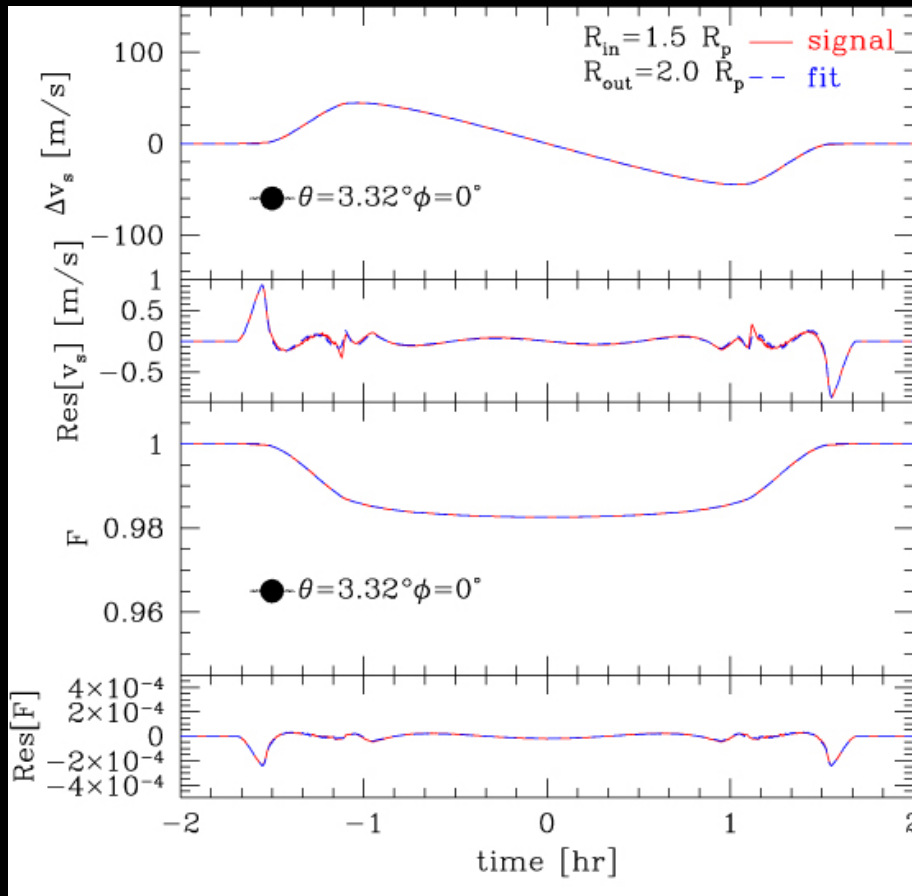
トランジットによる光度変化

リングなしフィットとの残差



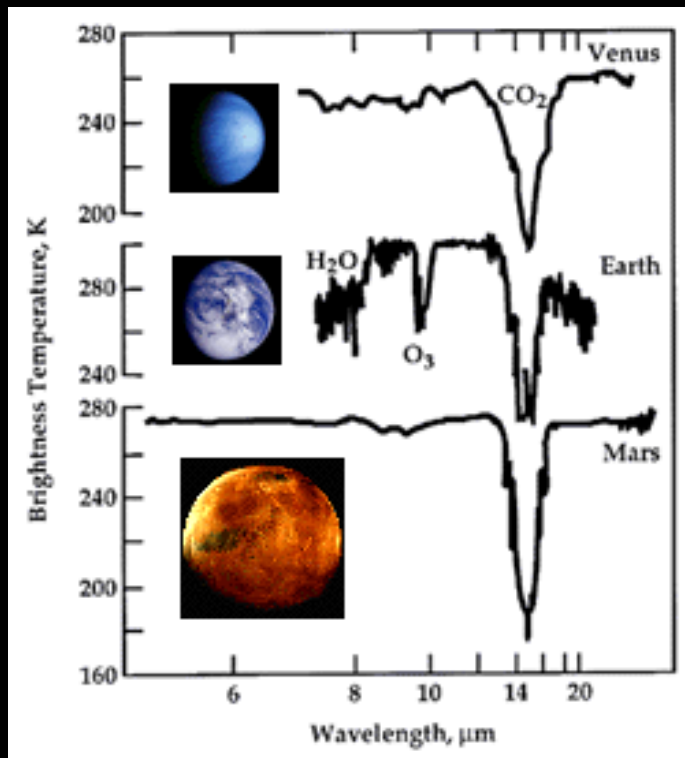
- トランジット惑星系HD209458がリングを持つと仮定
 - 惑星半径: $R_{\text{惑星}}$
 - リング内径: $1.5R_{\text{惑星}}$
 - リング外径: $2R_{\text{惑星}}$
- リングがないモデルとのズレ
 - 速度: 数m/s程度
 - 光度変化: 0.1パーセント程度
- ほとんど現在の測定精度のレベル!
- もし本当に存在していれば近い将来検出できるかも

ホットジュピターと土星の場合どう見える？



- ホットジュピター: tidal lockのためedge-onに近い
- 土星: 30度程度傾いているが太陽の自転が小さい
- いずれも不利なパラメータだが、検出可能範囲($S/N=1$)ではある

太陽系外惑星研究： 今後の10年 “天文学から宇宙生物学へ”



- 木星型ガス惑星： 発見の時代から
“characterization” の時代へ
 - 起源、形成、進化の基礎モデル構築
- 地球型惑星の発見へ
- 居住可能惑星の発見へ
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に
生物が存在するかどうかを天文観測だけで検証
できるか？ Biomarker を特定できるか？

謎解きはまだまだこれから

- 宇宙の果てをみることで自然界の新たな物質階層が明らかとなった
 - 宇宙の20%は暗黒物質、76%は暗黒エネルギー
 - 我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった
 - 暗黒物質、暗黒エネルギーの解明は21世紀科学の大目標
- 10年足らず前に初めて太陽系以外に惑星が存在することが発見された(ただしまだガス惑星のみ)。
 - 第二の地球はあるのか？
 - 地球外生物、地球外知的文明は存在するか？
 - 我々の存在は偶然か、必然か？
 - これらが単なる夢物語やSFではなく、科学的(物理+天文+化学+地学+生物)に議論できる時代になってきた！

暗黒エネルギー研究国際ネットワーク

全体コーディネーター: 須藤 靖

アメリカ(準拠点)
プリンストン大学
宇宙科学教室
コーディネーター
Edwin Turner
(教室自己資金、マッチングファンド申請予定)

アメリカ
カリフォルニア工科大学
天文学教室
コーディネーター
Richard Ellis
(Gemini/Subaru WFMOS
概念設計採択済み)

ビッグバン宇宙国際
研究センター
東京大学大学院
理学系研究科
コーディネーター
須藤 靖

宇宙マイクロ波背景放射
重力レンズ統計
銀河分布のバリオン振動

超新星による距離決定
弱い重力レンズ観測

東北大学

国立天文台

京都大学

広島大学

名古屋大学

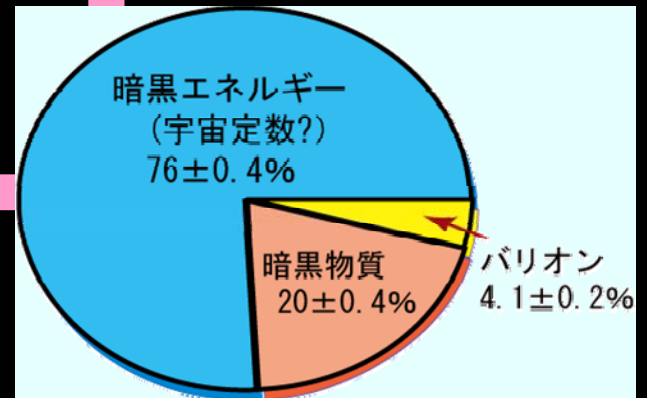
イギリス

エジンバラ大学
王立天文台
コーディネーター

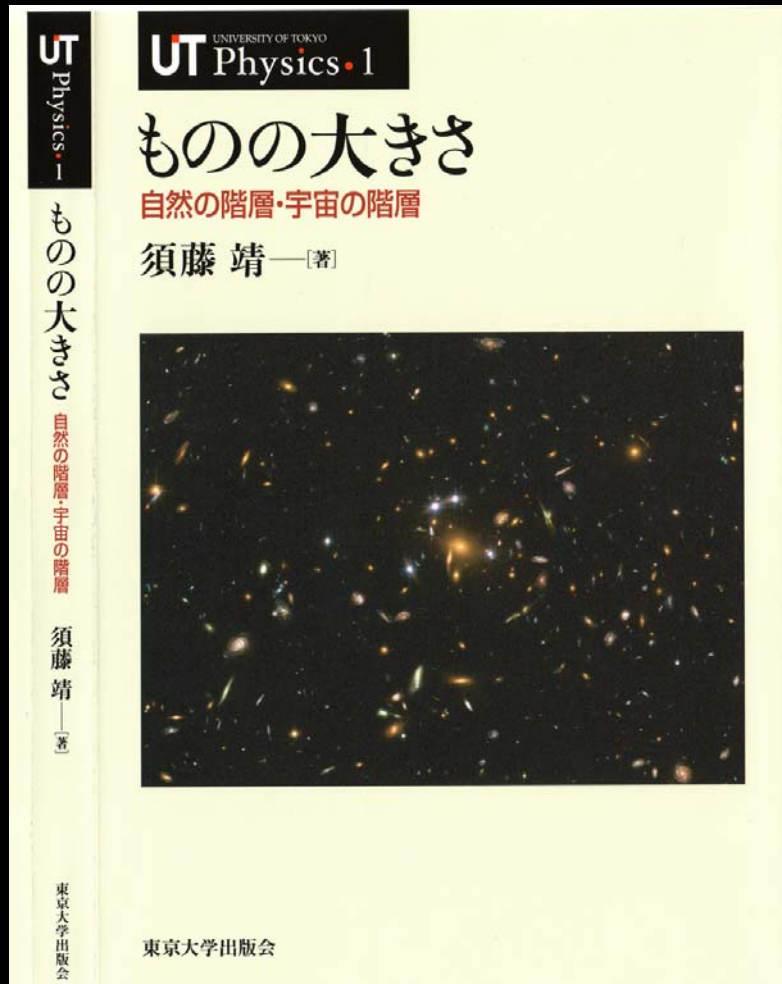
John Peacock

(Gemini/Subaru WFMOS
概念設計採択済み)

暗黒エネルギーのモデル
銀河分布のバリオン振動
弱い重力レンズ観測



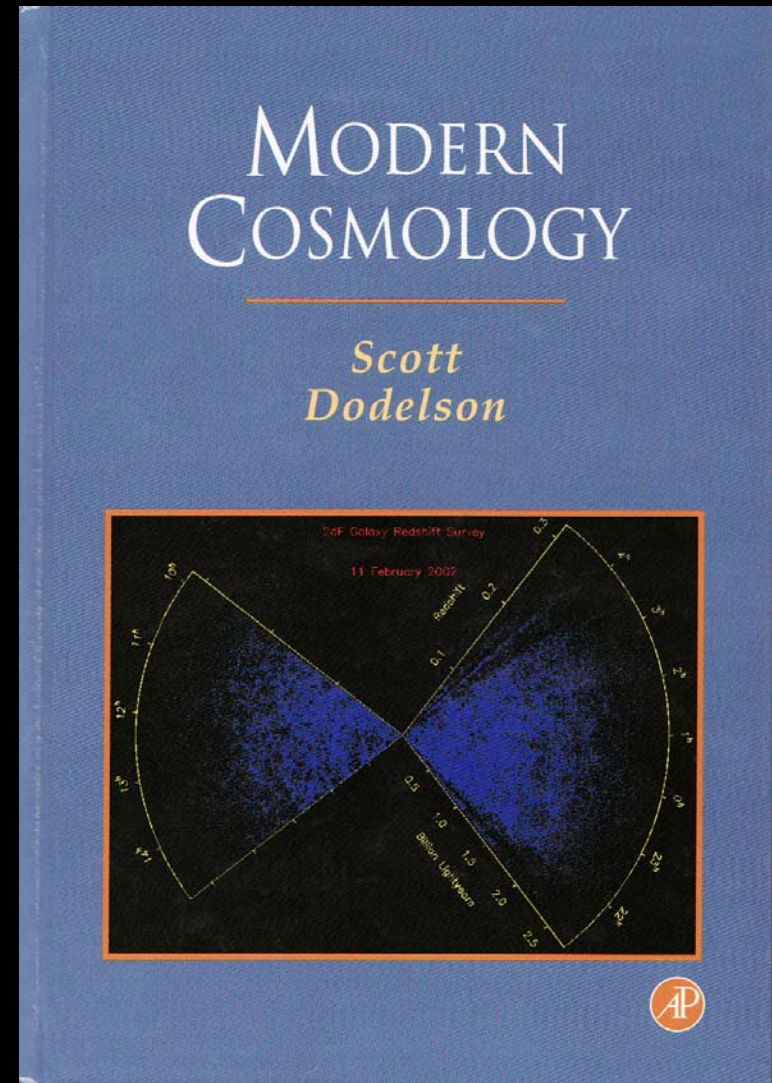
コマースシャル(要注意)！ UT Physics1 ものの大きさ 自然の階層・宇宙の階層



- 2006年10月13日発売
(東京大学出版会)
- 目次
 - 1 科学をする心
 - 2 微視的世界の階層
 - 3 宇宙の階層
 - 4 微視的世界と巨視的世界をつなぐ
 - 5 宇宙の組成
 - 6 人間原理
 - 7 宇宙論の進化
- 付録 大きな数と小さな数

前期理論演習(佐藤・須藤研合同)

- フリードマン宇宙モデル、宇宙の熱史とニュートリノの温度、ビッグバン元素合成、宇宙の再結合、などを中心とした宇宙論の基礎的事項に関してテキストを主として輪講する。
- その後、その応用的な宇宙論のトピックを選んでそれを輪講



後期理論演習(佐藤・須藤研合同)

- S.L.Shapiro and S.Teukolsky
“Black Holes,
White Dwarfs and
Neutron Stars”
の輪講

