

真空の相転移と宇宙 —超新星からインフレーションへ—

東京大学 佐藤 勝彦

真貝 : 私は大阪工業大学の真貝と申します。坂東さんのメモにありますように、若い人ということで指名されてしまいました。びびりながら進めさせていただきますので、よろしくお願いいたしますします。

講演なさるのは、東京大学の佐藤勝彦さんで、「真空の相転移と宇宙」というタイトルです。佐藤先生はみなさんご存じのように、超新星爆発におけるニュートリノトラッピングのメカニズムとか、宇宙のインフレーションモデル、それらの、まさにパラダイムをつくってこられた方です。今日はその歴史的ないきさつと、それから未来を展望した話をうかがえることを楽しみにしています。よろしくお願いします。

ご紹介ありがとうございます。東大の佐藤です。

真空の相転移と宇宙 —超新星からインフレーションへ—

東大理 物理学専攻
ビッグバン宇宙国際センター (RESCEU)

佐藤 勝彦

Plan of this talk

- I. 原子核の溶解と超新星物質
- II. 超新星コアのニュートリノ トラッピングと
ニュートリノバースト
- III. “真空”の相転移
- IV. 指数関数的膨張宇宙モデル (インフレーション)
- V. ダークエネルギー、真空のエネルギー

[Slide 1]

[Slide 1] 私の所属先として示しておりますビッグバンセンターは、現在私がセンター長をしておりますけれども、これは1995年にCOEプログラムにより最初につくられたものでございます。いまは21世紀のCOEプログラム「極限量子系と対称性」の代表をしておりますけれども、2つのプログラムの主旨はまったく異なります。後者は大学間の大学院レベルでの競争を求めて始まったものですが、前者は、研究者の業績や研究プロジェクトを評価し卓越した研究拠点を創設することを目的として始まったものです。私たちのセンターはこの本来のCOEプログラムの初年度につくっていただいたセンターです。わずか2講座の小さなセンターなのですが、初期宇宙を理論・観測の両面から進めていくという主旨で採択され設置されたセンターであります。10年時限ということで、きているわけでありまして。最後にセンターの次のプロジェクトなどにふれたいと思っております。

[Slide 2]

[Slide 2] 私のお話ですが、だいたいこういう順番で話していきたいと思っております。ただいま真貝さんから紹介をいただきましたように、私はもともと原子核に近い天体物理から出発した人間で、超新星ニュートリノなどの研究を進めていきましたが、統一理論・真空の相転移を勉強する必要がありまして、その過程で初期宇宙の研究に移っていききました。このあたりの歴史をお話していきたいと思っております。

[Slide 3] 私は京都大学の学生でしたので、ここに挙げておられる先生方に、ご指導をいただき、たいへん大きな影響を受けました。

研究の指導者、影響を受けた偉人



H. Yukawa (1907~1981)

学部での講義(紛争時代)
混沌会で 太陽ニュートリ
ノの報告 (D2の頃) など



C. Hayashi (1920~)

学部4年から指導
教官(素粒子的宇
宙論、星の進化)
基礎過程に基づき
研究せよ。



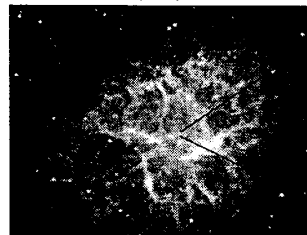
H.A. Bethe (1906~
6 March 2005)

came to Kyoto, Yukawa
Inst. as a guest of Prof.
Yukawa in 1969.
M2の時、共同研究

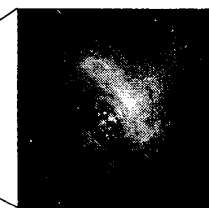
[Slide 3]

I. 原子核の溶解と超新星物質

Bethe, Boerner, Ogasawara, Iida, Watanabe, Sonoda
"In 1969, I started the research gravitational collapse of stellar cores &
supernovae. (Though interested in the early universe)"



Crab Nebula (Chandra)



1969年、Baadeの星 が33回/秒
瞬くことが発見: Crab pulsar

[Slide 4]

湯川先生ですけれども、ちょうど私が学部の学生の頃でしたけれども、物理学通論という講義1年間受けました。湯川先生の思い出として、一番私の印象に残っていることは、学生運動の活動家が先生に向かって「先生、今日はクラス討論にこの授業を組み替えてほしい」と申し入れた時のことです。大学紛争の時代ですので、そういう要求を学生が言うことがしばしばありました。大抵の京大の先生は、たいへん進歩的ですので、それでは、講義を中止しクラス討論に切り替えましようとおっしゃるわけでありました。しかし、まさにこの部屋で湯川先生が講義をされていたわけなのですけれども、活動家がそういうふうに出ると、湯川先生は激怒されて、「そういうことで私の講義を聴きたくないのだったら、その人たちは下の庭へ行ってやりなさい。私は一人でもやる」と毅然とおっしゃいました。それで庭へ行ったのは、その活動家一人だけでした。やっぱり学問・教育に対する先生のお気持ちをよく感じました。

そのあとも、大学院の学生の頃、先生が主催されていた混沌会というものがございまして、これは先生が長年続けておられたセミナーですが、そこでソーラーニュートリノのレビューをしたことを覚えております。昨日、梶田さんからいろいろとお話がありましたけれども、もちろん、1975、76年でも、ニュートリノ oscillation はソーラーニュートリノの問題を解く大きな可能性があるものだ、と、当然、認識されていたので、そのあたりのことを中心に報告したことを覚えております。

このころ、佐藤文隆さんが混沌会のお世話もされていまして、私はニュートリノ関係をやっていたので、「おまえ、ひとつ話せ」ということで、話させていただいたのではないかと考えております。

最後の湯川先生とのお付き合いは、先生のお葬式の受付をさせていただきました。そういう意味で、いろいろな機会がございまして、刺激を受けた次第でございます。

林先生は湯川先生の宇宙に対する強い興味と精神的支持のもとに、天体核物理学を創始されたわけでありまして。日本のなかで始めてというだけでなく、世界的にもこういう新しい分野を作っていかれたと思います。

それから、かつては基研の大きな研究会、天体核研究会というのが、毎年ございました。それはまさに、基研としての大きなプロジェクトであったと思います。武谷先生とか、湯川先生も時折、出られたと思いますけれども、素粒子や原子核や基礎物理学の知見に基づいて、宇宙のことを基礎プロセスから研究していこう、基本的にはそうだったと思います。林先生は、その先駆者でありましたけれども、よく考えてみると、私自身の研究は、まさにこの林先生の路線のなかで、林先生のその次のステップをそのままやっていただけという気が、本当にいま、いたします。

よく先生が言っておられたことは、すべて、ちゃんと基礎過程を押さえて、それに基づいて研究をしと。ただ単に現象論的なことをやるだけじゃなくて、基礎をちゃんとやって、いろいろなブ

ロセスを明らかにして、ちゃんとやれという話を、よくおっしゃっていただきました。それもまさに私がやってきたこと、それはもう、この林研の精神がそのまま私の気持ちになっているというのが、いまから振り返ると、本当にそうだと思っております。

最後に Hans Bethe の写真を入れてございます。残念ながら昨年、亡くなられましたけれども、私はちょうど、修士のときに、湯川先生のお客さんとして、最初は3カ月ぐらい滞在される予定だったのですが、Bethe のお嬢さまですかね、同志社大学で先生をずっとされておりましたので、半年間は滞在されましたね。9月から3月までは滞在されたと思います。そのときは川崎先生がおられたのでしょうか。

私が始めようとしていたことにつきまして、たいへん興味を持っていただきまして、幸いなことに、私のマスター論文になった原著論文が Bethe との共著になっております。

[Slide 4] それでは中身に入っていきたいと思います。私は林先生の研究室で勉強したわけですが、いまでもそうですけれども、物理の学生で、宇宙の研究をしたいといひますと、みなさん何をしたいかという、やっぱり宇宙初期の研究をしたいという方がほとんどです。私の東大の研究室でも、入って来られる学生のほとんどの方は、最初はやっぱり、宇宙の初めのことを研究したい。宇宙開闢のことをやりたいと言う人がほとんどです。この当時も同じです。私ももちろん、4年生のときに思っていたことは、やっぱり宇宙の始まりとか、そういうことをぜひやりたいという気持ちで入ってまいりました。

しかし、1968年、林先生の研究室に入りますと、わかってきたことは、ちょうど1965年に3度Kの黒体輻射というのが発見されて、だいたい理論的に研究することはし尽くされたという印象がありました。それは佐藤文隆さんをはじめ、先輩が頑張って、すぐできることはやってしまったという感じがありました。私はとにかく、マスターの人で、そんなオリジナルなことができるのかという感じがいたしました。あとの、銀河の形成だとか、そういう問題が残っていたのですけれども、ちょっとそのあたりは、私としては興味を持てなかったもので、どうしたものかと思っておりました。

だけどそのとき、たいへんうれしいことに、実はCrab Nebula、かに星雲のど真ん中に pulsar が発見されました。いまでも覚えておりますけれども、『Nature』の写真に、この星が写っている写真と、写っていない写真とが2枚出ているのです。つまり33ミリセカンドでパルスしておりますので、うまくシャッターチャンス을合わせた場合は写り、逆フェーズの時はその星が消えてしまうのです。つまり、昔から Baade の星という、妙なスペクトルの星が真ん中にあるということは知られていたのですけれども、それがなんと1秒間に33回も瞬いていたのです。明るさは太陽の100倍もあります。そんな星が1秒間に33回瞬くなんて、それはもう、驚きました。

これは最近、X線天文衛星 Chandra が撮ったど真ん中の写真ですが、これを見ますと、このように降着円盤があつて、どうも中性子星があるらしいということまで、見えてきているわけでありまふ。

私はいたく感動しまして、こういう分野の研究をやろうと思ったわけでありまふ。

[Slide 5] 実はこの中性子星をつくるのが、超新星爆発であるわけだ。そのときに、林先生の研究室では、ずっと星の進化をやられてきたわけでありまふ。池内さんあたりで、だいたい星の最後の進化の研究は、終わりにかけていました。つまり supernova を起こす寸前までの進化は、杉本大一郎さんから池内了さんにいたる林研の歴代の方が頑張られて終わってつたという感じでした。

私はちょうど、この Crab pulsar 発見に刺激され、俺はその超新星の研究を、林研として初めてやるんだとマスターのころに決心したわけでありまふ。

その過程で大事なプロセスを、林先生は、基礎からやれと言うのだから、やっぱり基礎からやらないとだめなので、勉強したわけでありまふ。

1. 中性子星、超新星中の原子核

- 林研、星の進化の最終段階、超新星の研究に取り組む。しかし、重要な基礎過程が残されていた:
How nuclei melt with increasing the matter density?
EOS and Neutrino opacity depends on what nuclei exist therein.
- Additionally, this problem was important for Pulsar glitch (sudden increase of the period: star quake), which depends on the shear modulus of neutron star crust, and what nuclei exist therein.
- 板東弘治、玉垣良三 に助言をいただき、研究を始めた(M2)。 → Bethe 来日

[Slide 5]

そうすると、わかってきたことは、単純なことですが、だんだん星の密度が高くなって、原子核の密度より高くなるわけですから、その過程で、原子核はどういうふうに合体するなり溶けるなりして、一様な核物質になるかと、そういうことすらわかっていないんじゃないかということに、気が付いたわけでありました。

これはまさに原子核の問題でありますので、ここに書いてありますけれども、先ほどの Crab Nebula の話の直後、坂東（弘治）先生、それから玉垣（良三）先生にいろいろとご相談いたしました。実は Bethe が来られたのは M2 の 9 月なのですから、すでにあとから示したような式なんかも書いておまして、その頃、若手の夏の学校がございまして、そこでも発表したりしていたわけでありました。

[Slide 6] だけど幸いなことに、湯川先生のところに Bethe がおられましたので、そのときに、林先生が基本的に、研究室でどんなアクティビティがあるかということ、紹介されたわけでありました。そういうことで、Bethe 先生は、そういう問題もあるのかということ、興味を持っていたということでもあります。Bethe 先生はその頃は、Nuclear Matter のことをやっておられまして、松井さんの話にもありましたように、Nuclear Matter のレビューとか、いろいろと書いておられるということがありました。私も原子核のゼミとかで、Nuclear Matter を勉強しました。

Bethe がこの問題に強い興味

Astrophys. J. 279-288 (1970)

Nuclei in Neutron Matter

H. A. Bethe
Cornell University, Ithaca, N. Y.G. Böser
Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, MünchenKazuo Sato
Kyoto University, Kyoto

Received March 25, 1970

修士論文の一部となつた。

The equation of state at densities somewhat below nuclear is re-examined. The results are in qualitative agreement with previous authors, but there are quantitative differences. Up to $\rho = 2.5 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ there are neutron-rich nuclei and electrons; between ρ_1 and $\rho_2 = 4.34 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ there is in addition a gas of free neutrons. At ρ_2 , nuclei disappear rather suddenly, and are replaced by protons. As long as nuclei exist, their mass and charge increase monotonically with ρ ; both Z and A are definite functions of ρ .

Key words: neutron star — nuclei

[Slide 6]

How nuclei melt into neutron star matter? (Bethe, Boerner, Sato, 1970 & Sato, 1975)

- Nuclei become larger and neutron rich with increasing density following a simple formula

- 原子核とその周りの中性子、陽子との化学平衡

$$\mu_{N,Z} = N \mu_N + Z \mu_Z$$

- 驚くべき簡単な式
- $$= 1 + \frac{kT}{M(N,Z)} \ln \left[\frac{n(N,Z)}{\omega(N,Z)} \left(\frac{2\pi^2 h^2}{MkT} \right)^{3/2} \right]$$

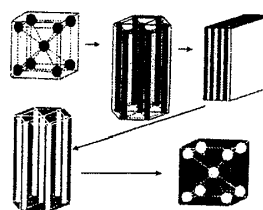
- BW質量公式では

$$Z = (12.5 A)^{1/2}$$

[Slide 7]

[Slide 7] 基本的には、簡単な話をやったわけですが、原子核が一個あって、そして neutron と proton が周りにあったとせよ。まさに松井先生が話されたように、この両者の間に、化学平衡があれば、どんなふうに、密度が高くなっていくときに、原子核の核子は変化するかということで、

Nuclear Pasta Structure



How the structure changes with increasing temperature?

Perturbation analysis with the analogy of liquid crystal (Mitsuru Matsuda et al., 2000)

With increasing matter density, the shape of nuclei changes from sphere, cylinder, slab, cylindrical bubble, spherical bubble and eventually becomes homogeneous.

(Ravenhall et al., 83; Hashimoto et al., 84; Oyama et al., 84; Maruyama et al., 98; Watanabe et al., 00, and 01; Iida et al., 01)

Essentially this change is described by the surface energy

$$g = \frac{\text{surface area}}{(\text{volume})^{2/3}}$$

minimum principle.

QMD method (Maruyama et al) is suitable for investigating the melting by finite temperature.

Recently we improved this method and succeeded to construct pasta structure (Watanabe et al., 01, ..., 05).

[Slide 8]

研究していたわけでありまして。単なる化学平衡です。原子核と neutron, proton がどういうふうに釣り合うかという、化学平衡の式です。これから、驚くことですが、実に簡単な公式が出てまいります。原子核の mass, neutron number, charge number を、log を微分したものが、 $1 +$ こういうふうなボルツマン因子ということになります。ボルツマン因子は、出てくるのは nuclei, 原子核の chemical potential を継承するというふうに ideal gas という仮定をしているからですが、驚くことに、これを M として Bethe-Weizacker の formula を代入しますと、charge number は、mass number の $1/2$ 乗で変化するということがわかります。最初は鉄 56 です。鉄 56 からだんだん原子核の密度が上がり、したがって A が大きくなってまいります。これは別のことで計算できます。そのときの Z が、これで計算できます。実に単純な formula が出てまいるわけでありまして。

そういうことで、どういうふうに原子核が neutron star のなかで、溶けていくかということを経験したわけでありまして。かつこれに温度をちゃんと入れると、近似的には有限温度でも、だいたいのことがわかるということになっているわけでありまして。

[Slide 8] これは、私のマスター論文、最初の論文なのですが、いまでもこのテーマをずっとやっておりまして、本当に過去の夢を追いすぎているのですが、そのあいだにも小笠原くんとか、いろいろな学生さんとも一緒にやっているのですが、ちょっと最近の話をさせていただきます。実は原子核は、溶けていく過程で密度を上げていく過程で、ここに書いてあるような、球の原子核から棒状の原子核、板状の原子核、それから糸状の空洞、それから球状の空洞、そして一様な nuclear matter になるということが、長い間でいろいろな人から言われました。これは特に Pethick という、私はあとで申しあげますが、NORDITA、コペンハーゲンにいたときに、呼んでいただいた方なのですが、その方などが、最初に議論されたわけでありまして。

実は最近やっていることは、ということかと言いますと、こういう相転移の変化を、Quantum Molecular Dynamics (QMD)、これは丸山さんが始めたわけですが、それを使ってやると、きれいにやっていけるのではないかと、7、8 年前からやっております。基本的には、Quantum とは言いますが、Molecular Dynamics みたいなものです。

これでやりますと、任意の形状で、球だとか棒だとか、そんなことを仮定しなくても、相転移が全部、有限温度まで計算できる。ただし、けっこう大変な計算です。私のアイデアは、MD-GRAPE を使って、パイプライン処理をすると高速化でき、物理的に意味のある Pasta Structure が描き出されその相転移が解明できるのではないかと考えたことです。MD-GRAPE は、杉本大一郎さんが始めた GRAPE を重力から一般の分子間力に拡張したもので、これを使って渡辺元太郎君が世界で始めて Pasta Structure が描き出しました。

それができるようになったことによって、有限温度でも高密度でも、どのような相転移がおこるか、わかってきたわけでありまして。

坂東：すみません、そのいまの Pasta Structure というのは、いつごろ初めて言われたのですか？

佐藤：そうですね、1980 年の終わりぐらいじゃないかな。

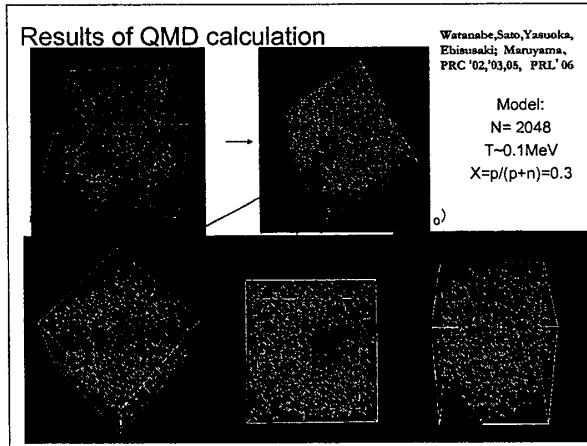
坂東：そうですか。

佐藤：基本的には、私は最初に質量公式でやりましたが、そういうレベルでいいです。そういう質量公式を、糸状の原子核だとか、ラザニア状の原子核だとか仮定して、mass formula をつくってやれば、それで定性てきな振る舞いは予想できます。ただ、現実はどういうふうに相転移していくかと、そういうことは、特に有限温度については、何もされておりました。

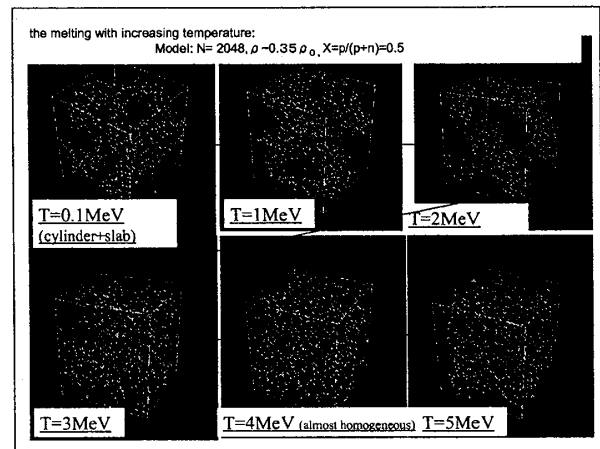
坂東：ということは、その時代から原子核では、核子の多体系ですね、原子核では、そういうフェーズもあり得るというような話は、もうご存じだったんですか。そうですか。でもその計算は、ちゃんとはやっていなかった。

佐藤：質量公式でやったぐらいですね。

われわれのグループも、質量公式みたいな単純なやり方で、最初はやっておりまして、それを有限温度に拡張するとか、そういうことをやっておりました。だけどこれは、QMD という計算は、確かに demonstrative で、たいへんうまくいくわけでありす。



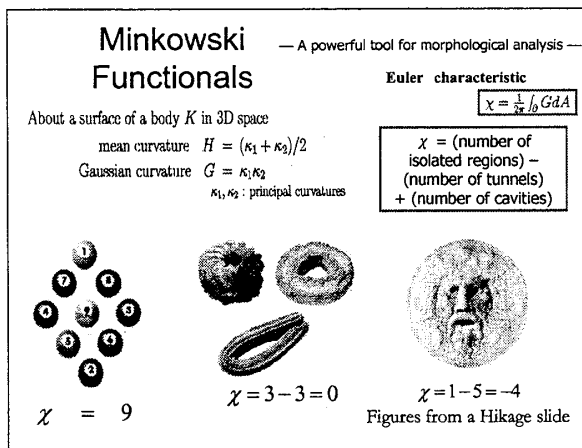
[Slide 9]



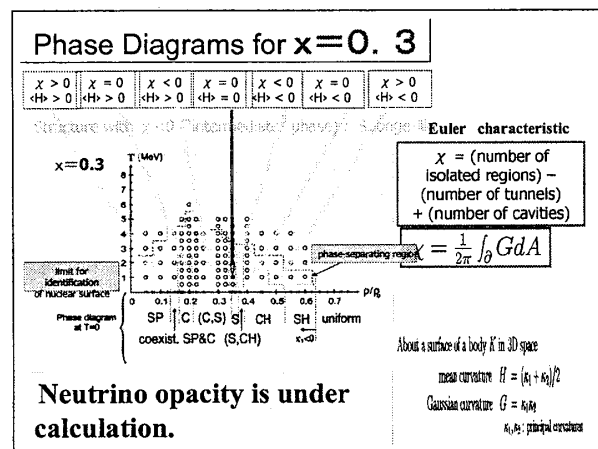
[Slide 10]

[Slide 9] この青いのは neutron で、赤が proton です。球状の原子核、密度を上げていきます。スパゲティ状の原子核になります。それからラザニア状の原子核ができて、そして cylindrical hole、つまりアンチスパゲティなんですけれども、それができます。最後には spherical な穴ができて、一様な物質になるということが、計算で出せるわけでありす。

[Slide 10] 同じように、ある密度で温度を上げていくと、どういふふうに変化していくかということ、これは温度が高くなると、もうぐじゃぐじゃでわからなくなっておりますけれども、こういう計算ができるようになりました。



[Slide 11]

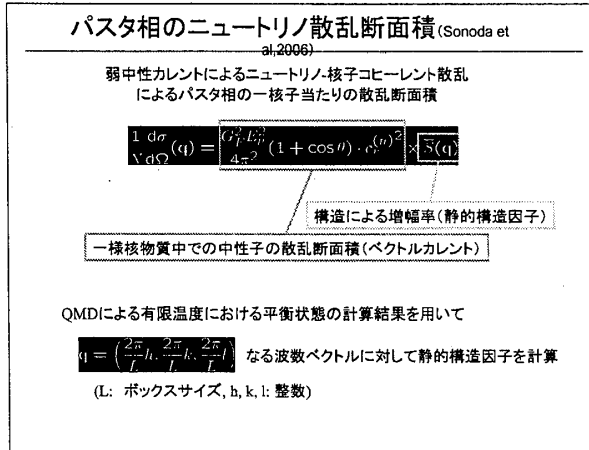


[Slide 12]

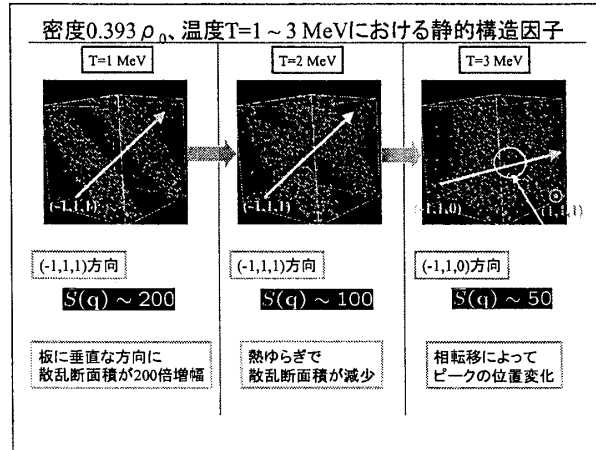
[Slide 11] この相転移のトポロジー解析をするということも、渡辺元太郎君を中心として世界で初めてやりました。オイラー数をと Gaussian curvature という原子核の表面の curvature を見ることによって、スパゲティか球かラザニアということを判定するということもできるようになりました。

[Slide 12] その結果、わかったことは、こちら (横軸) が全体の核物質の密度です。縦軸は温度です。そのなかでの phase diagram です。この層では spherical な原子核だとか、シリンダーであるとか、平面になっているとか、最後には uniform になると。温度では、どの程度上げたときに、

どういう相が現れるかとか、そういうことを計算できるようになりました。



[Slide 13]



[Slide 14]

[Slide 13] この研究は、流体計算に必要な、状態方程式が得られることのみならず、大事なのは、あとでお話しますように、超新星の爆発には必要なニュートリノ透過率が、計算できることです。

ニュートリノを散乱する度合は、パスタ相があったとき、どう変わるかということであります。基本的には、いわゆる cross section を出すときの、パスタ相での structure function ですね、これを計算することをやりました。ただしこれは、方向によって違ってくるようなものに、なるわけがあります。

[Slide 14] これは博士課程の園田くんが、やっておられるのですが、ニュートリノの方向によって structure 因子の値は変わってまいります。例えば板のとき、普通の球対称な原子核の場合と比べると、ある場合には散乱断面積が 200 倍ぐらいになります。温度の効果見ますと、温度を上げていったら、構造がぼけてきて、あまりその効果が見えなくなります、ニュートリノで物質をどれだけ押すことができるかは超新星爆発のメカニズムの重要な要素ですが、今そういうことを計算しております。

坂東: すみません、いまの $\bar{S}$ というのは、opacity?

佐藤勝: cross section, elementary process ですから、これは cross section の話です。それを構造因子のところで、原子核も構造因子コミをつけて書いてあるわけです。これはまた、純粋にそういう、散乱のときの構造の因子だけの話です。結晶解析をするときも同じ話ですね。

松井: neutral current も?

佐藤勝: はい、全部入っております。Weinberg-Salam で計算しているわけですね。

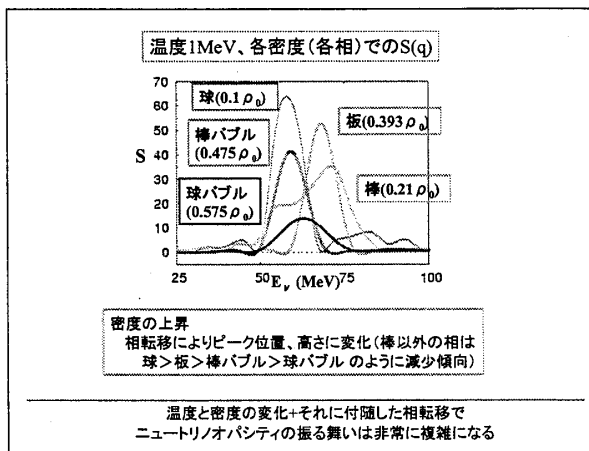
坂東: それが小さい?

佐藤勝: それは cross section が小さいということです。これが 100 倍になったら、普通の neutron, proton, 一個一個と反応するような cross section に比べると、100 倍大きいという意味です。coherent scattering をしているということなのです。

[Slide 15] それは例えば、ラザニアの間隔がどれだけあれば、そういう特徴的なところで peak が出てくるとか、エネルギーによって、こういうふうに変わってまいります。これはまさにいま、計算しているところであります。

[Slide 16] 超新星のお話に、だんだん入っていくわけですが、実はこの研究をしていてわかったことは、やっぱりニュートリノが、基本的には星の爆発を決めている。はっきり言えば、重力収縮して、重力エネルギーを稼いだと思っても、ほとんどのエネルギーは、ニュートリノで宇宙空間に持ち出してしまうと、99 パーセントは無駄になってしまうということです。風船をぐっと押

しつけて離せば反発爆発すると思うのは大間違いで、どこかに穴が開けられてしまって、ぶしゅつと縮んでしまいます。重力崩壊型の超新星爆発はそんな場合に対応します。重力収縮で得られたほとんどのエネルギー、99 パーセントは逃げて、爆発にはやくだたず無駄に使いになります。しかしその無駄遣いの度合いが小さければ、つまりニュートリノがよく衝突すると、爆発しやすいわけです。



[Slide 15]

II. Supernova Neutrinos

H. Suzuki, T. Totani, S. Nagataki, K. Takahashi, S. Ando
M. Takahara, S. Yamada, K. Kotake, T. Takiwaki, Y. Suwa

- 中性流相互作用による超新星コアのニュートリノのトラッピング (1975)
- SN1987A とニュートリノバースト (1987)
- タウニュートリノの質量と寿命に対する宇宙論・天体物理からの制限。
Sato & Kobayashi, PTP, 1977.
- 超新星でのニュートリノ振動, MSW転換、スピンフレーバ転換とニュートリノパラメータ
Totani, Takahashi, Ando 1995-現在

[Slide 16]

一方、その頃、1970 年の初めなのですが、ニュートリノの理論は、まだはっきり決まっておりませんでした。ニュートリノ相互作用の理論は、CVC だとか、いろいろなものがあつたんですけれども、一体どうしたらいいのか迷っておりました。あとで言いますけれども、益川さんから、Weinberg-Salam 理論を教えてくださいまして、それが私の人生を変えたわけなのです。

やったことは、このニュートリノの研究で、最初はやっぱり中性流、これは Weinberg-Salam が予言しているわけですが、それによってニュートリノの散乱が大きくなるということです。先ほど言った coherent scattering が大きくなるということを使って、ニュートリノが超新星コアに閉じ込められること、つまりトラップされるんだということを見つけました。それまでの研究では、ニュートリノは散乱されるものの、基本的には先ほど言ったようにすかさず抜けるだけだという話だったんですけど、そうではなく、コアに閉じ込められ、フェルミ縮退しそのフェルミエネルギーは 100 数十 MeV を越えることを示すことができました。わずか 10 秒程度ですが、十分コアの流体的タイムスケール、これは 1 ミリ秒の長さですが、より十分長くおおくく圧力として効くことになります。

この理論から 12 年後ですが、大マゼラン雲に超新星 1987 A が現れ、ニュートリノバーストが検出されました。これは超新星 1987 A のニュートリノバーストです、実際にバーストの持続時間は 10 数秒で、これはニュートリノのトラッピング理論とよく一致します、実際の超新星の爆発の観測でニュートリノのトラッピング理論は実証されたといえます。超新星 1987 A のニュートリノバーストの発見直後直ちに PR Letters に論文を書き、そのデータとの比較で、この理論とよく合うことを発表いたしました。

それから、実は、これは小林誠さんとの研究なのですが、本当にこの時代、うれしい話が多くありまして、ちょうどヘビーレプトンニュートリノというのが、1976 年かそのあたりに発見されたと思います。つまりいまで言うタウレプトン、タウニュートリノです。小林さんとのこの論文では、タウというニュートリノは決まっておりましたので、「ヘビーレプトンニュートリノ」と書いてあります。この論文は、このヘビーレプトンニュートリノに対して、宇宙論と天体物理から質量と、寿命に対する制限をつける論文です。

この論文は世界的にも早かったと思っているのですが、われわれは、質量と寿命、decay

する可能性も入れて、研究をやったわけであります。実は質量を入れてやるという論文は、Lee-Weinberg という論文が、実は私たちのこの論文より 3 日前に、Physical Review に投稿されていたのです。それはあとで知ったのですけれども、3 日ばかり、Lee-Weinberg という論文のほうが、質量に関しては、早かったのです。しかしニュートリノの寿命まで入れて、寿命と質量の平面の上で、どういう制限がつくかというのは、もちろん私たちは初めてですし、宇宙論、天体物理のいろいろな多方面の現象からニュートリノの質量と、寿命に対する制限をつける研究は、これが、もちろん世界でも最初の論文だと思います。

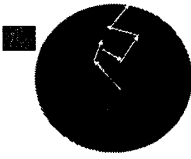
以後、素粒子の研究者が、新しい何か、弱い相互作用をする粒子を見つけると、だいたいどういうふうに decay するとか、そういうことを考えられて、mass と寿命に対して制限をつける研究をします。これはまったくこの論文と同じことを繰り返すわけです。3 度 K の輻射がどう変形するか、星の進化がどう変わるかとか、どういうふうに decay したものが見えてくるから、 γ 線で見えるから制限をつけるとか、基本的にこの論文はそのたたき台です、言ってみれば同じことを、タウニュートリノでやった同じことをするようになります。ここでは時間の関係で、このあたりの話はいたしません。

最近では、もちろんニュートリノは振動するということになりましたので、最近やっていることは、MSW での転換だとか、スピンプレーバー転換、これは太陽ニュートリノで提案されたりするのですけれども、そのあたりのことを考慮しての、超新星の上での研究をしているわけであります。

また、この超新星のニュートリノを観測することで、このニュートリノパラメータも決められるのではないかということも、最近の発展として進めております。準備をしているのですけれども、早く進めたいと思います。

中性流相互作用による ニュートリノ・トラッピング理論

- 1970年頃 Weinberg-Salam Modelを使って超新星ニュートリノの研究開始。湯川氏の理論は誤りという意見も出た。
- 1973年、中性流相互作用、GARGAMEL により発見 1973.
- D. Z. Freedman pointed out neutrinos are coherently scattered by nuclei.
- $\sigma \sim \sigma_{\mu} A^2$
- ニュートリノがトラッピングされることを認識 ($\tau_{\mu} \sim 10$ s)
- 且つ、ニュートリノが強くフェルミ宿対することに気づく ($E_{\nu} \sim 100\text{MeV}$).



ニュートリノバーストの持続時間は 10秒程度
~ 10msecではない。

素粒子学会応募論文

[Slide 17]

[Slide 17] これは先ほど言いました Weinberg-Salam を最初に使うということで、この話を始めたわけであります。

そうこうしているうちに、確かに CERN の GARGAMEL という実験のグループが、neutral current を発見いたしました。それで Weinberg-Salam は、これでいいんじゃないかというふうに、思うようになってきたわけです。

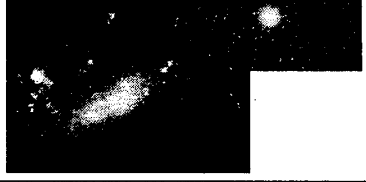
Neutral current があるということは、原子核と coherent な scattering をしますから、cross section が大きくなる、これは Freedman という方が計算して、示しているわけであります。

そうすると、基本的にはこの中のニュートリノがすかっと抜けるのではなくて、拡散で出て行くことになるということです。拡散を計算すると、数値計算をしなくてもわかるのですけれども、だいたい 10 秒とか 20 秒とか、そのぐらいのスケールで、星の中から抜けていくということがわかりました。つまりこれは、ニュートリノのバーストの時間のことです。duration はだいたいそのぐ

基研モレキュール型研究会
「超新星ニュートリノ研究会」1976?

宇宙線研 北村繁氏 などと組織: バイカル湖など使った計画など

1987年、超新星ニュートリノの検出
Supernova 1987A in LMC 23Feb. 7:35AM (UT), 1987 (来年在検出20年)



10 trillion neutrinos passed through your body.
Huge water Cherenkov counters deeply embedded in the Earth could detect this neutrino burst,
11 events by Kamiokande (Japan) &
8 events by IMB (USA).

[Slide 18]

らいであるという推定ができました。これはまさに、neutral currentのおかげです。

実はそれまでは、星のシミュレーションをやっている人はいたのですけれども、たいだい10msぐらいの時間で、ニュートリノがぱっと出て終わりという印象でした。そういう意味では、大きく話が変わってきたのではないかと考えております。

坂東：超新星の爆発は、どうも理論的にはしないというのが、割合はつきりしてきて、それが問題だというふうになってきたのは、どのへんですか。もっと前ですか。

佐藤勝：ずっとそうです。1970年ぐらいから、だいたい真面目にやると爆発しないと。そういう状況です。昔、Colgateが「爆発する」と言っていたのですけれども、それはニュートリノエネルギーの何パーセントが吸収されると爆発するという感じのシミュレーションになっていました。

坂東：ということは、佐藤先生はニュートリノのこういう仕事は、全部、超新星を爆発させるためにやっていらっしゃる？

佐藤勝：まあ、そうですね。

坂東：言ってみたら、超新星爆発がずっと理論の課題だったと？

佐藤勝：おっしゃるとおりです。

坂東：ここではまだ、成功はしていない。

佐藤勝：私たちは、数値実験もやるんですけども、この段階では、私は博士課程の頃から、一所懸命その数値計算を目指していたのです。けどなかなか数値計算というのは、甘くないのです。阪大の核物理センターに、カードを2箱ぐらい抱えて、持っていったのですが、共同利用で課金されることなく使わせてくれるって言うから、行っていたのですが、残念ながらそこまでたどり着く前に、宇宙論のほうが面白くなったもので、そちらに移ってしまっただけというのが、正直なところなのです。いまでも球対称の星はどうも、やっぱりニュートリノが押しても、やっぱり足りないんじゃないかと思われていると思います。

[Slide 18] 実はそういうことで、ぜひ超新星の観測があつてほしいと願ったわけなのですけれども、京大の基研で、モレキュール型の超新星ニュートリノの研究会というものをやりました。そのときは、宇宙線研で、ニュートリノ関係をやられた北村先生と一緒に、基研の研究会としてやりました。もちろんこの時点では、小柴先生がカミオカンデみたいなものをつくられるなんて、まったく知りませんでしたし、この時代にはあつたのでしょうか。もうあつたのでしょうかね。

坂東：ないね。

佐藤勝：なかったですか。この北村先生は、だいぶ梶田さんなんかを悩ませた方じゃないかと思えます。

坂東：みんなちょっと、「そんなあほな話」と思っていたんじゃないですかね。

佐藤勝：そうですね。

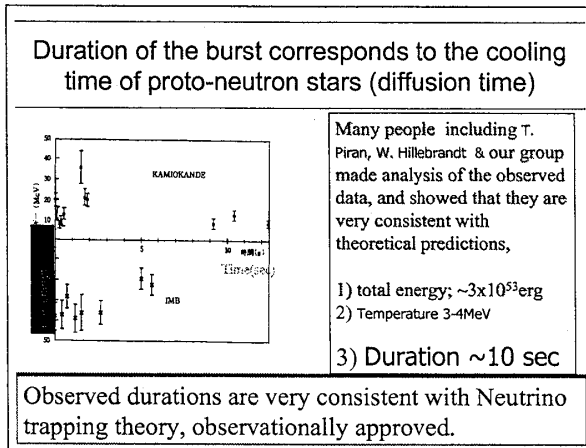
北村先生からお聴きしたのは、彼がバイカル湖でやるとか、ひょつとしたら琵琶湖でできるんじゃないかということを話しておられまして、そんなものかなと思っていただのですけれども、そうこうしているうちに、1982年に私は東大に移ったわけなのですけれども、東大に移ってわずか5年後に、超新星が本当に検出されたという、たいへん幸せなことになりました。

ちょうど来年で20年ということになります。考えてみれば、本当に一昔、大昔ですね。ちなみに私、この発見の現場の横にいましたので、昨日のように覚えているのですけれども、中畑さんと平田慶子さんとかと、本当にその1週間はいろいろと、戸塚（洋二）さんとも話し合っていました。理論家の立場からデータを解析しました。

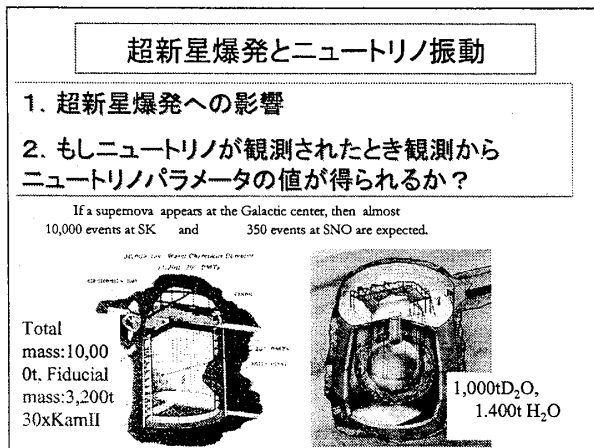
基本的にはduration timeが、わずか11個ぐらいでしたけれども、10秒ぐらいの値になると。そういうことを含めて、よく合うんだという論文を、小柴先生が記者会見で発表されたその日に、

Physical Review Letter に投稿しました。小柴先生から実は、記者会見に同席するよう言われていたのですが、論文を書くほうが忙しくて、たいへん小柴先生には申しわけありませんでしたが欠席しました。誰か理論屋がいたほうが、記者会見で便利だったのですが、記者会見のその時刻まで、最後、手を入れていましたので、行けませんでした。

でもそういう意味で、たいへん私たちの期待するおりのデータでして、たいへんうれしかったということでもあります。



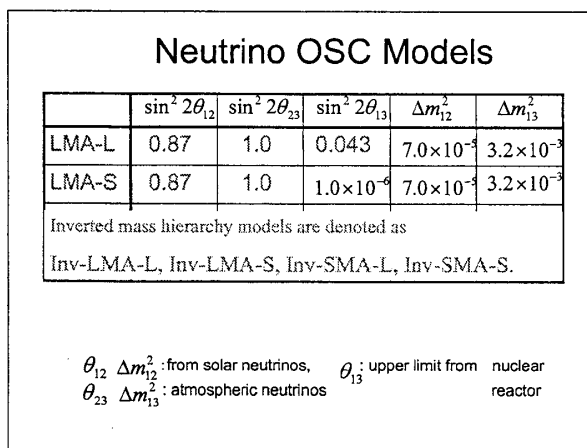
[Slide 19]



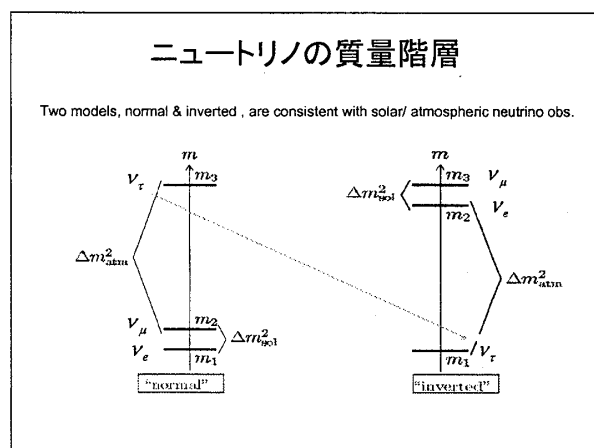
[Slide 20]

[Slide 19] 要するに私が言いたかったことは、この duration time だとか、トータルのエネルギーというのは、まさに理論どおりであったということでもあります。

[Slide 20] ニュートリノ振動ですけれども、これは梶田さんはじめスーパーカミオカンデが明らかにされたわけですから、私たち supernova の業界でも、oscillation の効果を入れて、supernova のダイナミクスをやらなければならない。それから detection も、ニュートリノが oscillation することを入れて、議論しなければなりません。 ν_e で出たものが ν_μ になったり、逆に ν_μ で出たものが ν_e になるとか、そういうことが起こっているわけですから、これは oscillation のことを、ちゃんと入れなければいけないということで、1990 年、梶田さんが国際会議で発表されるその前あたりから、やっていたわけでもあります。



[Slide 21]

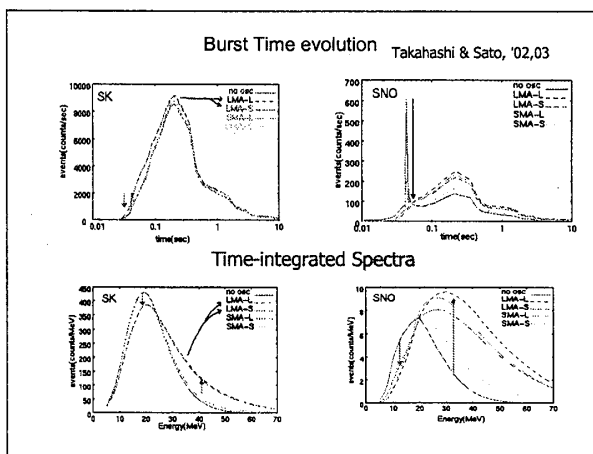


[Slide 22]

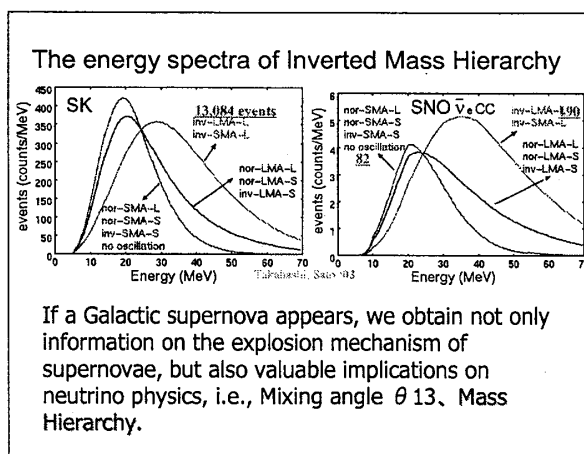
[Slide 21] いろいろ mixing angle なんかは、カミオカンデのデータだとかを使ってやります。ただし θ_{13} に関しては、大きな値、これはその当時原子炉で得られた上限値、それから小さな値、この $\times 10^{-6}$ というのは、 θ_{13} としては小さい値として、私たちが勝手にとった値です。私たちは単にダ

イナミクスだけではなくて、これが大きいのか小さいのか、これが supernova のニュートリノが観測されればわかるのではないかという主張をしたわけであります。

[Slide 22] 結果だけを示したいと思います。これは mass hierarchy によっても結果が変わりますので、mass hierarchy も一つのパラメーターになってしまいます。inverted mass hierarchy と normal mass hierarchy で結果は変わってまいります。



[Slide 23]



[Slide 24]

[Slide 23] neutrino transfer の計算は、Wilson などリバモアグループと共同研究したときのものを採用し、超新星のマントル、外層での oscillation を計算をします。例えばスーパーカミオカンデ (SK) でニュートリノが観測されると、こういうふうになるであろうと。ノーマルで oscillation がなければ、ここに小さな peak が出るのですが、一方、SNO ですね、サドベリーでやると、no-oscillation のとき、この赤いデータなのですが、ここにぴゅっとスパイクある信号になります。一方 oscillation があると、 θ_{13} が大きいときと小さいときで、どういふふうに違いが出るかを図に示してあります。

これ（下の図）は積分したあとの、エネルギーの spectra です。これ（上の図）はイベントそのもののタイムプロファイルです。

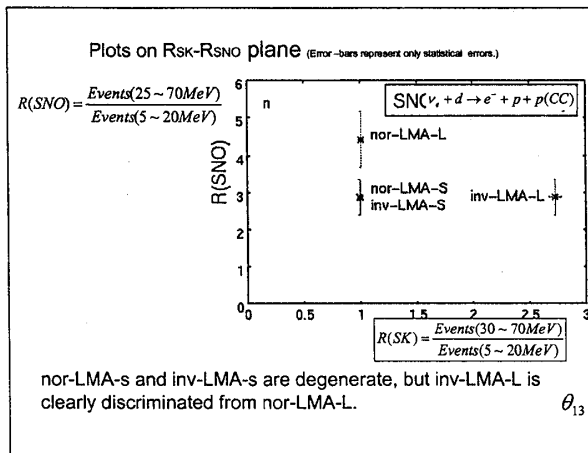
わかることは、SNO は、deuteron を使っていますので、electron-type neutrino に非常に感度があるので、カミオカンデとは違って、こちらはよく、違いが出てきます。ただし小さいので、SK と比べると、データでははるかにエラーバーが大きいデータとなります。またエネルギーの小さいところと大きいところのエベント数を比較してやると、 θ_{13} の大小が区別できると考えられます。

坂東：すみません、ちょっとさっきから気になっていたんですが、 θ_{13} がゼロのときというのは、あり得るんですか？あれは直接の transition がたとえなくてもほかから回ってきて、ぐるぐる回ると、結局、ちょっとはあるという。

佐藤：そうですね、私たちはゼロはしなかったけど、 10^{-6} 乗というのは、ゼロを仮定しているに等しいと思います。

[Slide 25] こうすると、実は SK でのエネルギーの高いイベントと低いイベント、SNO でのエネルギーの低いイベントとエネルギーの高いイベントの比をプロットしてやりますと、inverted の large mixing angle で、 θ_{13} が大きい、それから θ_{13} が小さい、大きいとか、こういうのはだいたい、このぐらいに分類できます。エラーバーは、SNO の場合はやっぱり大きく、SK は非常に小さいエラーバーになります。

もし、T2K など θ_{13} の値が決まる前に、もう一回、supernova が起こってくれば、 θ_{13} の情報が超新星から得られる可能性があります。

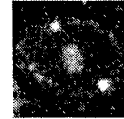


[Slide 25]

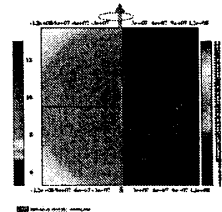
Present problem of Neutrino Burst Theory

- Stellar cores have large angular momentum and magnetic field.
- Simulations of magneto-rotational collapse suggest jet-like explosion, and neutrinos are ejected asymmetrically.
- Multi-dimensional simulations of the neutrino transfer is necessary.
- Some groups including us are challenging this problem.

SN1987A
HST image
on Jun.11
'02



Takiwaki et al., 2004-2006



[Slide 26]

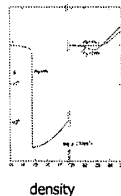
[Slide 26] 私たちは同時に、supernova のシミュレーションも、私の学生のころに、私が実現できなかったことを、いまは学生さんが自転や磁場を入れて、magnetohydro-dynamics のシミュレーションをしております。詳しく話す時間はないと思いますので、細かな話は省略いたします。

III. 真空の相転移

- I learned the Weinberg-Salam Theory in order to apply supernova neutrino interactions.
- I recognized it stands on the idea of phase transition of vacuum, and found it predicts interesting astrophysical and cosmological predictions.

対称性は湯川結合で回復、しかしゲージ相互作用で再び破れてゆく。

Higgs field



1) The broken symmetry of the vacuum is restored in ultra dense matter. Moreover, the symmetry is again broken with increasing the matter density by the effects of neutral current interaction. Sato & Nakamura '76.

[Slide 27]

In 1976, A.D. Linde sent me Lebedev Inst. preprints, and gave letters that he obtained same result.



Linde is a nice magician.



[Slide 28]

[Slide 27] 本題になってきますが、実は私は Weinberg-Salam 理論は、ニュートリノのために勉強したわけですが、勉強している過程で、真空の相転移という、たいへん面白いアイデアに基づいてつくられた理論であるということを、認識したわけでありました。

真空の相転移の天体物理・宇宙論への応用としてまず研究したのは neutron star だとか、超高密度物質のなかで Weinberg-Salam 相転移が起こることはないかでした。これは当時、Lee-Wick が原子核のほかのモデルで相転移を議論していたので、その影響でしょう。いまから言えば、とても不自然な話なのですが、Higgs meson の mass を極端に小さくすると、原子核密度程度でも、相転移が起こるようになります。

それは現実的なことではありませんが平均場近似をしまして、計算をしますと、対称性がこのあたりで回復してしまいます。こちらに物質の密度を書いてあります。 10^{15} グラムとか、このあたりは neutron star の密度です。これは Higgs field です。 ϕ_0 、ここが対称性の破れた状態です。

対称性の回復は湯川相互作用による効果です。一方、実はこの対称性は、密度を上げてやると、再びだんだん破れていきます。最初はちょっと気が付かなかったのですが、これはゲージ相互作用です。neutral current 相互作用によるエネルギーは対称性が破れるほうが下がります。したがってむしろ対称性は破れていくのだということに気が付きました。これはたいへん面白いと思います。

ました。Higgs boson の質量は、いまは 100 GeV 以上で、このような密度で相転移は起こりませんが、当時は何 MeV とか、数 GeV を仮定する論文もありました。

[Slide 28] この話をした頃、Andrei Linde から、実は俺も同じ結果を導いているという手紙をもらいました。Andrei Linde は、1972 年ころ宇宙で、いまから議論するような、相転移が起こるということを指摘したひとです。ただしそのときは、相転移が起こるということだけで、宇宙で何か面白いことが起こるかという発想はありませんでした。それは要するに、相転移が普通の二次の相転移ならあとに何か影響を及ぼすことはなく、宇宙の進化に影響はありません。

彼は相転移の、radiative correction の話をずいぶんやっております、私がインフレーションの論文を書く 1980 年ころまで、Linde とは文通をしておりました。ただし、当時、こんなことをやっているのは Linde と私ぐらいのもので、世界で誰もやっていないので、のどかな時代で、手紙を書いて返事を帰ってくるのに、1 カ月か 2 カ月かかるわけです。エアメールで出したときもあったし、ときには船便だったときもあると思うのですけれども、その程度で何も困りませんでした。ライバルもいませんので、まったくのどかな時代で、それが 1 カ月、2 カ月早く返事を欲しいとも思いませんでした。いまは、インターネットですぐに投稿しないと、astro-ph とかに投稿しないと、先を越されてしまいますけれども、そういうことが全然ない、いい時代でありました。

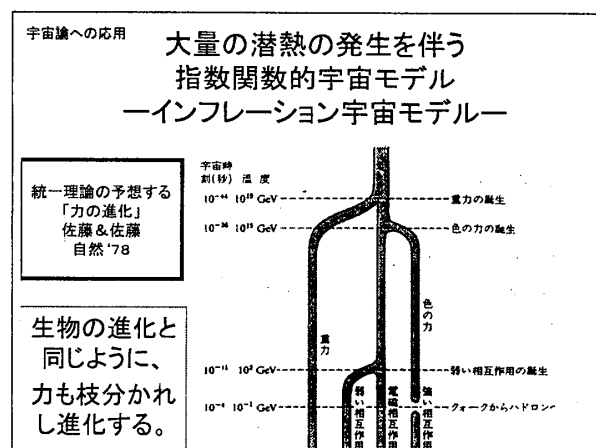
宇宙論への応用

これを武器に宇宙の初期に迫ることができる認識。

弱い相互作用をする粒子の質量と寿命に対する宇宙論。天体物理からの制限

- Higgs 粒子の崩壊(小さな質量を仮定)とそれによる宇宙背景放射の変形、及び質量に対する制限。
K. Sato & H. Sato, PTP, 1975.
- WIMP 崩壊による背景放射変形の世界最初の論文?
K. Sato & H. Sato, PTP, 1975.
- Higgs 粒子放射と星の進化への影響。
K. Sato & H. Sato, PTP, 1975.
- Axion 放射と星の進化からの制限。
K. Sato, PTP, 1978.

[Slide 29]



[Slide 30]

[Slide 29] 私は若い頃から初期宇宙をやりたいだったので、この話があると、初期宇宙の研究はできるのではないかと気が付きまして、始めたわけです。最初は佐藤文隆さんと一緒に、Higgs 粒子の質量や寿命に関する天体物理、宇宙論からの制限の研究を進めました。

もし Higgs 粒子が輻射崩壊するならば 3 度 K 黒体輻射の上に Higgs 粒子が decay したものが重なりまして、3 度 K 黒体輻射が変形します。これによって、Higgs の mass と lifetime を制限できるという論文を書きました。多分、いろいろなこういう粒子があって、それが崩壊して 3 度 K が変形するという論文は、多分、それまではなかったと思います。これが一番最初の論文ではないかと思ひます。とにかくいま、弱い相互作用をするような粒子の decay で、3 度 K が変形するという論文は多く出ていますが、これから始まったのではないかとと思っています。

同じように Higgs 粒子の質量が小さければ星のなかで温度が高いので、emit されます。これはまさに林先生の延長線でありまして、林先生は CVC があるかないかを、星の進化で調べてみようというたいへん pioneering なお仕事をされておまして、その延長線です。これでも制限がつくという話を、1975 年にやっております。

その後 axion が考えられた直後、axion の mass と lifetime についての制限がつくということで、論文を書きました。いまはこの axion は、invisible axion といって、こんなことで引っかからないように、逃げているのですけれども、当時は visible axion でルールアウトできる axion だったの

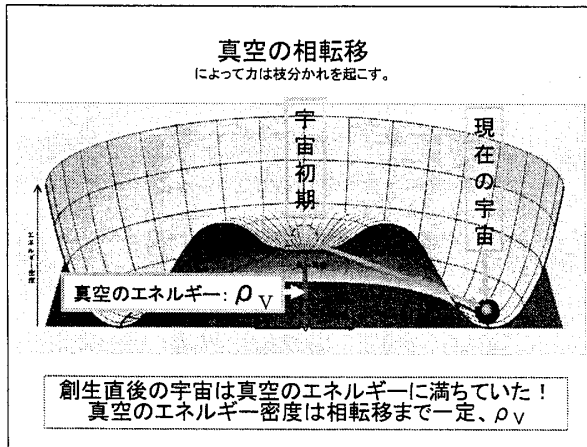
です。

[Slide 30] 私は 真空の相転移に基づく統一理論は宇宙初期を攻める道具だと思いましたもので、宇宙初期での相転移がどう起こるかということを、研究を始めました。その頃、実は佐藤文隆さんが、『自然』という雑誌に原稿を頼まれていまして、そういう話を一緒に含めるから、一緒に書こうと言われまして、佐藤さんと一緒にこういう絵を描きました。

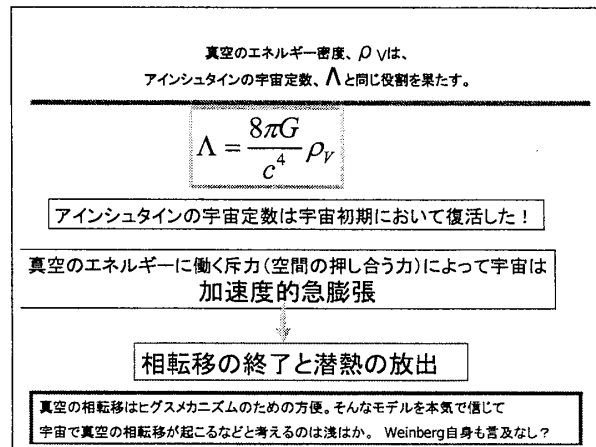
これは実は、宇宙の温度の高い状態から現在のまで、相転移によって、力がどういうふうに分化していくかということを書いたのですけれども、実はその当時、これを横にした絵があったのです。これは高エネルギーから低いエネルギーに変わっていくときに、結合定数がどう変わっていくかという話で、よく書かれていたわけで、それを縦にただけと言え、そのとおりなのです。横を縦にただけなののですけれども、それは大きな主張で意味があったと思うのです。これは宇宙における進化を表すものなのだとすることを主張したのです。

松井：線が切れているのは、何の意味があるのですか？

佐藤：これは、名前が色の力から、強い力に変わっているという意味です、力の名前が子どものときの名前と、大人になった時の名前が違うということで書いたわけです。



[Slide 31]



[Slide 32]

[Slide 31] しかし Linde が相転移が起こると言ったのみで何もその宇宙論的な意味を書かなかったのと同じように、相転移が起こりますと言っただけでは、宇宙に、何も新しいことは言えません。私はやっぱり、せっかくこういう面白いことに気が付いたのだから、絶対に宇宙のなかで影響を及ぼすようなことを考えてやろうと思いました。どうしたら宇宙の進化に影響を及ぼすようなことが起こるかということを、考えたわけです。

Weinberg-Salam で、まずは考えました。単なる二次相転移で、なめらかに、あたかも何もなかったように変化したのでは、それは絶対に、あとに何ら痕跡を残せませんので、痕跡を残すのは一次の相転移を考えなければだめだとすぐ考えました。

Weinberg-Salam を一次だとしますと、実はエントロピーが大量に生産されますので、バリオンナンバーの問題が生じます。つまりバリオンナンバーが薄められててしまうのです。

そうすると残念ながら、極端に、光に対してバリオンの数が少なくなってしまう。これはやっぱりだめだと。じゃあどうするかと。

この困難を避けるにはバリオン生成の前、 10^{16}GeV で起こる GUT 相転移を考えなければだめだということで、いろいろと模索しながら、GUT 相転移が一次相転移だとして、どういうシナリオができるか自分なりに一所懸命考えました。

ここに書きましたように、GUT 相転移が、宇宙の初期と現在の間で、こういうふうに相転移が

起こると、この間で潜熱の解放が起こるならば、宇宙がどうなるのかと考えていったわけです。現在の真空のエネルギーの値を0とするならば、昔の真空のエネルギーは、高かったことになります。

[Slide 32] アインシュタイン方程式のなかで、vacuum energy、真空のエネルギーというのは、基本的には宇宙項に対応します。つまりこれは、空間に対する斥力であります。藤井先生から、斥力といったらダメだと言っておられるわけですが、これは空間に対する斥力ということで、お許しいただけるのではないかと思います。

それからいま言ったように、単に加速度膨張、指数関数的膨張をするだけではなく、大事なことは相転移の終了にともなって大量の潜熱が放出されることです。インフレーションのシナリオが、基本的にはできたわけであります。1979年であります。

その後、基研の研究会なんかで、このあたりの話をしたことがあるのですが、素粒子の先生から、ずいぶんきついコメントがありました。Weinberg-Salam モデルを真に受けて相転移が本当に起こると思っているが、それはゲージ対称性を破る方便であって、そのためだけの現象論的モデルなのであって、相転移など実際には起こらないのではないかと、私はいまでも、この批判は、ある意味で正しいと思うのです。Weinberg-Salam での Higgs field は一体何なのか。いまはそれは、CERN でもうすぐ見えるということを言っていますけれども、確かに見えたとしても、Higgs は何であるかというのは、やっぱりよくわからないと思うのです。要するに scalar field というのは、正体不明であることは、変わっていないと思うのです。しかし素直に、Weinberg-Salam を受け入れるならば、こうなるんだと、同じように、大統一理論も素直に受け入れれば、こうなるんだということで、進めていったわけであります。

これはいま、ダークエネルギーの問題がありますけれども、真空のエネルギーは確かにあることはわかったのですけれども、それを scalar field でやるのは、本質を捉えたものかと。多分私は、そうじゃないと思うのです。基本的にはやっぱり、scalar field というのは現象論だと思っています。でも、現象論でも正しければいいじゃないかというのが、私の立場です。だからいま、ダークエネルギーの問題を、藤井先生のお話にもありましたような、いわゆるクインテッセンスなんていう、わけのわからない scalar field を導入して言っていますけど、現象論だけで深い意味はないのです。

インフレーションのアイデアは、いま言いましたように1979年にもう気が付いておりました。林先生の研究室にはいろいろとサブグループがありまして、その1つのサブグループのミーティングでインフレーションの話をいたしました。当時その場におられた方のお一人はここにおられるのですけれども、実は残念ながら、みなさん若い人から、ぼろくそに言われました。その批判は、ほんとに私も、弱点として気づいていましたので、強く反論はできませんでした。

何かといいますと、私はそのときに、地平線問題が解決されると、宇宙がなぜ一様だということを説明できると主張しました。それはインフレーションによって地平線が拡大するからです。私たちが現在見ている領域は、過去にはものすごく小さな一様な領域がインフレーションによってずっと広がった領域なのだと。だから一様になっているんだと。地平線が広がっていることを、だから地平線問題は解決できるんだということを言いました。

しかし、実は私が扱っていた宇宙論のモデルは、ロバートソン・ウォーカー計量という、一様を仮定した宇宙空間のモデルを使っているわけです。一様な宇宙モデルを使って、宇宙が一様になるとは、何も意味がないじゃないか、と言われたのです。私も実はその点は弱いと思っていたので、ちょっとやっぱり、論文を書くのはしばらく待つより仕方ないなと。やっぱり何か、はるかにアピーリングな話をしなければならない、地平線問題なんて原理的なそういうことを言ってもしょうがないと。実際、役に立つ話を議論しなければ、どうしようもないじゃないかというのが、私のそのときの気持ちでした。すぐに論文を書くのを諦めました。残念ながら、1979年の時点で、すぐ論文を書かなかったことが、まずいことになりました。

潜熱の発生を伴う指数関数的宇宙モデルは役立つのか？

1979年5月、天体核サブグループでも発表。

- ・地平線問題が解決されると主張したが強い批判。
- ・宇宙の一様性を、一様性を仮定したロバートソン・ウォーカー計量で証明しても、仮定＝結論。
- ・ほかの宇宙論的役割を議論しなければならない。→NORDITA、Copenhagen

[Slide 33]

NORDITAでの論文

1. バリオン、反バリオン対称(ドメイン構造)宇宙モデルを可能にする。

(Prog. Particle & Nuclear Phys. '80, Phys. Lett. '81)
Annihilation is suppressed because the domains are extended over the usual horizon.

2. 地平線を越えた宇宙構造の種 (凸凹)を仕込む。

(M.N.R.A.S. '81)

3. 磁気単極子の過剰生産をなくする。

GUTでは必然的に磁気単極子が大量に作られる。
M. Einhorn & K. Sato (Nucl. Phys. '81)

In addition,

Submitted earlier than Guth's one.

4. Inflation necessary predicts universes are created copiously, i. e. multi-production of universes.

Sato, Sasaki, Kodama, Maeda (Phys. Lett. '82)

[Slide 34]

私は、1979年にコペンハーゲンのNORDITAに客員教授で呼ばれておりましたので、これに気が付いた直後に論文も書かずに行かざるを得なくなりました。結局、NORDITAで論文書きを進めることになりました。

[Slide 34] 実はNORDITAでは、基本的には三つの論文を書きました。とにかく、何か実際に役立つと仕方がないので、原理的なことを言っても仕方がないので、こんなに宇宙のことに役立つんですよと言わなければならないので、一所懸命考えまして、基本的にこの三つに気が付いたということなのです。

一つは、バリオンと反バリオンの対称な宇宙のモデル、バリオンと反バリオンがそれぞれドメイン構造をもって入り交じっているモデルです。しかし、ドメインの大きさは地平線以下でなければならず、そうだとすると後の時代に対消滅してバリオン数ゼロの宇宙に帰ってしまいます。実はそのドメインが、インフレーションで大きくなることによって、対消滅が避けられるというモデルです。われわれの住んでいる宇宙、100億光年ぐらいの領域よりドメインの大きさがインフレーションで大きくなったとすれば救われると。これは地平線が大きくなるということの応用です。

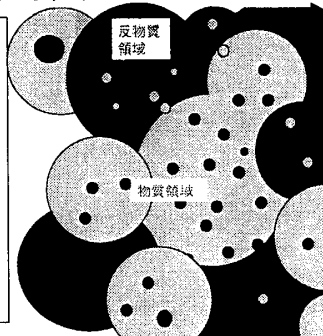
2番目は、宇宙構造の種を仕込むという問題です。これは当時からわかっていましたけれども、超銀河団だとか、大きな宇宙にはものすごく巨大な構造があるということはわかっています。だけどそれは、宇宙初期で種を仕込もうと思っても、全然できません。つまり地平線の問題というものがありまして、因果関係を持てる領域よりも、大きなスケールの山をつくってやらないと、できないような大構造があるのだというわけなのです。そういうふうに因果律を超えて、大きな構造があるというのは、大きな問題だと思っていたわけです。この問題もやっぱり、指数関数的な膨張で、地平線が大きくなれば、解決できるだろうということです。

モノポールの問題、これも実はGUTというものを信じるならば、必ず、必然的にモノポールが大量にできてしまいます。バリオン100個に1個のモノポール程度作られてしまいます。これは大問題でした。統一理論と宇宙論とは大きな矛盾を抱えているということで、当時の大問題でした。これはEinhornというアメリカ人との共著なのですが、彼は、この問題を、普通のビッグバンのモデルで解こうと考えていました。だけど基本的には解けていなかったわけです。これも相転移で、できる真空のドメインを現在の宇宙の大きさ程度にインフレーションで広げると、観測している宇宙の領域には1個のモノポールもなくなります。そういうことで、この三つの論文を書いたわけです。いま、どのくらいですかね。

[あと5分ぐらいで。]

物理学の対称性と、現実の宇宙の非対称性

1. 物理法則は物質と反物質に対してまったく対称のはずである。
2. 物理学の法則が対称に作られているのなら、現実世界で対称性が破れるにしても、その破れは平等にやぶれるのではないか？
3. ある場所では物質の世界が、また違った場所では反物質の世界が実現されるはずである。



[Slide 35]

Universe with baryon-antibaryon domain structure



- バリオン非対称性は CP の破れ、バリオン非保存反応、熱平衡からのずれ (Saharov('67), Kuzmin('70), Yoshimura('78)) で実現される。しかし物理学法則は対称であるべき、つまり CP は自発的に破れるべきである。
- こう考えると全体はバリオン非対称だが「バリオン、反バリオン ドメイン構造」を持つことになる。
- しかし旧来のビッグバン理論では、ドメインの大きさは地平線より小さく、後の時刻にドメインは対消滅をおこし、バリオン数ゼロの宇宙になる。
- CP の自発的対称性の破れの後で、インフレーションが起こるならば、これらのドメインサイズは極端に大きくなり対消滅は避けられる。

* Yoshimura pointed out first this possibility under the GUTs.

[Slide 36]

反物質・反世界の探査

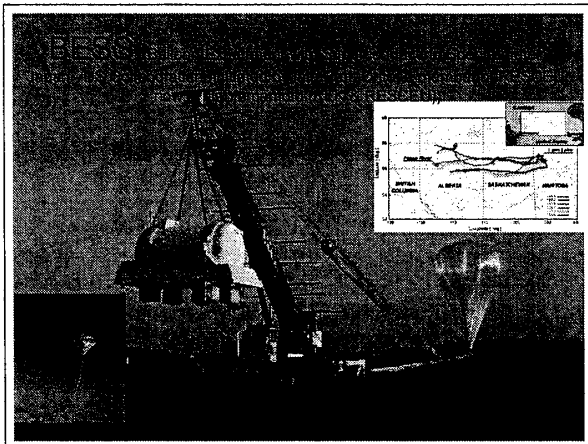
宇宙からやってくる反陽子の量、さらには反ヘリウムを検出して反世界があるのか、探査する。

反陽子は宇宙線の衝突で作られるので反世界の証拠にはならない。しかし反ヘリウムは反陽子、反中性子の核融合反応によるもので反世界の星、反世界ビッグバンでしか作られない。

BESS実験 (Balloon Experiment with Superconducting Spectrometer)
日本-アメリカ共同研究。(故 折戸教授、山本教授によって始められた)

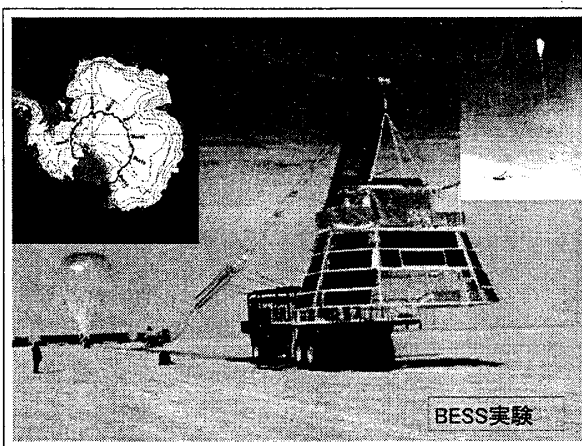
反物質の検出をする超伝導磁石を搭載した巨大な風船をあげて、反陽子の量の測定、反ヘリウムを見つける。

[Slide 37]



[Slide 38]

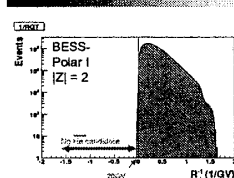
[Slide 35-39] ああ、そうですか。全然時間がありませんね。そういうことですので、このあたりの具体的な話は、全部スキップいたします。



[Slide 39]

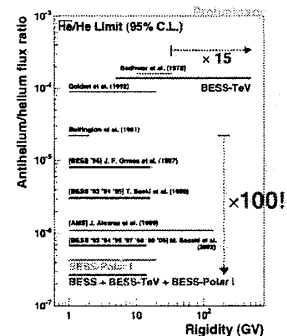
BESS 山本氏提供 (2006.10月)

反物質探索の進展



- BESS, BESS-Polar を通し反He/He比上限
 ● $< 3 \times 10^{-7}$
 ● 上限値を1/100押し下げる

M. Sasaki et al., presented at COSPAR-06, Beijing, and to be published in Adv. Space Res.



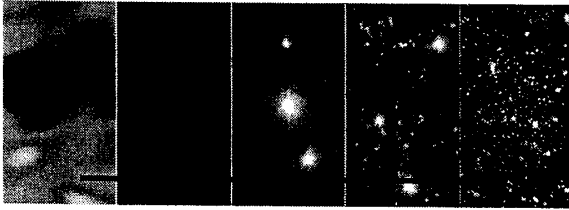
[Slide 40]

[Slide 40,41] ビッグバンセンターでは、数年前になくられた折戸先生が、BESS グループをつくり反物質宇宙線の探査をはじめられました。宇宙で物質と反物質がドメイン構造になっているのならば、反物質の宇宙線がやってくるはずだと。宇宙空間で反陽子はいくらでもできますからいくら反陽子をとらえても反世界の証拠にはまったくありませんが、しかし、アンチ・ヘリウムなら

ば反世界の証拠になります,, アンチ・ヘリウムは, 反世界での元素合成がないとできませんから, これが見えてくると, 反世界があるという証拠になるということで, ビッグバンセンターの大きな看板の一つだったのです. 今は高エネルギー研の山本先生がリーダとして進めておられます.

2. Generation of the seed of super-horizon scale structure of the universe (M.N.R.A.S. '81)

- ・ 宇宙初期に“構造の種”が仕込まれ,それが重力によって物質が集まり, グレイトウォール, 銀河団, 銀河が形成される.
- ・ しかし, “構造の種”の大きさは遙かに地平線(因果律)を超えた大きさでなければならぬ. とても標準モデルでは仕込めない.
- ・ しかし, 指数関数的膨張モデルでは相転移の揺らぎが引き伸ばされるので, 容易に仕込める.



[Slide 41]

In Feb., 1980, in order to make propaganda of the theory which can make the super-horizon density fluctuations, I visited Cambridge, Load M. Rees, a Mecca of galaxy formation, and the authorities.



Following the suggestion of Rees, I submitted to M.N.R.A.S.

[Slide 42]

いまのところ, 残念ながら, ヘリウムに比べると, アンチ・ヘリウムは, ほとんど 3×10^{-7} 程度しかないということがわかっています. 残念ながら, 反世界があったとしても, やっぱり少なくとも 100 メガパーセク以上の領域より遠方になってしまいます. 宇宙全体がインフレーションが起こって, いま, 観測できるところは全部, 物質であると, 反物質はないことになります.

坂東: いまのはアッパーバウンド?

佐藤勝: アッパーバウンドです. 全然みつかりません. ノーイベントです. すみません.

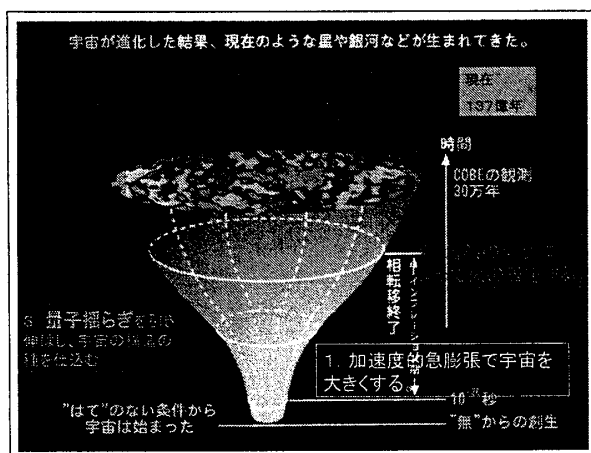
いや, 一個見つければノーベル賞かもわかりませんよ. それはもう, 本当に確認できるわけですよ, 我々の世界観を変えるような実験になりますから, いつも折戸先生は, ハイリスク, ハイリターンということを言っていました. もっとも時には, ハイリスク, ノーリターンということも言っていました.

でも, そういうモチベーションの結果, これだけ宇宙線の精密な観測ができるようになったという点で, たいへん折戸先生, 山本先生の偉大な功績と思います.

[Slide 42] 宇宙の大構造になる種をつくる話ですけれども, これは 1980 年に, まだ, Guth が論文を書いていない頃ですけれども, ケンブリッジに行きまして, Martin Rees のところに宣伝に行きました. この方は宇宙論の業界で, 当時から銀河形成の超権威者でありました. いまは「Martin Rees」と呼ぶのではなく, 「Lord Martin Rees」と言わないとだめなのです. 最近は Sir の称号に加えて, Lord という称号ももらったそうです.

[Slide 43] そういうことで, インフレーション, 要するに一次相転移のモデルでありましたけれども, いろいろと効果があるということです. いまは実は, 私は単純に, 相転移による揺らぎで, 大きな, 地平線がぐっと引き延ばされますから, 宇宙の大構造ができると言いましたが, 今は量子揺らぎによるものが原因だと考えると, 揺らぎのスペクトルが説明できるということになっております. G.Smoot の今年のノーベル賞にはインフレーションについて言及されていませんが, これを見つけて, George Smoot は受賞したわけです. 彼はこの COBE による揺らぎの発見によってインフレーションを, 誰もが信じるようになるだろうということを, 発見のときに言っております.

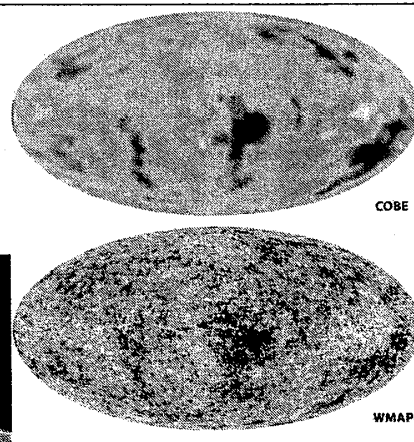
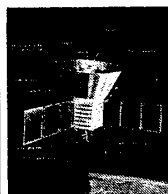
[Slide 44] たいへんうれしいことに, 観測的な支持が多く出てきたわけであります.



[Slide 43]

観測からの支持

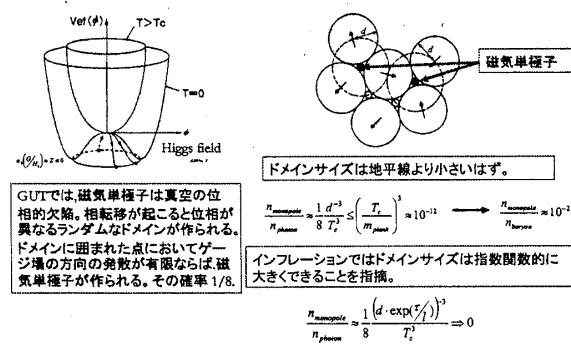
背景放射の揺らぎは“量子揺らぎ”が指数関数的膨張で超地平線スケールになったと考えられるスペクトルと一致。



[Slide 44]

3. 磁気単極子の過剰生産をなくする.

M. Einhorn & K. Sato (Nucl. Phys. '81)

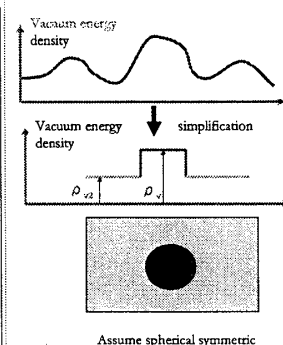


[Slide 45]

4. Multi-production of universes by inflation

Sato, Sasaki, Kodama, Maeda (PTP '81, Phys. Lett. '82a, '82b, PTP '83..)

- Inflation never occurs homogeneously over horizon, but occurs independently for each horizon-size region. Then the original universe becomes inhomogeneous greatly in over-horizon scale on the contrary to the inflation paradigm.
- Assume the vacuum energy density is inhomogeneous, and pick up a high density region and assume it is spherical symmetric for simplicity.



[Slide 46]

[Slide 45] モノポールの話はもうしません。GUTとか統一理論では、モノポールは、topological defectです。こういうものが普通に、二次の相転移であろうと、何であろうと、宇宙のなかではできすぎて、困ってしまいます。バリオンと比べると、バリオン 100 個に対して 1 個できるのです。これはとても問題外です。この問題も、インフレーションを考えると、解決します。

多くの方はインフレーションが起こると、モノポールのオーバープロセッシングが避けられるということを知っていると思うのですが、これは最初の論文なのですが、残念ながら、意外と知られていません。どうして認識されていないのか、わからないのですが、これももちろん、Alan Guth の論文よりは早く投稿された論文です。私の三つの論文は、全部 Alan Guth より早いです。

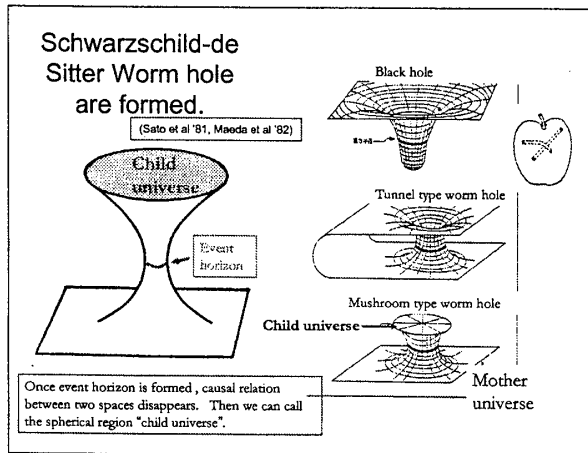
[Slide 46] 最後にかきましたのは、ここにおられる佐々木くんと一緒にした研究なのですが、私は当時、コペンハーゲンにいまして、実はひとつの問題で悩んでいました。それは相転移が終わらないという問題があるのです。つまり、一次相転移で考えると、インフレーションでバブルができて、それが合体して、相転移を終了するわけなのですが、nucleation の割合が少ないと合体しないのです。バブルはいくら光の速さで広がろうと、宇宙全体が光の速さより、言ってみれば早く膨張しているということで、いくら経っても、現在の真空状態が、宇宙のなかで、全部を占めてしまうということが起こらないのです。そのような構造を見ていると、いろいろな非常に困ったようなことが起こってまいります。実は私は本当に、それでずいぶん悩んでいたのです。

ところが幸いなことに、その頃、そこにいる佐々木くんが、実はイタリアの Ruffini のところに

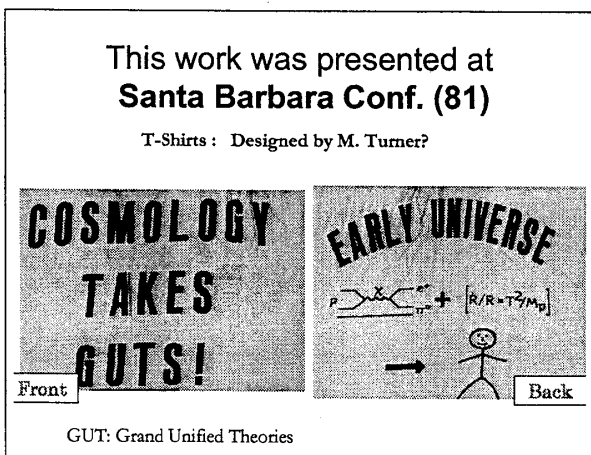
いまして、何度か知りませんがよく電話で話しました。佐々木くんは、ちょうどドクターの1年ぐらい。[いえ、もうD2です。] D2になっていたかな。

実は1980年の3月になっていましたかね、シシリー島エリーチェで宇宙論の conference がありまして、実はイタリアへ行きました。ともかく途中でローマ大学に立ち寄り Ruffini のところで、先ほど話したようなインフレーションのセミナーをしました。

だけど、セミナーはしましたが、いま申しあげました、相転移が終わらないとかという問題があるので、ずいぶん悩んでいまして、細かなことは言わずに、宇宙全体で相転移が起こって、宇宙全体がぐっと一挙に加熱されると、大筋の話だけをしました。



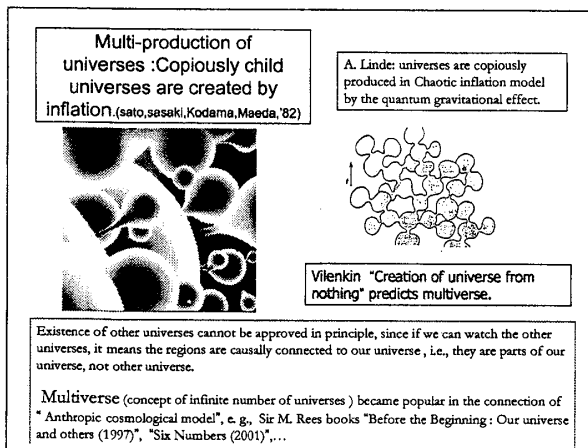
[Slide 47]



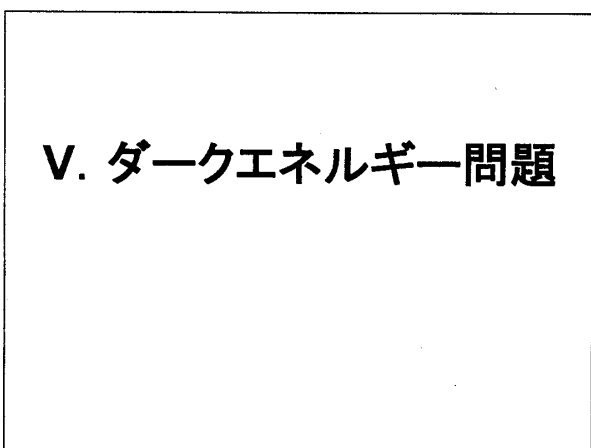
[Slide 48]

[Slide 47] そのなかから実はわかってきたことは、これは京都に帰ってきてから、佐々木くんも帰ってきましたけれども、小玉君とか前田君とまとめたことです。相転移が進んでいる状態では時空構造が大きく曲がってしまいまして、wormholeという構造が実際にできてしまうのだということに、気が付いたわけでありまして。よくこの絵を描いていますけれども、もともとの宇宙から、真空のエネルギーがまだまだ残っている領域は、wormholeになるのだと、これは、みなさん若手の方と議論をする過程で、確信を持てるようになりました。球対称モデルをうまく考えることで、確信を持てるようになったのです。

このあたりに関する、真空の相転移で泡ができる話は、相対論的に議論する話もありましたが、こういうふうに時空構造が曲がるということは、誰も気が付いていなかったのです。



[Slide 49]



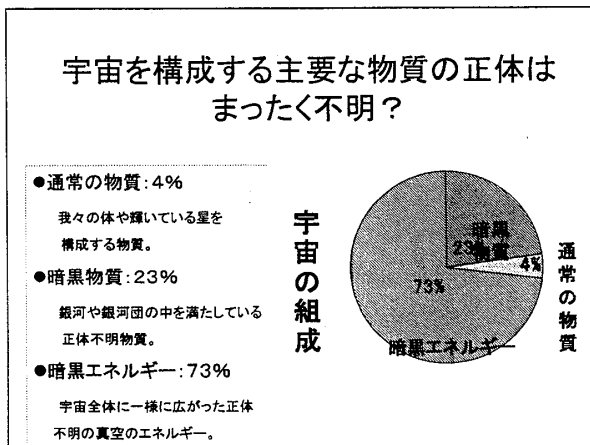
[Slide 50]

[Slide 49] 宇宙がたくさんできるという話は、Lindeのカオティックインフレーションモデルで量

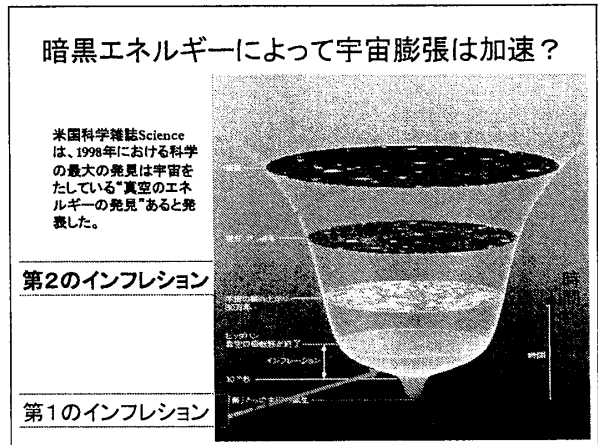
子重力的効果で作られるという仕事が知られていますが、子宇宙の相対論的な具体的な physics は、彼は何も言っていないわけです。この physics は、我々が世界で初めてだったと思います。それからあとで、前田君が第一著者の論文ですけれども、ある程度、外側にも真空のエネルギーがあって、中側にも真空のエネルギーがあるような場合についての、wormhole の形成を議論しているのですけれども、それからわかったことは、密度が高い、wormhole のある領域と、そうでない領域との密度の差が、3 倍以上ないと、wormhole になりません。密度差が小さいときには、どちらも de Sitter 的な宇宙になってしまいます。3 倍以上の揺らぎが起こったときにしか、こういうことは起こらないはずです。そういうことも、あとで議論したりしております。

このように、私は最初インフレーションのシナリオがうまくいかないと、困っていたのですけれども、その中から、実は宇宙がたくさん生まれてくるんだということに、気が付いたわけでありませう。時間が過ぎていましたね。

[Slide 50] じゃあ、最後の話をします。まったく同じことですが、現在の宇宙には、ダークエネルギーがあるということになっています。これはみなさんもお存じのように私はこれはよく、第2のインフレーションと呼んでいますけれども、第1のインフレーションと同じように、いま、真空のエネルギーが宇宙を充満しているらしいということになっているわけでありませう。細かな話はスキップしますが、このあたりはスキップします。



[Slide 51]



[Slide 52]

ダークエネルギー問題

ダークエネルギーの正体はいったい何か？
Quintessence (第5の元素仮説)? P. Steinhardt et al, '98

地上の物質: 4種類の元素: 水、空気、土、火
天上の物質: 第五の元素

時間的に変化するスカラー場のエネルギー:
現象論的理論にすぎない?
Brane Theory で説明できるか ghost condensation?

真空のエネルギー問題について:
現在我々のはかつて建設した物理学の体系という摩天楼を破壊することなく、その欠陥のある土台を取り替えることに挑戦しているのだ。(L. Abbott, Scientific American, 1988)

[Slide 53]

真空のエネルギーは正体は何であれ実在する。インフレーションの一つの根拠 “差” の測定 —カシミア効果—

真空も量子論的にゆらいでいる。
ゼロ点振動のエネルギー = 真空のエネルギー

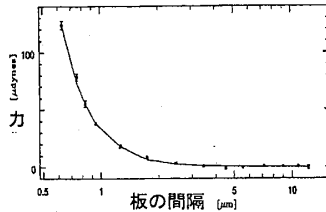
2枚の金属の板に挟まれた空間のゼロ点エネルギーは、外の広い空間のゼロ点エネルギーより小さいため、押されてくっつく。

真空のエネルギーの絶対的エネルギーの測定はできないが、このように“エネルギーの差”は測定できる。

S. K. Lamoreaux, '97,
U. Mohideen, A. Roy, '98.

[Slide 54]

カシミア効果の実験的確認 S. K. Lamoreaux, 97 U. Mohideen, A. Roy, 98



2枚の板の引き合う力は、理論の予言とびつたりあった。

真空のエネルギー密度の絶対値は分からないが、それが存在することを確かめた。

[Slide 55]

2. 小さすぎる問題(smallness problem)

真空のエネルギーが量子重力の効果によっているなら、プランクエネルギー密度のスケールであるべき。それと比べると比べて120桁も小さいのは不思議？

現在の真空のエネルギー密度とプランクエネルギー密度の比

$$\frac{\rho_v}{\rho_{planck}} = \frac{(10^{-3} eV)^4}{(10^{19} GeV)^4} = 10^{-124}$$

$$\text{あてずっぽうの推定} \quad \frac{\rho_v}{\rho_{planck}} = \exp(-2/\alpha)/(2\pi)^3 = 1.2 \times 10^{-123}$$

理論物理学の最大のミスマッチ？ α 微細構造定数

[Slide 56]

3. 偶然性問題(coincidence problem): なぜ宇宙は、宇宙開闢100億年余の時代に、 第2のインフレーションを始めたのか？

・ 人間原理のみが答えることができるのか？

宇宙は無限に存在し、それぞれ異なった物理定数(この場合真空のエネルギー密度=宇宙定数)を持っている。その中でも、知的生命体(人間)がうまれる宇宙のみ認識される。

現在の値より、大きな値を持つ宇宙では天体の形成が進まず知的生命体も生まれない。(S. Weinberg, 89)。

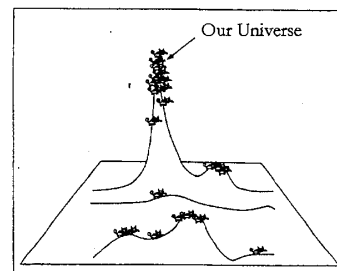
[Slide 57]

“multiverse”の自然選択による進化

The life of the cosmos, L. Smolin, 1997 (著者訳, 1998年)

- 仮定
1. ブラックホールが作られると別の新しい宇宙が生まれる。
 2. その新しい宇宙の物理法則は“少しだけ”元の宇宙の法則から異なる。

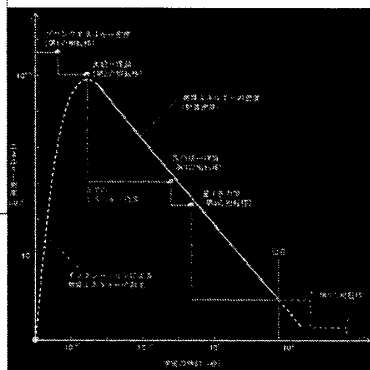
結果
ブラックホールを多く作る宇宙が自然選択で栄える。
素粒子物理学の標準モデルのパラメータは、多くのブラックホールを作るが故に、その値となっている。



[Slide 58]

4. 第5の相転移？

このエネルギーは、
第1のインフレーションの様に、いつか消えるのだろうか？



[Slide 59]

ダークエネルギー問題

東大ビッグバン宇宙国際センターの次期10年のテーマ

- ・1998年－2008年 初期宇宙、インフレーションなど
- ・2008年－ ダークエネルギー 探査と理論

$$p=w \quad \rho \quad (\text{真空のエネルギー} w=-1)$$

wの進化

(11月 ダークエネルギー研究会、国際会議)

実質は銀河サーベイ

- ・世界的に ダークエネルギー探査は大きなテーマ

SNAP,

[Slide 60]

[Slide 59] このダークエネルギーも、これから消えるという可能性も、実はあるのです。何かもし、第1のインフレーションが、まさに相転移で実質なくなってしまったように、実は消えたっていいわけですね。また藤井先生の議論のように、これは decay していくかもしれない、そういうこともあります。だから将来、どうなるかということについて、何一つわかっていないわけでありませう。

[Slide 60] とにかくいま、ダークエネルギーの問題は宇宙論の最大の問題だと思っております。

私たちのビッグバンセンターは 10 年間の時限のセンターとして設立されました。

2008 年がくると時限ということになるわけであります。大学が法人化されましたので、この時限はなくなったのですけれども、やっぱり一つの節目でありますので、次の 10 年は、やっぱり何を主なテーマに唱えるべきかということで、議論をしております。

いま実は挙げているのが、ダークエネルギーの理論と、その探査です。これを大きなテーマに置いていこうと思っております。

実はこれは、ダークエネルギーというと、いかにも原理的な難しそうな話をするかと思われるのですが、ダークエネルギーの観測とか探査というのは、何のことはない、これは実は、銀河のサーベイです。遠くの銀河、つまり過去の時代の銀河を見ることによって、ダークエネルギーがどういうふうに進化したかを調べようということなのです。

よく、ダークエネルギーを書くときに $p = w\rho$ 密度。真空のエネルギーに対しての圧力がどうであるかというのを、この w に押し込めて議論をします。真空のエネルギーは、 -1 なのです。pressure = マイナス energy density というわけなのです。 w の値は、いまの観測ではほとんど -1 に近いといわれていますけれども、これが過去でも、 w は -1 に近いのか、そういう意味で、進化を見るということは、実は銀河のサーベイをすることと同じです。

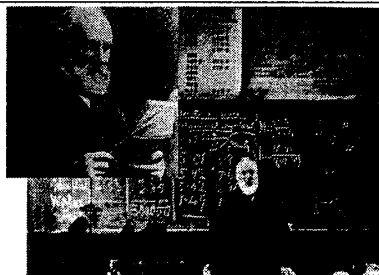
同時にこれは、理論的にも面白い話であります。いまのところ、現象論的な scalar field とか、そういうことでしかないわけですが、それがどこまで深まるか分かりませんが、21 世紀の大問題であることは疑いのないことです。

ビッグバンセンターでは、ダークエネルギーの研究会、国際会議を、須藤靖さんを中心にして開催しようとしております。現在 DOE とか NASA だとか、また、ヨーロッパの ESA は、ダークエネルギー探査の人工衛星だとか、いろいろなプロジェクトを出しています。ダークエネルギーのことがはたしてどこまでわかるか分かりませんが、銀河のサーベイが進むことにより、宇宙の進化ということについては、極めて有益な結果が出ると思います。

In 1900, Lord Kelvin gave a lecture "Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light."

"beauty and clearness of theory" was overshadowed by "two clouds, the null result of the Michelson-Morley experiment and the problems of blackbody radiation."

They were really the key for 20 century physics, relativity and quantum physics, on which the modern physics skyscraper stands.



Dark energy problem must be the key of gate to 21 century cosmology and physics.

[Slide 61]

[Slide 61] これは最後のスライドです。これは、Lord Kelvin が、1900 年、つまり 19 世紀の最後の年に言った、有名な言葉であります。要するに、19 世紀の物理学をおおている二つの暗雲があると、つまり、Michelson-Morley の実験によるエーテルの不存在問題と、Blackbody radiation

の発散問題があるということを言っているわけです。もちろんこれは、21世紀の物理学、相対論と量子論を生む重要な鍵となったものです。

同じように、いま、ダークマターとダークエネルギーという問題があるわけです。ダークマターは、LHCの実験などで解かれるかも知れませんが、このダークエネルギーは、極めて根源的な問題だと、みなさんも思っておられると思います。これは21世紀の宇宙論だけではなく、物理の根幹にかかわる問題であり、21世紀物理学を開く重要な鍵を担っていると思うのです。これがいつわかるようになってくるのか、楽観的ではありませんけれども、若い方もおられるし期待したいと思っております。

どうも長くなりました。

真貝：ありがとうございます。いろいろなエピソードを交えて、佐藤先生の一連の研究のいきさつを知る、たいへん貴重な講演だったと思います。ありがとうございます。時間過ぎてますけど、次は昼休みですし。

藤井：佐藤先生にはダークエネルギーが大事だとおっしゃっていただいたので、ちょっとだけ言わせていただきます。

売り言葉に買い言葉というのではありませんけれども、佐藤さんはスカラー場というのは、現象論的なものだとおっしゃったのですが、僕が昨日話したのはそうではなくて、クインテッセンスという、これは1998年ごろから、ある人たちが始めたあれなのですけれども、僕が言っているスカラー場は、それよりもっと前から考えているので、現象論ではなくて、例えば scalar-tensor 理論のように、アインシュタイン理論とは違うけれども、一種の、根本的な理論から出てくるもの、それから例えばヒモ理論からも期待されるもの、現象論ではないと思うのです。

僕は用心深く、佐藤さんがおっしゃったような意味のインフレーションは避けた。それからあとに起こる、現在も起こっていることに注目しようということを言っている。そんなことがあります。

それからもう一つ、いま佐藤さんは、ダークエネルギーの探査は、銀河の探査だとおっしゃいましたけれども、どうもそれ以外にもある。例えば、今日はおっしゃいませんでしたけれども、 α が時間とともに変化する、そのほうが僕は早いと思うんです。

どうしてかと言いますと、いまちょっと言う時間がありませんけれども、銀河のサーベイなんかは、 z 、レッドシフトで言うと、4とか6、もう少し前にいかないとだめでしょう。

佐藤：まあ、そういう意味では $z=10$ ぐらいまでのような気がしますけど。

藤井：でしょう。そこまではなかなか見られないのです。それよりも、例えば α が時間とともに変化するか、それがスカラー場の運命と、おそらく直接に関係がある。それはもっと、 z がせいぜい1.8とか2とか、低いほうだと例えば0.何とかというところに、…現象というのがあります。それは僕もいろいろやってみたのですが、そのへんに α の時間的变化の一つのあれがありますね。

それから QSO の absorption spectrum というやつから、…がたくさん調べているのです。それは z が2よりも小さいところを、1.いくつとか1.8とか、そういうところで非常にたくさん研究がおこなわれているのです。それがスカラー場にどれだけ関係しているか、多少、現象論的な議論もありますけれども、僕が言いましたような、もう少し理論的な議論からやるところがありません。

でも僕がいろいろと言ったおかげで、そういうふうな観点から、 α の時間的变化を調べているものがあるのです。昨日はお見せしませんでしたけれども、2、3週間前、僕に一つもらったメールで、新しい実験データもあって、それは今まで非常に慎重であった人が、 α

はやっぱり時間的に変化している、 2σ ですから、まだまだ彼らは用心深くて、これは新しい interesting なステージに入ったところだとしか言っていない。でもそういうところをもう少し見ていけば、多分、 z がもっと小さいところでわかります。

そういうことで、単なる現象論ではなくて、しかも現象に関係のあるところが、本当に宇宙論ではなく、もう少し近い、天文学ですね、そのへんから出てくるのだろうと、僕は思っています。

佐藤_勝：藤井先生の立場はよくわかりました。

しかしこういう問題の探査を、藤井先生はたくさん、ずいぶん宣伝される必要があると思うのです。いまのところやっぱり、 α を見ることで、そういう真空のエネルギーとか、そういうことが得られるとかかわるとかという認識は、やっぱり理論を介してそうなっているということは、やっぱり認識はされていないのですよね。やっぱりアメリカで DOE が認めるとか NASA が認めるというのが、やっぱり銀河サーベイから見るダークエネルギーの直接の変化を見ようという話になってしまっているわけです。

それにいま、先生のそういう理論では、そうなっていますけれども、やっぱり理論が入っていますよね、そういう銀河のサーベイでやるということは、ある意味では直接ですよ。そのあたりが、私はやっぱりこの scalar field という認識は、やっぱりいろいろな意味で、現象論的にはあるのだけれども、それが本質的かどうかというのは、素粒子の先生方に本当に聞きしたいのです、どういう認識でおられるのかと。

藤井：多分、素粒子の方もまた、そのスカラー場が本質的だとは、あまり思っていないでしょうね。あれが本質的だと思う人は非常に少ない。

なぜ不信感があるかという、それは昨日、ちょっと言ったかもしれませんが、scalar-tensor 理論に対しての不信感なのです。特に solar system experiment で、もう死んでいるのではないかという思いがあるみたい。それがそうじゃないと、僕はいろいろ、このごろから言い始めているんだけど、あんまりみんな。だから前田さんと僕のほうが不利だということ、そういったことがありますね。

佐藤_勝：私はただ、大事なことは、最近、Casimir 効果も実験的に確かめられてきて、真空のエネルギーとか、そういう概念は正しいと。それはインフレーションにとっても、非常にそういう実験的なサポートだと、私は思っているのです。だけどそれをスカラー場で検出するのが、本当にいいのかとか。

藤井：だからスカラー場というのは真空ではないのですよね。

佐藤_勝：まあ、そうですね。そういうことが、やっぱり。

藤井：もっと単純な話をしている。スカラー場がある。それはアインシュタイン理論があるのだったら、それをもう少し、明らかに宇宙が本当に accelerate しているのか、していないという説もあるということも知っていますけれども、accelerate しているのだったら、やっぱり必要だろう。それはちょっとアインシュタインの理論をもう少し拡張して、そのなかではスカラー場がテンソル場と同じぐらい、fundamental な役割を果たしていると考えて、何が悪いのだろうと。ダークエネルギーというのは、そういうものの現れじゃないか、と思う。そういう考えがあってもいいと思う。

佐藤_勝：そうですね、わかります。

じゃあ私は本当に、素粒子の先生方、そうですね、中西先生、スカラー場について、どう思われますか。

中西：わかりません。要するに量子化するかしないか、そこがちょっと、はっきりしないので。

佐藤_勝：まあ、古典的に近いね。

中西：もともと GUT とかの量子場というものがあつたわけですね。それがいつの間にか classical に変わっちゃって。

藤井：いつの間にかじゃなくて、そういう考えもあるということを言っているわけですね。

佐々木：ちょっとよろしいですか。そのアンケートを取ったときに、高次元を信じている人は、お年寄りの方々、多分、佐藤さんも含めて、あんまり多くなかったですけれども、現在ではある意味で、若者の常識ですね、宇宙の時空は、少なくとも時空の次元が四次元であるというのは、たまたまそういうのが見えている、現在、それこそ effective に見えているだけで、本来の時空は高次元なんだ。

そうすると、スカラー場が最初にあるがなかろうが、四次元では effective なスカラー場は必ずです。

佐藤：けっこうです。僕が言いたいことは、それに近いことなのです。やっぱり必ず現象論的であつて。

佐々木：metric から出るわけですね、だから $g^{\mu\nu}$ と同じレベルで出ちゃう。

佐藤：わかりました。その裏に何かあるのだと。それは超ひも理論とか M 理論かも知れない、ブレーンかもしれない、そういうもののベースがあつて出てきているのだと、私はそういう意味で、現象論だと言っているのです。それはまやかしか、そんな意味じゃありません。Higgs だって、見つかると思っています。だけど、Higgs が見つかったといって、Higgs field というのが、本当に根源的なものかと、それはちょっとわからないというのが、私の意見ですけれども、九後さんはどう思われますか。

九後：基本的には supersymmetry を信じていますので、いろいろとスカラー場もあると思います。それから高次元も信じています。

佐藤：佐々木教に信奉したのでしょうか。

真貝：そのほかに何か、おありでしょうか。

坂東：SF と SF でないものと、どう違うかというのは、すごく今日、impressive だったのですけれども、初期の段階で、Weinberg-Salam が本物かどうかというのは、多分 1973 年以前と以後と、違うと思うのです。

その前の段階では、益川さんは、あれはきれいだとよく云ってられました。きれいだけど自然はきれいなものを選ばなかったんだねなんて、言っていたのですよね。だから私なんかは、そんなものには惑わされないで、もうちょっとほかのことをやろうと、ずっと思っていたくちなのですけれども、それは誤っていたのです。

実はそういう頃に、Weinberg-Salam 理論を使って、そういう Higgs 場を使って、そのあと、佐藤さんがインフレーションの話をやられたと。そのときに、佐藤さんが SF でも何でもいいと思ってやられたのか、そのへんがすごく気になっているから、ずっとなんとなく思っていたのですけれども、今日のお話を聴いて、それが本当に宇宙でどういうふうに見れるのかということを、どこかで検証したいって、ずっと思っておられたというのが、すごくよくなって。

やっぱりそれはあれでしょうか、実は私は林先生が、よく物理教室で、素粒子とか宇宙とか原子核とか、いろいろなところの発表があると、素粒子はたいてい SF か、よくわからないような話をする、現象論とつながらないような話をするときに、林先生は必ず「それはどこで検証されますか」と質問されていたわけです。それはすごく私は印象に残っていて、そういうふうには考えないといけないのかと。理論の整合性ということもあるのですけれども、それだけじゃなくて、そこが非常に大事なというのを、林先生はいつも強調されていたのです。で林先生のところにいたのでやっぱり佐藤さんもその影響を受けられたのか、どうい

うことだったのかと。

わりに SF 的なことをやってはったとずっと思っていたものですから、ちょっと今日聴いて、ずっと悩んではったという話とか、宇宙の初期に孫宇宙みたいな、あほな話（って言ったら悪いけど）、そんな話をよくやらはるわと、そう思っていたのが、すごく自然との対話というか、そこがすごくよく今日の話でわかったのです。

佐藤^朗：昨日から、今日も言われたかな、やっぱり理論物理の人間というのは、論理を極めるということに尽きるのではないかと思うのです。Weinberg-Salam は、そういう理論があったときに、結果的に Higgs 場なんてのは、現象論かもわからないけれども、私はそう思っていますけれども、やっぱりそれが検出されるということは、きれいな物理が形成されているわけですね。現象論って何だろうと。

やっぱり突き詰めていくと、いろいろなことが見えてくるはずだという立場ですね、はっきり言って、インフレーションがうまくいかないで、困っていたわけですね。宇宙をたくさんつくってやろうなんて、そんな意志は全然ありません。まさにインフレーションを救うというのが、私、1980 年の半年から 1 年近く、悩みましたけれども、それを解くためにこそ、考えたという立場ですね。そんな SF なんて考えていない、とにかく物理、相対論と相転移が起こるという Higgs メカニズムに関係したものを、きれいな論理だから、これを突き詰めていって、どこまで、何が言えるのかと、それを明らかにしたいという、純粹にそういう気持ちが一番強かったですね。何か奇妙なことが言えるとか、そんな雰囲気は全然なかったですね。

真貝：せっかくですから私も、原子核のパスタ構造の絵を見せていただきましたが、個人的に、何年か前に佐藤先生と、多分、北白川学舎だったと思うのですけれども、原子核構造の相転移を、分子動力学を使って導き出すのは、私の最後の夢であるというようなことをおっしゃっていました。まだそれは「最後」という位置付けなのでしょう。

佐藤^朗：それは定年まで時間がないから、結局、最後になるだろうと思ったわけですね。修士論文から始めた仕事なので、そういう意味では一つの区切りであろうということで、申しあげたわけです。もちろん本当に、完全に量子力学を計算するのは夢でしょうけれども、それはちょっと、私ができることではないということでもあります。

真貝：まだまだご活躍を期待しています。

伊沢：それに関して、ちょっと質問したいのですけれども、佐藤先生の不肖の弟子として、昔に習って忘れちゃったのではないかと思うんですけど、ああいうパスタ構造というのは、密度、温度プレーンでの平衡状態の話ですね。だから現実の超新星みたいな、ダイナミカルなところでそれが実現するかという話は、かなり疑問に思っていたんですけど、それはどうなんですか。

佐藤^朗：それはタイムスケールを比較すればわかります。ああいうようなタイムスケールは、1 フェルミのところを移動する時間とか、そういう時間なのです。それは見る間に起こります。松井さんの話にあったような、原子核 collision の場合ですら、熱平衡になっているなどというのは、驚異的な話ですね。supernova は短い現象とはいえ、コアのダイナミクスのタイムスケールはミリセカンドです。これはもう、原子核スケールのタイムスケールに比べると、何十倍も長い長い時間です。だから、移動する時間、相転移の起こる時間というのは、もちろんありますけれども、それは原子核の話で言えば、まさに平衡状態が移っていくということであり、まったく問題はないと思います。

唯一違うのは、weak interaction だけです。これは確かに面白いです。だから weak interaction はフローズンしておいて、できますけれども、それは多分、strong interaction に関

しては、まったく熱平衡、化学平衡は OK だと思っています。

伊沢 : Nuclear matter になってたら、問題ないということですね。

佐藤勝 : マターにならなくても、原子核, neutron, proton のシステムの熱平衡、化学平衡は、超新星ではまったく完全に成り立っていると私は思っています。

松井 : スパゲティなんか、真っ直ぐじゃなくても。

佐藤勝 : ぐじゃぐじゃしています。

松井 : そういうことが入っているんですか。

佐藤勝 : その通りです。あれは動いたりしますよ。だけど実は、計算上はクーリングダウンするわけです。それは質量がありますけれども、動いています。有限温度にするときは動いています。

松井 : ニュートリノの coherent cross section とか。

佐藤勝 : ニュートリノ scattering があつたからといって、パスタの構造が変わるということはないと思うのですけれども。

松井 : ニュートリノの cross section が大きくなるということが大事だとおっしゃったと思いますけれども、そうすると、その構造はそれにどういうふうに効いてくるかというのは、要するに真っ直ぐのパスタか、ラザニアが溶けかけたようになっているのか。

佐藤勝 : そうですね、やっぱりそういう大きい cross section とはいえ、まだまだ全体から見れば、極めて小さな確率なのです。やっぱり 99 パーセントは逃げ出すことは確かなのです。その 1 パーセントのニュートリノが、パスタにぶつかることによって、どれだけ変形するかと。

松井 : それって中の方？ 外は？

佐藤勝 : いま議論しているのは、コアの中ですけどね。いまのところ、荒っぽい推定ではやっぱり、ニュートリノが散乱することによって、構造が劇的に変わるということはないと思うのです。熱的振動と同じレベルだと思いますけどね。

松井 : 私の質問は逆だったんですけど。ニュートリノの transport が、そういう影響をどのぐらい受けるかというのは、かなり重要な問題だとおっしゃったんですよね。

佐藤勝 : その通りです。

松井 : そうすると、そのダイナミカルな様相が、ニュートリノの transport, cross section を変える？

佐藤勝 : 実際、実はニュートリノ transport をしようと思うときには、熱分布することを考えないといけないのです。こっちを向いているとか、あっちを向いているとか、そういうことを調べる必要があります。だから温度が高いところでの、そういう cross section を調べるときは、実はあらゆる phase をミックスしたような、structure function を、方向依存性があると言いましたけれども、あれを平均したようなものを使うということです。

neutron star みたいになってきて、温度が冷えたときは、スパゲティが綺麗にはえているとか、そういうことを考えないとだめだと思っています。supernova は平均していいと思っています。

坂東 : やっぱりちょっと気になるのは、結局、まだ爆発には無理なのですよね。

佐藤勝 : いま、私たちのグループの言い分を言いますと、それはマグネトハイドロで爆発するという信念でやっております。

坂東 : そうなんですか。要するに、あれを入れてみたり、スパゲティフェーズにしてみたけども、それだけでは無理だったということなのですか？

佐藤勝 : スパゲティ構造は、やっぱりあまりにも elementary すぎまして、数値実験に持ってくるまで、まだまだできていません。それは難しいです。

坂東 : それで、結局、現実には爆発しているわけですよね。ですから、その確信があつたら、必ずできるというのは、昨日か一昨日か、話に出ていたのですけれども、その信念でやったはる

と思うんですが、なかなかその構造を、そこまでまだいっていないということかな。

佐藤^勝 : いまはちょっと、話す時間がなかったからなのですけれども、 γ 線バーストが見つかっています。これはわれわれはやっぱり、回転が強くて、磁場があつて、しかも質量の重い星の場合は、supernova 爆発から γ 線バースト的な現象に移っていくと思っています。質量を大きくして、かつ回転磁場ですね、そういうことがあると、そういう γ 線バーストになると思います。

つまり unified theory をつくりたいというのが、いまの夢なのです。つまり同じように、相対的な重力崩壊だけでも、真ん中にブラックホールができて、かつ回転があつて、磁場があるとか、そういうときには γ 線バーストになったり、supernova になったり。回転と磁場、星の質量、その三つをパラメーターにした、このスペースの上で、ここはどういうタイプの supernova, γ 線バーストになる、そういう unified picture をつくりたいというのが、いま、僕らのグループの夢です。科研費の申請もそういうふうに出しているのですけれども、通るかどうかわかりません。

佐々木 : すみません、僕はだから、言い方の問題なのだろうと思うのですが、要するに磁場を考えるというのは、磁場がないとどうも無理だ。だけれども、磁場というのは少なくとも観測されていると。だからそのエフェクトをちゃんと取り入れれば、やっぱり爆発するのではないか、そういう意味の信念だと、僕は思っているのですけれども。

坂東 : それだったら、いろいろと、これも入れてみる、あれも入れてみるって、なんかエッセンシャルに爆発するには、何やったかというのが、これやあれやとちよつとずつ足していったらできたということなのかどうかということを、聞いているのです。

佐々木 : そうじゃなくて、いつもおっしゃっているのですが、supernova は何しろ、重力エネルギーの 1 パーセントを使う、その 1 パーセントがどうコントロールされるかというところがエッセンスなので、いままでまずは磁場がない状況で、一体本当に爆発するのかもしれないのかということを、最後まで突き詰めて、やっぱりだめじゃないか。そうするとやっぱり磁場がエッセンスだろうという、そういう話になっているのではないかということです。

佐藤^勝 : いま言ったように、 γ 線バーストが見つかったことは大きいです。要するに磁場の役割というのは、いままでは無視していましたがけれども、やっぱりそういう流体现象、実際にやってみると、いくらでも jet というのが簡単に出るのです、極端に言うと、こんなに jet が出やすいのかと思うくらい出るのです。

やっぱり supernova, 1987A の remnant を見ていても、回転している証拠があるし、jet が出たと思われるような変形が、中心に見えていますよね。だからやっぱり、昔、私が夢としてやっていたような、球対称の supernova のやつは、もういまは、残念ながら死んだと思っています。回転と磁場、これはやっぱり爆発現象の本質ではないかと思っています。

真貝 : だいぶ時間も過ぎてしまいました。どうもありがとうございました。