

エキゾチックなハドロン

核物理研究センター 中野 貴志

関：時間になりましたので、セッションを始めさせていただきます。カリフォルニア州立大学 Northridge 校の関と申します。座長をやらせていただきます。よろしくお願いします。

今日のセッションは、二つの話がありますけれども、二つの実験とも、世界に先駆けておこなわれつつある実験で、二人のスピーカーは、いずれの実験でも責任者の方々に、現在、どういうことをやっていらっしゃるのか、あるいはこれからどういうことをやろうとしていらっしゃるのか、そういうお話をお聴きできたらと思います。

それから、これは私のお願いなのですが、もし、十億と数十億とか数百億とかというお金があるとしましたら、どういうことをなされたいのかということ、できればお聴きしたいと。いわゆる英語で言う「What would I do for ...」というのをぜひお聴きしたいと思うのですけれども。

では最初に、阪大の中野さんから、お願いいたします。

ありがとうございます。とんでもなくひどい声ですみません。二日ほど前に風邪をひきまして、普通はすぐ治ってしまうのですが、テレビでたまにやっていた森進一の真似を、子どもにせがまれて、調子に乗ってやっているうちに、こんな声になってしまいました。なかなか治らなくて、さっきここにあるいろいろな飲み物を飲んで、どれが一番効くかという実験をしていたのですが、トイレが近くなるだけで、全然治りませんでした。最後まで、なんとか話します。

エキゾチックなハドロン

Pentaquark: The rise and the fall.
...but still alive.

中野 貴志
大阪大学核物理研究センター

「学問の系譜」研究会 @ 京大基研, November 17, 2006

1

[Slide 1]

Outline

- Introduction
- Status of Θ^+ study
- New LEPS result
- Summary

2

[Slide 2]

[Slide 1] 今日の題は「エキゾチックなハドロン」で、これだけでは非常に broad で、何を話しかさっぱりわからないので、藤井先生に倣って、サブタイトルをつけます。「Pentaquark: The rise and the fall」。これだけだと、非常に湿っぽい話になってしまうので、「but still alive」というところを強調したいと思います。

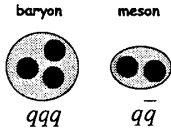
[Slide 2] Outline は、Introduction から始めて、それから、われわれ以外の実験も含めて、pentaquark、その中の特に、 Θ^+ という粒子の status の話。それから、われわれは新しい結果が出ていますので、それについて話して、conclusion じゃないですが、summary をして、最後に今後どういうふうに研究を進めていくかということと話したいと思います。

[Slide 3] Introduction ですが、われわれが何を研究したいかというと、baryon のなかに閉じ込められている quark を研究したいわけです。baryon のなかに閉じ込められていない quark は、見つ

かっていないので、クォークといえば全部が全部そうなのですけれども、特に低エネルギーで、それがどうなっているかということを研究したい。特に current quark の mass は, Higgs mechanism で generate され, hadron のなかで QCD の interaction のなかで, spontaneous に chiral symmetry が破れると, その 30 倍以上の mass が与えられる。そういう詳細なメカニズムについては, まだわかっていない。そういうところも, 実験によって明らかにしていくことはできないかというところが, 目指すところです。

Quark confinement

No free quark was observed. $\sim$ confined in a hadron

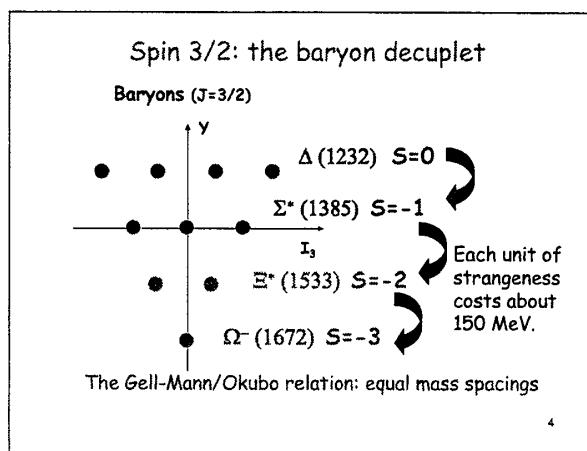


A hadron is much heavier than a quark!

$m_u = 1.5 \sim 4 \text{ MeV}$, $m_d = 4 \sim 8 \text{ MeV}$, $m_s = 80 \sim 130 \text{ MeV}$
 proton(uds) = 938 MeV, $\phi(s\bar{s}) = 1029 \text{ MeV}$

Within the literature there are even suggestions that the u quark could be essentially massless.

[Slide 3]



[Slide 4]

[Slide 4] quark model, 構成 quark model の成功の代表例といいますと, 僕が生まれる前か, 後ですね。後なのですけれども, こういう decuplet の mass difference を, 非常によく再現するといふことがあります。この場合は uds という三種の flavor で, spin が $\frac{3}{2}$ ですから, フレバー空間で完全対称になっています。それで strange quark の数が 1 個増えるにしたがって, 構成要素の数が 4, 3, 2, 1 と落ちていって, なおかつ mass がだいたい 150MeV ずつ増えていくということが説明でき, quark model というのは非常に成功を収めた。

Baryon masses in constituent quark model

$m_u \sim m_d = 300 \sim 350 \text{ MeV}$, $m_s = m_{u(d)} + 130 \sim 180 \text{ MeV}$

- Mainly 3 quark baryons:
 $M \sim 3M_q + (\text{strangeness}) + (\text{symmetry})$
- π , K, and η are light:
 Nambu-Goldstone bosons of spontaneously broken chiral symmetry.
- 5-quark baryons, naively:
 $M \sim 5M_q + (\text{strangeness}) + (\text{symmetry})$
 1700~1900 MeV for Θ^+

[Slide 5]

What are pentaquarks?

- Baryon.
- Minimum quark content is 5 quarks. ($qqqq\bar{q}$)
- "Exotic" penta-quarks are those where the antiquark has a different flavor than the other 4 quarks
- Quantum numbers cannot be defined by 3 quarks alone.

Example: uudd $\bar{s}$

Baryon number = $1/3 + 1/3 + 1/3 + 1/3 - 1/3 = 1$

Strangeness = $0 + 0 + 0 + 0 + 1 = 1$

e.g. uudd $\bar{c}$, uuss $\bar{d}$

c.f. $\Lambda(1405)$: uuds $\bar{u}$ or uds

[Slide 6]

[Slide 5] だいたいことはわかっているということです。つまり一つあたりの quark には, 300 か 350MeV の質量を与えなさい, それから, strange quark は少しだけ重いですよ, あとはいろいろな symmetry による補正を加えることによって, 3-quark baryon というのは, だいたい説明できます。

meson についても同じです。だから 2-quark の mass に symmetry の補正を加えればいい。

だいたいうまくいくのですけれども, うまくいかないのもあって, pion とかというのは, 非常

に軽い。これは、御本人を前にして言うのもなんですが、chiral symmetry の自発的破れに伴う、Nambu-Goldstone boson というものと解釈することによって、 π とか K とか η だとかが軽いというのは、説明できる、何も不思議なことではないです。実際に何が起きているかは見えなから、僕は不思議なのですけども。

5-quark baryons をナイーブに考えると、その mass は5倍のクォーク mass を与えて、strangeness を持っていたら、strangeness の分を足してあげなさい、あとは symmetry なのでですけども、symmetry で動ける範囲というのは、だいたい決まっています。そういうことを考えると、だいたい 1700 から 1900 MeV になります。これはかなり重いわけです。5-quark の baryon, pentaquark がなかなか見つからない、あるいはないかもしれないというのは、 π とか K とか η とかが軽いというのと、非常に密接に結び付いていて、そういう重いものができてしまったら、 π とか K とか η を放出してしまえばいいわけです。それで寿命が非常に短くなって、みつからない。

[Slide 6] 今回、われわれが研究しようとしているのは、エキゾチックな pentaquark という状態で、どういうものかという、 $qqqq\bar{Q}$ なんですが、この $\bar{Q}$ が普通の、ほかの u とか d とかと違うもの、これは u とか d とかでできているとしたら、一つだけ違うもの、 $\bar{c}$ でも $\bar{s}$ でもいいのですけれども、そういうものをサーチしたい。example としては、 $uudd\bar{s}$ 。example というか、メインにこの話ばかりをするのですけれども、 Θ^+ , baryon number が 1 で、strangeness+1 で、charge は +1 です。

普通の baryon にも、こういう成分もあってもかまわないわけです。特に $\Lambda(1405)$ という粒子があるのですけれども、これは普通の quark model では、mass が全然合わなくて、これは何か、非常に強い 5-quark 成分が入っているんじゃないか、あるいは meson baryon のレゾナンス系じゃないのかといわれていますけれども、外から見ていただけでは、決してこれは pentaquark かどうかということはわからなくて、それは $uuds\bar{u}$ でも、これと同じ flavor を持つ状態をつくることのできるし、それから uds でもつくることのできる。

いま、僕が話そうとしている pentaquark というのは、そういう 3-quark では決して表すことができないものです。

What are effective degrees of freedom ?



(a) 3q (b) hybrid (c) diquark (d) meson-cloud

Meson cloud picture: Thomas, Speth, Weise, Oset, Brodsky, Ma, ...
 $|p\rangle \sim |uud\rangle + \epsilon_1 |n(u\bar{d})\pi^+(\bar{d}u)\rangle + \epsilon_2 |\Delta^{++}(uuu)\pi^-(\bar{u}d)\rangle + \epsilon' |\Lambda(uds)K^+(\bar{s}u)\rangle + \dots$

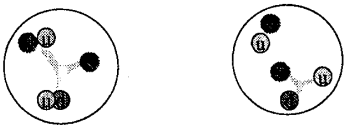
7

[Slide 7]

B.S.Zou, D.O.Riska, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 072001

New picture for strangeness in the proton:
 $\bar{s}$ in S-state, $uuds$ in $[31]_X[22]_F[22]_S = 1/4$ s in P-state including diquark configuration $\bar{s}[su][ud]$, instead of meson cloud $\Lambda(uds)K^+(\bar{s}u)$!

$|p\rangle \sim |uud\rangle + \epsilon_1 |[ud][ud]\bar{d}\rangle + \epsilon_2 |[ud][us]\bar{s}\rangle + \dots$



Diquark-cluster vs Meson Cloud

8

[Slide 8]

[Slide 7] これは将来、こういうものが見つかったら、どういうふうにつながっていくかということを示すスライドです。例えば proton なんですけど、真空のふらつきによって、 $q\bar{q}$ ができただけでかまわないわけです。そういう成分が、いくらあってもかまわないわけです。非常に低エネルギーで、エフェクティブに proton を記述するときに、一体何が本質的に重要な自由度なのか、そういうことにつながってくると思います。この例で言ったら、meson cloud というので、proton というのを、普通の uud , に加えて neutron と π , ..., $\Lambda+K^+$, こういうふうに記述しております。

[Slide 8] 他の可能性としては、例えば 5-quark 成分なんですけど、5-quark と言っても、一つは anti-quark なんですけど、そういうものを $uudd\bar{d}$ で、あるいは $udds\bar{s}$ 、こういう成分が入っているんじゃないか、こういうところにつながっていくわけです。

「エキゾチックなハドロン」と題したのは、だから普通、hadron は meson と baryon で、meson は $q\bar{q}$ 、baryon は qqq と思っているけれども、どんな baryon にも、もしかしたらエキゾチックな成分というのが、含まれているかもしれない、そういうのが、何か重要な役割を果たしているかもしれない、と考えたからです。

もともとはそちのほうから話持っていこうとしたのですが、今日、みなさんのお話をうかがっていると、この場では正直に洗いざらい、自分の思っていることをしゃべれという感じなので、そういうわけのわからないような話にはいかずに、このあと、全部 pentaquark, Θ^+ について話します。

Particle Data Group

NOTE ON THE $S=+1$ BARYON SYSTEM
(PDG 1986; Phys. Lett. B170, 289)

The evidence for strangeness +1 baryon resonances was reviewed in our 1976 edition,¹ and more recently by Kelly² and by Oades.³ Two new partial-wave analyses⁴ have appeared since our 1984 edition. Both claim that the P_{13} and perhaps other waves resonate. However, the results permit no definite conclusion- the same story heard for 15 years. The standards of proof must simply be much more severe here than in a channel in which many resonances are already known to exist. The general prejudice against baryons not made of three quarks and the lack of any experimental activity in this area make it likely that it will be another 15 years before the issue is decided.

9

[Slide 9]

Pentaquark

The antiquark has a different flavor than the other 4 quarks.

D. Diakonov, V. Petrov, and M. Polyakov,
Z. Phys. A 359 (1997) 305.

- Exotic: $S=+1$
- Low mass: 1530 MeV
- Narrow width: ~ 15 MeV
- $J^P=1/2^+$

10

[Slide 10]

[Slide 9] これが 1986 年の状況ですね。 Z^+ と、その頃呼ばれていましたけれど、pentaquark サーチに対する Particle Data Group のノートです。いろいろ書いてありますけれども、この時点で、もうずいぶんとサーチされていたわけです。リブキンは、かなり早い段階で、pentaquark は可能ではないかと言っていたし、いろいろな人がそういう自由度を探せと言っていたので、いくつか探索実験が行われていました。

でも、あると思われるデータとか、ないと思われることとかいろいろとあって、ここでは「the results permit no definite conclusion the same story heard for 15 years」この時点で 15 年ですから、pentaquark サーチの歴史はかなり長いです。

このときの PDG の prediction は、「The general prejudice against baryons not made of three quarks and the lack of any experimental activity in this area make it likely that it will be another 15 years before the issue is decided」。ちょうど 15 年経つと 2001 年で、pentaquark 騒ぎというか、Activity ががっと上がったところで、すごい予言だなという感じがするのですが、残念ながら、現在も conclusion には至っていません。それについて話します。

[Slide 10] リバイバルになったのは、一つの prediction が契機になっています。Diakonov, Petrov, Polyakov という人たちが、chiral quark soliton model というものを使って、pentaquark を prediction したのです。baryon の面白いところは、いろいろな、全然違うような model で predict しても、全部合ってしまう。なぜなのかよくわかりませんが、いろいろな model が、描像としてはまったく違うんだけど、いろいろな描像のものが、なぜか知らないけど、AdS/QCD も含めて、ハドロンの質量や性質を再現してしまう。

chiral quark soliton model の弱いところは何かということ、mass splitting については非常に精

度良く predict できる, 例えば decuplet, non-decuplet については, 1 パーセントの精度で, mass splitting については予言できるのですけれども, どこが基準かということを与えてやらないと, predict できないところが, 弱いところです.

Diakonov たちは, この $N(1710)$ という, quark model がなかなか説明できない状態が pentaquark, つまり anti-decuplet のメンバーであると仮定して, そこから mass splitting で, こういうものを予言しました. 一見, strangeness が +1 から 0 になっていて, mass が上がっているのは不思議なんですけれども, これはすべて, anti-decuplet のメンバーですので, $s\bar{s}$ がこの中に入っているので, 重くなるぶんにはかまわない. mass splitting を与えて, それで 1530 と. width は非常に狭いということを行いました.

実はこの論文は, べつに実験屋の関心も呼ばずに, ほとんど無視されていたのです. 契機となったのは, ある会議で僕は Diakonov とご飯を食べていて, Diakonov が, 自分の proton に対する理解が正しければ, これはないといけなと言ったのです. 理論屋の話はそんなに信じないのですけれども, Diakonov という人は, 吸い込むような目を持っていて, 面と向かって話すと, あわわわという感じで, 信用してしまったのです. セントペテルスブルクの名家の出身で, 小さい頃にショスタコーヴィッチに抱っこされた写真があるとか, お父さんは 17 カ国語が話せるとか, あまり物理とは関係ないのですけれども, そういう人です. で, これはいつか探してやらないといけなと, そのときに思いました.

Fall-apart decay problem

- DPP predicted the Θ^+ with $M=1530\text{MeV}$, $\Gamma<15\text{MeV}$, and $J^P=1/2^+$.
- Naïve QM (and many Lattice calc.) gives $M=1700\sim1900\text{MeV}$ with $J^P=1/2^-$.
- But the negative parity state must have very wide width ($\sim 1\text{ GeV}$) due to "fall apart" decay.

Positive Parity?

- Positive parity requires P-state excitation.
- Expect state to get heavier.
- Need counter mechanism.
- diquark-diquark, diquark-triquark, or strong interaction with "pion" cloud?

[Slide 11]

A di-quark model for pentaquarks

$[ud][ud]\bar{s}$

JW hep-ph/0307341
JM hep-ph/0308286

$L=1$, one unit of orbital angular momentum needed to get $J=1/2^+$ as in χ_{SM}

Uncorrelated quarks: $J^P = 1/2^-$

Decay Width: $\langle [ud][ud]\bar{s} | [uud][u\bar{s}] \rangle = \frac{1}{2\sqrt{6}} \Gamma \approx \frac{200\text{ MeV}}{(2\sqrt{6})^2} \approx 8\text{ MeV}$

Mass Prediction for Ξ^- is 1.75 instead of 2.07 GeV

12

[Slide 12]

[Slide 11] まず理論の話をしますけれども, 理論的にはなかなか難しい. 先ほども言いましたように, ナイーブに考えると, 1700 から 1900MeV という重さがないといけな. さらに, 質量が一番低い状態は, quark model だと, spin parity が $\frac{1}{2}^-$ なのです. $\frac{1}{2}^-$ というのは, 終状態の KN と同じ量子数ですので, これは, 何もクリエーションすることなく fall-apart で decay することができる.

これは幅を考えると, 1GeV の幅となって難しいのです. こういう fall-apart を防ぐには, なんとかしてこの始状態と終状態の overlap を小さくしなければいけないのですけれども, 小さくしようと思って, 例えばそれが positive parity であるとする, 普通は P-state の excitation をどこかで必要とする. こういうものはものすごく, エネルギー的に損なわけです. 重くなってしまう. だから幅を狭くしようと思って, 始状態と終状態をできるだけ違うものにしようと思うと重くなっちゃうし, それから普通に quark model で考えると, 幅が広すぎるというのが状況です.

Θ^+ が, 確固たる観測事実として確立しつつあった時期には, いろいろなモデルが出てきて, 軽い質量と狭い幅を説明しようとしてしました.

[Slide 12] これは例えば, Jaffe-Wilczek の di-quark model ですけれども, ud-ud に強い相関が

あるとすると、軽くなって、さらに波動関数が終状態と大きく違うので、幅は狭くなります。それでも8MeVです。実験的に upper limit はだいたい1MeVですので、それでも幅の狭まり方が全然足りません。

Narrow Decay Width of Pentaquarks

- So, this process is considered as a quantum tunneling process, and therefore the decay of the penta-quark baryon is expected to be strongly suppressed.

penta-quark baryon gluonic excited state baryon + meson system

$\Delta E = \text{about } 1 \text{ GeV}$

- This leads to a very small decay width of the penta-quark baryons.

13

H. Suganuma, Talk at Pentaquark04

[Slide 13]

Why Θ^+ is so narrow?

$$\Gamma_{\Theta^+} = \frac{3 g_{\Theta^+ K^+}^2 m_N}{2\pi(m_N + m_K)^2 m_{\Theta^+}} |\langle p | j | \Theta^+ \rangle|^2$$

$$g_{\Theta^+ K^+} \approx \frac{g_{\Theta^+ K^+} (m_N + m_K)}{2 F_K} \quad \text{similar to } g_{\Theta^+ K^+} = \frac{g_A m_N}{F_K}$$

$$g_A^{\Theta^+ - n K^+} = \frac{\langle n | j | \Theta^+ \rangle}{\sqrt{N_{\Theta^+}^{(3)} + N_{\Theta^+}^{(8)} + \dots}} \quad \frac{N_{\Theta^+}^{(3)}}{N_{\Theta^+}^{(8)}} \ll 1$$

Θ^+ decay is suppressed to the extent the 5-quark component of the neutron is less than its 3-quark component. Additional suppression comes from the peculiar flavor structure of the neutron's 5-quark component where the $\bar{Q}$ is in the flavor-singlet combination with one of the four Q_i .

A preliminary crude estimate gives $\Gamma_{\Theta^+} \approx 0.7 \text{ MeV}$ without fitting any parameters!

14

D. Diakonov, Talk at Pentaquark04

[Slide 14]

[Slide 13] ちょっと面白いなと思っているのは、これは昔の話なので、いますと、菅沼さんが怒るかもしれないですけども、菅沼さんが2004年に話された話で、彼は lattice で計算すると、pentaquark はこういうような配位になっているだろうと予想しました。こういう配位になっているときに、baryon と meson に分かれようとする、どうしても一度、gluonic な loop の excitation が必要になります。これはバリアとしてはたらくので、幅が狭くなってくる。定性的な理論、定量的にはなりきりませんが、それでもこれは一つの可能性です。

[Slide 14] Diakonov 本人が言っているのは何かというと、これは light cone で近似しているのですが、 Θ^+ から neutron- K^+ への decay というのは、5-quark 成分から 5-quark 成分への transition で、その過程で K-on を emission する。そのときに、neutron の 5-quark 成分がもともと少ないからという、聞いていると騙されたような感じがするのですが、それを彼の chiral soliton model で計算すると、いまのところ 0.7MeV という結果が出ています。いずれにしろ、なかなかこれだけでは受け入れ難い。特に SU(3) symmetry とかというものを、仮定しないとイケないのですが、s-quark が、ほかの quark に比べてずいぶん重く、SU(3) symmetry は破れていることがわかっているわけですから、なかなか難しいところがあると思います。

Quark Models for the pentaquark Θ^+

“The pentaquark Θ^+ is a mystery. No honest calculation reproduces its mass and width simultaneously.”

15

M. Oka, Talk at SNP2006

[Slide 15]

Θ^+ search at LEPS

$Q=+1$ γ K^- $S=+1$
 n Θ^+ K^+ n
 udd $uudd\bar{s}$ us udd

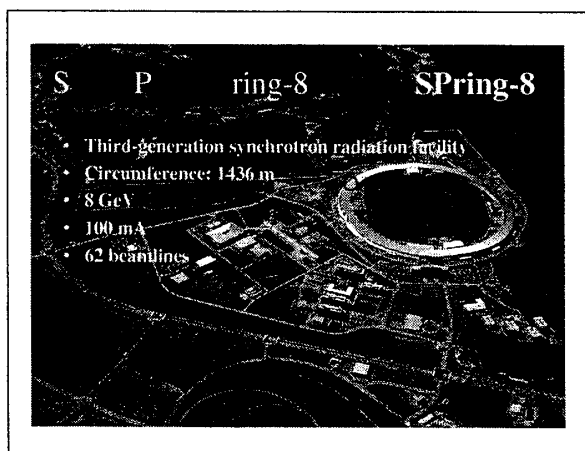
16

[Slide 16]

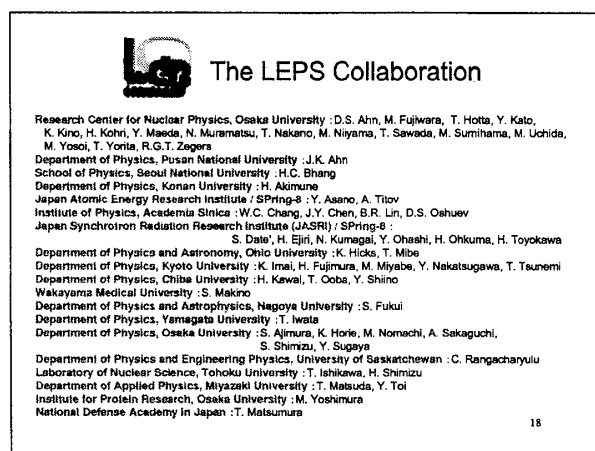
[Slide 15] これはついこの前、中国であったワークショップで、岡さんが、途中のまとめで言っ

たことなのですが、*「The pentaquark Θ^+ is a mystery. No honest calculation reproduces its mass and width simultaneously」*. honest というところが主観的な感じがするのですが、こういう状況になっています。実験家から見て、こういうことを言われると、どう思うか。ただただ心細いというのがありますが、だからといって、研究をやめるわけにはいきません。もちろん物理屋ですので、理論をまったく無視するわけにはいきませんが、baryon というのは、いろいろと、まだまだわからないことばかりで、実験をする側の精神としては、最終的に決着がつくまで、いろいろな理論的困難があるにしろ、実験を続けなくちゃいけない、そう考えています。

[Slide 16] 一番最初の結果を説明します。最初の結果というのは、 γ 線を neutron に当てて、終状態が K^- , K^+ , neutron. このうちの charged particle だけを detect して、 γ - K^- 反応の missing mass で、 K^+ -n 系の質量を測って、Diakonov の予言に基づいて探していますから、1,530MeV に近いところに幅の狭いピークはないかというサーチの結果です。

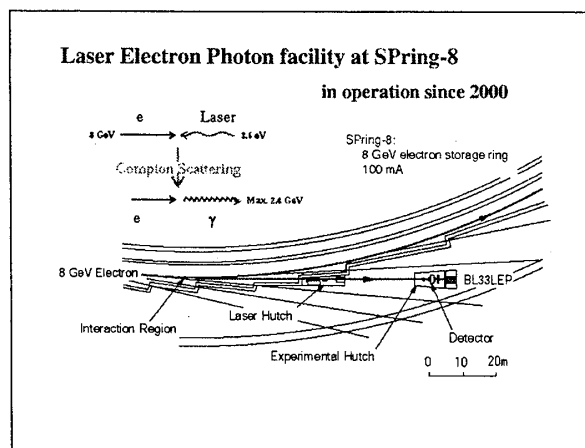


[Slide 17]

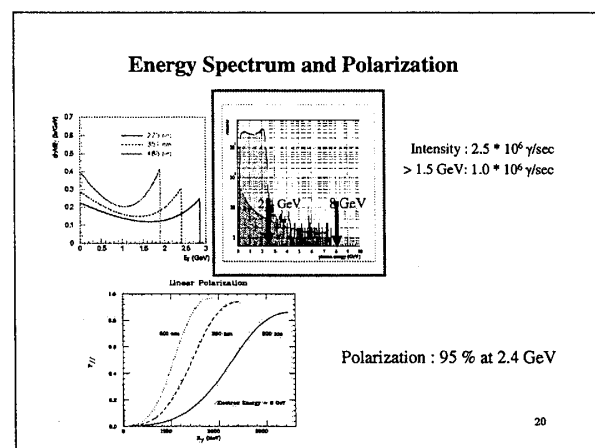


[Slide 18]

[Slide 17,18] 実験は、もうかなりこのへんにビルが建ってきて、こんなに緑はないのですが、SPring-8 というところでやりました。われわれは62本あるビームラインのうちの1本を使わせていただいて、細々とやっています。ただ、collaboration はたくさんいて、50人以上います。ただ、institute の数で割ると3で、ほとんど一本釣りという感じですが、いろいろなところにトークをしに行ったら、一緒にしない？と誘って行って、どんどん増やしてきたという感じです。この部屋で誘ってもいいのですが、ケーブルとか引き抜かれそうなので、やめておきます。



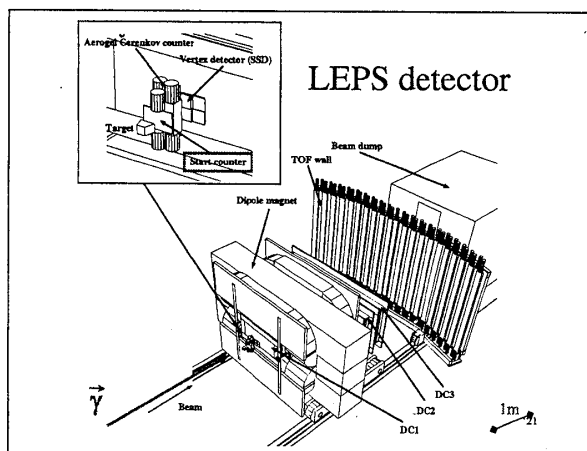
[Slide 19]



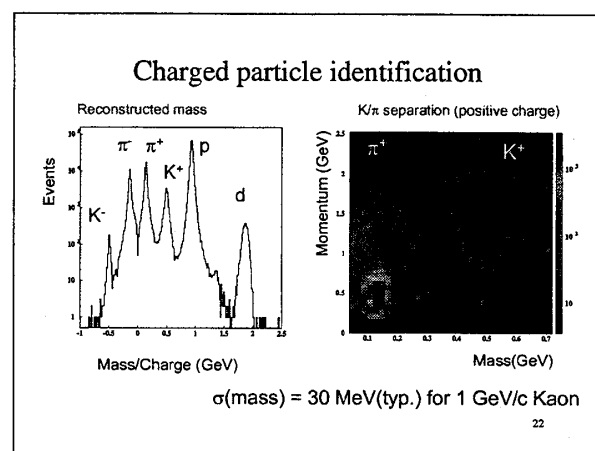
[Slide 20]

[Slide 19,20] どういう特徴があるか。こういう話を長くすると、理論屋の人は、全員寝てしま

うので、あまりに長くはしたくないのですけれども、何が特徴かという、ぐるぐる回っている electron に、laser をぶつけて、その跳ね返った backward Compton γ 線で実験しているということです。普通はそうじゃなくて、electron を取り出して、radiator にぶつけて、そこで bremsstrahlung によって光ビームを出しています。一番違うのは何かというと、ビームの energy spectrum なのです。bremsstrahlung でやると、ほとんど実験に使われない低エネルギーの background が非常に大きくなるのに比べて、laser backward だと、ほとんどエネルギー分布が flat なのです。いらないところだから、どうでもいいじゃないかと思うのですけれども、実験ではこれは非常に問題になっていて、energy は低いのですけれども、充分 e^+ , e^- threshold を超えていますから、前方に detector を置けなくなります。ものすごく大量の photon が前方に飛んでくるので、前方に置いた detector は、 e^+ , e^- ばかり観測してしまうので、そこは普通は、不感領域になります。backward Compton 法にはそのような問題がありません。



[Slide 21]



[Slide 22]

[Slide 21] われわれは、そういう backward Compton gamma の性質を充分生かすために、前方に spectrometer を置きました。これは photon を使った実験では、誰も見ていない領域なのです。いろいろと利点はあるのですけれども、もちろん見ていない引き出しを開けるわけですから、何かまだ、隠れているものを見つける可能性が高いということもありますし、何を produce するにしても、hadron というのは、production threshold のところで、cross section が高くなる傾向があります。

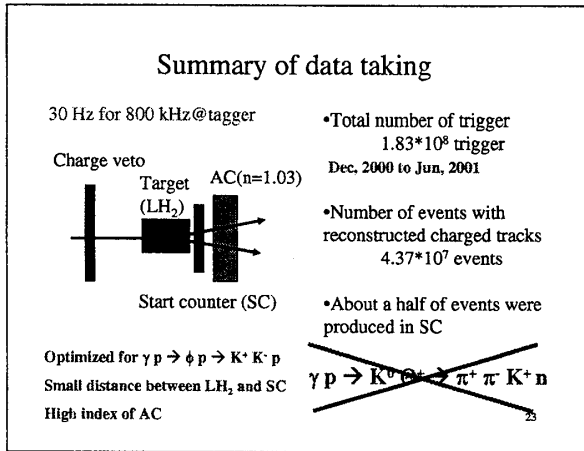
Threshold のところというのは、相対運動量は非常に小さいですから、できたものが全部同じ方向に Lorentz boost されて飛んでいるわけです。そういうものを捕まえるのに、前方に検出器を置くと有利だというわけです。

ここに hydrogen target があって、そのあとに start counter というカーボンの、があります。

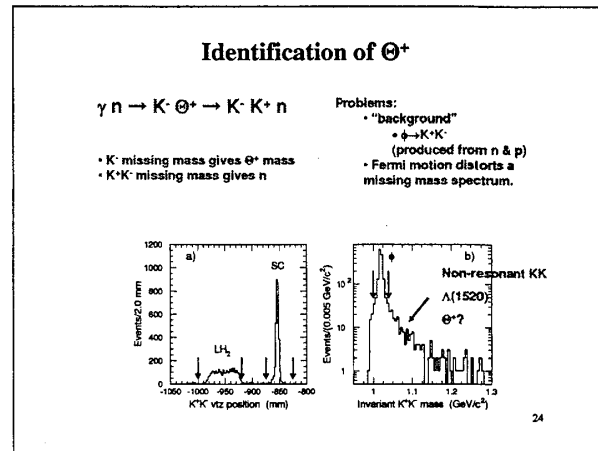
[Slide 22] これは π とか K とか proton とかが、きれいに分かれているということです。

[Slide 23] 最初の実験は、liquid hydrogen を使いました。だからべつに pentaquark を探そうと思っていたわけではないのです。pentaquark はずっとあとで探そうと思っていて、余裕があればと思っていたのですが、このときは ϕ photo production を threshold 近辺でやりたいと思っていました。

実際に pentaquark サーチのうちの一つのモードは、 γp で $K_s^0 \pi^+$, $\pi^+ \pi^- K^+$ なのですが、 ϕ をやろうと思っていたので、エアロジェルチェレンコフ counter というものをターゲットのすぐあとに置いていました。これはチェレンコフカウンターですから、速い particle を全部リジェクトしてしまうのです。だから π を捕まえられない。なので、このモードでのサーチはできなかったのです。



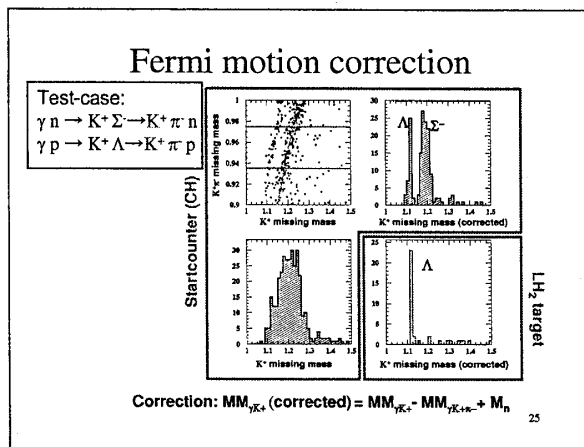
[Slide 23]



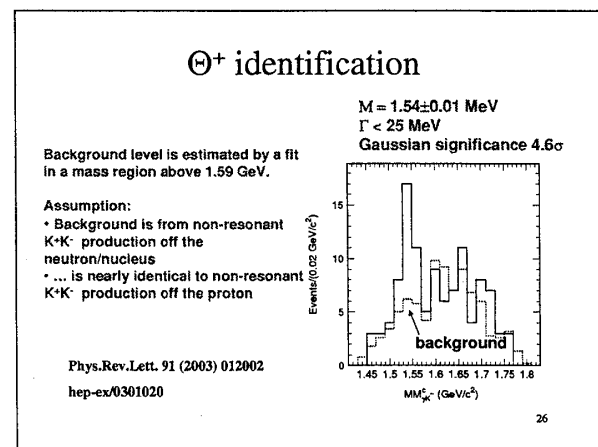
[Slide 24]

[Slide 24] どうしたかという、これは vertex distribution, どこで反応が起こったかを示す図ですけれども、hydrogen と、そのあとにすぐ start counter があって、そこから event がたくさん来ていることが分かります。これを見て、この event を使えないかと思いました。これは carbon を含んでいますので、 γ -n の反応ができるんじゃないかというのが、はじめのアイディアです。

もちろん background はいっぱいあります。特に ϕ を捕まえようとしていたので、 ϕ はいっぱい入ってくるので、 ϕ をカットしなきゃいけない。もっとシリアスな問題は、neutron というのは carbon の中で動いていますから、missing mass のテクニックを使おうとしても、mass はぼやけてしまうわけです。



[Slide 25]

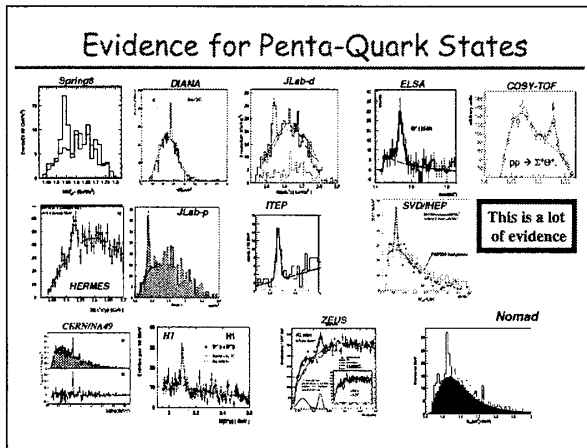


[Slide 26]

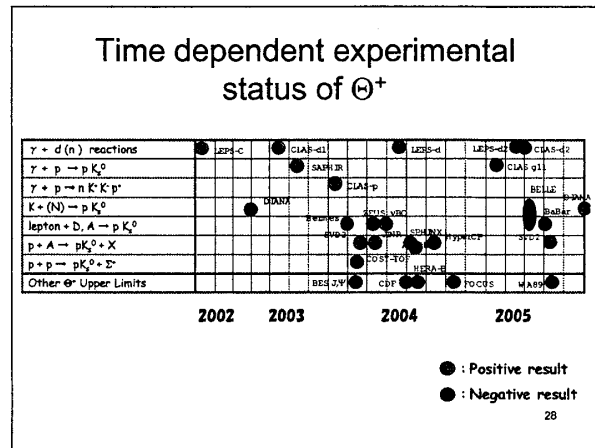
[Slide 25] 普通はそれで、だめかなと思うのですが、わりとリアクションが単純なので、例えばこの場合ですけど、 γ -n で $K^+ \Sigma^-$ 。普通に neutron が止まっていると思って、missing mass を見ると、広がってしまっても何も見えないけれども、終状態が neutron であるという constraint を使うと、 $K^+ \pi^-$ の missing mass と、 K^+ の missing mass の間に、こういう相関が出て、この相関を使って、spectrum を立てることができます。それで実際、neutron からしか出てこない Σ^- が、完全にアイデンティファイすることができた。 Σ^- は、確かに hydrogen target から全然出てきてなくて、target からは Λ しか出てこない。こういうことがわかったので、flavor と charge をひっくり返すだけですね、 K^- の missing mass を見ようと思ったら、 π^- の代わりに K^+ を require して、 K^+ の代わりに K^- を require して、 K^- の missing mass を見たら、 γ -n 反応で、 Θ^+ がサーチできるんじゃないかと思ったわけです。

[Slide 26] そうすると、その日のうちにピークが出てきてしまっただけで、これはかなりえらいことだと思ったんですけど、どういうわけか発表してしまったのです。それがいまから思うと、かなり統計的には貧しい、20 イベント足らずのピークなんですけど、こういうところに excess が出てくる。

実際に、background がなにかわからないのですが、hydrogen と一緒に取っていて、hydrogen では Θ^+ ができないとわかっているんで、同じ手法を hydrogen に対してやって、hydrogen の missing mass で background を estimate しました。このように、これはかなりたくさんの assumption が入っていて、そういうデータだったのです。



[Slide 27]



[Slide 28]

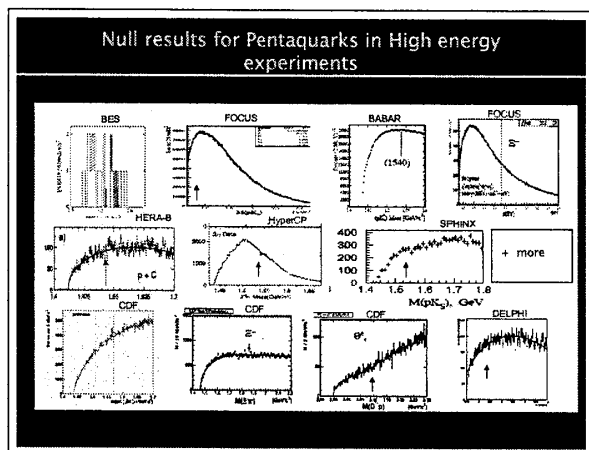
[Slide 27] ただ、この発表を一番最初にしたときにはもう、一番仲のいい友だちでも、僕のほうを向いてくれなかったんですけど、そのあとすぐに、いろいろな実験が追試をやって、いろいろところで見えたという話が出たのです。これが当時出てきた positive results で、微妙にマスが違うという実験があるのは気になるんだけど、どれもこれもピークが見えたということを言っていました。γ線の実験が多いです。これなんか、proton target で、 γ - K_S^0 という実験です。これが pp の実験です。こういう実験が出てきた。一つ一つの統計精度はそんなに高くないけれども、高い信頼性があるのではないかと、このときは思われたのです。

[Slide 28] ところが 2003 年ぐらいに、phase transition が起こりまして、negative な results がだだだだとして出たのです。これは negative な results なんですけど、何が negative な results と positive な results が違うかという、negative な results というのは、ほとんどの場合、high energy の collider 実験からきています。それで非常に統計精度がいいわけです。

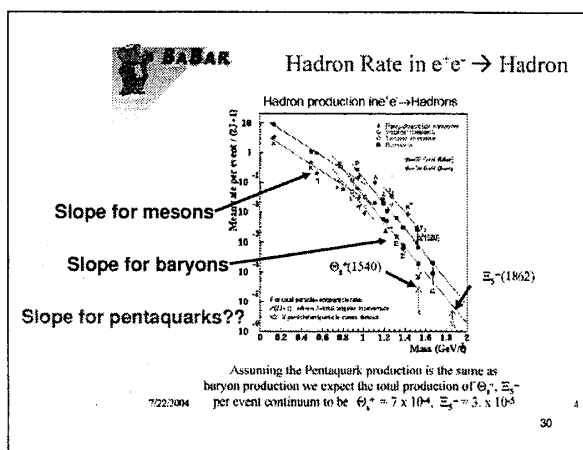
もう一つ何かというと、彼らは別にどういうメカニズムで Θ^+ ができるかということは気にしていなくて、とにかく Θ^+ をつくるのに、充分なエネルギーで、いろいろなものをつくって、終状態の K_S^0 -proton をスキャンしているというのが多いです。 K_S^0 -proton の invariant mass spectrum を見ると、ピークが見えない。統計が非常にいいのと、resolution が非常にいいので、そういうものがあれば、この時点では Θ^+ の幅は非常に狭いと思われていましたから、ぴんと立つはずであるということです。

[Slide 30] 実際にこれは BaBar で upper limit を求めて、 Θ^+ がどれぐらいできていないかというのを示したものです。ここが upper limit です。high energy では、meson とか baryon というのは、わりといい系統性を持っていて、flavor によらず、mass だけでだいたいどれぐらいできるかというのはわかるのです。これは現象論的な線ですから、現象論的に使うしかないのですけれども、ここで言いたいのは何かというと、 Θ^+ が普通の baryon だとすると、もうその線からずいぶん離れている。ただ meson と baryon の線が、角度が違っているのがわかるように、5-quark の state で、

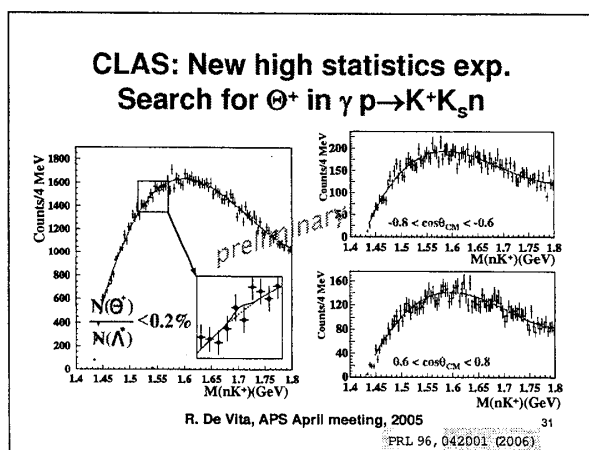
この角度が全然違うという可能性は残ります。それでも Θ^+ は高エネルギー領域では、できにくいというのがはっきりした。こういう状況でした。これはまだ、そんなにシリアスな状況ではなかったのです。



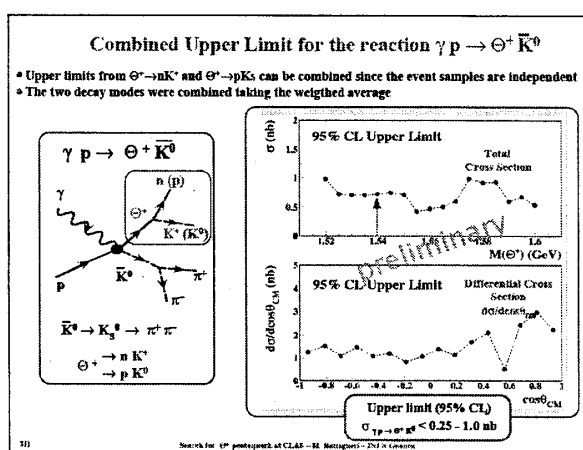
[Slide 29]



[Slide 30]



[Slide 31]



[Slide 32]

[Slide 31] シリアスだったのは何かというと、CLAS、これはジェファークソンラボ、同じように γ 線を使う実験ですけれども、 $\gamma p \rightarrow K^+ K_s$ neutron というモードで Θ^+ をサーチしたときに、まったく見えていないという結果が出たことです。

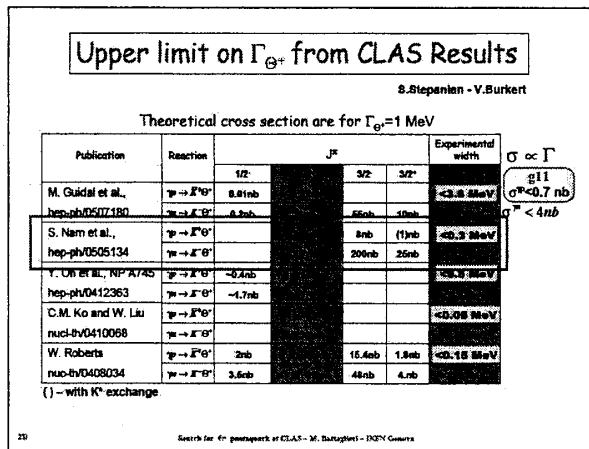
先ほど、positive な results のなかに、proton を target をした γ 線の実験があると言いましたけれども、その実験は、 5σ もあったのですけれども、それを完全に否定しているわけです。CLAS の実験結果はそのデータは嘘だということを言っていて、なおかつかなり低い upper limit を出している。

[Slide 32] アメリカでの pentaquark サーチというのは、この時点でほとんど終わってしまった。特に DOE のラボの結果というのは、アメリカで影響力が強いのですので、終わってしまったのです。

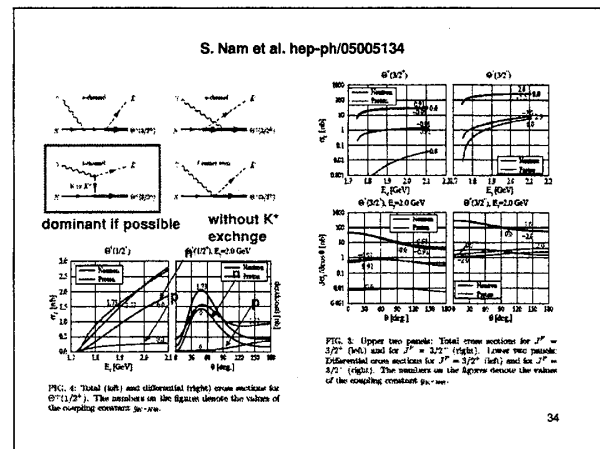
彼らは最近、 $K_s K_s$ というモードでもサーチしていて、それですべての角度で、かなり upper limit が低いということまで出しています。だから LEP は前方を囲んでいるけど、CLAS は後方だからという議論をしている人もいたのですけれども、それはもう、この時点で、角度 dependence という事じゃない、 Θ^+ はほとんど proton からできていないという結果になっているのです。

[Slide 33,34] もちろん、理論と比べて、 Θ^+ の幅がいくらかということを見て、それが例えば 0.1MeV とかになってしまうと、 Θ^+ の存在は、ほとんど否定されてしまうわけです。

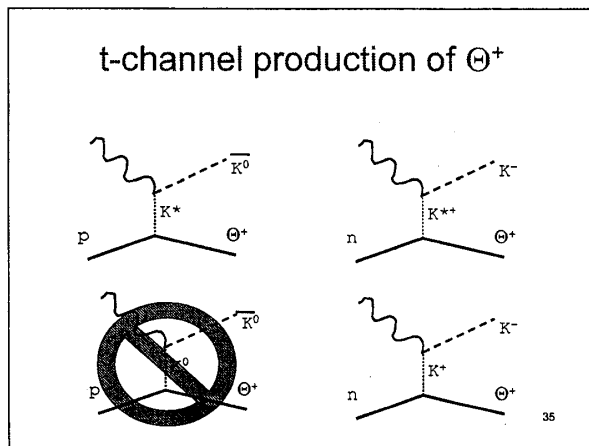
ただ、ここで気をつけてほしいのは、実は理論の多くは、まだ Θ^+ があると思われていた時期に出されたものです。特に ELSA といって、先ほど言った γp で K_s と p を捕まえ、 Θ^+ ができているという結果の発表があった時期に、prediction がおこなわれていました。詳細に、この時期の理論を見てみると、実はそういう大きな cross section を出しているのは、t-channel で K^* を exchange しているとき、 K^* というのはベクター K meson ですがけれども、そういうときに限られているということなのです。



[Slide 33]



[Slide 34]



[Slide 35]

Impact/Interpretation of CLAS proton result

- A 5σ evidence turned out to be wrong!
- If there is no large isospin asymmetry in the elementary process, the γ^*d and γ^*A experiments with lower statistics should not be able to see the signal, and they are also wrong.
- $\rightarrow$ t-channel K^* exchange amplitude does not have isospin asymmetry.
- Any theoretical model or experimental result which require a large K^* coupling to the Θ^+ are rejected.
- Absence of K^* exchange contribution leads to small cross-section in general (very small for a proton).
- Theoretical calculations contain large uncertainty due to ambiguity of the form factor.

[Slide 36]

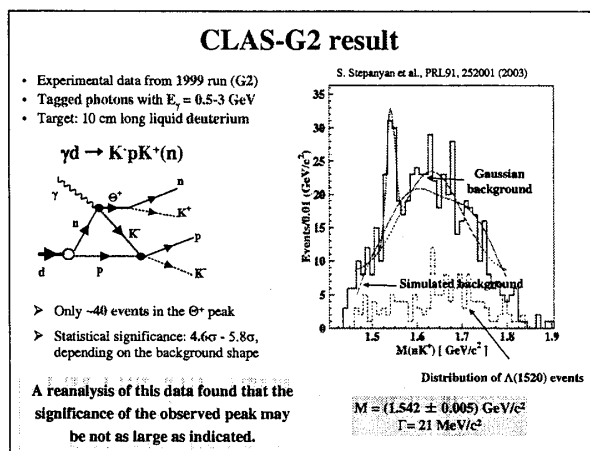
[Slide 34,35] 実際、t-channel で Θ^+ がどうやってできるかというのは、ここで proton と neutron について見せています。 γ は $K^- K^+$ に couple できるけど、 $K^0 \bar{K}^0$ には couple できないわけで、このダイアグラムは禁止されています。ベクター K meson だと、 γ はベクター粒子なので可能で、これはいい。いろいろな計算で、この t-channel である粒子が交換されないと、この contact term というのが、これはゲージ普遍性を保証するために、どうしても入ってくる term なのですが、それがなくなって、この二つがなくなり、cross section は非常に小さくなるということがあります。

実際、これは普通に Born 近似すると、neutron と proton では、cross section に非常に大きな asymmetry が出てきます。

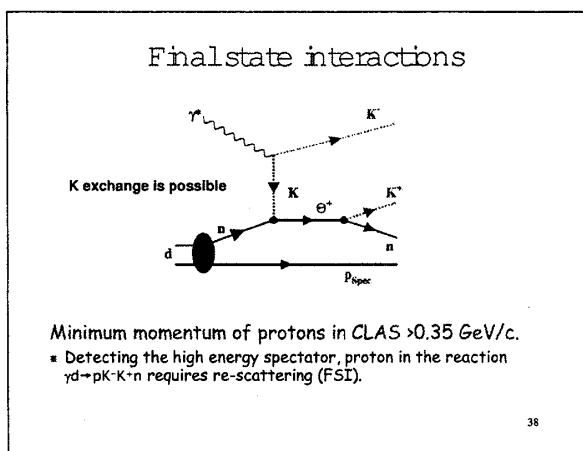
ELSA は何を間違えたか。ELSA というのは同じように、 γp で $K_s p$ というものでサーチしてあると言ったのに、間違えました。原論文をよく見ると、彼らは missing mass で K^+ をアイデンティファイしているのですが、その missing mass の分布は、非常にブロードで汚い。テールも片よっている。テールは多分、 π^+ だと思います。それが π^+ だとすると、 K_s の flavor は間違っ

いて、実は γp で Σ をプロダクションしたものを、mis-identify しましたという可能性が非常に強いと思われます。

[Slide 36] CLAS のインパクトは強いのですが、われわれの立場は、どうということかという、 K^* に couple する Θ^+ は完全に死んでしまった。 Θ^+ を説明するときに K^* と強く couple しなくちゃいけないことが、すべての理論で要求されているのであれば、 Θ^+ はないというのは認めます。ただ、そうじゃないので、まだ探してもいいと思っているというのが現状です。

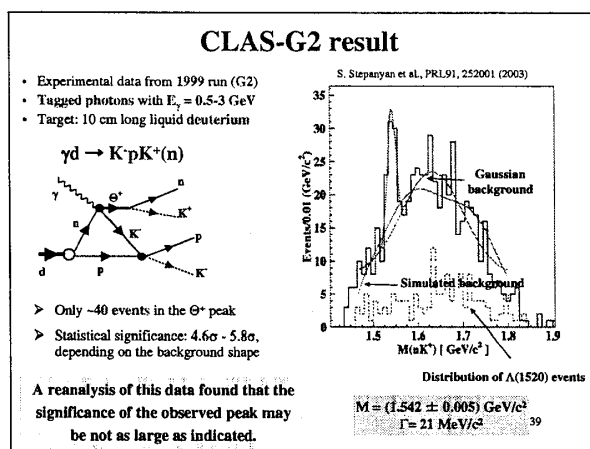


[Slide 37]

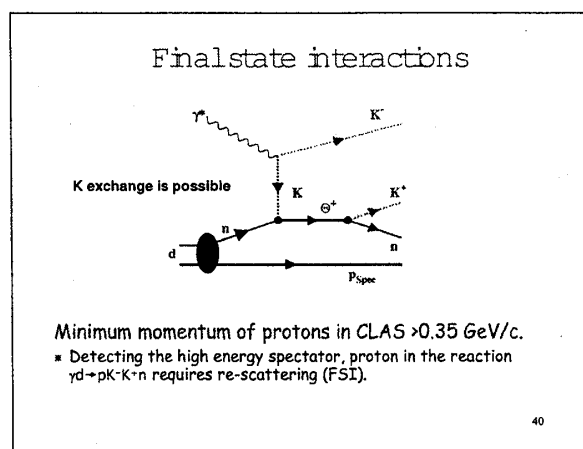


[Slide 38]

[Slide 37,38] もう一つ、CLAS という結果があつて、これは γd でサーチしているのですけれども、詳細は省きますが、これは neutron ターゲットなので、 K^- のエキスチェンジは可能で、 Θ^+ はつくれるのですが、ポイントは何かというと、彼らのディテクターは、横に acceptance があるので、この proton、素過程ではスペクテータなのですけれども、こいつが最終的に detector に入てこなくちゃいけないのです。そうしようと思うと、final state interaction で非常にややこしいことをしなくちゃいけなくて、理論的には、実験結果の解釈に、かなり不定性があると思います。



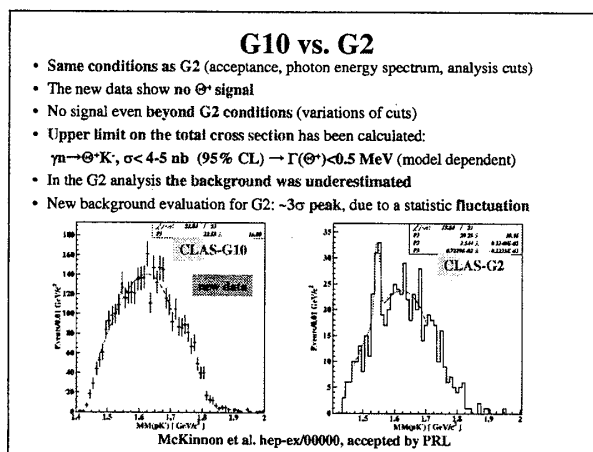
[Slide 39]



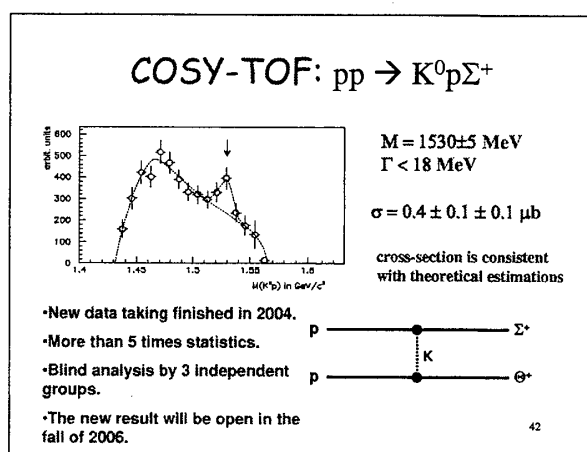
[Slide 40]

[Slide 39,41] 何がインパクトがあるかということ、一旦これは、あると言っていた実験をもう一回すると、なくなってしまう。なくなった理由は、いまのところあまりうまく説明できていないのですけれども、彼らは本当なら background になっているところを、background をまず引き間違えた。background を新しいデータで、high statics なデータで引き直すと、これはそんなに excess ではないと。たまたま 3σ の excess がここにあって、 2σ の downward shift が2カ所あったから、peak と見えたというのは、彼らの言っていることです。

これは実験屋にも衝撃なのですけども、多分理論屋の方にはもっと衝撃で、 5σ のピークと言っている、そんなことが起こってしまうんだったら、何を信じていいのかということになると思いますが、そういうことが起こったのです。



[Slide 41]

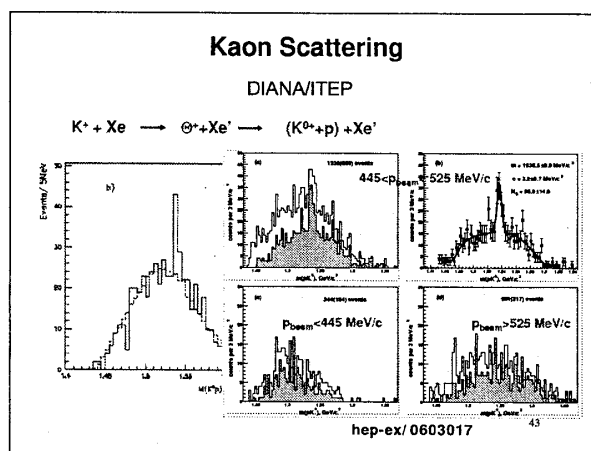


[Slide 42]

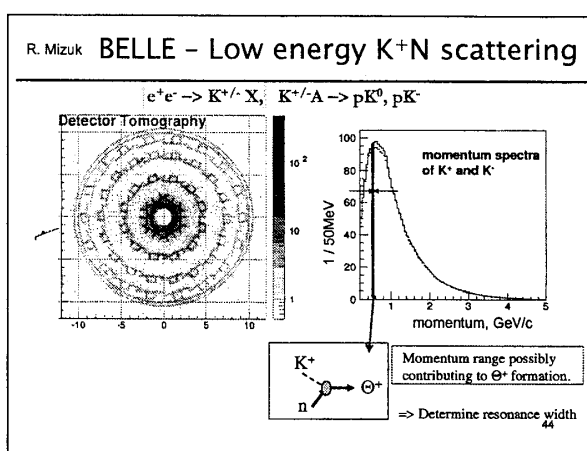
[Slide 42] これを見せたのは、まだ諦めずに Θ^+ をサーチしているところが、われわれのほかにも COSY というドイツの研究所があつて、threshold 近くの pp 散乱をやっている、結果が、もう秋ですよ、もうすぐ発表されるというので、これを出しています。

この実験のポイントは何かというと、非常に momentum のよくわかっている proton beam でやっているの、これが本当なら、 Θ^+ の mass が 1.55 GeV 以上であることは、ほぼあり得ないということが一つです。

もう一つは、このモードというのは K -on exchange できますから、ちゃんとしておいたほうがいいですよと言う点です。もちろんこれが本当に起こっていることかどうかというのは、全然わかりませんが、いまのところ K^* exchange scattering では Θ^+ が生成されそうにないといわれているので、 K -on に注目したのです。



[Slide 43]



[Slide 44]

[Slide 43] 靴の上から足をかくことで、リアクションメカニズムに逃げられたら、あるとかないうか、言えないのでないかということがありますが、もちろんきっちりと言える実験もあつて、それがこの実験なのです。この実験というのは、 K^+ と neutron をぶつけて Θ^+ 。これは Θ^+ の decay の逆反応で、これは崩壊の幅が決まれば、どれだけできるかというのは正確に決まるわけです。 Θ^+ が decay できるのなら、これは絶対に起こらなくちゃいけなくて、これは最終的にあるなしをはっ

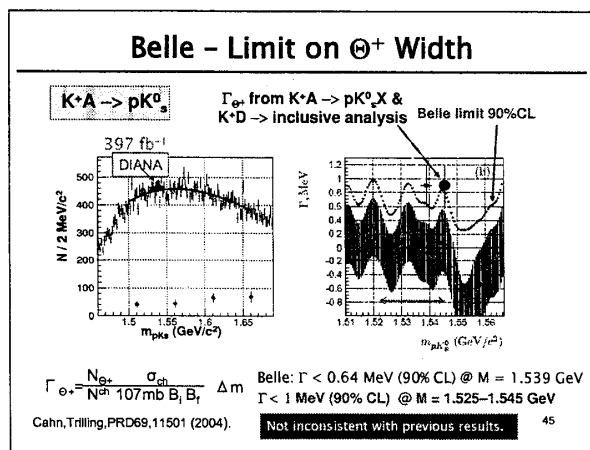
きり言える model independent な非常に重要な実験です。

こういうサーチは2カ所でされていて、一つはロシアの ITEP, 実験自体は、実は1980年代にされて、写真乾板もあったんだけど、いろいろなロシアのごたごたでスキャンするおばさんを雇う金がなくなって、スキャンできなくなっていたのです。それでスキャンし直してみると、こういうピークがでてきました。

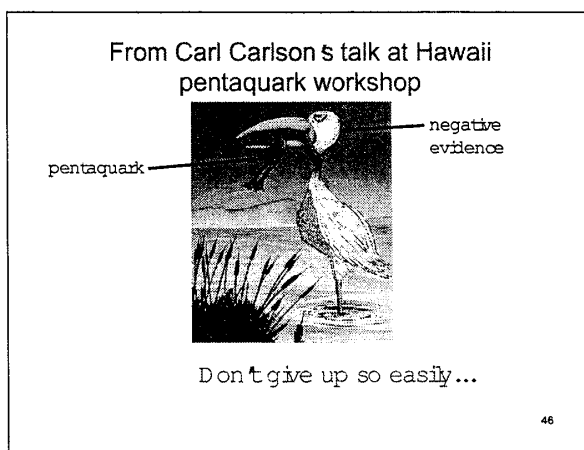
その後、この結果が出たあと、経済状態がどんどん良くなって、スキャンの数を増やしてみても、増やしたサンプルを足しても、ピークはまだ生き残っていますというのが、つい最近、今年の3月の状況です。

最新の結果では、若干、ピーク位置がずれているのが気に入らなくて、どうしてだという話をしたのですが、彼らは binning の問題である、binning を変えたら、同じような位置に出ますというのが回答でした。ただ、数が少ないのです。これは10倍はないとはっきりしません。

[Slide 44] もう一つ、最新のテクノロジーを使って、 K^+N の scattering をサーチしたものがあって、これが KEK の BELLE の結果です。これは e^+e^- で K^+ が出てきますが、この K^+ と反応したあとのこういう反応の vertex point を求めます。detector tomography. detector がどういうふうに配されているかわかるという実験です。



[Slide 45]



[Slide 46]

[Slide 45] モーメントとしても、formation momentum, ちょうど elastic に、 Θ^+ が作られるという formation momentum も充分含んでいる。これでサーチしたところ、なくて、実際に DIANA の結果が本当なら、彼らのところにこれぐらいのピークがくるはずなんだけれども、そういうのが見えないので、upper limit を出しています。

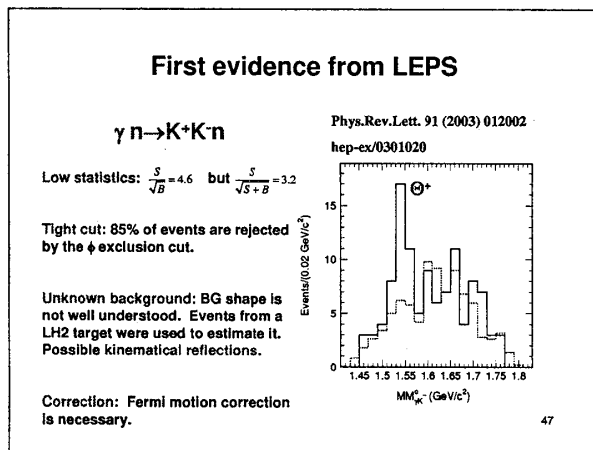
このデータのふらつきからわかるように、だいたい upper limit と DIANA の測定結果というのは comparable で結着はついていません。

[Slide 46] これが pentaquark の状況なのです。Don't give up so easily.

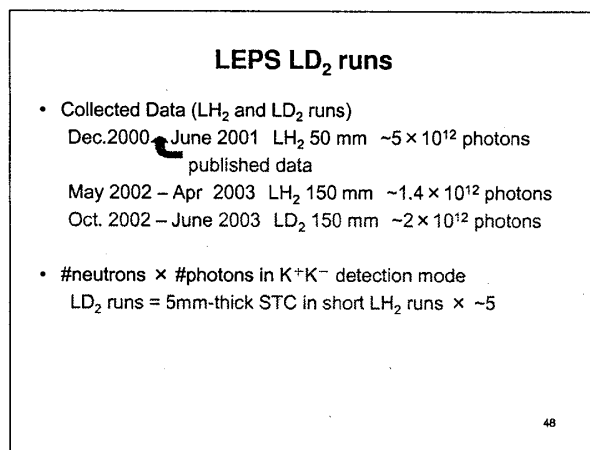
[Slide 47-49] これはももとの実験なのです。もちろん、諦めるわけにはいかないのです。本当にないのなら、ないというふうにちゃんと示して、大声でちゃんと謝らないといけない。実験は続いています。まずこれは、実は negative な evidence をいっぱい出てくる前にやった実験なので、2003 年の 6 月に終わってしまっているのですけれども、D(deuteron) target を使って、同じようにサーチをしました。同じように γn で missing mass を見ると、こういうふうにピークが出てくるところをチェックしている。

ただ、これは問題があって、統計的には前回よりも圧倒的に多いのですけど、5 倍とか 7 倍多いのですが、もしこのピークが、何か artificial なことで出てきたとすると、なかなか否定できないのです。われわれの detector はビーム軸を中心にして左右対称なので、 K^+ の missing mass, K^-

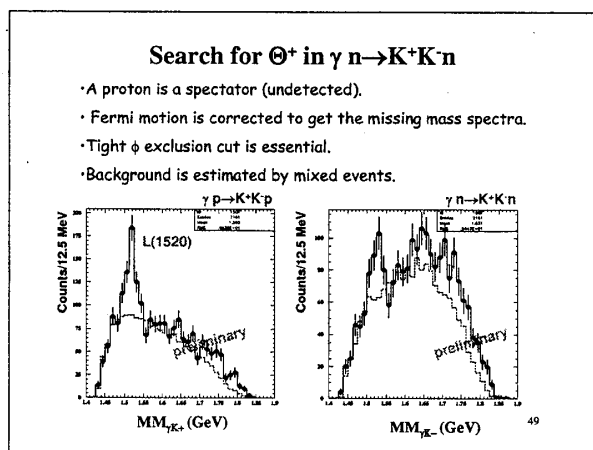
の missing mass がほとんど同じところに, artificial なものが現れうるのだけでも, Θ^+ の mass と, $\Lambda(1520)$ の mass が非常に近いので, ここに何か乗っていたとしても, $\Lambda(1520)$ がマスクされちゃうという嫌みなところがあります。



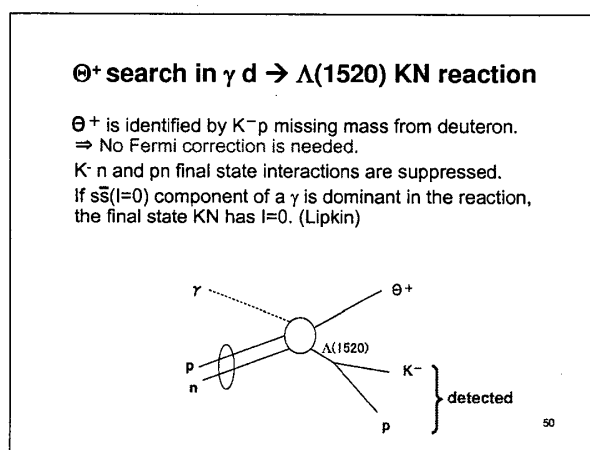
[Slide 47]



[Slide 48]



[Slide 49]



[Slide 50]

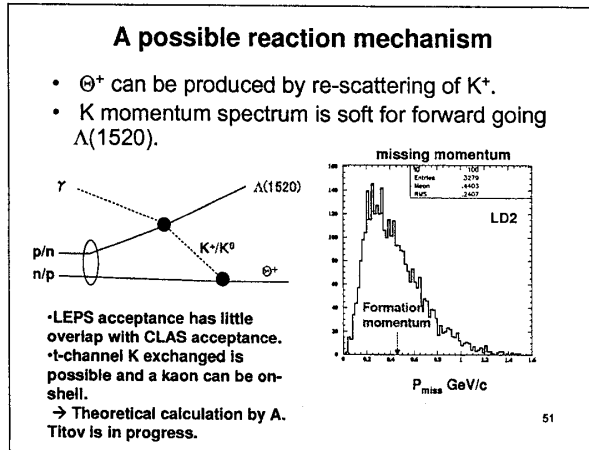
[Slide 50] 実はこのモード [Slide 49] より, 今日お話するのは, このモード [Slide 50] で, dueteron に γ ぶつけて, $\Lambda(1520)K^- \Theta^+$ という 2 体反応を調べます. こういうのは何が利点かというと, 質量測定が neutron の fermi mortion に全然影響されない. さらにここで Lipkin のアイディアを書きましたけれども, いろいろな理論家の計算によると, $\Lambda(1520)$ を捕まえることによって, Θ^+ のプロダクションは enhance する可能性がある. 一つ, すぐにわかるのは, 例えば K^- と proton とかが, final state interaction をすると, $\Lambda(1520)$ のピークというのはできません. だから final state interaction で, Θ^+ をつくり得ないようなモードを, 除いてしまうという効果があります.

[Slide 51] われわれの detector は, 非常にいいところにあって, $\Lambda(1520)$ を全部捕まえているので, γ 線のエネルギーは, ほとんど $\Lambda(1520)$ に transfer されます. だから同じ方向に出るやつを捕まえる.

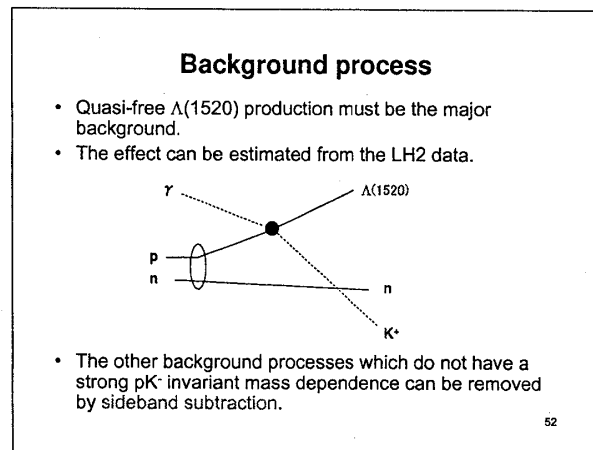
K^- on が, ここで交換されたとすると, 非常にソフトで, formation momentum をおおっています. こういう, 非常にソフトな K^- on, これは real の K^- on が交換できるというのがミソなのですが, real の K^- on を交換できるというセットアップは, 世界中でもわれわれだけです.

[Slide 52] Background process についても, この場合は非常に簡単で, ほとんどの background は quasi free で, つまり K^- on が neutron と interaction しなかったというので生まれていると思わ

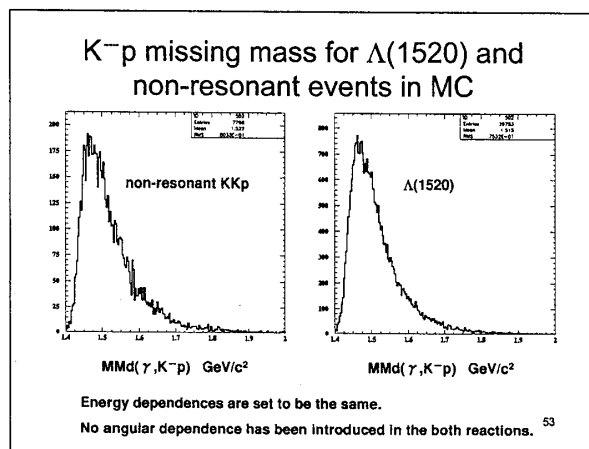
れるので, hydrogen のデータを使って, simulate することができます.



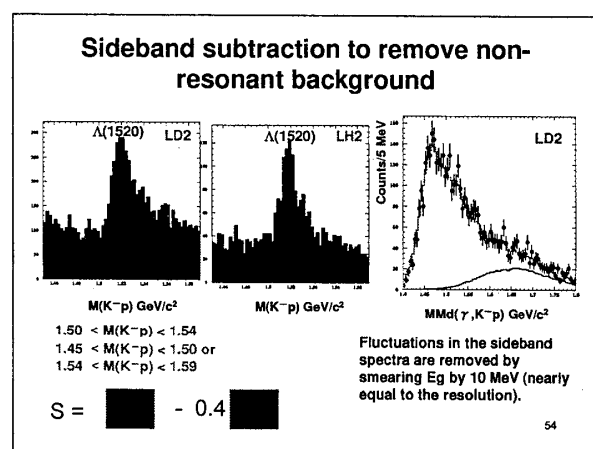
[Slide 51]



[Slide 52]



[Slide 53]



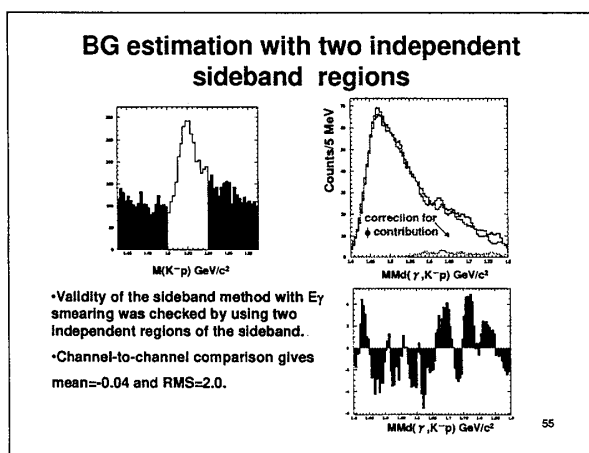
[Slide 54]

[Slide 53] もちろんモンテカルロで我々の detector で, そういうものを普通にとったときにピークできないかという, 一番最初に確かめておく必要があって, これは γp で KKp といって, γp で, $\Lambda(1520)$ ができてから K^-p というのを, モンテカルロで出したやつですが, 低いところでピークになっているのは, 前方の K^-p を捕まえやすいというところからきています. だから momentum transfer は, ほとんどない. だから γ 線の momentum はほとんど K^-p にいっちゃったような event が, 低い missing mass になっていて, あとは角度が大きくなるにしたがって, acceptance が小さくなってだらだらと落ちていく.

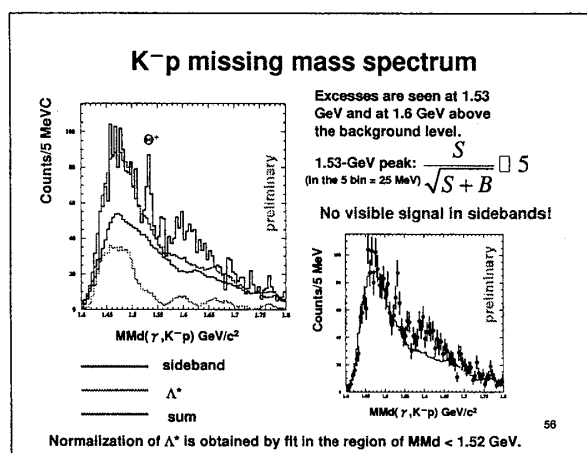
[Slide 54] 実際, $\Lambda(1520)$ がすべてじゃないのですけれども, その他の background については sideband method を使います. つまり $\Lambda(1520)$ とほかのところとを比べることによって, $\Lambda(1520)$ 以外の background も引くことができる. この場合は, 1.45 から 1.59 GeV までを取ってきて, この中の 40 MeV を, シグナル region, それからこの赤いところを background region として, background region の missing mass を 0.4 倍して引いてやることによって, シグナルと見るわけです.

それだけでは, 統計的なふらつきがあるので, ある smoothing をしています. これは γ 線のエネルギーを resolution の範囲でふってやるということで, スムースにしています. そういうことをすることによって, background のきれいなカーブを出すことができる.

[Slide 55] もちろん, そういう smoothing がうまくいっているかというのは, 確かめる必要はあって, background region を二つに分けて, それぞれ比べて, ほとんど差がないということです.



[Slide 55]



[Slide 56]

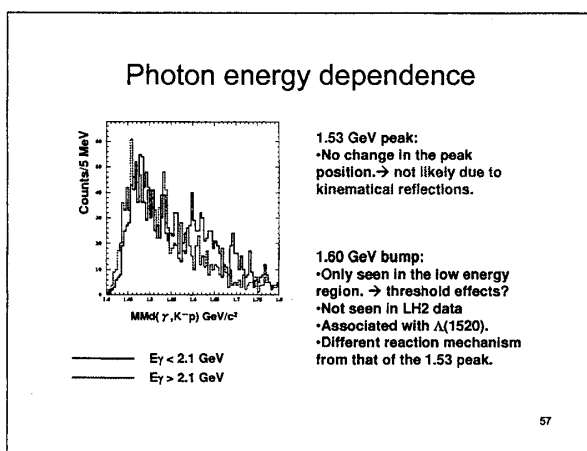
[Slide 56] こういふことをすると、ピークが出てくるのです。ここに $\Theta^+(1530)$ ピークがあつて、ここにわれわれにも何かわからない excess があつて、ほかは計算できる。 γp で $\Lambda(1520)$ ができているというのに、非常に近い。

この Background の estimation を信じるなら 5σ です。最初に preliminary な結果を見せたときの実験屋の反応ですけれど、KEK の I 教授は、「おまえがピークを欲しい欲しいと思うから出てくるんや」というのが反応で。

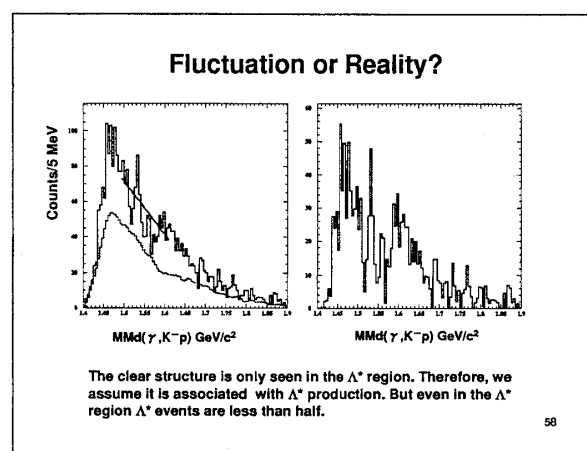
もう一人、東大の Y という助教授は、「中野さん、大丈夫です。Rubbia でもいっぱい嘘をついていましたよ」。どっちもあんまりうれしくないコメントで、僕としては、そういうつもりじゃないんだけど、慰められたのかなんかよくわからないのですが、頑張れという話です。

坂東 : そっちの 2 番目の、こっちのほうの excess は何でしたっけ。

中野 : わからないのです。わからないのですが、 $\Lambda(1520)$ を選ぶときだけ出てくるのです。だから、sideband では全然見えないのです。あとでちょっと、energy dependence を見ますけど、threshold に近いところだけ出てくる excess です、なぜかわからないのです。なぜかわかれれば、もっとすっきりするのですが、いまのところわからない。



[Slide 57]

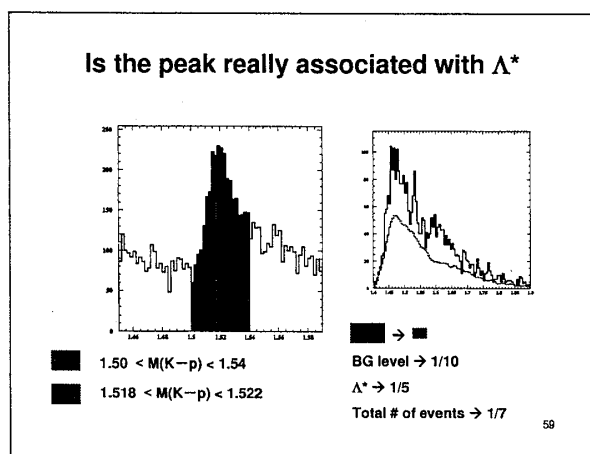


[Slide 58]

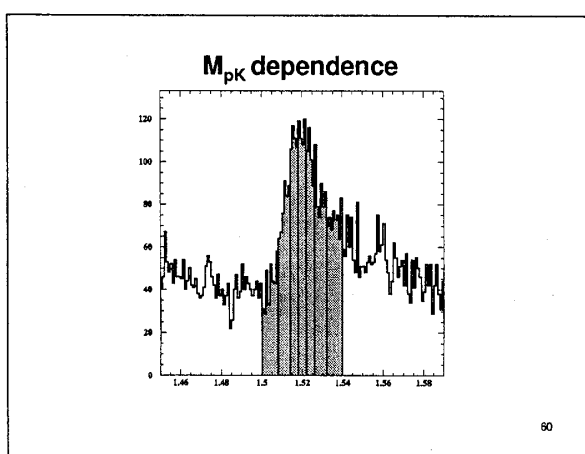
[Slide 57] もちろんピークが見えただけではだめなわけで、いろいろとチェックしている。すぐに思いつくのは phase space のある領域に Θ^+ とは全く違う理由で event が集中する。それが K^-p missing mass に reflection でピークを作るという可能性です。kinematical reflection をチェックするには energy dependence を見ます。reflection は一般に energy dependence が大きくて、ある

エネルギーでだけ現れたり、エネルギーと共にピーク位置が変わったりします。われわれは1.75 から2.4GeV という広い energy region を持っているの、それがあるかないかということを調べたら、ないわけです。reflection じゃないと。

次に1.6GeV の bump なのですけども、これは低いほうでしかできない。不思議です。何かわからないのですけれども、ただ、今としては、そういう事実があるということだけです。



[Slide 59]



[Slide 60]

[Slide 58,59] もちろん、この結果、これ生の spectrum から background を引いて、background はこうなっているんですけど、これが本当か、それとも fluctuation かというのは、問題になってくるわけです。background をちょっとスケールを変えてプロットすると、シグナルプラス background といわれているやつに、かなり似てくるわけです。これももう、そもそもわれわれの acceptance を背負っているわけだから。本当は、こういう真っ直ぐな線なんじゃないかと。これはたまたま、 2σ の excess と 3σ の dip ですね、アメリカで起こることなら、日本で起こってもかまわないということで、そういうことが起こってしまっているんじゃないかというのが、一番の criticism です。

それに答えるには、実験を繰り返すしかないというのは、わかっているのですけれども、このデータでも、少しはやれることがある。何がやれるかということ、われわれはこの excess というのは、 $\Lambda(1520)$ に付随しています。あんまり詳しく、いままで話しませんでしたが、 $\Lambda(1520)$ のときにしか、ピークははっきり見えないのです。そして sideband では見えない。 $\Lambda(1520)$ だけ選んできたときに、こういうものはあるはずですよというのが、われわれの実験結果です。これは $\Lambda(1520)$ の purity というか、S/N を上げてやれば、チェックできるわけです。だから非常に狭い、 $\Lambda(1520)$ のピークのところを持ってくると、background は減るけれども、相対的に $\Lambda(1520)$ の成分は増えるので、これがそういうピークのところだけ取ってきたときに、ただ単にこれが、fluctuation がありますけれども、単純に下に下がっただけなのか、それともこのピークの構造が、よりはっきりするのかということによって、 $\Lambda(1520)$ に付随しているかどうかということがわかるわけです。

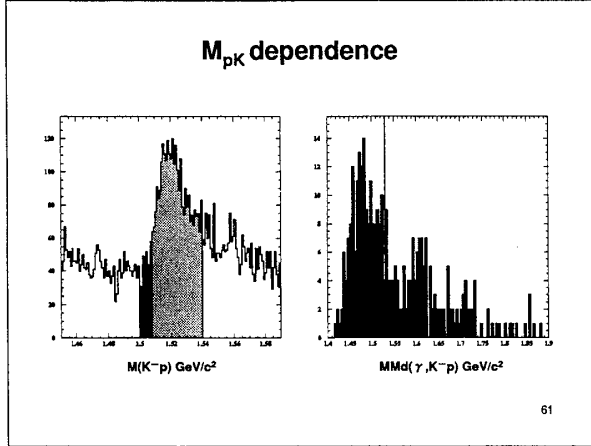
[Slide 60] もっと言えば、領域をばっと分けてしまっ、順番に見ていけばいいわけです。そのときに、 Θ^+ に対応するピークはどうなっているかということを見ていけばいいわけです。

[Slide 61-67] これは多分、研究会でお見せするのは初めてなのですが、一番低いところ、S/N があまり良くないところでは、こんなのが、だんだん中心に近づけていくにしたがって、このへんではかなりはっきりしていて、ここが一番真ん中ですけども、出てきて、ここで落ちてきて、見えなくなっていくというふうになります。

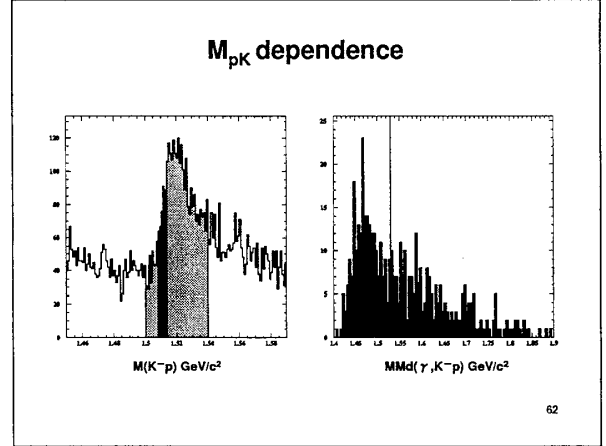
これは、いかさま行為があるときに、結果はわかっているわけです。表ばかり出るような行為があると。表ばかり出るような結果が出たときに、われわれはそれは、前半にいかさま行為が混ざっていましたと言って、それが本当かどうか、チェックしているようなものです。それはた

だの fluctuation だったら、どの sequence を取ってきても、だいたい同じようなかたちをしているはずだけど、われわれは表が出るのがどこで多かったか予想がつくので、そのチェックをしたわけです。

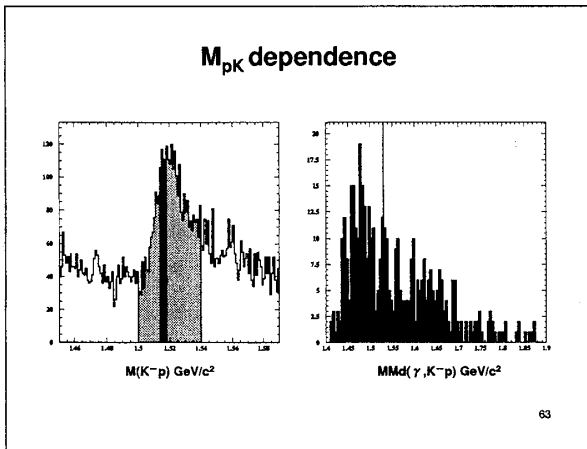
これをもって、完全に「ある」というわけにはいかないんだけど、起こっていることを見ると、 $\Lambda(1520)$ と非常に強く correlate しているように見えるというのが、言えることです。



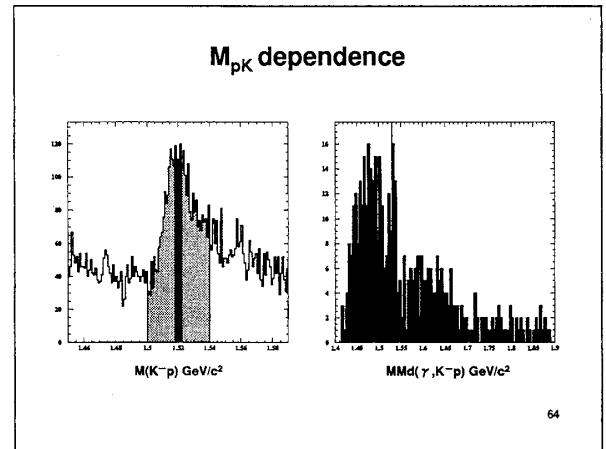
[Slide 61]



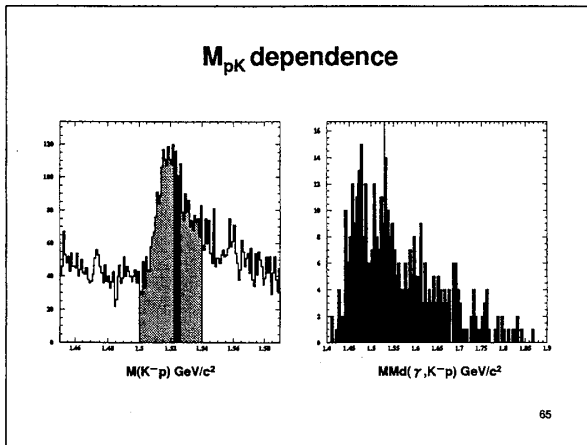
[Slide 62]



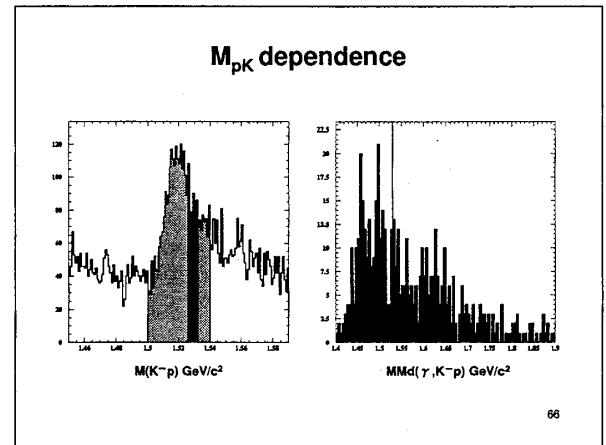
[Slide 63]



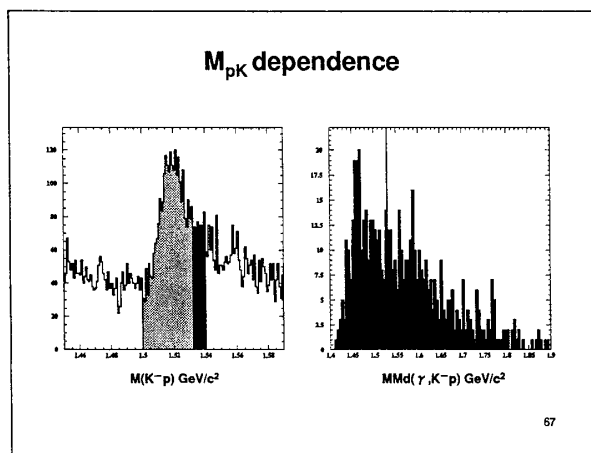
[Slide 64]



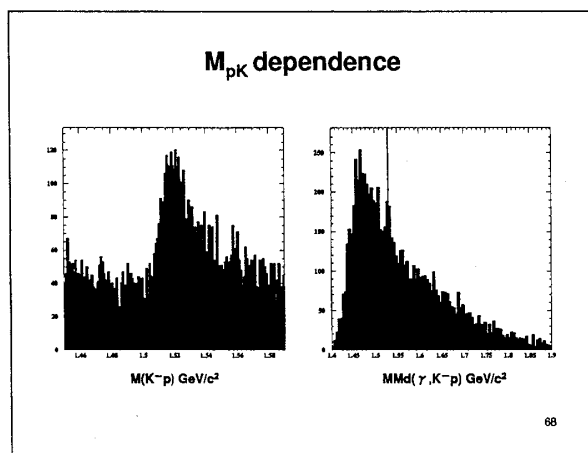
[Slide 65]



[Slide 66]



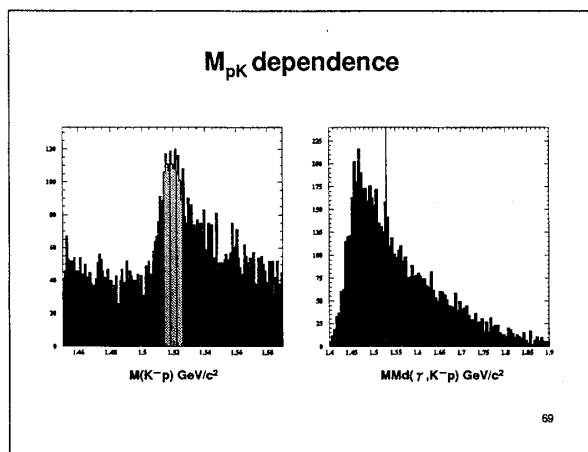
[Slide 67]



[Slide 68]

もう一つは、こういう実験をするときに、cut というのが非常に有効なんだけれども危険で、event を select するときに、この selection の cut point というのは、実験から決めるわけです。もちろんピークを見ながら決めてはいけないんだけど、見ちゃうわけです。きれいなところで cut point を決めちゃうと、それが実際、ピークとしてジェネレートされますので。一番いいテストは、もう一回実験を繰り返すということなのですけども、それ以外にも、これは全然カットしていなかったらどうなるか。

[Slide 68] これはまったく cut せずに、全部の event を plot しています。もともとこうなるんだから、なくなりませんけれども、もう一つ言えるのは何かというと、シグナルの総数ですね、ここに含まれているシグナルの総数は、cut することによって、S/N は悪くなっていますけれども、増えています。



[Slide 69]

If the Θ^+ peak is due to fluctuations, we are unlucky enough to repeat the experiment.

70

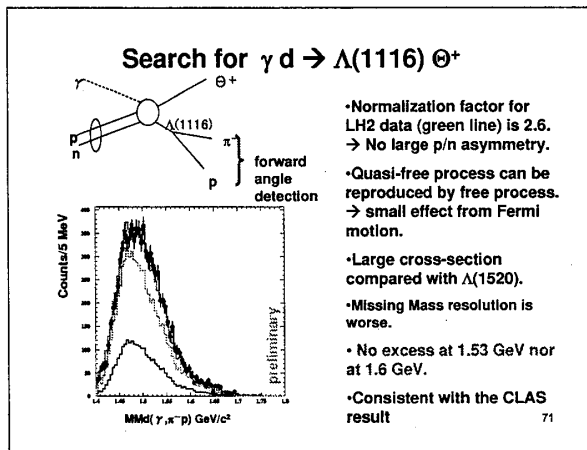
[Slide 70]

[Slide 69] こういうところがあります。さらには中心部分、excess がたくさん見える中心部分を取り除いても、 $\Lambda(1520)$ が少しあれば出てくる。だから cut によって、そもそも flat なものを anti-phase にしているというわけではない、そういうことがわかったのです。

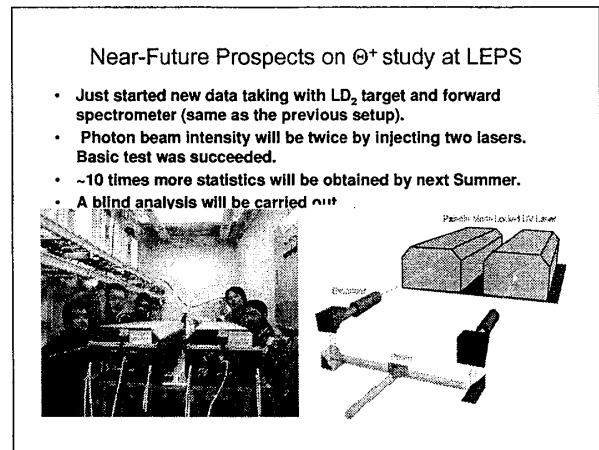
[Slide 70] いまのわれわれの立場を言うと、 Θ^+ のピークというものが fluctuation だとしたら充分 unlucky なので、もう一回実験を繰り返すことになった。そういうことなのです。それで実験を繰り返しているというのが、現状です。

[Slide 71] いいことばかりを言って終わるわけにいかないのです、一つちゃんと見せておくと、 $\Lambda(1520)$ だけじゃなくて、 $\Lambda(1116)$ という普通の Λ でも、同じサーチができます。それもやってい

ます。結果は、残念ながら何も出ません。だから同じように deuteron で γ で hyperon というものですが、 $\Lambda(1116)$ では見えない。



[Slide 71]



[Slide 72]

我々の結果だけではなく、いろいろな状況を見たときに、何がどうなっているかという、 Θ^+ は、もしあるとしたら、出てきたり出てこなかったりしている。energy range にしてもそうだし、reaction にしてもそうである。そんなものはナンセンスだから、信じるのはやめなさいというのは、一つの立場です。もう一つの立場としては、もしかしたらこれは、何か新しい hadron の研究の方向を指しているのかもしれない。いままで hadron の研究というのは、mass を決めて width を決めたら、だいたいそれでおしまい、そういう表をばっつつくっておいて、理論屋にあげて、理論屋はそれを再現できたらそれで終わりだったんだけど、もしかしたら hadron の構造というのは、どういう反応でたくさんできて、あるいはどういう decay をするかということを見ることによって、本来取り出せない quark が、中でどうなっているかということがよりわかる、反応の選択性ですね、そういうもので調べることができるのかもしれない。実際、 $N^*(1535)$ は η をタグしなければ見えないということがあるわけで、そういうことが、もしかしたらたくさん有るかもしれない。

[Slide 72] いま、われわれはどういうことをしているかということ、2本の laser をいっぺんに入れることによって、実験屋が考えそうな brute なことですが、effective に実験時間を増やして、来年の夏までに10倍の統計を貯めようとしています。10倍の統計を貯めて、今度は何をしようとしているかということ、blind analysis. 簡単に言うと、解析プログラム、それから cut 条件をあらかじめ決めておいて、データがきたら、それをばんと apply するという。実は僕は、昔は rare decay をやっていた、こればかりやっていたのです。それが嫌になって、hadron にきたところもあるのですけれども、ずっとやっているのはなかなか消耗ですので、今回ばかりはこれをやらないとしょうがないかなと思っていて、blind analysis をやろうと思っています。

[Slide 73] なかなか景気のいい話はないのですけれども、pentaquark については、 Θ^+ については、そういう状況です。いまのところはないと言っている人が多い。われわれのところではピークが見えているし、なんとなく非常にあり得ないような correlation があるので、あるんじゃないかとわれわれは思っていて、10倍データを貯めようとしています。

pentaquark, Θ^+ だけがあるということはある得なくて、ほかにもないといけないんですけども、その状況は、もっと混沌としている、一時あると思われていた、strangeness が2の pentaquark というのは、いまは消えています。

もう一つ、Diakonov の prediction であったように、 N^* の pentaquark がないといけないのですけれども、それについては、もしかしたらそうかもしれないという状態がみつかってます。これは、

また別の選択則があつて、u-spin の選択則があつて、 γn 反応ではできるけれども、 γp 反応ではできない、1675 という、非常に mass としては高いですね、そういう N^* 状態です。これは YKIS でも、東北大学から報告がありますので、その結果を見ていただきたい。

Other pentaquarks

Existence of the $\Xi_{3/2}(1862)$ and the Θ_c^0 is questionable. For the both cases, only one experiment has observed the positive evidence, while other experiments claim that their null results are incompatible with them.

GRAAL observed a *narrow* resonance in the missing mass of $\gamma n \rightarrow \eta X$ reaction (later confirmed by ELSA). It may be $P_{11}(1675)$ but can be interpreted as $D_{13}(1675)$.

[Slide 73]

Summary

- Recent null results restrict the possibility that a pentaquark exists severely.
- For Θ^+ , any theoretical model or experimental results which requires large K^* exchange contribution are rejected.
- There are still some positive evidences which cannot be excluded completely.
- Experiments with positive results, especially where t-channel K exchange is possible, should be repeated with higher statistics.
- There are still on-going activities. Let's see the results. They will hopefully conclude the case.

[Slide 74]

[Slide 74] Summary としては、なかなか苦しい状況になっているのは確かである。ただ、完全に死んだわけじゃない。K-on exchange というものが可能なモードで見たときには、まだまだ pentaquark を見つける可能性があつて、なおかつ完全にはほかの実験では否定できないような結果がまだあります。今後もいろいろな activity があるので、もう少し待ってくださいというのがメッセージです。

Particle Data Group

NOTE ON THE $S = +1$ BARYON SYSTEM

(PDG 1986; Phys. Lett. B170, 289)

The evidence for strangeness +1 baryon resonances was reviewed in our 1976 edition,¹ and more recently by Kelly² and by Oades.³ Two new partial-wave analyses⁴ have appeared since our 1984 edition. Both claim that the P_{13} and perhaps other waves resonate.

However, the results permit no definite conclusion- the same story heard for 15 years. The standards of proof must simply be much more severe here than in a channel in which many resonances are already known to exist. The general prejudice against baryons not made of three quarks and the lack of any experimental activity in this area make it likely that it will be another 15 years before the issue is decided.

75

[Slide 75]

[Slide 75] 最後に Particle Data Group のノートをもう一度お見せします。昔の人は賢かったのです。「The standards of proof must simply be much more severe here than in a channel in which many resonances are already known to exist」。だから、pentaquark とかがあるというためには、evidence のレベルというのは、ずっとずっと高くないといけない。スタンダードも、もっと高くな

いといけないということで、いまの段階では、われわれのデータでは、あったとは言えませんが、もしあるようならば、それがきっちりいえるところまで実験の精度を上げていきたいということです。どうもありがとうございました。

関 : それではディスカッションをお願いいたします。

坂東 : さっきの Λ が見えないのは、不思議なんですけれども、どうしてそんな、普通のものが見えないんですか。

中野 : そうじゃなくて、 Λ のピークは見えるんです。それで Λ を選んで、その missing mass で Θ^+ をサーチしたら。

坂東 : それが見えないと。びっくりした。すみません。

中野 : Λ ははっきり見えています。この Λ の場合は、何が一番違うかという、エネルギーの range が違うと、 $\Lambda(1520)$ については、非常に threshold に近いというか、われわれは threshold から始まって、1.7GeV から threshold なんですけど、そこから数百 MeV ということなんですけれども、 Λ の threshold は、900MeV 程度なので、region としては非常に、エナジーティックなところに入っていくと、そういう違いがあります。

坂東 : こういう実験は、魅力的な理論屋がいたからされたようなことを、さっきおっしゃっていたのですけれども、やっぱり何か実験をやるのに、賭けみたいな実験はやりませんよね。たいてい、ほかの実験のバイプロダクトとしてやられるんですか、こういう場合は。

中野 : γ を入射粒子に使う実験は、そうじゃなくて、この実験の場合にもそうですけれども、ほとんどインタラクションが小さいから、minimum bias で取っちゃうんです。minimum bias で取ってしまっただけで、いろいろなことが起こっているわけなんですけれども、Bread & Butter の物理のほかに、こんなものが見られるんじゃないかといって、いろいろと解析するというのが、 γ の実験の面白いところなのです。

だからこの先、これはこれでどうなるかわからないのですけれども、 γ を使った実験で僕たちが目指しているのは、まず intensity をあげて、もう一つは 4π の detector を置きたい。できるだけ均質で、resolution が良くて、charged Particle と γ がいっぺんに取れるような detector を置いて、minimum bias でデータを取って、何が起こっているかというのを、off line になりますけれども、見たい。

今回、ちょっと言いましたけれども、やっぱり baryon を研究するときに、一つのモードだけで、それも限られた acceptance だけで何かを見るというのは非常に難しく、やっぱり baryon resonance ができたら、それは一つの崩壊モードだけで崩壊するんじゃなくて、いろいろな崩壊モードに崩壊するわけですね。そういうものを同時に取って比をとるとかなんとかしないと、baryon の構造とかいうのは、なかなかわからないんじゃないのかというのを思っています。

関 : ほかに。それじゃあ、どうもありがとうございました。