

Air shower simulation

(Case of Cosmos)

- Historical review (only partly with some relevance to atmospheric neutrinos)
- A bit about general features
- Non standard features
- Ongoing activities

Session: Air shower simulation and hadronic interaction

K.Kasahara
waseda

Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range

Feb. 20-22, 2019 @ Nagoya

Air shower simulation

(Case of Cosmos)

- Historical review (only partly with some relevance to atmospheric neutrinos)
- A bit about general features
- Non standard features
- Ongoing activities

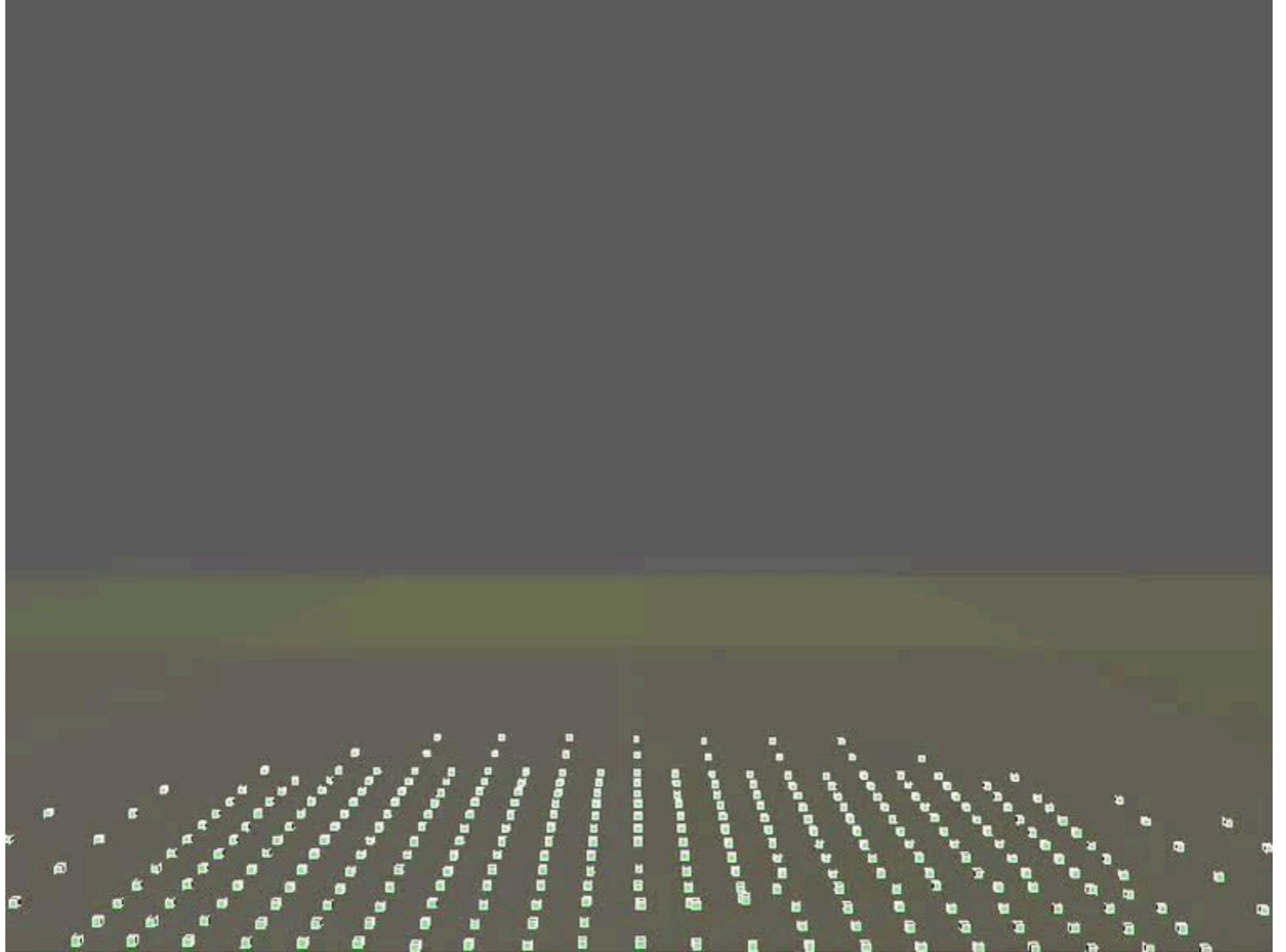
Session: Air shower simulation and hadronic interaction

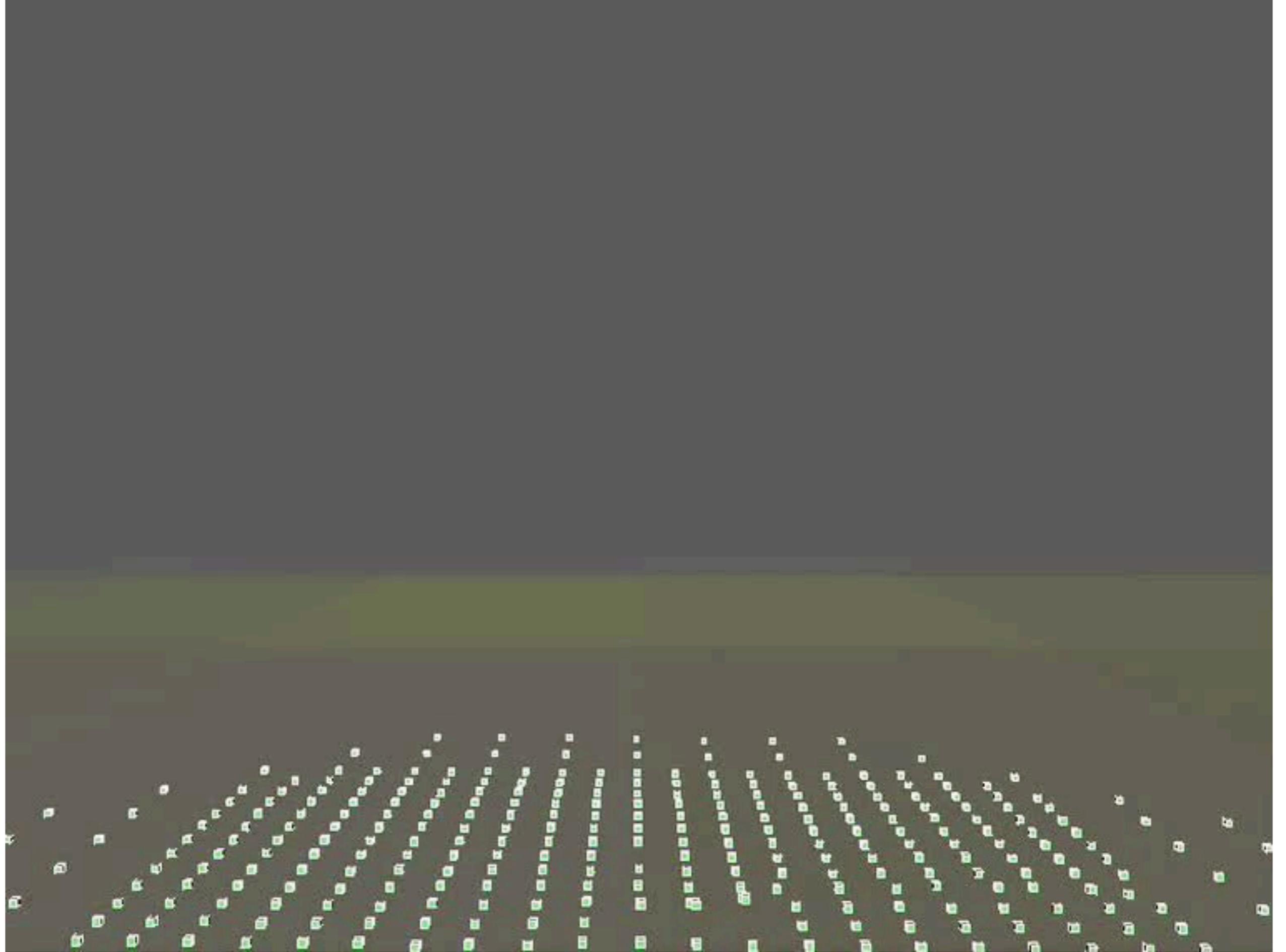
K.Kasahara
waseda

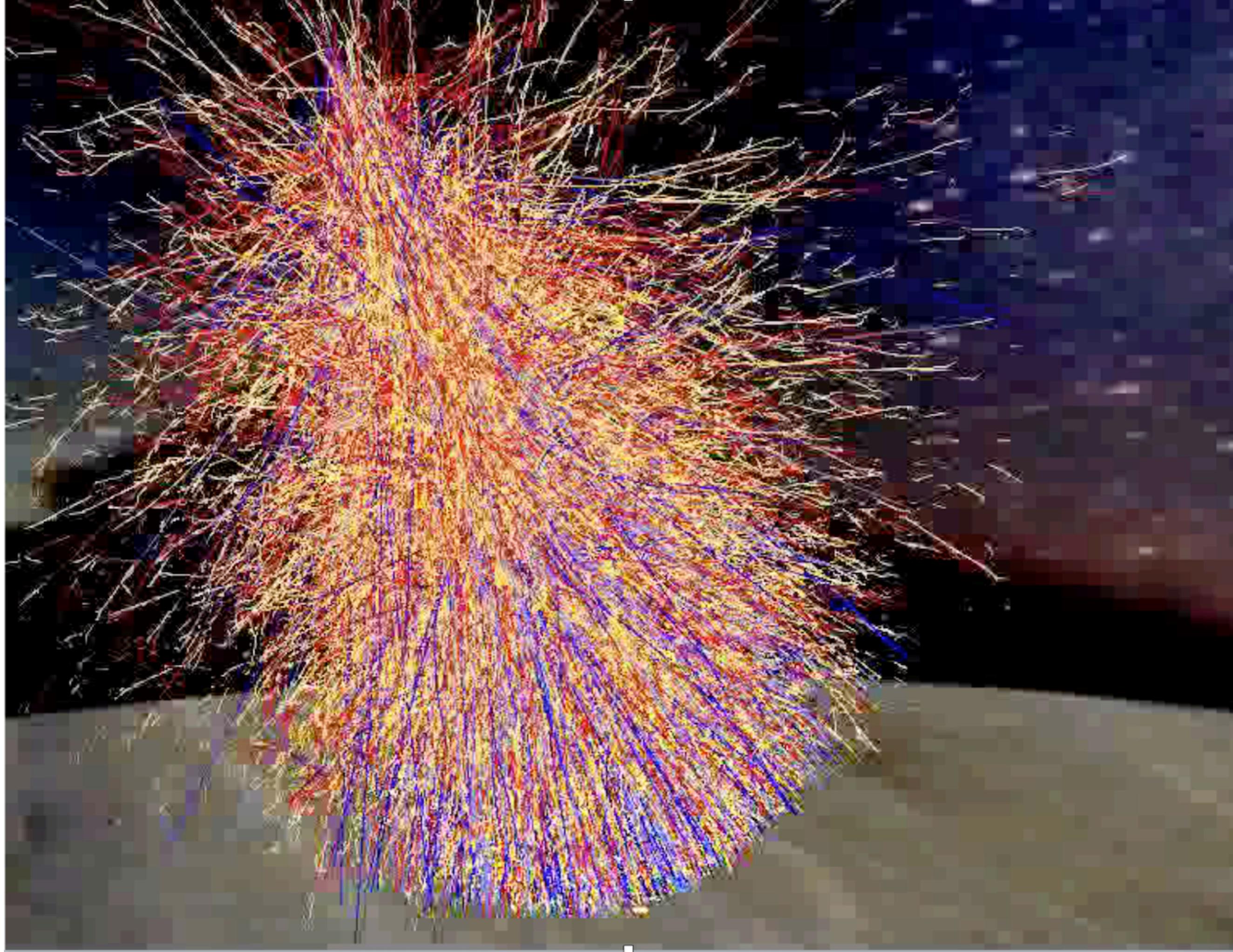
Today's talk will not be systematic, sorry

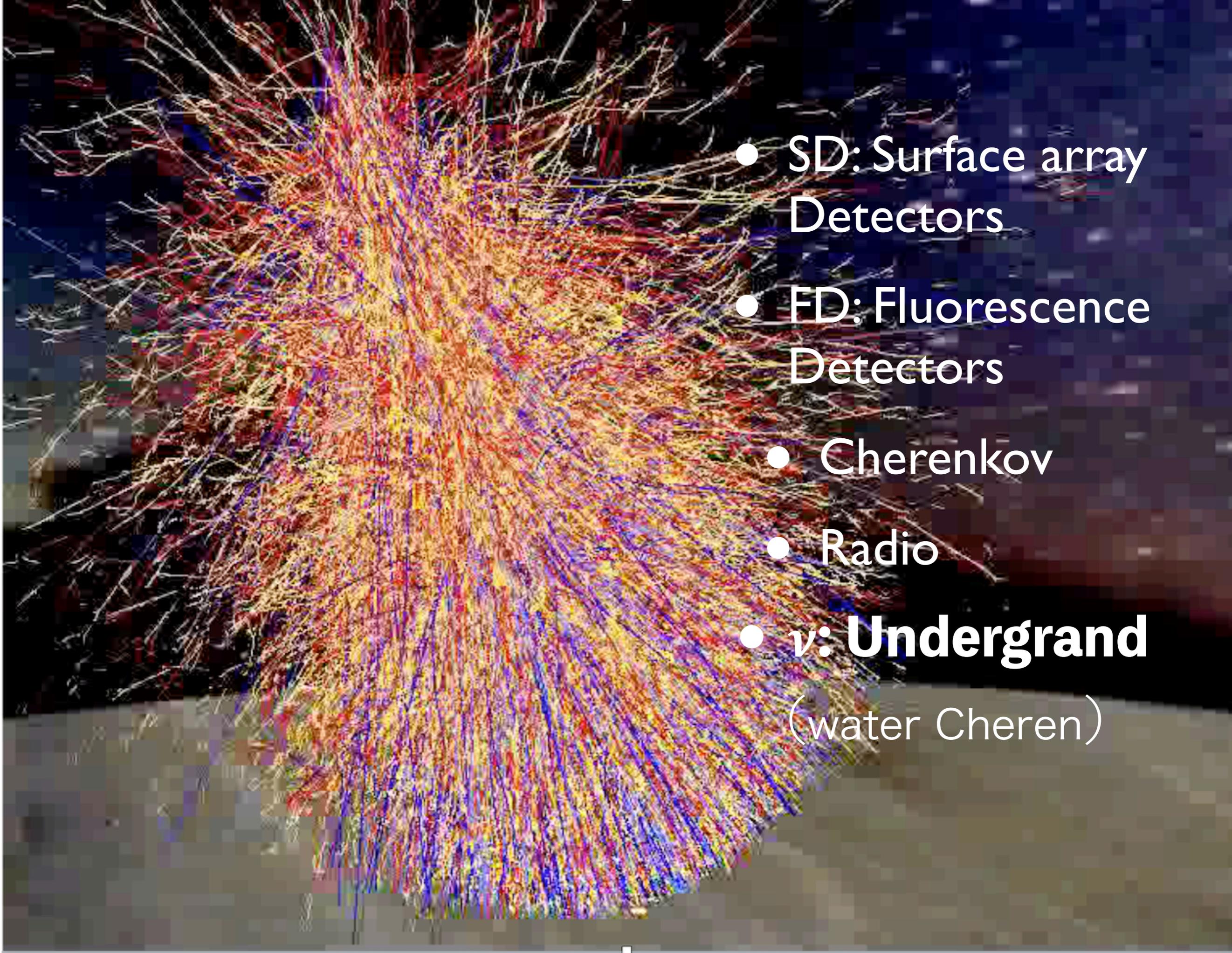
Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range

Feb. 20-22, 2019 @ Nagoya









- SD: Surface array Detectors
- FD: Fluorescence Detectors
- Cherenkov
- Radio
- ν : **Undergrand**
(water Cheren)

THE NOBEL PRIZE



2015年
ノーベル物理学賞受賞!!



東京大宇宙線研究所所長
梶田 隆章

2015年ノーベル物理学賞受賞理由

ニュートリノ質量の存在を示す
ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミュウニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミュウニュートリノが減っているようにみえていたのです。

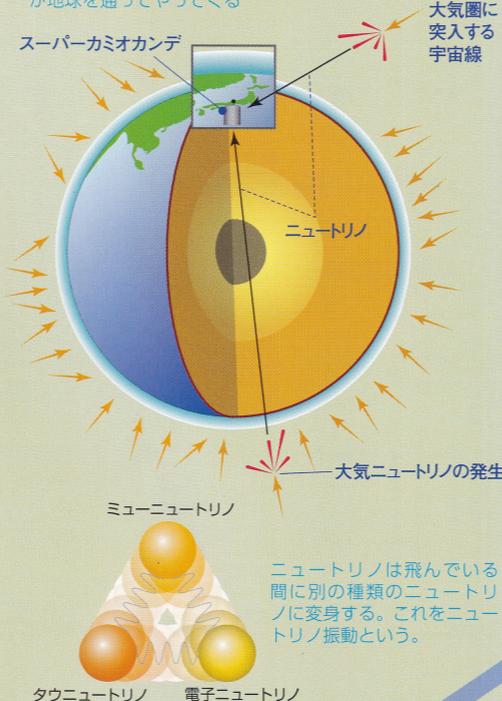
ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。

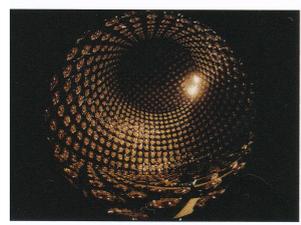
ニュートリノは電子の仲間。3種類のニュートリノがある



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミュウニュートリノの数が少ないことに気づく。

1983 **Kamiokande started**
カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内部に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突し、輝き（チェレンコフ放射）を出すと、1万個の光センサーで検出する。

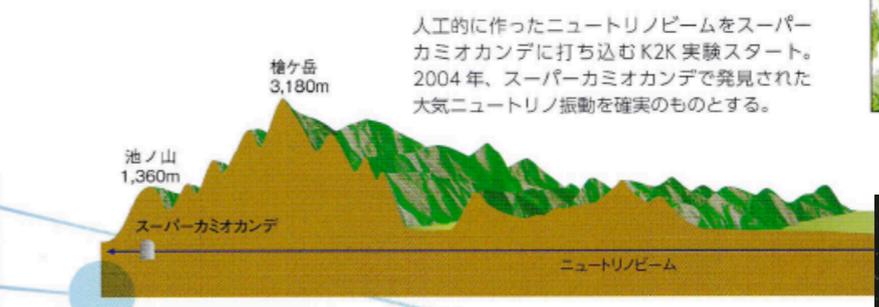
1987 **Nu from SN 1987A**

1996 **Super Kamiokande**

1998 **SK Atmos. Nu Oscil.**

1999 K2K 実験開始

2001 太陽ニュートリノ振動を発見



2002 **Koshiaba Nobel Prize**

2004 K2Kでニュートリノ振動の確認

2005 地球ニュートリノの発見 (KamLAND実験)

2009 T2K 実験開始

2011 T2Kで電子ニュートリノ出現事象を発見

2013 T2Kで電子ニュートリノ出現事象の観測と測定

2015 **Kajita Nobel Prize**

SK-Gd 計画

スーパーカミオカンデに Gadolinium を追加し、ニュートリノの検出効率を向上させる計画。

ハイパーカミオカンデ計画

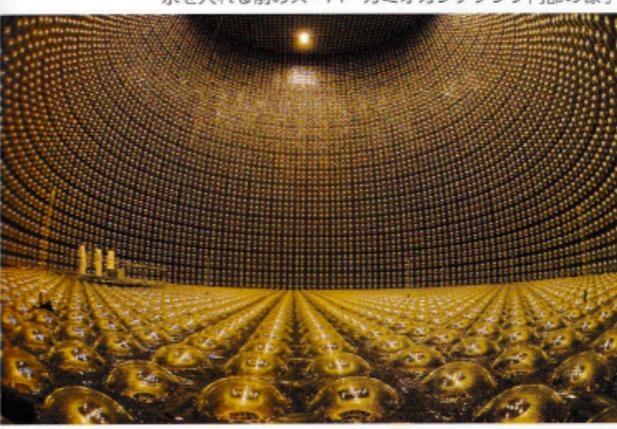
スーパーカミオカンデを大きさや性能とも大きく超える装置を建設し、ニュートリノの CP 対称性の破れ (ニュートリノ・反ニュートリノの性質の違い) の測定や陽子崩壊の発見を通して、素粒子の統一理論や宇宙の進化史の解明を目指します。

ハイパーカミオカンデ

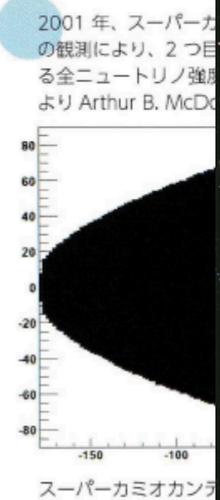
SK-Gd 計画

T2Kによるニュートリノ・反ニュートリノの違いの探検

梶田先生がノーベル物理学賞を受賞



水を入れる前のスーパーカミオカンデタンク内部の様子



2001年、スーパーカミオカンデの観測により、2つ目となる全ニュートリノ強度より Arthur B. McDonald



ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

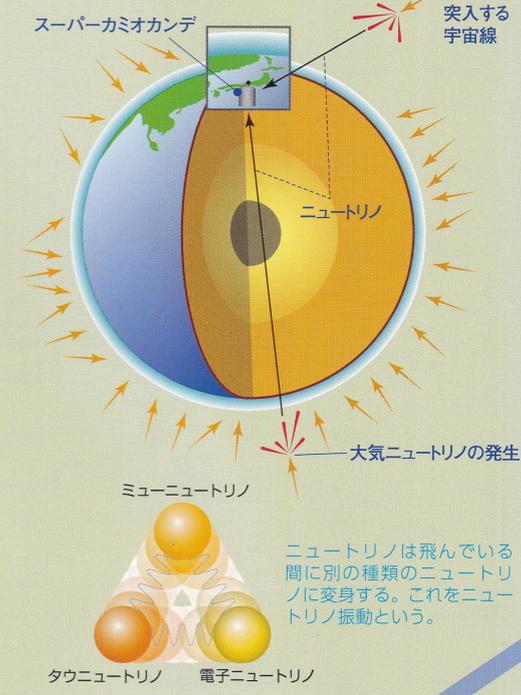
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

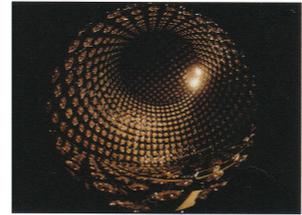
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



スーパーカミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

1983 **Kamiokande started**
カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9割を1万個の光センサーで検出する。

1987 **Nu from SN 1987A**

1996 **Super Kamiokande**

1998 **SK Atmos. Nu Oscil**

1999 K2K 実験開始

2001 太陽ニュートリノ振動を発見



ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

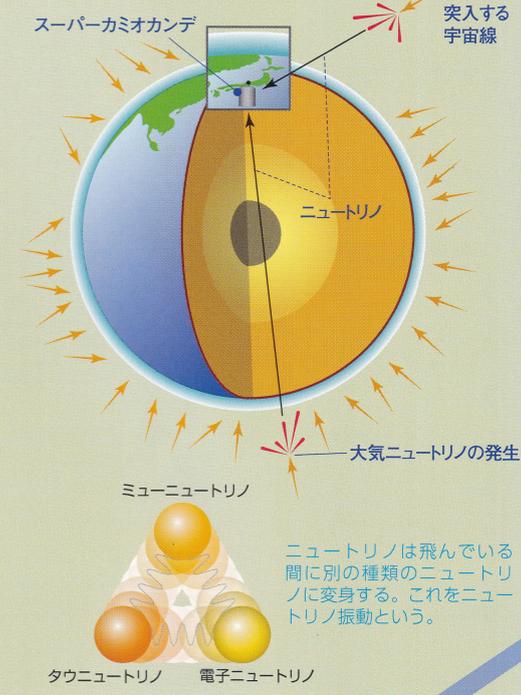
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。

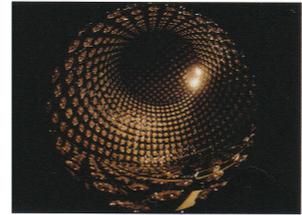


宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



ニュートリノは飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身する。これをニュートリノ振動という。

神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

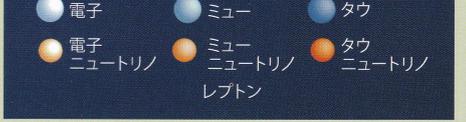
- 2001 太陽ニュートリノ振動を発見
- 1999 K2K 実験開始
- 1998 SK Atmos. Nu Oscil.
- 1996 Super Kamiokande
- 1987 Nu from SN 1987A
- 1983 Kamiokande started



カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が終段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーを配置し、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした電子が光を出し、それを1万個の光センサーで検出する。

Dawn period of Cosmos ~1970

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



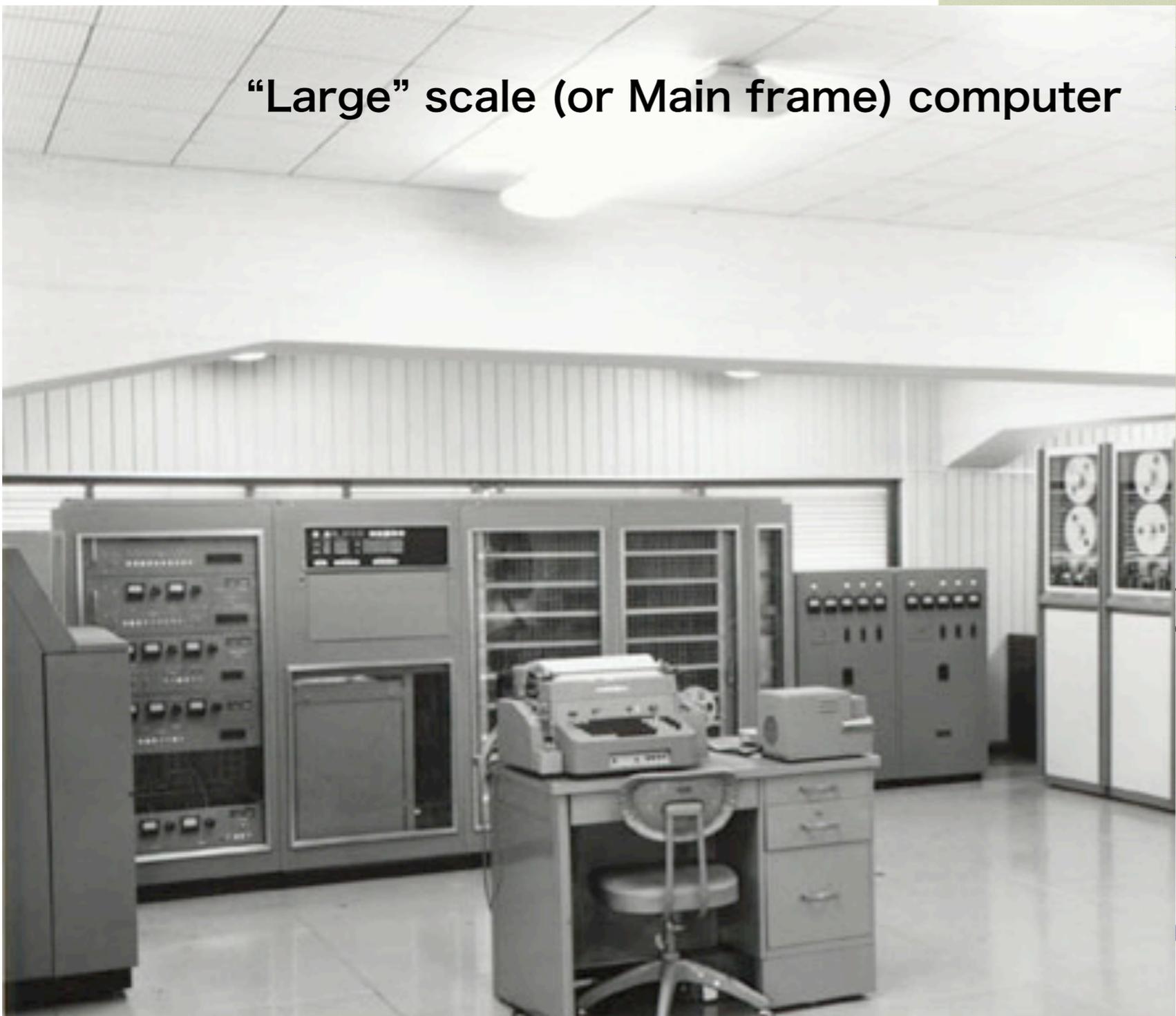
ニュートリノの観測から、地球の裏側から来たニュートリノの数が、検出器で観測されるニュートリノの数に比べて、約半分

減っている間に別の種類のニュートリノに変身しているという現象によるものと見られる。ニュートリノ振動」という現象によるものと見られる。ニュートリノが地球内を通過する間に別の種類のニュートリノに変身してしまっ

た。ニュートリノに質量があるときだけ起こるニュートリノ振動の発見は、ニュートリノ振動という決定的な証拠となった

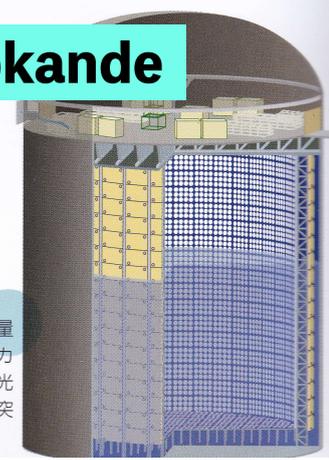
のは素粒子理論の定説を覆し、新しい発見。この成果が認められて今回のノーベル賞を受賞した。

“Large” scale (or Main frame) computer



ニュートリノ研究の歴史

- 1987 ● Nu from SN 1987A
- 1996 ● Super Kamiokande
- 1998 ● SK Atmos. Nu Oscillation Experiment
- 1999 ● K2K 実験開始
- 2001 ● 太陽ニュートリノ振動を発見

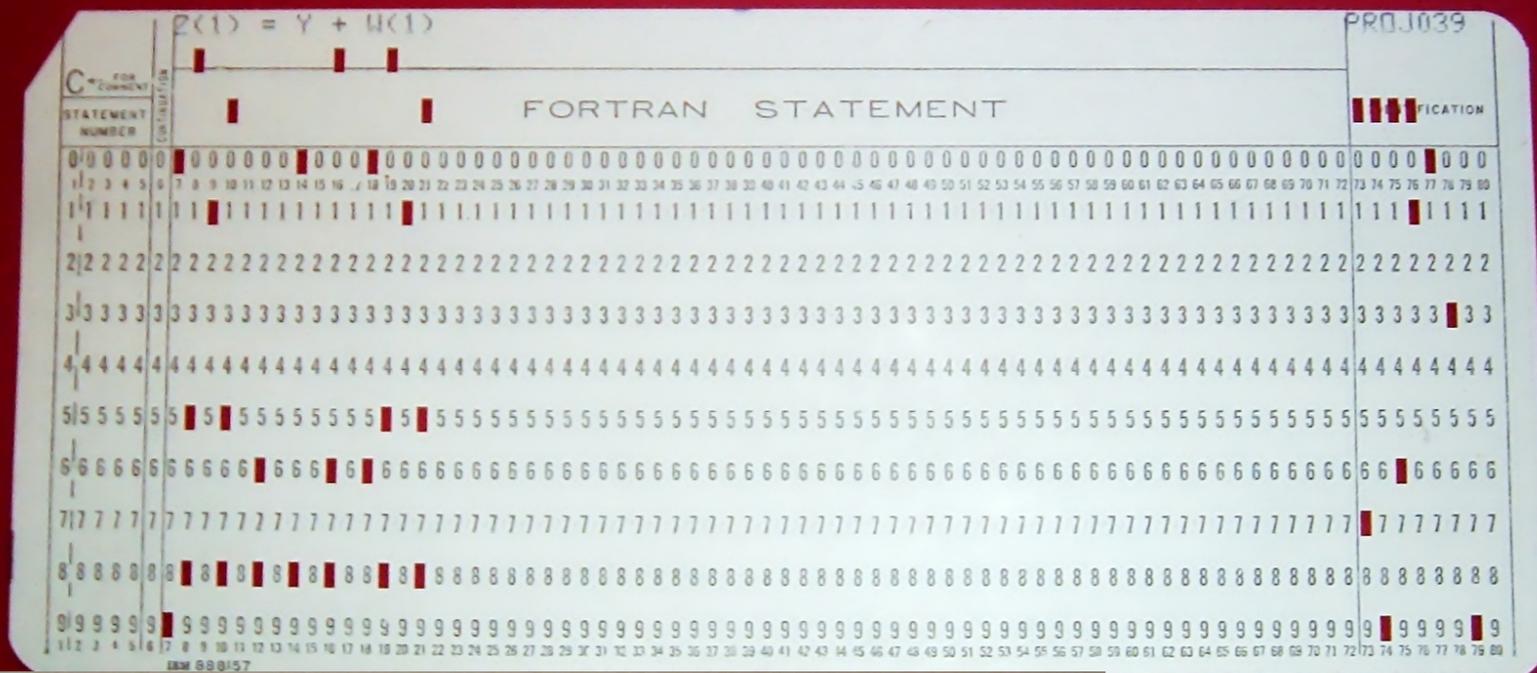


Kamiokande started

スーパーカミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が大幅に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大な水タンクの内部に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突し、発生するチェレンコフ放射を1万個の光センサーで検出する。

Dawn period of Cosmos ~1970

What are these ?



floating * : $\sim 100\mu s$

Core memory

size: < *1MB
(~*100kwords)

No HD:

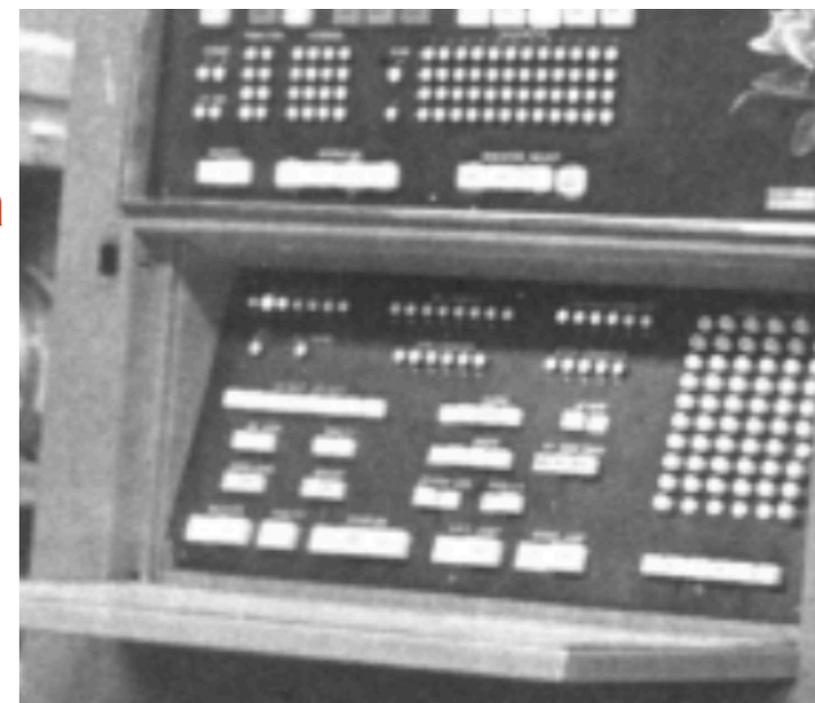
No Screen Display
(Lots of lamps on the console)

Machine language

Assembler language

Algol

Fortran



search max;

ニュートリノ振動の発見

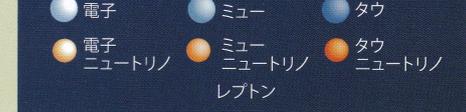
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

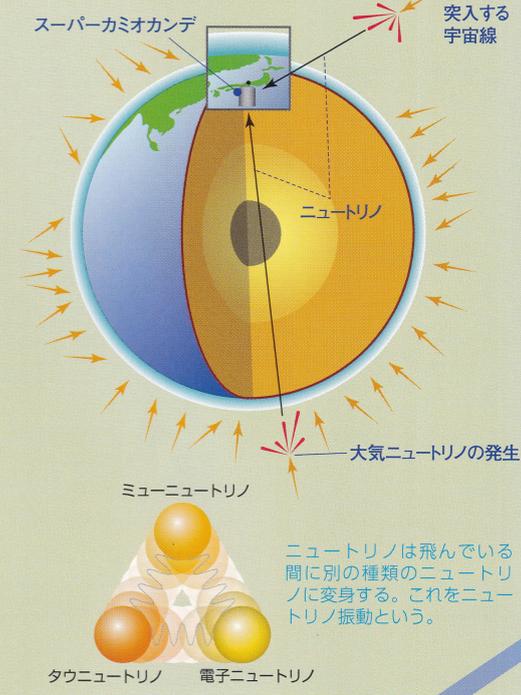
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

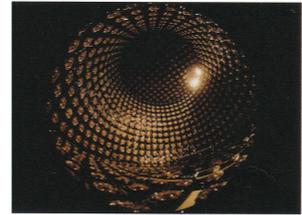
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

- ~1970 Kamiokande started
- 1983 カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9割を1万個の光センサーで検出する。
- 1987 Nu from SN 1987A
- 1996 Super Kamiokande
- 1998 SK Atmos. Nu Oscil.
- 1999 K2K 実験開始
- 2001 太陽ニュートリノ振動を発見

A shocking event !

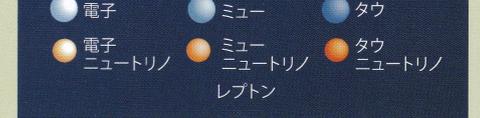
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

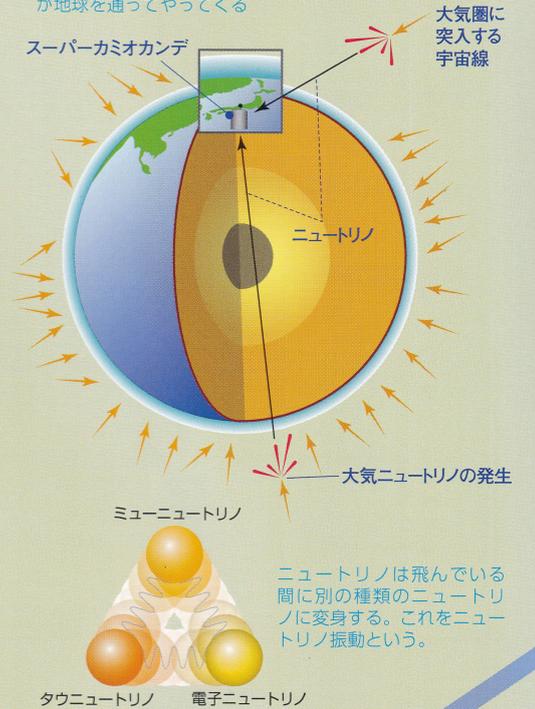
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

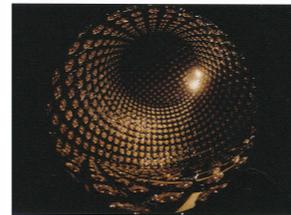
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

1983 **Kamiokande started**

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした電子が光を発生させる。この光を1万個の光センサーで検出する。

1987 **Nu from SN 1987A**

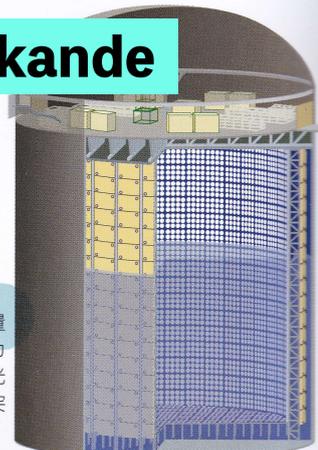
1996 **Super Kamiokande**

1998 **SK Atmos. Nu Oscil.**

1999 K2K 実験開始

2001 太陽ニュートリノ振動を発見

~1970



A shocking event !

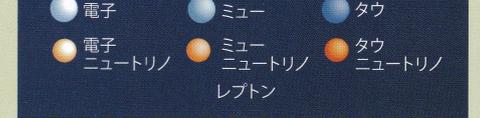
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

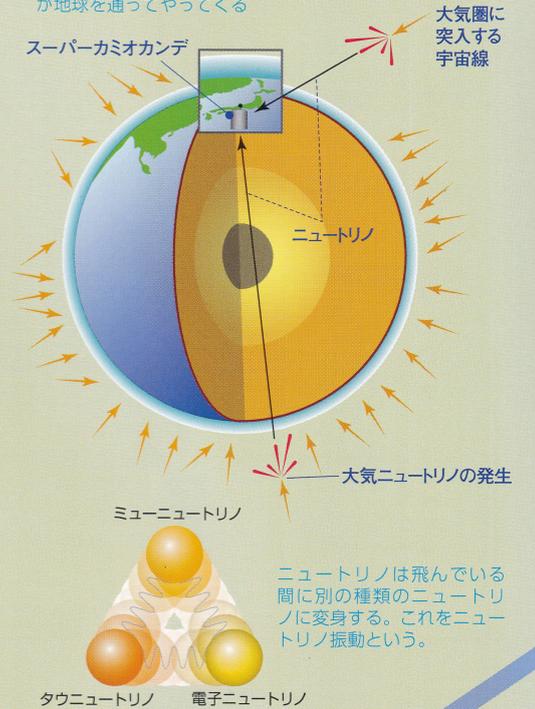
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

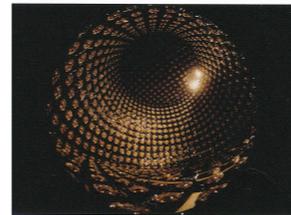
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
陽子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.

~1970

1983

Kamiokande started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内部に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9光を1万個の光センサーで検出する。

1987

Nu from SN 1987A

1996

Super Kamiokande

1998

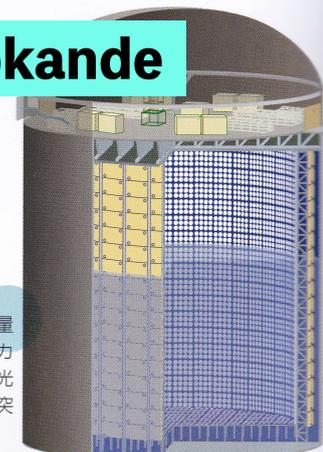
SK Atmos. Nu Oscil.

1999

K2K 実験開始

2001

太陽ニュートリノ振動を発見



A shocking event! Cosmos: AS simulation

ニュートリノ振動の発見

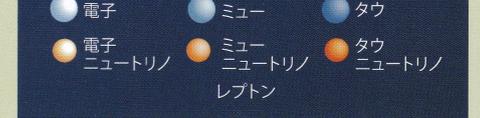
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

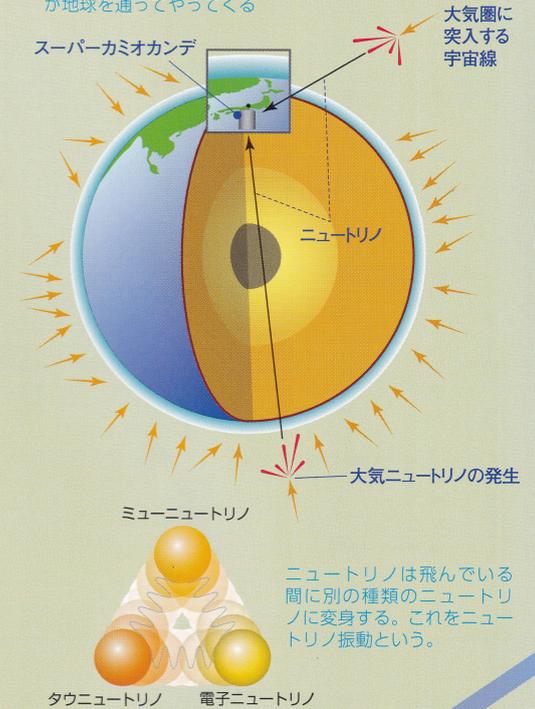
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

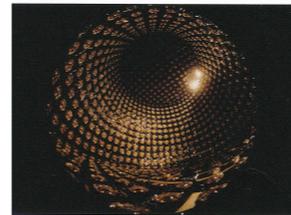
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

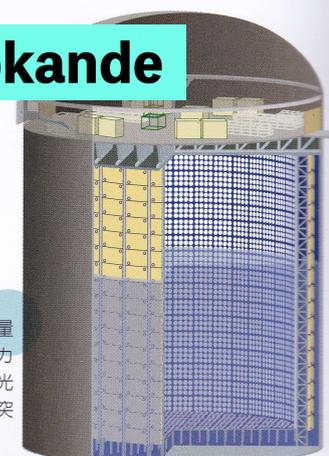
Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.

~1970

1983

Kamiokande started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9光を1万個の光センサーで検出する。



1987

Nu from SN 1987A

Super Kamiokande

SK Atmos. Nu Oscil.

1999

K2K 実験開始

1998

2001

太陽ニュートリノ振動を発見

A shocking event! Cosmos: AS simulation

High Mountain

Good $\Delta E, \Delta \theta$

ニュートリノ振動の発見

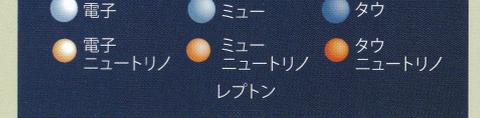
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

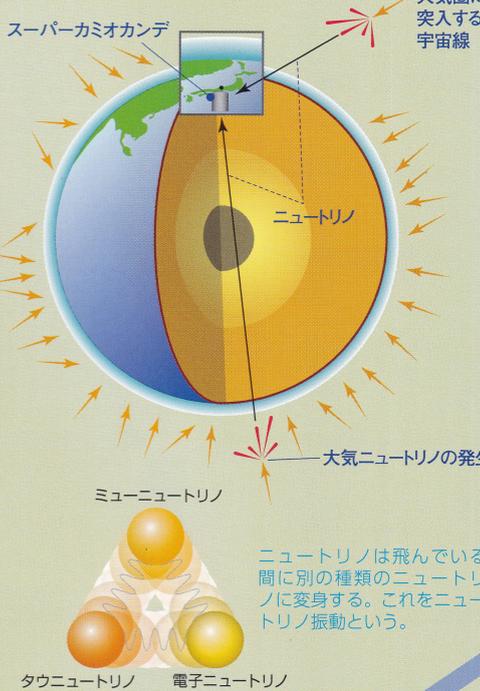
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

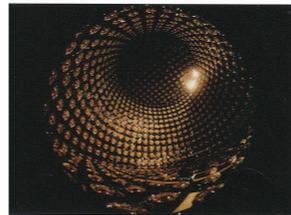
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

Cyg.X3 $> 10^{15}$ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.

~1970

1983 Kamiokande started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした電子が光を発生させる。この光を1万個の光センサーで検出する。

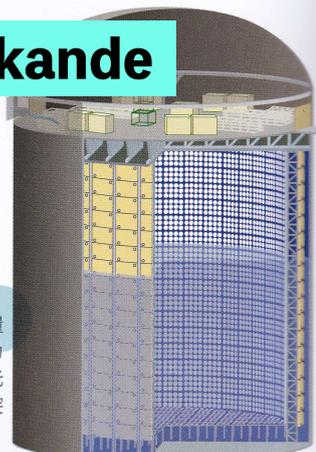
1987 Nu from SN 1987A

1996 Super Kamiokande

1998 SK Atmos. Nu Oscil.

1999 K2K 実験開始

2001 太陽ニュートリノ振動を発見



A shocking event! Cosmos: AS simulation

High Mountain

Good ΔE , $\Delta \theta$

PEGASAS project
(PeV Energy Gamma
ray Astronomy by
AS)

Cyg.X3 $> 10^{15}$ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.

~1970

ニュートリノ振動の発見

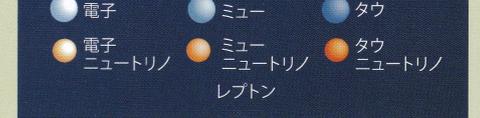
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

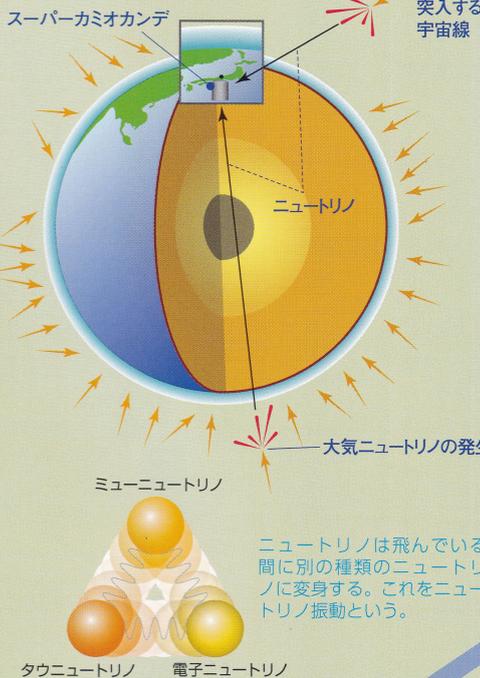
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

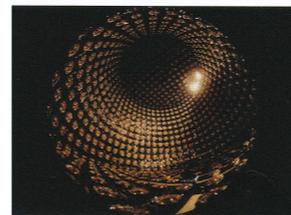
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

1983

Kamiokande started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9光を1万個の光センサーで検出する。

1987

Nu from SN 1987A

1996

Super Kamiokande

1998

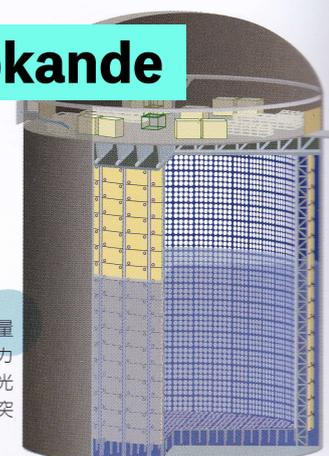
SK Atmos. Nu Oscil.

1999

K2K 実験開始

2001

太陽ニュートリノ振動を発見



A shocking event! Cosmos: AS simulation

High Mountain

Good ΔE , $\Delta \theta$

PEGASAS project
(PeV Energy Gamma
ray Astronomy by
AS)

Test at Mt. Norikura

Cyg.X3 $> 10^{15}$ eV γ
Samorski & Stamm: APJ Let.

~1970

ニュートリノ振動の発見

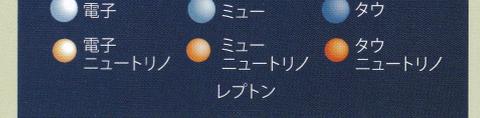
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

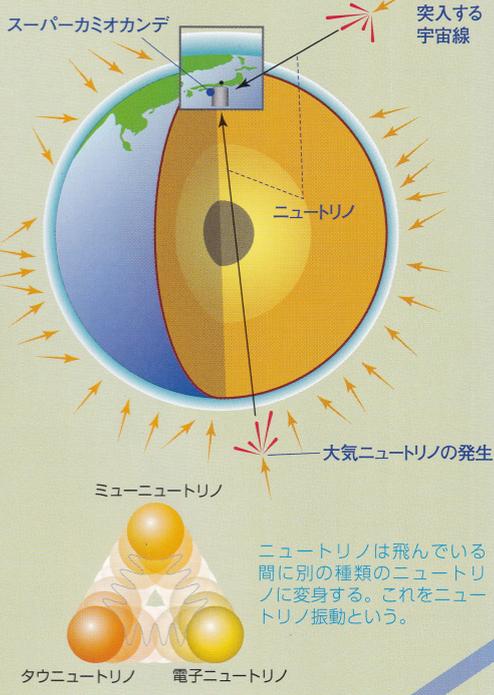
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となりました。

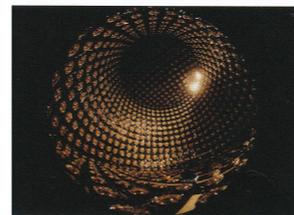
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

1983

Kamiokande started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9光を1万個の光センサーで検出する。

1987

Nu from SN 1987A

1996

Super Kamiokande

1998

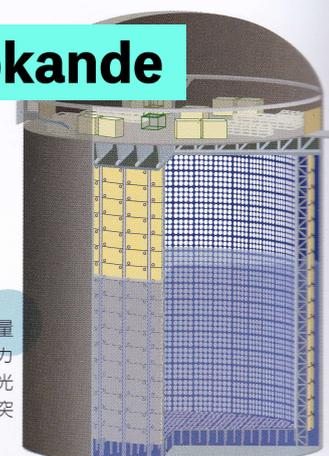
SK Atmos. Nu Oscil.

1999

K2K 実験開始

2001

太陽ニュートリノ振動を発見



A shocking event! Cosmos: AS simulation

High Mountain

Good ΔE , $\Delta \theta$

PEGASAS project
(PeV Energy Gamma
ray Astronomy by
AS)

Test at Mt. Norikura

Tibet ASg

Cyg.X3 $> 10^{15}$ eV γ
Samorski & Stamm: APJ Let.

~1970

ニュートリノ振動の発見

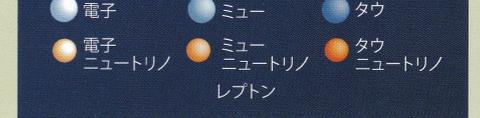
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

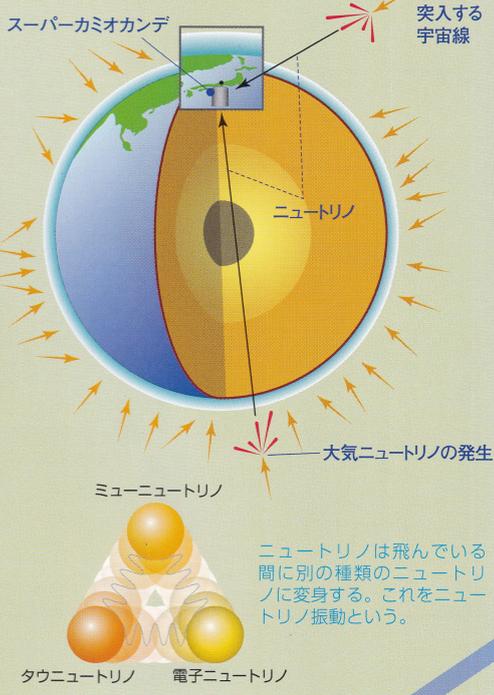
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となりました。

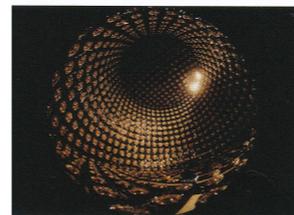
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

1983

KamioKANDE started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9元を1万個の光センサーで検出する。

1987

Nu from SN 1987A

1996

Super Kamiokande

1998

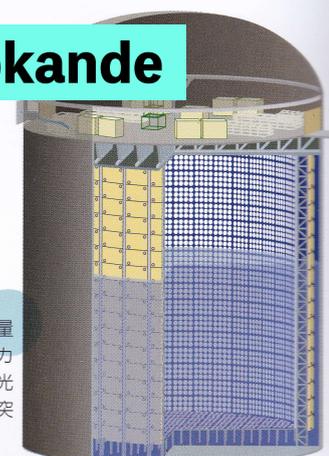
SK Atmos. Nu Oscil.

1999

K2K 実験開始

2001

太陽ニュートリノ振動を発見



A shocking event! Cosmos: AS simulation

High Mountain

Good ΔE , $\Delta \theta$

PEGASAS project
(PeV Energy Gamma
ray Astronomy by
AS)

Test at Mt. Norikura

Tibet ASg

Cyg.X3 $> 10^{15}$ eV γ
Samorski & Stamm: APJ Let.

~1970

ニュートリノ振動の発見

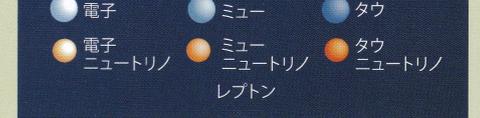
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

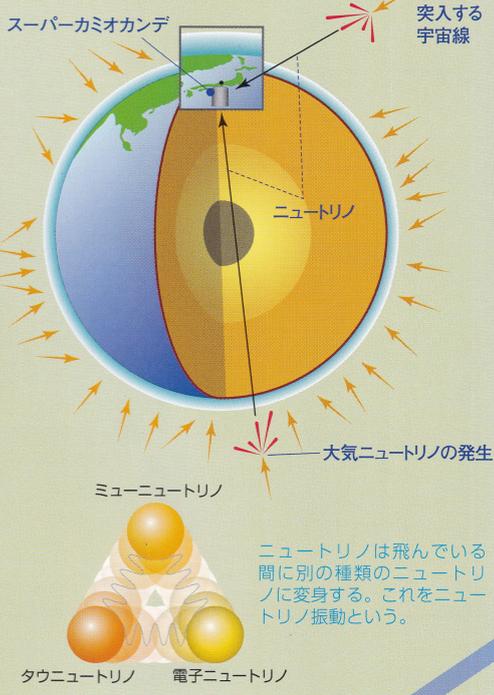
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

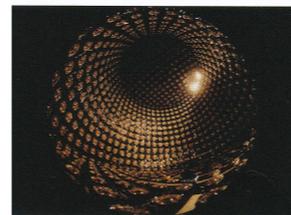
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

1983

KamioKande started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは、巨大な水タンクの内部に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9光を1万個の光センサーで検出する。

1987

Nu from SN 1987A

1996

Super Kamiokande

1998

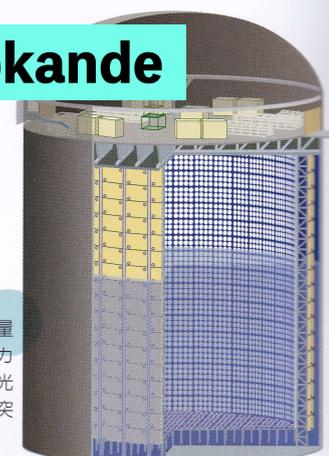
SK Atmos. Nu Oscil.

1999

K2K 実験開始

2001

太陽ニュートリノ振動を発見



A shocking event! Cosmos: AS simulation

High Mountain

Good $\Delta E, \Delta \theta$

PEGASAS project
(PeV Energy Gamma
ray Astronomy by
AS)

Test at Mt. Norikura

Tibet ASg

>100TeV g ; 5 sigama

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

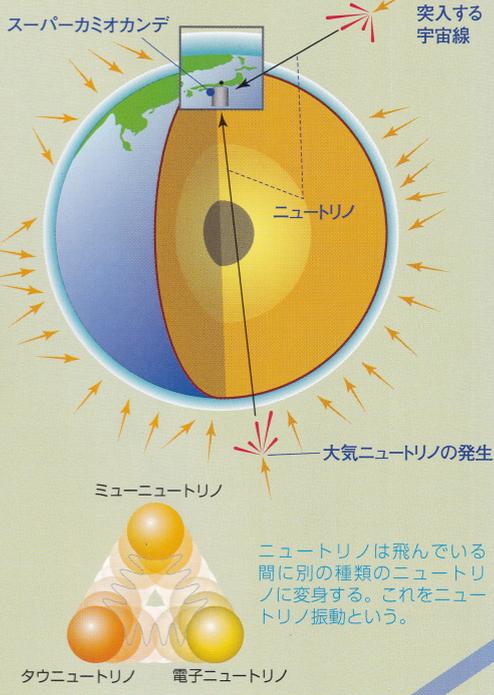
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となりました。

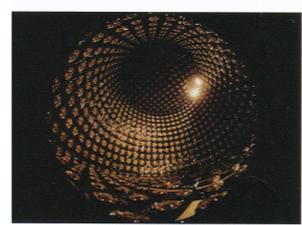
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



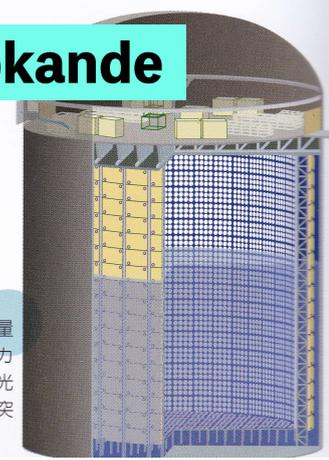
カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

Cyg.X3 >10¹⁵ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.

1983 Kamiokande started

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内壁に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、弾き飛ばした光子が9割を1万個の光センサーで検出する。



1989 Tibet ASg construction

1987 Nu from SN 1987A

1996 Super Kamiokande

1998 SK Atmos. Nu Oscil.

1999 K2K 実験開始

2001 太陽ニュートリノ振動を発見

1970

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

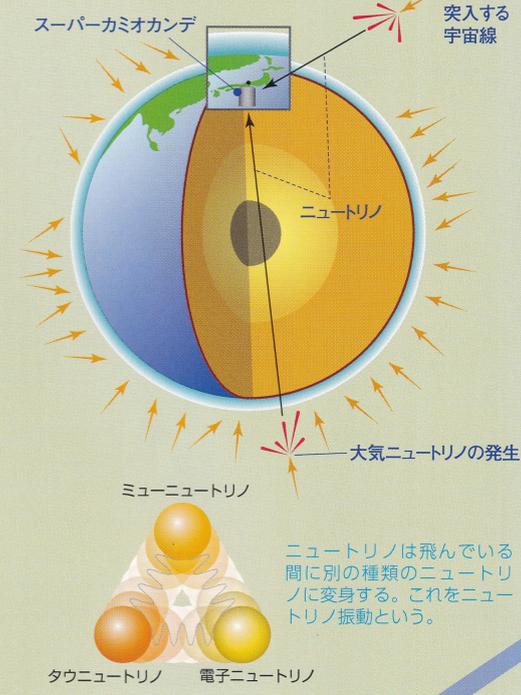
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

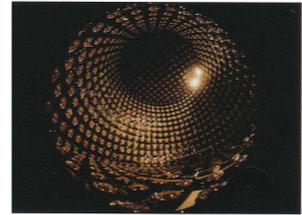
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる

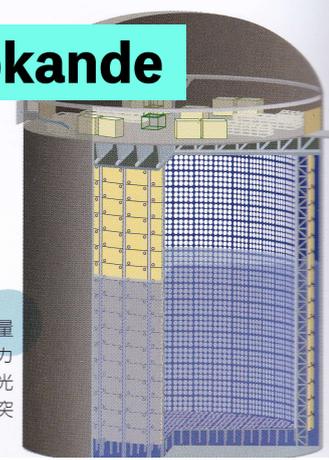


神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験
易子崩壊探索の邪魔になる大気ニュートリノの研究をすすめる中で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

- ~1970 Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983 Kamiokande started
- 1987 Nu from SN 1987A
- 1996 Super Kamiokande
- 1998 SK Atmos. Nu Oscil.
- 1999 K2K 実験開始
- 2001 太陽ニュートリノ振動を発見



カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーを配置し、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して生じるチェレンコフ放射をこの光センサーで検出する。

ニュートリノ振動の発見

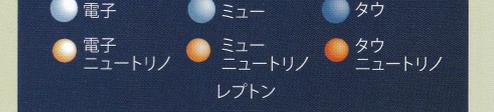
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

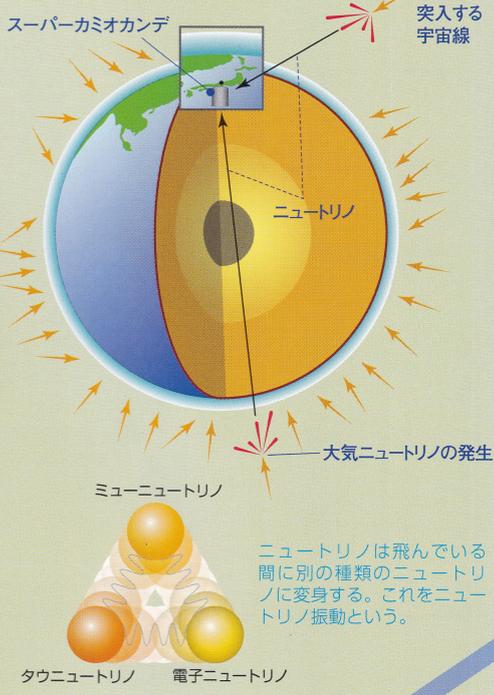
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。

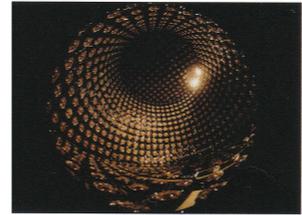


宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

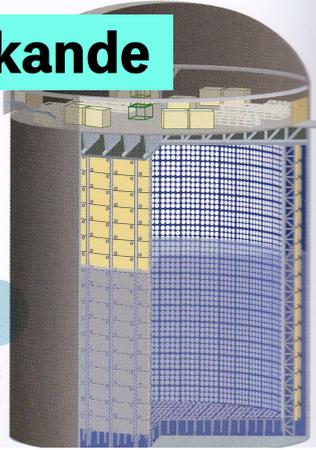
- ~1970: **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ**
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started**
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: 太陽ニュートリノ振動を発見



スーパーカミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生するチェレンコフ放射をこの光センサーで検出する。



Fukugita came to me: (~1986?)

ニュートリノ振動の発見

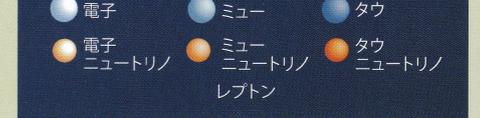
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

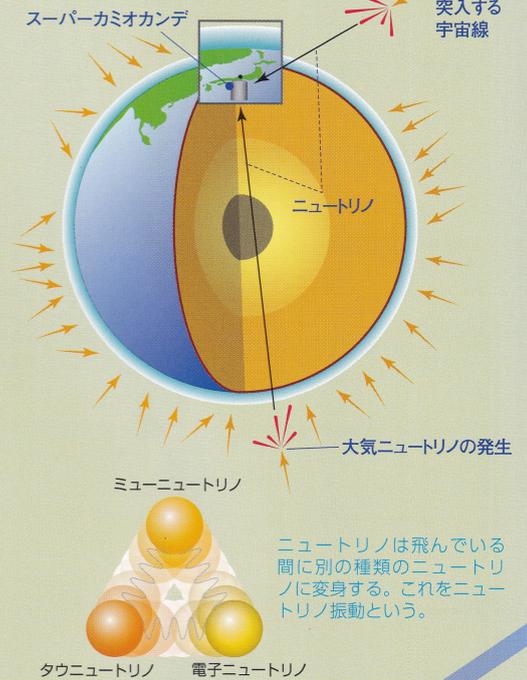
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

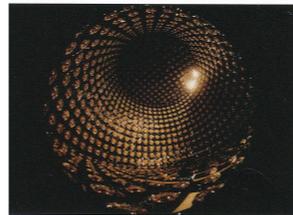
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験

Tibet ASg construction 1989

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

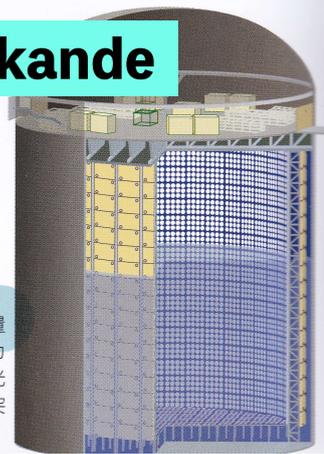
1987 Nu from SN 1987A

Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.

1983 Kamiokande started Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.

~1970

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生する微弱な光を捉え、検出する。



2001 太陽ニュートリノ振動を発見

1999 K2K 実験開始

1998 SK Atmos. Nu Oscil.

1996 Super Kamiokande

Fukugita came to me: (~1986?)

★ ν gun smoke @ Kamioka

ニュートリノ振動の発見

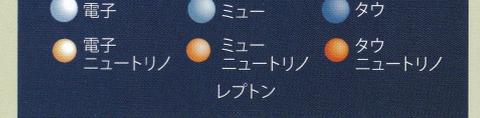
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかいないことを発見しました。

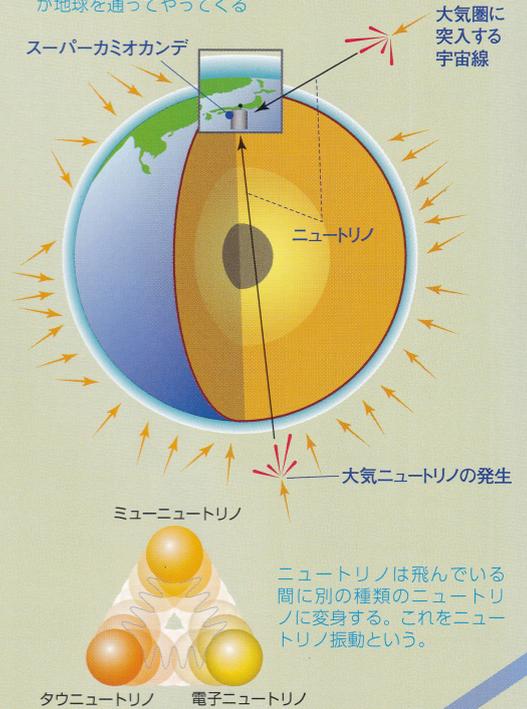
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

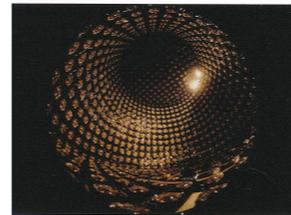
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験

Tibet ASg construction 1989

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.

1983

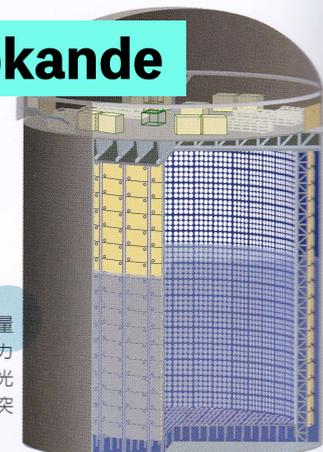
Kamiokande started

Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ

Samorski & Stamm:APJ Let.

~1970

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が終段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突して、輝き放たれる光を検出する。



1999 K2K 実験開始

1998 **SK Atmos. Nu Oscil.**

1996 **Super Kamiokande**

1987 **Nu from SN 1987A**

2001 太陽ニュートリノ振動を発見

Fukugita came to me: (~1986?)

★ ν gun smoke @ Kamioka

★ ν is much more important than γ

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかいないことを発見しました。

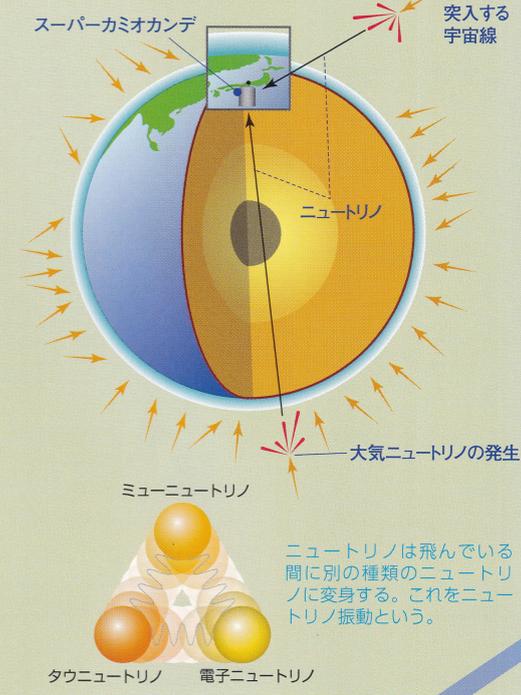
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。

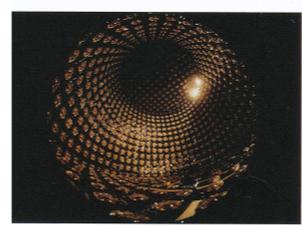


宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

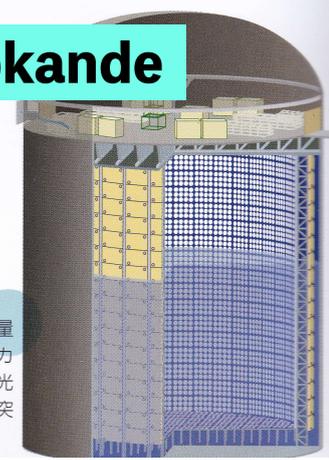
- ~1970: **Cyg.X3 >10¹⁵ eV γ**
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started**
Cyg.X3 >10¹⁵ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction 1989**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: **K2K 実験開始**
- 2001: **太陽ニュートリノ振動を発見**



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生するチェレンコフ放射をこの光センサーで検出する。



Fukugita came to me: (~1986?)

★ ν gun smoke @ Kamioka

★ ν is much more important than γ

★ Should calculate ν

ニュートリノ振動の発見

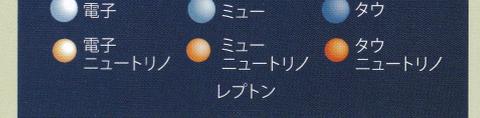
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかいないことを発見しました。

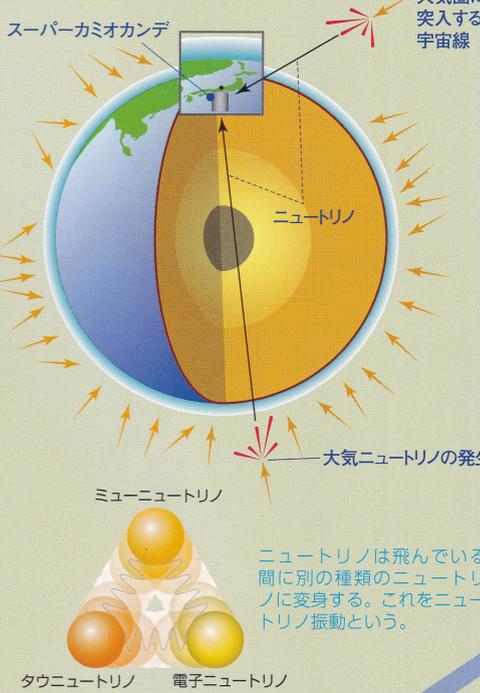
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となりました。

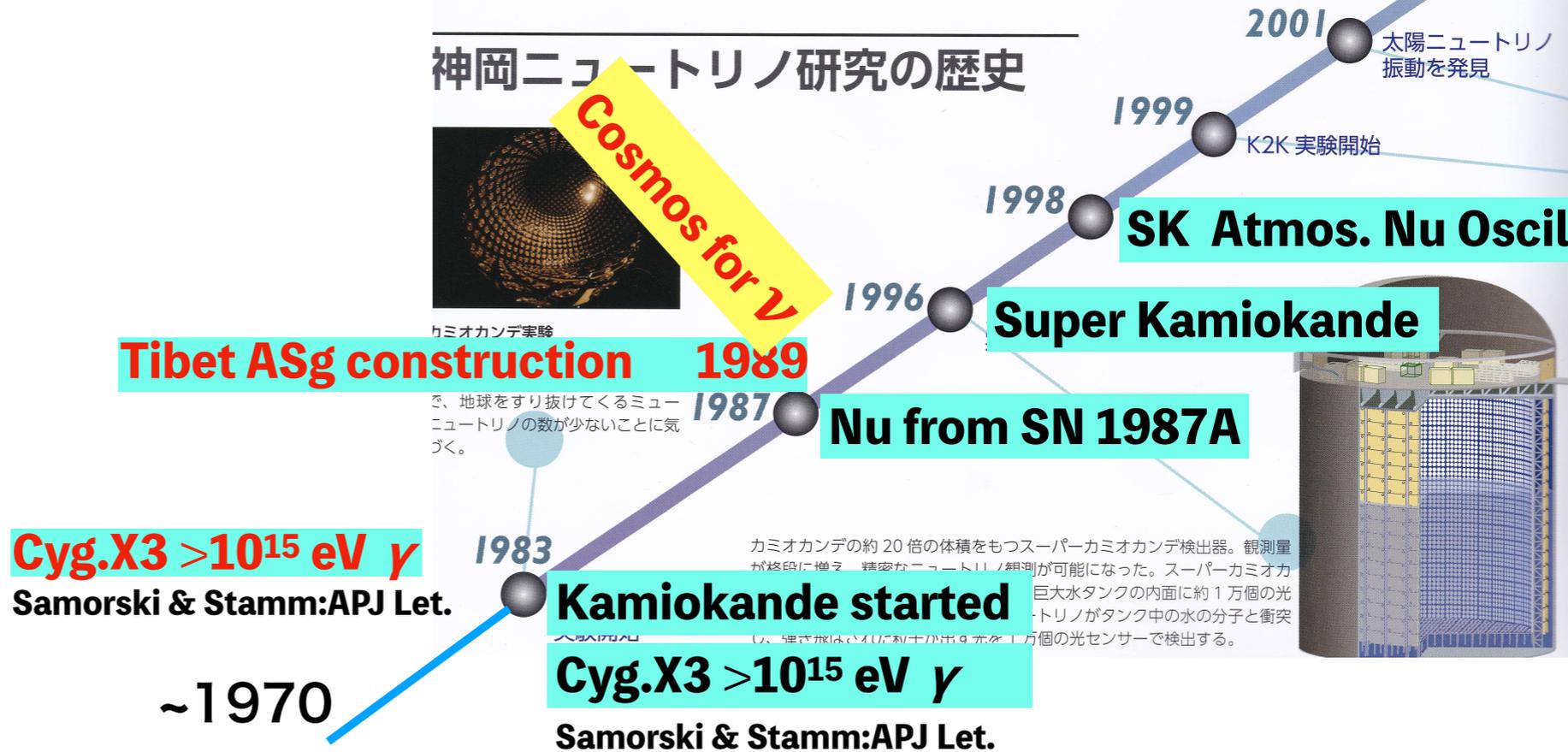
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



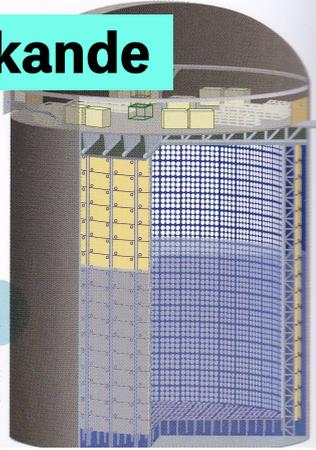
神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突して、輝き散らす光子を検出する。



ニュートリノ振動の発見

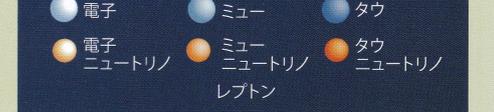
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

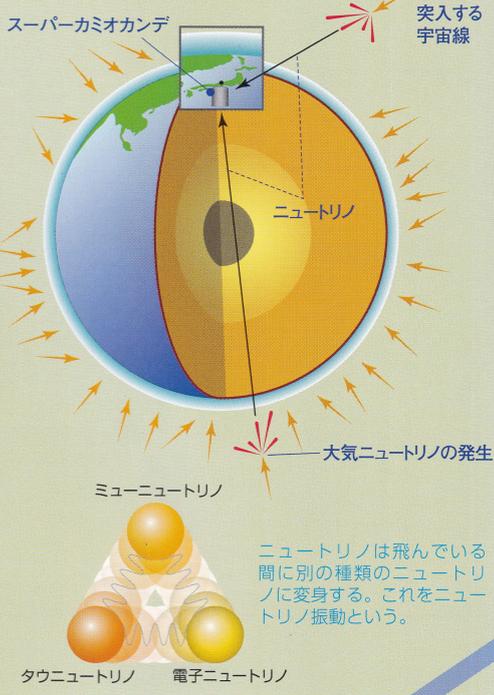
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。

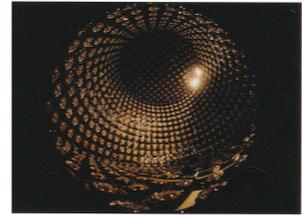


宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

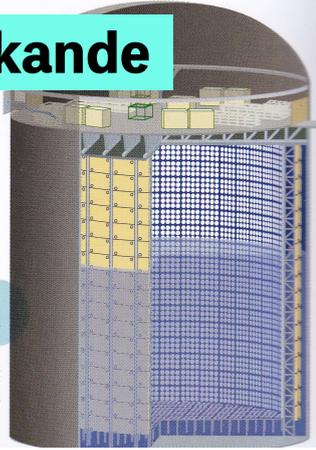
- ~1970: **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ**
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started**
Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: 太陽ニュートリノ振動を発見



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生するチェレンコフ放射をこの光センサーで検出する。



●Honda joined in the calculation

●The driving force

ニュートリノ振動の発見

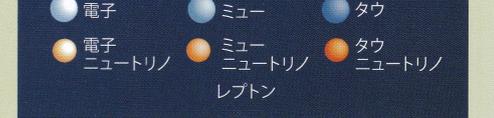
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

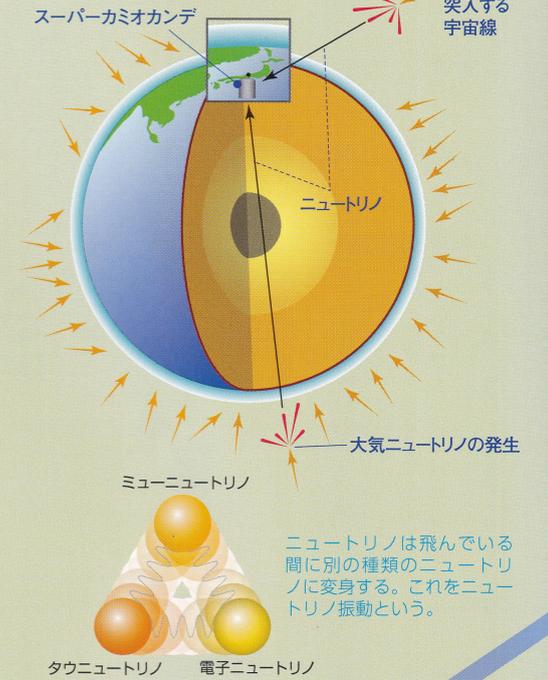
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

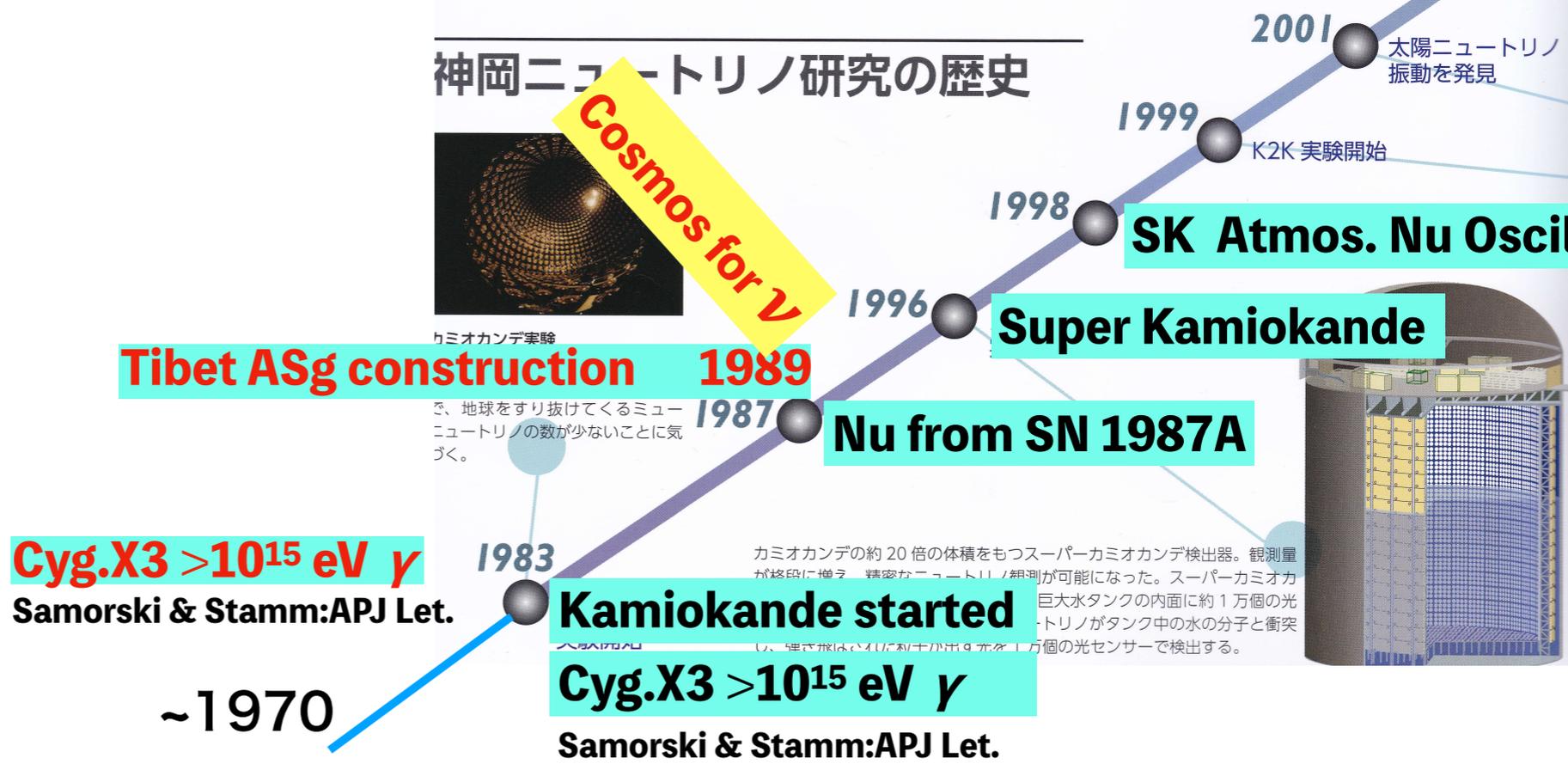
大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



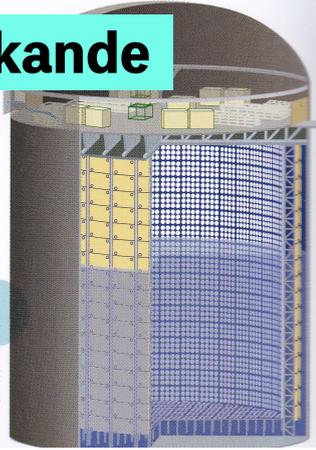
神岡ニュートリノ研究の歴史



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられ、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生するチェレンコフ放射を捉え、検出する。



● Honda joined in the calculation

● The driving force

● Atmospheric Neutrino Fluxes

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

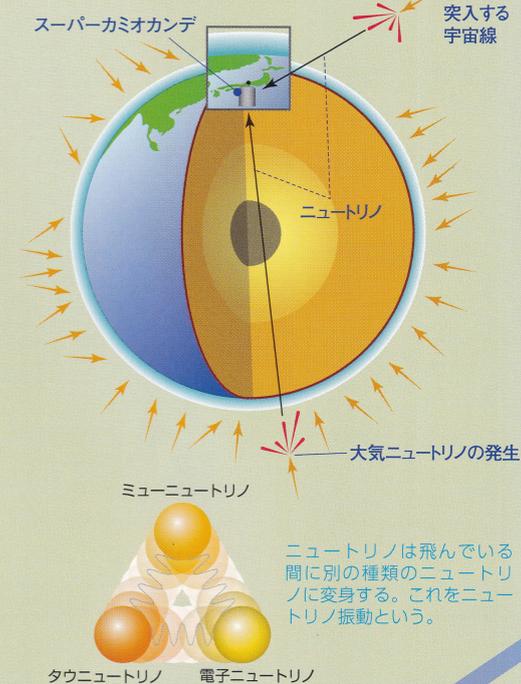
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

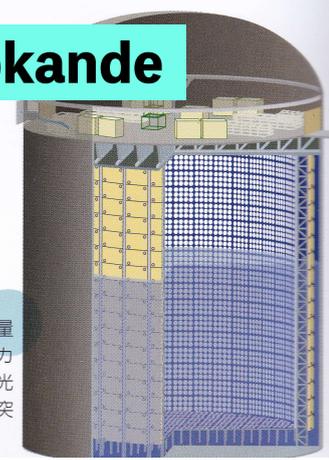
- ~1970: Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: Kamiokande started Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: Nu from SN 1987A
- 1989: Tibet ASg construction
- 1996: Super Kamiokande
- 1998: SK Atmos. Nu Oscil.
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: 太陽ニュートリノ振動を発見



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が3桁に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは、巨大な水タンクの内部に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生する光を捉えることで検出される。



● Honda joined in the calculation

● The **driving force**

● **Atmospheric Neutrino Fluxes**

● H, K, Hidaka, Midorikawa

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

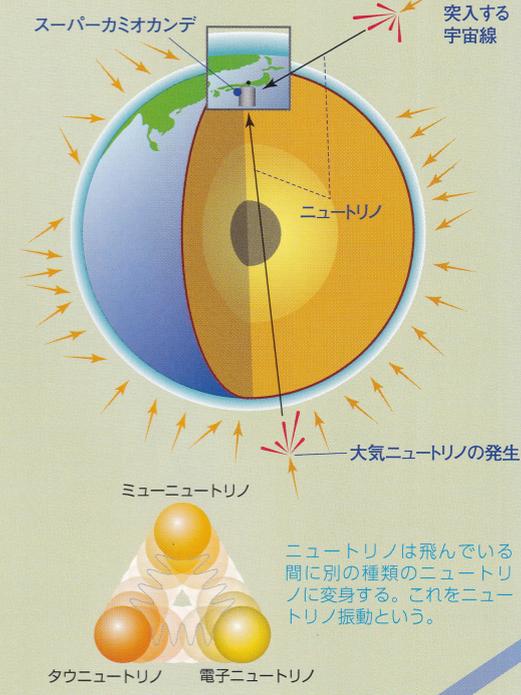
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

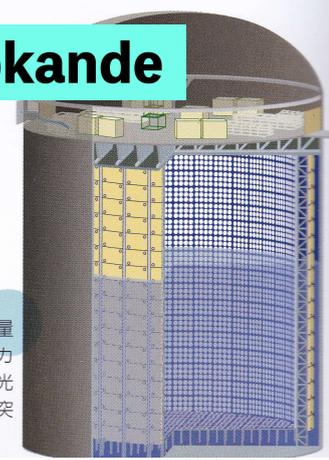
- ~1970: **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ** Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started** **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ** Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: **太陽ニュートリノ振動を発見**



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生するチェレンコフ放射をこの光センサーで検出する。



● Honda joined in the calculation

● The driving force

● Atmospheric Neutrino Fluxes

● H, K, Hidaka, Midorikawa

● Phys. Lett. B 1990

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

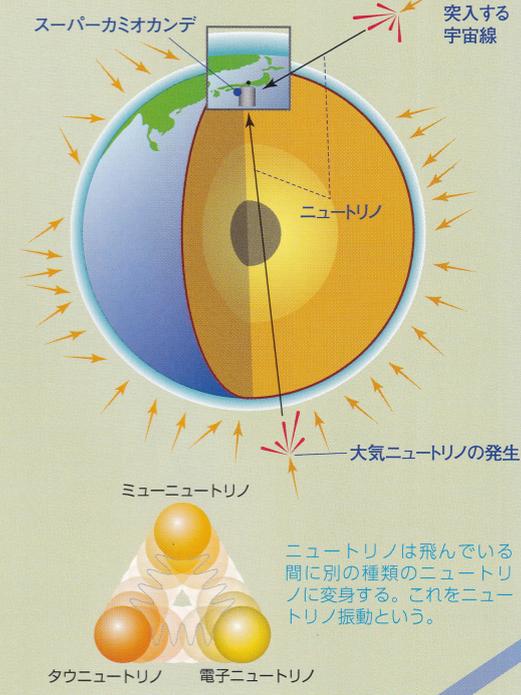
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

~1970 Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.

1983 Kamiokande started Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.

1987 Nu from SN 1987A

1989 Tibet ASg construction

1996 Super Kamiokande

1998 SK Atmos. Nu Oscil.

1999 K2K 実験開始

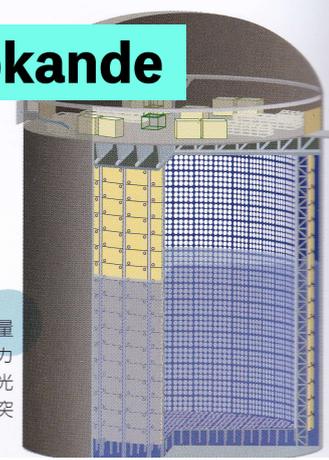
2001 太陽ニュートリノ振動を発見



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が3桁に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカデは、巨大な水タンクの内部に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突して、輝き放たれる光を検出する。



- Honda joined in the calculation

- The **driving force**

- **Atmospheric Neutrino Fluxes**

- H, K, Hidaka, Midorikawa

- Phys. Lett. B 1990

- Included muon polarization

ニュートリノ振動の発見

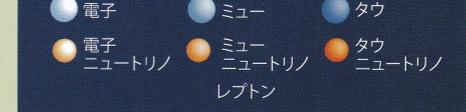
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

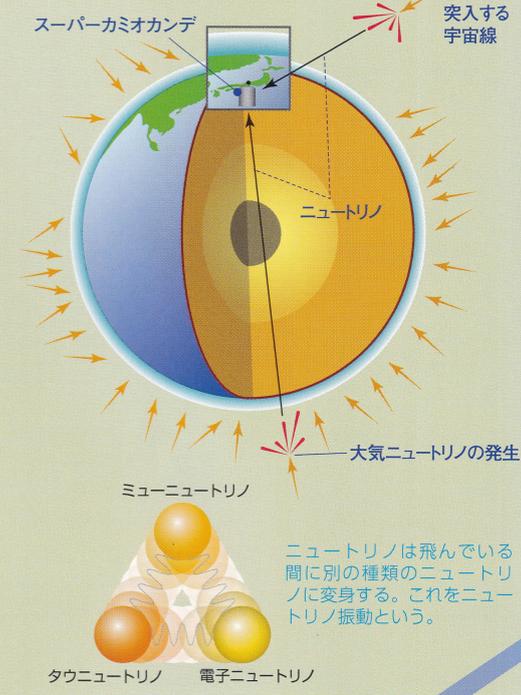
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

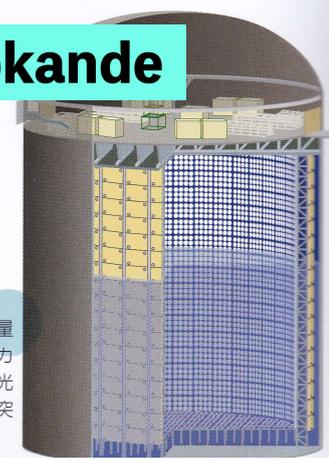
- ~1970: Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: Kamiokande started Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: Nu from SN 1987A
- 1989: Tibet ASg construction
- 1996: Super Kamiokande
- 1998: SK Atmos. Nu Oscil.
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: 太陽ニュートリノ振動を発見



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が3桁に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカデは、巨大な水タンクの内部に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突して、発生する微弱な光を検出する。



- Honda joined in the calculation
- The **driving force**
- **Atmospheric Neutrino Fluxes**
- H, K, Hidaka, Midorikawa
- Phys. Lett. B 1990
- Included muon polarization
- Comparison with Barr et al.

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

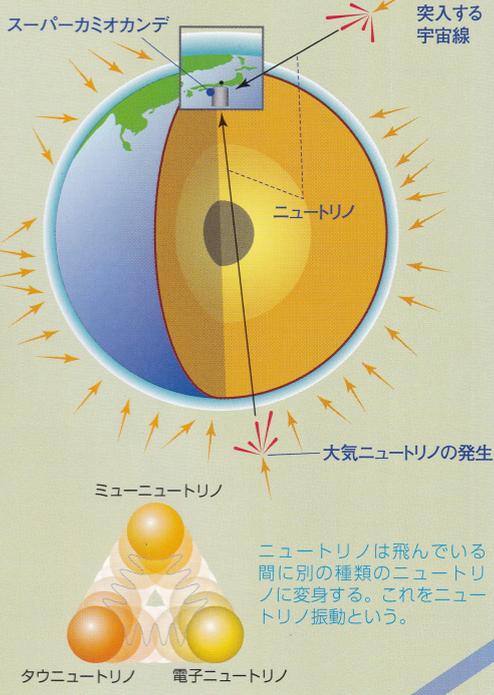
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

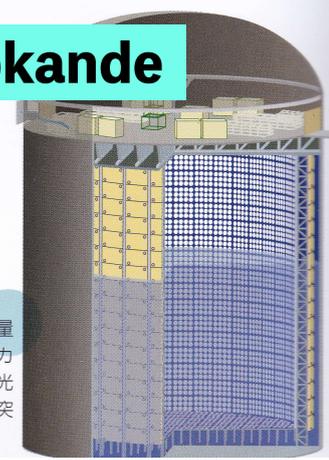
- ~1970: **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ** Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started** **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ** Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: **太陽ニュートリノ振動を発見**



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が3桁に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられ、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生するチェレンコフ放射を捉え、検出する。



- Honda joined in the calculation
- The **driving force**
- **Atmospheric Neutrino Fluxes**
- H, K, Hidaka, Midorikawa
- Phys. Lett. B 1990
- Included muon polarization
- Comparison with Barr et al.
- Discussed ν oscillation

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

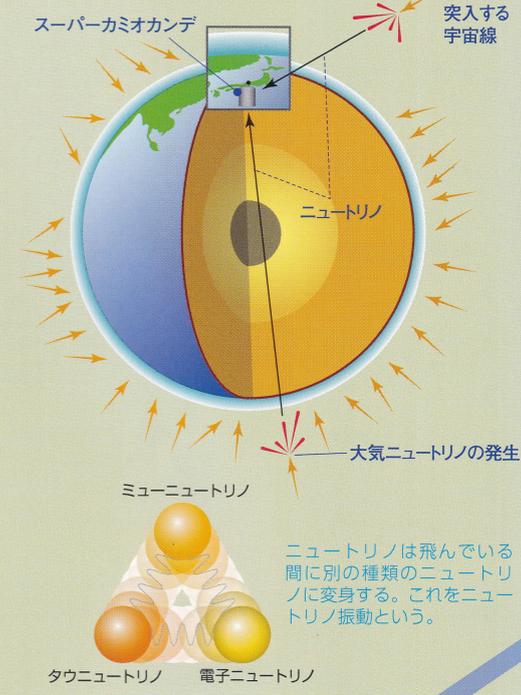
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

- ~1970: **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ** Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started** **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ** Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: **K2K 実験開始**
- 2001: **太陽ニュートリノ振動を発見**

カミオカンデ実験
で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、発生するチェレンコフ放射を1万個の光センサーで検出する。

- Honda joined in the calculation

- The **driving force**

- Atmospheric Neutrino Fluxes

- H, K, Hidaka, Midorikawa

- Phys. Lett. B 1990

- Included muon polarization

- Comparison with Barr et al.

- Discussed ν oscillation

- Masses of neutrinos suggested from the anomalous atmospheric neutrino

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

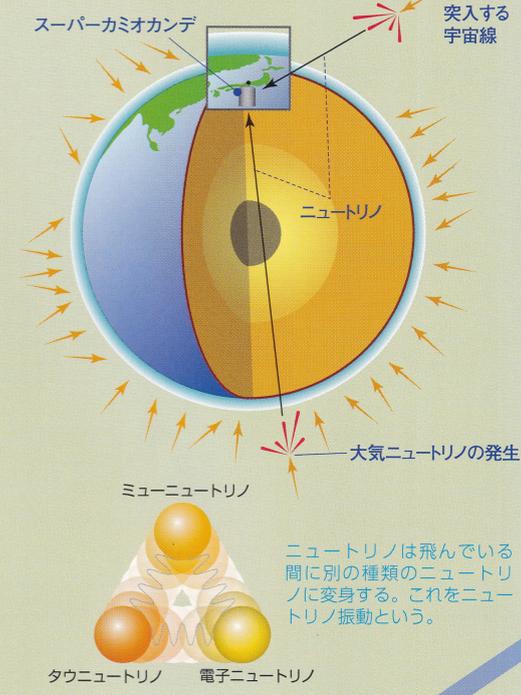
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



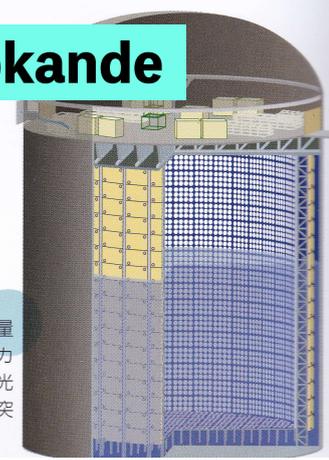
Cosmos for ν

1987
1989
1987

Nu from SN 1987A

Super Kamiokande

SK Atmos. Nu Oscil.



Super-Kamiokande started

ν flux $> 10^{15}$ eV γ

Imorski & Stamm:APJ Let.

2001
2001
2001
太陽ニュートリノ振動を発見

1999
1999
K2K 実験開始

1998
1998

1996
1996

1989
1989

1987
1987

- Honda joined in the calculation

- The **driving force**

- Atmospheric Neutrino Fluxes

- H, K, Hidaka, Midorikawa

- Phys. Lett. B 1990

- Included muon polarization

- Comparison with Barr et al.

- Discussed ν oscillation

- Masses of neutrinos suggested from the anomalous atmospheric neutrino

- Midorikawa, Honda, Kasahara

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

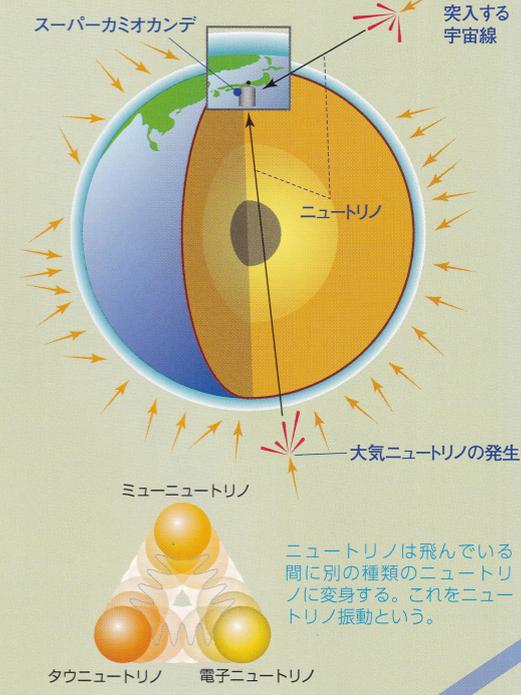
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



Cosmos for ν

1987 **Nu from SN 1987A**

1989 **on 1989**

1996 **Super Kamiokande**

1998 **SK Atmos. Nu Oscil**

1999 **K2K 実験開始**

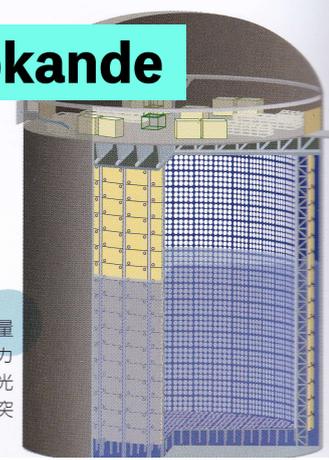
2001 **太陽ニュートリノ振動を発見**

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは、巨大な水タンクの内部に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して生じるチェレンコフ放射を、この1万個の光センサーで検出する。

Super Kamiokande started

yg.X3 > 10¹⁵ eV γ

morski & Stamm:APJ Let.



- Honda joined in the calculation

- The **driving force**

- Atmospheric Neutrino Fluxes

- H, K, Hidaka, Midorikawa

- Phys. Lett. B 1990

- Included muon polarization

- Comparison with Barr et al.

- Discussed ν oscillation

- Masses of neutrinos suggested from the anomalous atmospheric neutrino

- Midorikawa, Honda, Kasahara

- Phys. Rev.D 1991

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

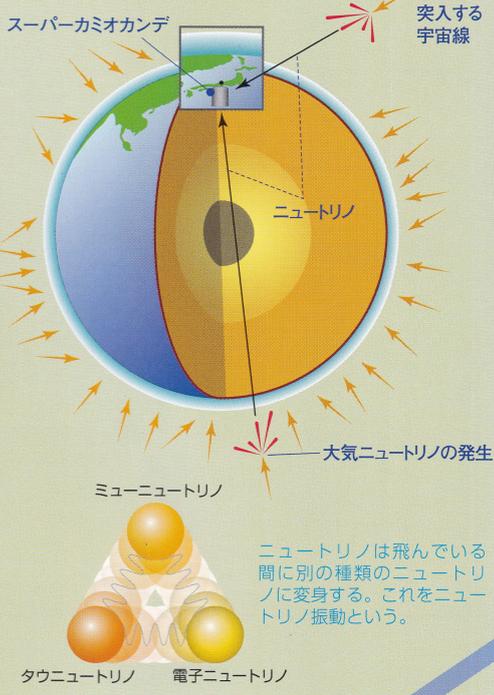
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



Cosmos for ν

1987
1989

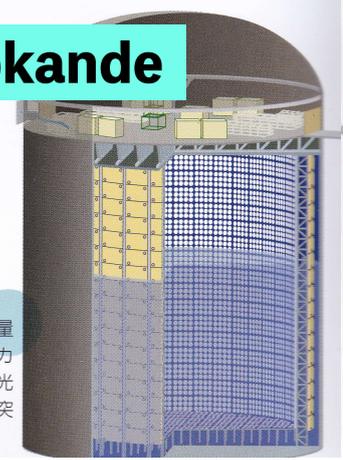
Nu from SN 1987A

Super Kamiokande

SK Atmos. Nu Oscil.

1999
K2K 実験開始

2001
太陽ニュートリノ振動を発見



Super-Kamiokande started

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$

Phys. Rev. Lett. 77:1603 (1996)

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは、巨大水タンクの内部に約1万個の光センサーを配し、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して生じる光を1万個の光センサーで検出する。

- Honda joined in the calculation

- The **driving force**

- Atmospheric Neutrino Fluxes

- H, K, Hidaka, Midorikawa

- Phys. Lett. B 1990

- Included muon polarization

- Comparison with Barr et al.

- Discussed ν oscillation

- Masses of neutrinos suggested from the anomalous atmospheric neutrino

- Midorikawa, Honda, Kasahara

- Phys. Rev.D 1991

- Discussed ν mass

ニュートリノ振動の発見

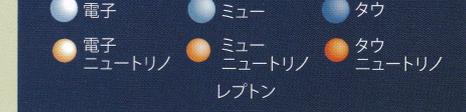
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

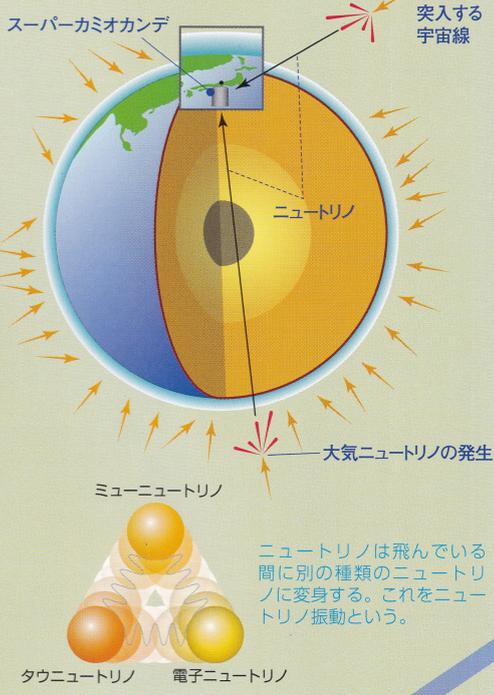
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史



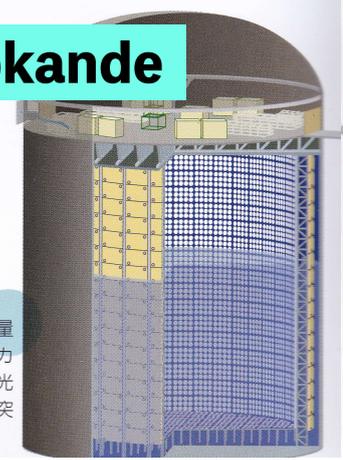
Cosmos for ν

1987
1989

Nu from SN 1987A

Super Kamiokande

SK Atmos. Nu Oscil.



Super Kamiokande started

ν flux $> 10^{15} \text{ eV } \gamma$

Imorski & Stamm:APJ Let.

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは巨大水タンクの内部に約1万個の光センサーを配置し、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生する光を捉える。検出器は約1万個の光センサーで検出する。

2001 太陽ニュートリノ振動を発見

1999 K2K 実験開始

1998

1996

1989

1987

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

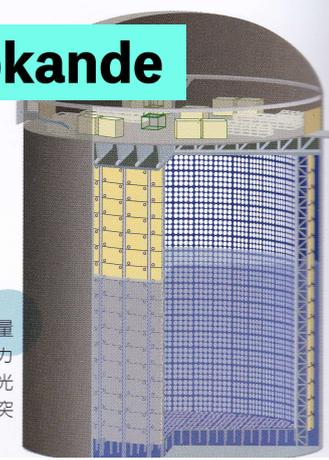
- ~1970: **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ**
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started**
Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ
Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: **太陽ニュートリノ振動を発見**



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生するチェレンコフ放射を捉え、検出する。



ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないことを発見しました。

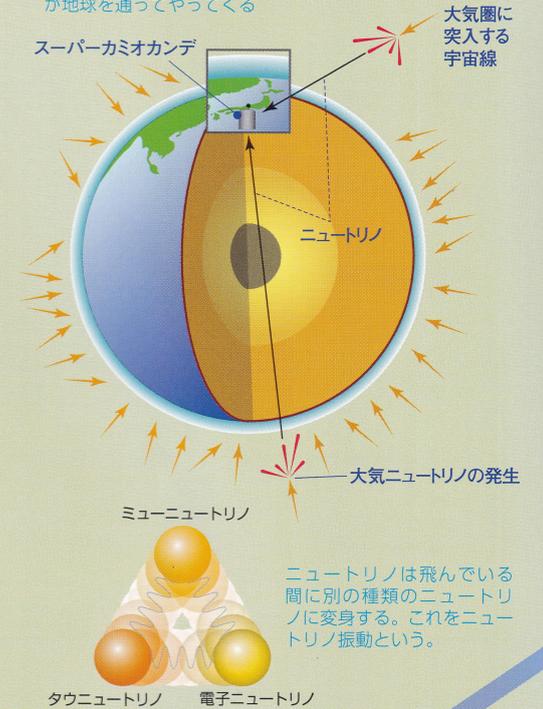
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となったのです。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

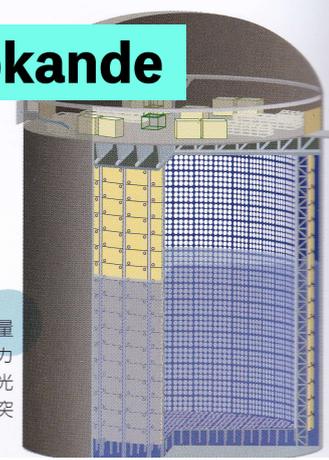
- ~1970: **Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ** Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: **Kamiokande started** Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: **Nu from SN 1987A**
- 1989: **Tibet ASg construction**
- 1996: **Super Kamiokande**
- 1998: **SK Atmos. Nu Oscil.**
- 1999: **K2K 実験開始**
- 2001: **太陽ニュートリノ振動を発見**



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカ巨大水タンクの内面に約1万個の光センサーがタンク中の水の分子と衝突し、発生する光を1万個の光センサーで検出する。



★ Volkova:

★ Importance of pol. for ν_e/ν_μ

ニュートリノ振動の発見

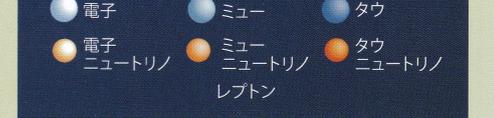
ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

1998年梶田氏らは大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

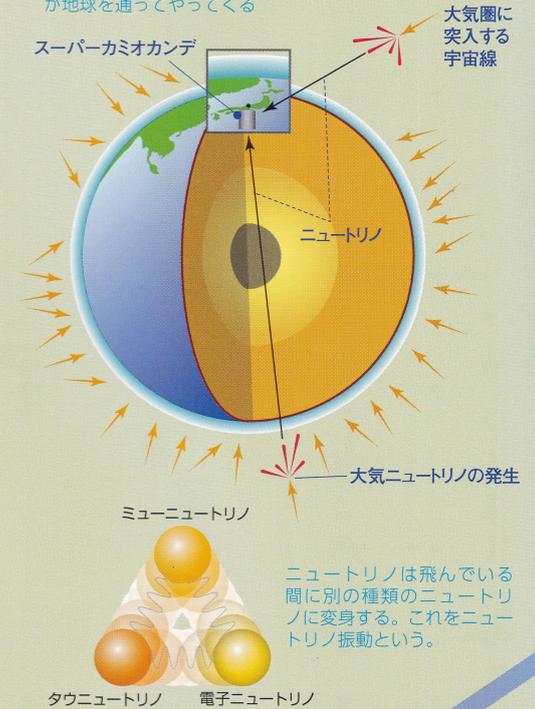
これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノがゼロでない質量を持つという決定的な証拠となりました。

大気ニュートリノ振動の発見は素粒子理論の定説を覆し、新しい物理への扉を開きました。この成果が認められて今回のノーベル賞受賞となりました。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通過してやってくる



神岡ニュートリノ研究の歴史

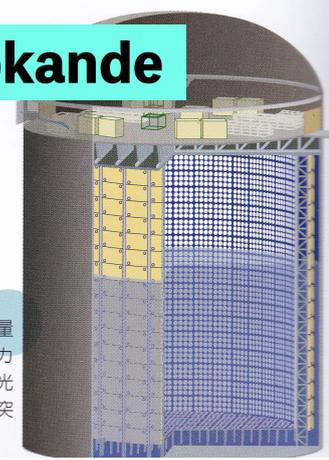
- ~1970: Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1983: Kamiokande started Cyg.X3 > 10¹⁵ eV γ Samorski & Stamm:APJ Let.
- 1987: Nu from SN 1987A
- 1989: Tibet ASg construction
- 1996: Super Kamiokande
- 1998: SK Atmos. Nu Oscil.
- 1999: K2K 実験開始
- 2001: 太陽ニュートリノ振動を発見



カミオカンデ実験

で、地球をすり抜けてくるミューニュートリノの数が少ないことに気づく。

カミオカンデの約20倍の体積をもつスーパーカミオカンデ検出器。観測量が格段に増え、精密なニュートリノ観測が可能になった。スーパーカミオカンデは、巨大な水タンクの内部に約1万個の光センサーが取り付けられており、ニュートリノがタンク中の水の分子と衝突して発生する光を捉えることで検出される。



★Volkova:

★Importance of pol. for ν_e/ν_μ

★Cosmic gamma rays, neutrinos and related astrophysics. Proc. Nato Advanced Study, 1988

A COMMENT ON ν_e/ν_μ RATIO IN ATMOSPHERIC NEUTRINO FLUXES

L.V. Volkova
Institute for Nuclear Research
Academy of Sciences of U.S.S.R.
60th October Anniversary, pr. 7a
Moscow 117312
U.S.S.R.

ABSTRACT. It is shown that experimentally measured ratio of atmospheric electron-neutrino flux to that of muon-neutrinos and expected theoretical ratio do not contradict each other if muon polarization is taken into account in calculations.

The accuracy of calculations of the ratio of electron ($\nu_e + \bar{\nu}_e$) to muon ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$) atmospheric neutrino fluxes can be better than that for fluxes themselves. This accuracy is better than 5%.

ニュートリノ振動の発見

ニュートリノは素粒子の一種です。3種類あるニュートリノは非常に軽く、長い間その質量はゼロだと考えられていました。

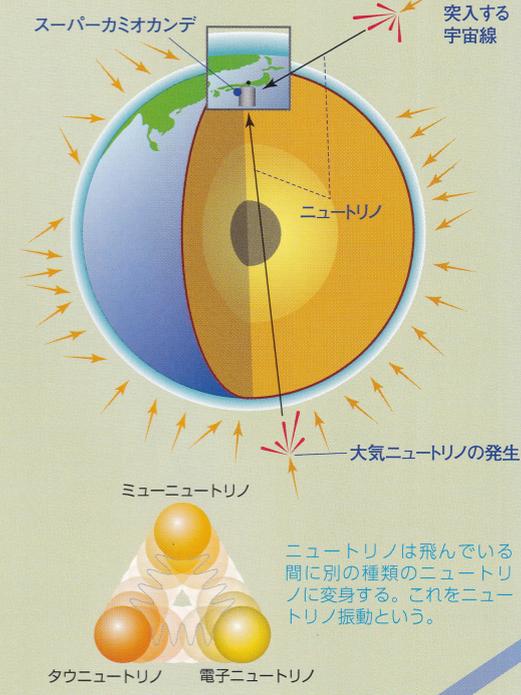
1998年梶田氏は大気ニュートリノの観測から、地球の裏側で作られて長い距離を飛んできたニュートリノの数が、検出器のすぐ真上から降ってくるニュートリノの数に比べて、約半分しかないと発見しました。

これは、ニュートリノが飛んでいる間に別の種類のニュートリノに変身してしまう「ニュートリノ振動」という現象によるものでした。地球の裏側で生まれたミューニュートリノが地球内部を走っている間に、タウニュートリノに変身してしまったため、ミューニュートリノが減っているようにみえていたのです。

ニュートリノ振動は、ニュートリノに質量があるときだけ起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノに質量があるという証拠となった。



宇宙から降ってくる宇宙線が地球上の大気と衝突して大気ニュートリノが生まれる。ニュートリノはなんでもすり抜けるので、地球の裏側で生まれた大気ニュートリノが地球を通ってやってくる



の歴史



PJ Let.

★ She was invited in 1995 by Arafune-san

★ She was invited in 1995 by Arafune-san



Had. Interaction models in before ~1999

<5GeV: NUCRIN

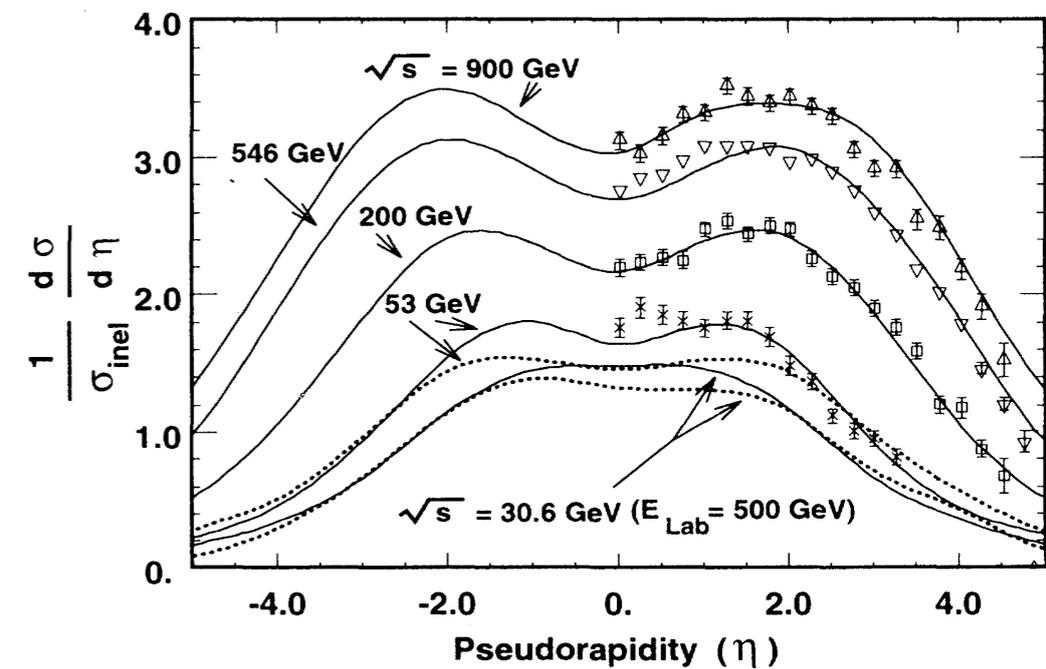
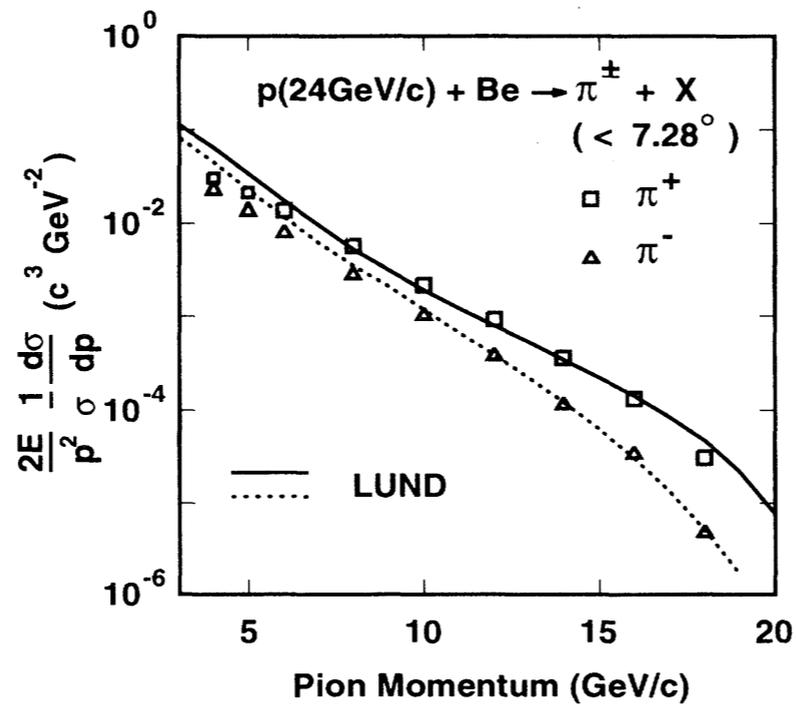
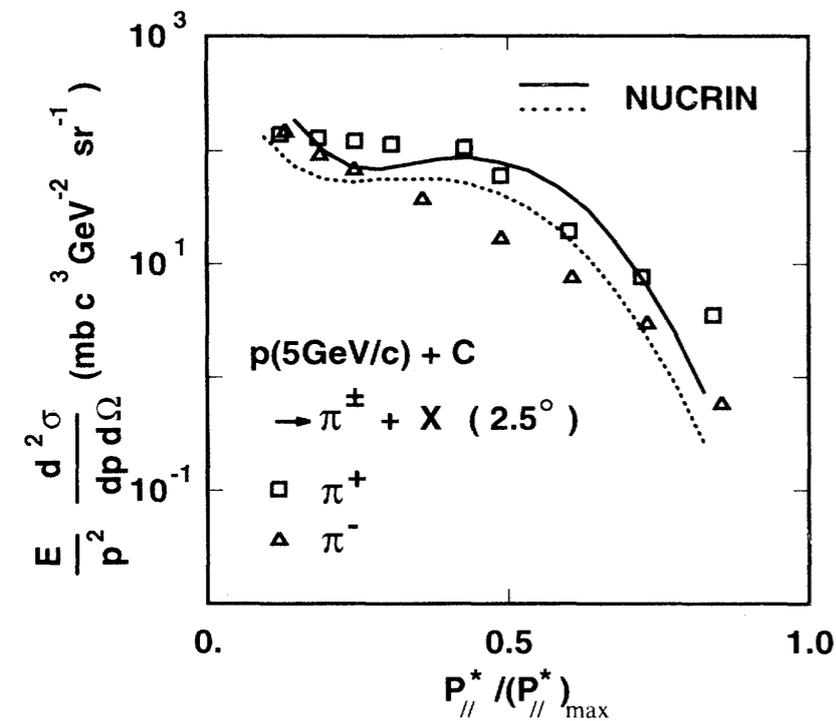
5~500 GeV: Lund Fritiof1.6+Jetset6.3

>500 GeV: ad-hoc model (sometime referred as Cosmos model; ~UA5 model)

pC p=5.1 GeV/c

pBe p=24 GeV/c

pp=1.4~400 TeV



Two problems

- **Event generation: time-consuming**
- **Modification of code: difficult**

For ν , only **inclusive** spectrum is enough

Honda made such inclusive spectra for all these models

==> **new code: ATMNC**

==> **Two problems much relaxed**

Since we don't know experimental details, we asked Kajita-san's help: ==> HKKM papers (Honda, Kajita, Kasahara, Midorikawa)

First paper by ATMNC

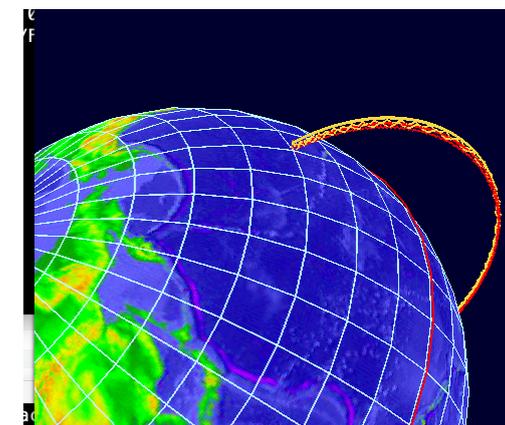
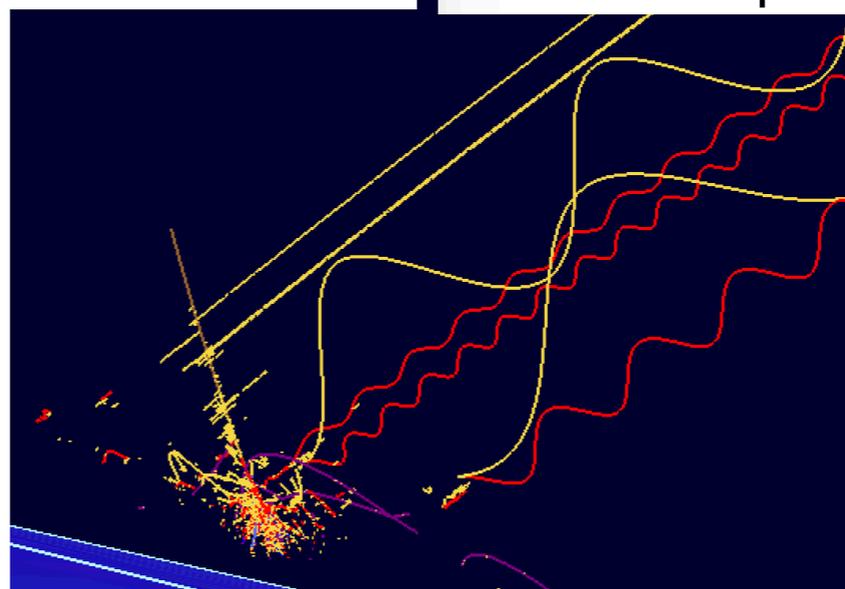
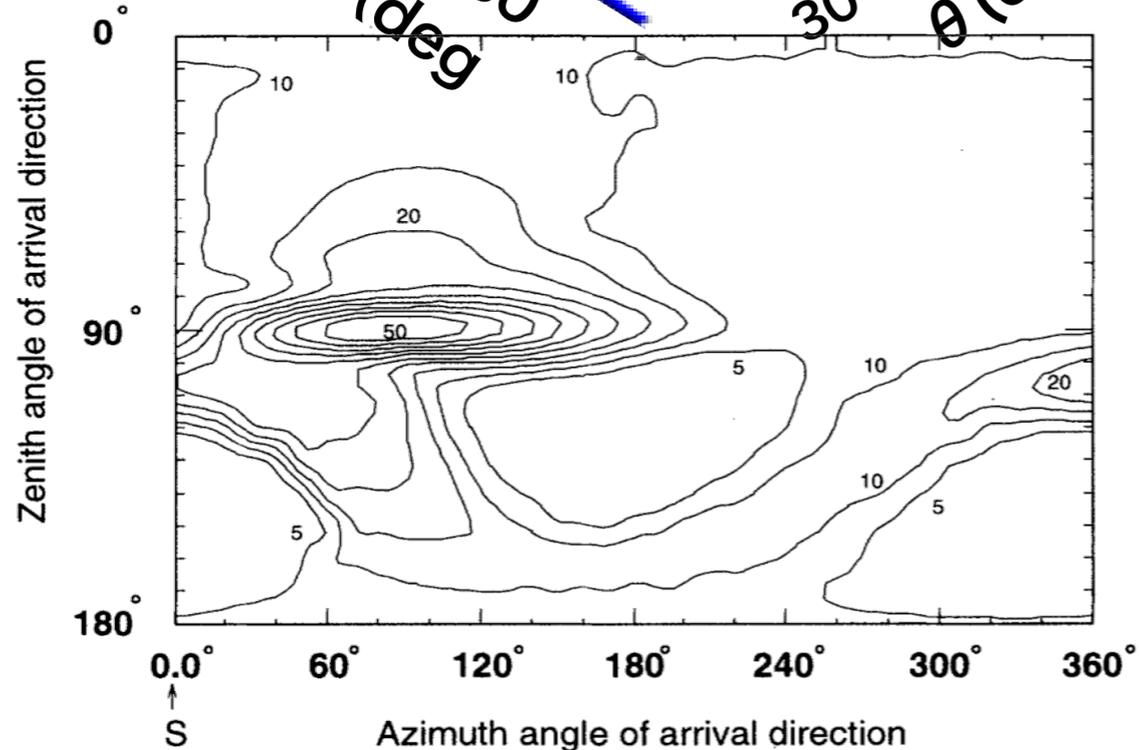
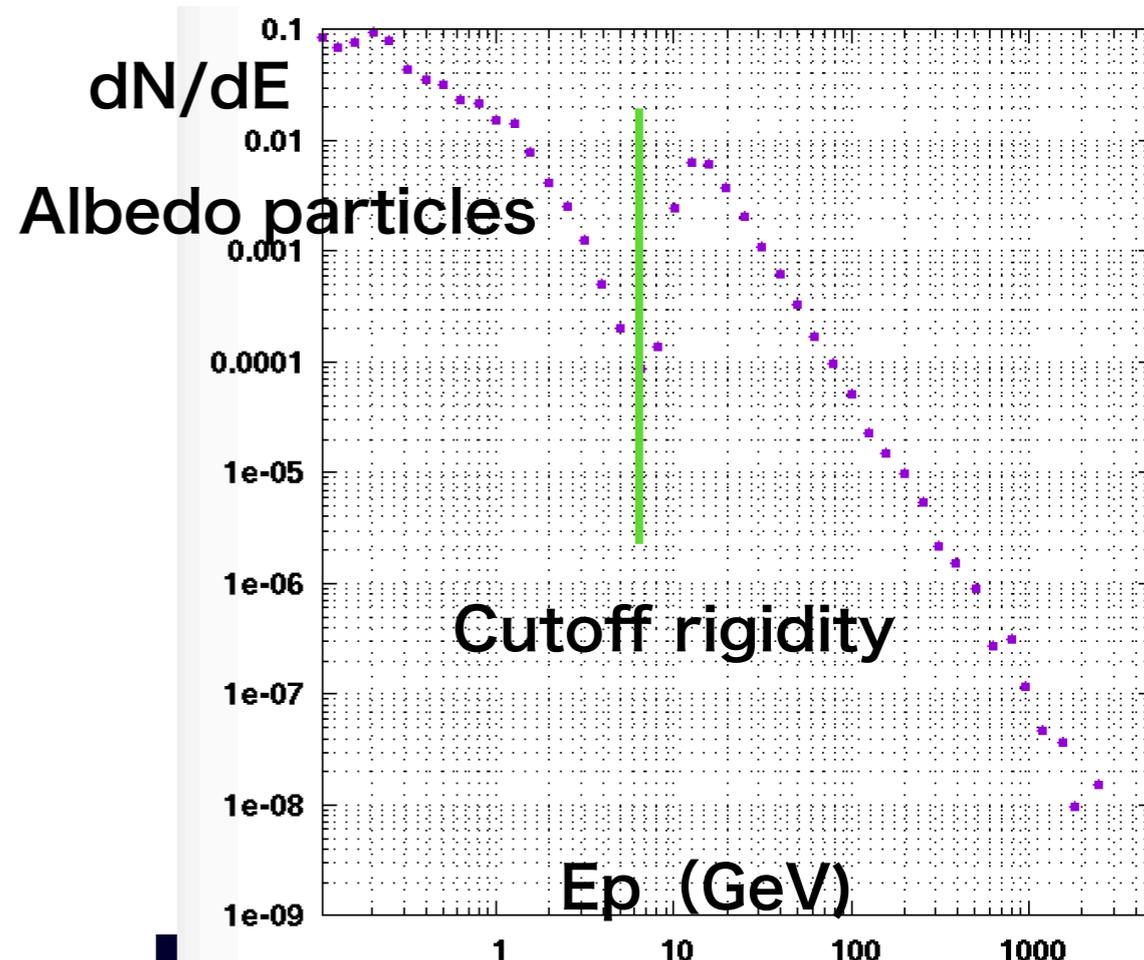
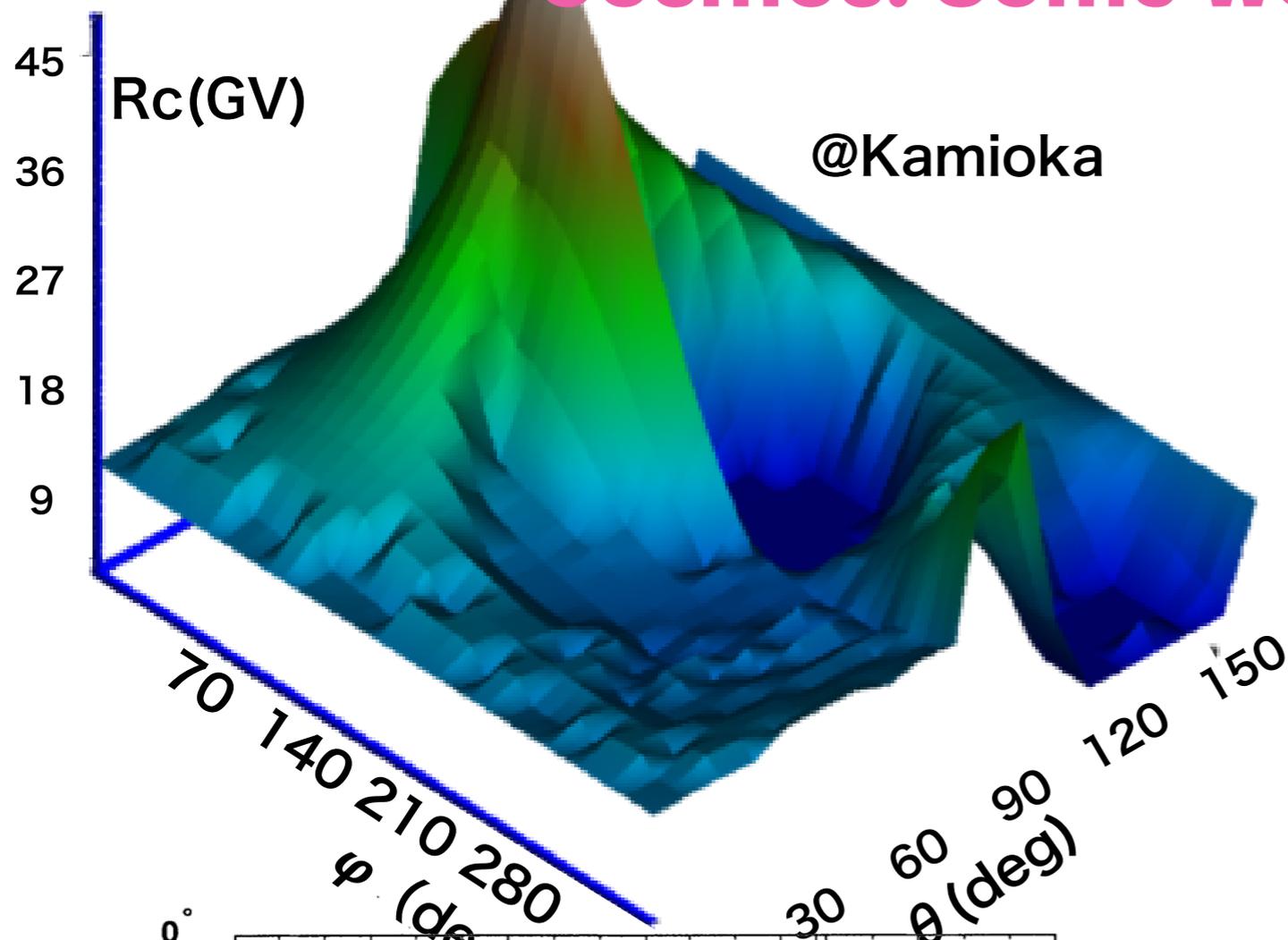
Calculation of the flux of atmospheric neutrinos

HKKM

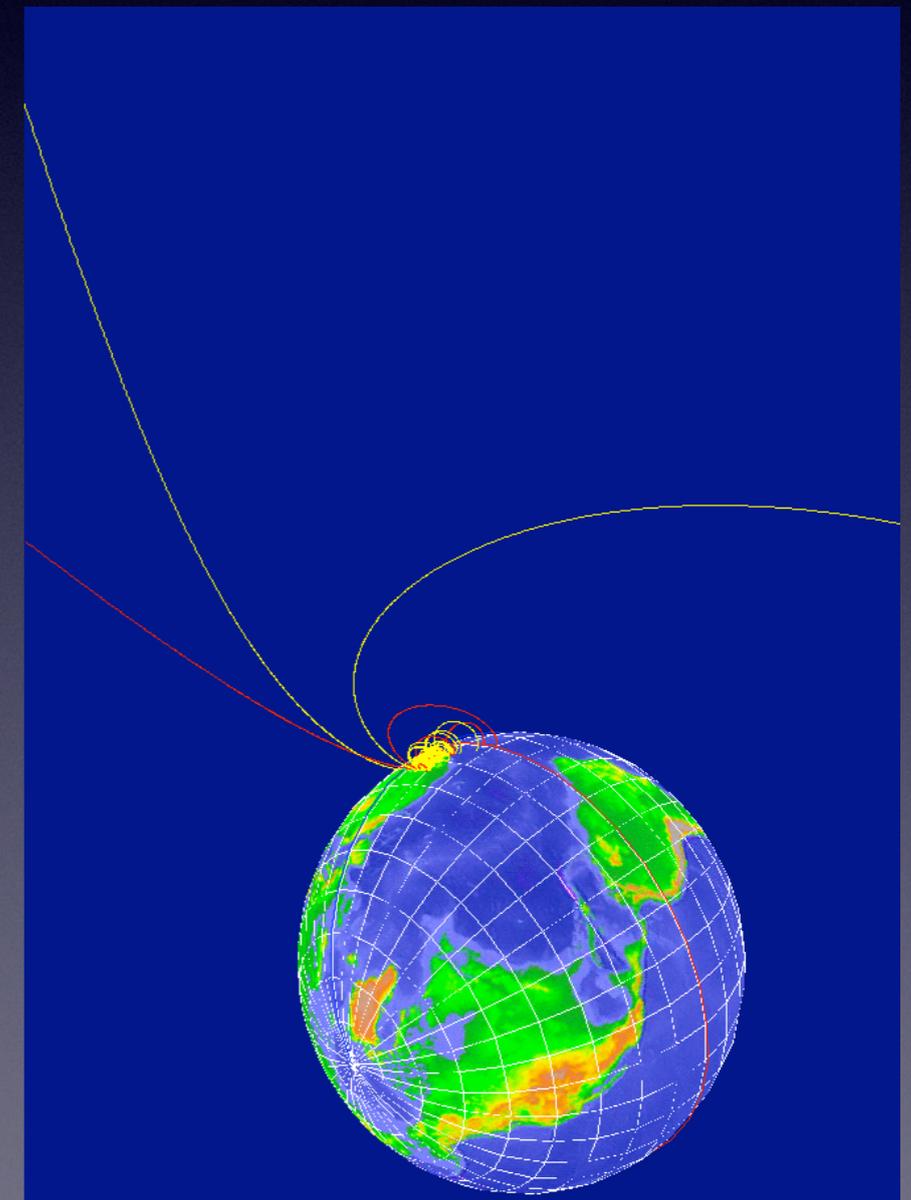
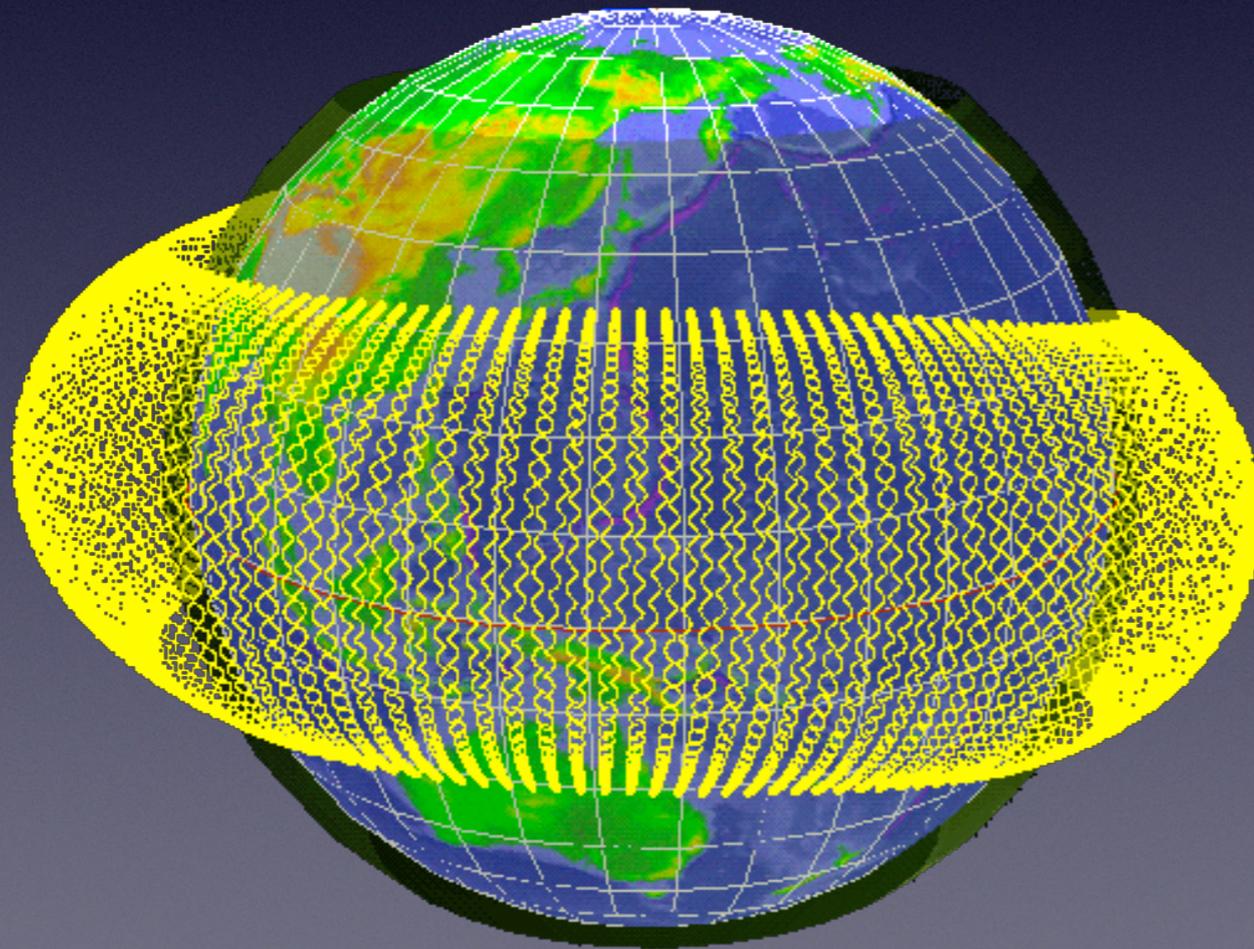
Phys. Rev.D Vol.52 (1995)

ν business \Rightarrow ATMNC

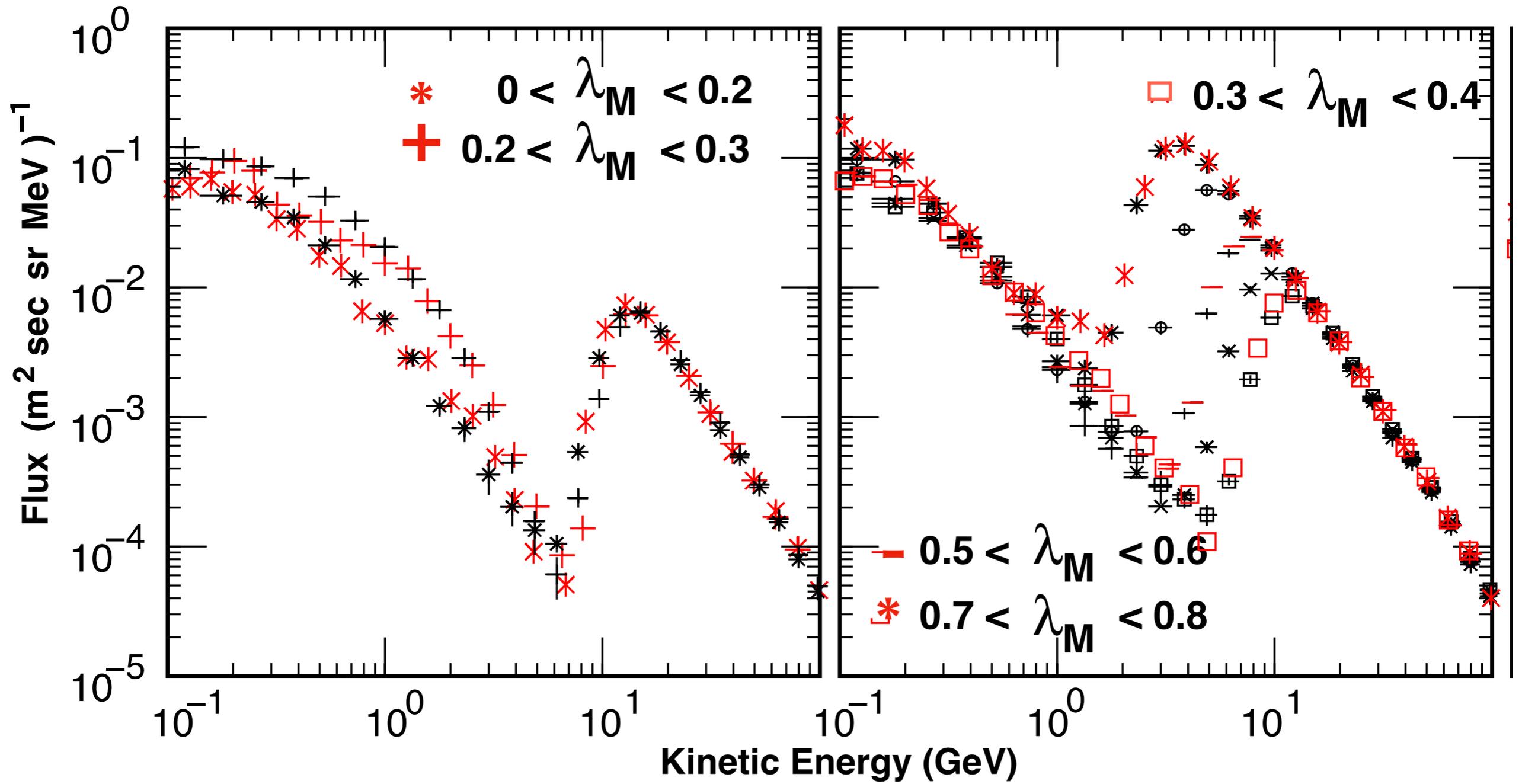
Cosmos: Some works related to Atmos ν



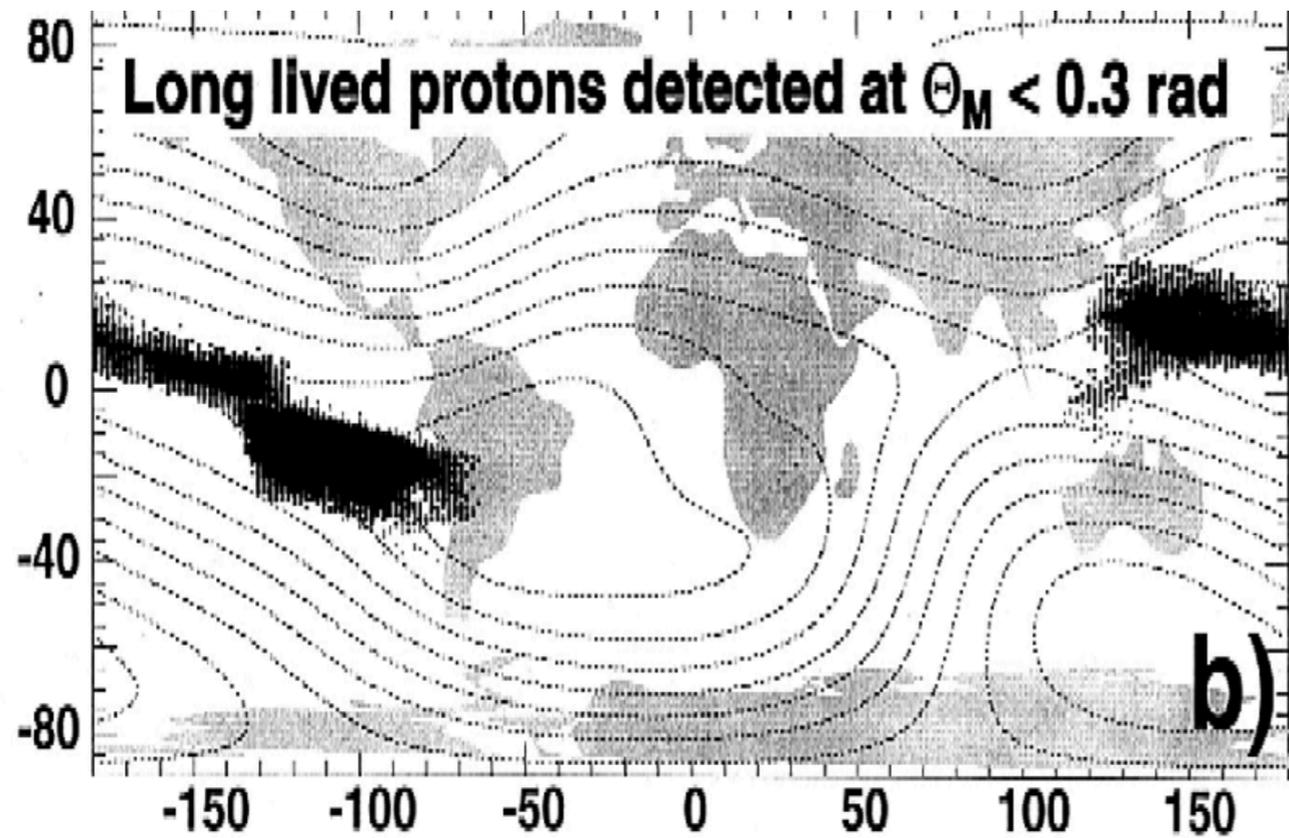
AMS01 ~y2000 afforded valuable data for investigating rigidity cutoff, albedo particles:
check Cosmos.



AMS vs Sim.
protons

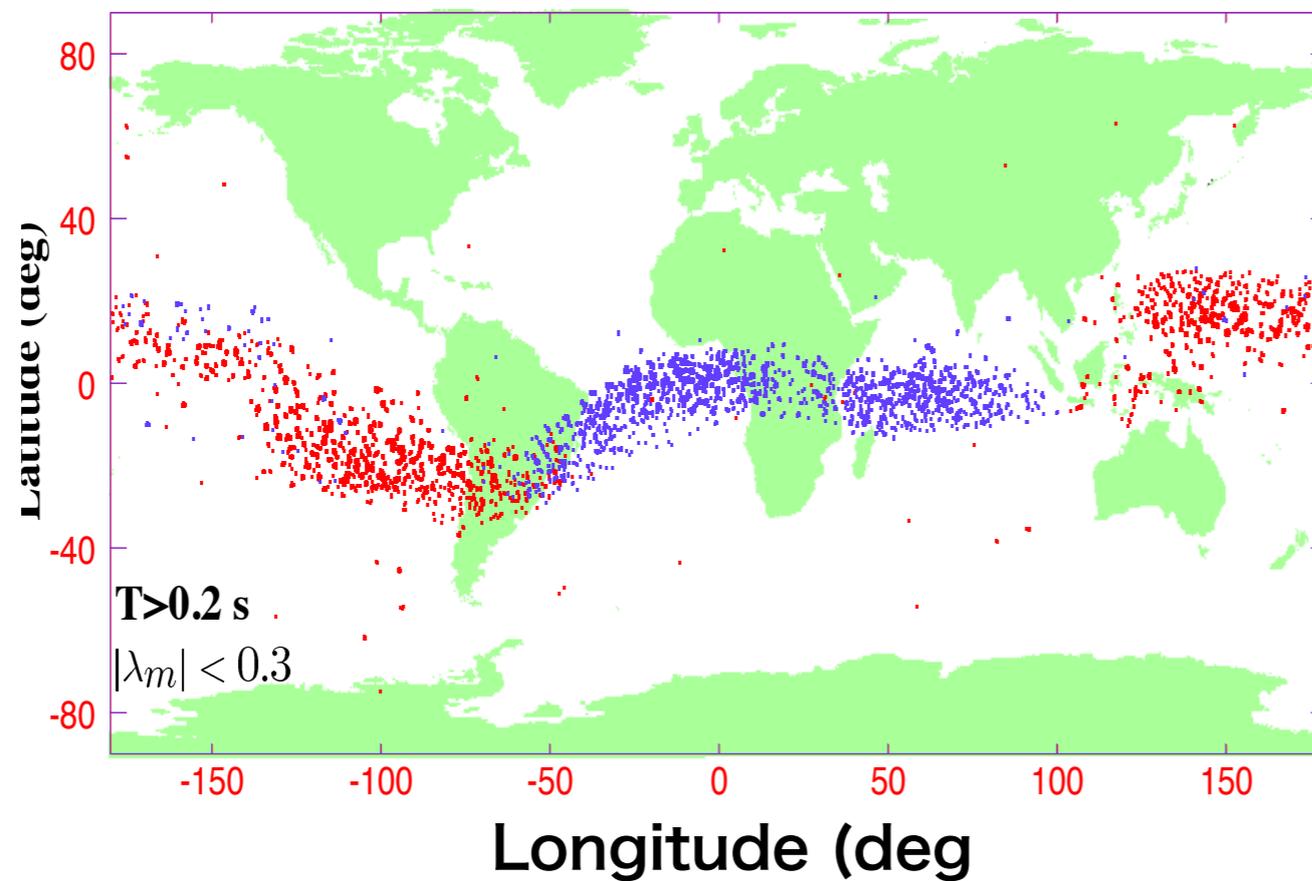


Origin of long lived ($t > 0.2s$) protons



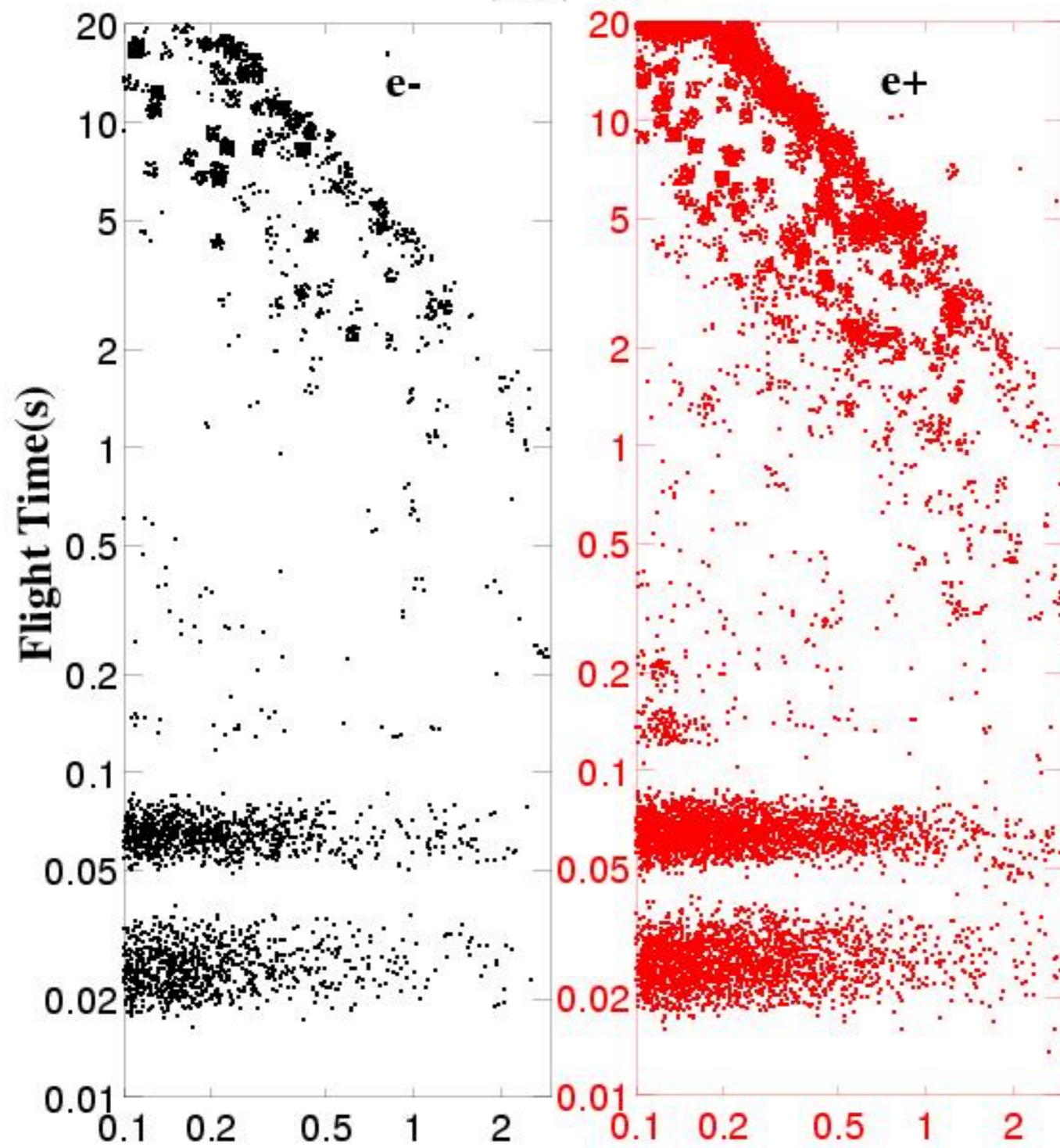
AMS01: Phy.Rev.Let B 472 (2000)

Origin(●) and Sink Point(●) of Long-Lived Protons



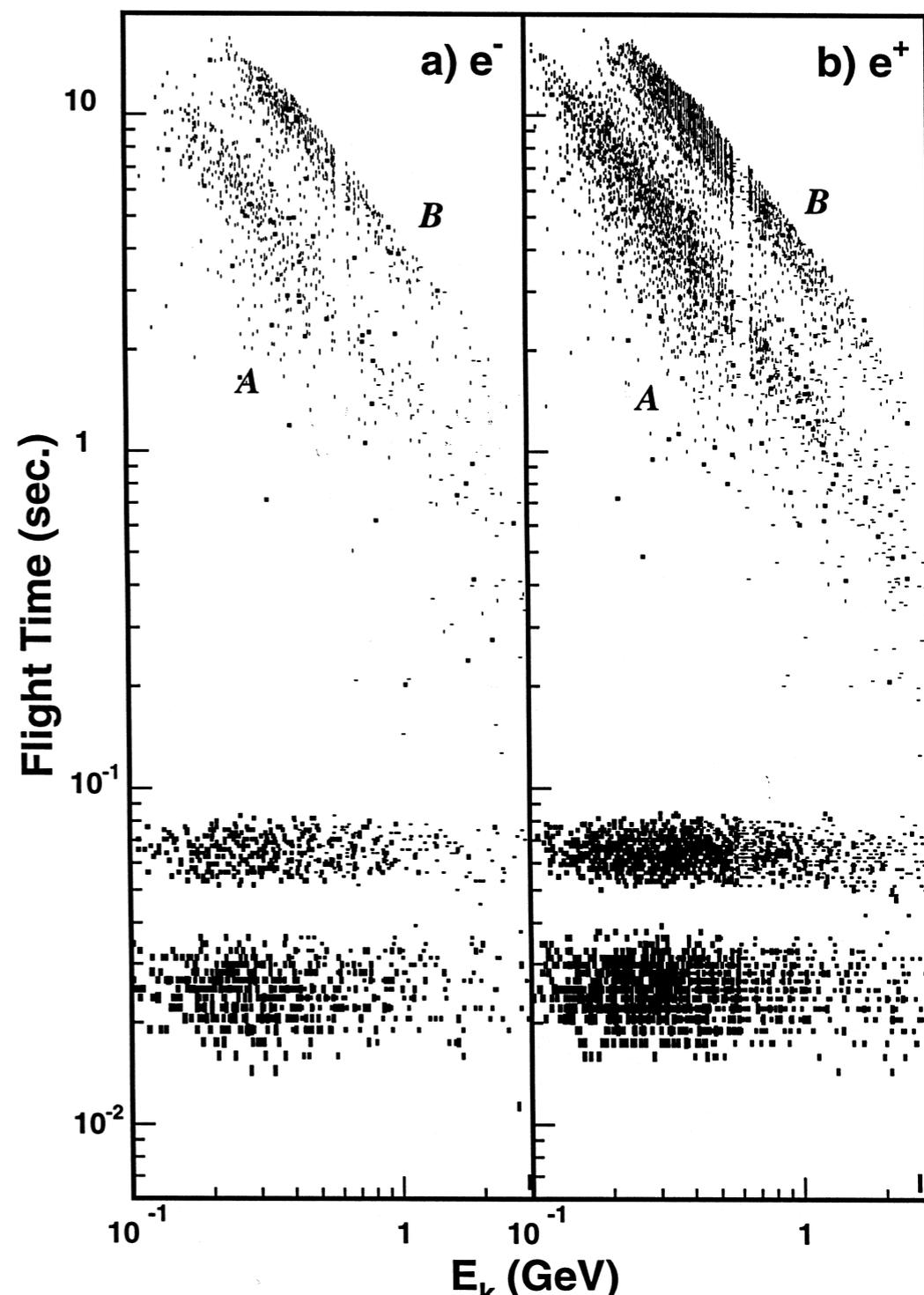
Electron Flight Time vs Energy

$|\lambda_m| < 0.3$



AMS01

Physics Letters B 484 (2000)



Conclusion for Atmos. ν from these studies:

Albedo contribution to ν flux < 1% of total ν flux

Int. model checking

- ✦ **With accel. experiment data**

- ✦ **Sometimes**

- ✦ **No Air like target**
 - ✦ **No pion incident case**
 - ✦ **No nucleus incident case**

@>10¹⁴ ~ 10¹⁷ eV: LHCf

- ✦ **With atmospheric muons: p, He,.. 1ry. pi,K interaction. Target Air.**

- ✦ **Sometimes**

- ✦ **contradicting data**
 - ✦ **low statistics**

- ✦ **With atmospheric gamma rays**

- ✦ **For atmos. ν , less suited than atmos. muon, but would have certain meaning**

~y2000, dpmjet3 became available

Int. model checking

- ✦ With accel. experiment data

- ✦ Sometimes

- ✦ No Air like target
 - ✦ No pion incident case
 - ✦ No nucleus incident case

@>10¹⁴ ~ 10¹⁷ eV: LHCf

- ✦ With atmospheric muons: p, He,.. 1ry. pi,K interaction. Target Air.

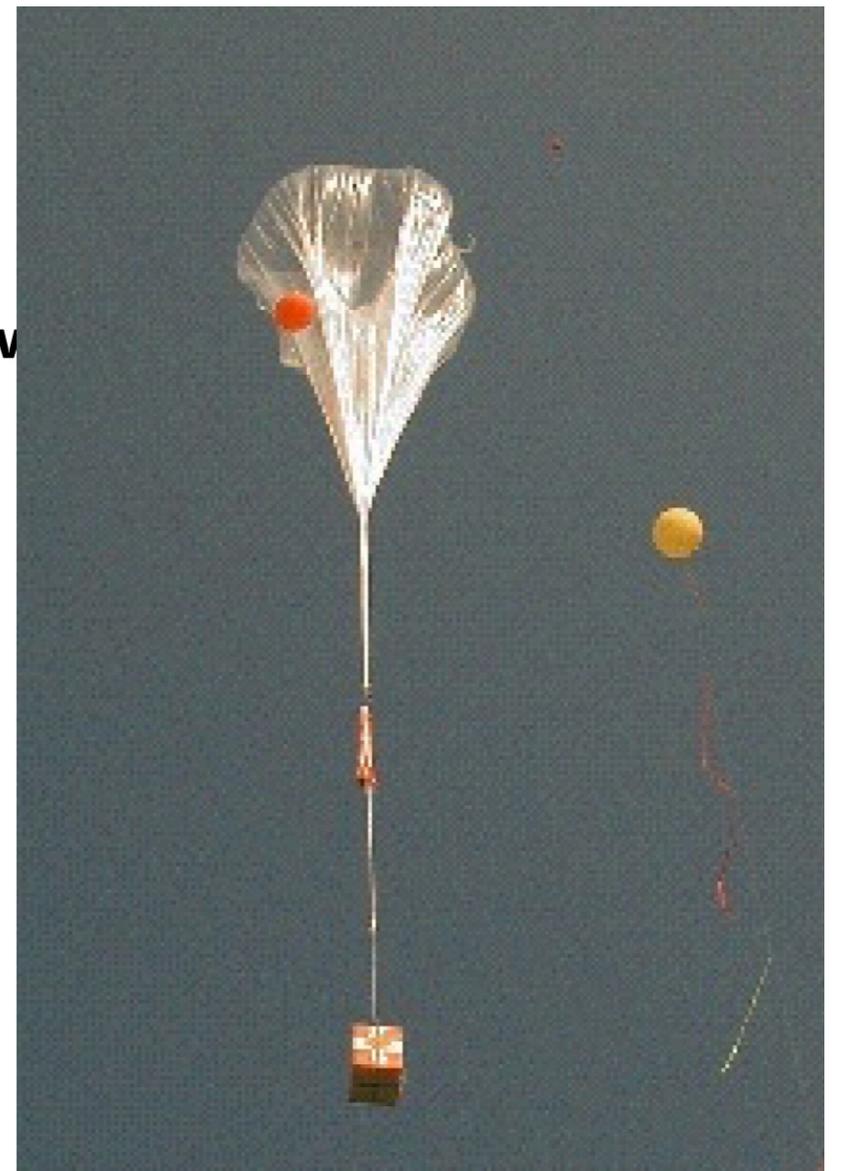
- ✦ Sometimes

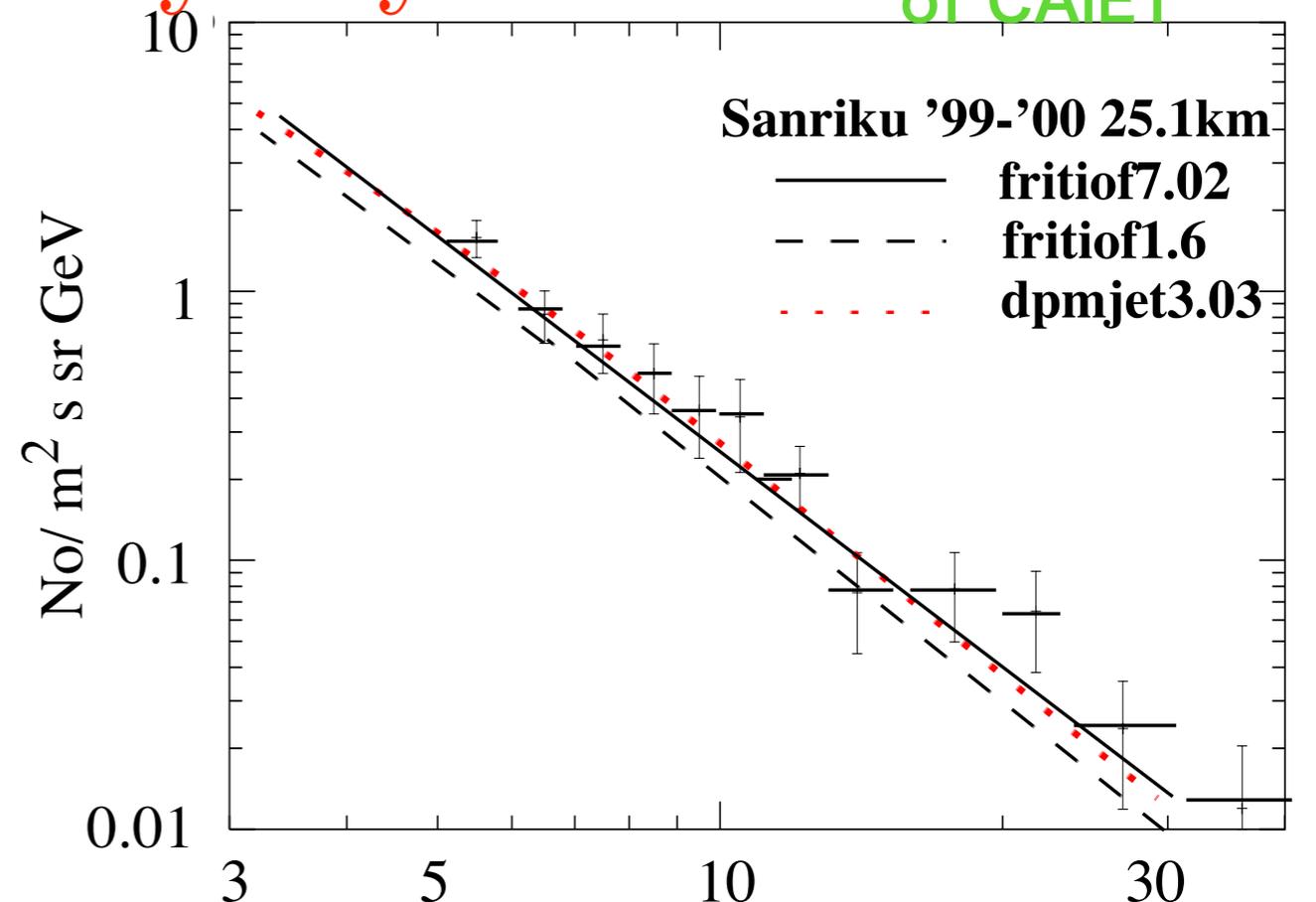
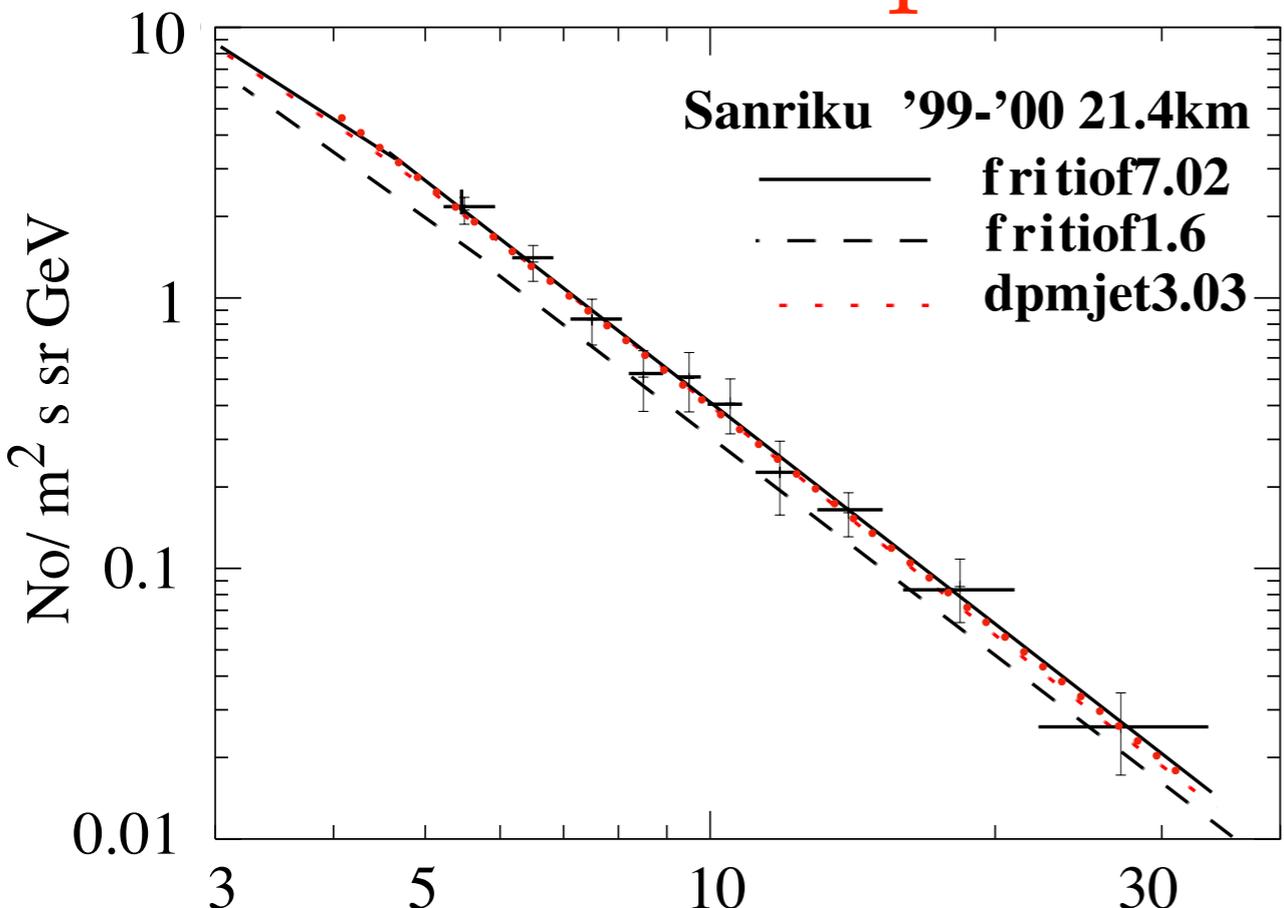
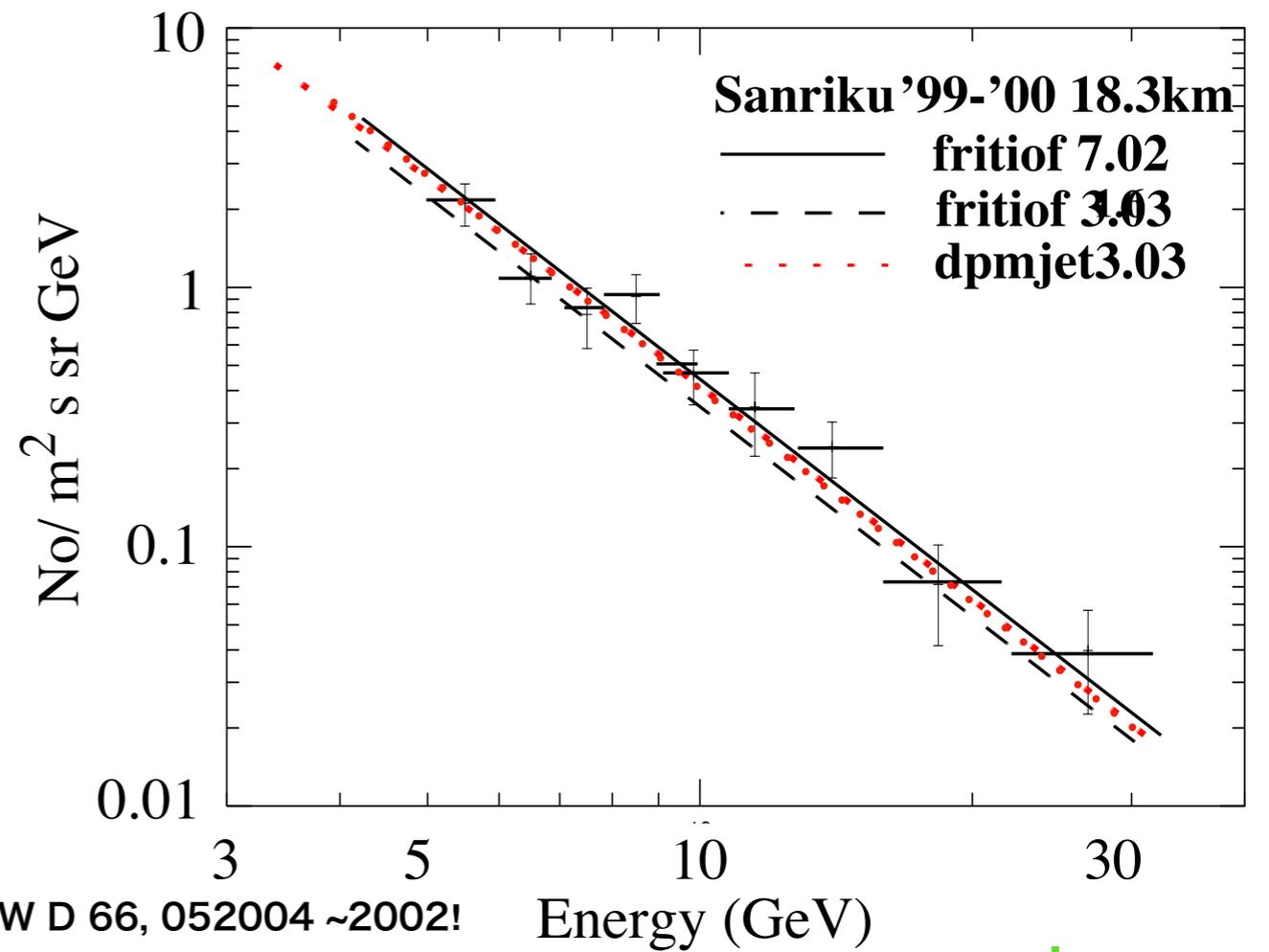
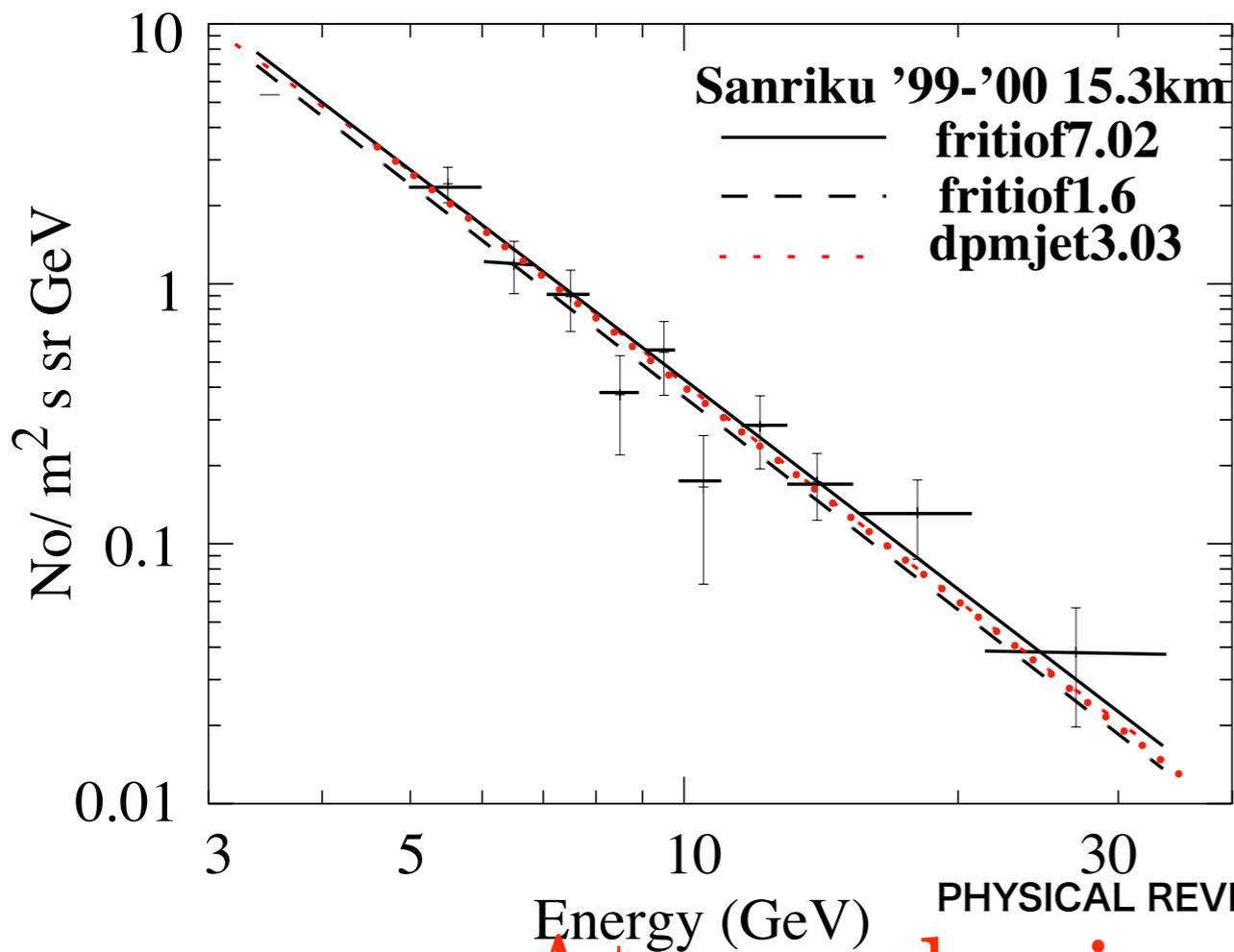
- ✦ contradicting data
 - ✦ low statistics

- ✦ With atmospheric gamma rays

- ✦ For atmos. ν , less suited than atmos. muon, but would have meaning

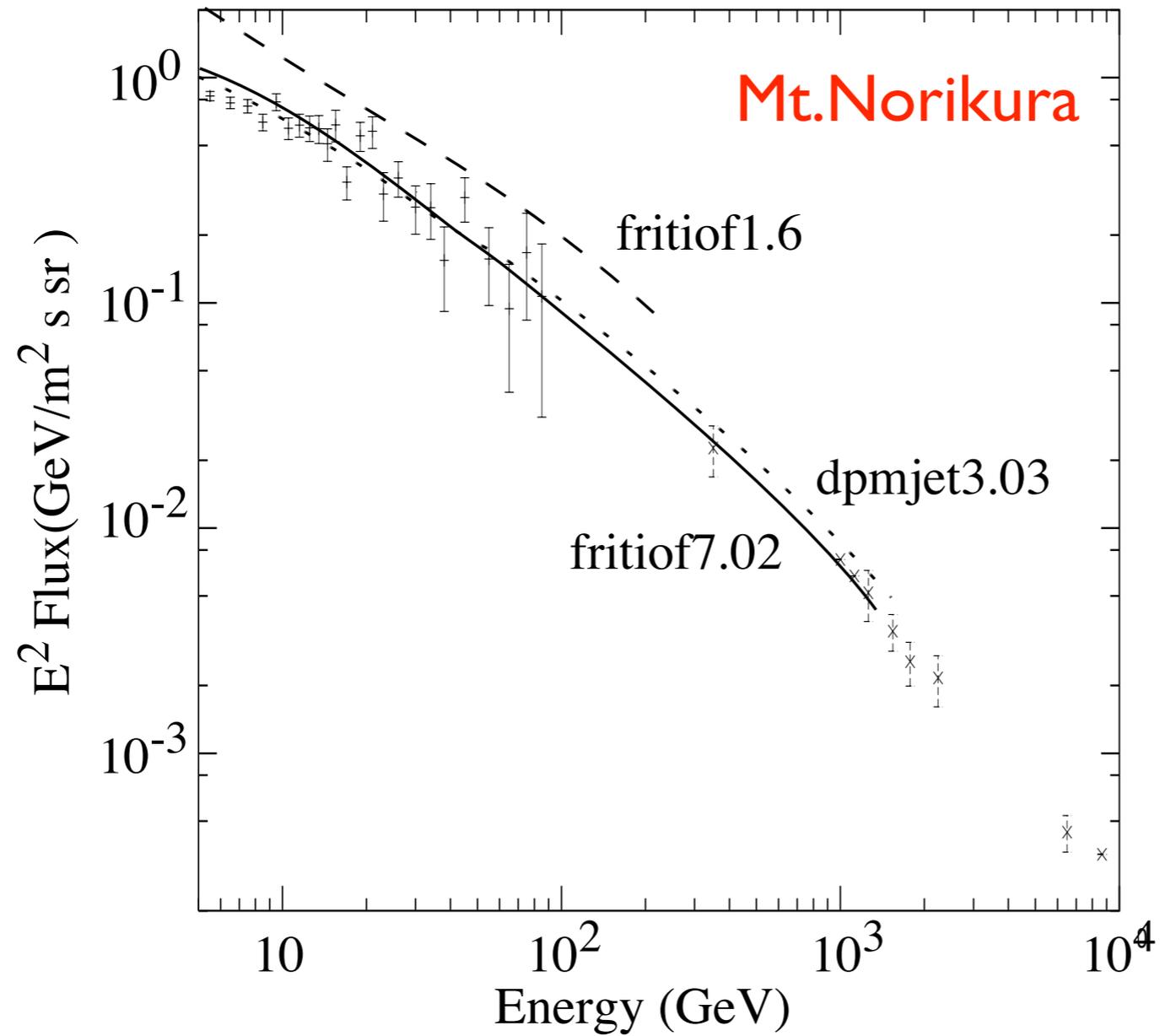
~y2000, dpmjet3 became available





PHYSICAL REVIEW D 66, 052004 ~2002!

Atmospheric γ -rays by BETS ancestor of CAIET



dpmjet3 found to be a very good model, though not perfect

A bit about charm particles

- As well known, it becomes important at $\sim \text{PeV}$

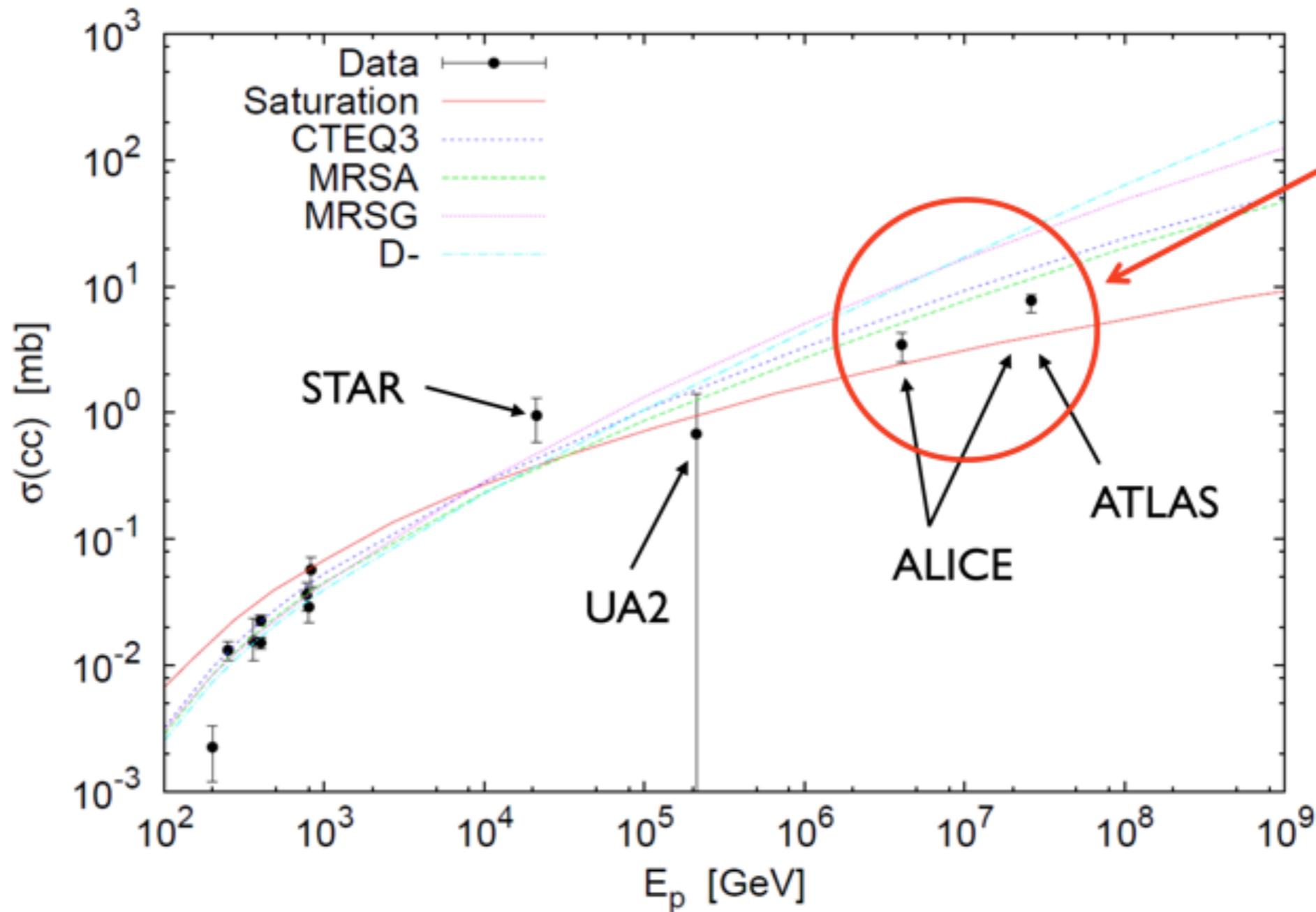
E.g IceCube BG

	$c\tau$ (m)	D.C (GeV)	B.R
$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	7.8	115	1
$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$			
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$	658	1	1
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$			
$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	3.7	870	0.64
$K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$			0.051
$K^+ \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$			0.034
$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e(\nu_e)$	15.3	211	0.41
$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$			0.27
$K_s^0 \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \bar{\nu}_e(\nu_e)$ (calculation?)	0.026	120	7×10^{-4}
$K_s^0 \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$ (not listed in the summary table)			4.7×10^{-4}

	$c\tau$ (m)	D.C (PeV)	B.R
$\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda^0 + \mu^+ + \nu_\mu$	6×10^{-5}	250 PeV	0.02
$\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda^0 + e^+ + \nu_e$			0.02 (0.01 ?)
$D^+ \rightarrow \bar{K}^0 e^+ \nu_e (\bar{K}^0 \mu^+ \nu_\mu)$	3.1×10^{-4}	39	$\sim 0.09(0.09)$
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ e^+ \nu_e (K^- \pi^+ \mu^+ \nu_\mu)$			$\sim 0.04(0.04)$
$D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e (K^- \mu^+ \nu_\mu)$	1.2×10^{-4}	100 PeV	0.036(0.033)
$D^0 \rightarrow K^* e^+ \nu_e (K^* \mu^+ \nu_\mu)$			$\sim 0.02(0.02)$
$D^0 \rightarrow K^- \pi^0 e^+ \nu_e (\bar{K}^0 \pi^- e^+ \nu_e)$			$\sim 0.02(0.02)$

- *Until a few years ago, among the models used in high energy AS simulation, only **dpmjet3** was the code that can deal with charm
- *But, authors of dpmjet3 **warn** “it’s old, **don’t rely on it**”
- *However, it would be a good exercise to look into it. Let’s try

Total charm cross section $pp \rightarrow cc$

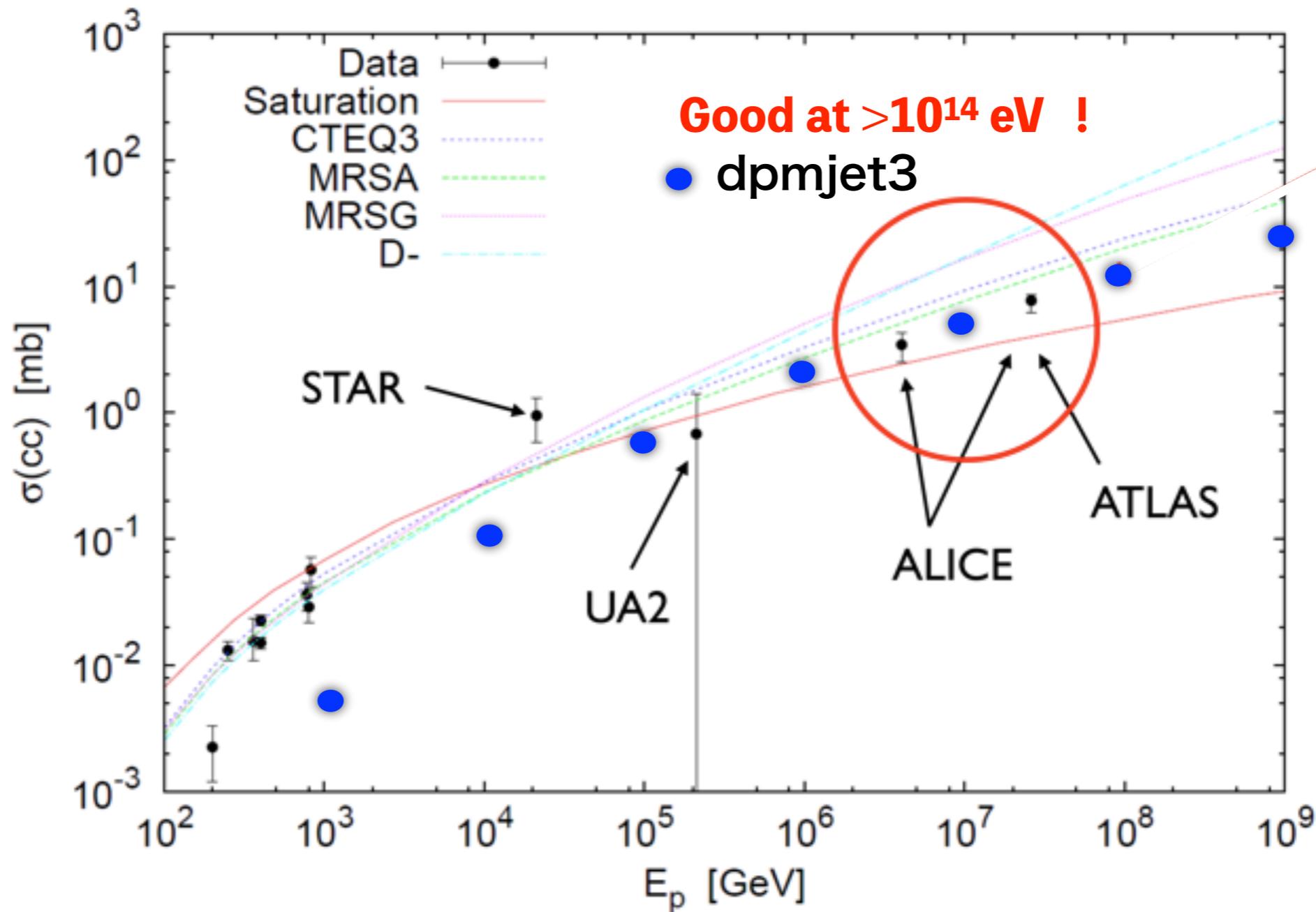


New data since 2011

Very different energy dependence of calculations!

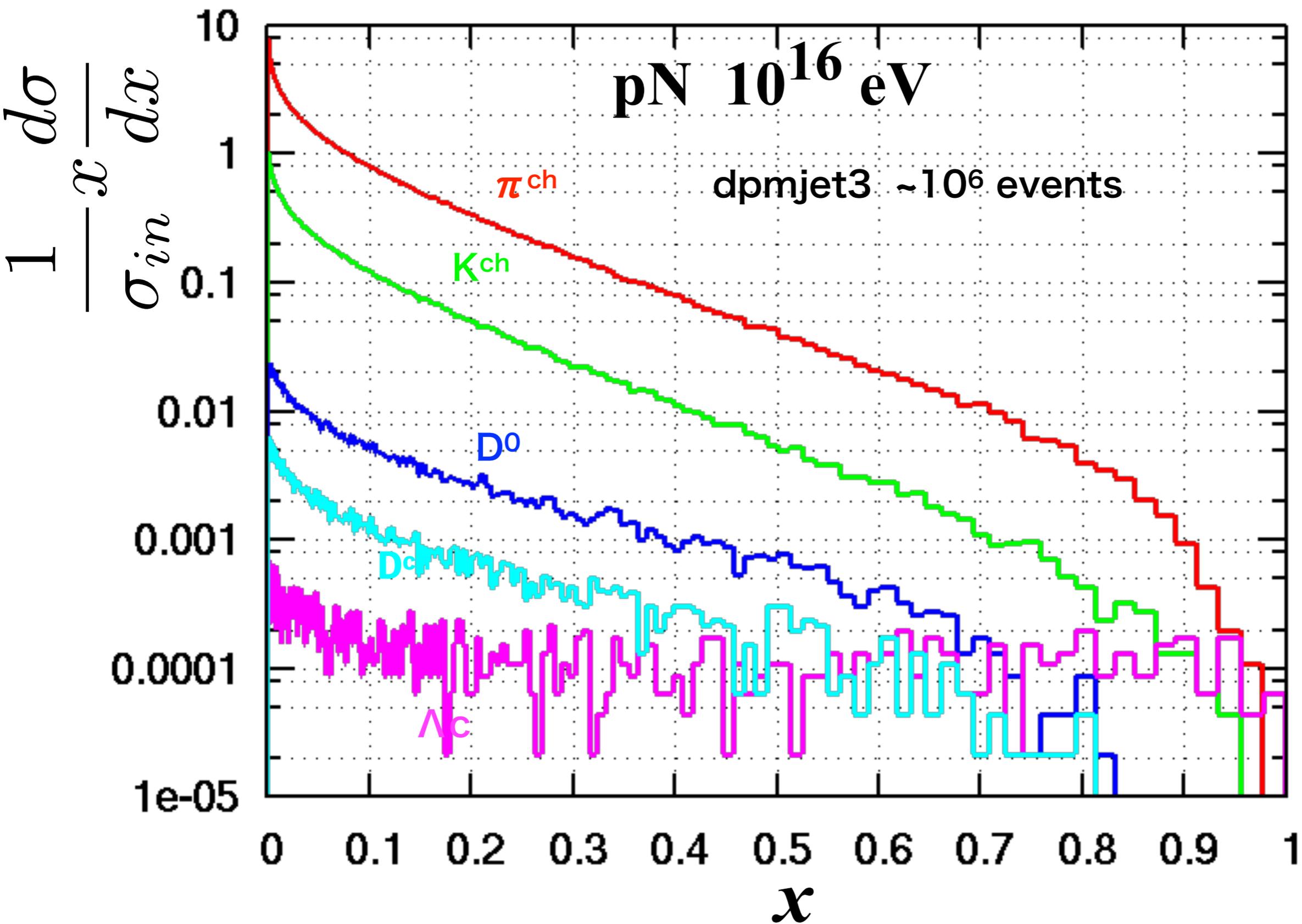
R. Enberg: Charm in the atmosphere

Total charm cross section $pp \rightarrow cc$



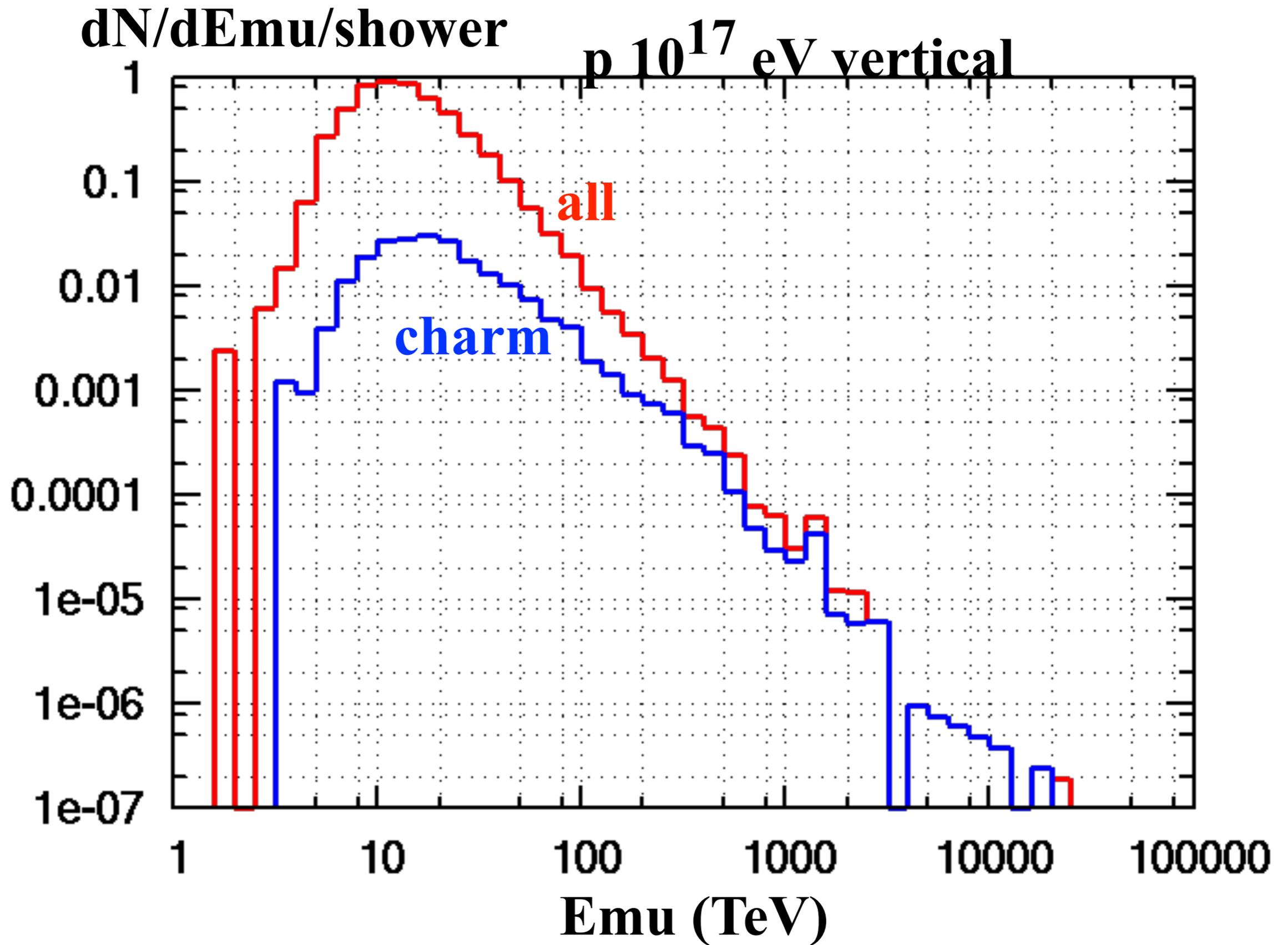
Very different energy dependence of calculations!

R. Enberg: Charm in the atmosphere

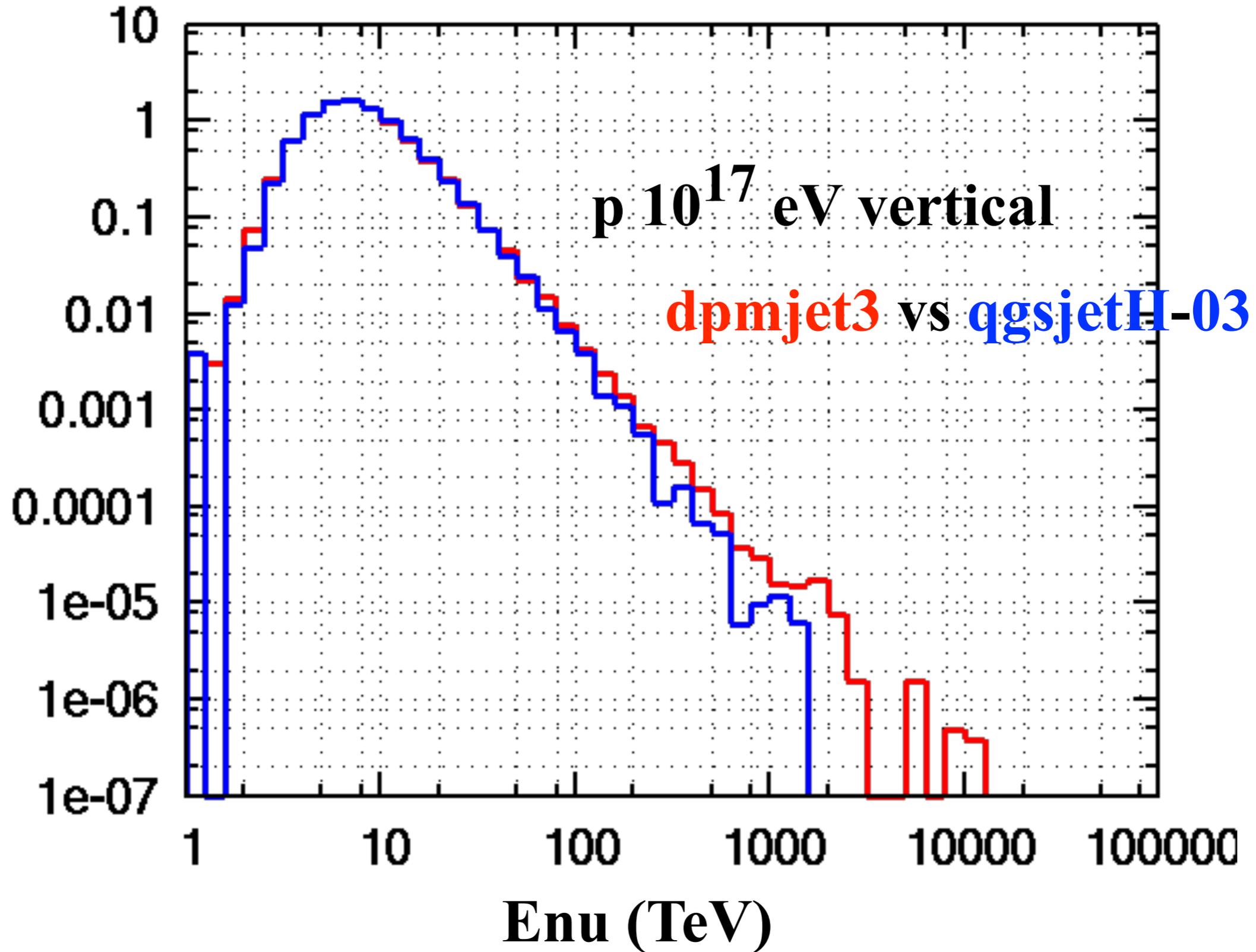


2.3c is consistent with those at ICRR

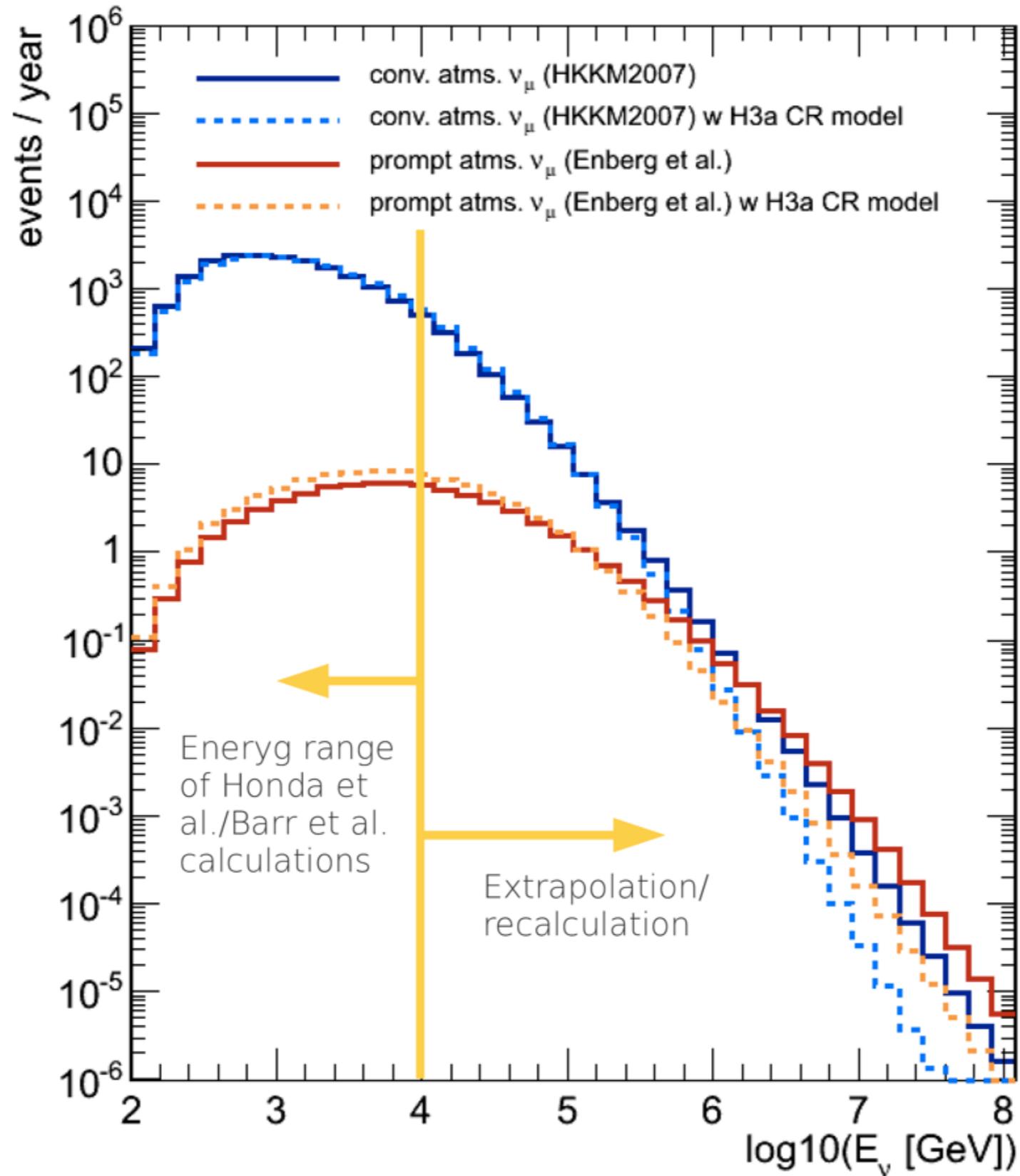
Highest energy muon in a shower



$dN/dE_{\nu}/\text{shower}$ Highest energy ν in a shower

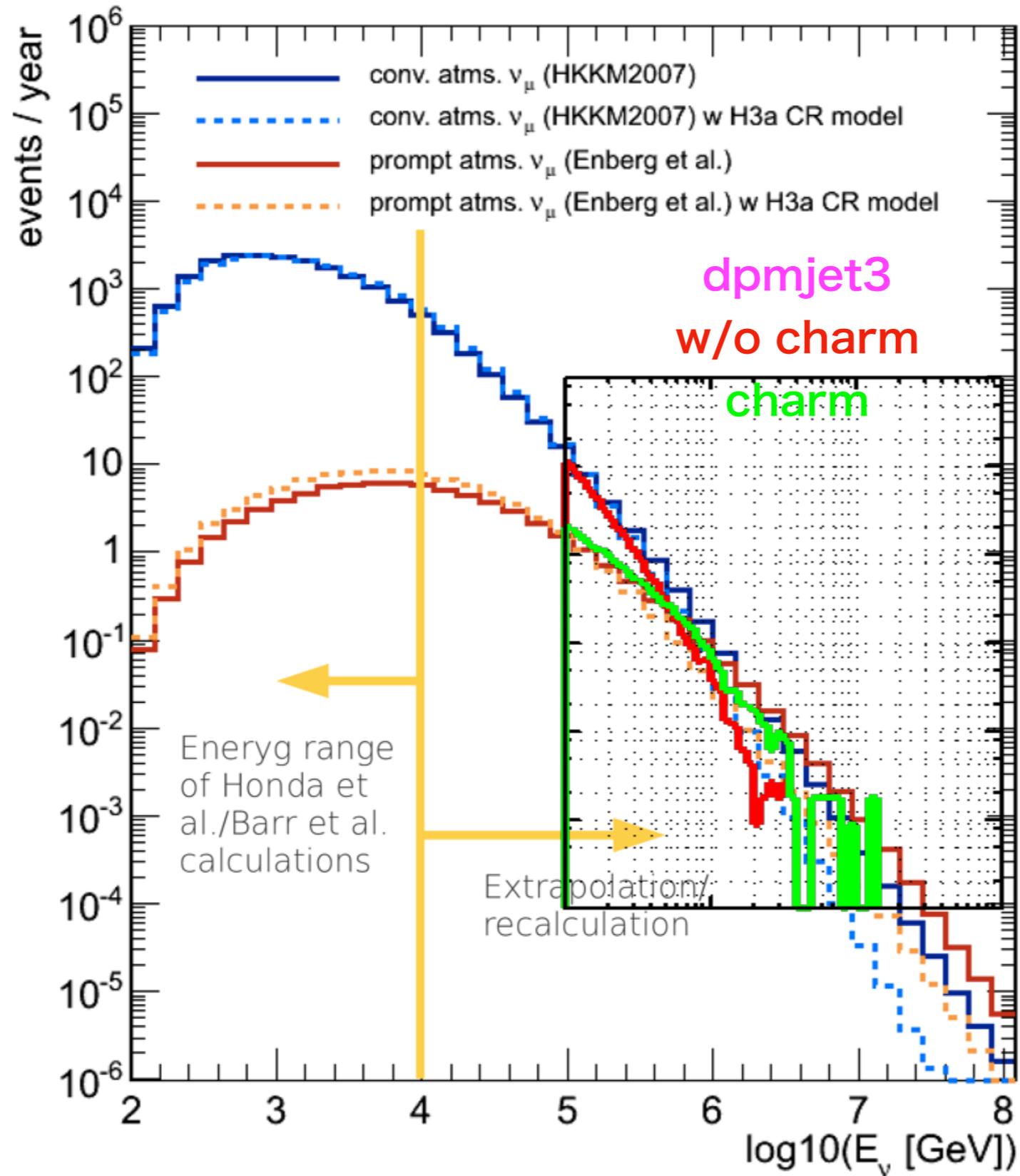


IceCube case



From Schukraft @CERN Feb. 2013

IceCube case

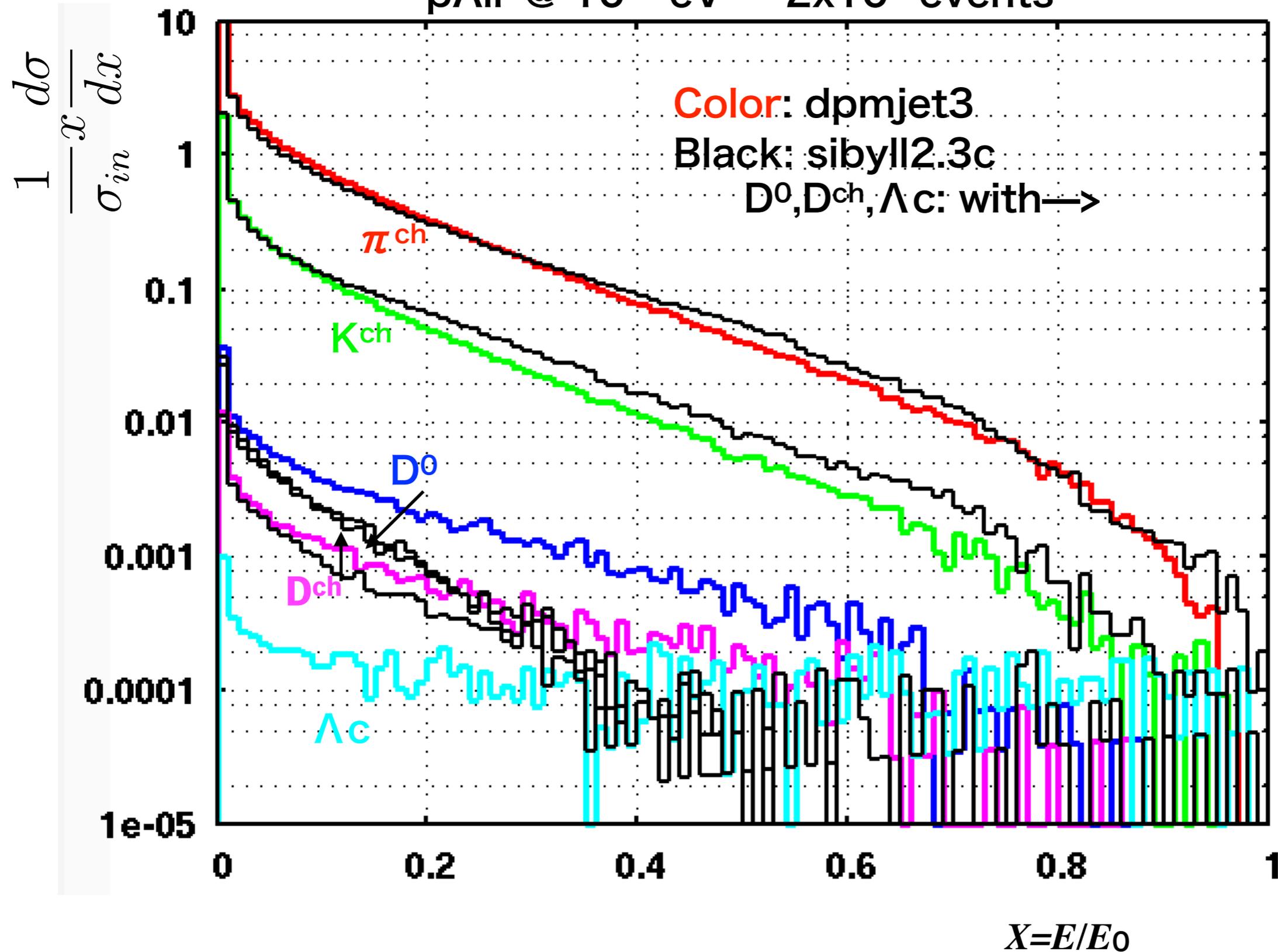


From Schukraft @CERN Feb. 2013

Comparison with Sibyll2.3c

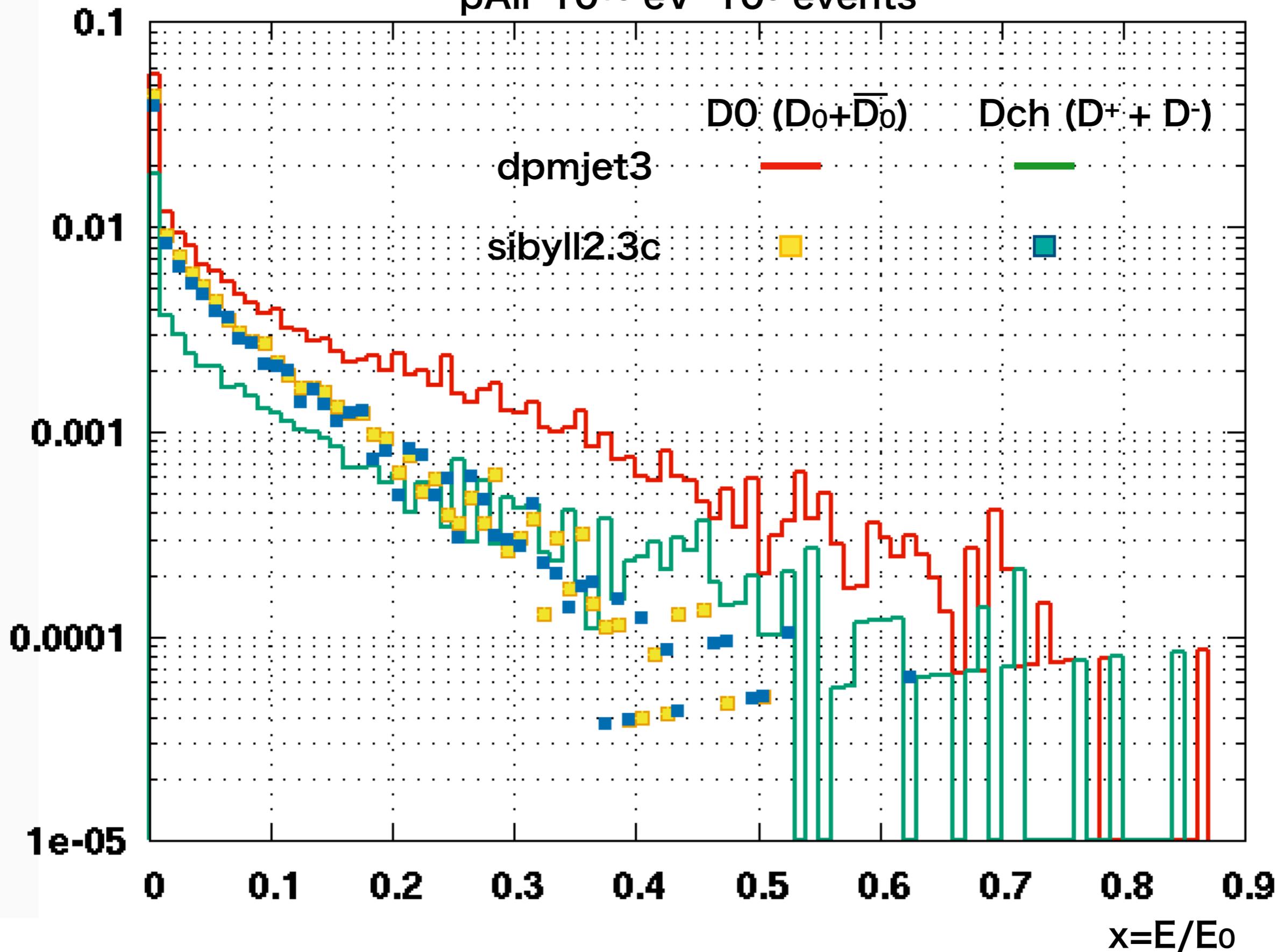
Comparison with Sibyll2.3c

pAir @ 10^{16} eV 2×10^6 events



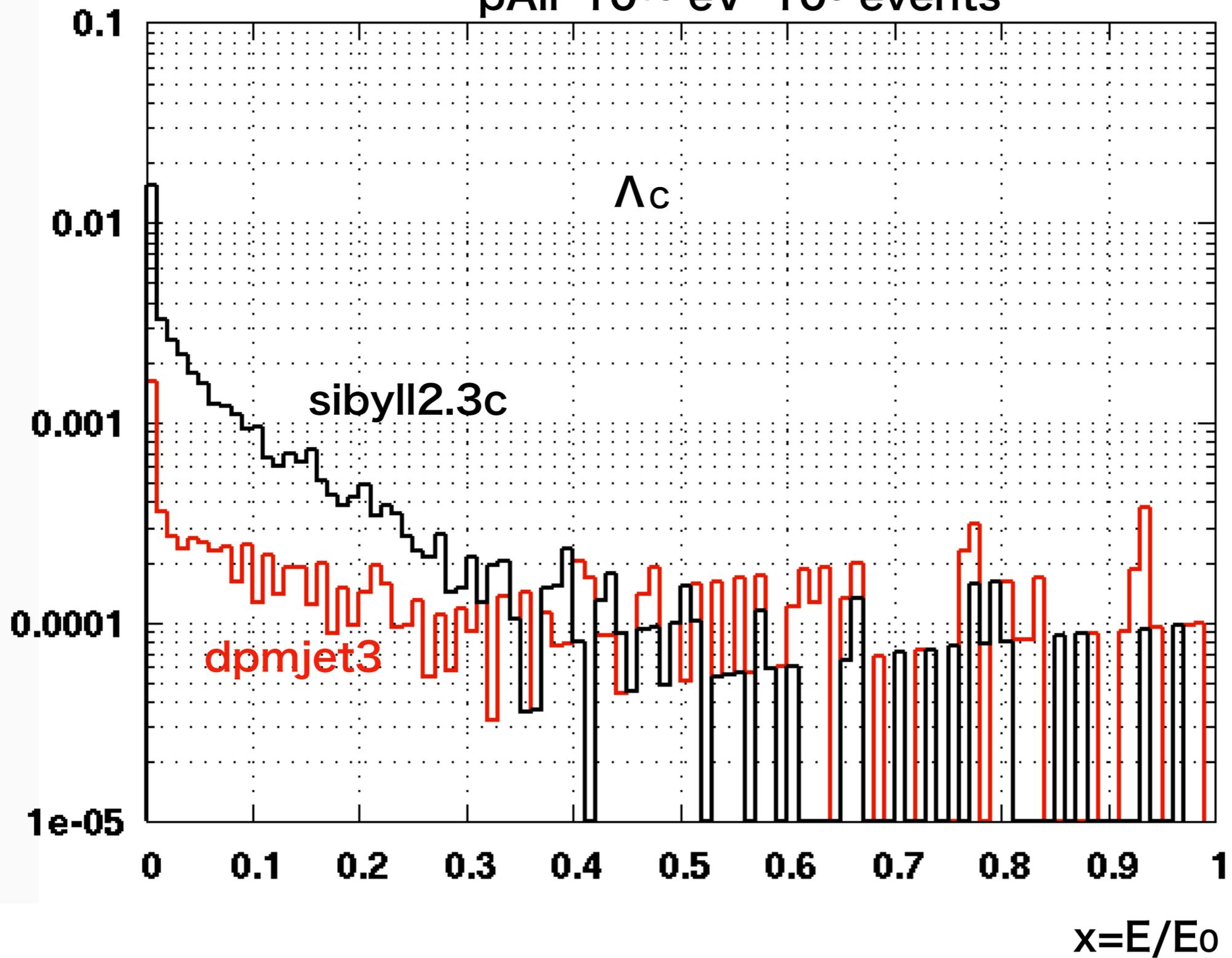
xdN/dx /event

pAir 10^{16} eV 10^6 events



$x dN/dx$ /event

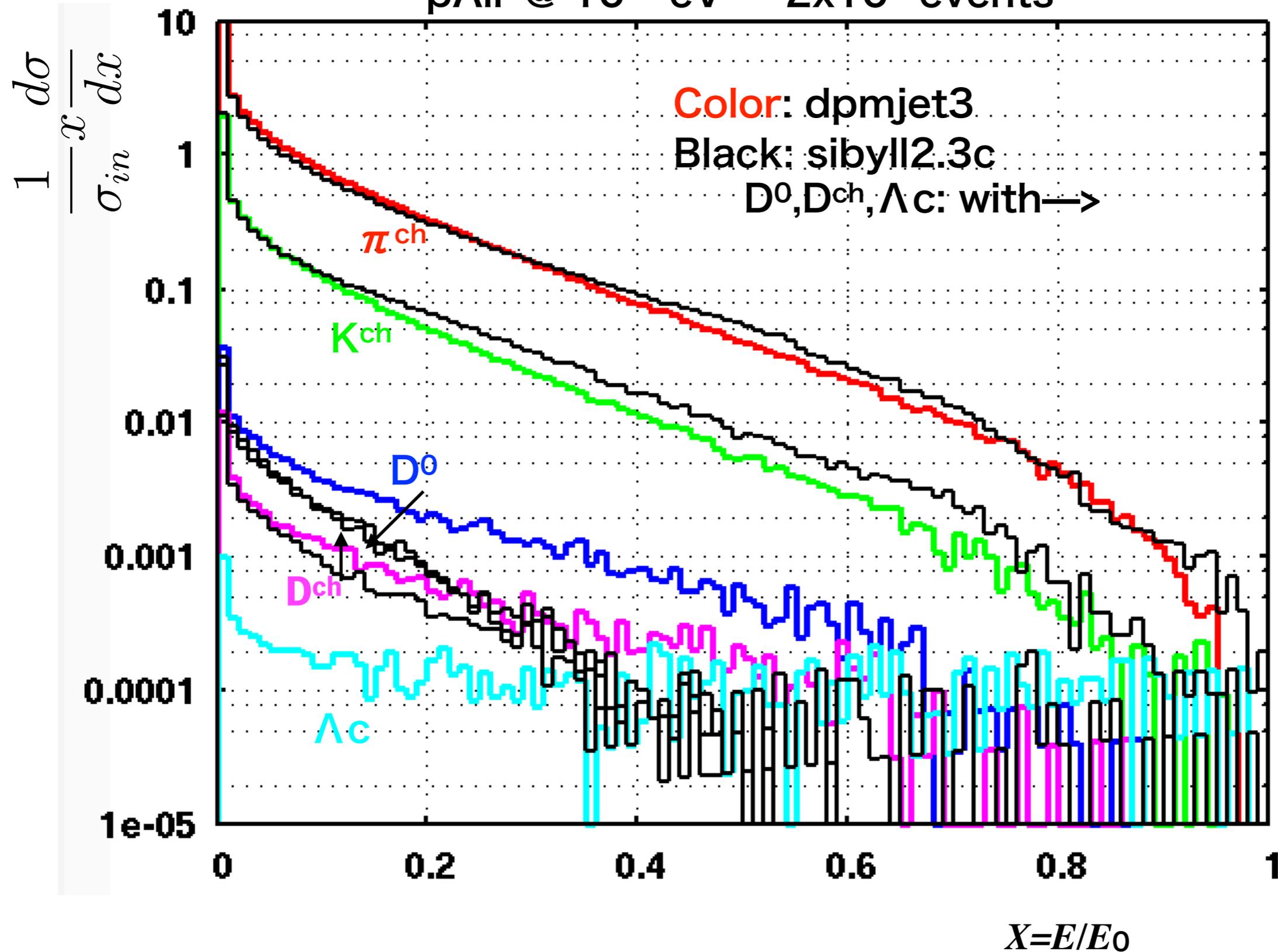
pAir 10^{16} eV 10^6 events



Comparison with Sibyll2.3c

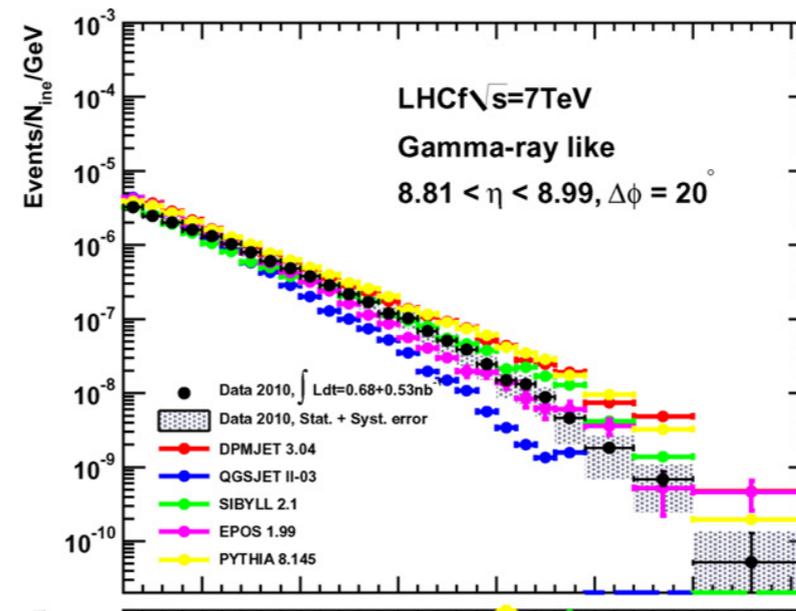
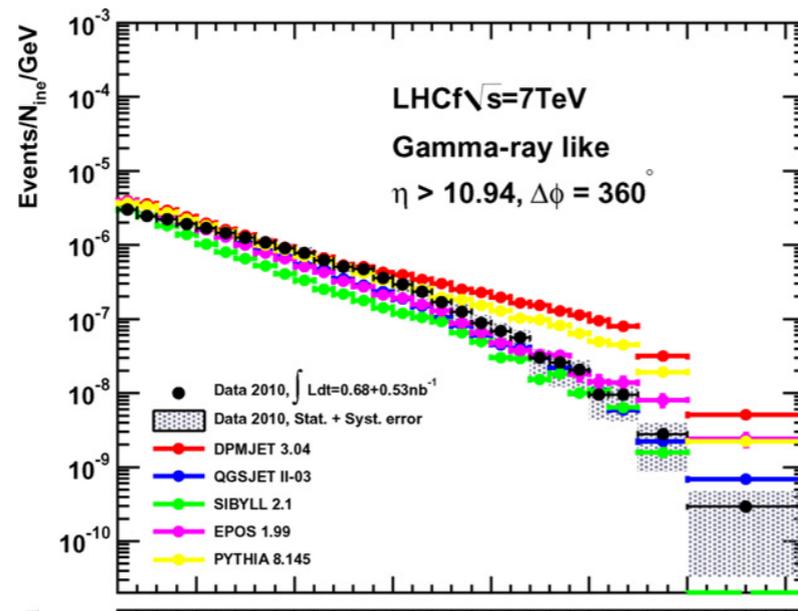
Comparison with Sibyll2.3c

pAir @ 10^{16} eV 2×10^6 events

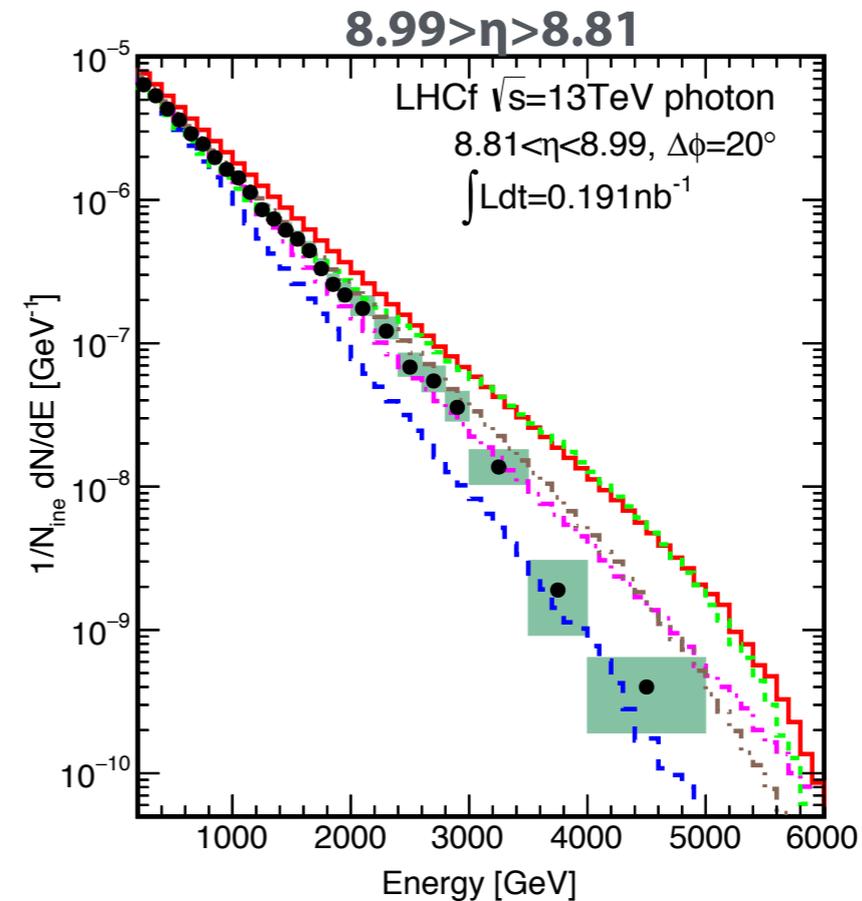
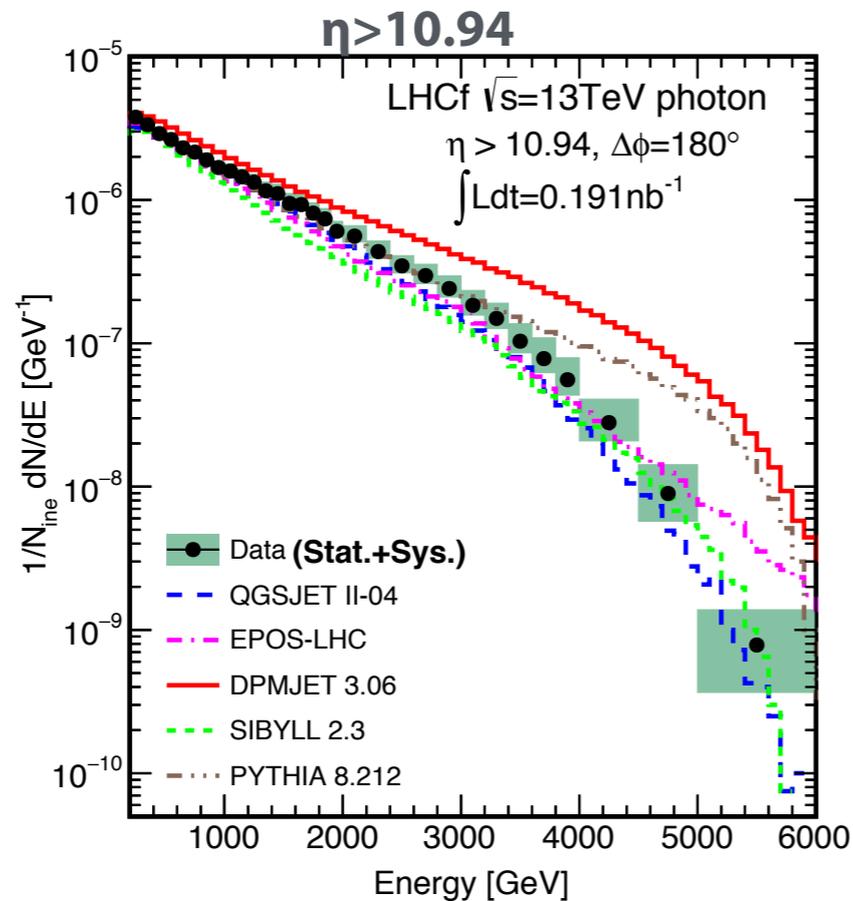


p-p $\sqrt{s}=7$ TeV, single photon spectra

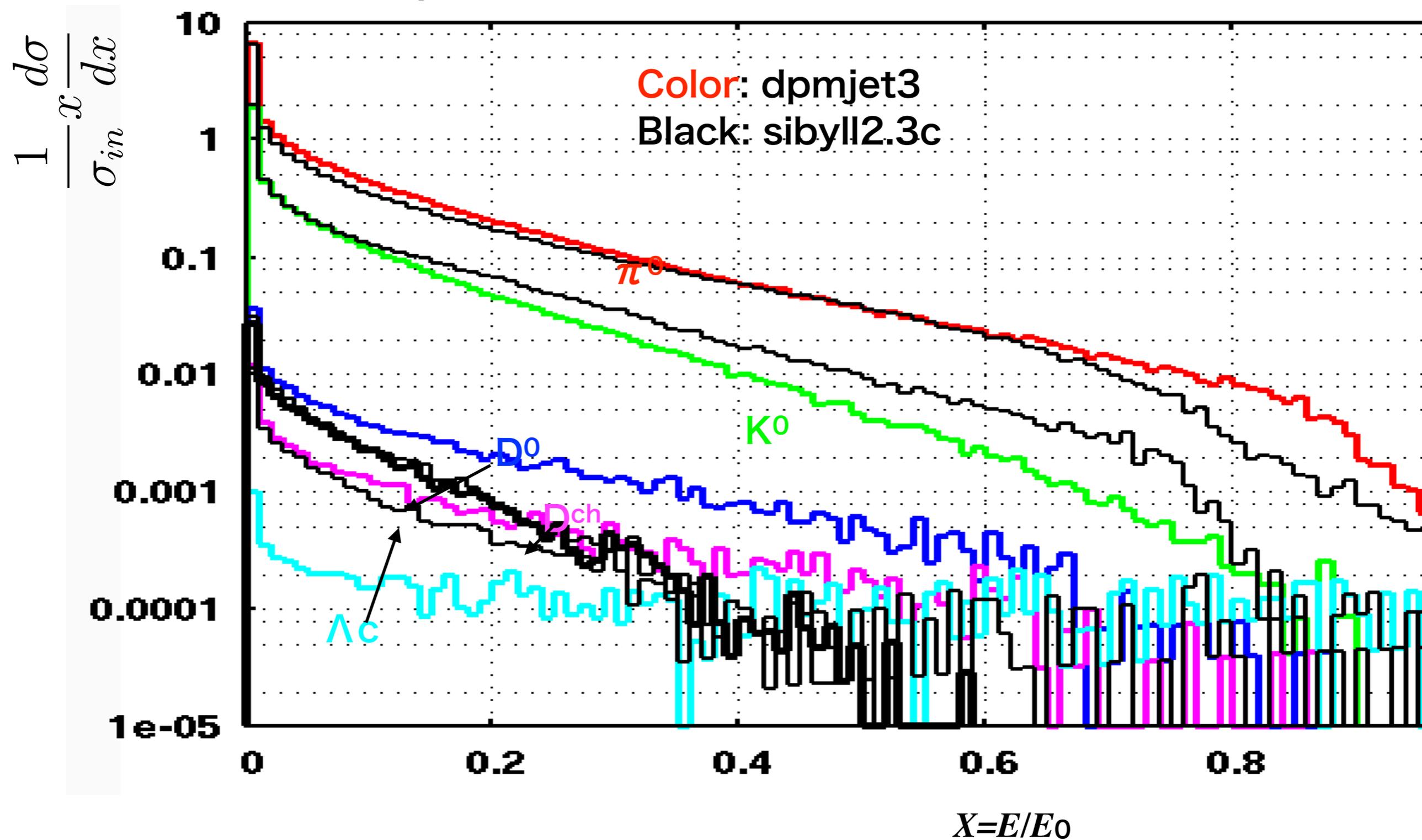
Before going to the detailed comparison with the models, just for remind..



$\sqrt{s}=13$ TeV LHCf inclusive photon spectra



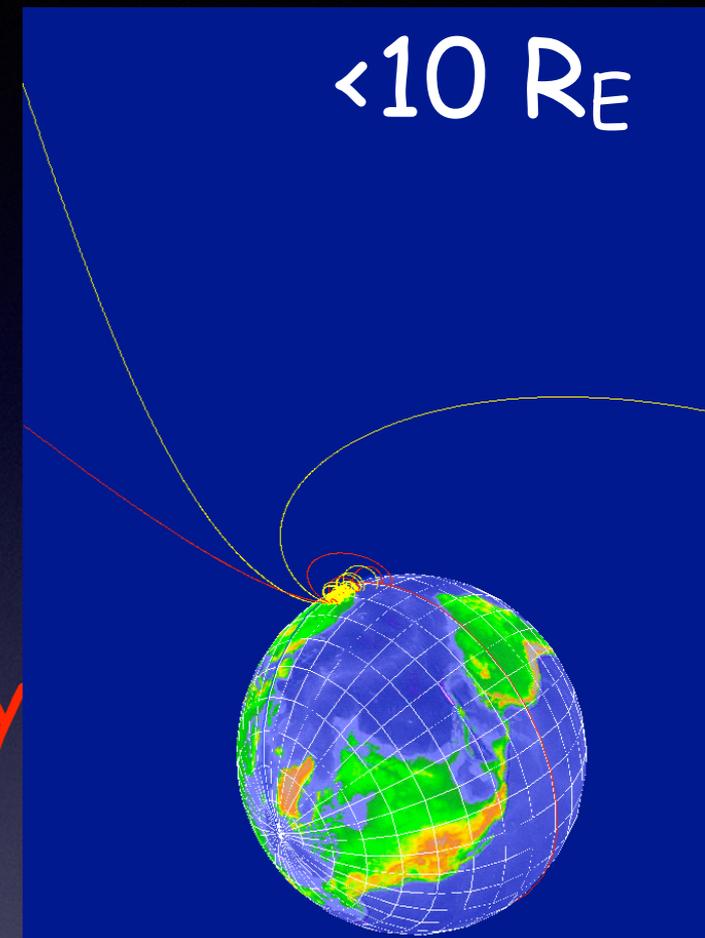
pN @ 10^{16} eV 2×10^6 events



Current Cosmos: General Features

- Fortran + c
- User Interface : Fortran or C++
- Compiler: Formal Fortran
 - Intel Fortran
 - GFortran
- Thin Sampling
- Parallel computing
 - MPI
 - Skeleton -smach- flesh method
- Hybrid AS size computing (M.C + Analytical)

- Energy: 1keV $\sim 10^{21}$ eV
- Environment: Earth Atmospher
- Time dependent NRL atmosphere
- IGRF B, dipole B, no B
- Arbitrary E field
- Various particles; tau lepton can be 1ry



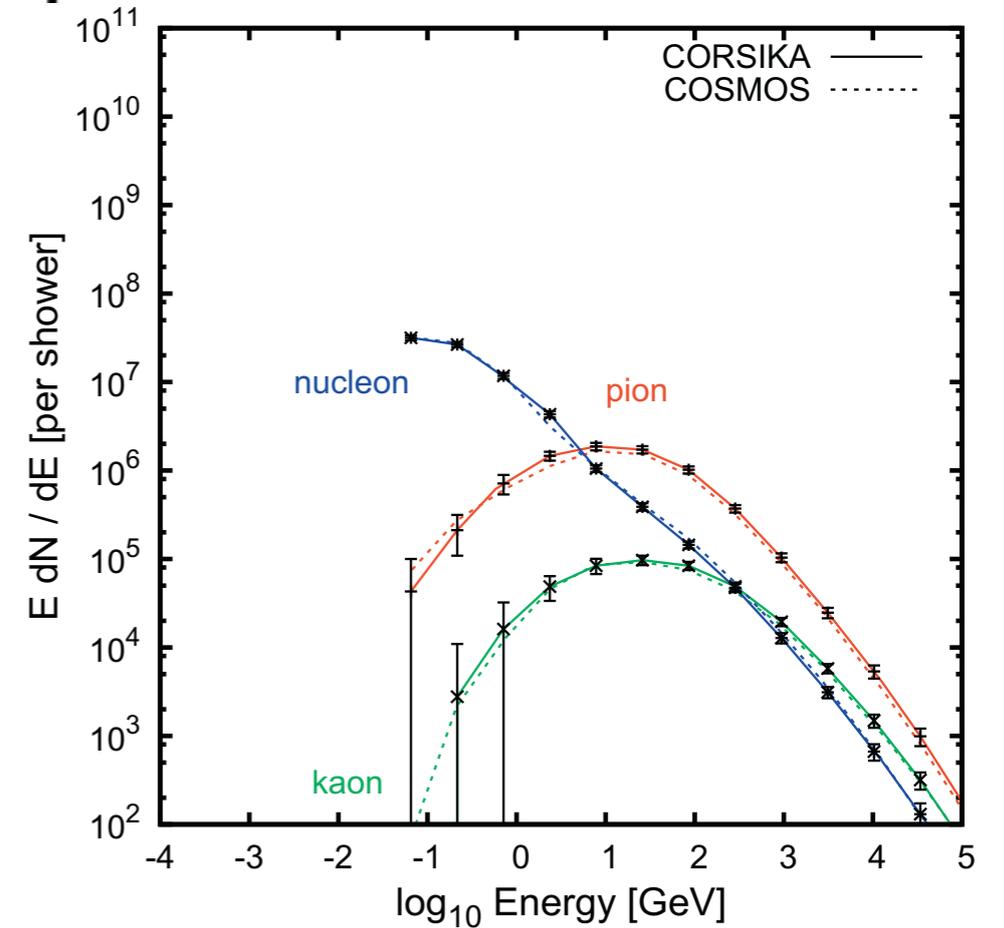
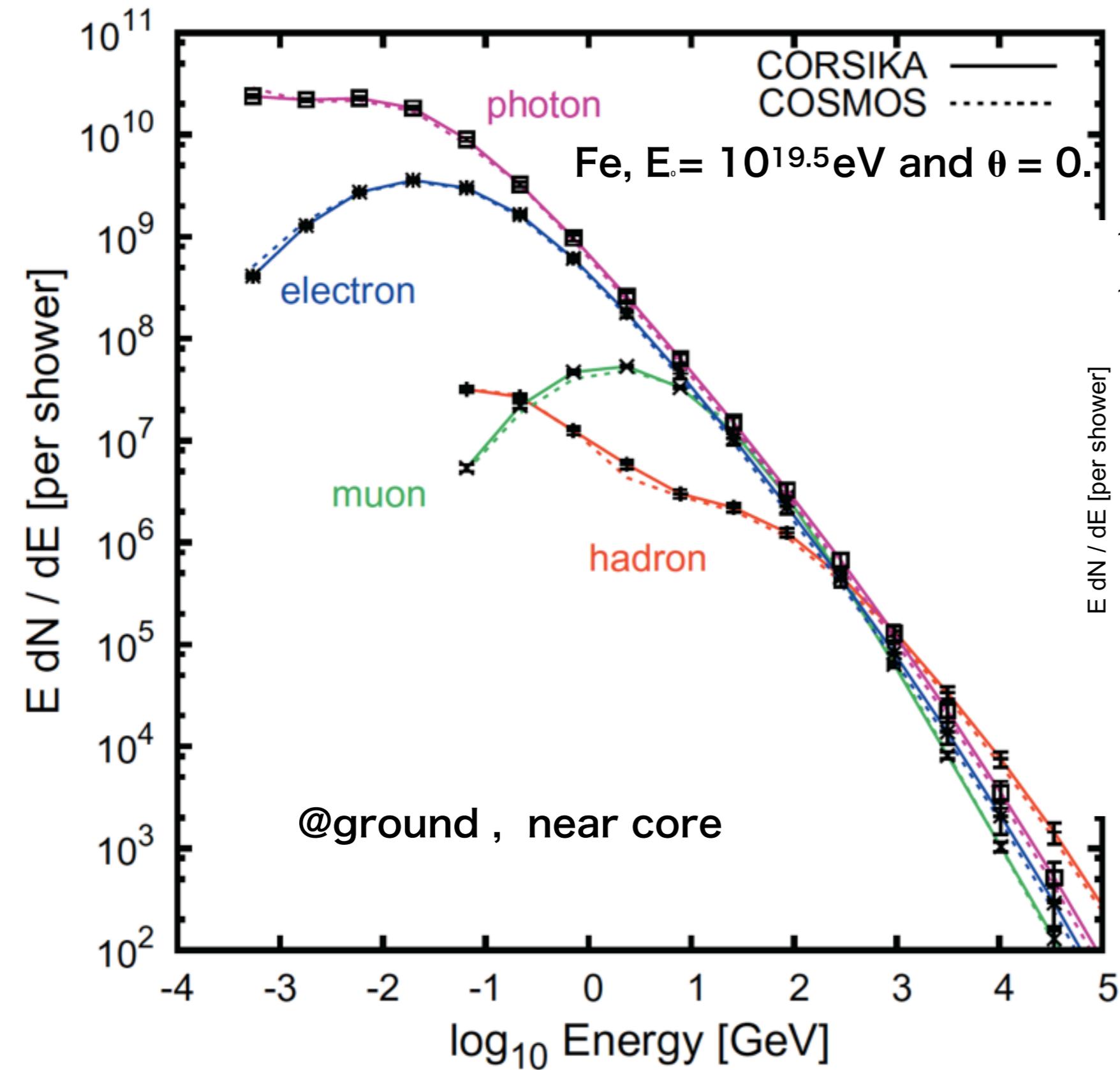
Processes

- Elemag:
 - photoelectric Eff., Rayleigh scat, Compton scat,
 - mag. pair cre. pair cre.
 - brems. e^+ annihilation, Bhabha, Møller scat.
 - mag. brems (synchrotron rad).
 - photo-hadron prod.
 - LPM effect on brem and pair.
 - Multiple scatt
- muon
 - brems, pair cre. nucl. int.
 - polarization, stopping mu- capture
- hadron interaction.
- Cherenkov → some user interface

Interaction Models

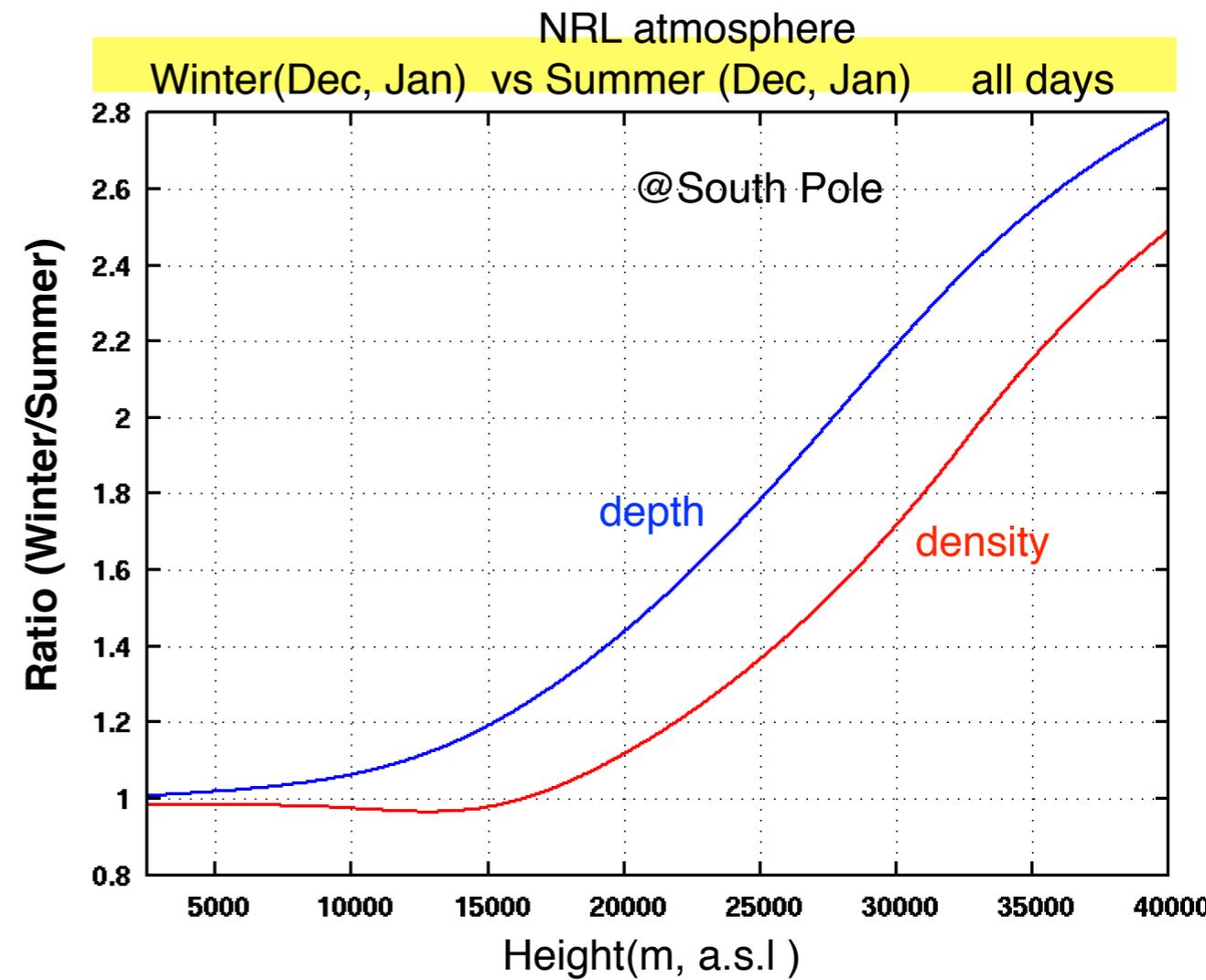
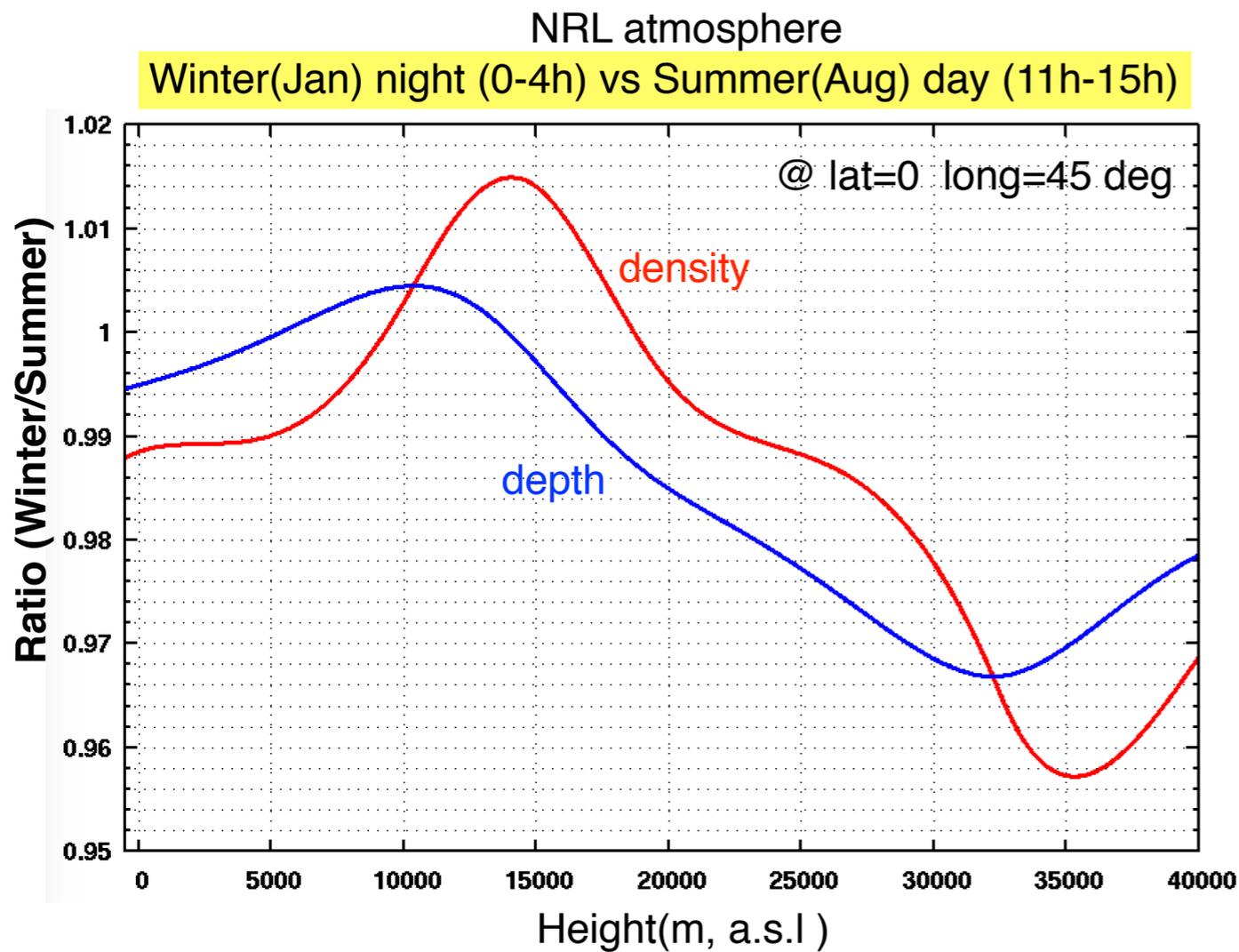
Model	Energy (GeV)	Remarks
dpmjet3	> threshold	<5GeV ~ Nucrin. Ela included. charm. UHE ?
QGSJET03	> 80	
QGSJET04	> 80	LHC tuned
EPOS1.99	> 80	
EPOS-IHC-3400	> 80	LHC tuned
EPOS-IHC-3700	> 80	LHC tuned. A>56 can be used
Sibyll2.1	> 80	essentially for p, Air target
Sibyll2.3c	> 80	// charm included
JAM	< 10 ⁶	spectator fragment ng
PHITS	< 2	JAEA code. neutron interaction
Sofia	> 0.14	photo-hadron production
Fritiof1.6	< 2000	
Nucrin	< 5	
ad-hoc	> threshold	employed only for rescue

Comparison with CORSIKA



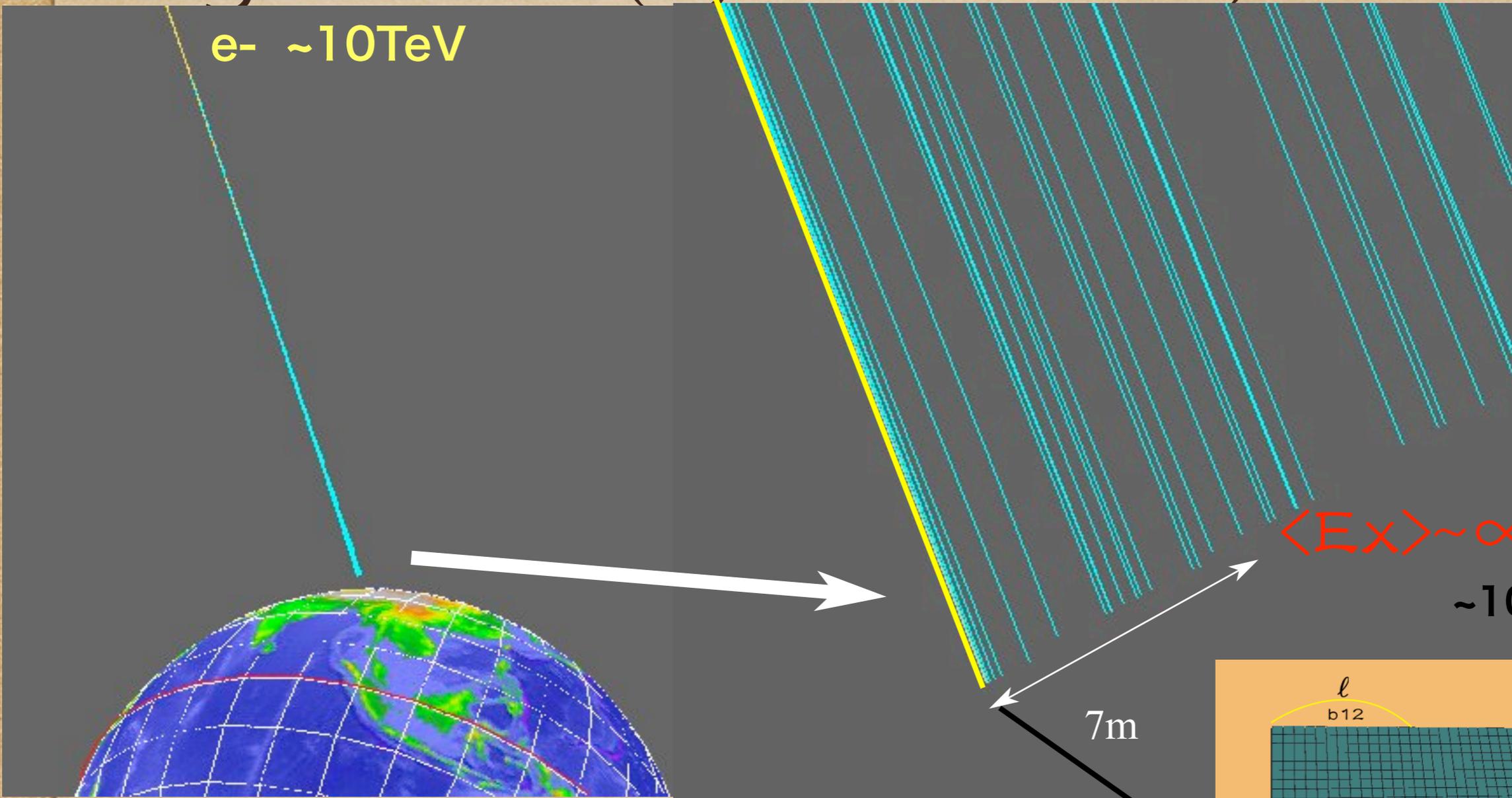
Some non-standard features in Cosmos

★ Time and place dependent atmosphere by NRLMSISE



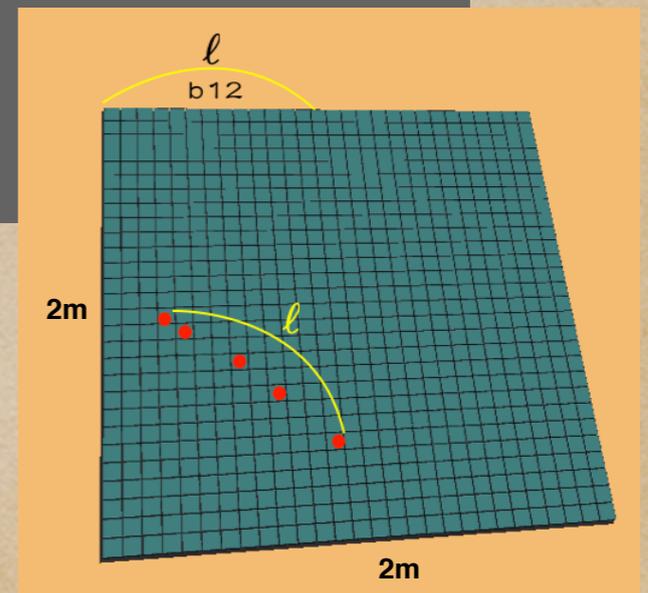
Mag. Brems(synchrotron) Xray

$e^- \sim 10\text{TeV}$



$$\langle E_x \rangle \sim \propto E_e^2$$

$\sim 100 \text{ keV}$



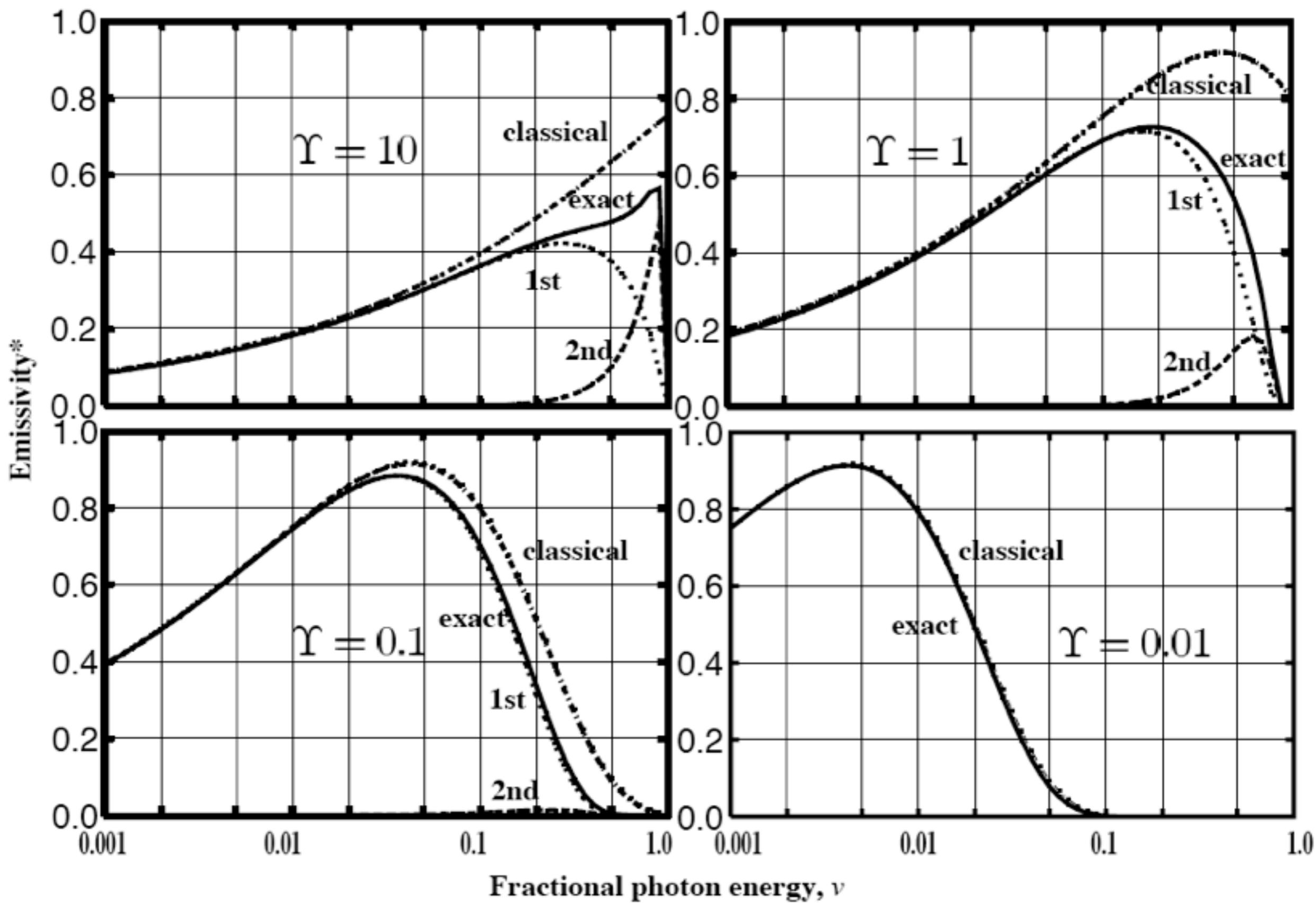
Explore the High Energy End of 1ry Electrons

Mag. Effect at ultra high energies

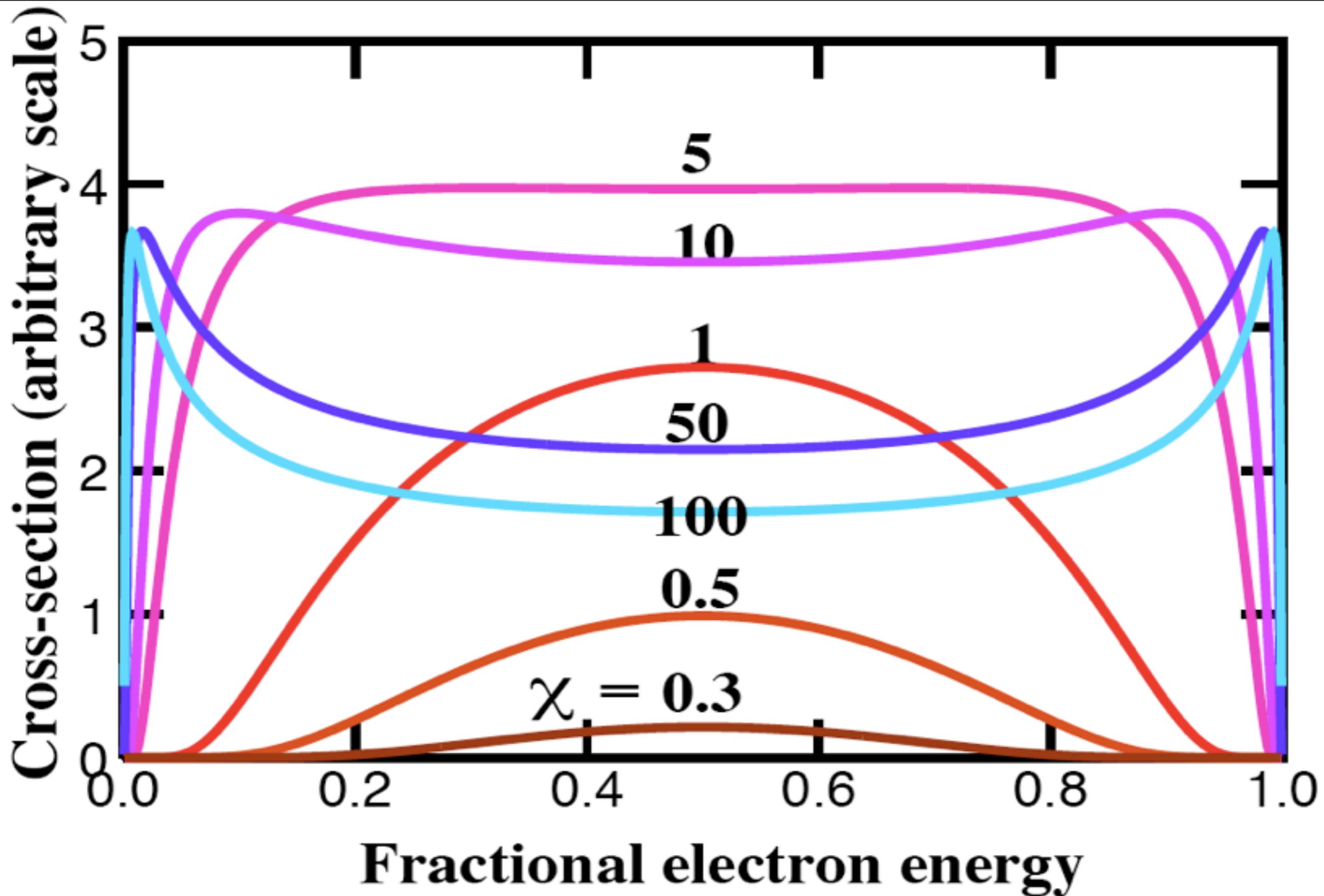
$$\Upsilon = \frac{E_e B}{m B_c} \quad \chi = \frac{1 E_\gamma B}{2 m B_c}$$

$$B_c = 4.3 \times 10^{13} \text{ gauss}, \quad B \sim 0.3 \text{ gauss}$$

Mag. Brems

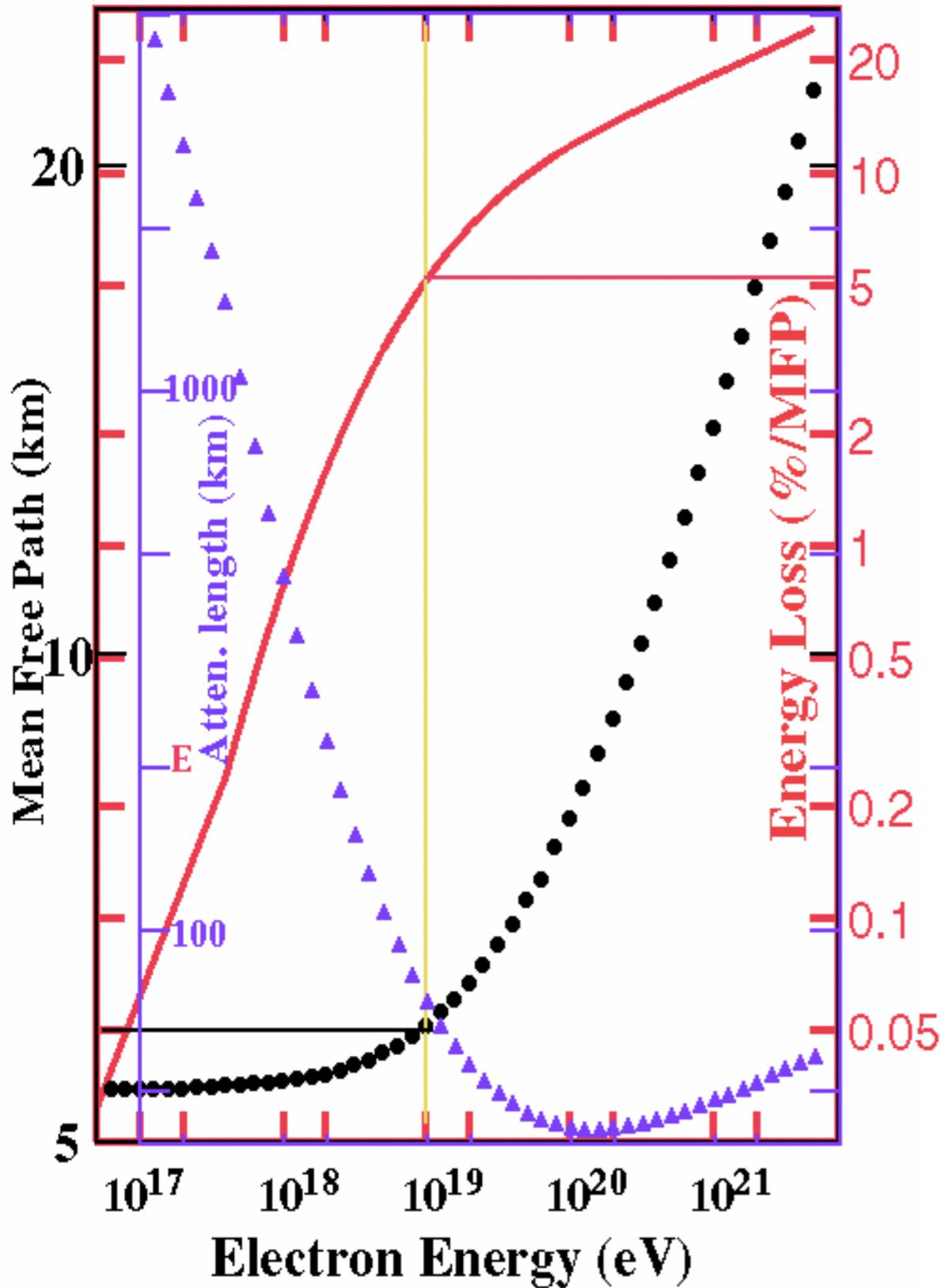


Mag. pair cre.

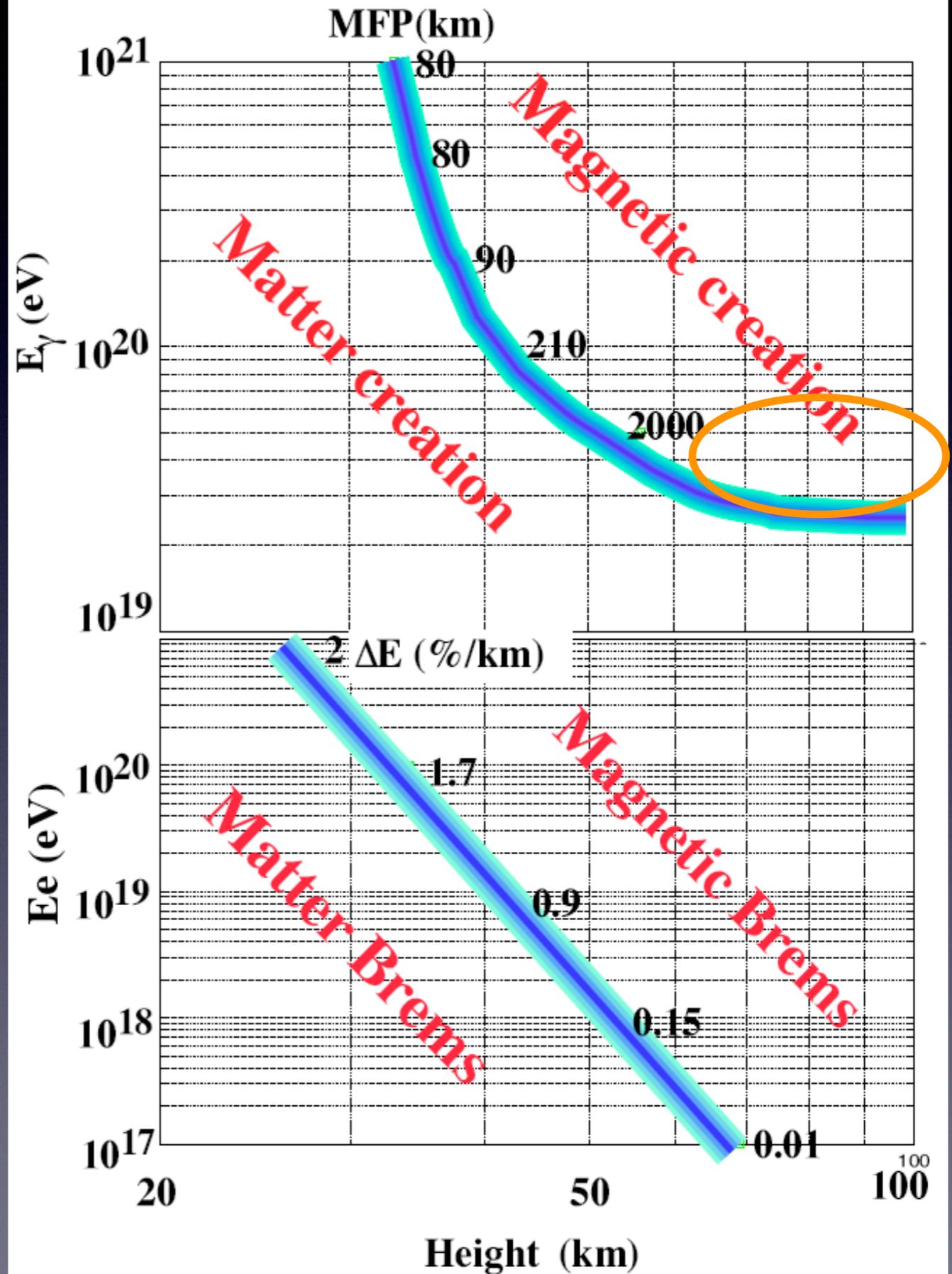


Mag. Brems

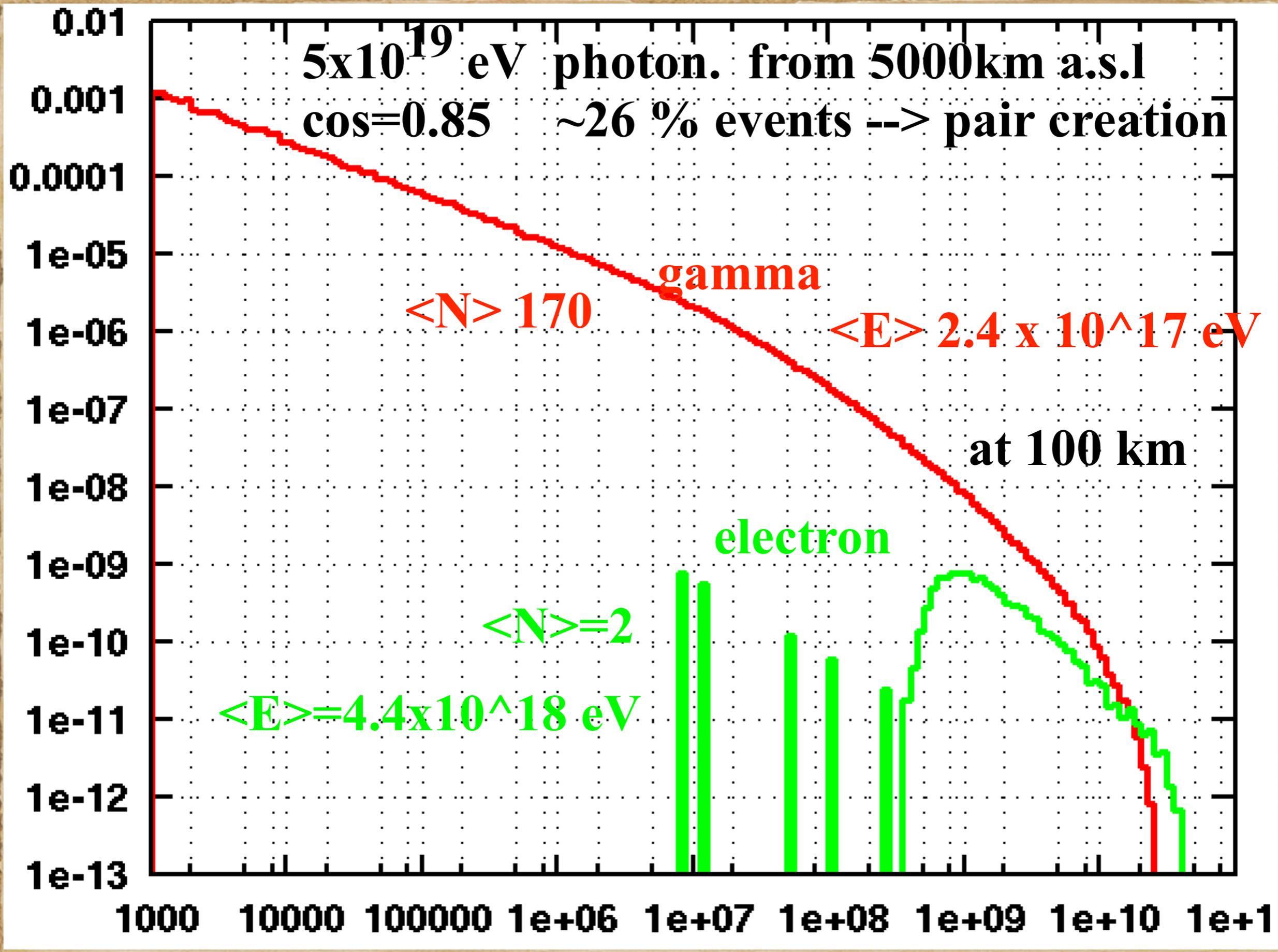
Magnetic Brems in 0.3 Gauss Env.



Break-Even Points



dN/dE/event



Mag. pair creation

$$\chi = \frac{E_\gamma}{2m_e} \frac{B \sin \theta}{B_c}$$

$$|\vec{P} \times \vec{B}| \propto B \sin \theta$$

large

Mag. pair
works

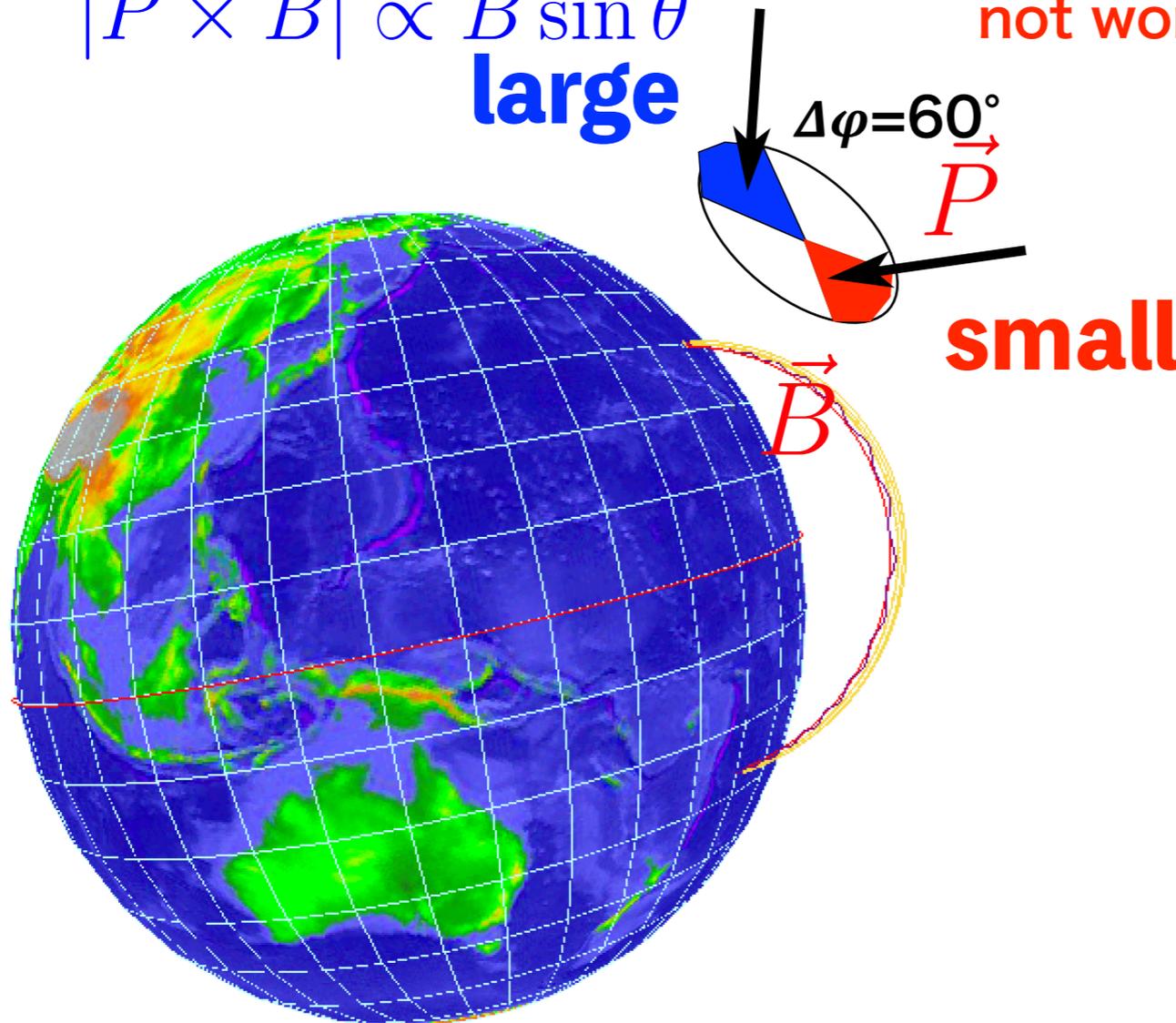
LPM
not works

Fluctuation
small

not works

works

large



Quick Hybrid calculation of Ne by $E\gamma=5\times 10^{19}$ eV

Ne

4.5e+10

4e+10

3.5e+10

3e+10

2.5e+10

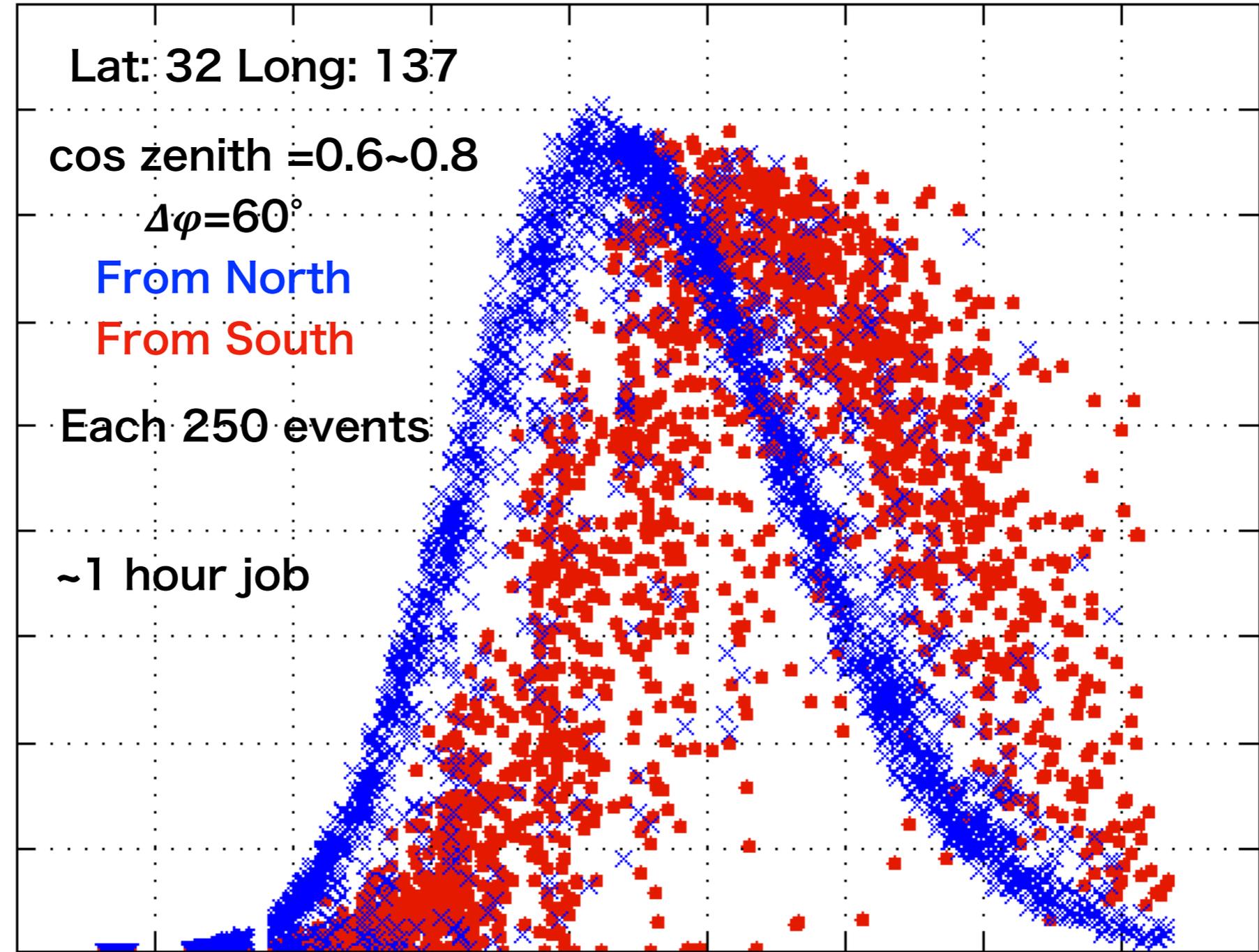
2e+10

1.5e+10

1e+10

5e+09

0



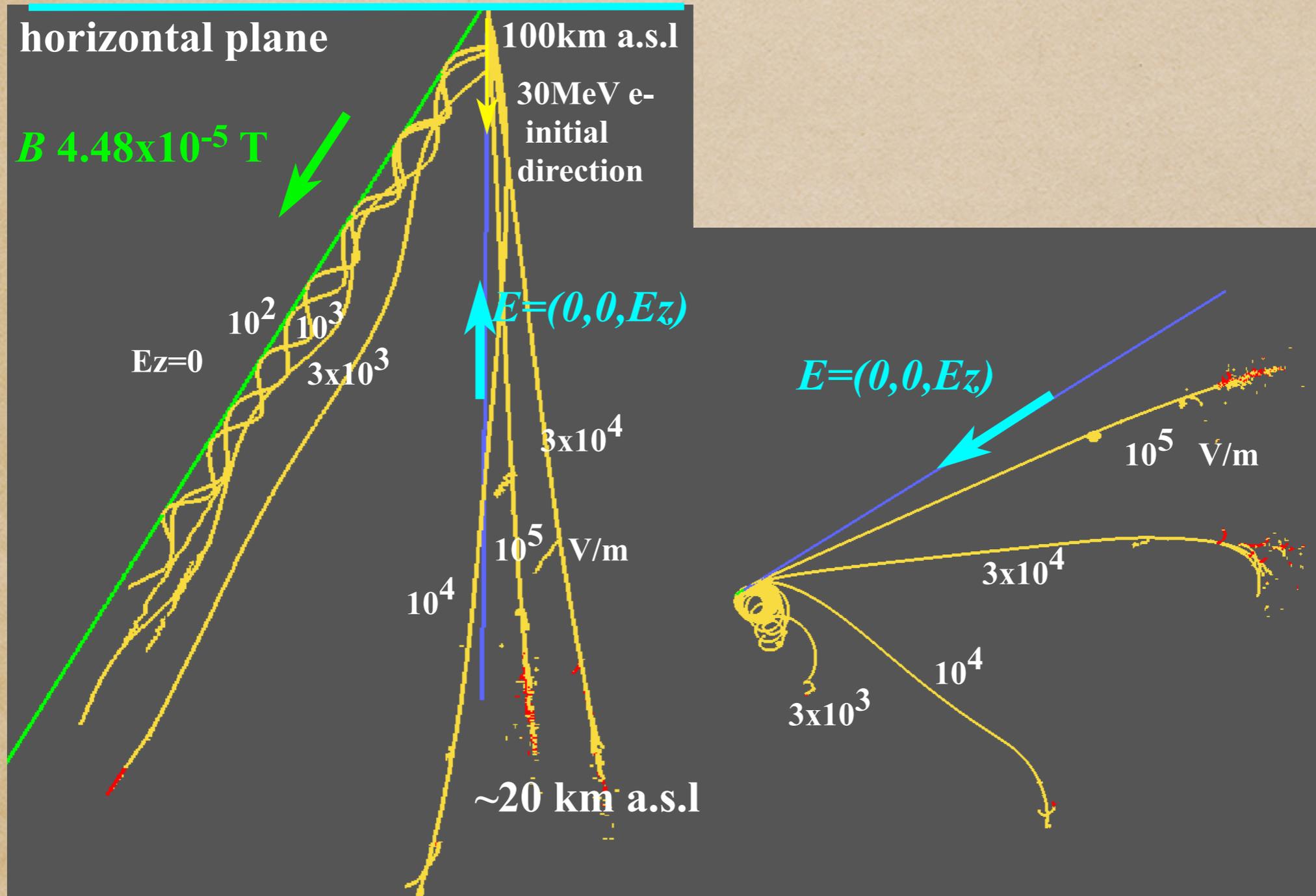
0 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

Slant Depth (g/cm²)

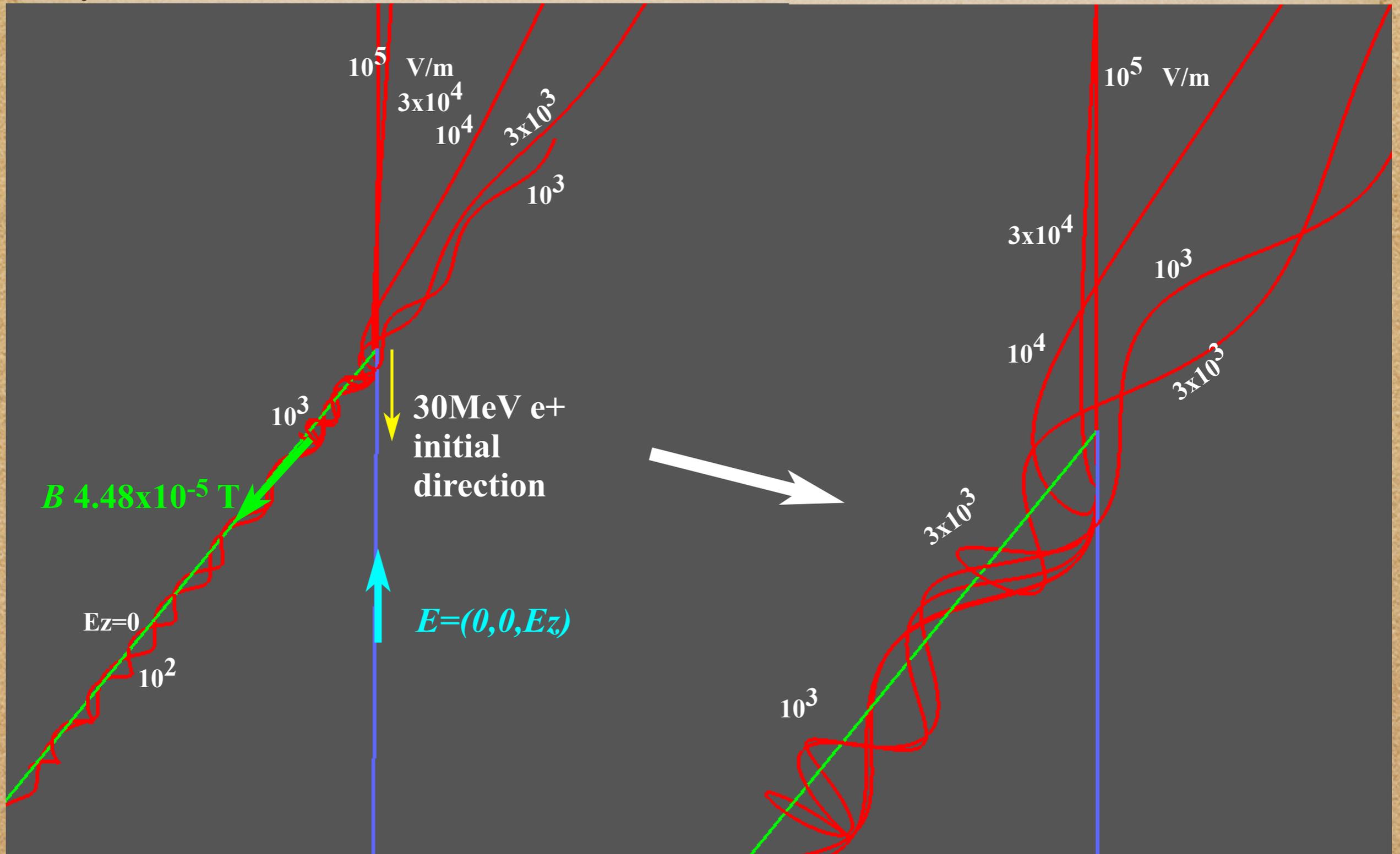
Electric field

- Simple field ($E(r,t)$): Specified by parameters
- Complex one: The user may supply a subroutine for giving $E(r,t)$.

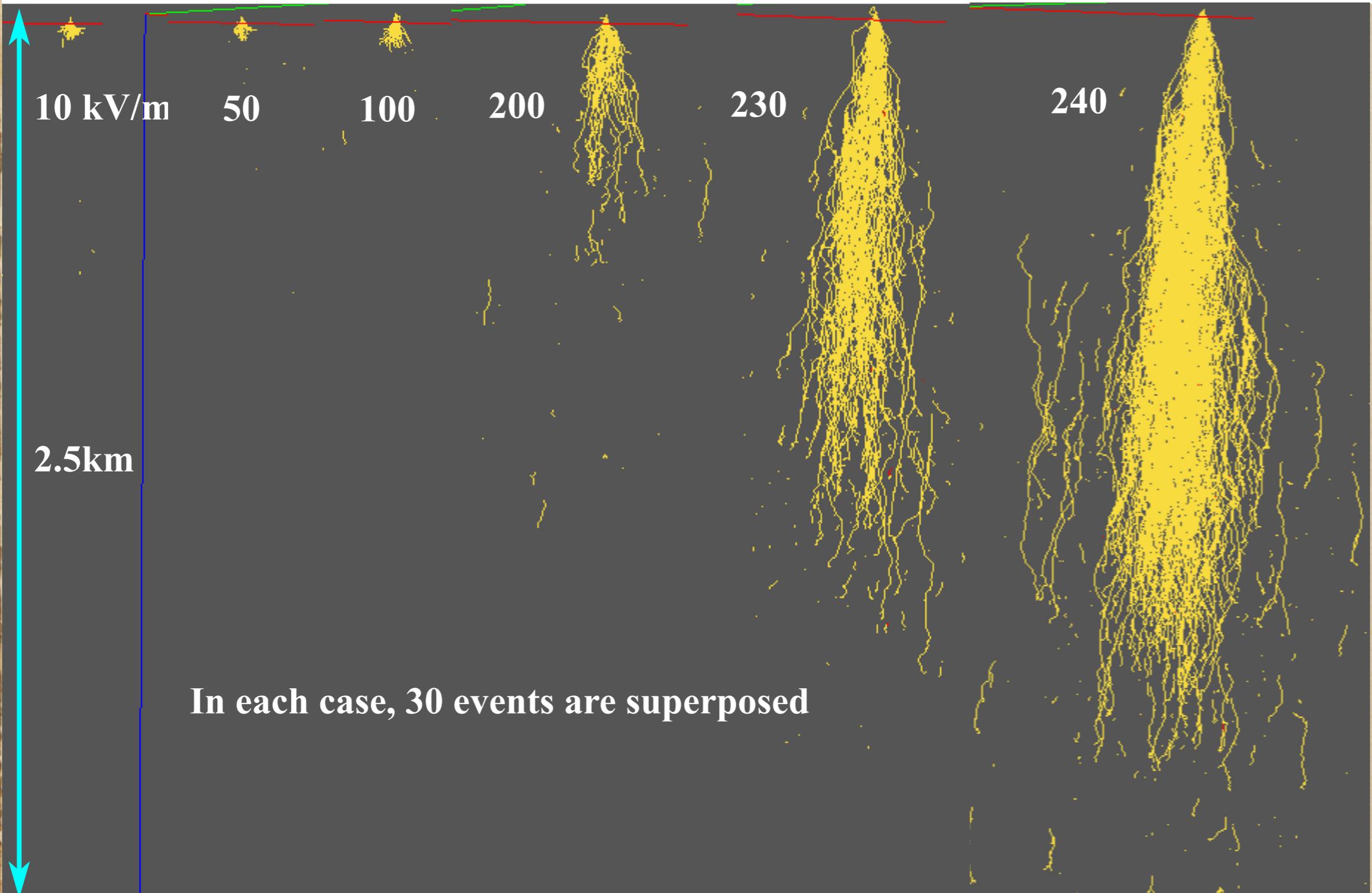
- Test at almost no air height, (B, E)
- electron 30 MeV



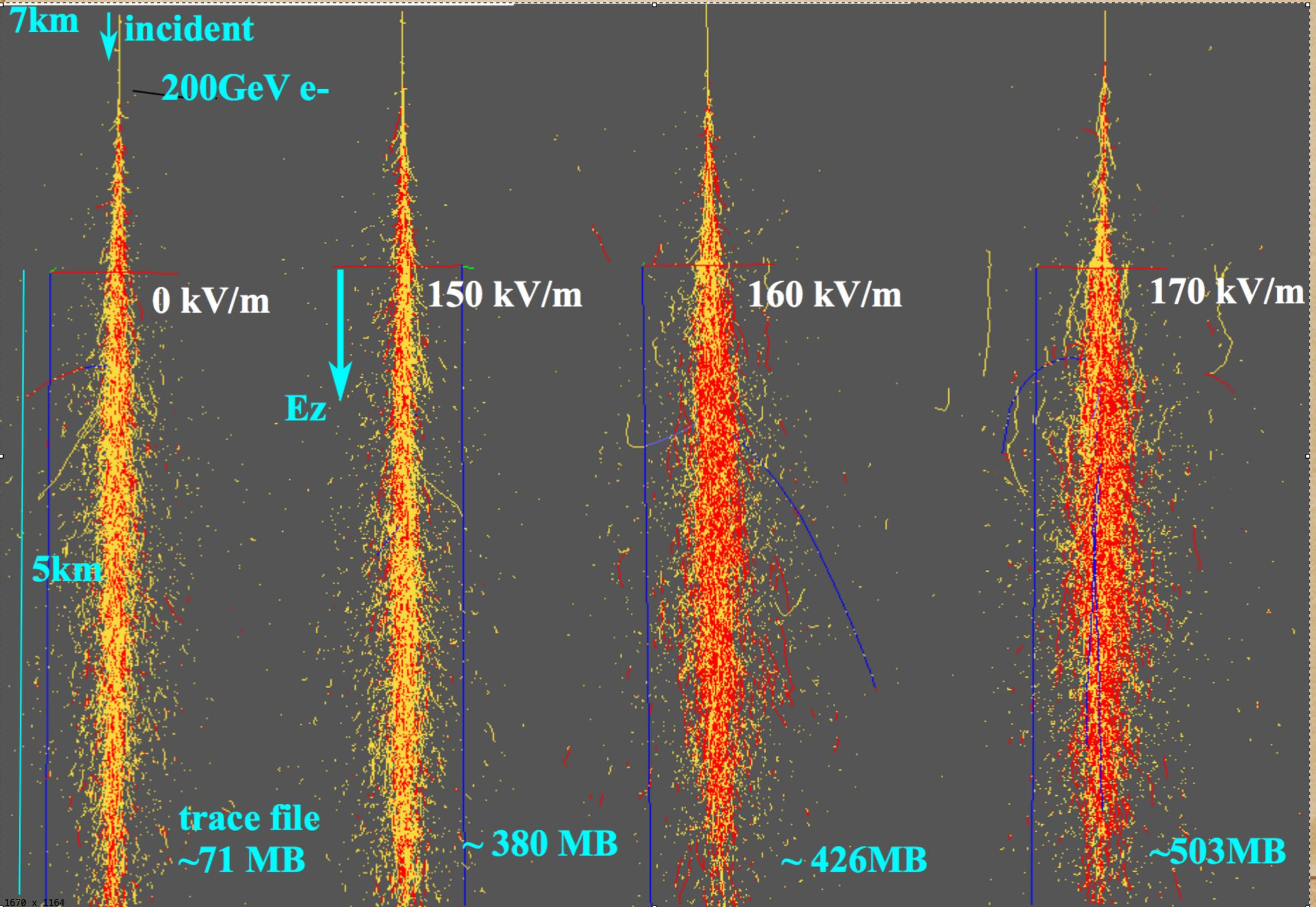
- Test at almost no air height, (B, E)
- positron 30MeV



• Test in air 10MeV e-



• Test in air 200 GeV e-



• Test in air 200 GeV e-

7km

incident

200GeV e-

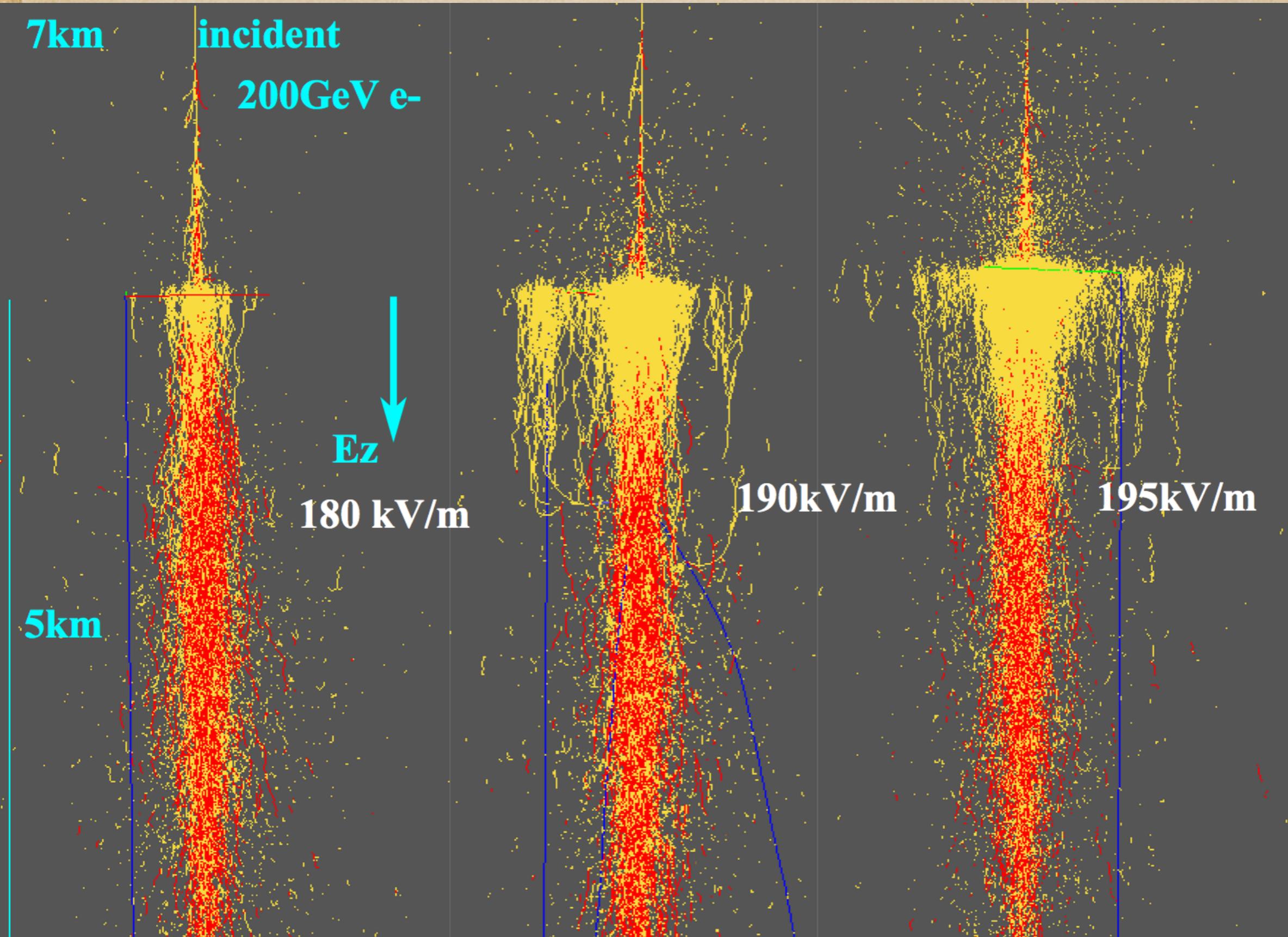
E_z

180 kV/m

190kV/m

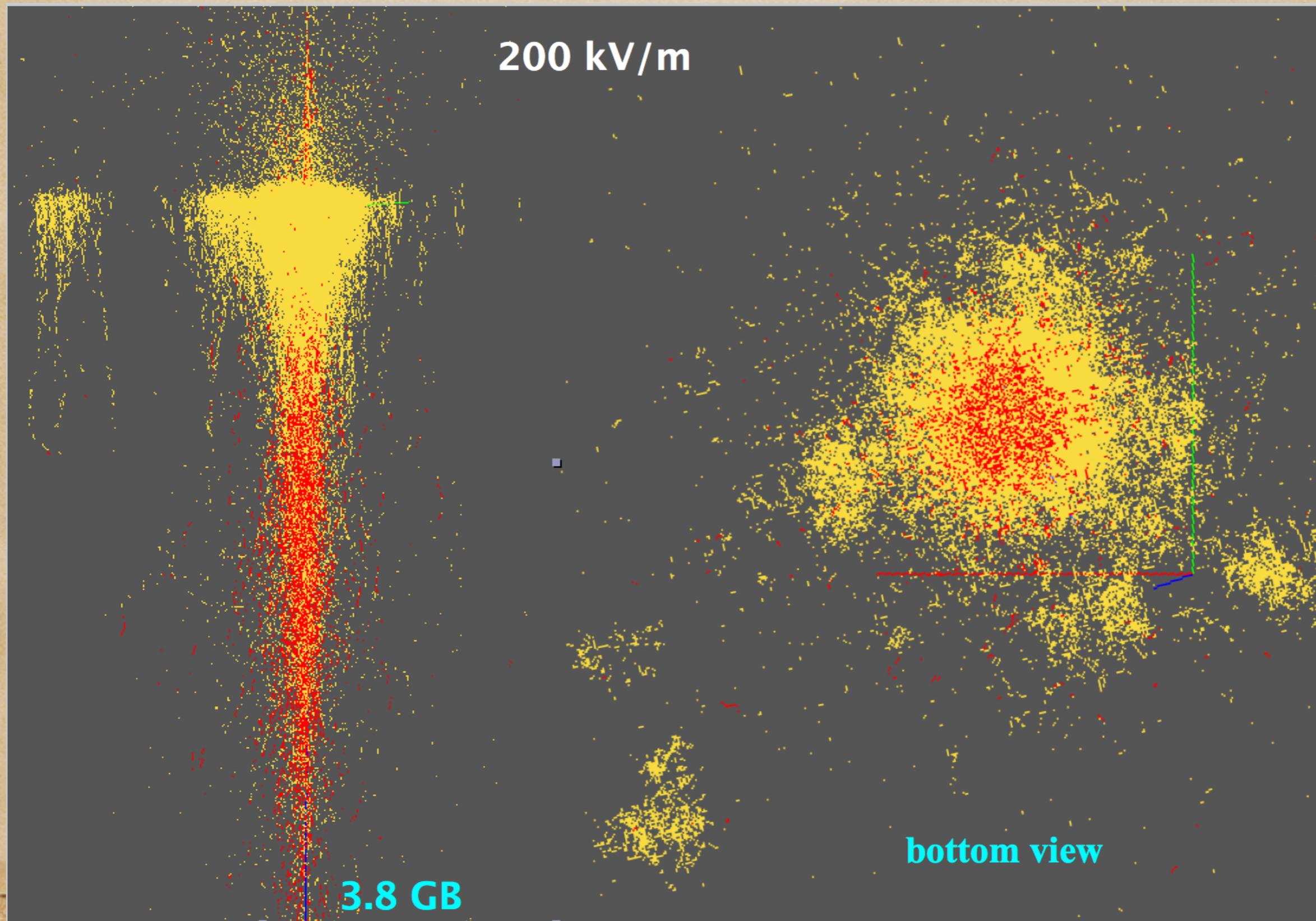
195kV/m

5km



• Test in air 200 GeV e-

200 kV/m



3.8 GB

bottom view

- In actual applications, it is important to take into account the time information of electric field (duration time), as well as r-dependence.

Non MPI parallel computing

- MPI: Message Passing Interface: suffers communication burden
- For cascade process, skeleton-smash-flesh method is introduced.
 - At initial stage, jobs are distributed to a number of cpu's
 - No communication needed during computation.
- Thinning may be employed simultaneously

Skeleton method

skeleton



Skeleton method

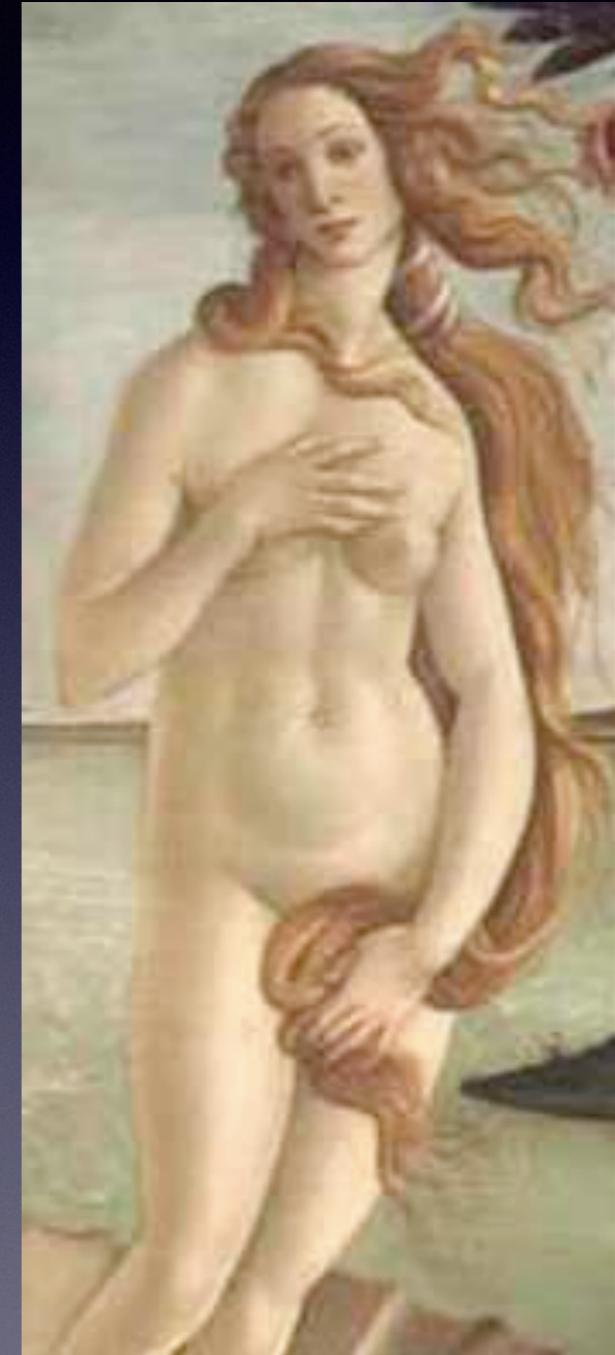
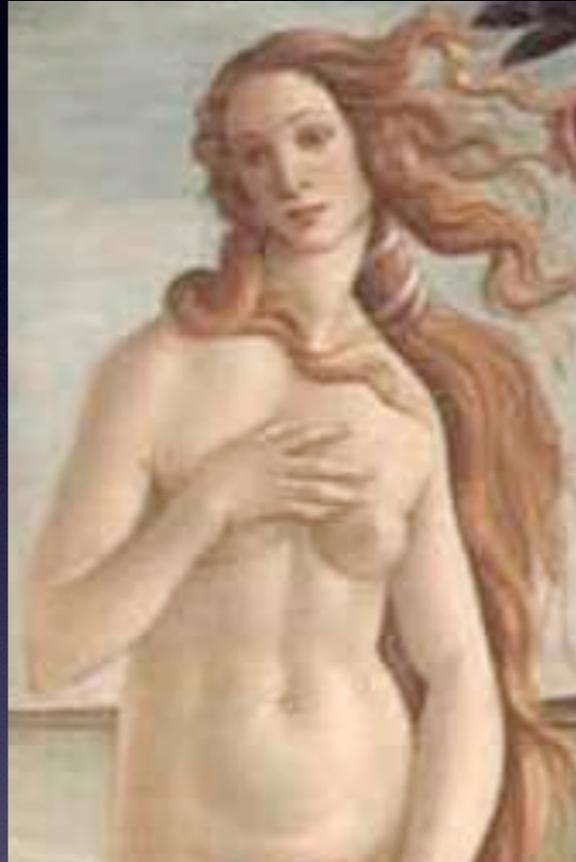
skeleton



fleshing

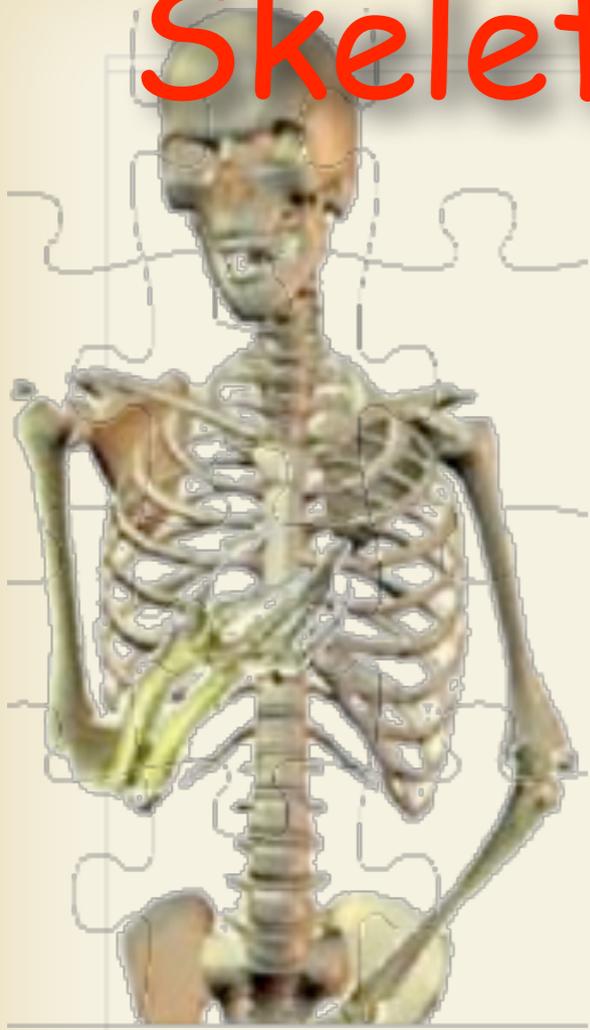
Skeleton method

skeleton



fleshing

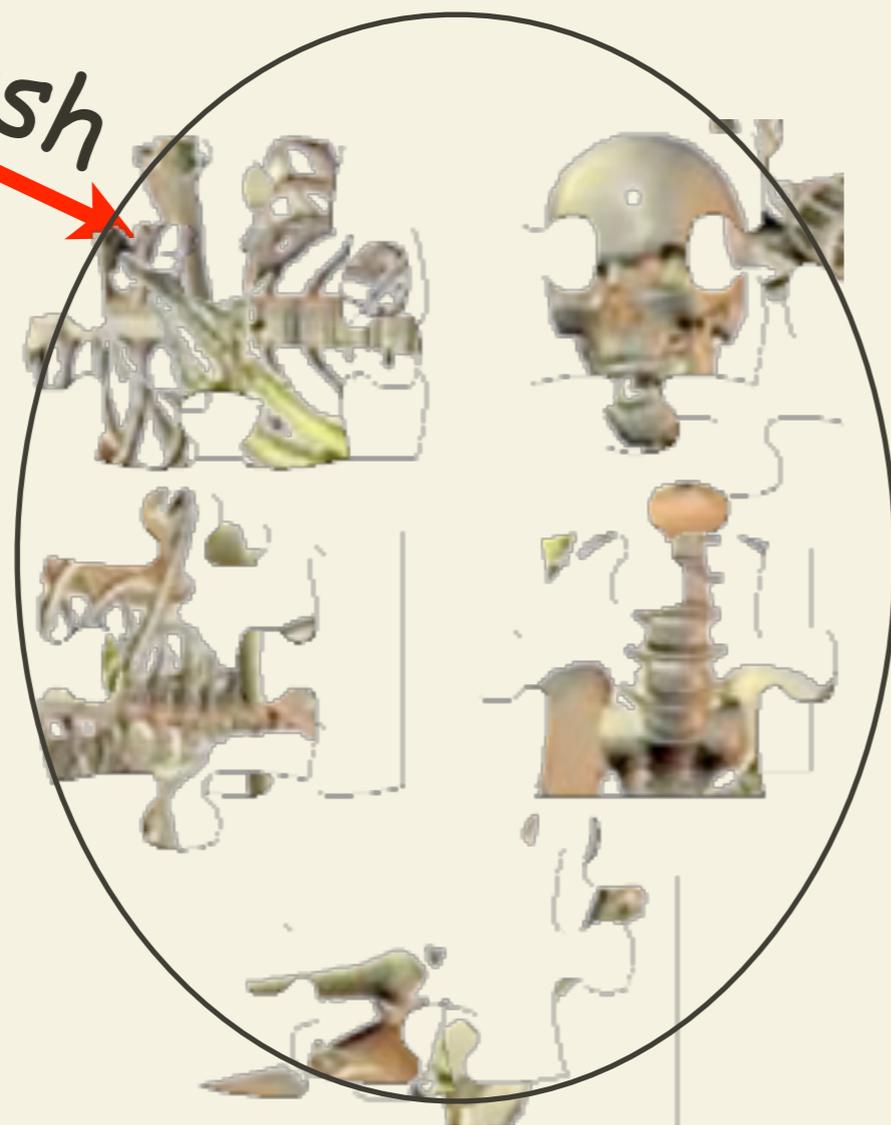
Skeleton-Smash-Flesh method



Skeleton-Smash-Flesh method



Smash

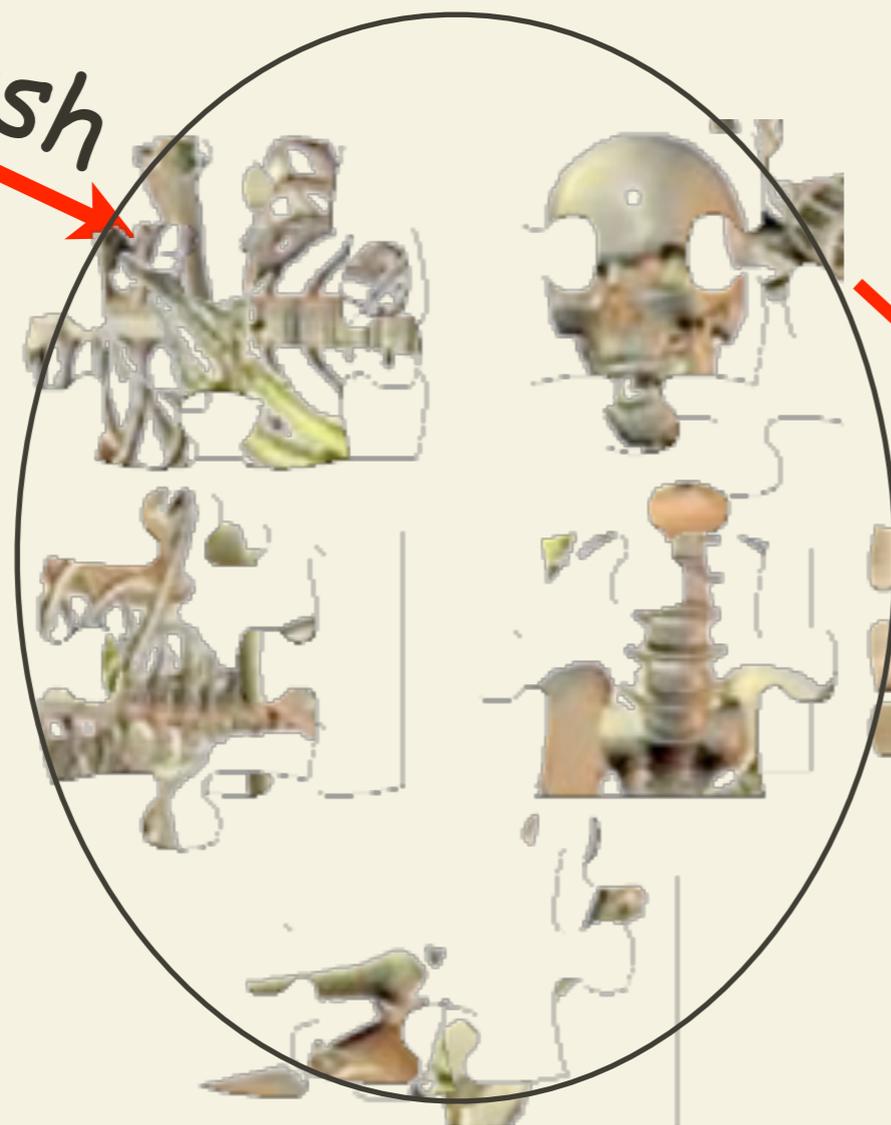


Skeleton-Smash-Flesh method

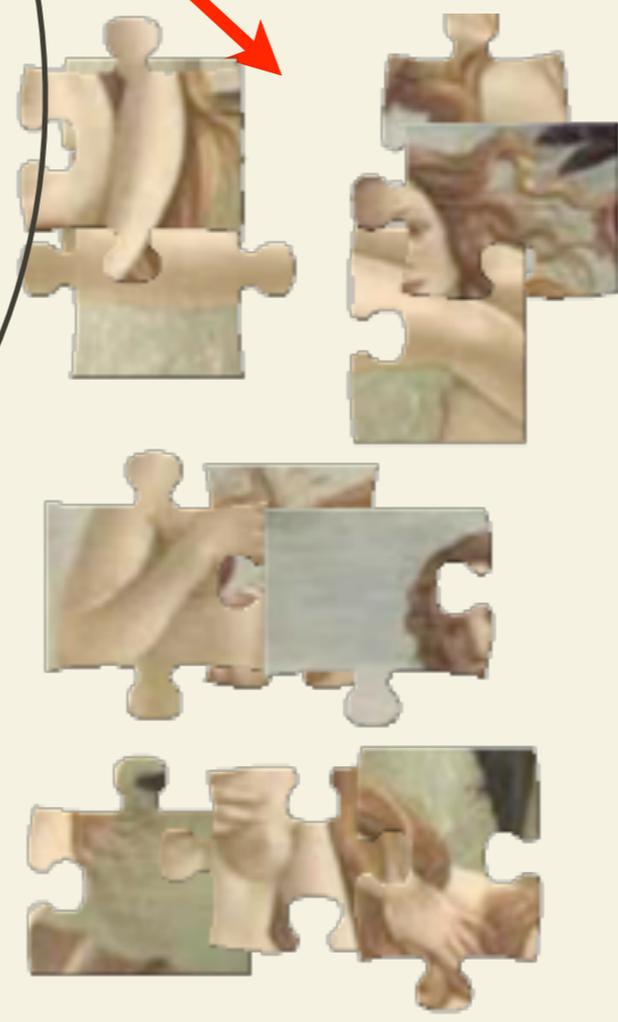
Distributed parallel processing



Smash



Fleshing at n-cpu

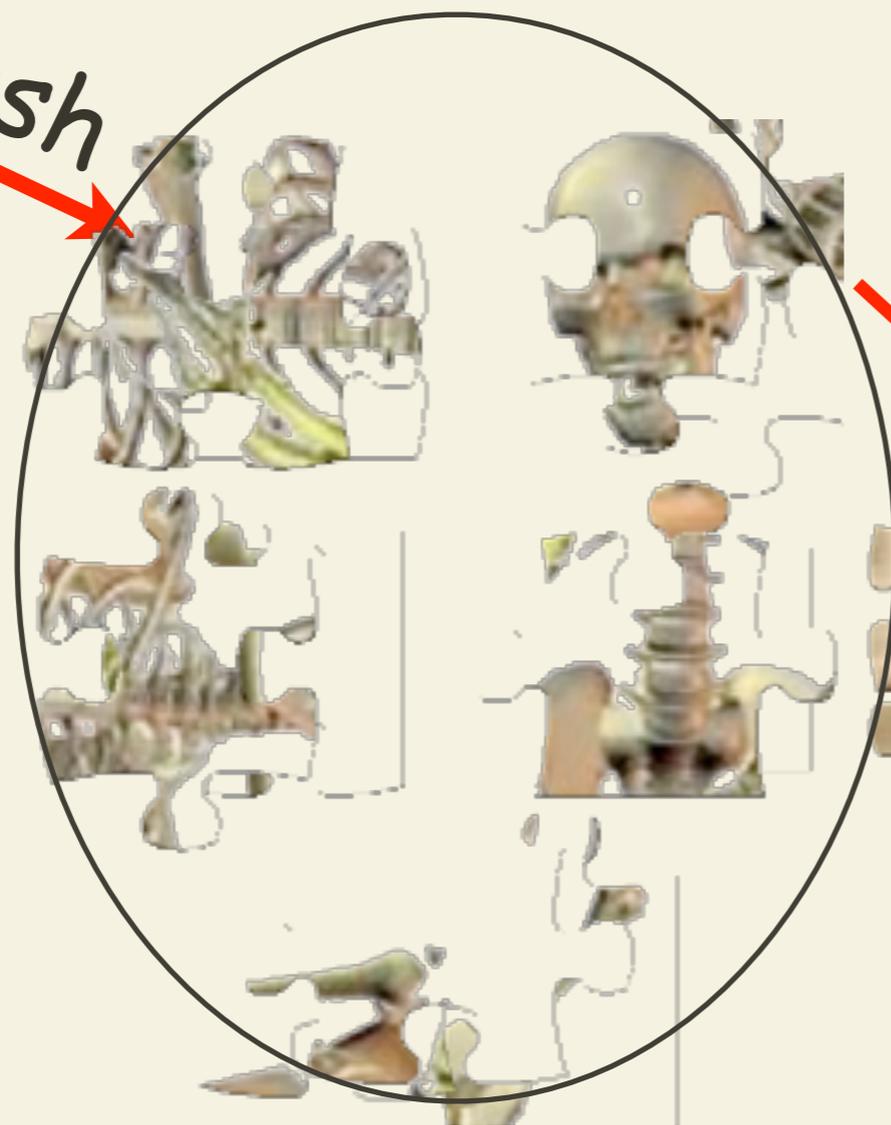


Skeleton-Smash-Flesh method

Distributed parallel processing



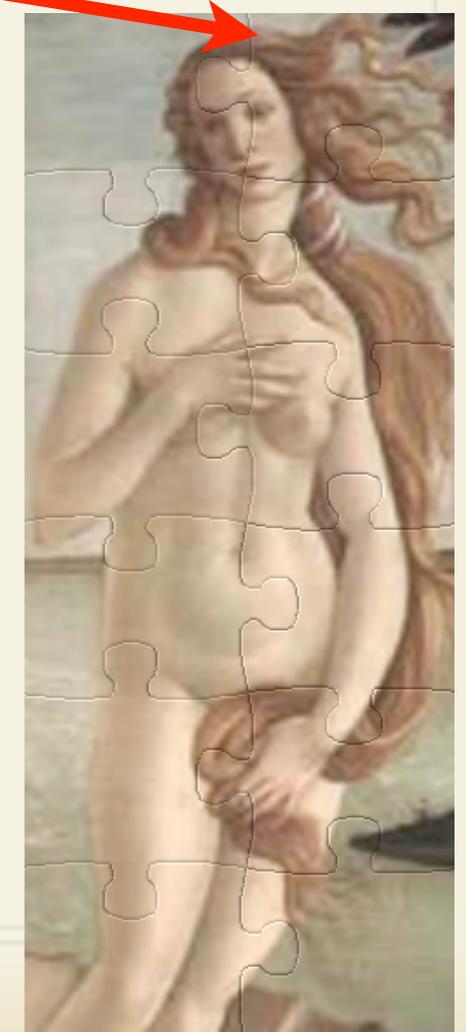
Smash



Fleshing at n-cpu



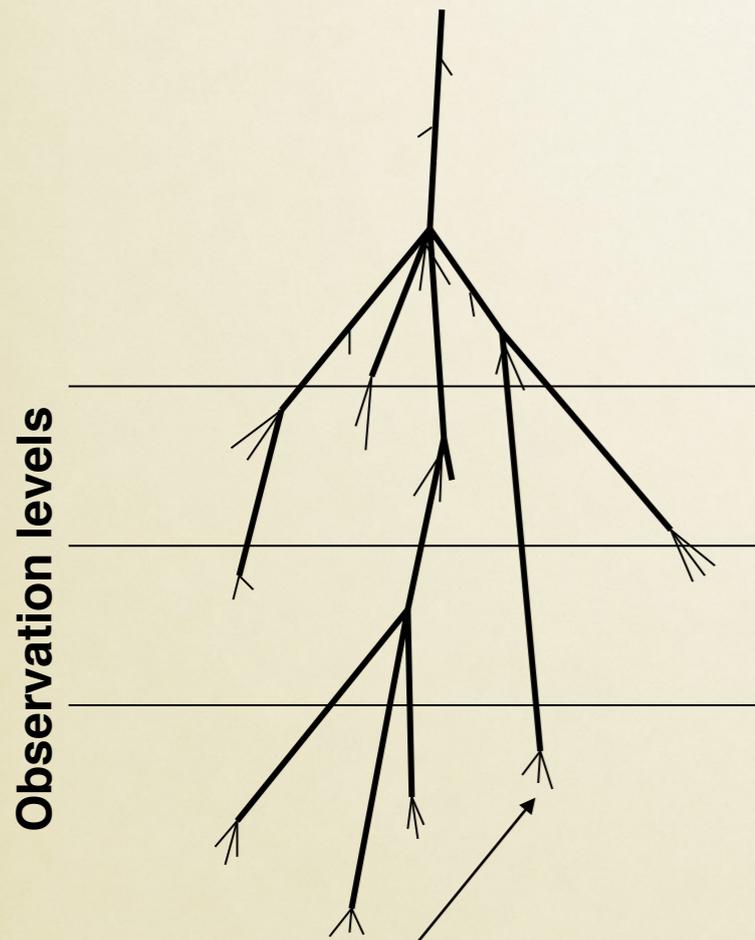
Assembling



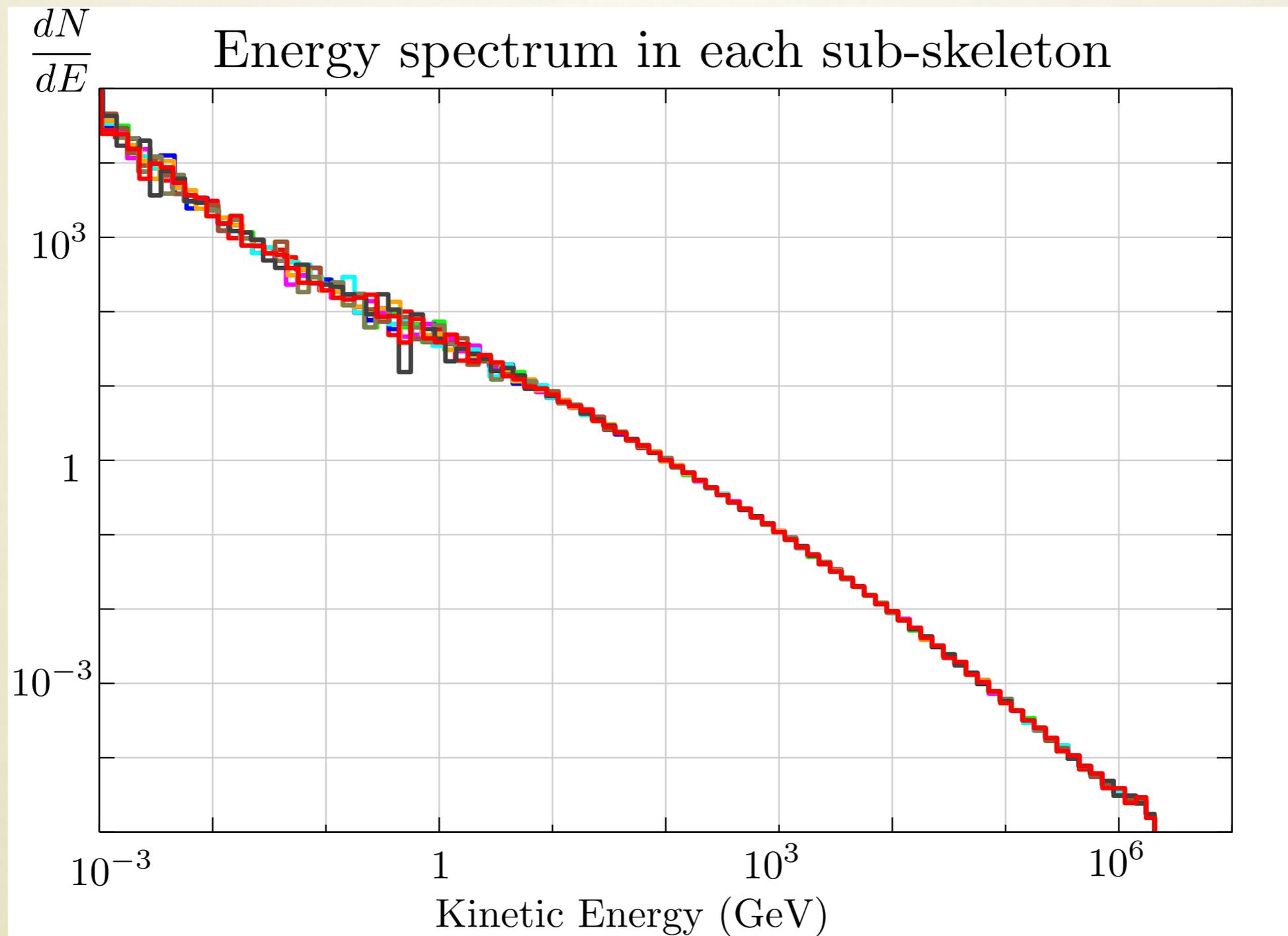
No communication needed during computation

10^{20} eV $E_{\min}=2 \times 10^{15}$ eV; 1534303 ptcls

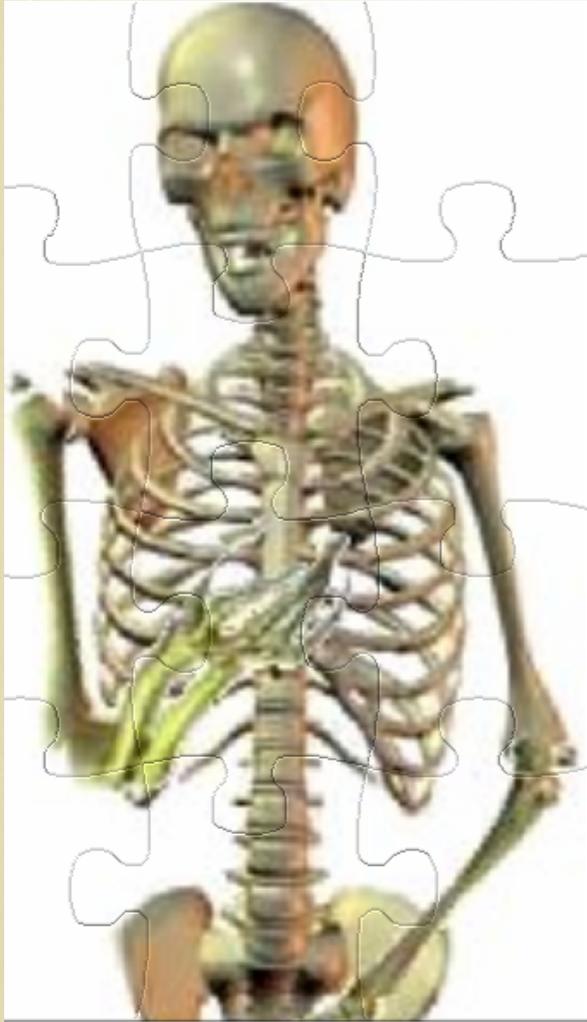
cpu#	cpuPW	Sum E	# of ptcls
1	1.0	0.9827795E+08	1535
2	1.0	0.9827795E+08	1536
3	1.0	0.9827795E+08	1536
4	1.0	0.9827795E+08	1536
5	1.0	0.9827795E+08	1535
...			
995	1.0	0.9827795E+08	1536
996	1.0	0.9827795E+08	1536
997	1.0	0.9827795E+08	1536
998	1.0	0.9827795E+08	1536
999	1.0	0.9827795E+08	1535



nodal points ~360000
generation: ~100 sec

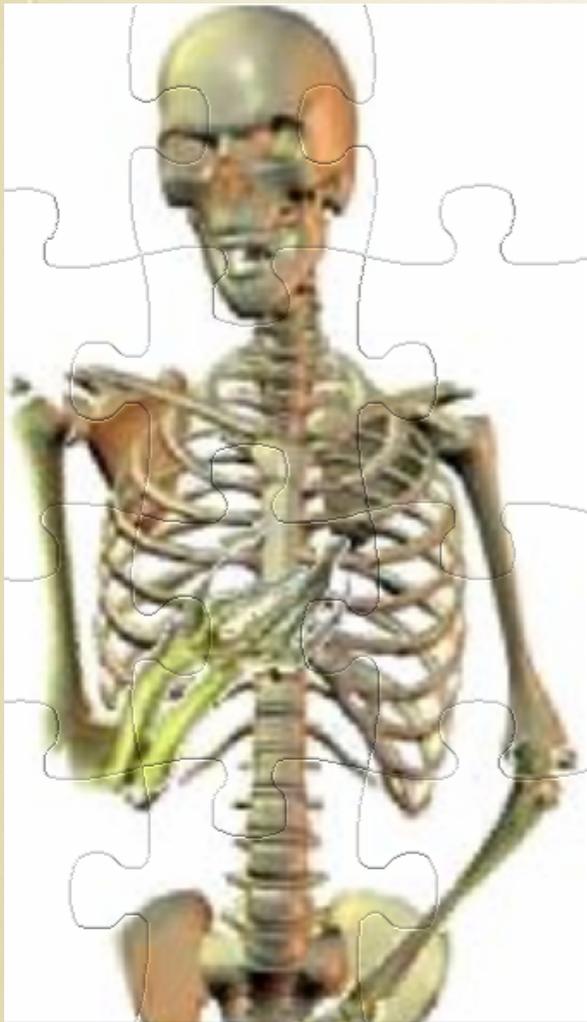


Virtual (Quasi) Full M.C at 10^{20} eV



Assemble Thinning

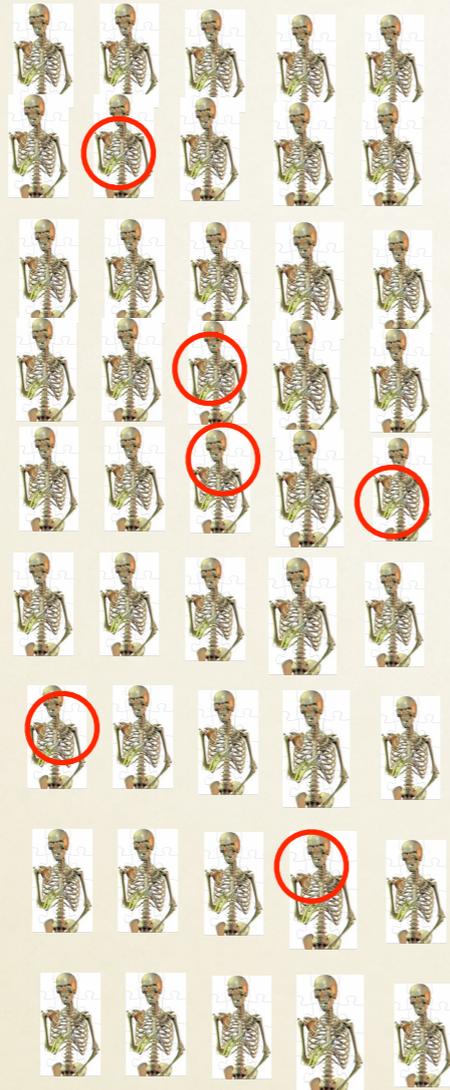
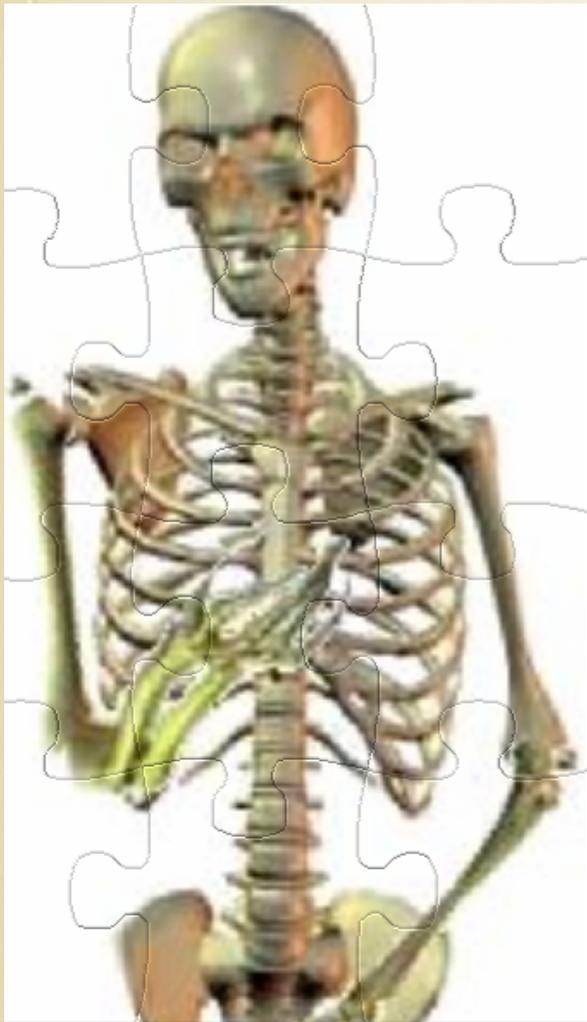
Virtual (Quasi) Full M.C at 10^{20} eV



500 skeleons

Assemble Thinning

Virtual (Quasi) Full M.C at 10^{20} eV

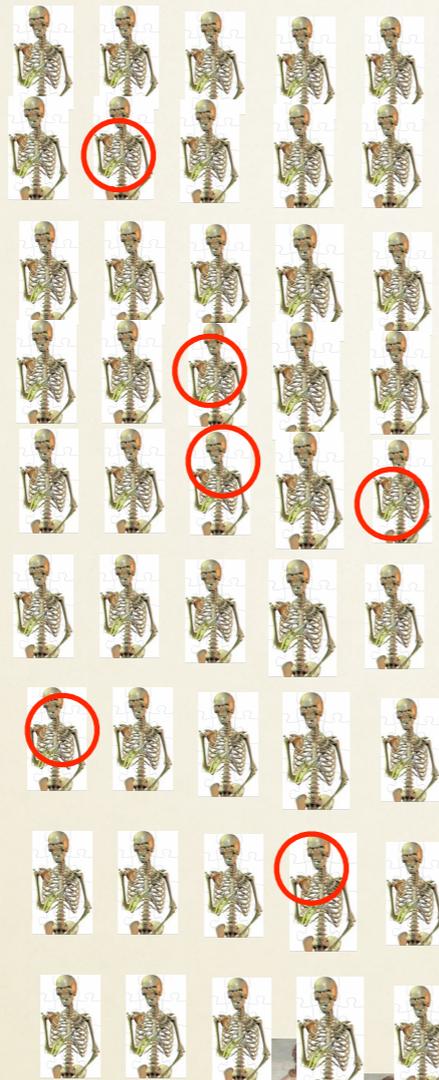
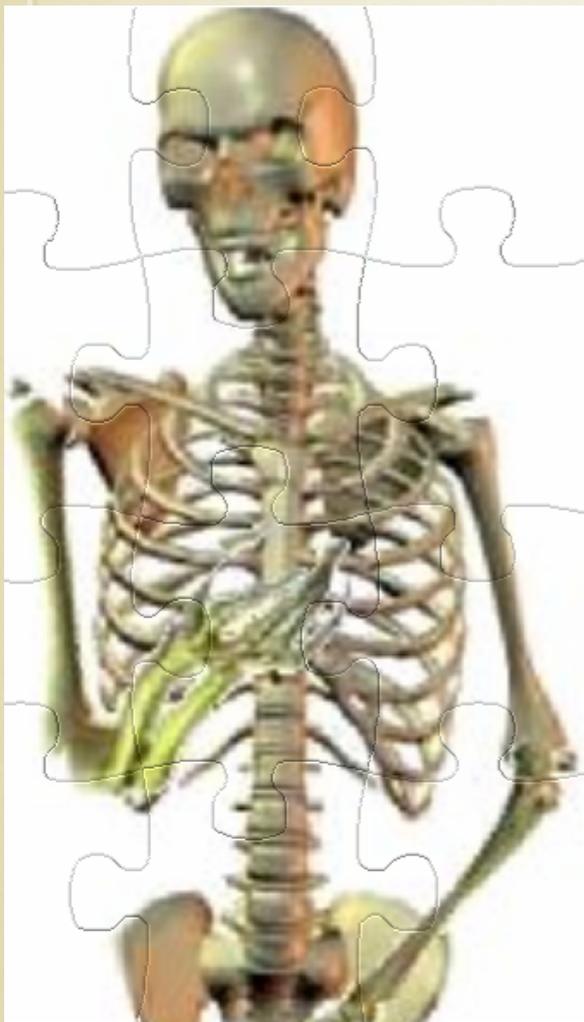


500 skeleons

50's are fleshed

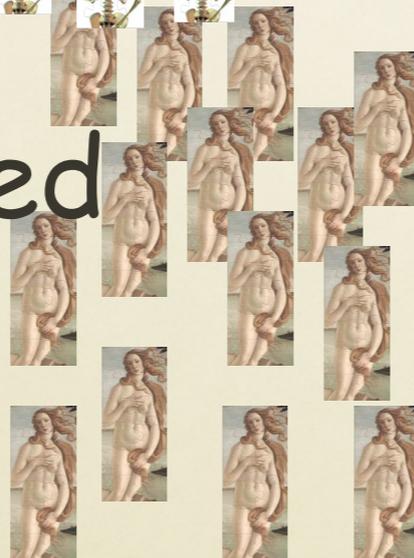
Assemble Thinning

Virtual (Quasi) Full M.C at 10^{20} eV



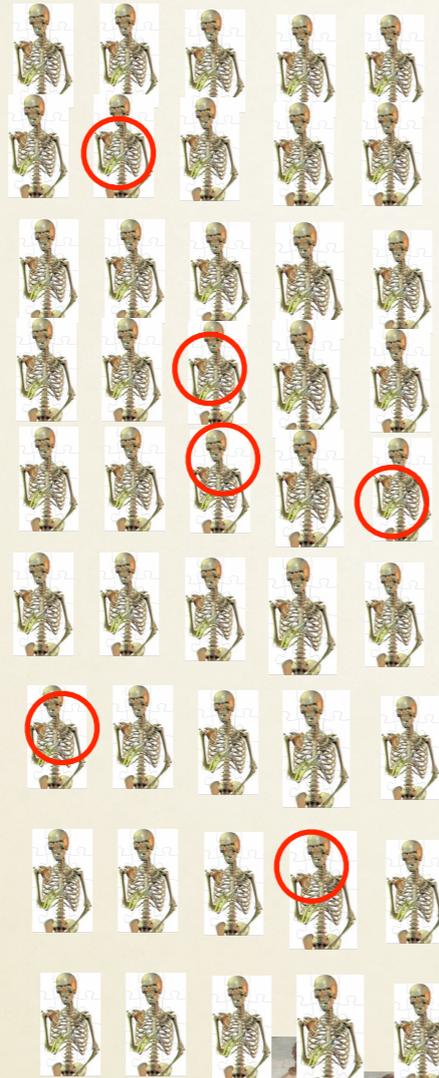
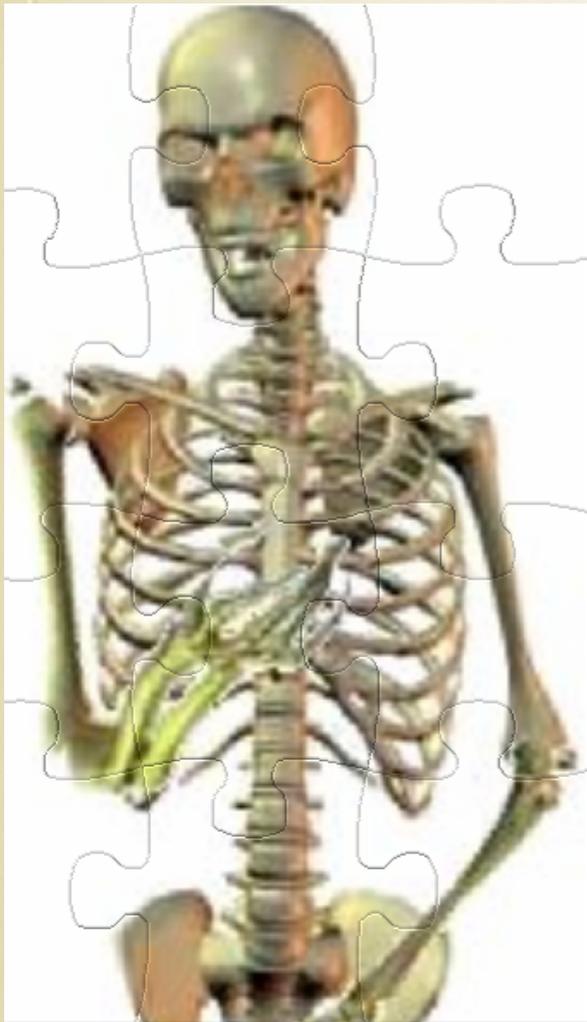
500 skeleons

50's are fleshed



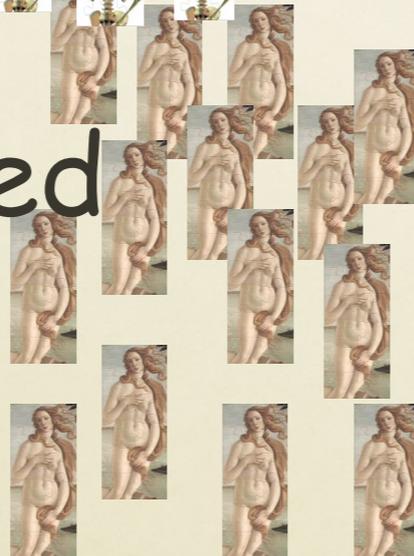
Assemble Thinning

Virtual (Quasi) Full M.C at 10^{20} eV



500 skeleons

50's are fleshed



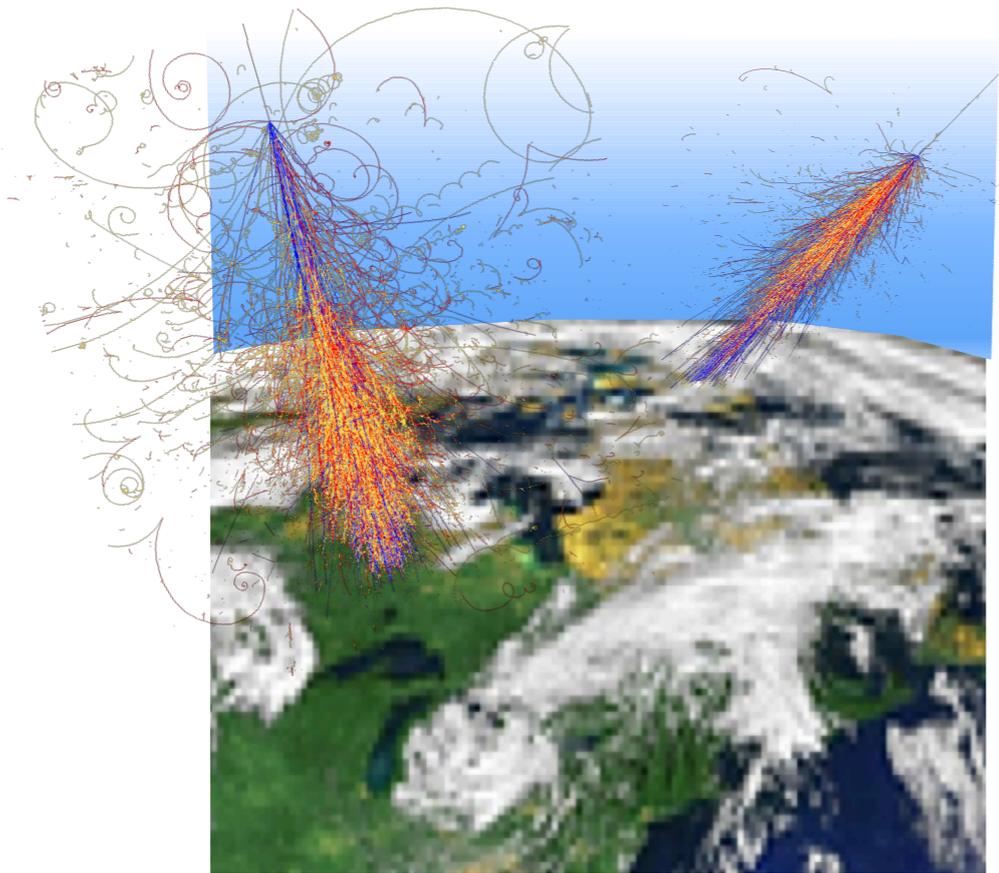
Assemble Thinning

No weighted ptcl's

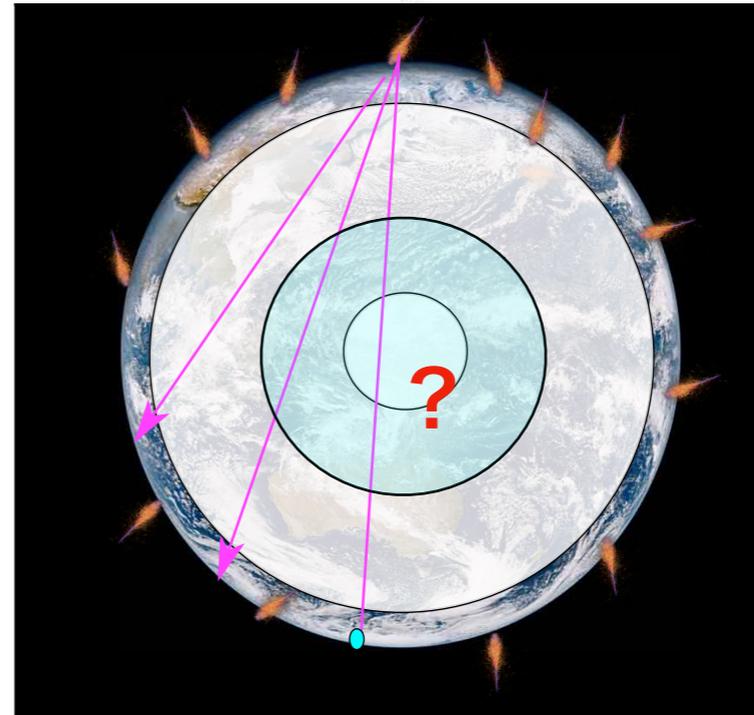
Ongoing activities

- **A new team was formed**
 - **Several people**
 - **PI Sako @ ICR.**
 - **Further development, refinement etc.**
- **More user interfaces**
- **Cosmos can now use only Air as the medium**
 - **=> arbitrary combination of multiple media**

Example:



+



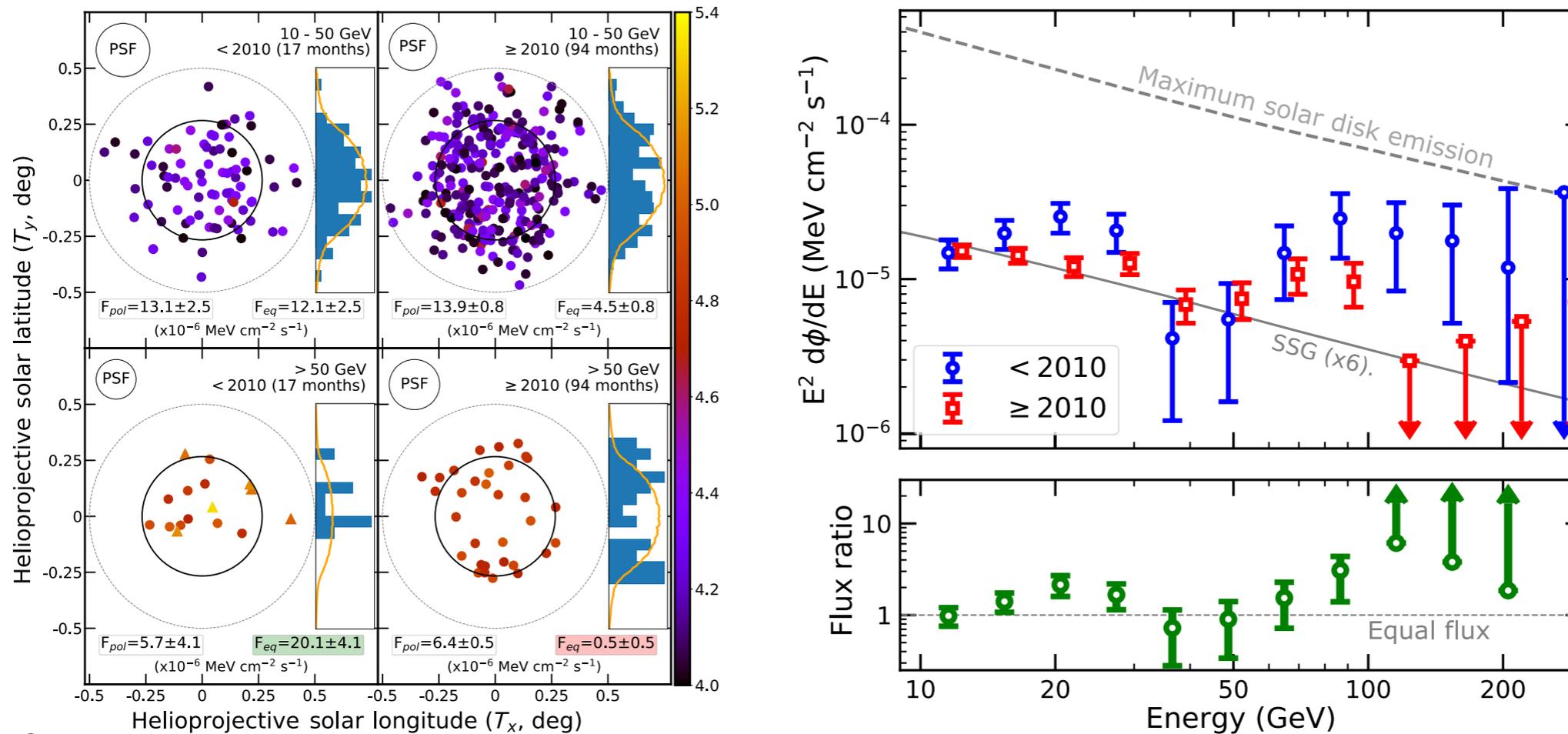
Earth core tomography by using the atmospheric nu oscillation

Example:

Gamma ray from the SUN

PHYSICAL REVIEW LETTERS 121, 131103 (2018)

T. Linden et al



Other cases:

Magnetor.

Mars.

Conclusion

- **Cosmos is now moving to a new stage**

Thank you for your attention !

SK Atmos. Nu Oscil.

● μ pol

SK Atmos. Nu Oscil.

- μ pol

- Theory

- μ pol
- Theory
- Hayakawa,

- μ pol
- Theory
 - Hayakawa,
 - Phys. Rev. Vol.108, 1957

- μ pol

- Theory

- Hayakawa,

- Phys. Rev. Vol.108, 1957

- Fowler, Primakoff and Sard

- μ pol

- **Theory**

- Hayakawa,

- Phys. Rev. Vol.108, 1957

- Fowler, Primakoff and Sard

- Nuovo. Cimento. Vol.IX, 1958

- μ pol

- **Theory**

- Hayakawa,

- Phys. Rev. Vol.108, 1957

- Fowler, Primakoff and Sard

- Nuovo. Cimento. Vol.IX, 1958

- **Experiment**

- μ pol
- **Theory**
 - Hayakawa,
 - Phys. Rev. Vol.108, 1957
 - Fowler, Primakoff and Sard
 - Nuovo. Cimento. Vol.IX, 1958
- **Experiment**
 - Clark and Hersel

- μ pol
- **Theory**
 - Hayakawa,
 - Phys. Rev. Vol.108, 1957
 - Fowler, Primakoff and Sard
 - Nuovo. Cimento. Vol.IX, 1958
- **Experiment**
 - Clark and Hersel
 - Phys. Rev. Vol.108, 1957

- μ pol

- **Theory**

- Hayakawa,

- Phys. Rev. Vol.108, 1957

- Fowler, Primakoff and Sard

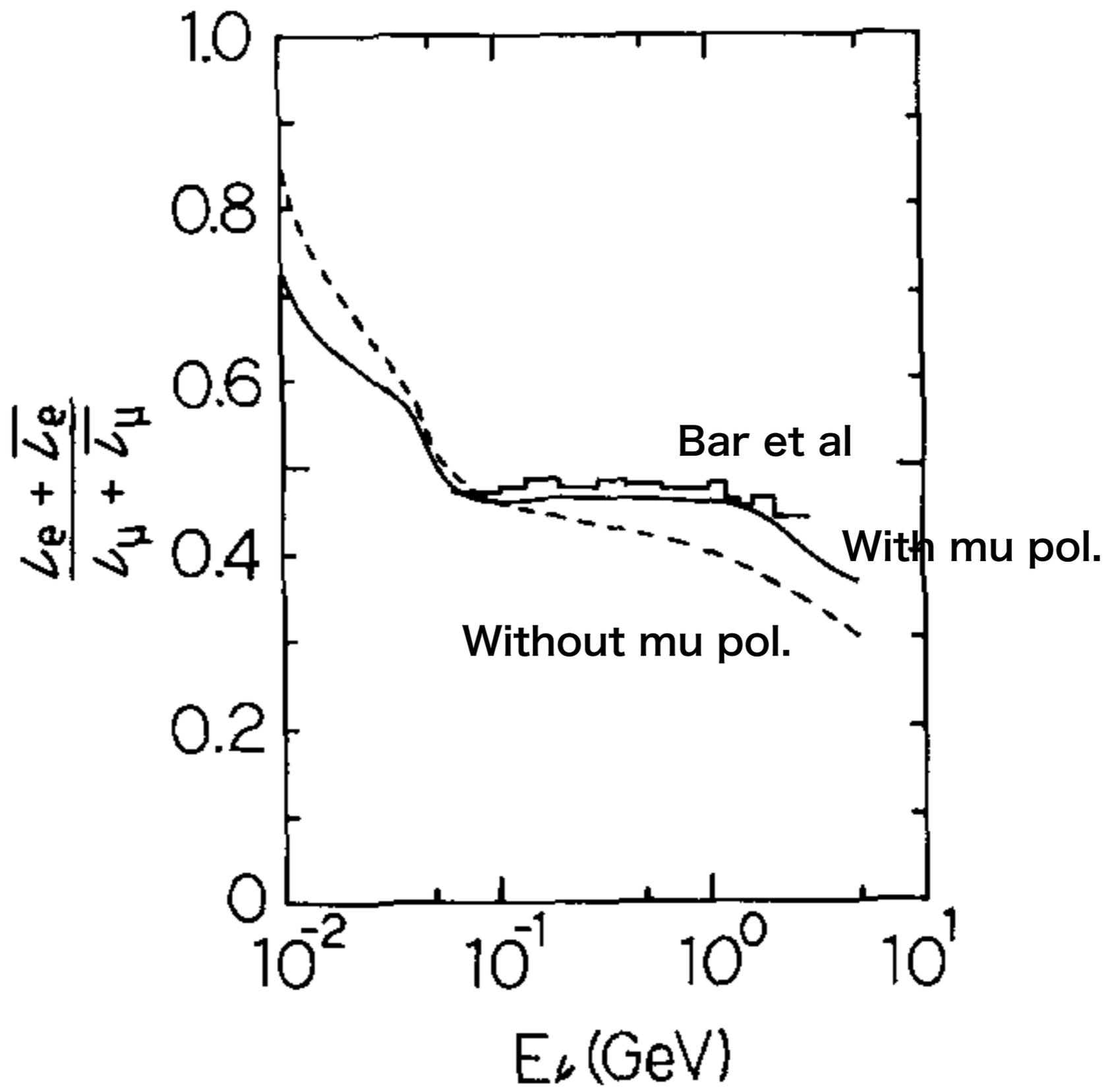
- Nuovo. Cimento. Vol.IX, 1958

- **Experiment**

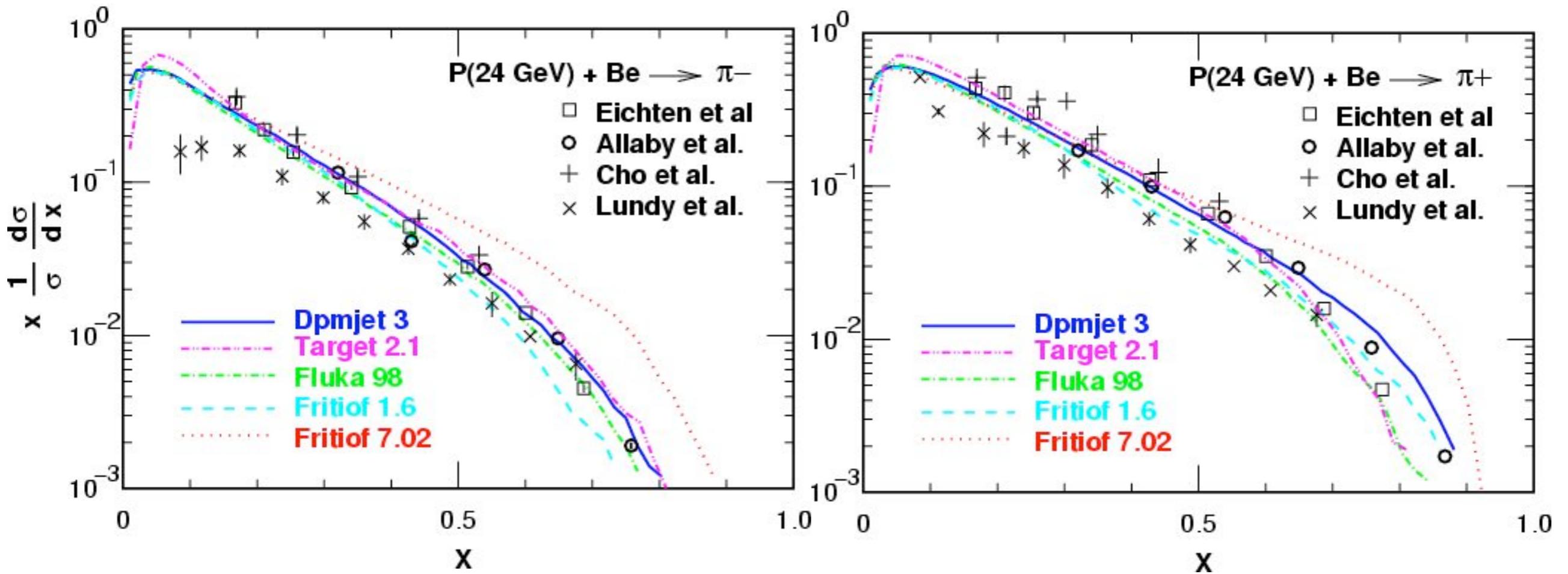
- Clark and Hersel

- Phys. Rev. Vol.108, 1957

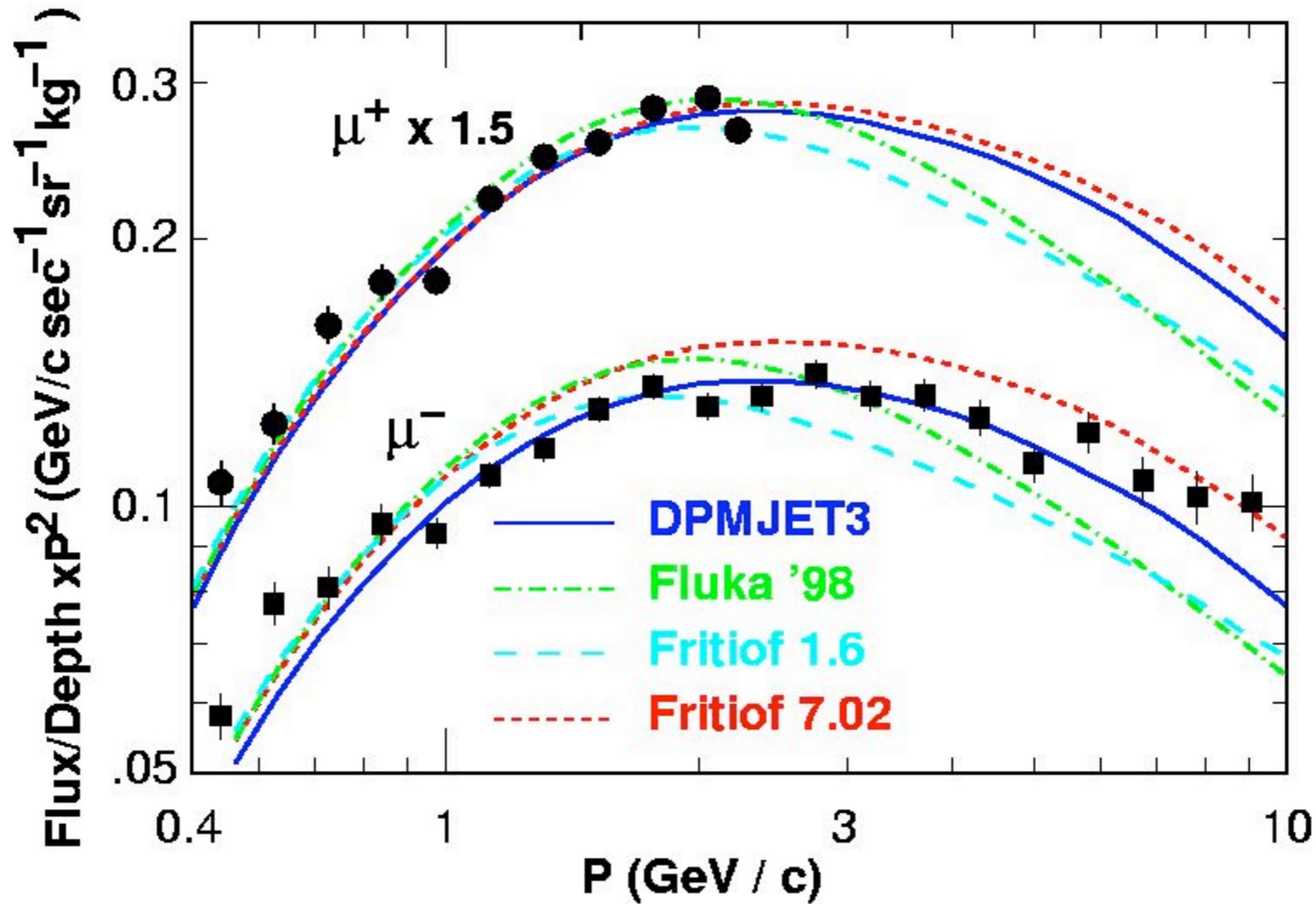
- Non zero pol. earlier exp.



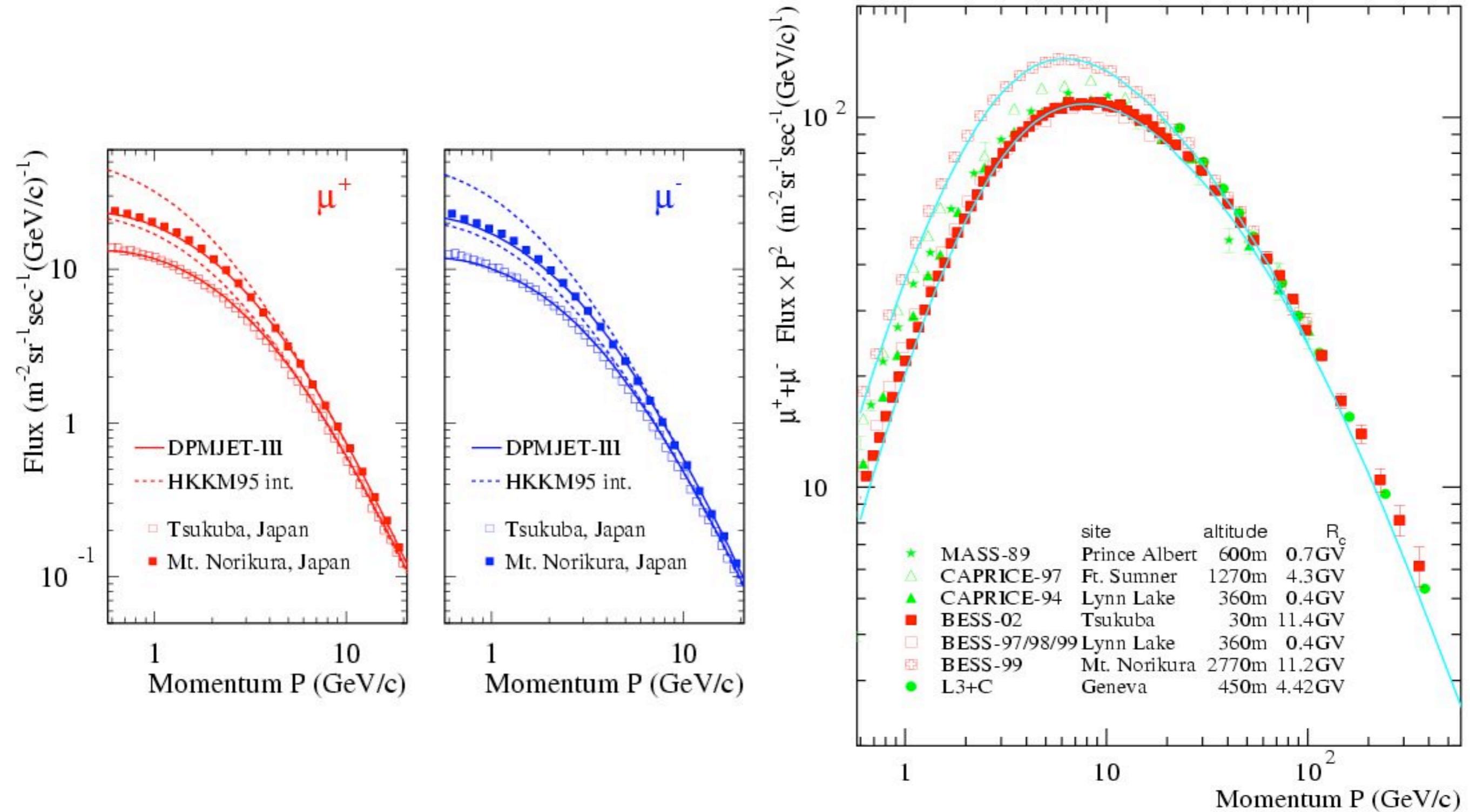
Interaction Model



Test with muon flux at Balloon Altitude

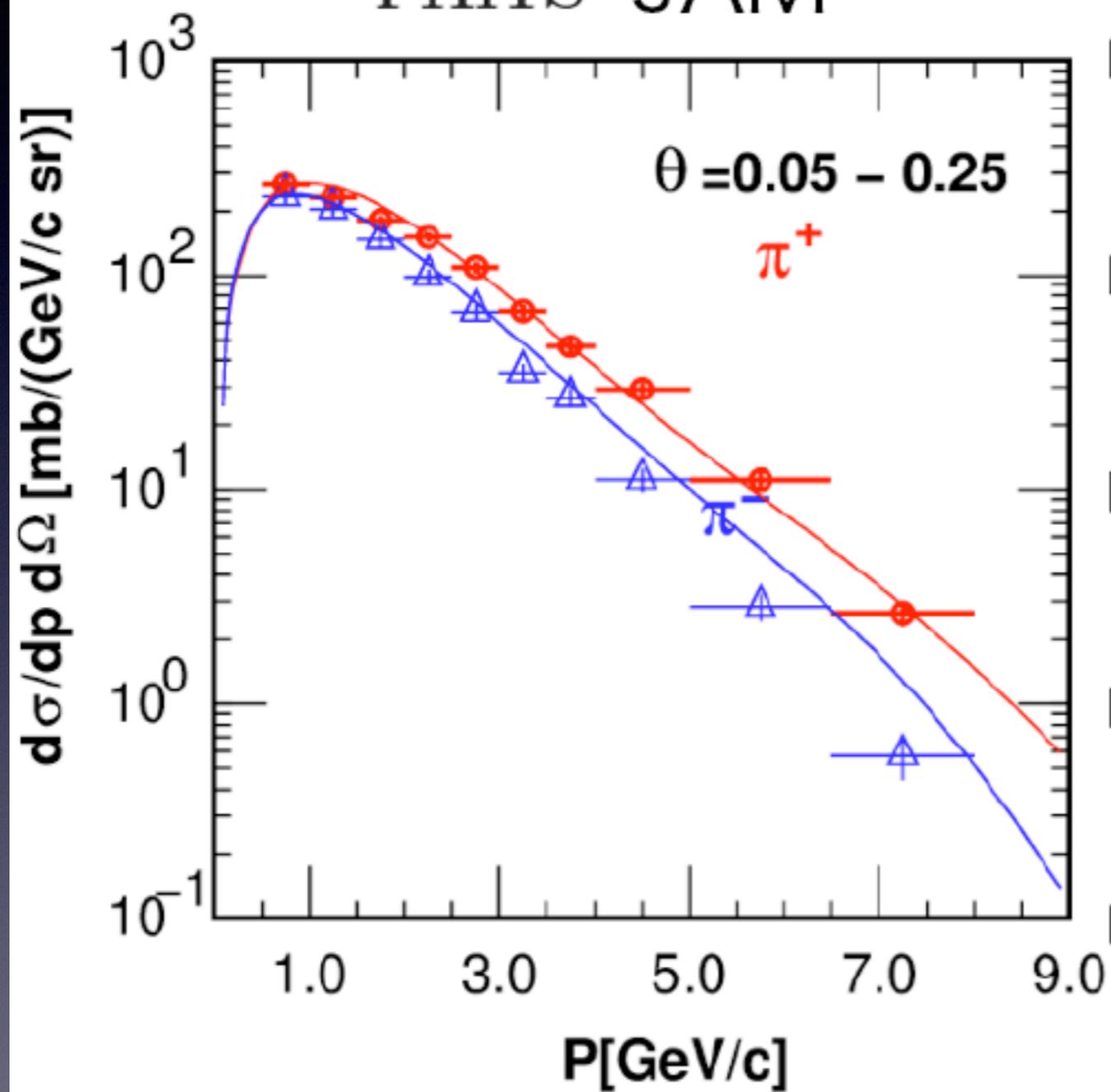


Muon Observations

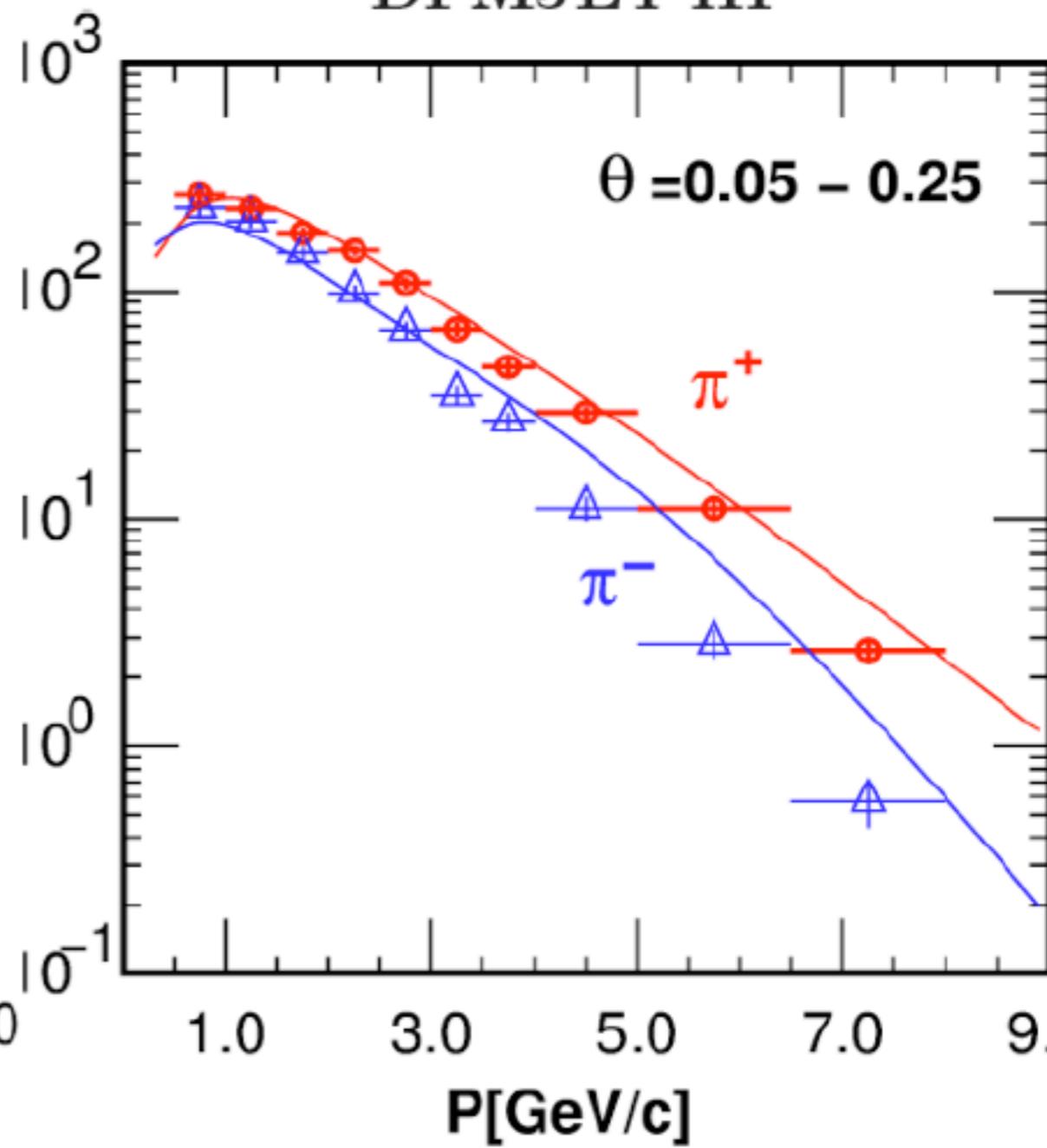


Wide Angle ($0.05 < \theta < 0.25$) Comparison

PHITS JAM

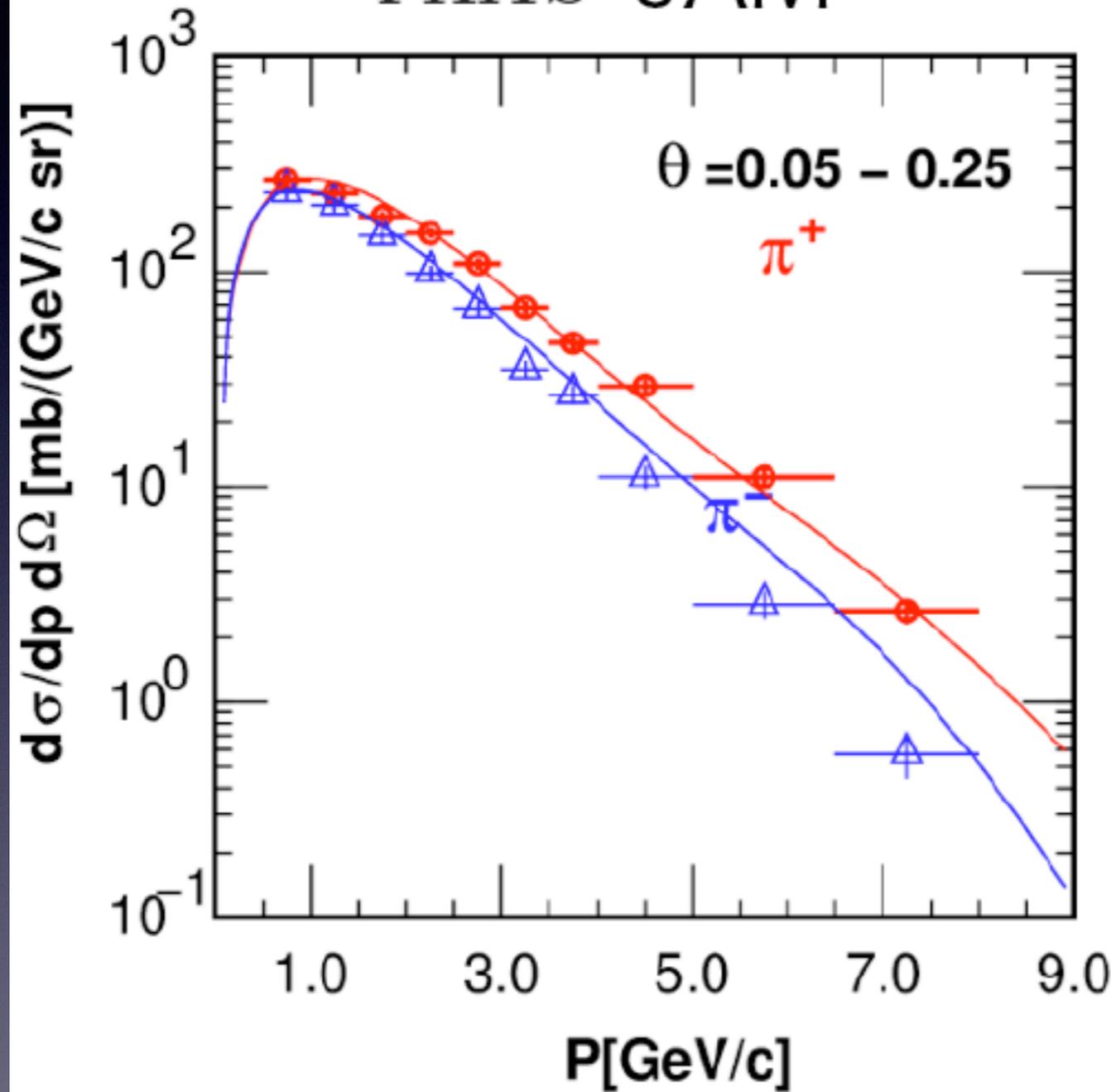


DPMJET-III

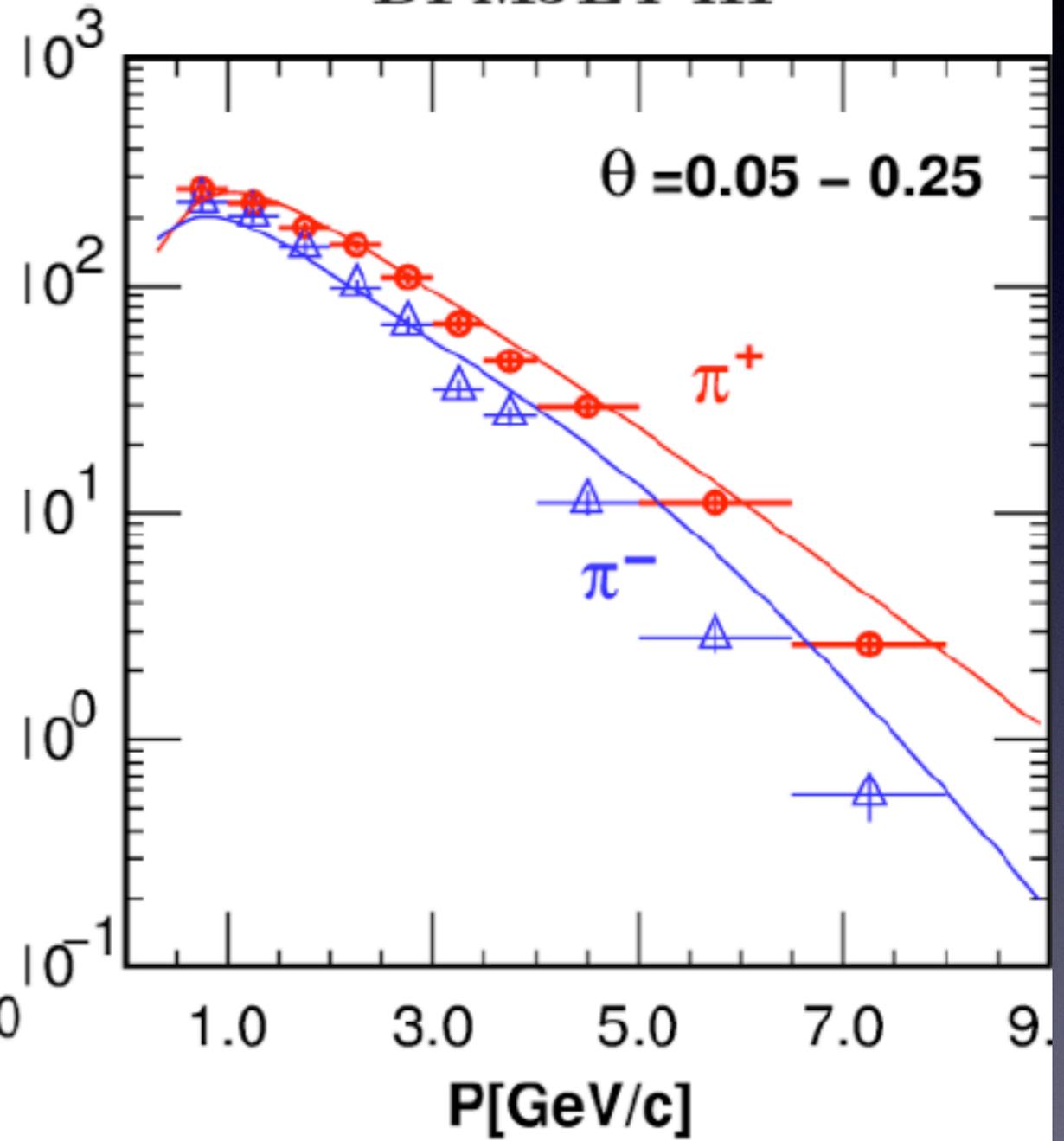


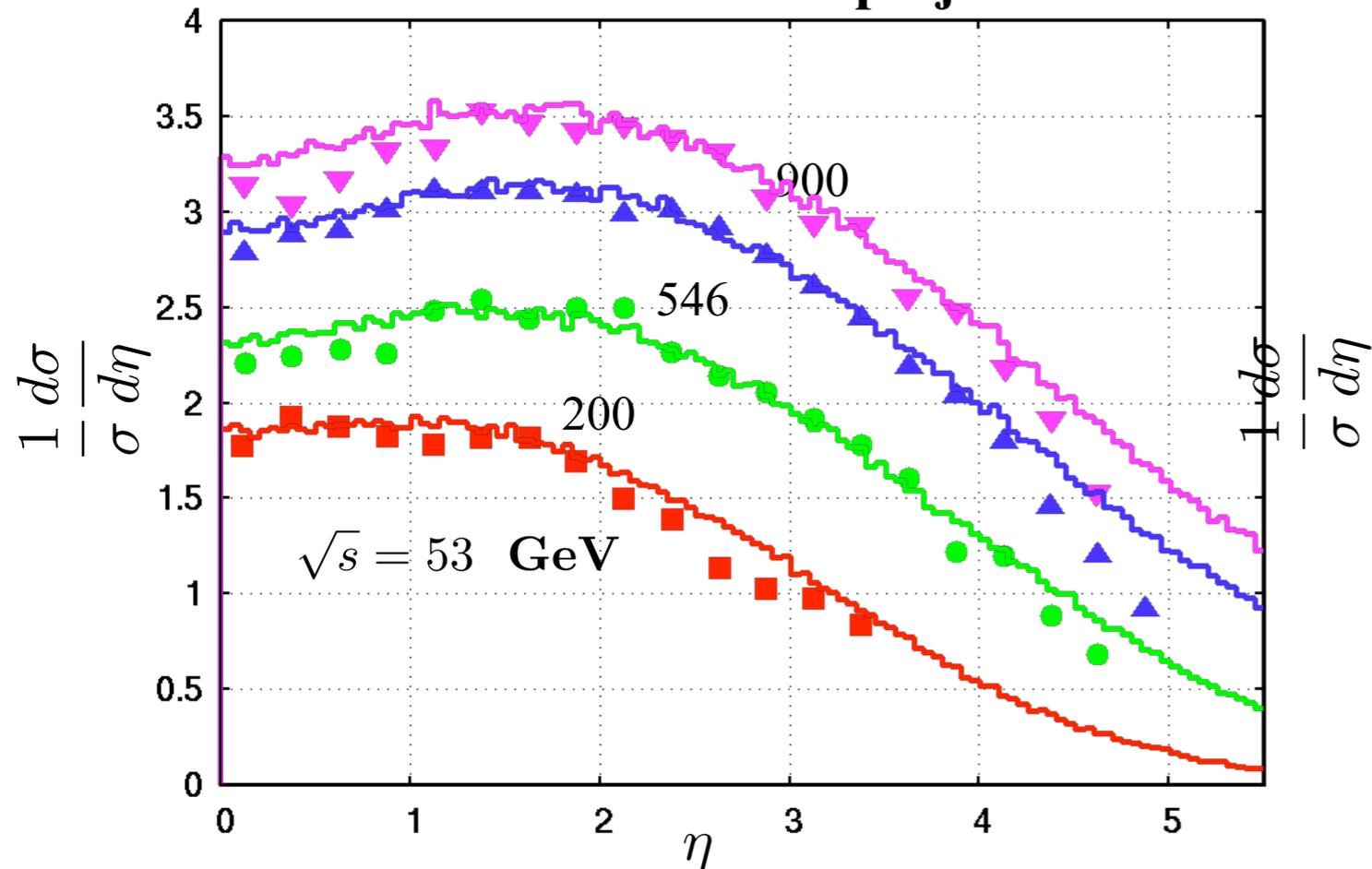
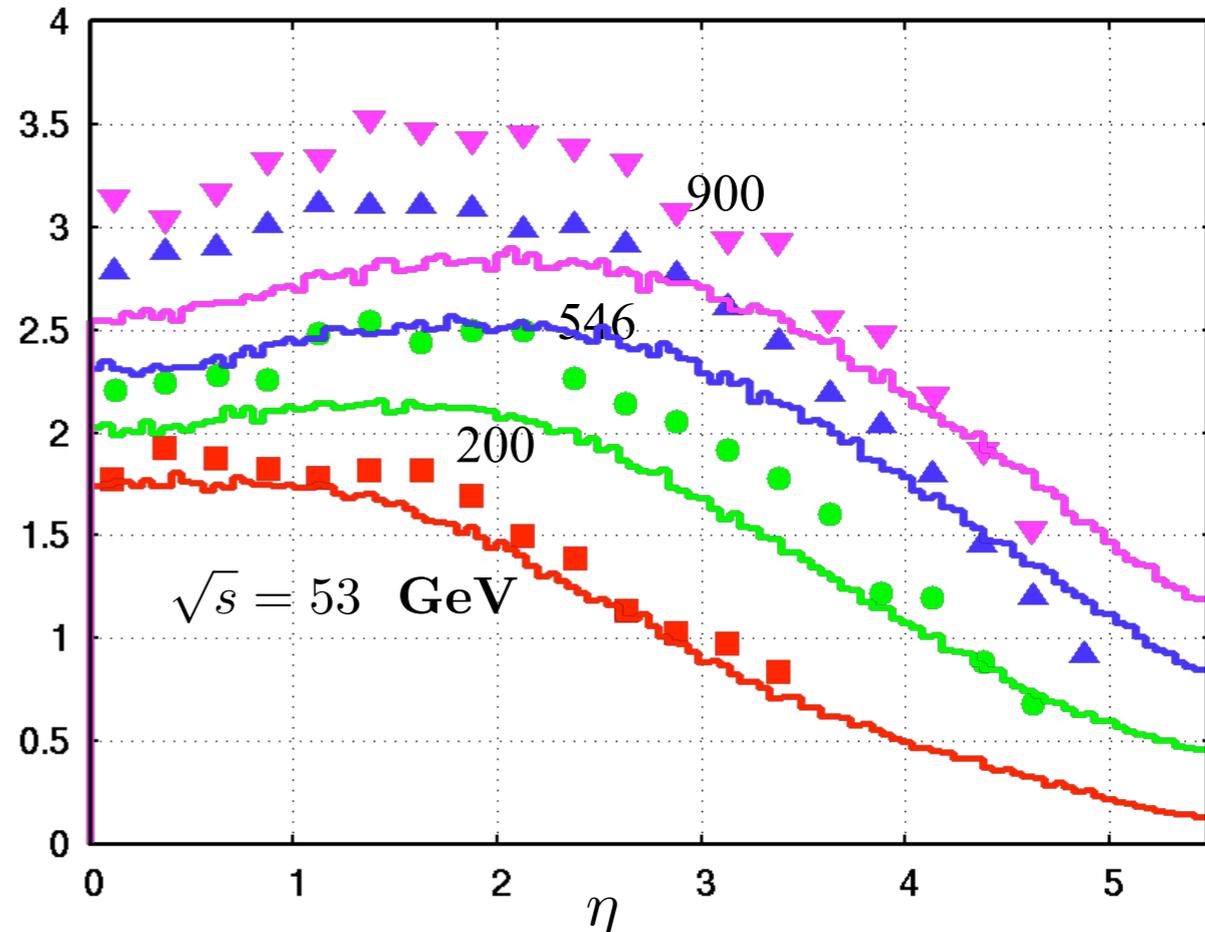
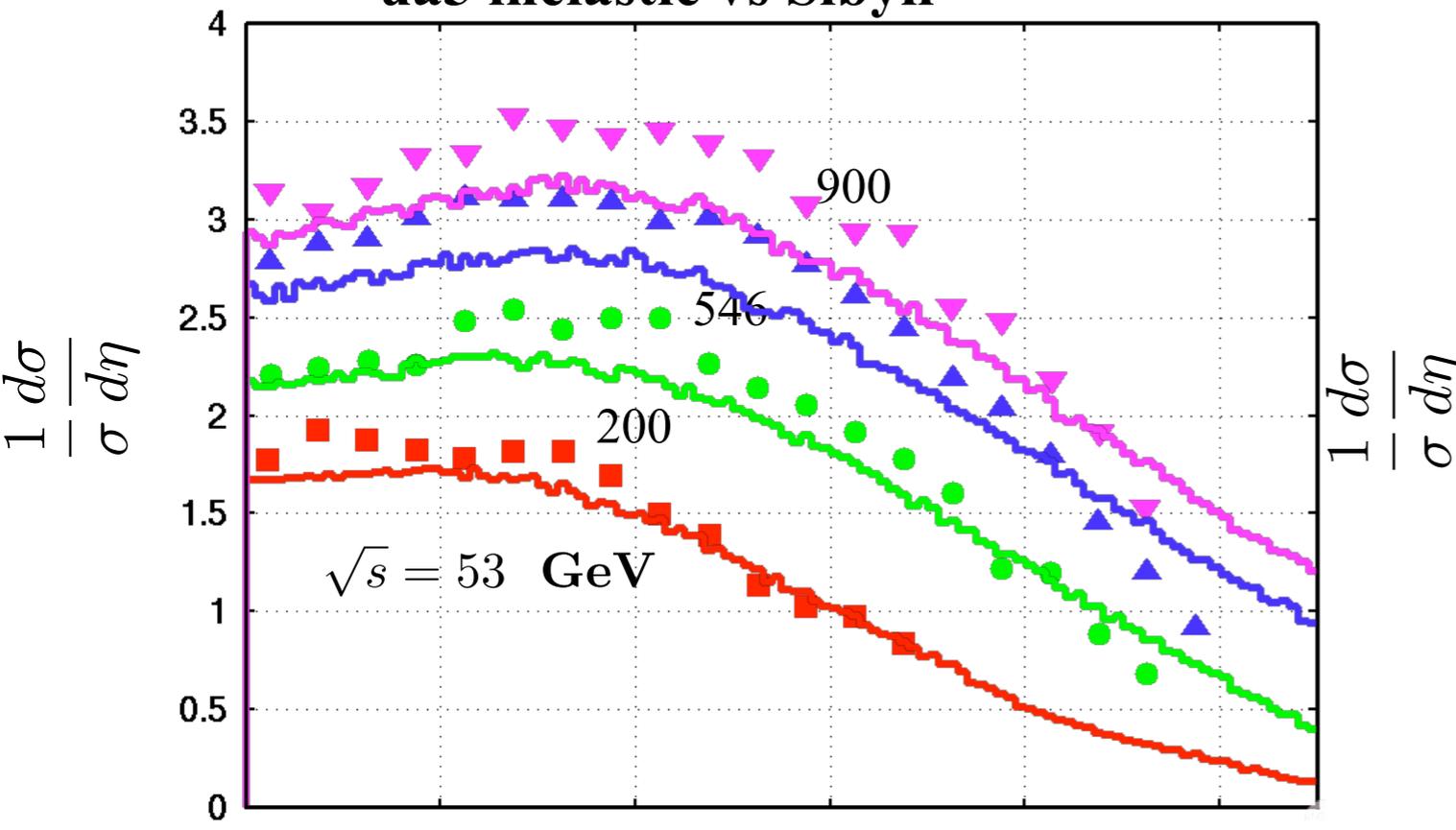
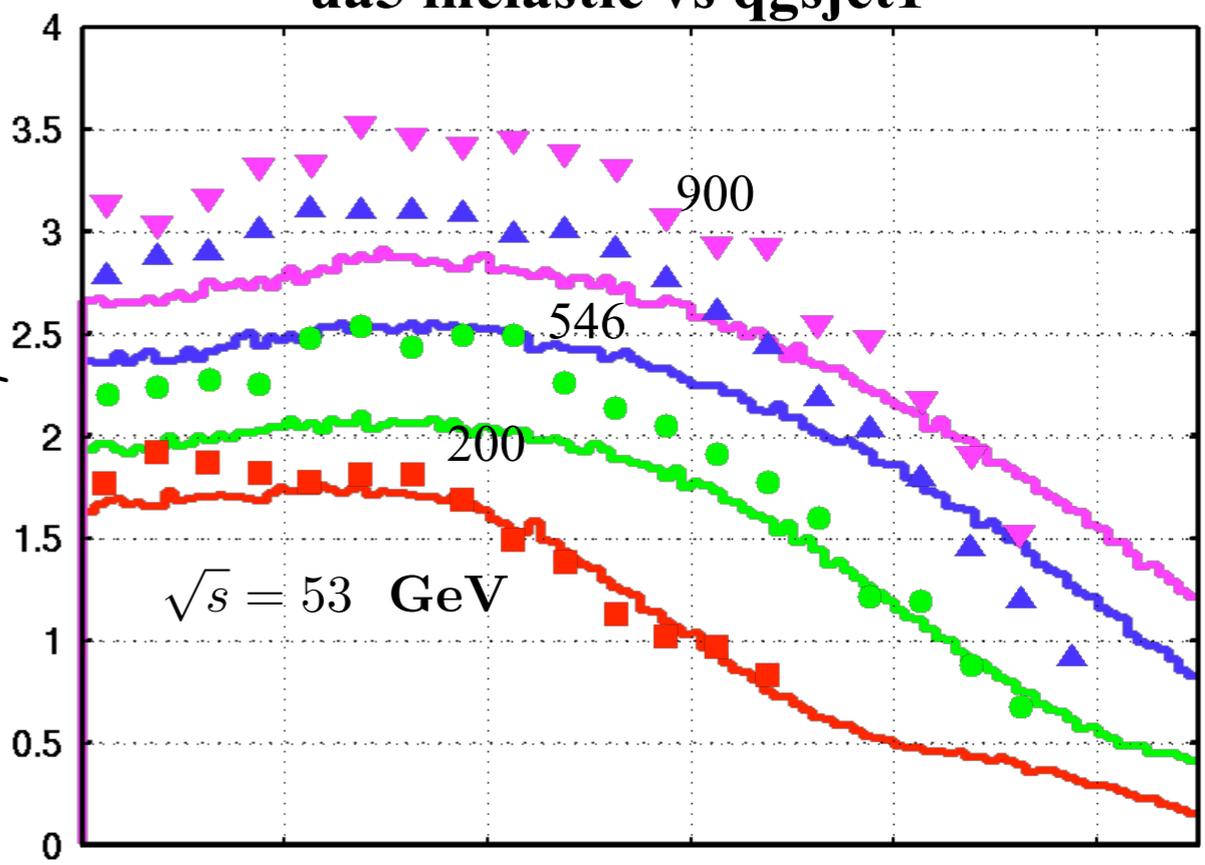
Wide Angle ($0.05 < \theta < 0.25$) Comparison

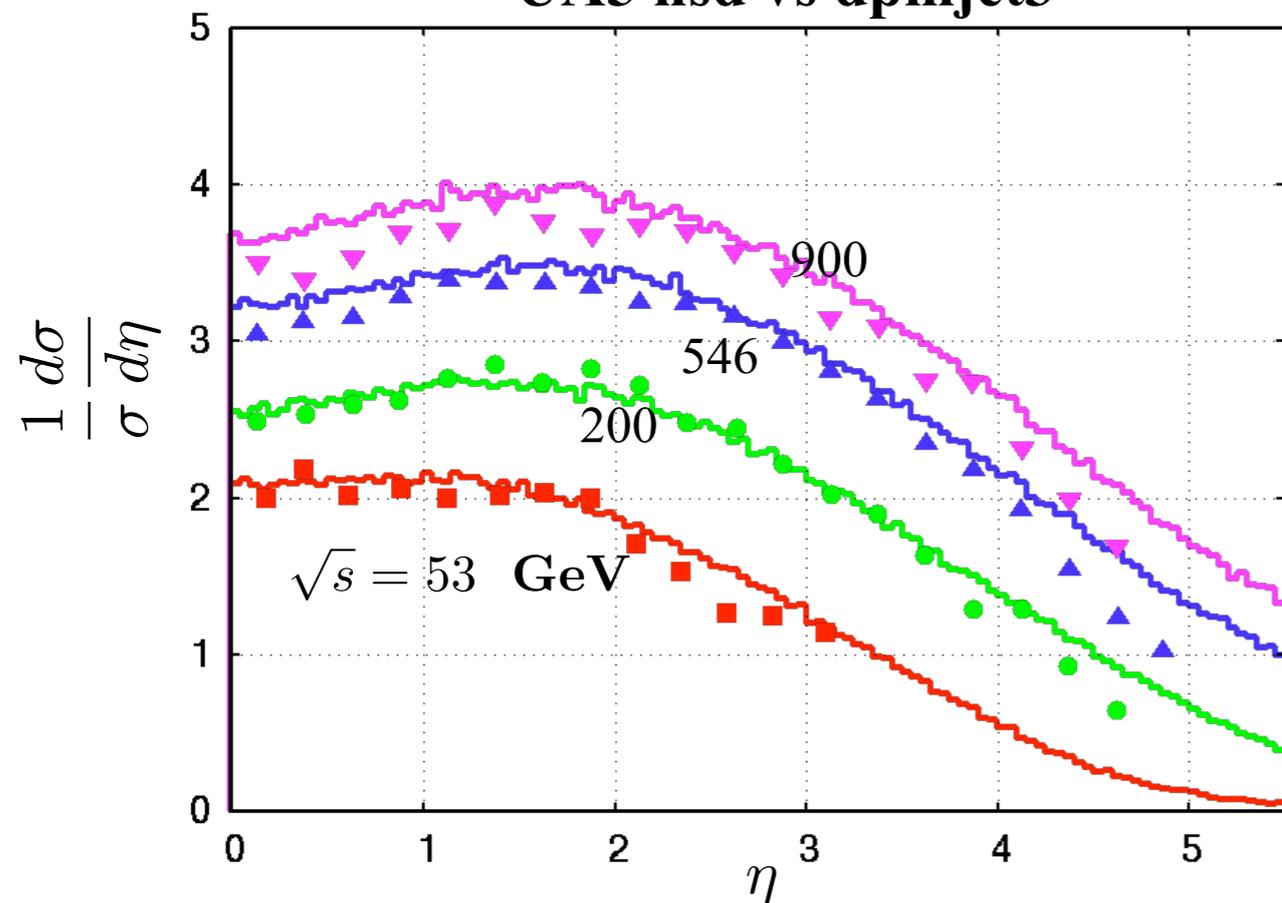
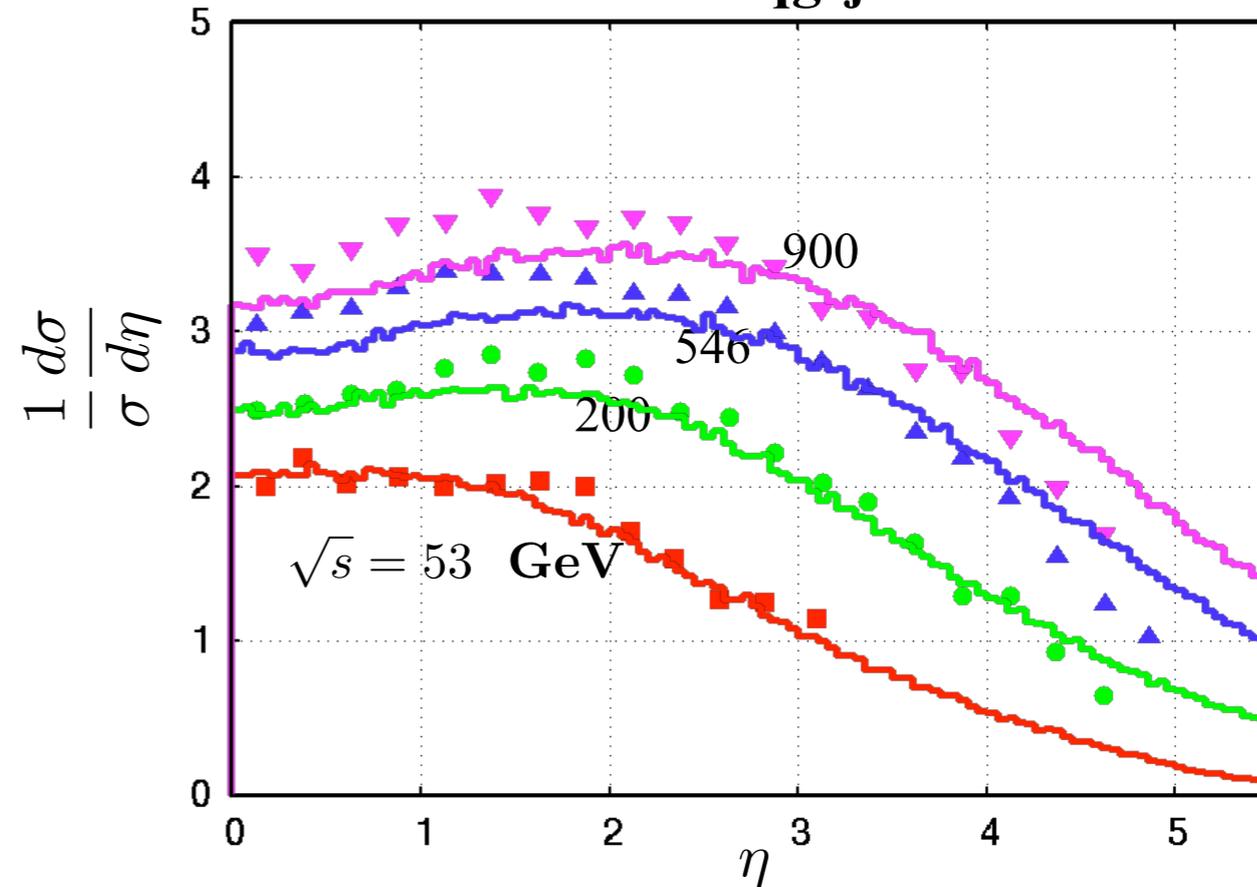
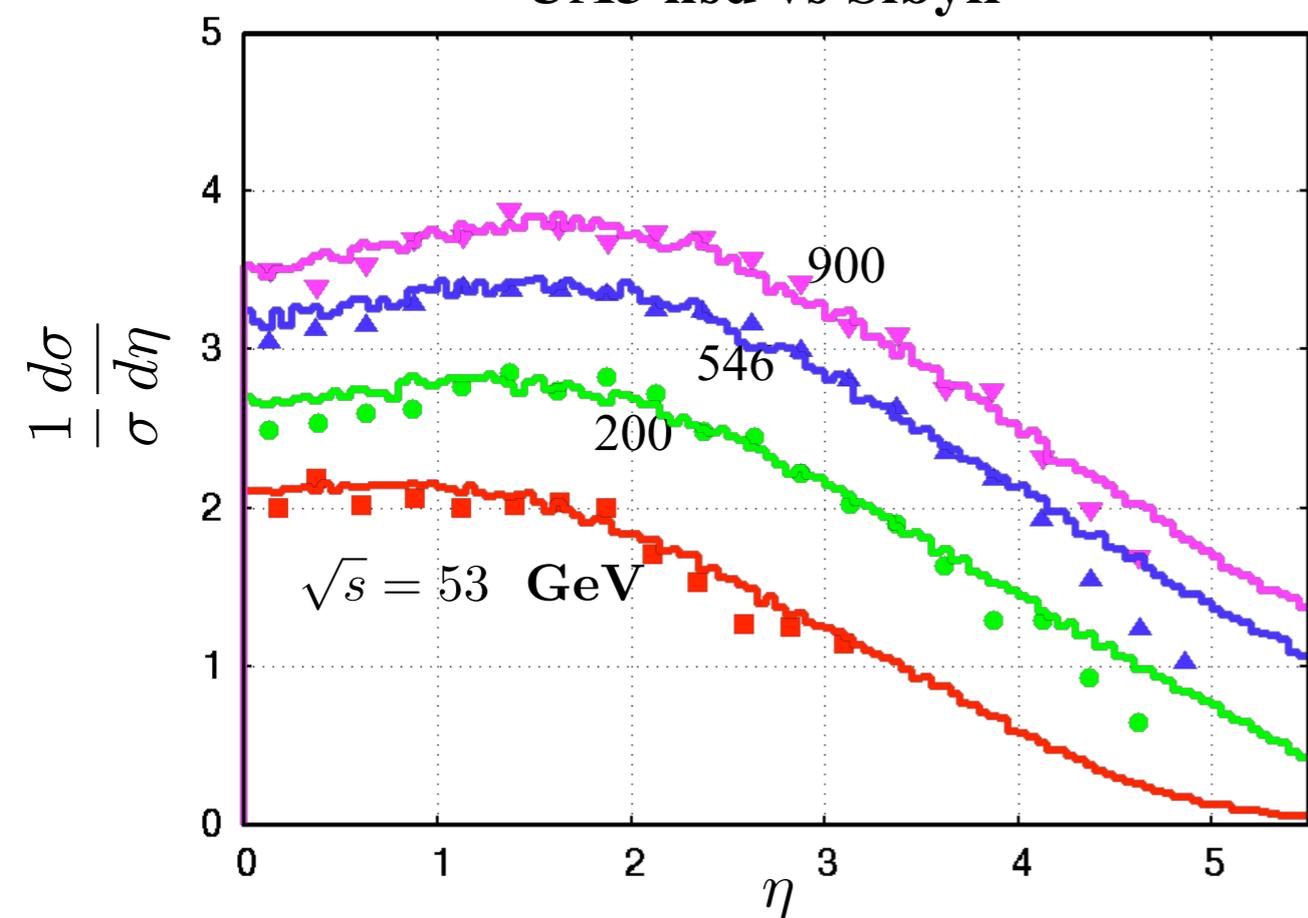
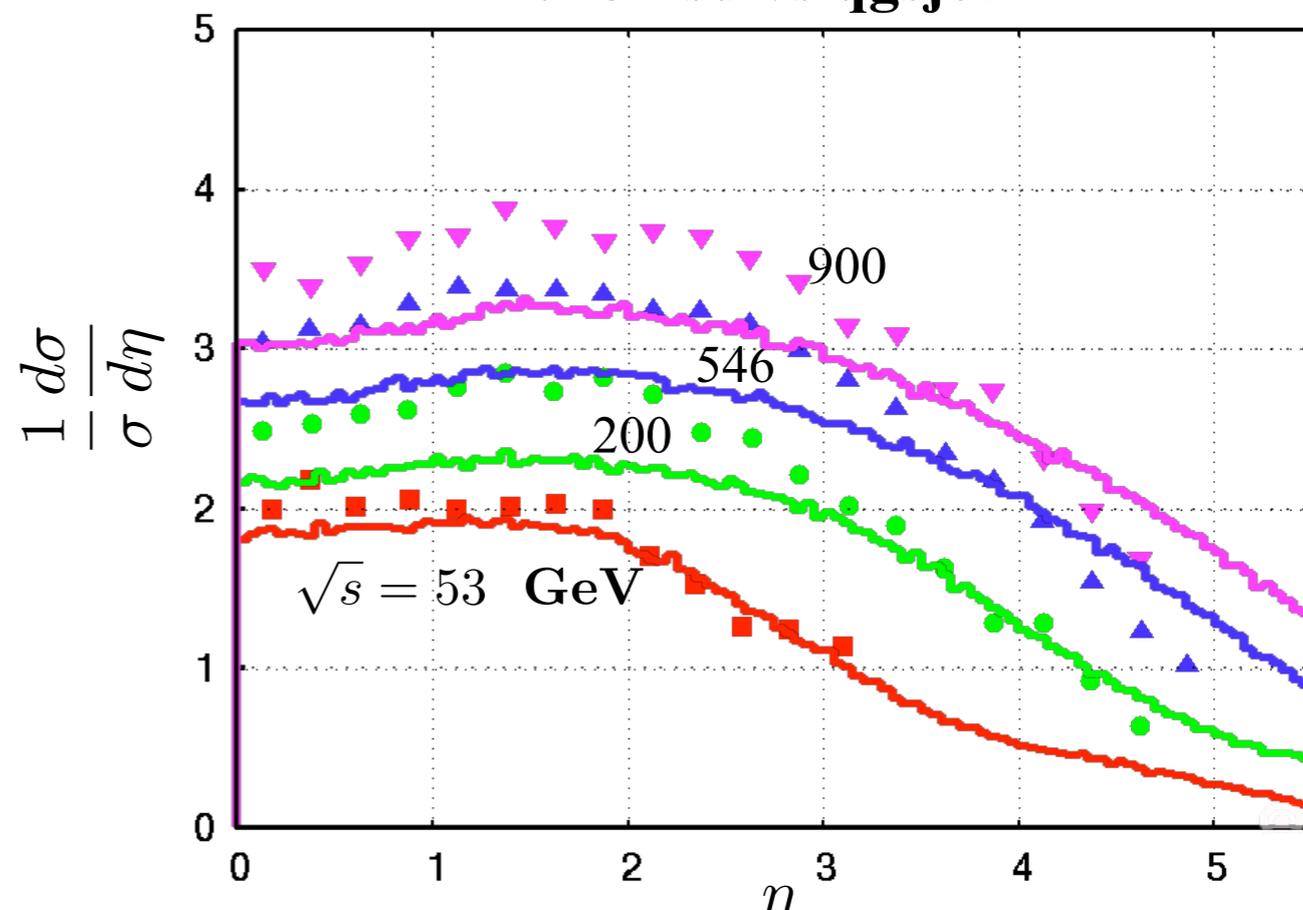
PHITS JAM



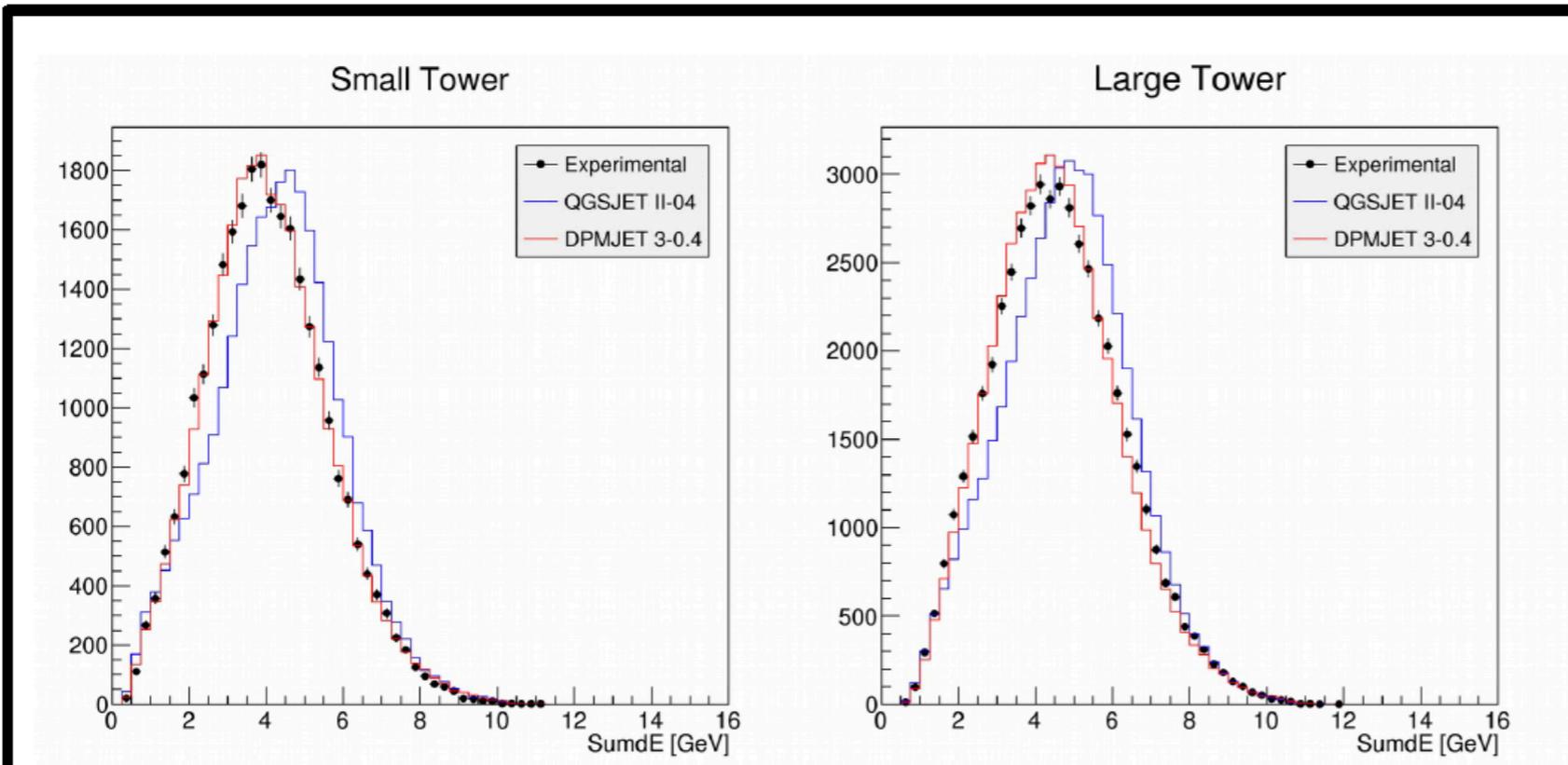
DPMJET-III



UA5 inelastic vs dpmjet3**ua5 inelastic vs qgsjet2****ua5 inelastic vs Sibyll****ua5 inelastic vs qgsjet1**

UA5 nsd vs dpmjet3**ua5 nsd vs qgsjet2****UA5 nsd vs Sibyll****ua5 nsd vs qgsjet1**

SPS beam test (protons): data vs MC



		Mean [GeV]	σ /Mean [%]	Ratio
Small tower	Experiment	4.041	39.283	-
	QGS	4.310	38.174	1.067
	DPM	4.065	39.430	1.006
Large Tower	Experiment	4.571	36.899	-
	QGS	4.820	34.594	1.055
	DPM	4.542	36.253	0.994

LHCf

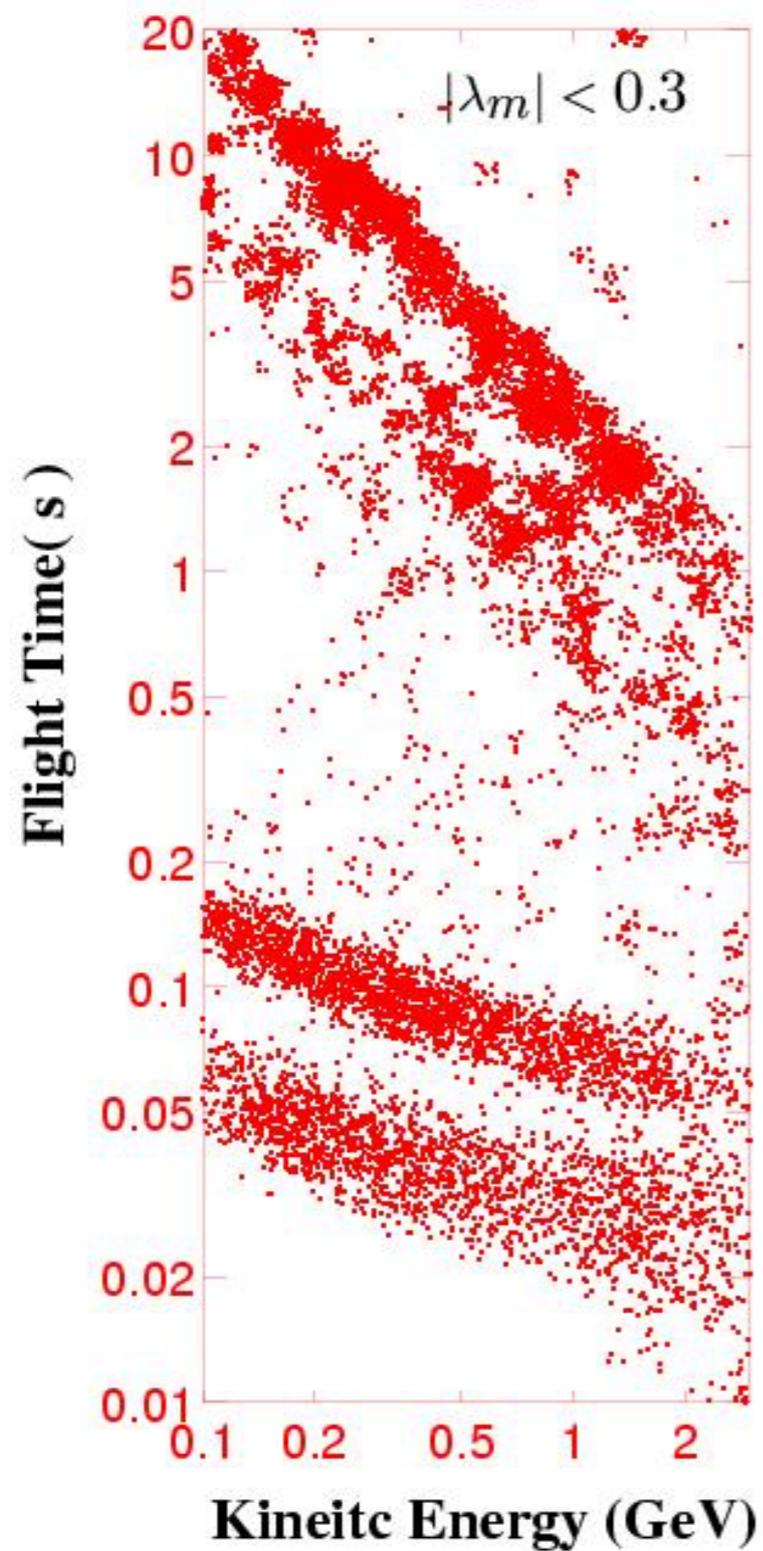
Alessio Tiberio

Workshop on forward
physics and high-energy
scattering 2at zero degrees
2017 Nagoya

350 GeV proton beam

Flight Time vs Energy

secondary protons



EPICS

Cosmos

some of Media info

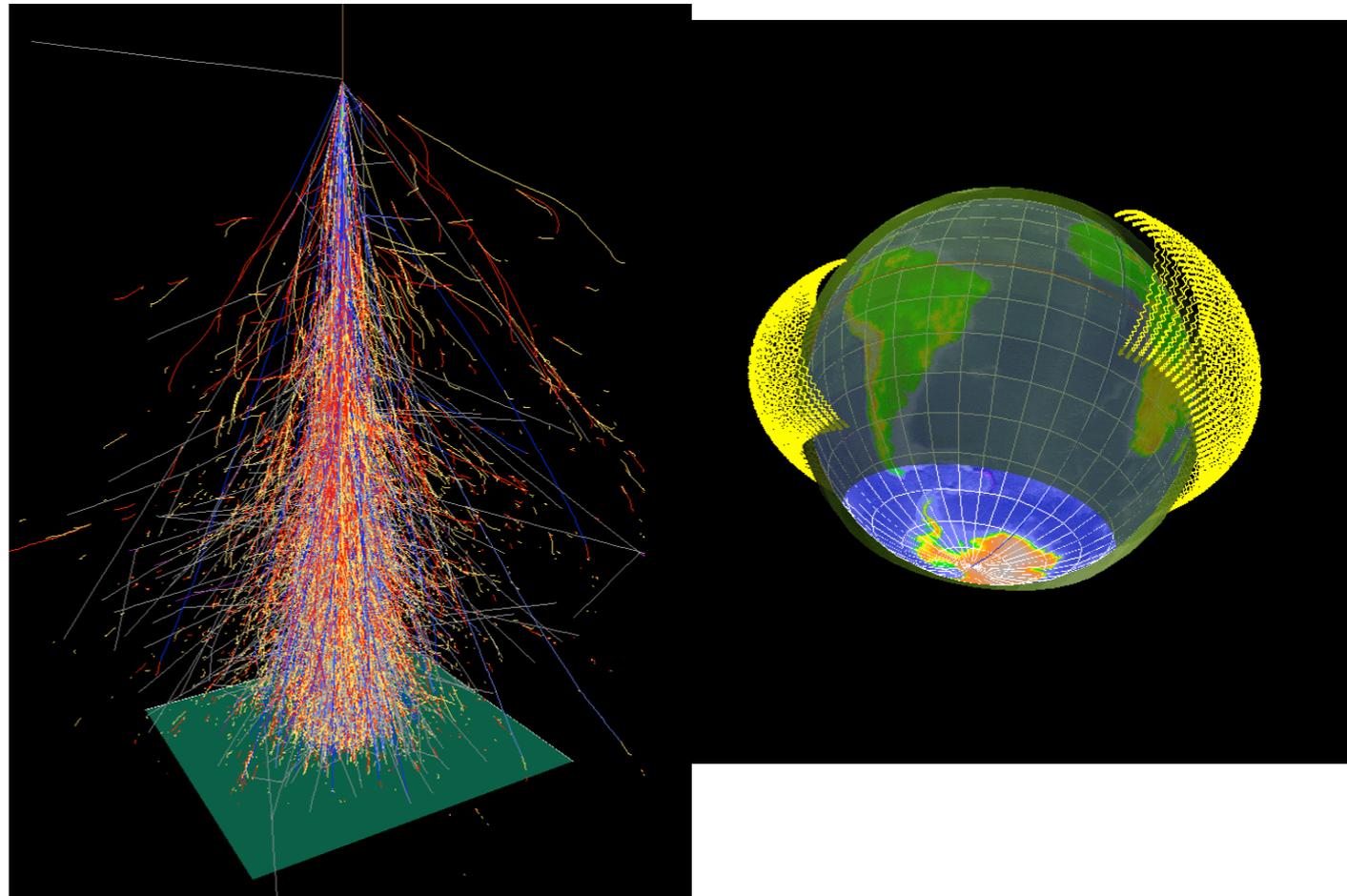
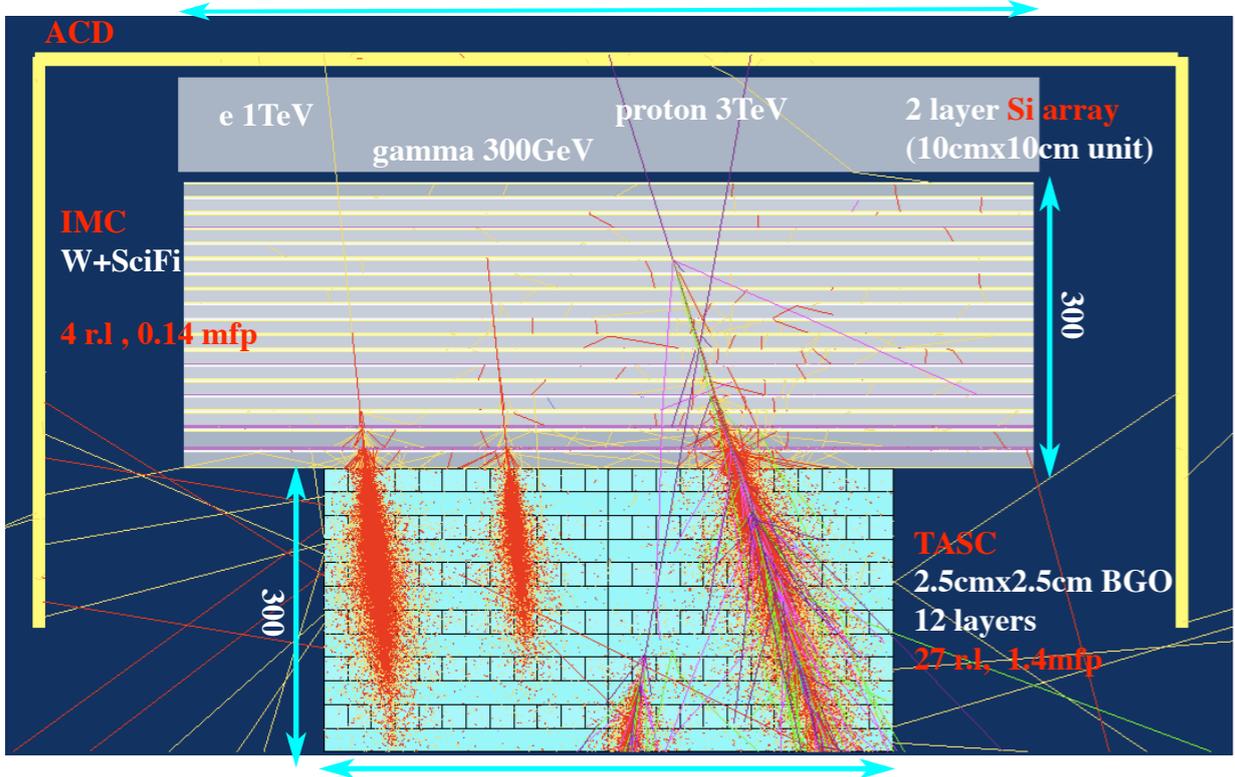
EM for the Media

various Media

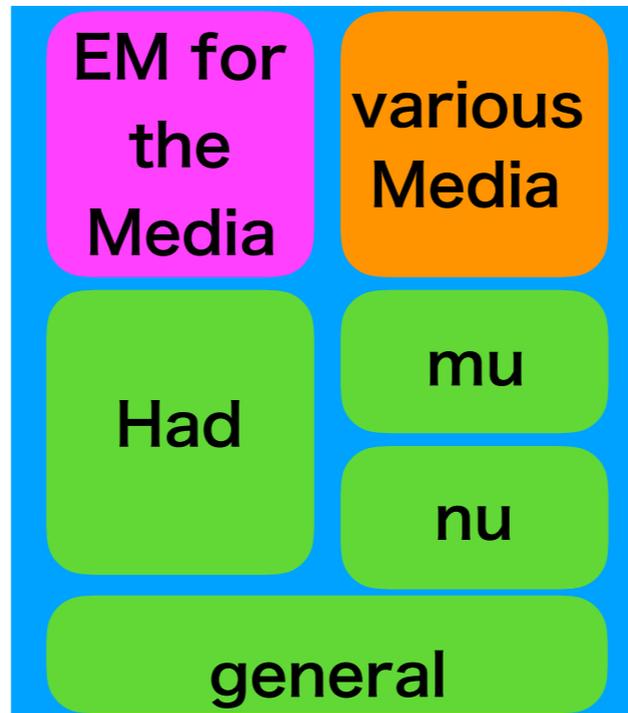
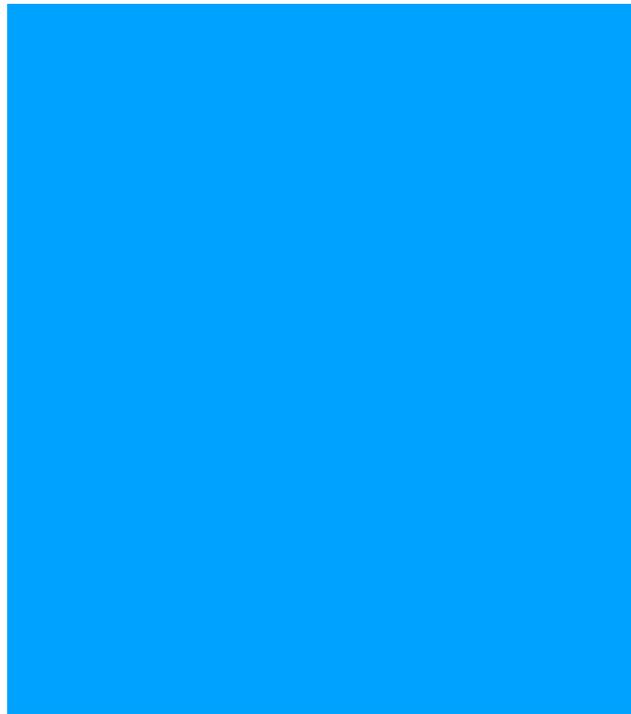
Had

EM for Air

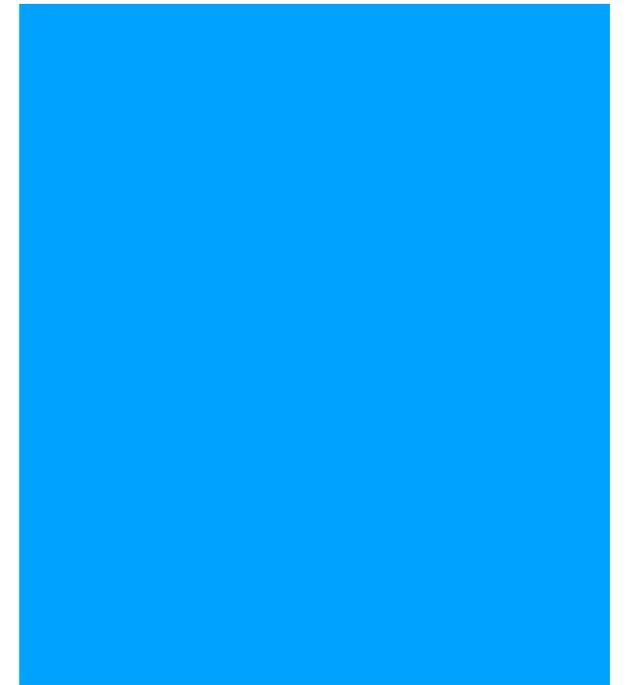
Air



EPICS



Cosmos



Detection of 2×10^{15} -eV to 2×10^{16} -eV gamma Rays from Cygnus X-3

[M. Samorski](#), [W. Stamm](#) (Kiel U.)

1983

Astrophys.J. 268 (1983) L17-L21

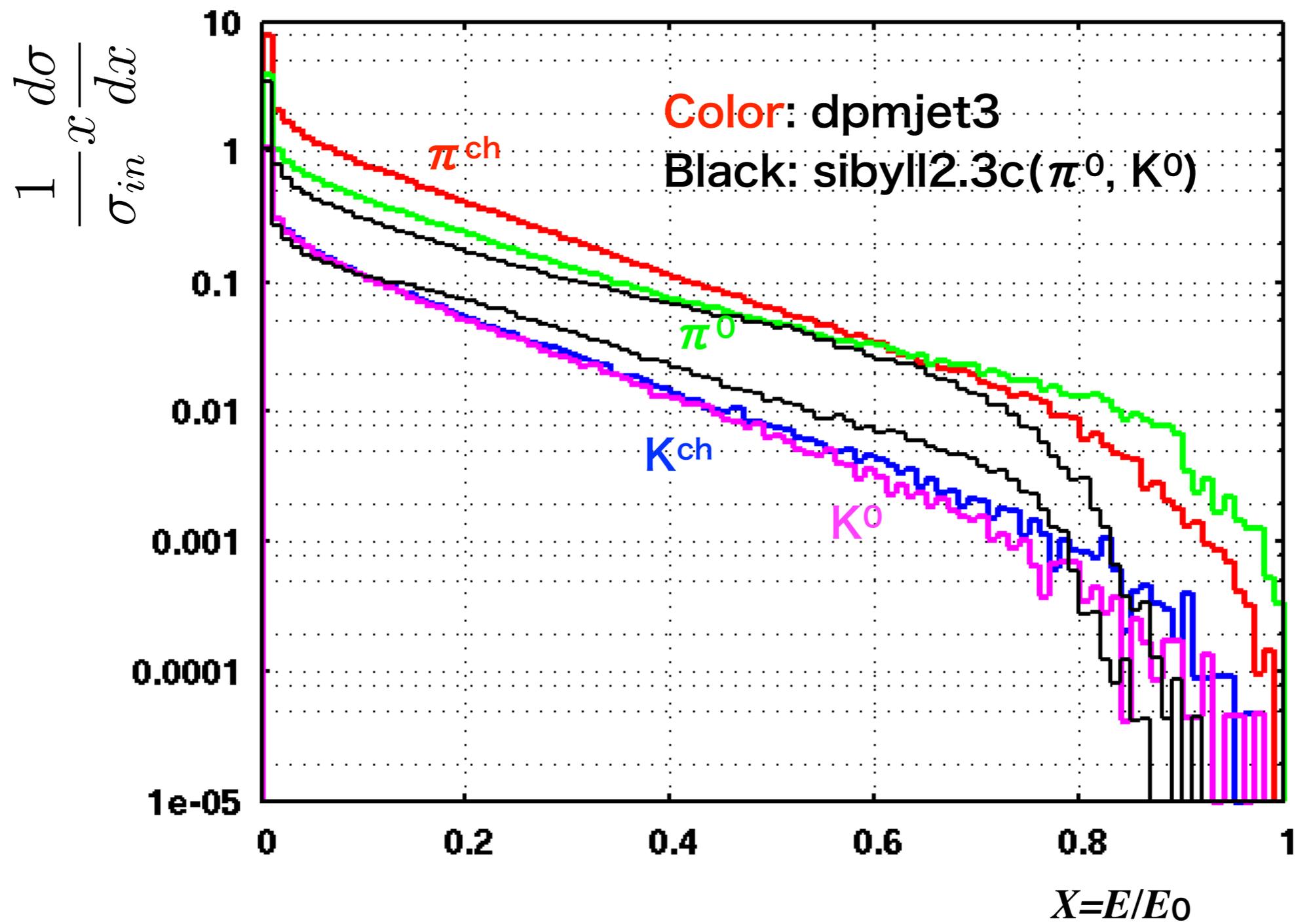
DOI: [10.1086/184021](https://doi.org/10.1086/184021)

-
-

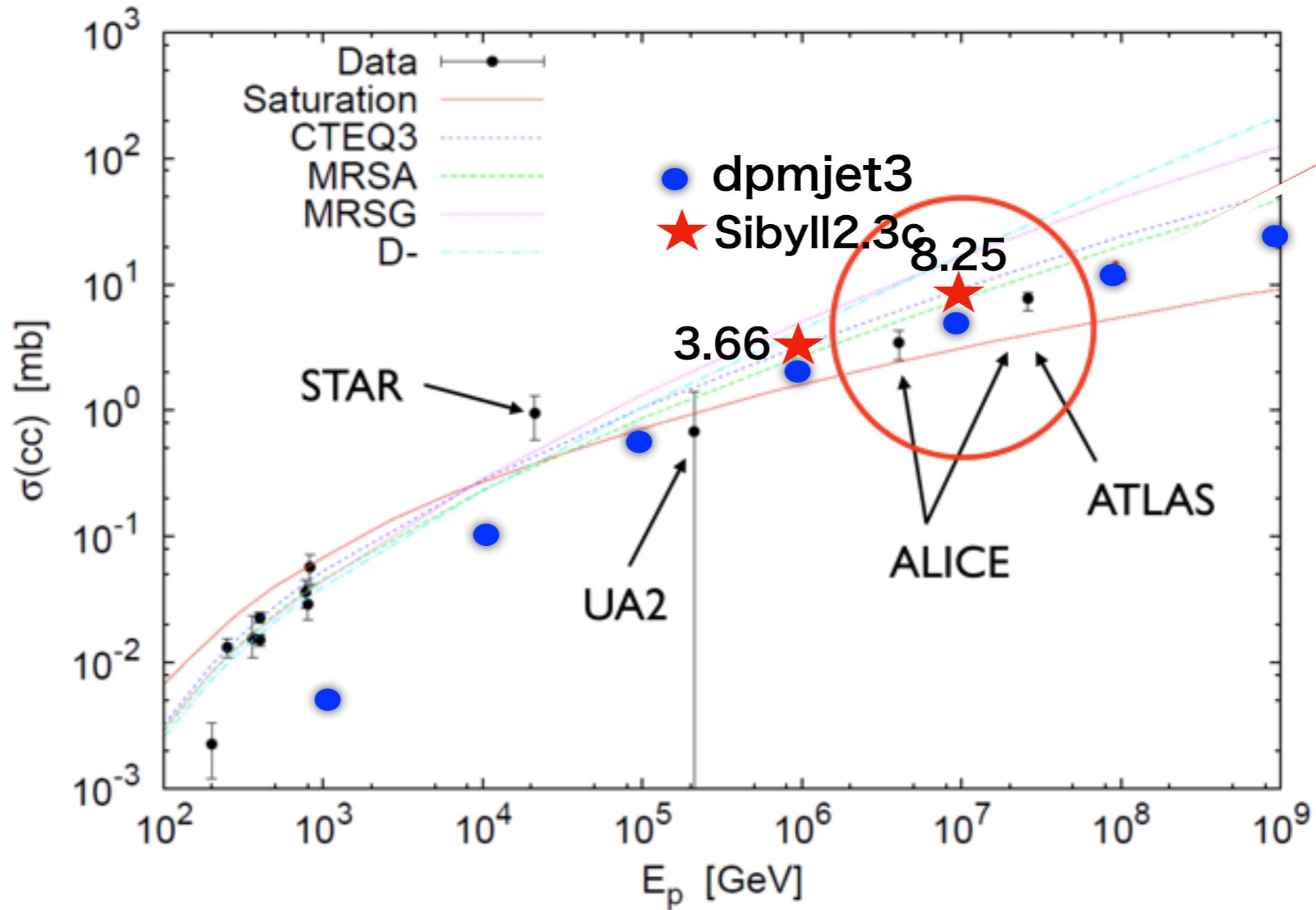
Abstract (ADS)

Kiel, West Germany air shower experiment data are analyzed with a view to the detection of showers from Cyg X-3, with a measurement resolution of 1 deg and an on-source observation time of 3838 hr over a sensitive area of 2800 sq m. In addition to a 4.4-sigma excess of showers from the direction of $\delta = 40.9 \pm 1.5$ deg and $\alpha = 307.8 \pm 2.0$ deg, the time-averaged analysis indicates the typical 4.8-hr modulation of the excess showers. The time-averaged integral gamma-ray flux derived corresponds to a luminosity of 6×10^{36} ergs/sec in the 2×10^{15} - 2×10^{16} eV energy region, establishing this as the first experimental evidence for a clearly identified gamma-ray point source which emits at energies greater than 10^{15} eV.

pp @ 10^{16} eV 2×10^6 events



Total charm cross section $pp \rightarrow cc$

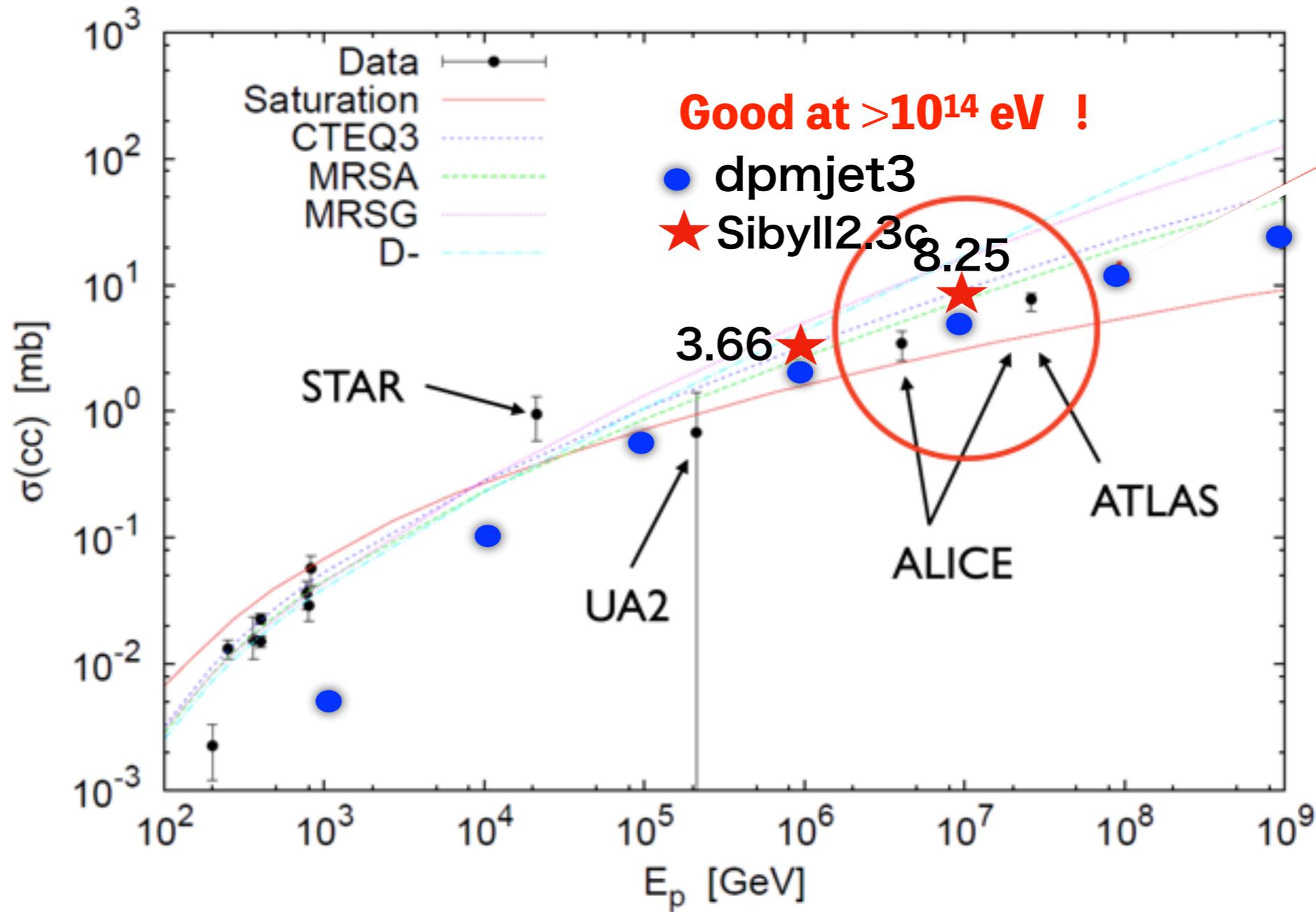


New data since 2011

Very different energy dependence of calculations!

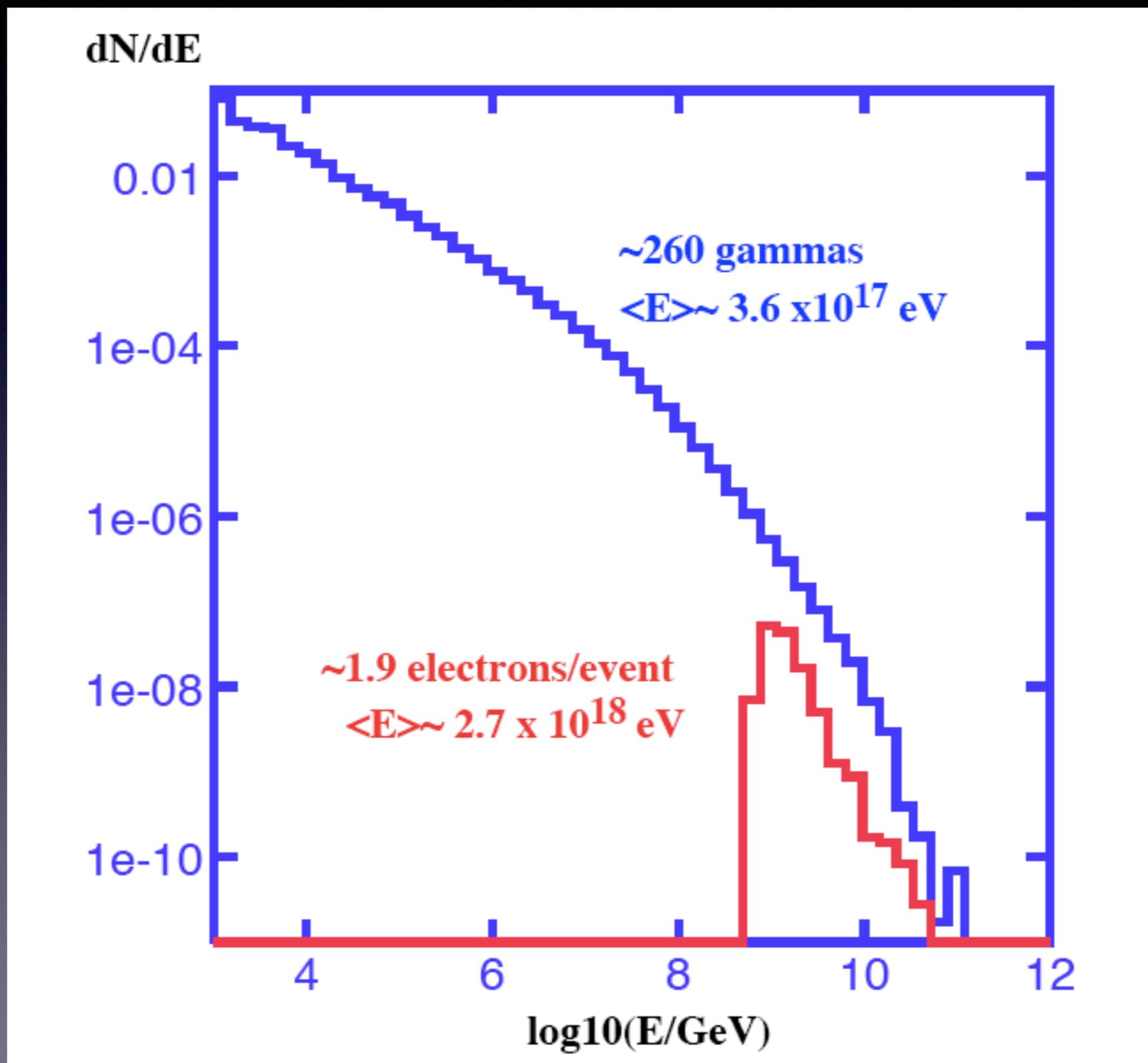
R. Enberg: Charm in the atmosphere

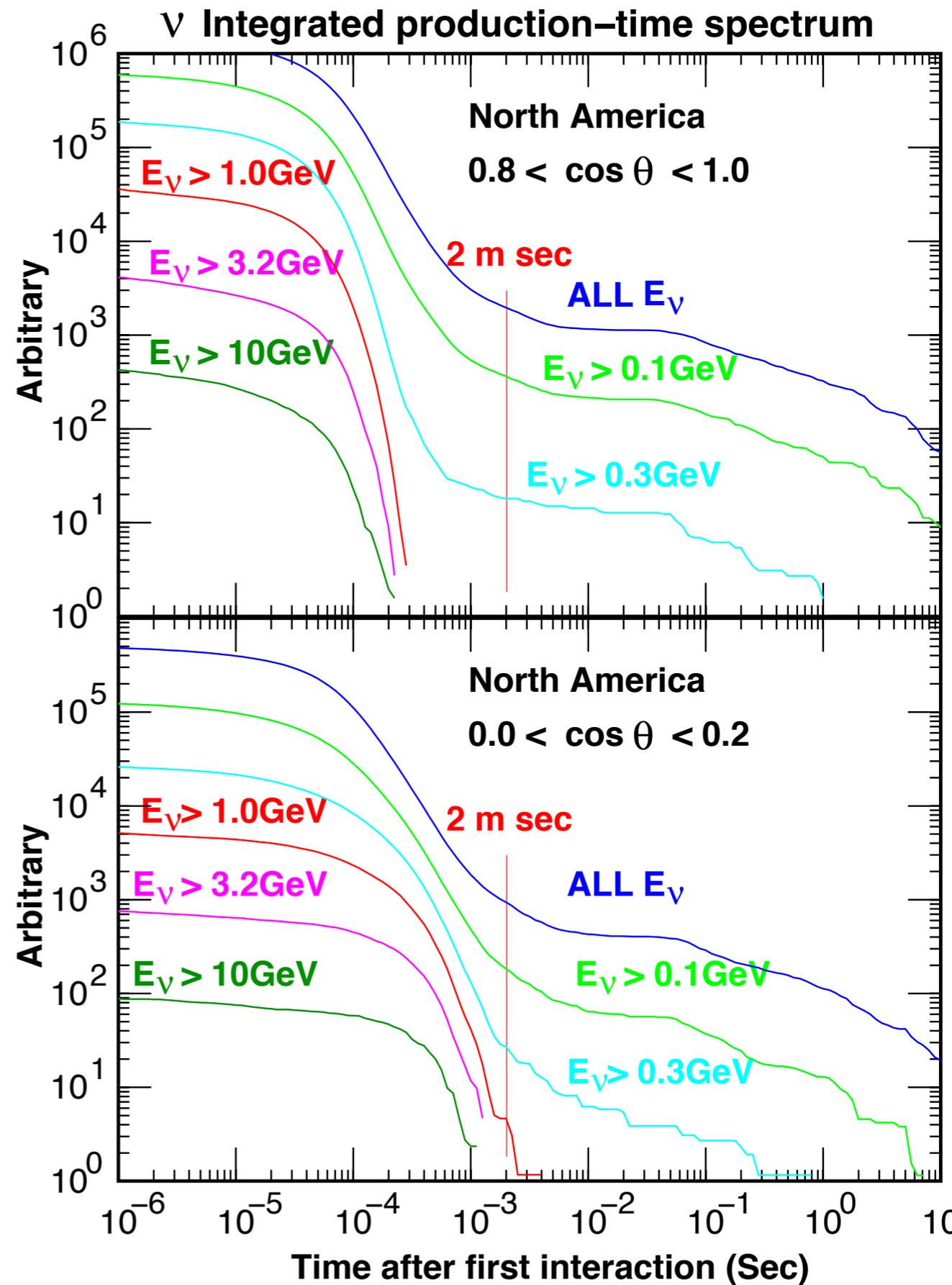
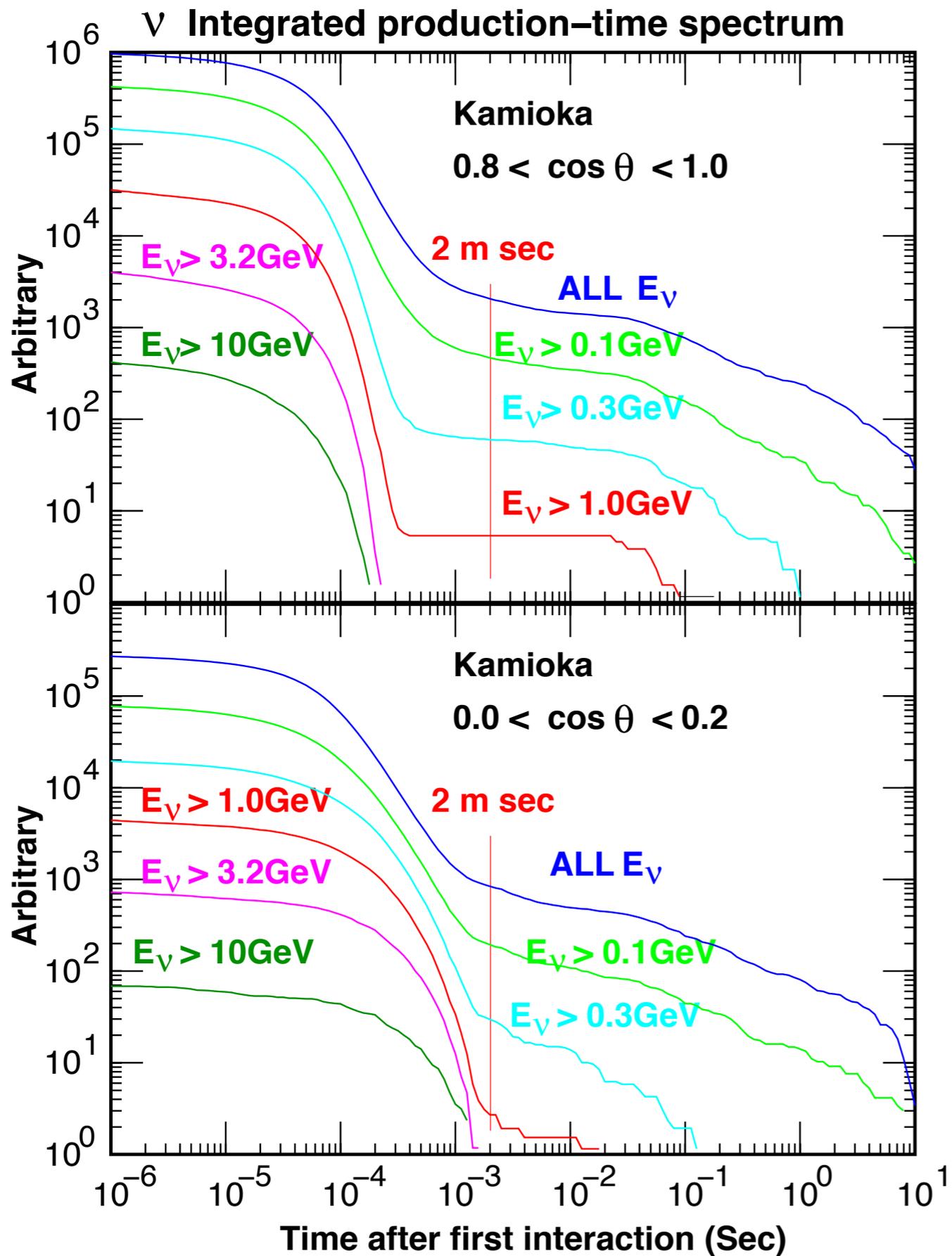
Total charm cross section $pp \rightarrow cc$

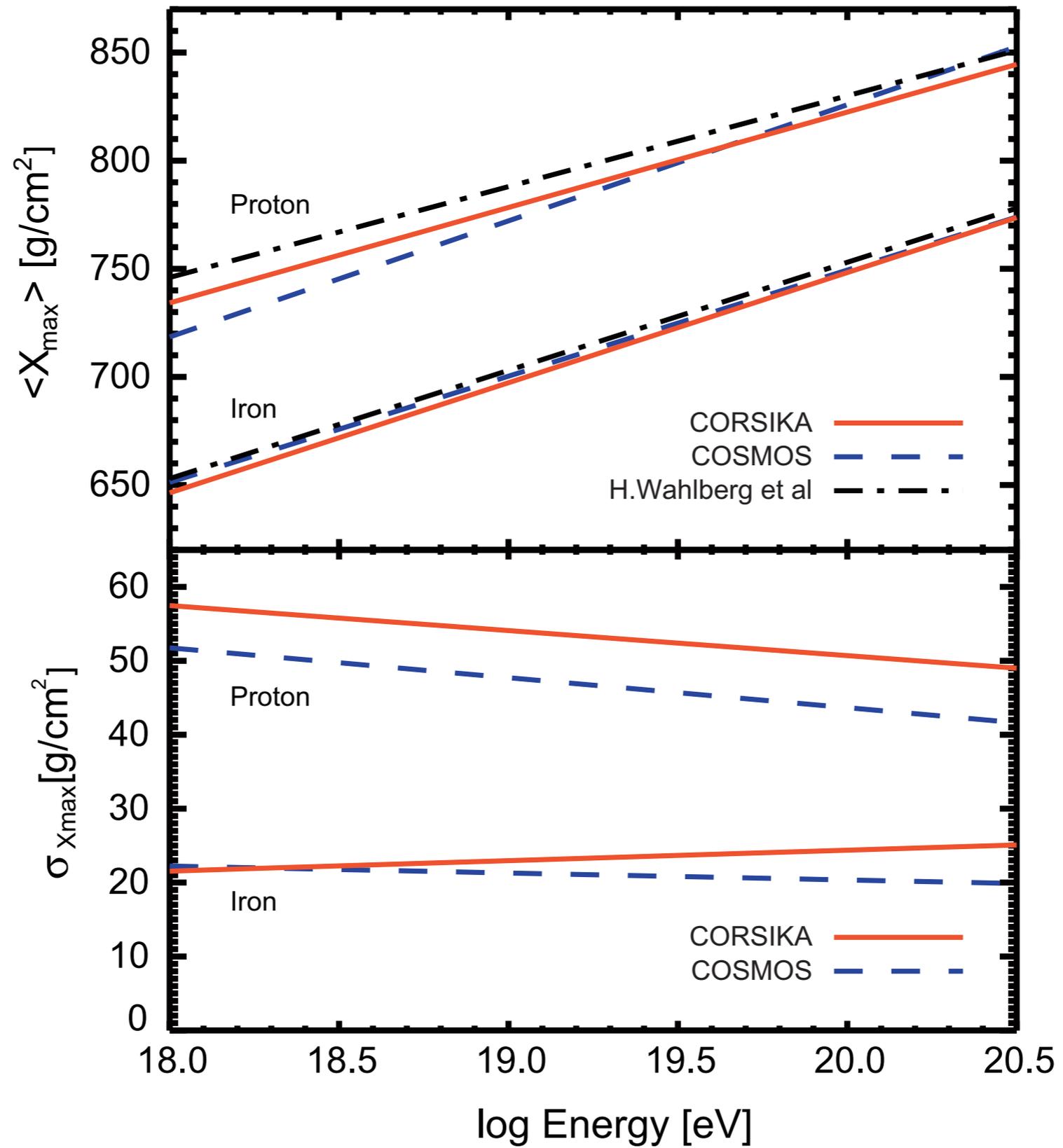


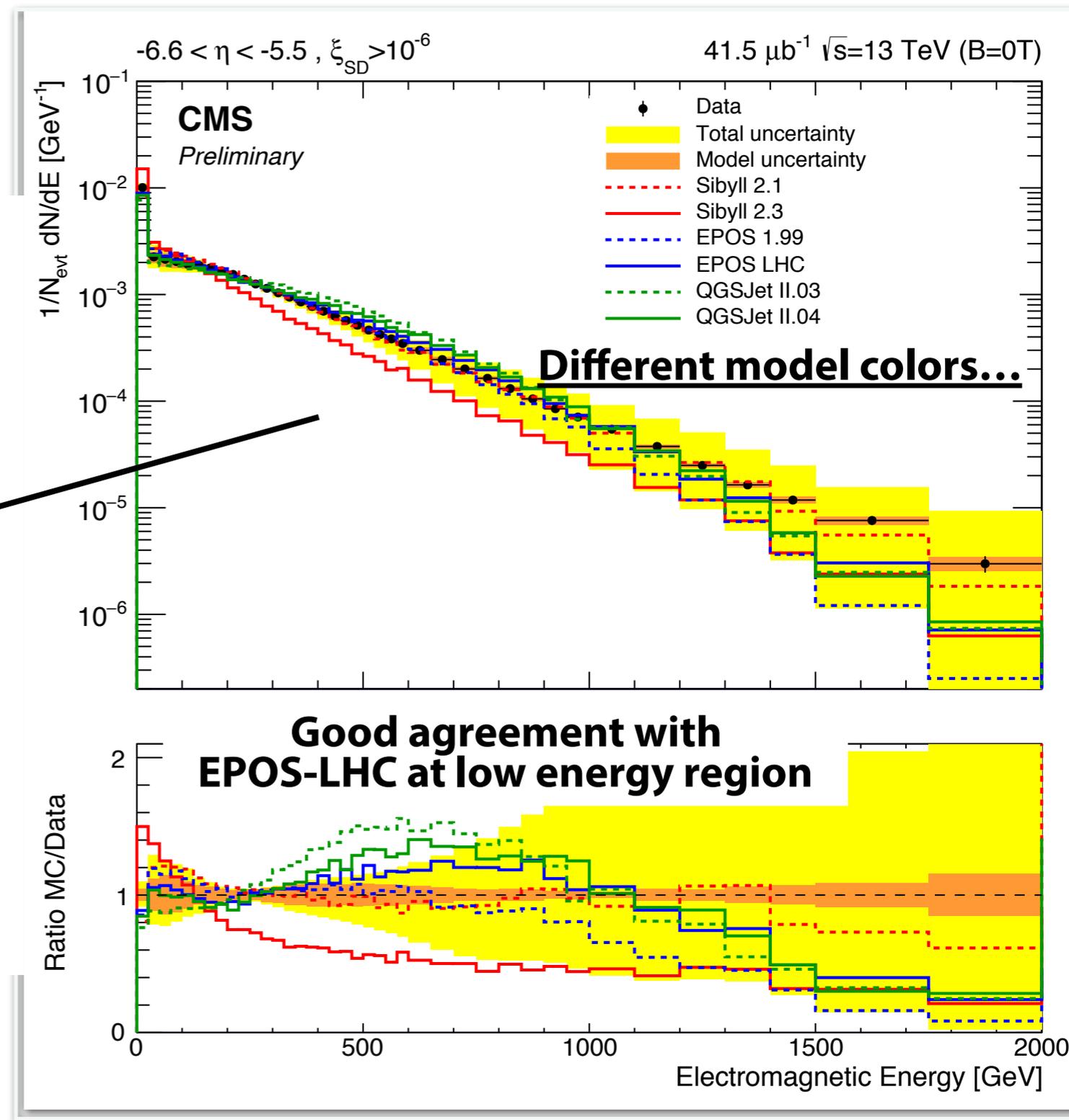
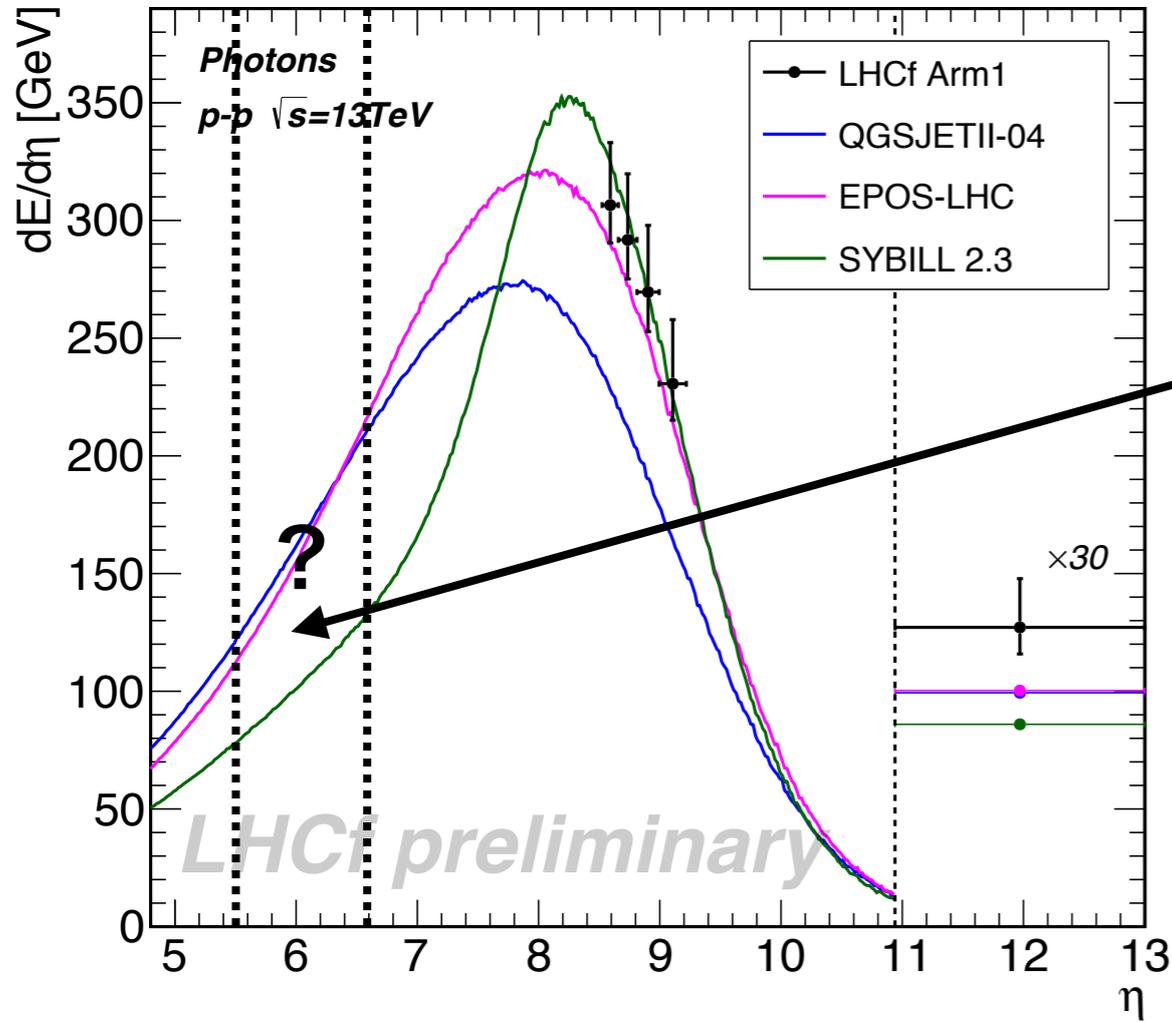
Very different energy dependence of calculations!

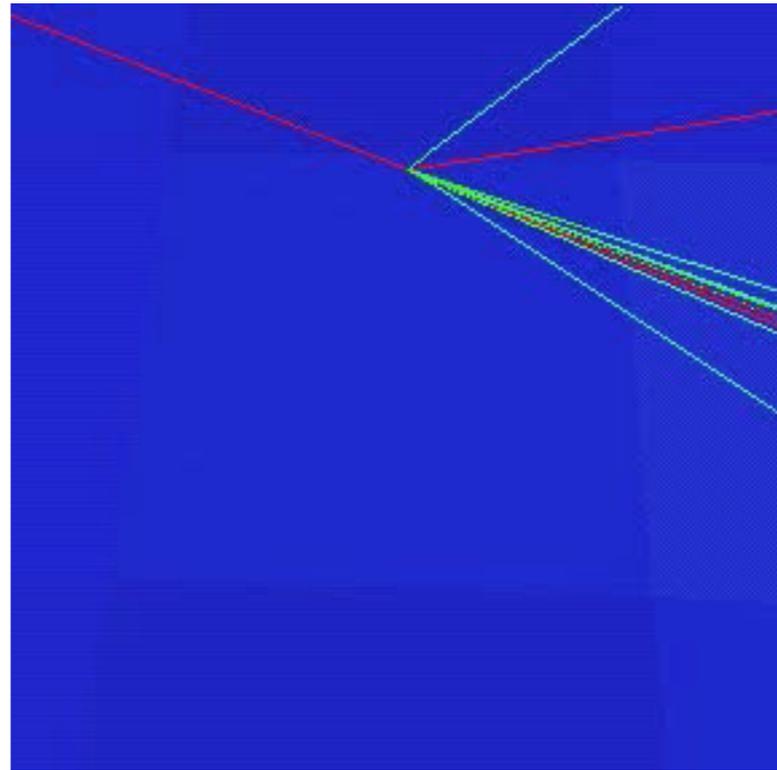
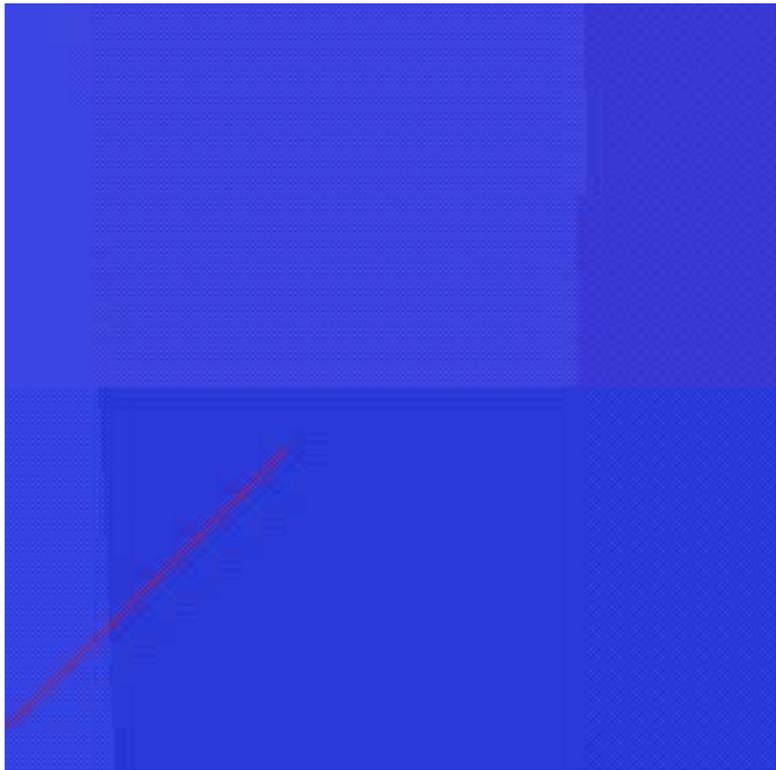
Average energy spectrum of magnetic cascade at 100 km a.s.l. for 10^{20} eV photon primary

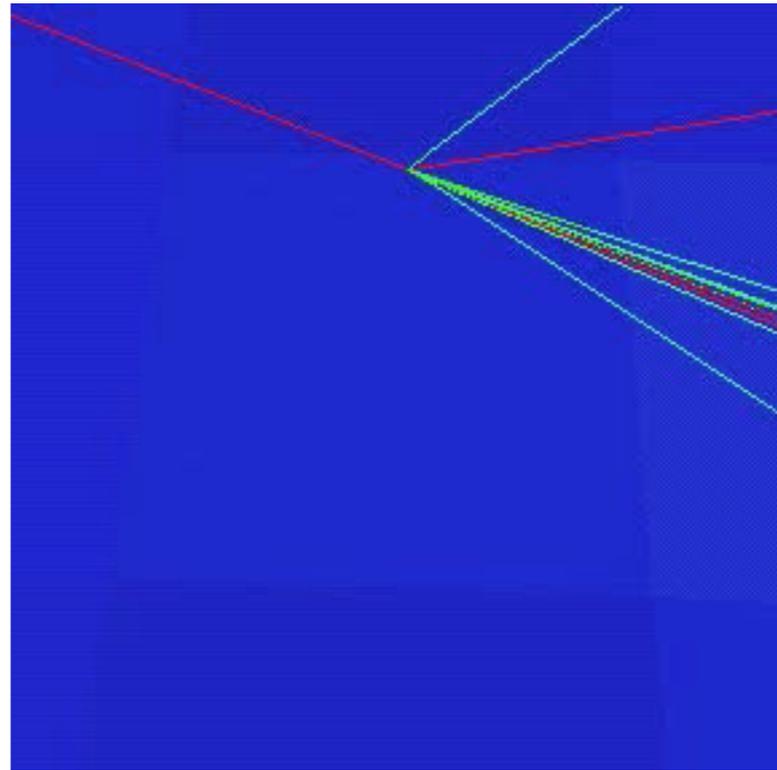
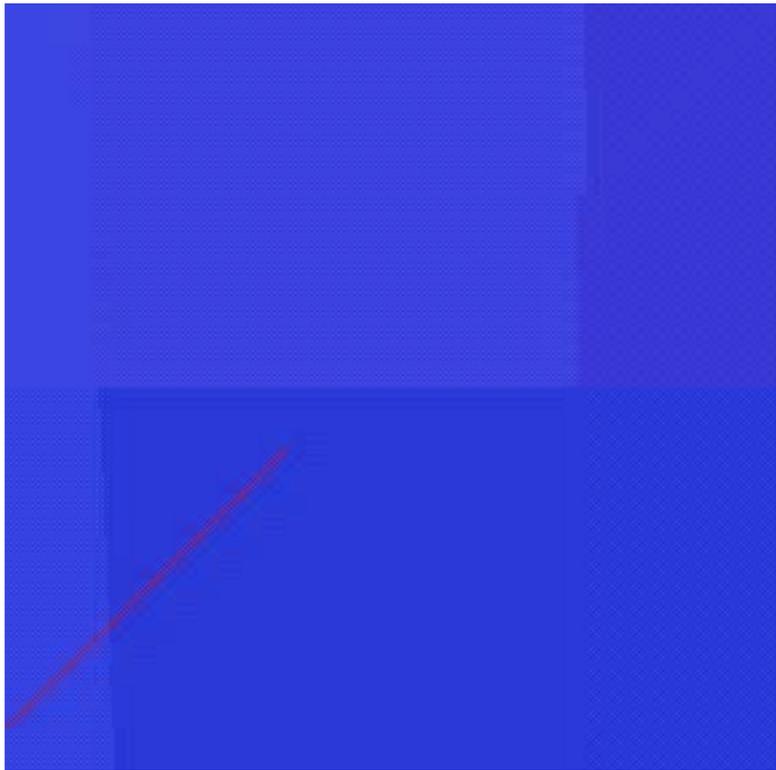


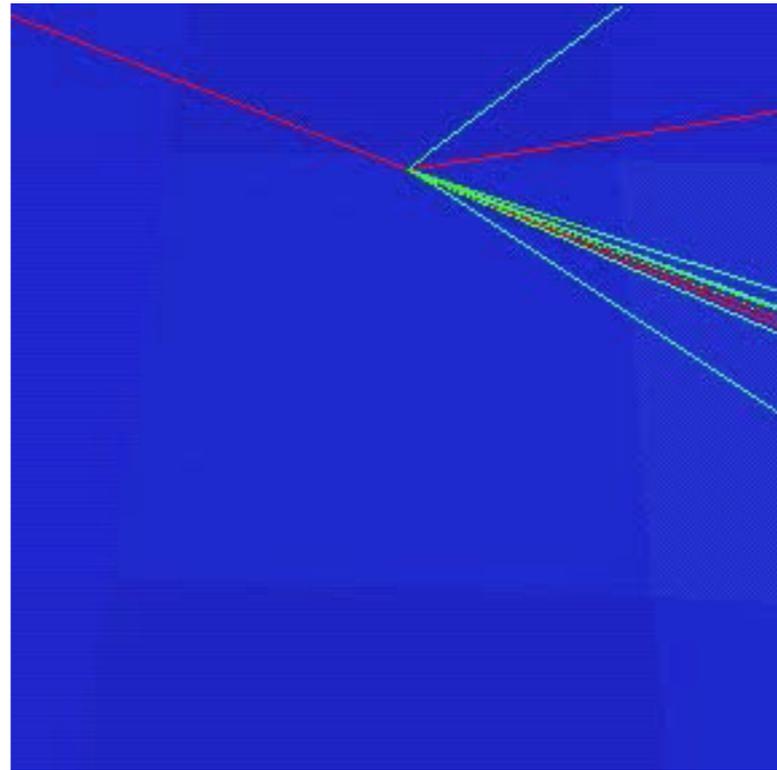
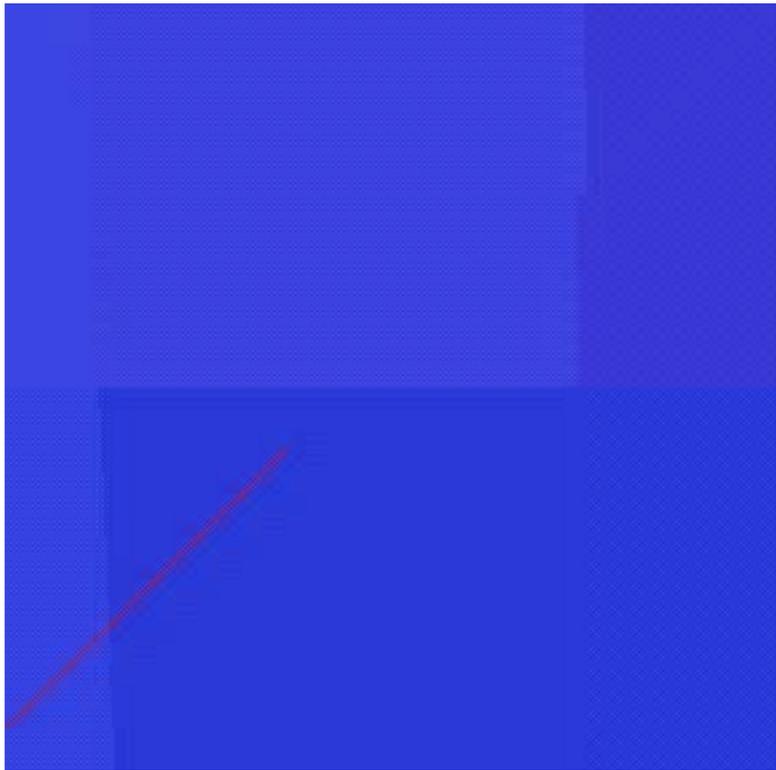


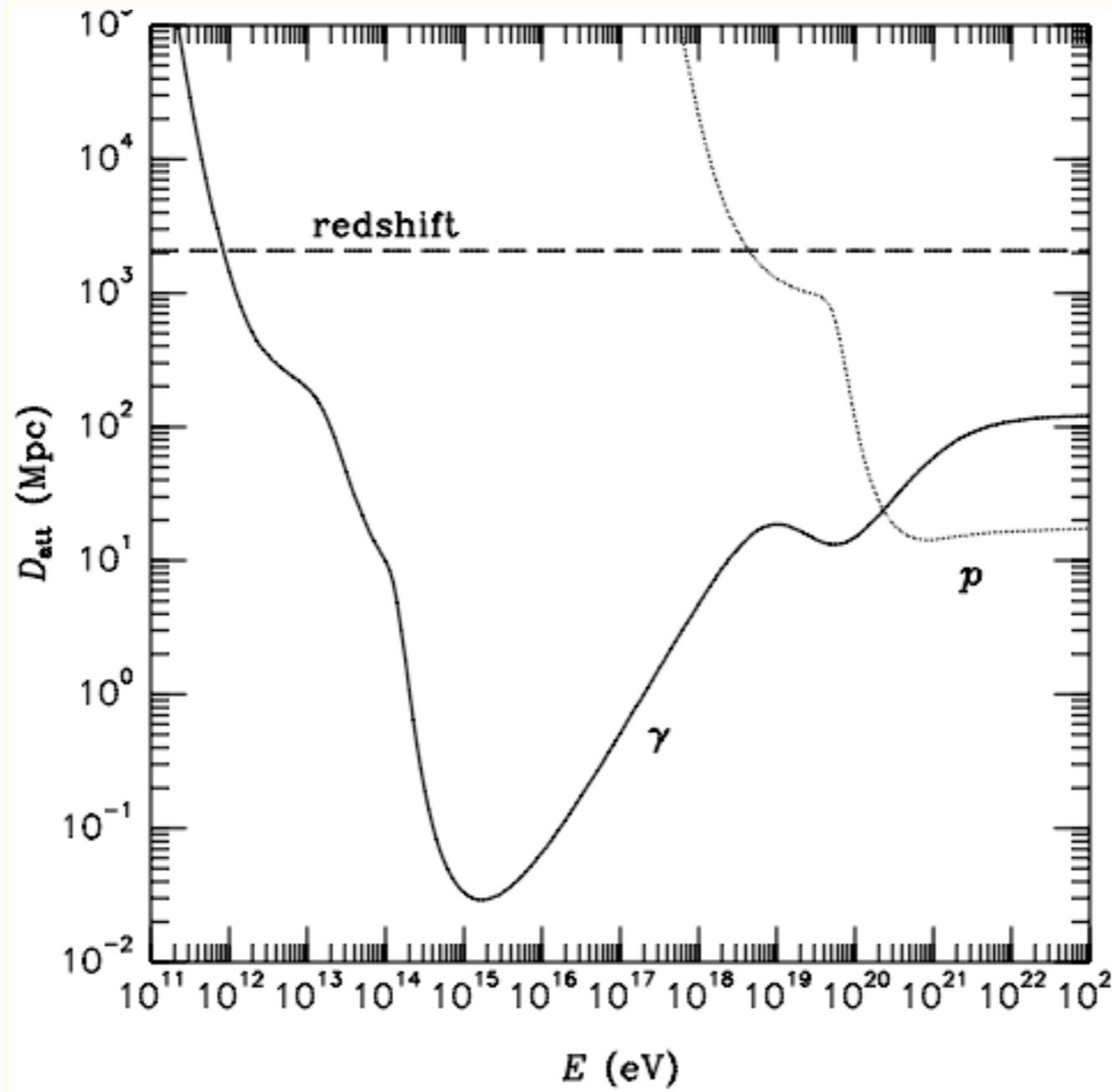




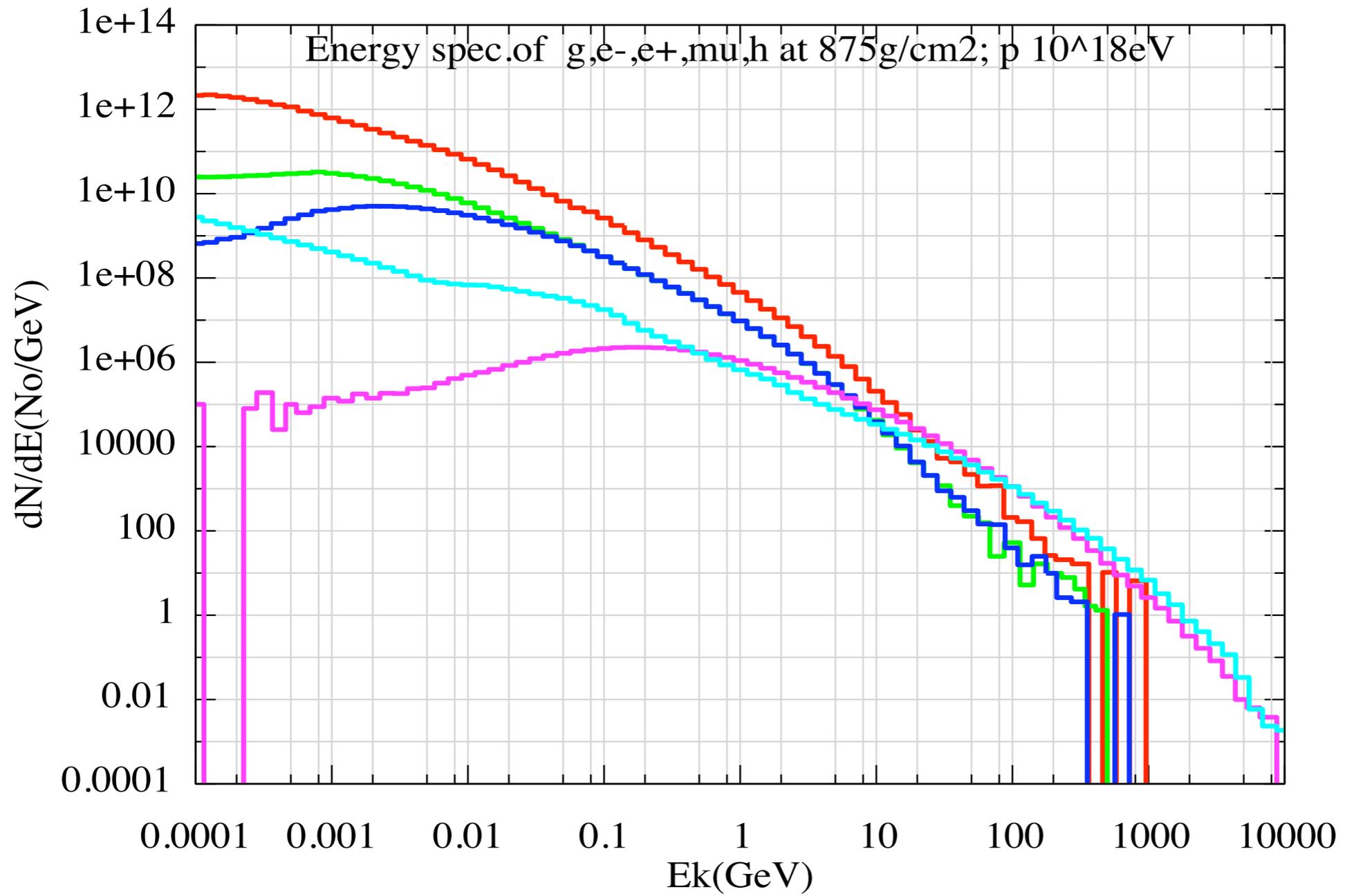




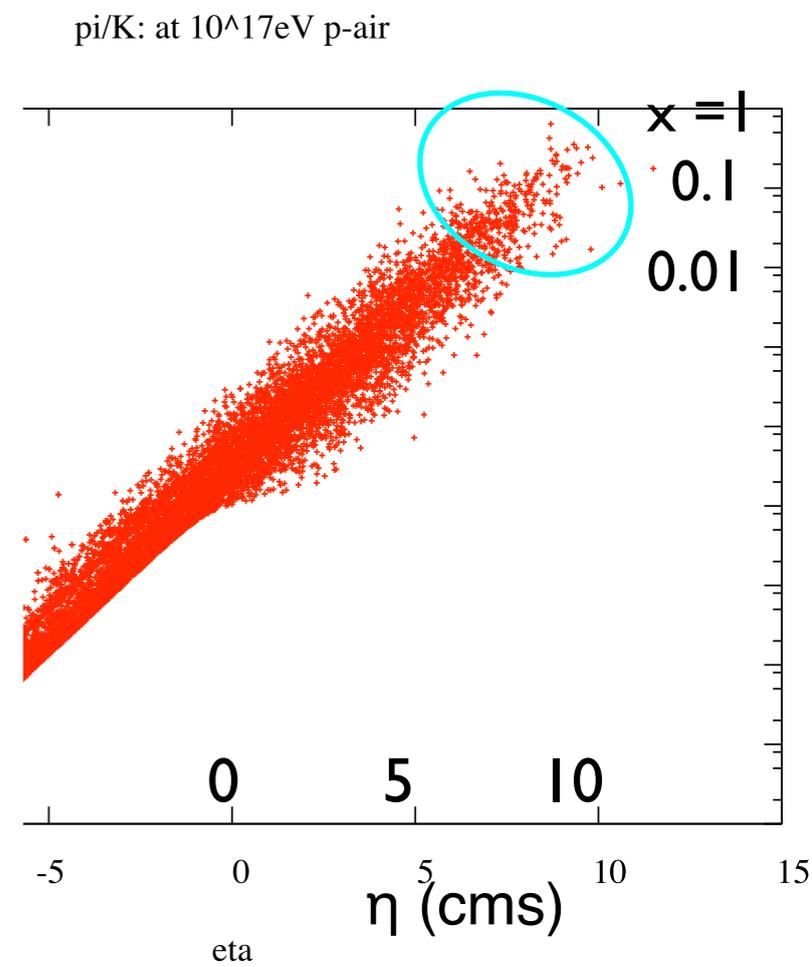
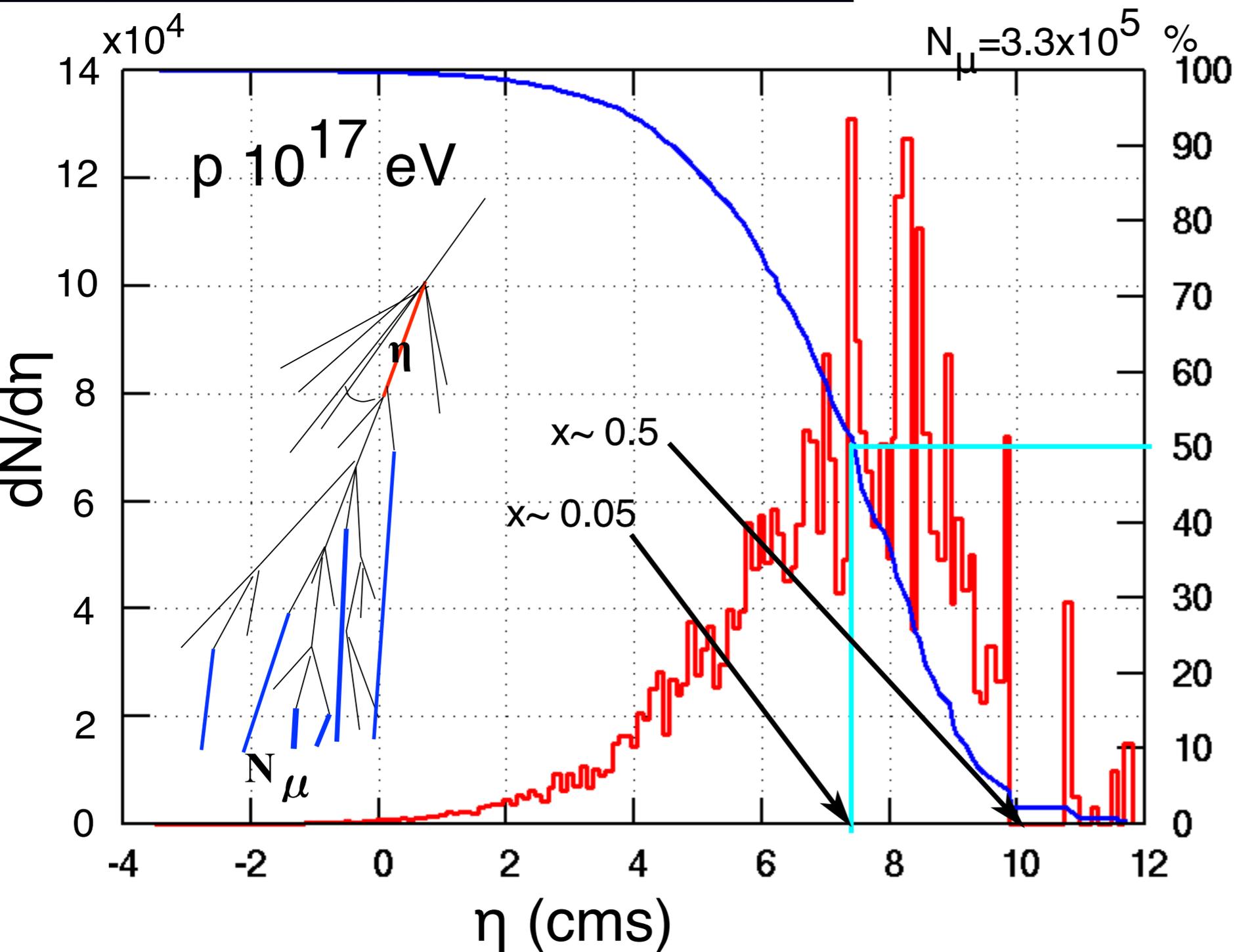




LPM + Geomag



However, for H.E A.S, forward production is important
 pi, K produced at η in 10^{17} eV p-air coll. ==>
 how many muons finally ?



Highest energy muon in a shower

H (km)

70

60

50

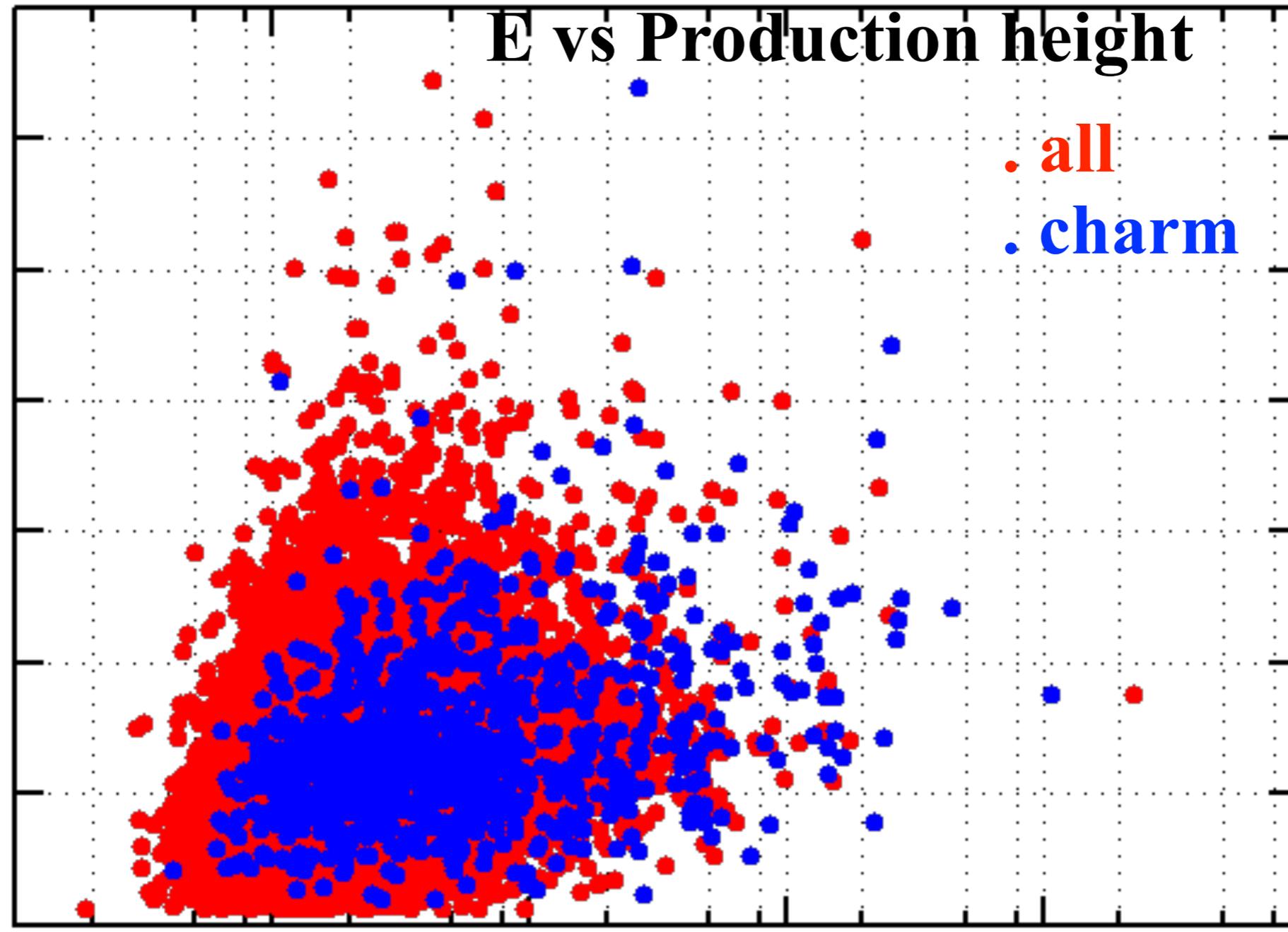
40

30

20

10

0



E vs Production height

. all

. charm

1

10

100

1000

10000

100000

E_{mu} (TeV)

Highest energy nu in a shower

H (km)

