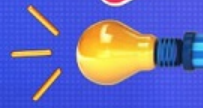


IT'S
QUIZ

TIME



What planetary body is behind me?

A) The Moon.

B) Ceres.

C) Mars.

D) None of the above.

What planetary body is behind me?

D) None of the above.

A Brief History of Chemistry in the Cosmos

Daniel Wolf Savin
Columbia University



Outline

Let there be light



Motivation

D1 Experiment

Results

Let there be life



Motivation

D3 Experiment

Results

ס בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ: והארץ היתה ²
תהו ובהו וחשך על-פני תהום ורוח אלהים מרחפת על-פני
המים:

³ ויאמר אלהים יהי אור ויהי-אור ⁴
כי-טוב ויבדל אלהים בין האור ובין החשך: ויקרא אלהים לאור ⁵
יום ולחשך קרא לילה ויהי-ערב ויהי-בקר יום אחד

וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים יְהִי רָקיעַ בְּתוֹךְ הַמַּיִם וַיְהִי מַבְדִּיל בֵּין מַיִם ⁶
לְמַיִם: וַיַּעַשׂ אֱלֹהִים אֶת-הַרְקִיעַ וַיַּבְדֵּל בֵּין הַמַּיִם אֲשֶׁר מִתַּחַת ⁷
לְרָקִיעַ וּבֵין הַמַּיִם אֲשֶׁר מֵעַל לְרָקִיעַ וַיְהִי-כֵן: וַיִּקְרָא אֱלֹהִים ⁸
לְרָקִיעַ שָׁמַיִם וַיְהִי-עֶרֶב וַיְהִי-בֹקֶר יוֹם שֵׁנִי:

וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים יִקְוּ הַמַּיִם מִתַּחַת הַשָּׁמַיִם אֶל-מְקוֹם אֶחָד וְתִרְאֶה ⁹
הַיַּבְשָׁה וַיְהִי-כֵן: וַיִּקְרָא אֱלֹהִים לַיַּבְשָׁה אָרֶץ וּלְמַקְוֵה הַמַּיִם ¹⁰
קָרָא יַמִּים וַיִּרְא אֱלֹהִים כִּי-טוֹב: וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים תְּדַשֵּׂא הָאָרֶץ ¹¹
דִּשְׂא עֵשֶׂב מְזִרִיעַ וְרַע עֵץ פָּרִי עֹשֶׂה פְּרִי לְמִינֹו אֲשֶׁר וְרַעֲיָבו
עַל-הָאָרֶץ וַיְהִי-כֵן: וַתּוֹצֵא הָאָרֶץ דִּשְׂא עֵשֶׂב מְזִרִיעַ וְרַע לְמִינָהּוּ ¹²
וְעֵץ עֹשֶׂה-פְּרִי אֲשֶׁר וְרַעֲיָבו לְמִינָהּוּ וַיִּרְא אֱלֹהִים כִּי-טוֹב:
וַיְהִי-עֶרֶב וַיְהִי-בֹקֶר יוֹם שְׁלִישִׁי ¹³

Science is answering questions that humanity has pondered for millennia.



Outline

Let there be light

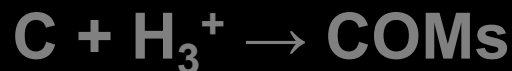


Motivation

D1 Experiment

Results

Let there be life



Motivation

D3 Experiment

Results

ס בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ: והארץ היתה ריקה ובהו וחסך על־פני תהום ורוח אלהים מרחפת על־פני המים:

3 ויאמר אלהים יהי אור ויהי־אור

4 כי־טוב ויבדל אלהים בין האור ובין החשך: ויקרא אלהים לאור

5 יום ולחשך קרא לילה ויהי־ערב ויהי־בקר יום אחד

6 ויאמר אלהים יהי רקיע בתוך המים ויהי מבדיל בין מים

7 למים: ויעש אלהים את־הרקיע ויבדל בין המים אשר מתחת

8 לרקיע ובין המים אשר מעל לרקיע ויהי־כן: ויקרא אלהים

לרקיע שמים ויהי־ערב ויהי־בקר יום שני:

9 ויאמר אלהים יקוו המים מתחת השמים אל־מקום אחד ותראה

10 היבשה ויהי־כן: ויקרא אלהים ליבשה ארץ ולמקוה המים

11 קרא ימים וירא אלהים כי־טוב: ויאמר אלהים תדשא הארץ

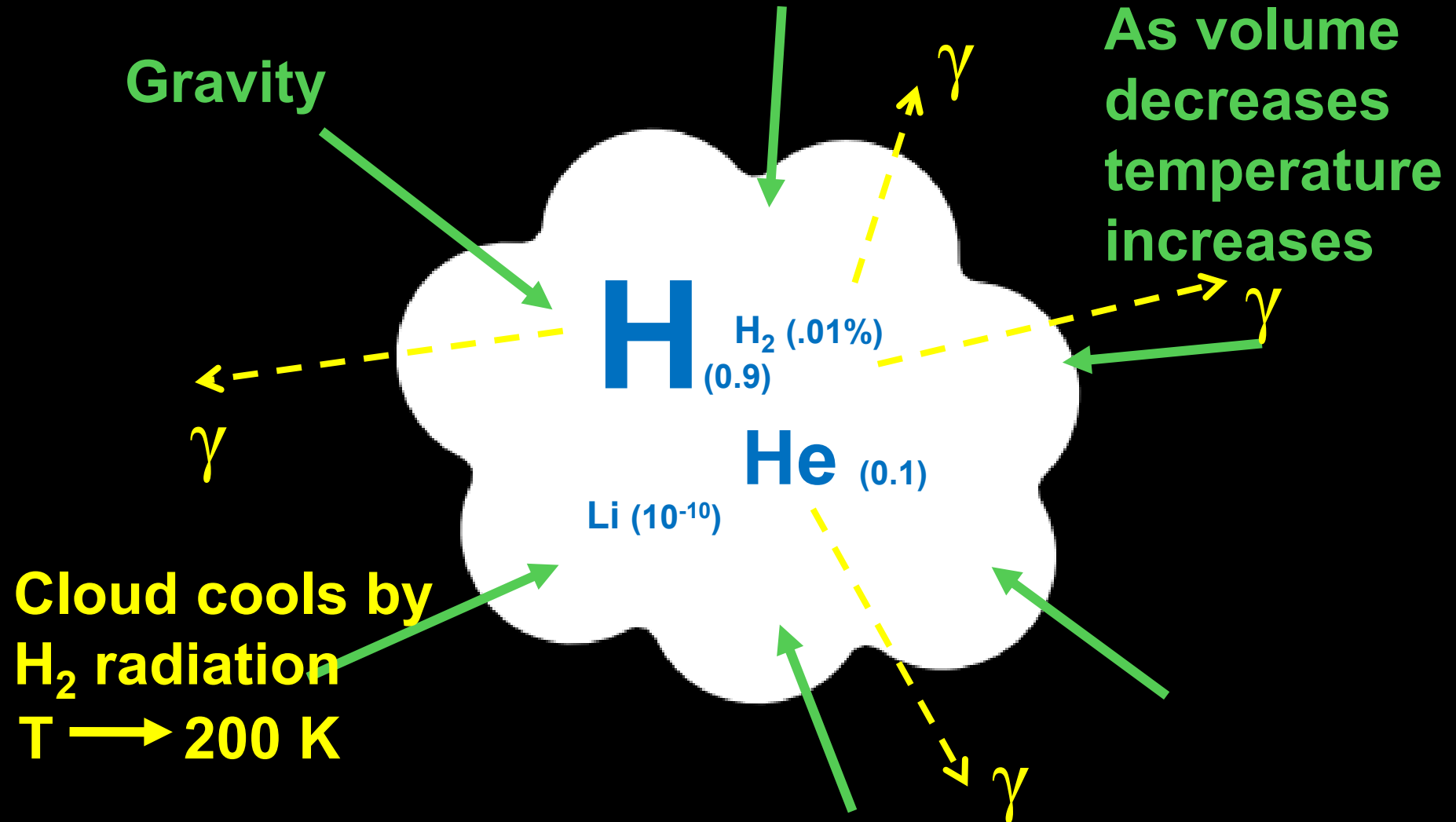
12 דשא עשב מזריע זרע עץ פרי עשה פרי למיננו אשר זרעו־בו

13 על־הארץ ויהי־כן: ותוצא הארץ דשא עשב מזריע זרע למינהו

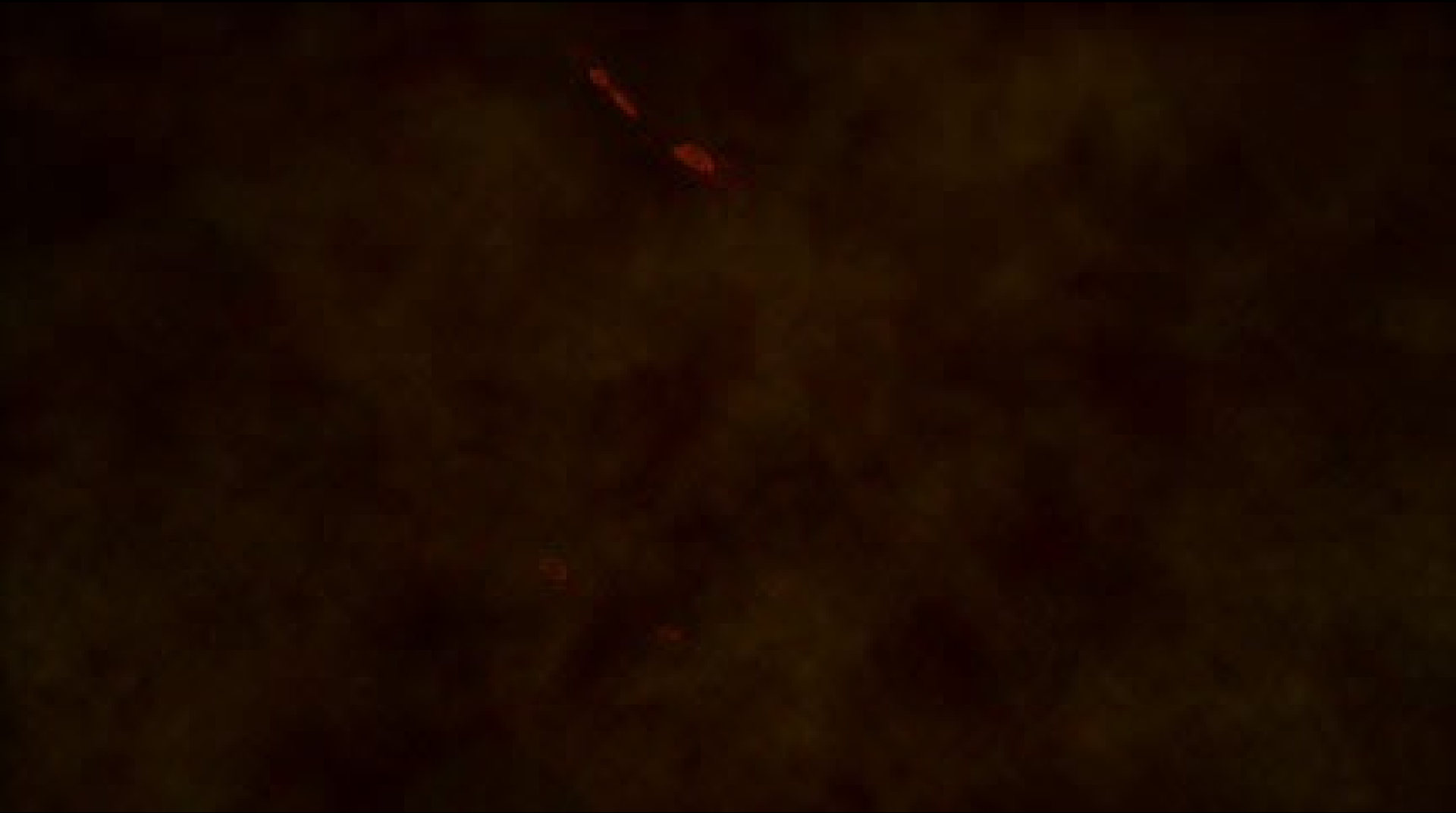
ועץ עשה־פרי אשר זרעו־בו למינהו וירא אלהים כי־טוב:

ויהי־ערב ויהי־בקר יום שלישי

Structure formation in the early universe



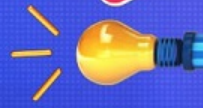
Simulated formation of the first star



(Kaehler, Abel, & Bryan 2009)

IT'S
QUIZ

TIME



Why did this movie have no sound?

A) Copyright issues.

B) Makers too lazy to add.

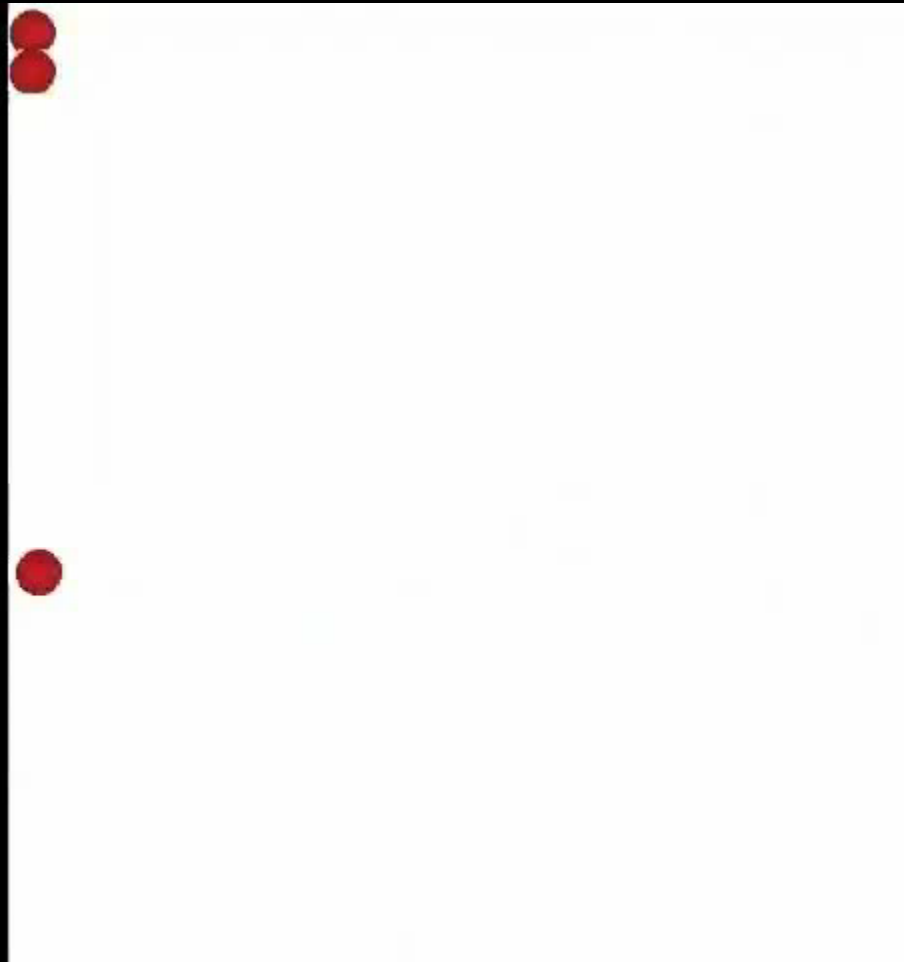
C) Only dogs can hear it.

D) Space is a vacuum.

Why did this movie have no sound?

D) Space is a vacuum.

How H_2 radiatively cools the gas down to temperature of $T \sim 200$ K



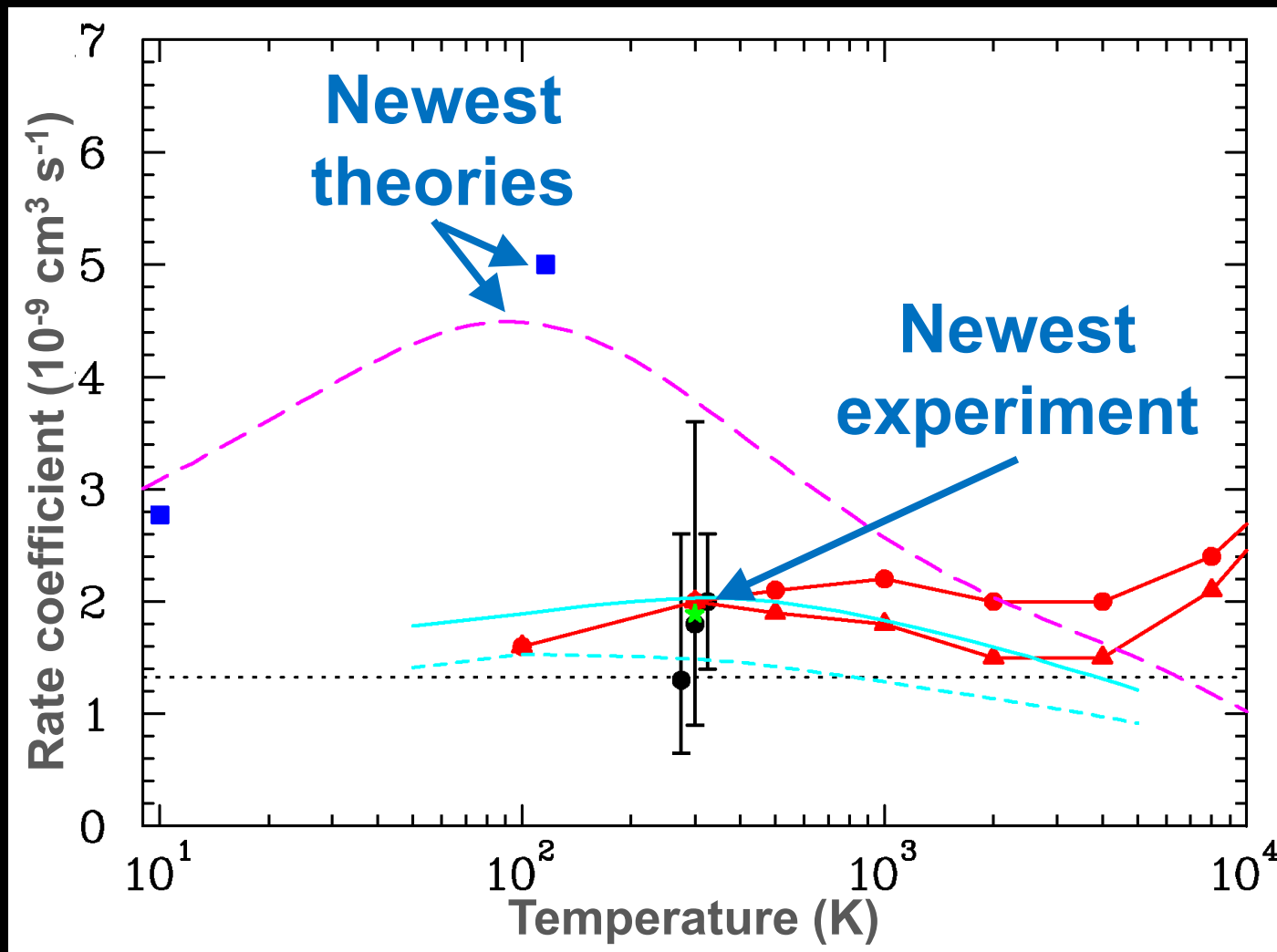
H₂ Formation during Epoch of Protogalaxy and First Star Formation

Associative detachment (AD)



This was not well understood before we started.

Published kinetics for $\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$



There is nearly an order of magnitude spread.
This has significant cosmological implications!

First Star Formation

Upper limit for stellar mass set by balance of outward pressure and inward gravitational force.

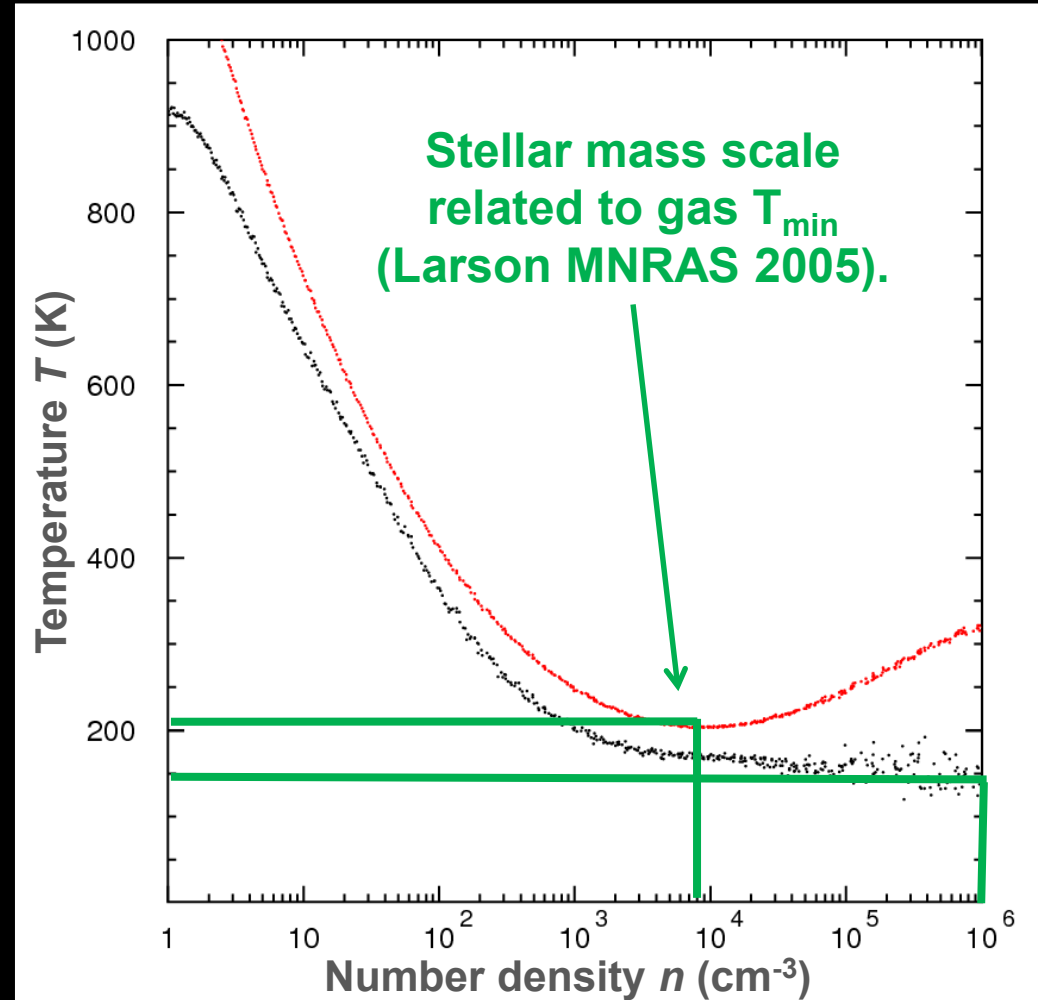
This hydrostatic equilibrium limit is commonly called the Jeans mass:

$$M_J \propto \frac{T^{3/2}}{\sqrt{n}}$$

Uncertainties in M_J translate into uncertainties in predicted elemental yield from nucleosynthesis.

Implications for First Star Formation

- Initially ionized gas
- 3D simulation.
- Curves is for limits of $\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$ rate coefficient.
- $M_J \propto T^{3/2} n^{-1/2}$
- M_J uncertain by factor of 20.



(Kreckel et al. 2010, Science, 329, 69)

Outline

Let there be light

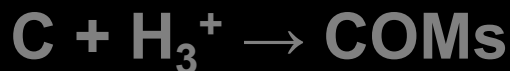


Motivation

D1 Experiment

Results

Let there be life



Motivation

D3 Experiment

Results

ס בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ: והארץ היתה ריקה ובהו וחסך על-פני תהום ורוח אלהים מרחפת על-פני המים:

3 ויאמר אלהים יהי אור ויהי-אור
4 כי-טוב ויבדל אלהים בין האור ובין החשך: ויקרא אלהים לאור יום ולחשך קרא לילה ויהי-ערב ויהי-בקר יום אחד

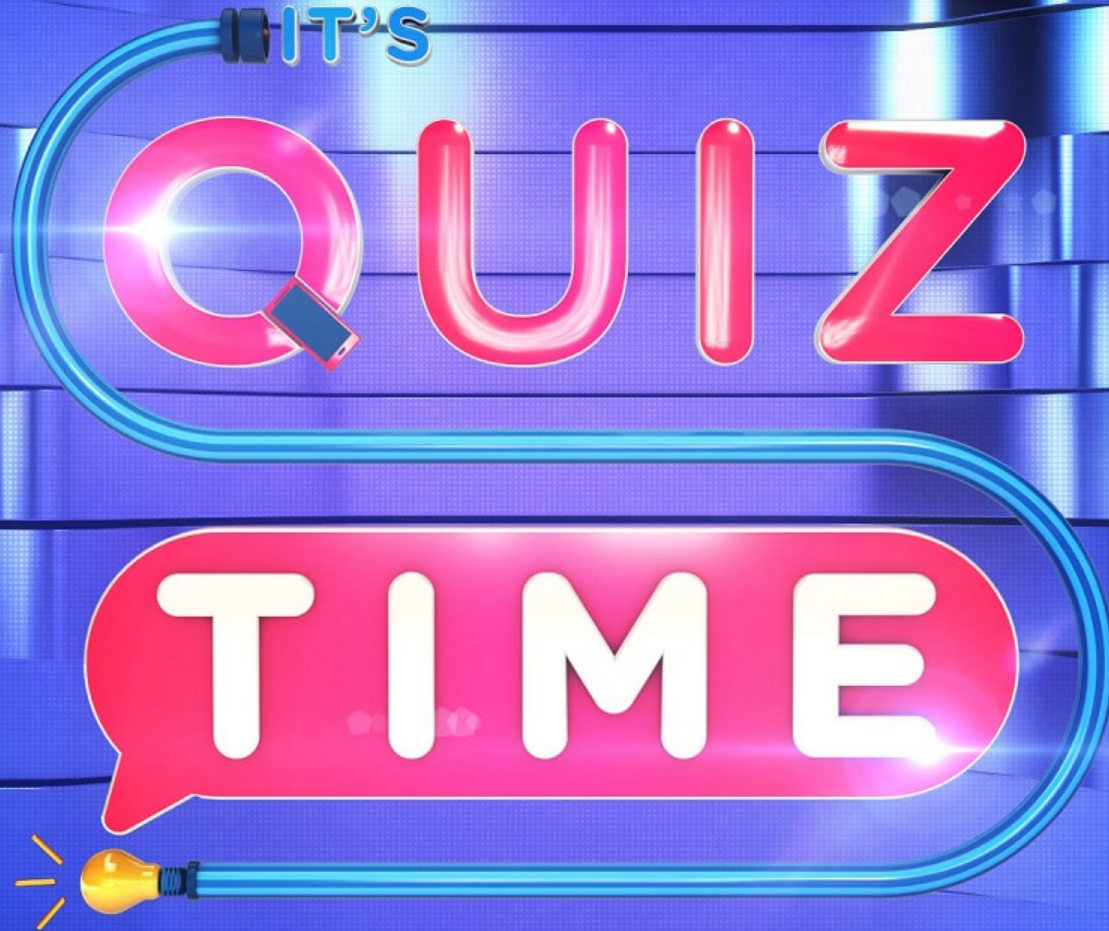
6 ויאמר אלהים יהי רקיע בתוך המים ויהי מבדיל בין מים למים: ויעש אלהים את-הרקיע ויבדל בין המים אשר מתחת לרקיע ובין המים אשר מעל לרקיע ויהי-כן: ויקרא אלהים לרקיע שמים ויהי-ערב ויהי-בקר יום שני:

9 ויאמר אלהים יקוו המים מתחת השמים אל-מקום אחד ותראה היבשה ויהי-כן: ויקרא אלהים ליבשה ארץ ולמקוה המים קרא ימים וירא אלהים כי-טוב: ויאמר אלהים תדשא הארץ דשא עשב מזריע זרע עץ פרי עשה פרי למיננו אשר זרעו-בו על-הארץ ויהי-כן: ותוצא הארץ דשא עשב מזריע זרע למינהו ועץ עשה-פרי אשר זרעו-בו למינהו וירא אלהים כי-טוב: ויהי-ערב ויהי-בקר יום שלישי

IT'S

QUIZ

TIME



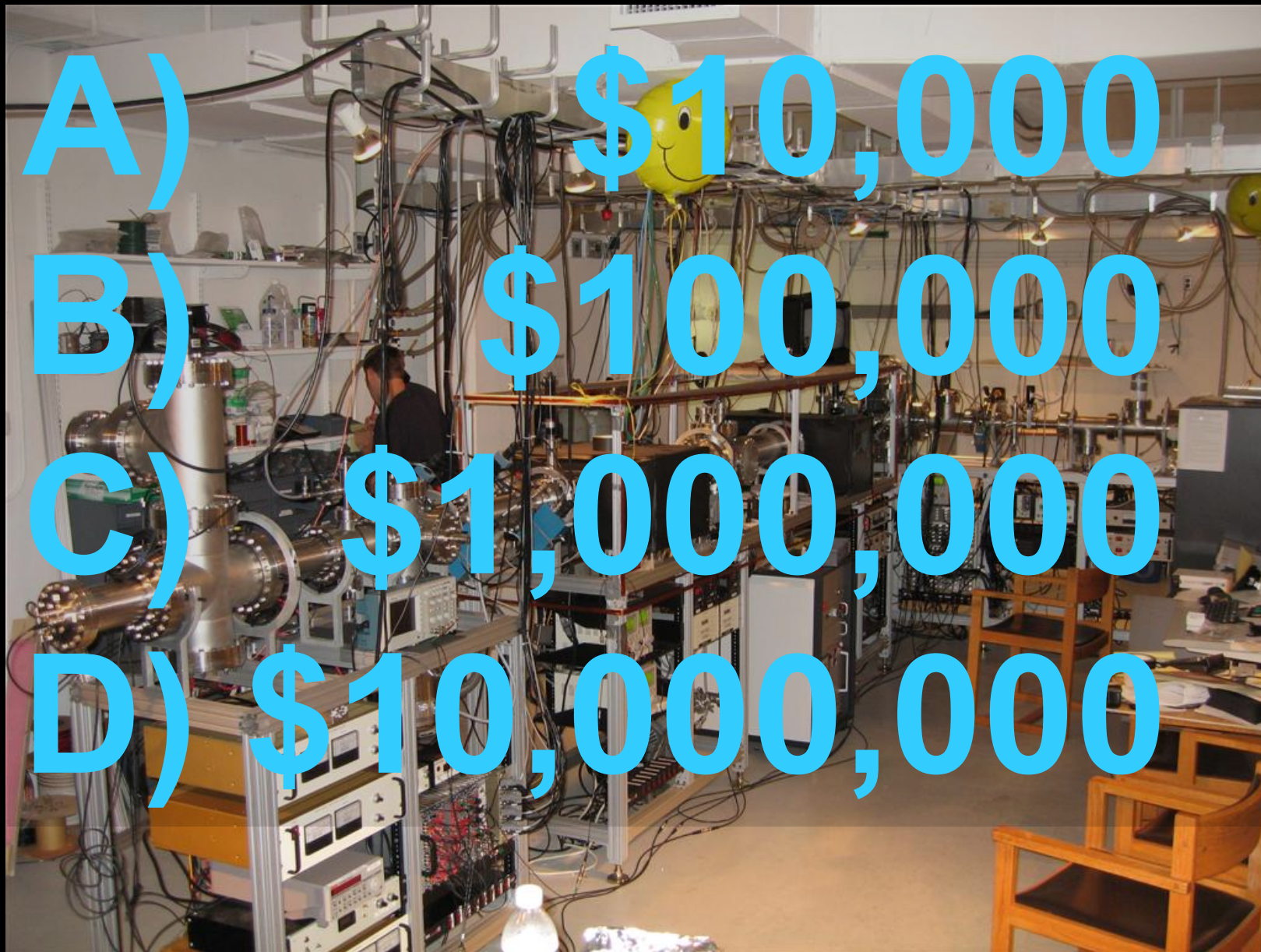
How much did this cost?

A) \$10,000

B) \$100,000

C) \$1,000,000

D) \$10,000,000

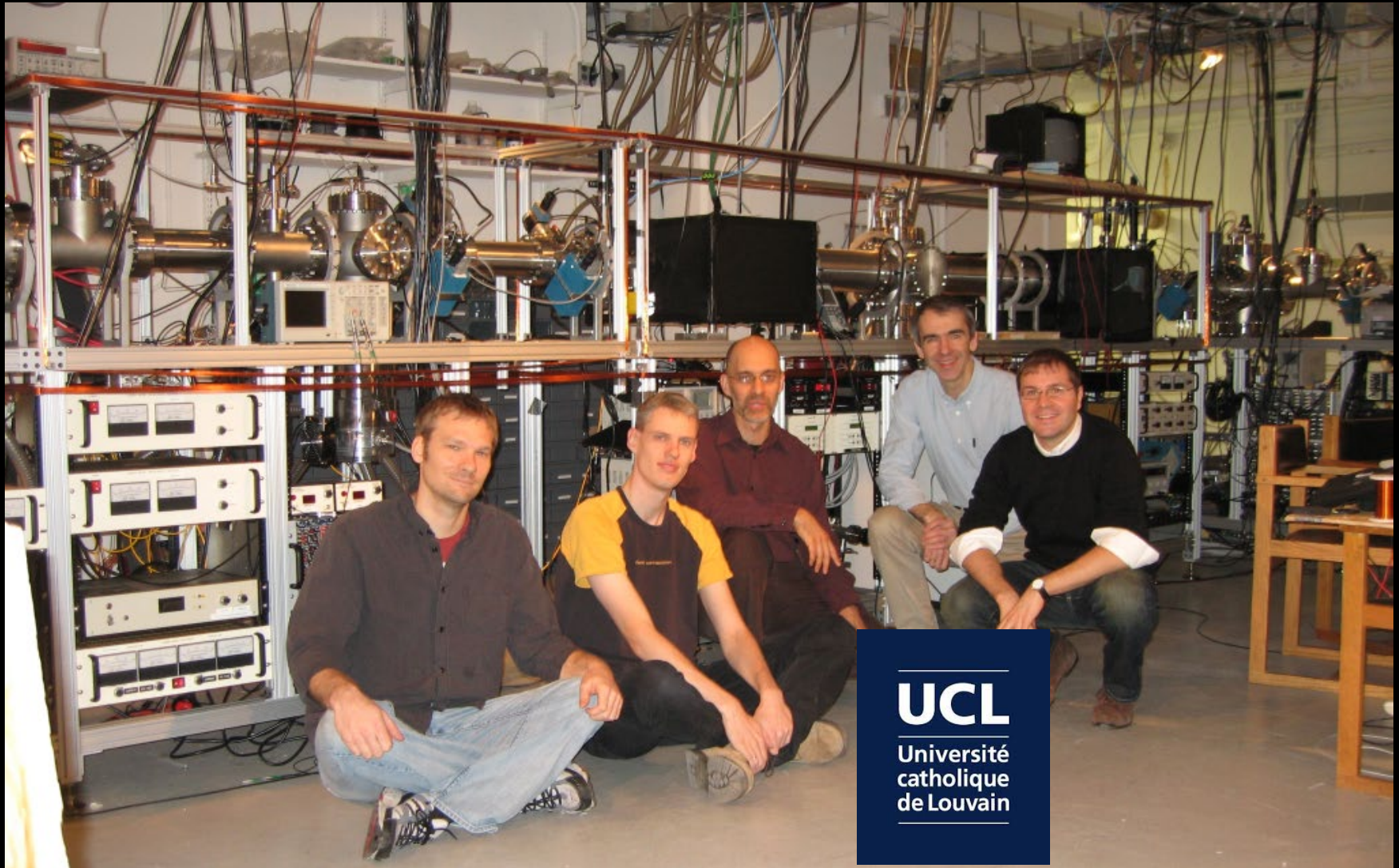


How much did this cost?



C) \$735,548

The Team Members



K. A. Miller, H. Bruhns, DWS, X. Urbain, H. Kreckel

Outline

Let there be light

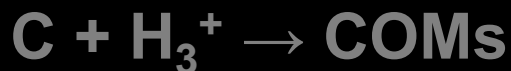


Motivation

D1 Experiment

Results

Let there be life



Motivation

D3 Experiment

Results

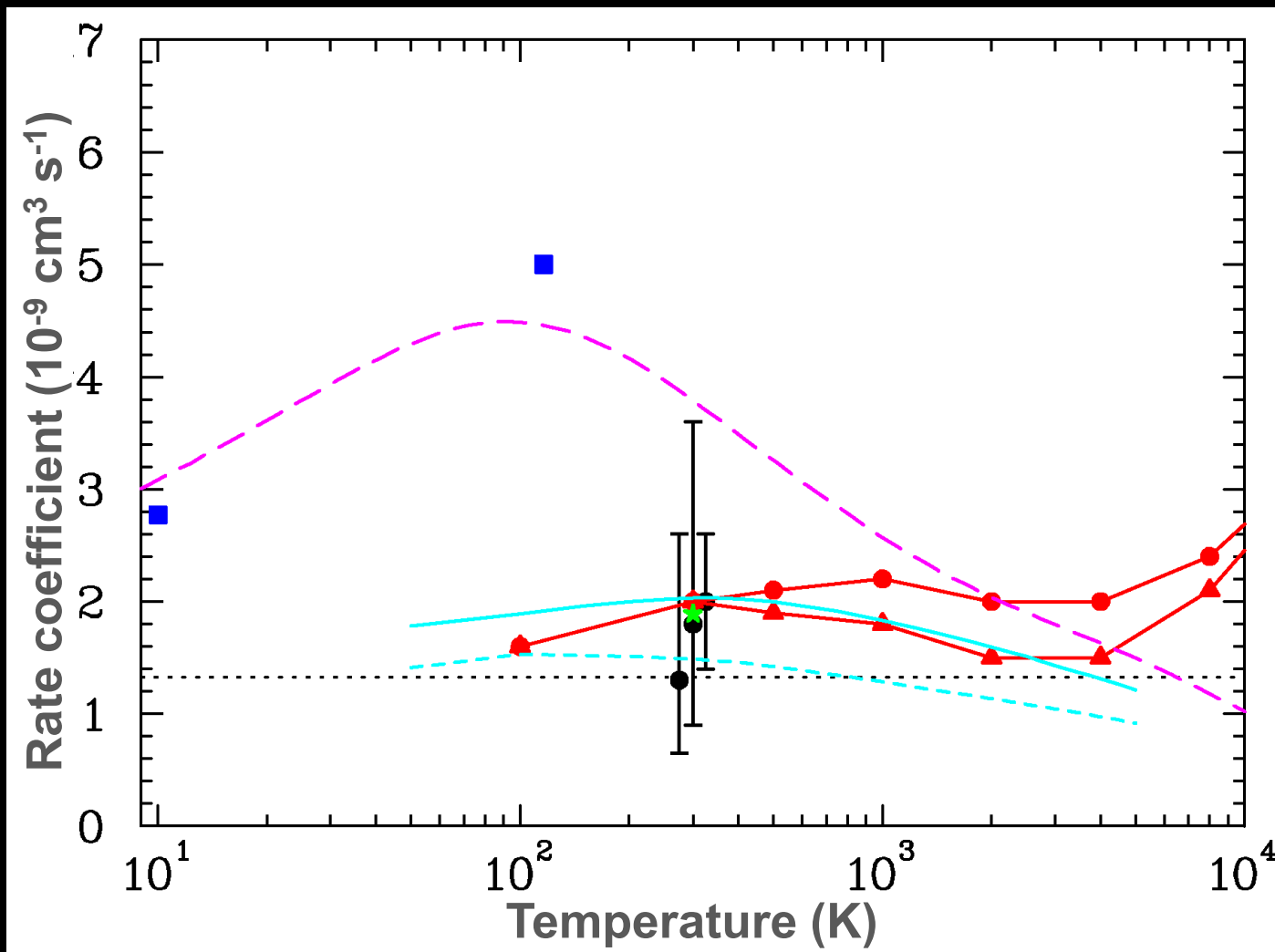
ס בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ: והארץ היתה ריקה
תהו ובהו וחשך על-פני תהום ורוח אלהים מרחפת על-פני
המים:

3 ויאמר אלהים יהי אור ויהי-אור
4 כי-טוב ויבדל אלהים בין האור ובין החשך: ויקרא אלהים לאור
5 יום ולחשך קרא לילה ויהי-ערב ויהי-בקר יום אחד

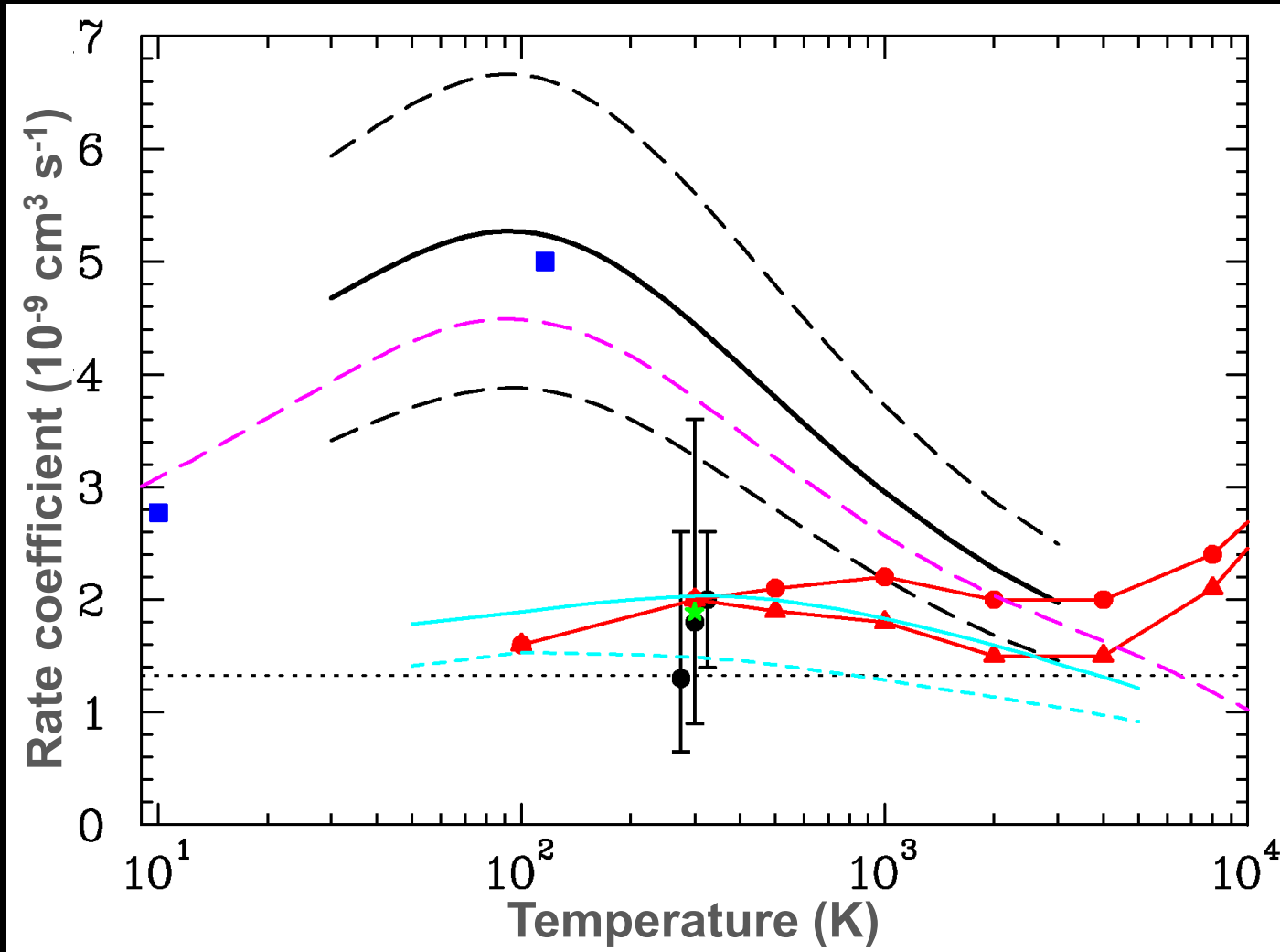
6 ויאמר אלהים יהי רקיע בתוך המים ויהי מבדיל בין מים
7 למים: ויעש אלהים את-הרקיע ויבדל בין המים אשר מתחת
8 לרקיע ובין המים אשר מעל לרקיע ויהי-כן: ויקרא אלהים
לרקיע שמים ויהי-ערב ויהי-בקר יום שני:

9 ויאמר אלהים יקוו המים מתחת השמים אל-מקום אחד ותראה
10 היבשה ויהי-כן: ויקרא אלהים ליבשה ארץ ולמקוה המים
11 קרא ימים וירא אלהים כי-טוב: ויאמר אלהים תדשא הארץ
דשא עשב מזריע זרע עץ פרי עשה פרי למיננו אשר זרעו-בו
12 על-הארץ ויהי-כן: ותוצא הארץ דשא עשב מזריע זרע למינהו
ועץ עשה-פרי אשר זרעו-בו למינהו וירא אלהים כי-טוב:
13 ויהי-ערב ויהי-בקר יום שלישי

Kinetics data for $\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$



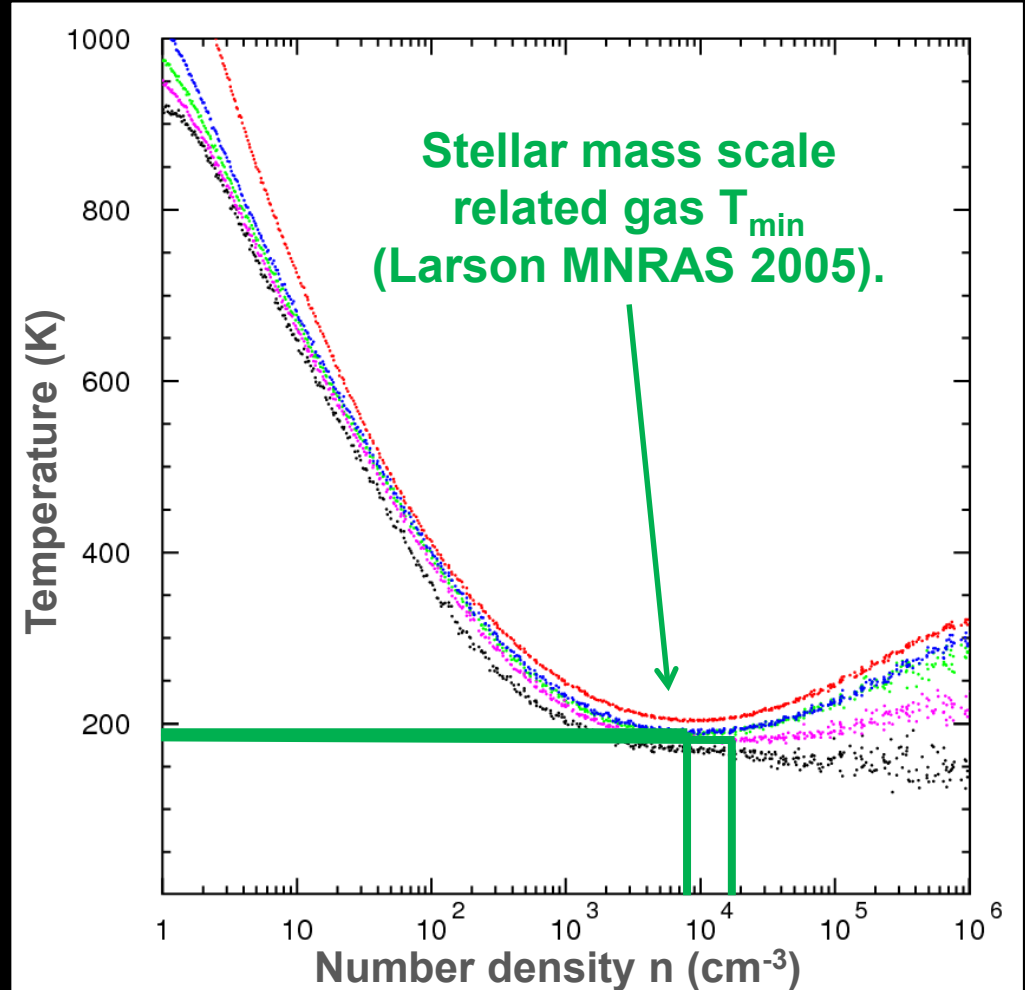
Adding in our results



Theory and experiment have finally converged.

Implications for First Star Formation

- Initially ionized gas
- 3D simulation.
- Red & black due to previous AD uncert.
- Other points show new $\pm 25\%$ uncert.
- M_J uncertainty goes from 20 to 2!



(Kreckel et al. 2010, Science, 329, 69)

Questions on First Half of Talk?

Outline

Let there be light



Motivation

D1 Experiment

Results

Let there be life



Motivation

D3 Experiment

Results

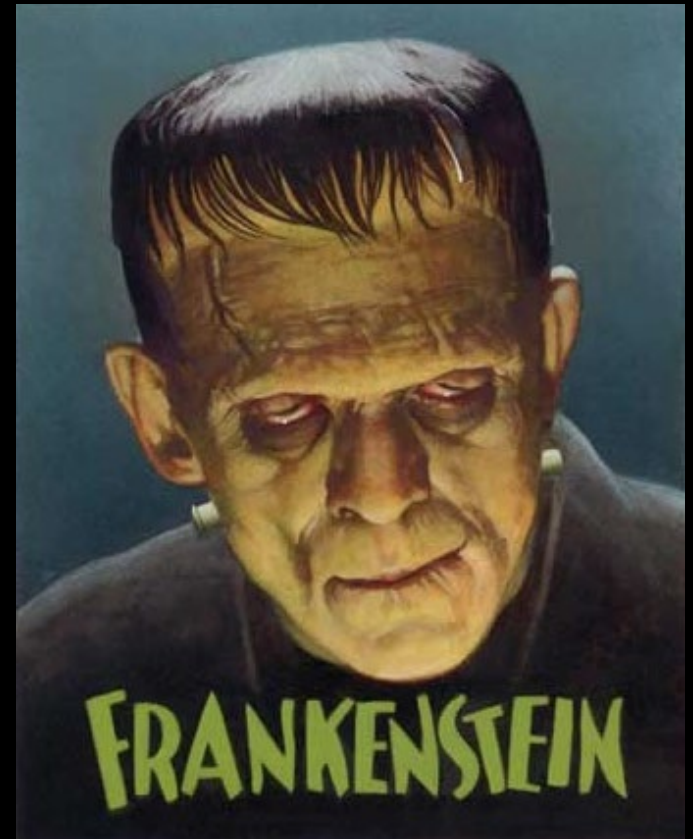
ס בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ: והארץ היתה ריקה
תהו ובהו וחשך על-פני תהום ורוח אלהים מרחפת על-פני
המים:

3 ויאמר אלהים יהי אור ויהי-אור
4 כי-טוב ויבדל אלהים בין האור ובין החשך: ויקרא אלהים לאור
5 יום ולחשך קרא לילה ויהי-ערב ויהי-בקר יום אחד

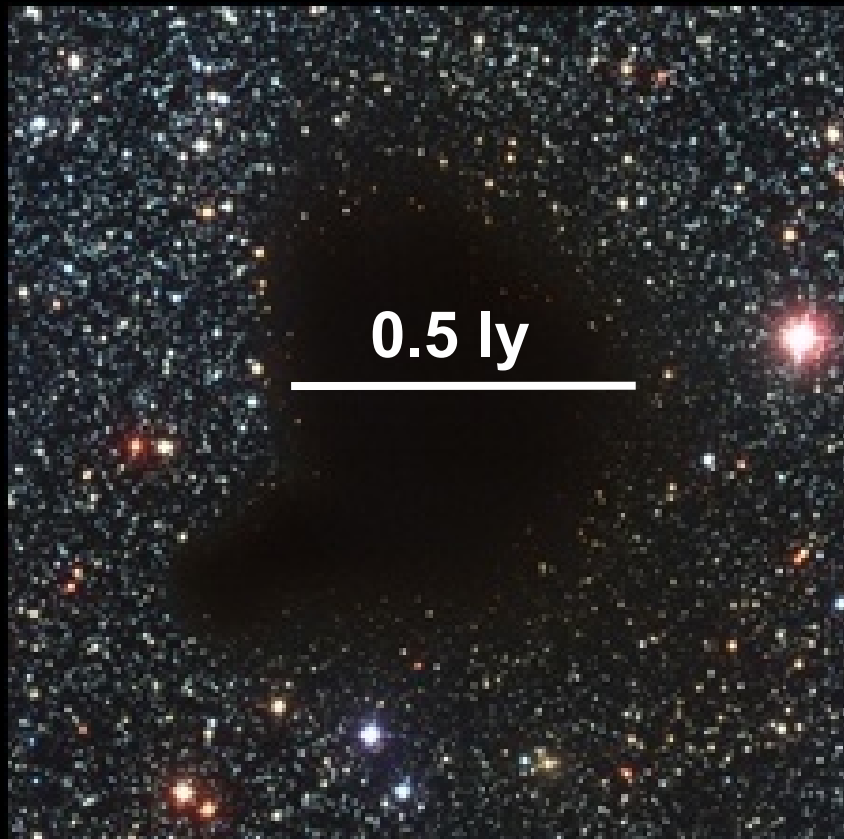
6 ויאמר אלהים יהי רקיע בתוך המים ויהי מבדיל בין מים
7 למים: ויעש אלהים את-הרקיע ויבדל בין המים אשר מתחת
8 לרקיע ובין המים אשר מעל לרקיע ויהי-כן: ויקרא אלהים
לרקיע שמים ויהי-ערב ויהי-בקר יום שני:

9 ויאמר אלהים יקוו המים מתחת השמים אל-מקום אחד ותראה
10 היבשה ויהי-כן: ויקרא אלהים ליבשה ארץ ולמקוה המים
11 קרא ימים וירא אלהים כי-טוב: ויאמר אלהים תדשא הארץ
דשא עשב מזריע זרע עץ פרי עשה פרי למיננו אשר זרעו-בו
12 על-הארץ ויהי-כן: ותוצא הארץ דשא עשב מזריע זרע למינהו
ועץ עשה-פרי אשר זרעו-בו למינהו וירא אלהים כי-טוב:
13 ויהי-ערב ויהי-בקר יום שלישי

Pathway from atoms in space to life on Earth is full of unknowns



Pathway from atoms in space to life on Earth is full of unknowns



How far did interstellar chemistry take us on this pathway towards life?

The interstellar medium exhibits a rich chemistry

200+ molecules have been found.

3/4^{ths} contain carbon (C).

Interstellar chemistry is organic in nature.

There's water there too.

Species	Mass	Species	Mass	Species	Mass	Species	Mass
H ₂	2	NO	30	HOCO ⁺	45	CH ₃ CONH ₂	59
H ₃ ⁺	3	CF ⁺	31	NH ₂ CHO	45	HNCS	59
CH	13	CH ₃ NH ₂	31	PN	45	C ₅	60
CH ⁺	13	H ₃ CO ⁺	31	AlF	46	CH ₂ OHCHO	60
CH ₂	14	HNO	31	C ₂ H ₅ OH	46	CH ₃ COOH	60
CH ₃	15	CH ₃ OH	32	CH ₃ OCH ₃	46	HCOOCH ₃	60
NH	15	SiH ₄	32	H ₂ CS	46	OCS	60
CH ₄	16	HS	33	HCOOH	46	SiS	60
NH ₂	16	HS ⁺	33	NS	46	C ₅ H	61
NH ₃	17	H ₂ S	34	CH ₃ SH	48	AlCl	62
OH	17	H ₂ S ⁺	34	SO	48	HOCH ₂ CH ₂ OH	62
OH ⁺	17	C ₃	36	SO ⁺	48	HC ₄ N	63
H ₂ O	18	HCl	36	C ₄ H	49	CH ₃ C ₄ H	64
H ₂ O ⁺	18	c-C ₃ H	37	C ₄ H ⁻	49	S ₂	64
NH ₄ ⁺	18	l-C ₃ H	37	NaCN	49	SiC ₃	64
H ₃ O ⁺	19	c-C ₃ H ₂	38	C ₃ N	50	SO ₂	64
HF	20	H ₂ CCC	38	H ₂ CCCC	50	CH ₂ CCHCN	65
C ₂	24	HCCN	39	HCCCCH	50	CH ₃ C ₃ N	65
C ₂ H	25	C ₂ O	40	MgCN	50	C ₃ S	68
C ₂ H ₂	26	CH ₂ CN	40	MgNC	50	FeO	72
CN	26	CH ₃ CCH	40	HC ₃ N	51	C ₆ H	73
CN ⁺	26	SiC	40	HCCNC	51	C ₆ H ⁻	73
HCN	27	CH ₃ CN	41	HNCCC	51	C ₅ N	74
HNC	27	CH ₃ NC	41	c-SiC ₂	52	C ₆ H ₂	74
C ₂ H ₄	28	H ₂ CCO	42	C ₃ O	52	HCCCCCCH	74
CO	28	NH ₂ CN	42	H ₂ C ₃ N ⁺	52	HC ₅ N	75
CO ⁺	28	SiN	42	AlNC	53	KCl	75
H ₂ CN	28	CP	43	CH ₂ CHCN	53	NH ₂ CH ₂ COOH	75
HCNH ⁺	28	HNCO	43	c-H ₂ C ₃ O	54	SiC ₄	76
N ₂ ⁺	28	HNCO ⁻	43	HC ₂ CHO	54	C ₆ H ₆	78
CH ₂ NH	29	c-C ₂ H ₄ O	44	SiCN	54	C ₇ H	85
HCO	29	CH ₃ CHO	44	SiNC	54	CH ₃ C ₆ H	88
HCO ⁺	29	CO ₂	44	CH ₃ CH ₂ CN	55	C ₈ H	97
HN ₂ ⁺	29	CO ₂ ⁺	44	C ₂ S	56	C ₈ H ⁻	97
HOC ⁺	29	CS	44	C ₃ H ₄ O	56	HC ₇ N	99
SiH	29	N ₂ O	44	CH ₃ CH ₂ CHO	58	HC ₉ N	123
CH ₃ CH ₃	30	SiO	44	CH ₃ COCH ₃	58	HC ₁₁ N	147
H ₂ CO	30	HCS ⁺	45	NaCl	58		

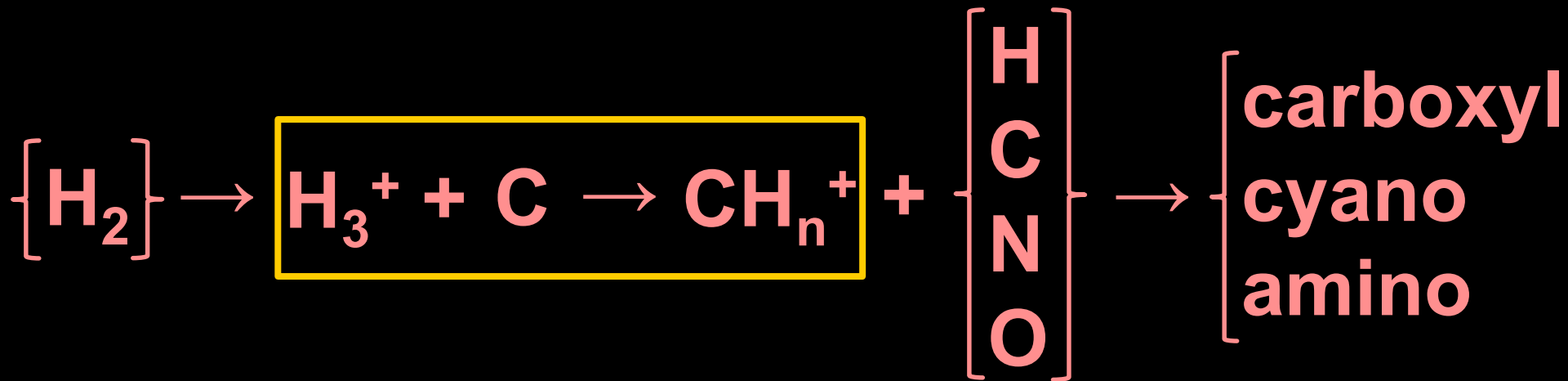
Source: astrochemistry.net

Some gas-phase pathways for forming the chemicals needed for life

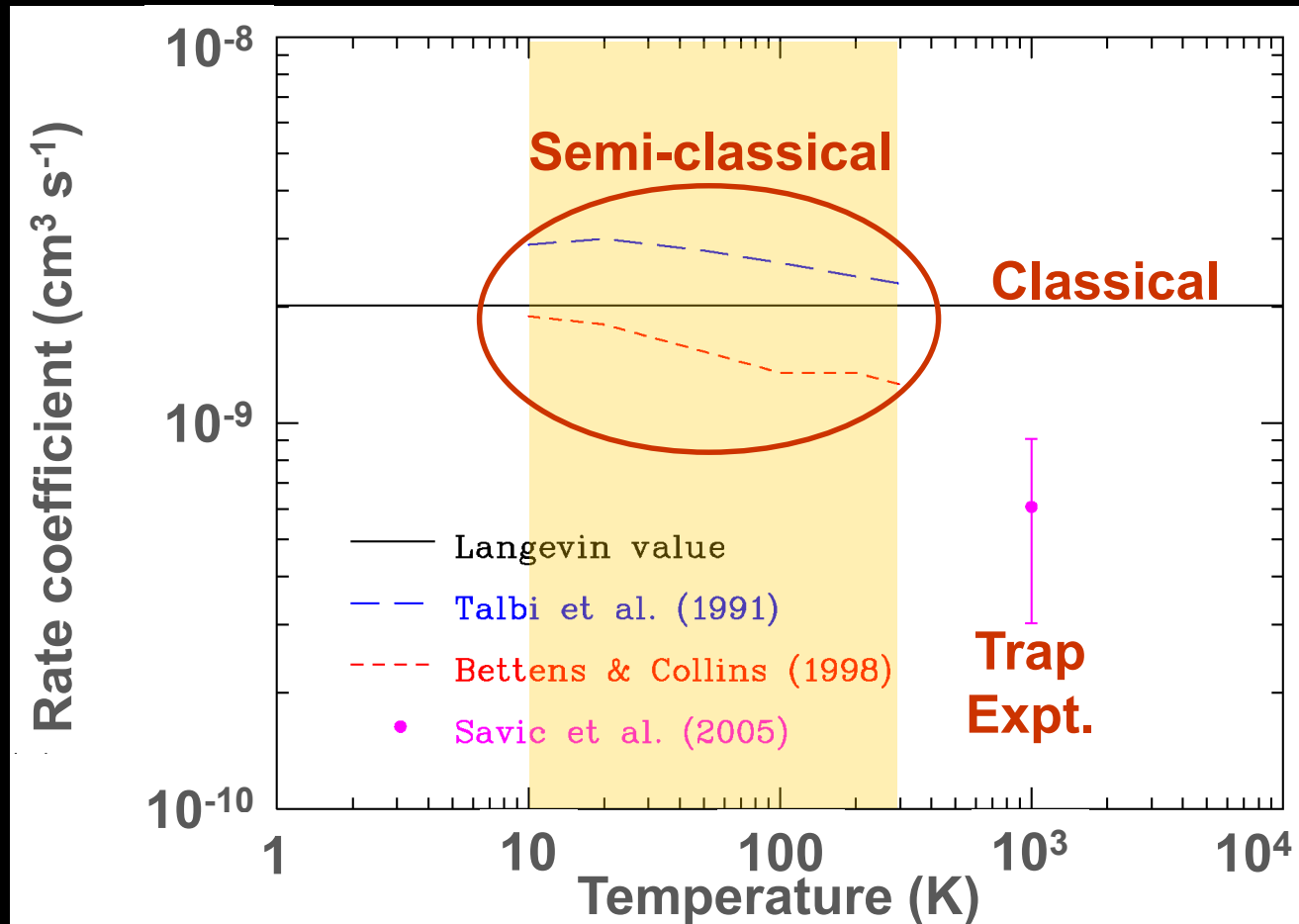
Conditions in dense molecular clouds:

$$n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$T_{\text{gas}} \sim 10 \text{ K}$$



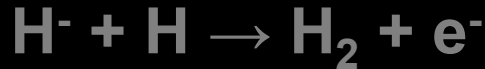
Published kinetics of $\text{C} + \text{H}_3^+ \rightarrow \text{CH}^+ + \text{H}_2$



QM calc's beyond current theoretical abilities.
No lab data exist at molecular cloud temperatures.
Over factor of 2 uncertainty in the rate coefficient.

Outline

Let there be light

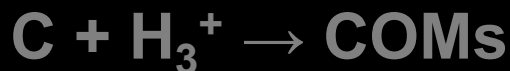


Motivation

D1 Experiment

Results

Let there be life



Motivation

D3 Experiment

Results

ס בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ: והארץ היתה חֲלָה
תהו ובהו וחשך על־פני תהום ורוח אלהים מרחפת על־פני
המים:

3 וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים יְהִי אור וַיְהִי־אור
4 כִּי־טוֹב וַיִּבְרָא אֱלֹהִים בֵּין הָאור וּבֵין הַחֹשֶׁךְ: וַיִּקְרָא אֱלֹהִים לְאור
5 יוֹם וְלַחֹשֶׁךְ קָרָא לַיְלָה וַיְהִי־עֶרֶב וַיְהִי־בֹקֶר יוֹם אֶחָד

6 וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים יְהִי רָקִיעַ בְּתוֹךְ הַמַּיִם וַיְהִי מַבְדִּיל בֵּין מַיִם
7 לְמַיִם: וַיַּעַשׂ אֱלֹהִים אֶת־הַרְקִיעַ וַיִּבְרָא בֵּין הַמַּיִם אֲשֶׁר מִתַּחַת
8 לְרָקִיעַ וּבֵין הַמַּיִם אֲשֶׁר מֵעַל לְרָקִיעַ וַיְהִי־כֵן: וַיִּקְרָא אֱלֹהִים
לְרָקִיעַ שָׁמַיִם וַיְהִי־עֶרֶב וַיְהִי־בֹקֶר יוֹם שֵׁנִי:

9 וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים יִקּוּוּ הַמַּיִם מִתַּחַת הַשָּׁמַיִם אֶל־מְקוֹם אֶחָד וְתִרְאֶה
10 הַיִּבְשָׁה וַיְהִי־כֵן: וַיִּקְרָא אֱלֹהִים לַיִּבְשָׁה אֶרֶץ וּלְמַקְוֵה הַמַּיִם
11 קָרָא יַמִּים וַיִּבְרָא אֱלֹהִים כִּי־טוֹב: וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים תְּדַשָּׂא הָאָרֶץ
דָּשָׂא עֵשֶׂב מְזֵרִיעַ וְרֹעַ עֵץ פָּרִי עֵשֶׂה פְּרִי לְמִינֹו אֲשֶׁר וְרֵעִי־בו
12 עַל־הָאָרֶץ וַיְהִי־כֵן: וַתּוּצֵא הָאָרֶץ דָּשָׂא עֵשֶׂב מְזֵרִיעַ וְרֹעַ לְמִינֵהוּ
וְעֵץ עֵשֶׂה־פְּרִי אֲשֶׁר וְרֵעִי־בו לְמִינֵהוּ וַיִּבְרָא אֱלֹהִים כִּי־טוֹב:
13 וַיְהִי־עֶרֶב וַיְהִי־בֹקֶר יוֹם שְׁלִישִׁי

We have built an apparatus to study



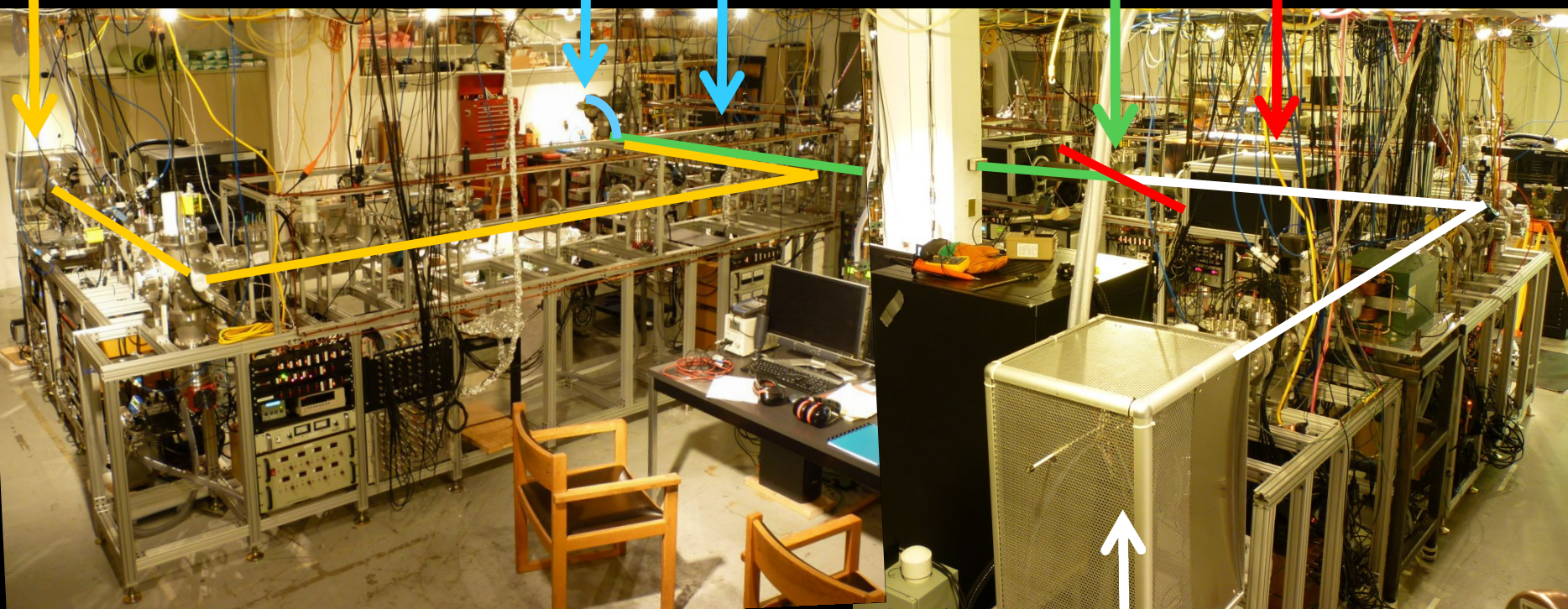
H_3^+ source

Signal

Chemistry

C beam

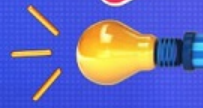
Laser



C⁻ source

IT'S
QUIZ

TIME



How much did this cost?

A) \$1,000,000

B) \$2,000,000

C) \$4,000,000

D) \$8,000,000

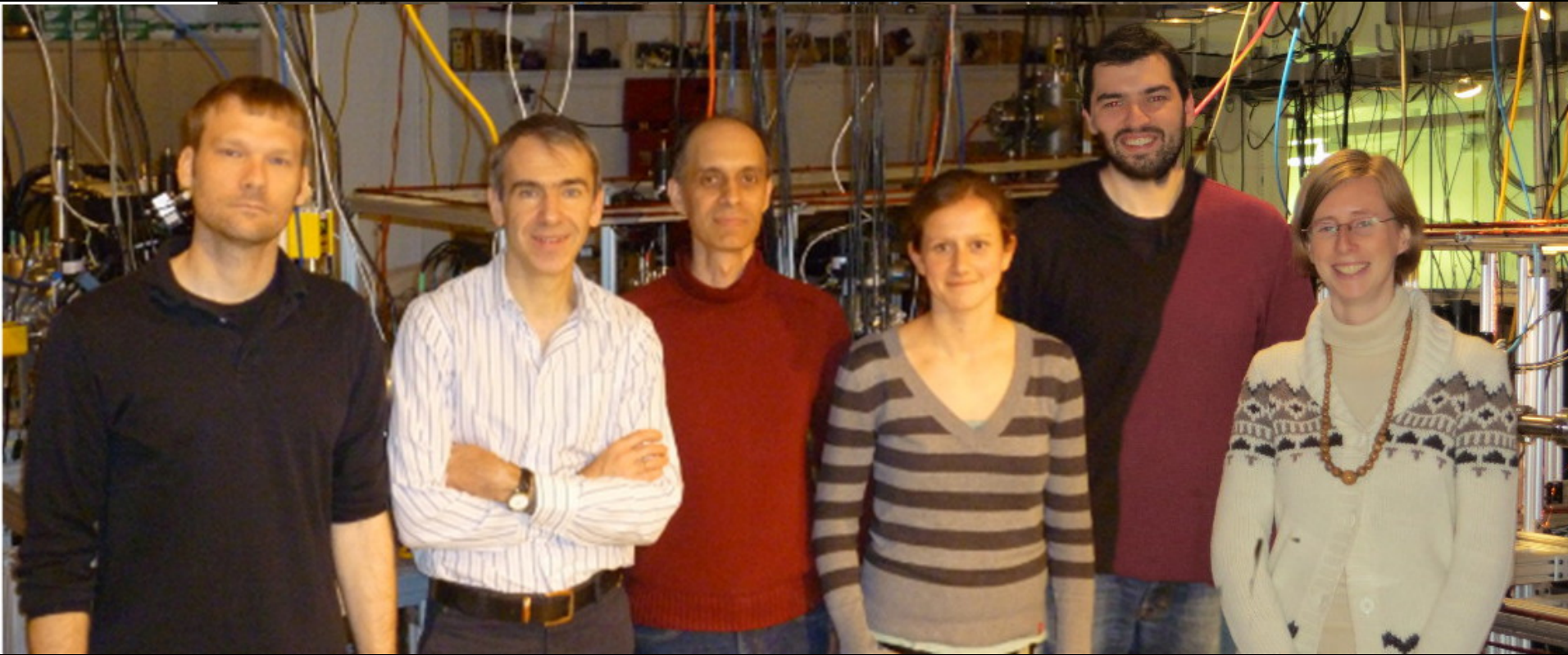


How much did this cost?

B) \$1,999,242



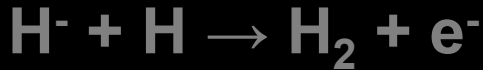
The Team Members



Ken Miller, X. Urbain, DWS, Jule Stützel, A. O'Connor, Nathalie de Ruelle

Outline

Let there be light

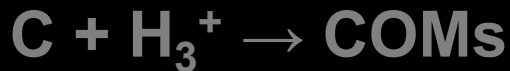


Motivation

D1 Experiment

Results

Let there be life



Motivation

D3 Experiment

Results

ס בראשית ברא אלהים את השמים ואת הארץ: והארץ היתה ריקה ובהו וחסך על-פני תהום ורוח אלהים מרחפת על-פני המים:

3 ויאמר אלהים יהי אור ויהי-אור

4 כי-טוב ויבדל אלהים בין האור ובין החשך: ויקרא אלהים לאור

5 יום ולחשך קרא לילה ויהי-ערב ויהי-בקר יום אחד

6 ויאמר אלהים יהי רקיע בתוך המים ויהי מבדיל בין מים

7 למים: ויעש אלהים את-הרקיע ויבדל בין המים אשר מתחת

8 לרקיע ובין המים אשר מעל לרקיע ויהי-כן: ויקרא אלהים

לרקיע שמים ויהי-ערב ויהי-בקר יום שני:

9 ויאמר אלהים יקוו המים מתחת השמים אל-מקום אחד ותראה

10 היבשה ויהי-כן: ויקרא אלהים ליבשה ארץ ולמקוה המים

11 קרא ימים וירא אלהים כי-טוב: ויאמר אלהים תדשא הארץ

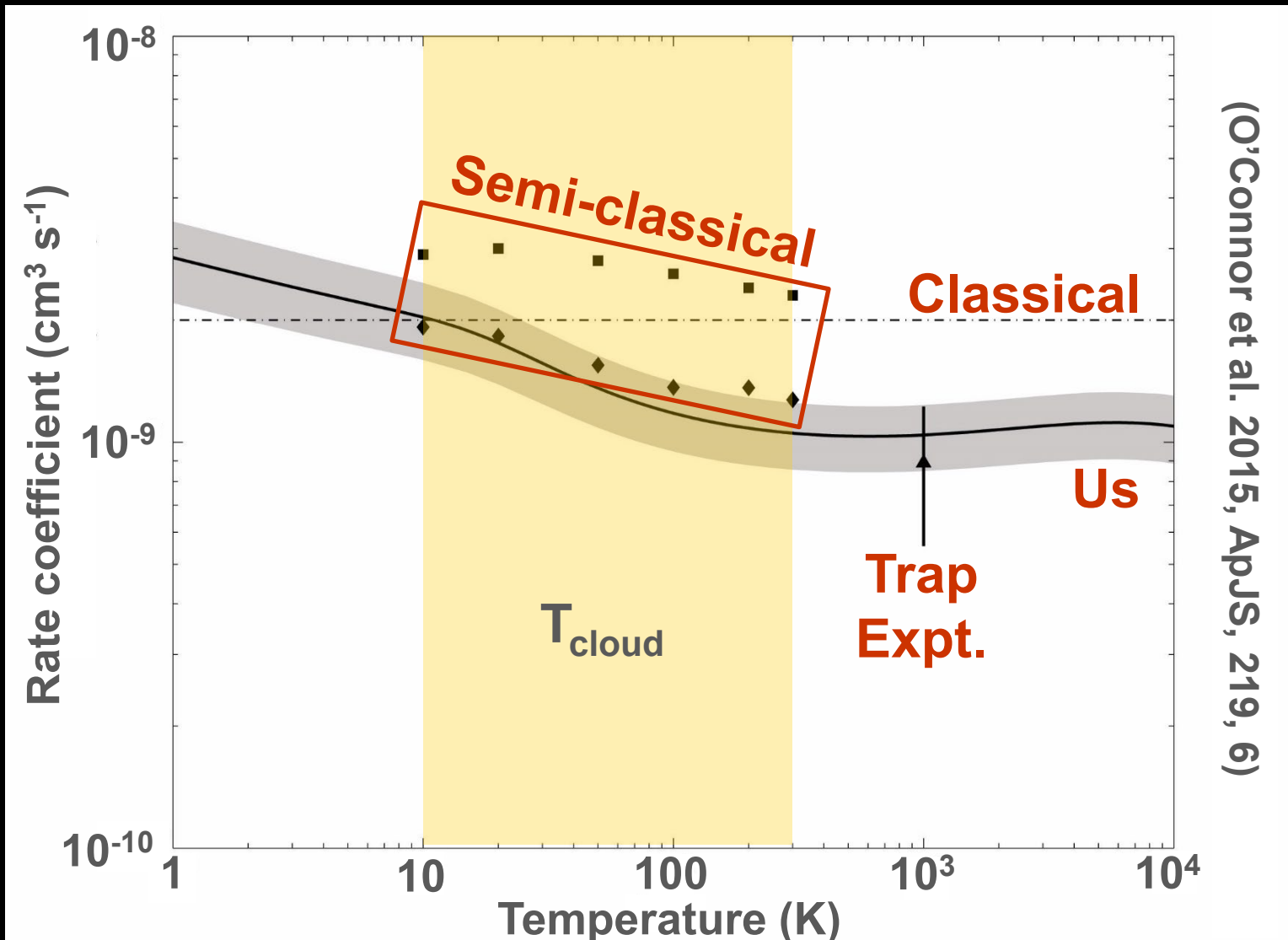
12 דשא עשב מזריע זרע עץ פרי עשה פרי למיננו אשר זרעו-בו

13 על-הארץ ויהי-כן: ותוצא הארץ דשא עשב מזריע זרע למינהו

ועץ עשה-פרי אשר זרעו-בו למינהו וירא אלהים כי-טוב:

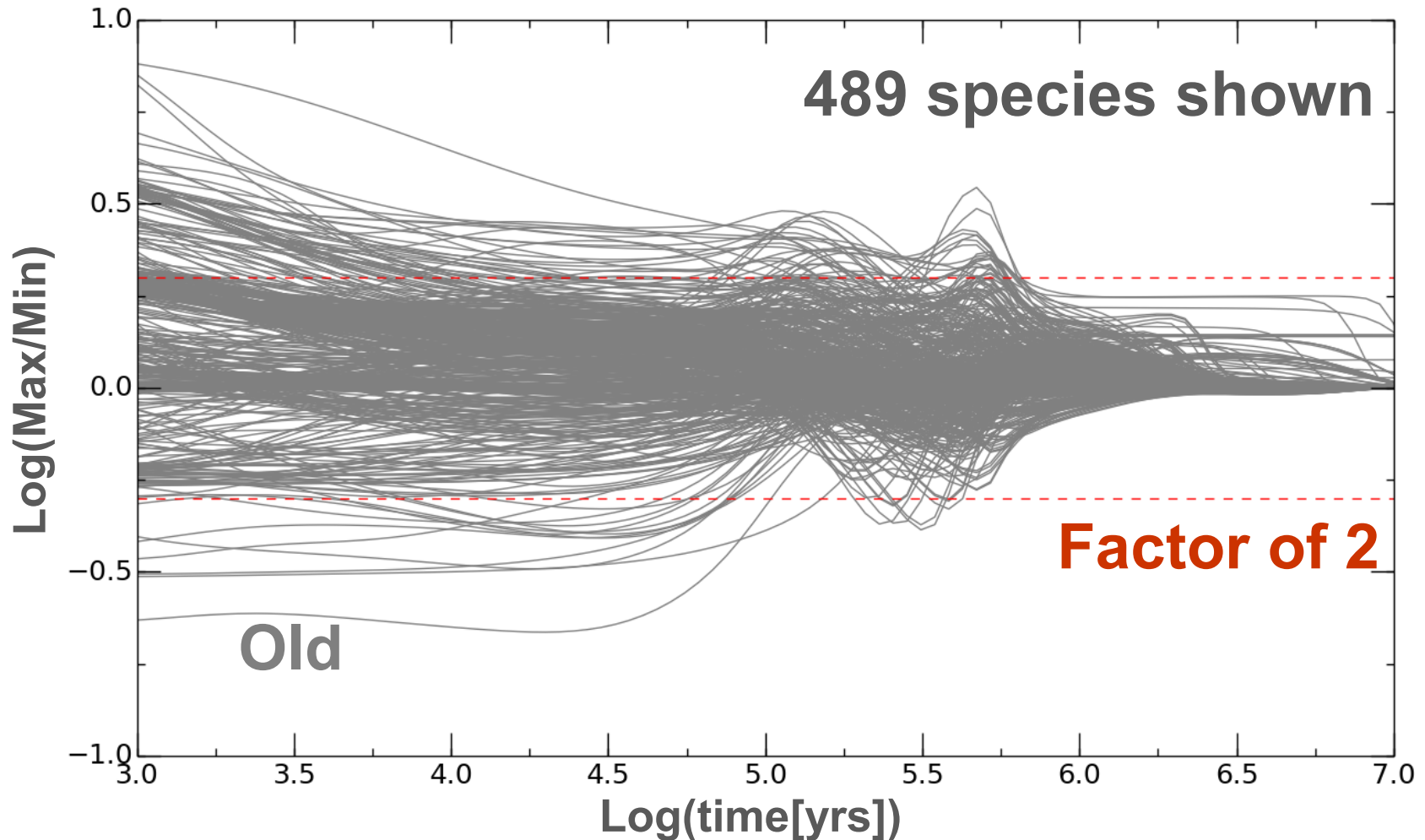
ויהי-ערב ויהי-בקר יום שלישי

C + H₃⁺ summed thermal rate coefficients



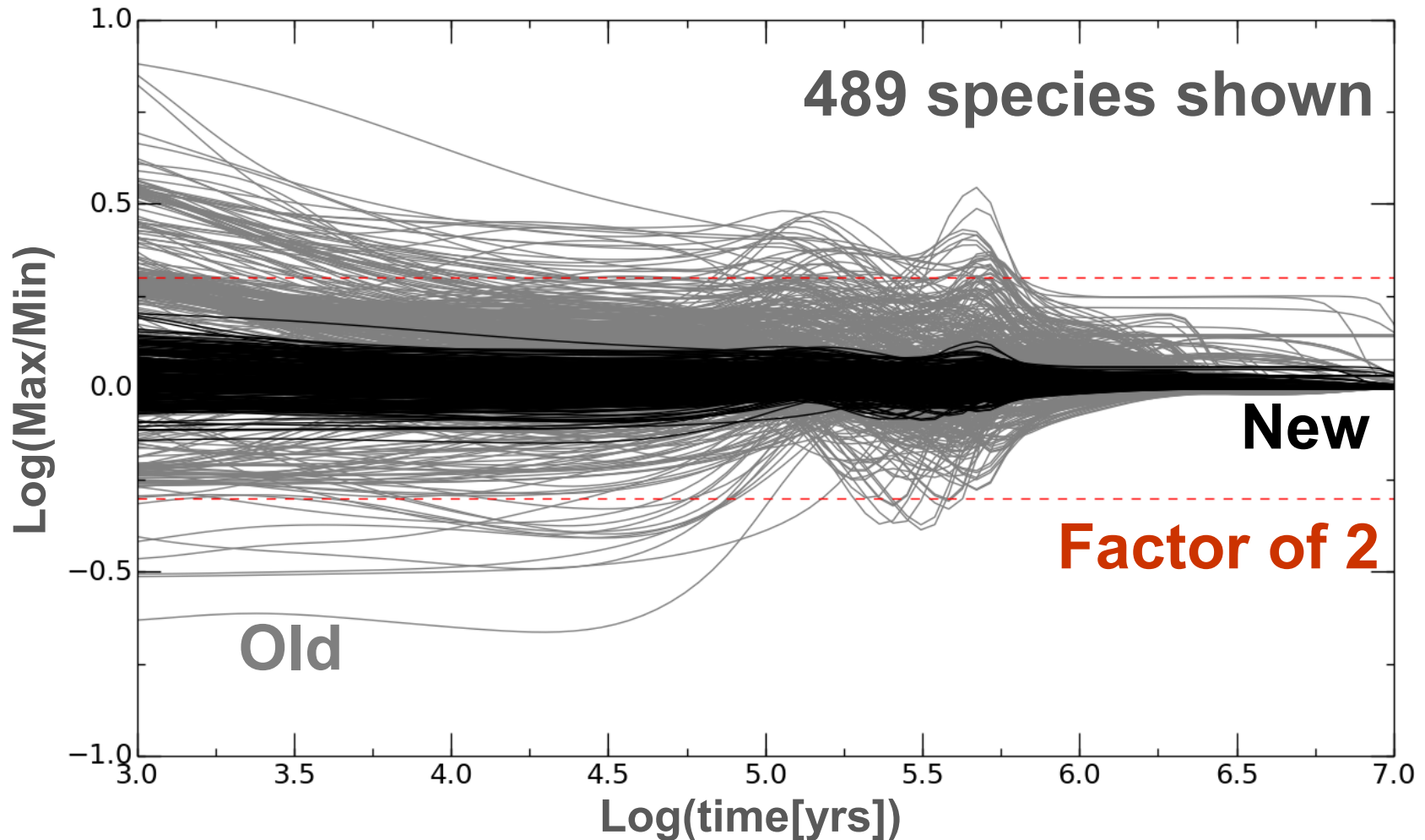
Reduced uncertainty from factor of >2 to <20%.

New C + H₃⁺ data reduces abundance uncertainties in astrochemical models



(Vissapragada et al. 2016, ApJ, 832, 31)

New C + H₃⁺ data reduces abundance uncertainties in astrochemical models



(Vissapragada et al. 2016, ApJ, 832, 31)

Conclusions

- We have performed the first energy dependent measurements for the $\text{H}^- + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$ reaction.
- Our results will improve cosmological models for protogalaxy and first star formation.
- Have developed a new apparatus to study astrochemical reactions with atomic D, C, and O.
- We have measured $\text{C} + \text{H}_3^+$, $\text{O} + \text{H}_3^+$, as well as $\text{D} + \text{H}_3^+/\text{H}_2\text{D}^+/\text{D}_2\text{H}^+$.
- Results improve our understanding of the chemical evolution of the cosmos.

Thanks for your attention.