A Brief History of Chemistry in the Cosmos

> Daniel Wolf Savin Columbia University



# Outline

Let there be light  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ Motivation D1 Experiment Results

Let there be life  $C + H_3^+ \rightarrow COMs$ Motivation D3 Experiment Results ם בְּרֵאשִׁית בָּרָא אֵלהֵים אֵת הַשְׁמָיִם וְאֵת הָאָרָץ: וְהָאָׂרָץ הֵיְתָה אֵ תֹהוֹ וָבֹהוּ וְחָשֶׁךְ עַל־פְּגֵי תְהָוֹם וְרַוּחַ אֱלהִים מְרַחֶפֶת עַל־פְּגֵי הַמֵּיִם:

<sup>3</sup> <u>ווּאמֶר אֱלהֶים יְהֵי</u> אֶוֹר ווְהִי־אָוֹר ווַיָּרָא אֲלהָים אֶת־הָאוֹר פִּי־מֵוֹב וַיַּרְהֵל אֱלהִים בִּין הָאוֹר וּבֵון הַחְשֶׁך: וַיְקָרָא אֱלהַים אָת־הָאוֹר יוֹם וְלַחָשֶׁך כָּרָא לֵיְלָה וֵיְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָּקֶר ווֹם אֶחָר

זַיָּאֶמֶר אֲלֹהִים יְהֵי רָקִיעַ בְּתֵוּךְ הַמֵּיִם וִיהֵי מַבְהִיל בֵּין מָיִם 6 לְמָיִם: וַיַעַש אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בֵּין הַמָּיִם אֲשֶׁר מִתַּחַת 7 לְרָקִיעַ וּבֵין הַמַּיִם אֲשֶׁר מַעַל לְרָקֵיעַ ווֵיִהִיבֵן: וַיִּקְרָא אֵלהִים 8 לְרָקִיעַ שָׁמֵים וֵיְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָקָר יוֹם שֵׁנִי:

9	וַיָּאמֶר אֶלהִים יִקְוּוּ הַמֵּיִם מִתַּחַת הַשְׁמִים אֶל־מְקוֹם אֶחָר וְתָרָאֶה
10	היבשה ויהייכו: ויהרא אלהים וליבשה ארץ ולמקוה המים
11	קָרָא יַמֶּים וַיָּרָא אֶלהָים כִּי־מִוֹב: וַיָּאמֶר אֶלהִים תַּרְשָׁא הָאָרָץ
	דָּשָׁא עַשָּב מַוְרִיעַ זָּרַע עֵיץ פִּרִי עַשָּה פִּרִי לְמִינוֹ אֲשֶׁר וַרְעוּ־בָו
12	עליקאָרָץ ווְהִי־בֵן: וַתּוֹצָא הָאָרָץ דֶּשָּׁא עֵשָׁב מַזְרָיע וָרַע לְמִינָׁהוּ
	וְעַאַ עְשֶׁה־פְּרֵי אֲשֶׁר וַרְעוֹ־בָוֹ לְמִיגָהוּ וַיַּרָא אֱלהָים כִּי־מִוֹב:
13	וידויערב וידי-לרר יום שלישי

# Science is answering questions that humanity has pondered for millennia.



# Outline

Let there be light  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ Motivation D1 Experiment Results

Let there be life  $C + H_3^+ \rightarrow COMs$ Motivation D3 Experiment Results ם בְּרֵאשִׁית בָּרָא אֵלהָים אֵת הַשְׁמָיִם וְאֵת הָאָרָץ: וְהָאָׁרָץ הֵיְתָה אֵ תֹהוֹ וָבֹהוּ וְהָשֶׁךְ עַל־פְּגֵי תְהָוֹם וְרַוּהַ אֵלהִים מְרַחֶפָת עַל־פְּגֵי הַמֵּיִם:

<sup>6</sup> וַיָּאֶמֶר אֲלֹהִים יְהֵי רָקִיעַ בְּתֵוֹךְ הַמֵּיִם וִיהֵי מַבְהִיל בֵּין מֻיִם <sup>6</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בֵּיָן הַמֵּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בְּיָן הַמָּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְרָקִיעַ וּבֵין הַמַּיִם אֲשֶׁר מַעַל לְרָקִיעַ וַיִרִיבֵן: וַיִּקְרָבָא אֲלֹהִים <sup>8</sup>
לְרָקִיעַ שְׁמֵים וַיְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָקָר יוֹם שֵׁנִי:

וַיָּאמֶר אָלהום יָקָוּוּ הַמֵּיִם מתַּחַת הַשָּׁמִים אֶל־מָקום אָחָר וִתָרָאָה 9
היבשה ויהי-כז: ויהרא אלהים וליבשה ארץ ולמקוה המים 10
קרא יַמֶּים וַיַרָא אֶלהָים כִּי־מִוֹב: וַיָּאמֶר אֱלהִים תַּרְשָׁא הָאָרָץ 11
דּשָׁא עַשָּב מַזְרֵיעַ זָּרַע עַיָץ פִּרִי עַשָּה פָּרִי לְמִינוֹ אָשָׁר וַרְעוּ־בָו
על־הָאָרָץ ווְהִי־כֵן: וַתּוֹצָא הָאָרָץ דֶּשָׁא עֵשֶׁב מַזְרָיעַ וָּרֵע לְמִינֶׁדוּ
ועא עשה־פּרָי אַשֶׁר וַרְעוֹ־בָוֹ לְמִיגָהוּ וַיַרָא אֵלהָים בּי־מִוֹב:
ויהי־ערב ויהי־בקר יום שלישי

#### Structure formation in the early universe



#### How H<sub>2</sub> radiatively cools the gas down to temperature of T ~ 200 K



H<sub>2</sub> Formation during Epoch of Protogalaxy and First Star Formation

**Associative detachment (AD)** 

#### $H^{-} + H \rightarrow H_{2} + e^{-}$

This was not well understood before we started.

#### Published kinetics for $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$



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:

$$M_{\rm J} \propto \frac{T^{3/2}}{\sqrt{n}}$$

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  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^$ rate coefficient.
- $M_{\rm J} \propto T^{3/2} n^{-1/2}$
- *M*<sub>J</sub> uncertain by factor of 20.



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

# Outline

Let there be light  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ Motivation D1 Experiment Results

Let there be life  $C + H_3^+ \rightarrow COMs$ Motivation D3 Experiment Results ם בְּרֵאשִׁית בָּרָא אֵלהָים אֵת הַשְׁמָיִם וְאֵת הָאָרָץ: וְהָאָׁרָץ הֵיְתָה אֵ תֹהוֹ וָבֹהוּ וְהָשֶׁךְ עַל־פְּגֵי תְהָוֹם וְרַוּהַ אֵלהִים מְרַחֶפָת עַל־פְּגֵי הַמֵּיִם:

<sup>3</sup> <u>ווּאַמֶר אֱלֹהֶים יְהֵי</u> אֶוֹר ווְהִי־אָוֹר ווַיִרָא אֲלֹהָים אֶת־הָאוֹר קי־מֵוֹב וַיַּרְהֵל אֱלֹהִים בָּין הָאוֹר וּבֵון הַחְשֶׁך: וַיְקָרָא אֱלֹהַים וּלָאוֹר יוֹם וְלַחָשֶׁך כָּרָא לֵיְלָה וֵוְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָּקֶר ווֹם אֶחָר

<sup>6</sup> וַיָּאֶמֶר אֲלֹהִים יְהֵי רָקִיעַ בְּתֵוֹךְ הַמֵּיִם וִיהֵי מַבְהִיל בֵּין מֻיִם <sup>6</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בֵּיָן הַמֵּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בְּיָן הַמָּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְרָקִיעַ וּבֵין הַמַּיִם אֲשֶׁר מַעַל לְרָקִיעַ וַיִרִיבֵן: וַיִּקְרָבָא אֲלֹהִים <sup>8</sup>
לְרָקִיעַ שְׁמֵים וַיְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָקָר יוֹם שֵׁנִי:

הַשְׁמִיִם אָל־מָכַוֹם אָחָד וִתָרָאָה 9	וַיָּאמֶר אֶלהום יָקָוּוּ הַמַּיִם מִתַּחַת
ון ליבשה ארץ ולמקוה המים 10	היבשה ויהי־כז: ויהרא אלהים
ניאמר אָלהים תַּדְשָׁא הָאָנָץ 11	כָרָא יַמֶּים וַיָּרָא אֶלֹדָים כִּי־טִיב:
עַשָּׁה פָּרִי` לְמִינוֹ אֲשָׁרַ וַרְעוֹ־בָו	דָּשָׁא עַשָּב מַזְרֵיעַ זְרַע עַיָץ פּרִי
ן אָשָׁא אַשֶׁב מַזְרֵיעַ וָרַע לְמִינֶׁדוּ 12	על־הָאָרָץ ווֵהִי־כֵן: וַתּוֹצָא הָאָרָץ
<u>קמינהו ויָרָא א</u> ָלהָים בּי־מּוֹב:	ועא עשה־פּרָי אַשֶׁר זַרְעוֹ־בָוֹ
13	ויהי־ערב ויהי־במר יום שלישי

## The apparatus the day after first signal





#### How much did this cost?



# How much did this cost?



#### **The Team Members**



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

# Outline

Let there be light  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ Motivation D1 Experiment Results

Let there be life  $C + H_3^+ \rightarrow COMs$ Motivation D3 Experiment Results ם בְּרֵאשִׁית בָּרָא אֵלהֶים אֵת הַשְׁמָיִם וְאֵת הָאָרָשְ: וְהָאָׁרָשְ הֵיְתָה אֵ תֹהוֹ וָבֹהוּ וְחָשֶׁךְ עַל־פְּגֵי תְהָוֹם וְרַוּהַ אֱלהִים מְרַחֶפֶת עַל־פְּגֵי הַמֵּיִם:

<sup>6</sup> וַיָּאֶמֶר אֲלֹהִים יְהֵי רָקִיעַ בְּתֵוֹךְ הַמֵּיִם וִיהֵי מַבְהִיל בֵּין מֻיִם <sup>6</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בֵּיָן הַמֵּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בְּיָן הַמָּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְרָקִיעַ וּבֵין הַמַּיִם אֲשֶׁר מַעַל לְרָקִיעַ וַיִרִיבֵן: וַיִּקְרָבָא אֲלֹהִים <sup>8</sup>
לְרָקִיעַ שְׁמֵים וַיְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָקָר יוֹם שֵׁנִי:

הַשְּׁמִיִם אָל־מָכָוֹם אָחָד וְתָרָאָה 9	וַיָּאמֶר אֶלהום יָקָוּוּ הַמַּיִם מִתַּחַת ו
ון ליבשה ארץ ולמקוה המים 10	היבשה ויהי־כז: ויקרא אלהים
ניאמר אָלהים תַּדְשֵׁא הָאָׂרָץ 11	כָרָא יַמֶּים וַיָּרָא אֶלדָים כִּי־מִוֹב:
עַשָּׁה פְּרִי` לְמִינוֹ אֲשָׁרַ וַרְעוֹ־בָו	דָּשָׁא עַשָּב מַזְרַיע זָרַע עַיָן פּרִי
<sup>12</sup> געשב מוריע גרע למיגרו	עַל־הָאָָרָץ ווֵהִי־כֵן: וַתּוֹצָא הָאָרָץ
לְמִיגָהוּ וַיָּרָא אֶלהָים בּּי־מָו <b>ב:</b>	ועא עשה־פּרָי אַשֶׁר זַרְעוֹ־בָוֹ
13	ויהי־ערב ויהי־במר יום שלישי

#### Kinetics data for $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$



#### **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 ±25% uncert.
- *M*<sub>J</sub> uncertainty goes from 20 to 2!



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

## **Questions on First Half of Talk?**

# Outline

Let there be light  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ Motivation D1 Experiment Results

Let there be life  $C + H_3^+ \rightarrow COMs$ Motivation D3 Experiment Results ם בְּרֵאשִׁית בָּרָא אֵלהֻים אֵת הַשְׁמָיִם וְאֵת הָאָרָץ: וְהָאָׁרָץ הֵיְתָה אֵ תֹהוֹ וָבֹהוּ וְהָשֶׁךְ עַל־פְּגֵי תְהָוֹם וְרַוּהַ אֵלהִים מְרַחֶפֶת עַל־פְּגֵי הַמֵּיִם:

<sup>3</sup> <u>ווּאַמֶר אֱלֹהֶים יְהֵי</u> אֶוֹר ווְהִי־אָוֹר ווַיִרָא אֲלֹהָים אֶת־הָאוֹר קי־מֵוֹב וַיַּרְהֵל אֱלֹהִים בָּין הָאוֹר וּבֵון הַחְשֶׁך: וַיְקָרָא אֱלֹהַים וּלָאוֹר יוֹם וְלַחָשֶׁך כָּרָא לֵיְלָה וֵוְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָּקֶר ווֹם אֶחָר

<sup>6</sup> וַיָּאֶמֶר אֲלֹהִים יְהֵי רָקִיעַ בְּתֵוֹךְ הַמֵּיִם וִיהֵי מַבְהִיל בֵּין מֻיִם <sup>6</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בֵּיָן הַמֵּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְמָיִם: וַיַּעֲשׁ אֲלֹהִים אֶת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בְּיָן הַמָּיִם אָשֶׁר מִתַּחַת <sup>7</sup>
לְרָקִיעַ וּבֵין הַמַּיִם אֲשֶׁר מַעַל לְרָקִיעַ וַיִרִיבֵן: וַיִּקְרָבָא אֲלֹהִים <sup>8</sup>
לְרָקִיעַ שְׁמֵים וַיְהִי־עֶרֶב ווֵהִי־בָקָר יוֹם שֵׁנִי:

הַשְׁמִים אָל־מָקום אָחָד ותָרָאָה 9	וַיָּאמֶר אֶלהום יָקָוּוּ הַמַּיִם מִתַּחַת ו
ון ליבשה ארץ ולמקוה המים 10	היבשה ויהי־כז: ויקרא אלהים
ניאמר אָלהים תַּדְשָׁא הָאָנָץ 11	כָרָא יַמֶּים וַיָּרָא אֶלֹדָים כִּי־מִוֹב:
עַשָּׁה פְּרִי` לְמִינוֹ אֲשָׁרַ וַרְעוֹ־בָו	דָּשָׁא עַשָּב מַזְרַיע זָרַע עַיָן פּרִי
<sup>12</sup> אַשָּׁא אַשָּׁב מַזְרֵיעַ וָרַע לְמִינֶׁדוּ	עַל־הָאָָרָץ ווֵהִי־כֵן: וַתּוֹצָא הָאָרָץ
לְמִיגָהוּ וַיָּרָא אֶלהָים בּּי־מָו <b>ב:</b>	ועא עשה־פּרָי אַשֶׁר זַרְעוֹ־בָוֹ
13	ויהי־ערב ויהי־במר יום שלישי

#### 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<sup>ths</sup> contain carbon (C).
- Interstellar chemistry is organic in nature.
- There's water there too.

Species	Mass	Species	Mass	Species	Mass	Species	Mass
H <sub>2</sub>	2	NO	30	HOCO <sup>+</sup>	45	$\rm CH_3 \rm CONH_2$	59
$H_3^+$	3	$\mathrm{CF}^+$	31	$\rm NH_2CHO$	45	HNCS	59
CH	13	$\mathrm{CH}_3\mathrm{NH}_2$	31	PN	45	$C_5$	60
$\mathrm{CH}^+$	13	$\rm H_3CO^+$	31	AlF	46	CH <sub>2</sub> OHCHO	60
$CH_2$	14	HNO	31	$C_2H_5OH$	46	CH <sub>3</sub> COOH	60
$CH_3$	15	$\mathrm{CH}_3\mathrm{OH}$	32	$\rm CH_3OCH_3$	46	HCOOCH <sub>3</sub>	60
NH	15	$\mathrm{SiH}_4$	32	$H_2CS$	46	OCS	60
$\mathrm{CH}_4$	16	HS	33	HCOOH	46	SiS	60
$\rm NH_2$	16	$\mathrm{HS^{+}}$	33	NS	46	$C_5H$	61
$\mathrm{NH}_3$	17	$H_2S$	34	$\rm CH_3SH$	48	AlCl	62
OH	17	$H_2S^+$	34	SO	48	$\mathrm{HOCH}_2\mathrm{CH}_2\mathrm{OH}$	62
$OH^+$	17	$C_3$	36	$SO^+$	48	$\mathrm{HC}_4\mathrm{N}$	63
$H_2O$	18	HCl	36	$C_4H$	49	$\mathrm{CH}_3\mathrm{C}_4\mathrm{H}$	64
$H_2O^+$	18	$c-C_3H$	37	$C_4H^-$	49	$S_2$	64
$\mathrm{NH_4}^+$	18	$l-C_3H$	37	NaCN	49	$ m SiC_3$	64
$H_3O^+$	19	$c-C_3H_2$	38	$C_3N$	50	$SO_2$	64
$_{ m HF}$	20	$H_2CCC$	38	$H_2CCCC$	50	$\rm CH_2 \rm CCHCN$	65
$C_2$	24	HCCN	39	HCCCCH	50	$\mathrm{CH}_3\mathrm{C}_3\mathrm{N}$	65
$C_2H$	25	$C_2O$	40	MgCN	50	$C_3S$	68
$C_2H_2$	26	$\rm CH_2 \rm CN$	40	MgNC	50	FeO	72
CN	26	$\mathrm{CH}_3\mathrm{CCH}$	40	$\mathrm{HC}_{3}\mathrm{N}$	51	$C_6H$	73
$\rm CN^+$	26	SiC	40	HCCNC	51	$C_6H^-$	73
HCN	27	CH <sub>3</sub> CN	41	HNCCC	51	$C_5N$	74
HNC	27	CH <sub>3</sub> NC	41	$c-SiC_2$	52	$C_6H_2$	74
$C_2H_4$	28	$H_2CCO$	42	$C_3O$	52	HCCCCCCH	74
CO	28	$\rm NH_2CN$	42	$\rm H_2C_3N^+$	52	$\mathrm{HC}_{5}\mathrm{N}$	75
$\rm CO^+$	28	SiN	42	AlNC	53	KCl	75
$H_2CN$	28	CP	43	$\rm CH_2 CHCN$	53	$\rm NH_2CH_2COOH$	75
$\mathrm{HCNH^{+}}$	28	HNCO	43	$c-H_2C_3O$	54	$\mathrm{SiC}_4$	76
$N_2^+$	28	HNCO-	43	HC <sub>2</sub> CHO	54	$C_6H_6$	78
$\mathrm{CH}_2\mathrm{NH}$	29	$c-C_2H_4O$	44	SiCN	54	$C_7H$	85
HCO	29	$\rm CH_3 CHO$	44	SiNC	54	$\rm CH_3C_6H$	88
HCO <sup>+</sup>	29	$\rm CO_2$	44	$\rm CH_3 CH_2 CN$	55	$C_8H$	97
$HN_2^+$	29	$\rm CO_2^+$	44	$C_2S$	56	$C_8H^-$	97
$HOC^+$	29	CS	44	$C_3H_4O$	56	HC <sub>7</sub> N	99
SiH	29	$N_2O$	44	$\rm CH_3 CH_2 CHO$	58	$\mathrm{HC}_{9}\mathrm{N}$	123
$\mathrm{CH}_3\mathrm{CH}_3$	30	SiO	44	$\rm CH_3 COCH_3$	58	HC <sub>11</sub> N	147
$\rm H_2CO$	30	$\mathrm{HCS}^+$	45	NaCl	58		

Source: astrochemistry.net

Some gas-phase pathways for forming the chemicals needed for life Conditions in dense molecular clouds:  $n \sim 10^4$  cm<sup>-3</sup>  $T_{gas} \sim 10$  K



# Published kinetics of C + $H_3^+ \rightarrow CH^+ + H_2$



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  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ Motivation D1 Experiment Results

#### Let there be life

 $\begin{array}{c} {\sf C} + {\sf H}_3^+ \to {\sf COMs} \\ & {\sf Motivation} \\ {\sf D3 \ {\sf Experiment}} \\ & {\sf Results} \end{array}$ 

ם בְּרֵאשִׁית בָּרָא אֵלהָים אֵת הַשְׁמָיִם וְאֵת הָאָרָץ: וְהָאָרָץ הֵיְתָה אֵ תֹהוֹ וָבֹהוּ וְהָשֶׁךְ עַל־פְּגֵי תְהָוֹם וְרַוּהַ אֵלהִים מְרַחֶפֶת עַל־פְּגֵי הַמֵּיִם:

<sup>3</sup> <u>ווּאמֶר אֱלהֶים יְהֵי</u> אֶוֹר ווְהִי־אָוֹר ווַיָרָא אֲלהָים אֶת־הָאוֹר קי־מֵוֹב וַיַּרְהֵל אֱלהִים בּין הָאוֹר וּבון הַחְשֶׁך: וַיְקָרָא אֱלהַים וּלָאוֹר יוֹם וְלַחָשֶׁך כָּרָא לֵיְלָה וֵיְהִי־עֶרָב ווְהִי־בָּקָר יָוֹם אֶחָר

זַיָּאמֶר אָלֹהִים יְהִי רָקִיעַ בְּתַוּךְ הַמֵּיִם וִיהֵי מַבְהִיל בֵּין מָיִם <sup>6</sup> לְמָיִם: וַיַעַש אָלהִים אָת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בֵּין הַמָּיִם אֲשֶׁר מִתַּחַת 7 לְרָקִיעַ וּבֵין הַמִּיִם אֲשֶׁר מַעַל לְרָכֵיעַ וַיִהִי־בֵן: וַיִּקְרָא אָלהִים 8 לְרָקִיעַ שָׁמֵים וַיְהִי־עֶרֶב וַיְהִי־כָּכֶר יָוֹם שֵׁנִי:

9	וַיָּאמֶר אֶלהִים יִקְוּוּ הַמֵּיִם מִתַּחַת הַשְׁמִים אֶל־מְקוֹם אֶחֶׁר וְתָרָאֶה
10	היבשה ויהי-כו: ויהרא אלהים וליבשה ארץ ולמקוה המים
11	קָרָא יַמֶּים וַיָרָא אֶלהָים כּּי־טִוֹב: וַיָּאמֶר אֶלהִים תַּרְשָׁא הָאָׂרָץ
	דָּשָׁא עַשָּב מַזְרַיע זָרַע עָץ פִּרִי עַשָּה פִּרִי לְמִינו אֲשָׁר וַרְעוּ־בָו
12	על־הָאָרָץ ווְהִי־בֵן: וַתּוֹצָא הָאָרָץ דֶּשָׁא עֵשָׁב מַוְרָיע וָוָהי־בֵן: עַל־הָאָרָץ דָּשָׁא מ
	וְעֵאַ עְשֶׁה־פְּרֵי אֲשֶׁר וַרְעוֹ־בָוֹ לְמִיגָהוּ וַיַּרָא אֱלהָים כּּי־מּוֹב:
13	ויהי־ערב ויהי־במר יום שלישי



C<sup>-</sup> source



# How much did this cost? A) \$1,000,000



#### How much did this cost?



#### **The Team Members**



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

# Outline

Let there be light  $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ Motivation D1 Experiment Results

#### Let there be life

C + H<sub>3</sub><sup>+</sup> → COMs Motivation D3 Experiment Results ם בְּרֵאשִׁית בָּרָא אֵלהֻים אֵת הַשְׁמָיִם וְאֵת הָאָרָץ: וְהָאָׁרָץ הֵיְתָה אֵ תֹהוֹ וָבֹהוּ וְחָשֶׁךְ עַל־פְּגֵי תְהֵוֹם וְרַוּחַ אֵלהִים מְרַחֶפָת עַל־פְּגֵי הַמֵּיִם:

<sup>3</sup> <u>ווּאמֶר אֱלהֶים יְהֵי</u> אֶוֹר ווְהִי־אָוֹר ווַיָּרָא אֲלהָים אֶת־הָאוֹר פִּי־מֵוֹב וַיַּרְהֵל אֱלהִים בָּין הָאוֹר וּבֵון הַחְשֶׁך: וַיְקָרָא אֱלהַים אָת־הָאוֹר יוֹם וְלַחָשֶׁך כָּרָא לֵיְלָה וֵוְהִי־עֶרֶב ווְהִי־בָּקֶר ווֹם אֶחָר

זַיָּאמֶר אָלֹהִים יְהָי רָקִיעַ בְּתַוּךְ הַמֵּיִם וִיהָי מַבְהִיל בֵּין מָיִם 6 לְמָיִם: וַיַעַש אָלהִים אָת־הָרָקִיעַ וַיִבְהֵל בֵּין הַמָּיִם אֲשֶׁר מִתַּחַת 7 לְרָקִיעַ וּבֵין הַמִּיִם אֲשֶׁר מַעַל לְרָכֵיעַ וַיִהִי־בֵן: וַיִּקְרָא אָלהִים 8 לְרָקִיעַ שָׁמֵים וַיְהִי־עֶרֶב וַיְהִי־כָּכֶר יָוֹם שֵׁנִי:

9	וַיָּאמֶר אֶלהִים יִקְוּוּ הַמֵּיִם מִתַּחַת הַשְׁמִים אֶל־מְקוֹם אֶהָר וְתָרָאֶה
10	היבשה ויהי-כו: ויהרא אלהים וליבשה ארץ ולמהוה המים
11	קָרָא יַמֶּים וַיָּרָא אֶלהָים כִּי־מִוֹב: וַיָּאמֶר אֶלהִים תַּרְשָׁא הָאָרָץ
	דָּשָׁא עַשָּב מַוְרִיעַ זֶׁרַע עֵיץ פּּרִי עַשָּׁה פּּרִי לְמִינוֹ אֲשֶׁר וַרְעוּ־בָו
12	עליהאָרָא ווְהִי־בֵן: וַתּוֹצָא הָאָרָץ דֶּשָּׁא עֵשָׁב מַזְרֵיע וָרַע לְמִינָׁהוּ
	וְעֵאָ עְשֶׁה־פְּרָי אֲשֶׁר וַרְעוֹ־בָוֹ לְמִיגָהוּ וַיָּרָא אֱלהָים כִּי־מִוֹב:
13	ויהידערב ויהידבמר יום שלישי

# C + H<sub>3</sub><sup>+</sup> summed thermal rate coefficients



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

## New C + H<sub>3</sub><sup>+</sup> data reduces abundance uncertainties in astrochemical models



## New C + H<sub>3</sub><sup>+</sup> data reduces abundance uncertainties in astrochemical models



#### Conclusions

- We have performed the first energy dependent measurements for the H<sup>-</sup> + H → H<sub>2</sub> + e<sup>-</sup> 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 C +  $H_3^+$ , O +  $H_3^+$ , as well as D +  $H_3^+/H_2^-D^+/D_2^-H^+$ .
- Results improve our understanding of the chemical evolution of the cosmos.

## Thanks for your attention.