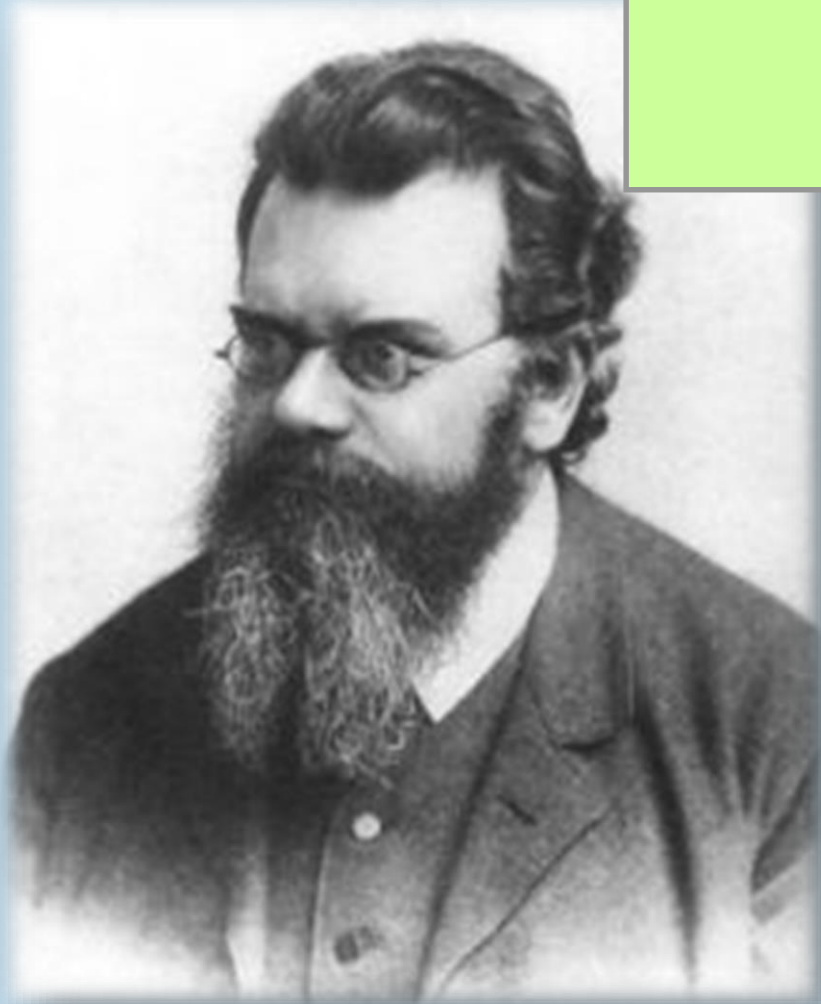


Ludwig Boltzmann (1844 – 1906)



ベント ヴォルフガング
東海大学・理学部・物理学科

まずは19世紀後半のウィーンについて一緒に考えましょう．．．

そのときのウィーンは、政治、芸術、物理の中心でした。
何故そんなに多くの優秀な人達が同時に、
同じ町に集まったのか、今でも大きな謎です。



人口は約5千3百万



奥さんは有名なSisiです。

オーストリア・ハンガリー帝国の皇帝
Franz Josef Iの賢明な指導の下で、
沢山の民族が共存しました。

Gründerzeit: ウィーンの有名なリング通りは完成されました。



ウィーン大学本館



ウィーン市庁



国会議事堂



ホフブルグ

その時代に活躍しましたウィーンの物理学者. . .

J. Loschmidt (1821 – 1895):

「空気分子の大きさは 10^{-9}m で、1 立方メートル中の数は約 10^{25} 個。」



J. Stefan (1835 – 1893):

「物体の放射率はその物体の温度の 4 乗に比例する」
(Stefan-Boltzmann の法則)

E. Mach (1838 – 1916):

「絶対空間が存在しない。」(Mach の原理、Einstein にも影響。)
原子の存在を否定：「原子って？見たことがありますか？」



L. Boltzmann (1844 – 1906):

「エントロピー (確率) が高くなることは乱雑さが増えることを示す。」 (熱力学第 2 法則の統計的な解釈。)

Ludwig Boltzmann (1844 Wien – 1906 Duino)

力を尽くした天才的な物理学者のシンボル。

「理論を作り上げることが私の夢です。
それを実現するために、どんな犠牲でも払います。」

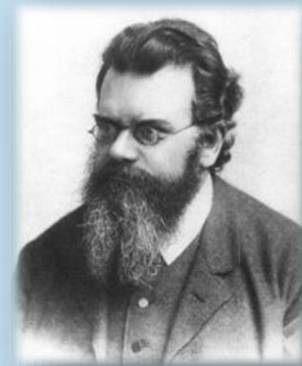
10歳まで家庭教師。
A. Bruckner のピアノレッスンを受けた。

1863 – 1866: ウィーン大学の学生 (1866 博士号)。
その後、高校の先生および J. Stefan 教授の助手。

「Stefan 教授に Maxwell の電磁気学と、
英語の教科書も一緒に渡された。」

1866 - 1868 年:

気体分子の速度分布
(Maxwell – Boltzmann 分布)
熱力学の第 2 法則の力学的な解釈
(気体の分子論)



物理学科の学生達 (1866)
Boltzmann が前、左から 4 番目)



1868 年の Boltzmann と履歴書

1869 – 1876: Graz 大学、Wien 大学数学科の教授。



「第1の論争」：ドイツの天才物理学者 R. Clausius との戦い
→ Boltzmann の勝利（統計物理学発見の priority についての論争）

「物理の権威である Clausius さんのおかげで、私の研究の priority が広く知り渡されていることが私の最大の喜びである。

(Boltzmann の勝利宣言, 1871 年)

1872 年論文： 「気体分子間の熱平衡の研究」：87 ページの大作品！

Maxwell のコメント：

「Boltzmann の論文を理解しようとしたましたが、論文の長さが最大のショックでした。」

Boltzmann の反論：

「Elegance とは
洋服屋さんや靴屋さんの課題です。」

この仕事で、歴史的有名な
「Boltzmann 運送方程式」
および「H-定理」が証明されました。



Wien Ber. 66 (1872)275.

334 22. Über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen.

$$(16) \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left[\frac{f(\xi, t)}{\sqrt{\xi}} \frac{f(x+x'-\xi, t)}{\sqrt{x+x'-\xi}} - \frac{f(x, t)}{\sqrt{x}} \frac{f(x', t)}{\sqrt{x'}} \right] \\ &\quad \times \sqrt{x x'} \psi(x, x', \xi) dx' d\xi. \end{aligned} \right.$$

Dies ist die Fundamentalgleichung für die Veränderung

ここで一緒に少し物理の勉強をしましょう。。。

Boltzmann の夢:

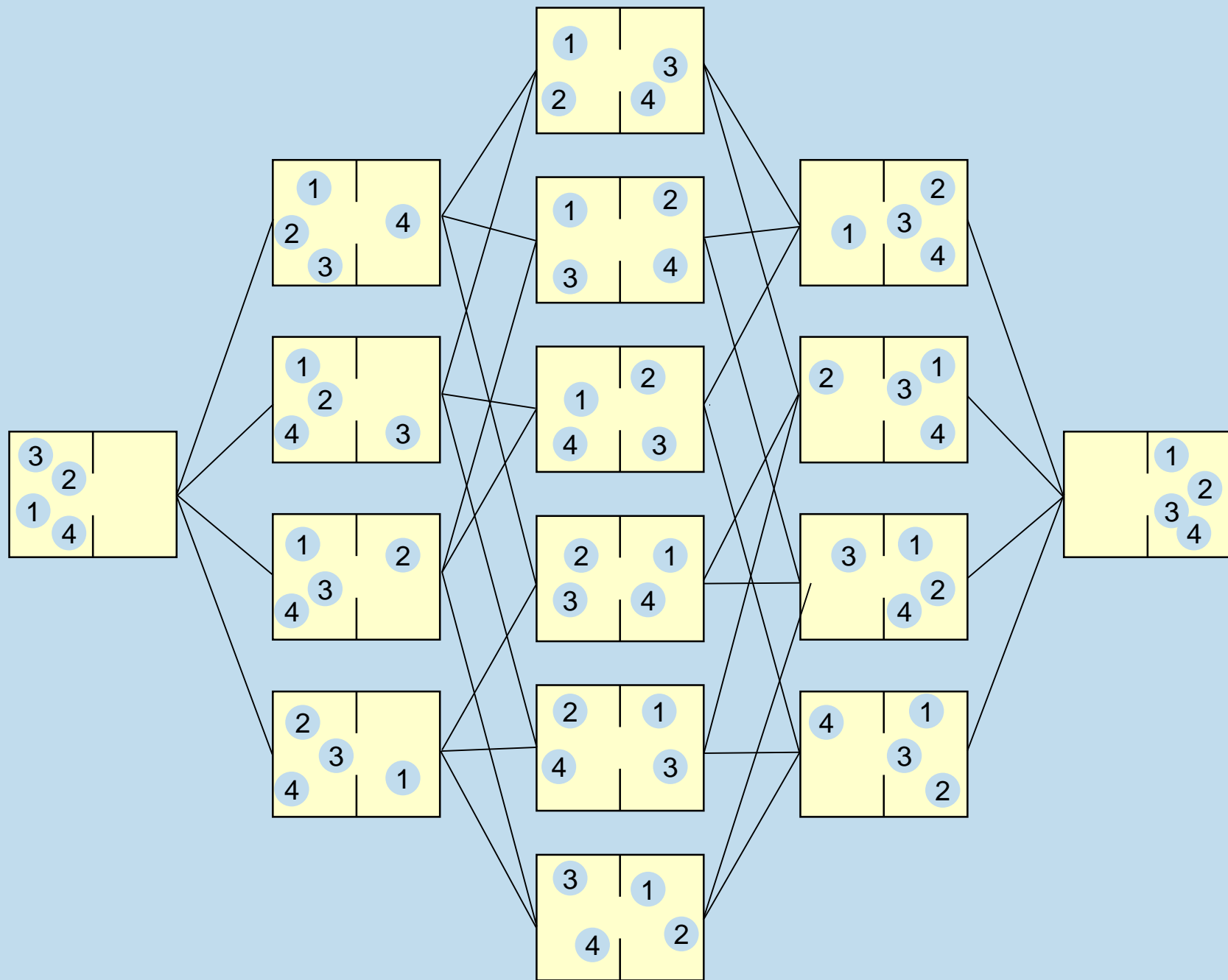
気体の温度、圧力など「熱力学的な性質」を分子の運動で説明したい。

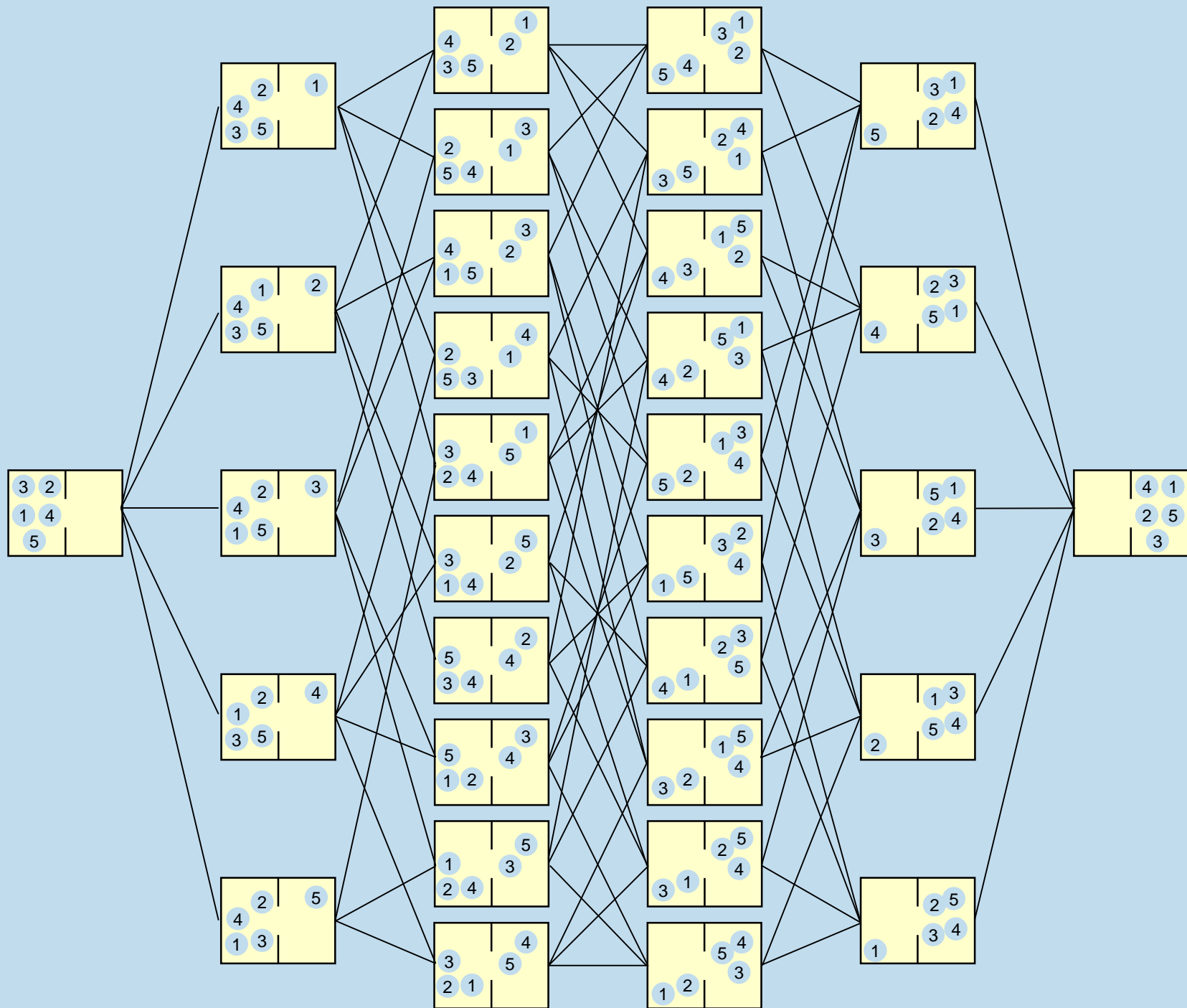
Boltzmann の考え方:

分子の運動によって、「確率が低い状態」が「確率が高い状態」へ変わる。ただし:

「確率が高い状態」が、数多くのミクロ状態で実現可能である。
「確率が低い状態」が、数少ないミクロ状態で実現されている。

具体例として、部屋の中に分子が4個および5個が存在する場合を考えましょう。。。





Boltzmann の結論：

分子の運動によって、状態の確率が増加する。
言い換えると、状態の乱雑さが増加する。
更に、その確率の対数は熱力学のエントロピーに比例する。

その考え方に対して数多くの批判があった。Boltzmann の「第2の論争」：

E. Mach (物理), W. Ostwald (化学) の批判：
「分子は存在しない。エネルギー保存則だけで
全ての現象を説明できる (energetics)。」

1895年の会議、Boltzmann と Ostwald との論争
について次のように報告されている：

「Boltzmann と Ostwald との争いは
闘牛と闘牛士との間の戦いのようでした。
闘牛士が色々なワナを使ったが、闘牛の圧勝でした。
我々若手学者は皆 Boltzmann を支持した。」

(A. Sommerfeld の報告)



Wilhelm Ostwald (1853-1932)
化学ノーベル賞 1909。
Leipzig 大学の教授。
上記の論争の後、神経発作を
起こし、半年間の休暇をとった。

しかし、もっと深刻な批判の声も出ました。Boltzmann の「第3の論争」：

1875 年、J. Loschmidt (Boltzmann の同僚) の批判
1896 年、E. Zermelo (当時は M. Planck の助手) の批判：

「力学の法則が時間反転に対して不変である。従って、分子の力学的な衝突のため状態の確率が増えた場合、逆に確率が減る場合もあるはず。」

(Loschmidt の時間反転の批判)

「力学系において、十分な時間が経過したときに、保存則で許される限り、どんな状態でも必ず実現される。」

(Zermelo の繰り返しの批判)

Boltzmann の反論 (1877 年)：

確かにそうだが、確率 (エントロピー) が低い状態が実現されるまでの時間が非常に長い！

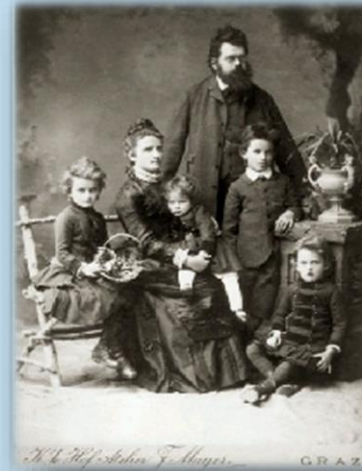
Boltzmann の反論を直感的に理解するために、ビリヤードを考えましょう！

1876 – 1890 年: Boltzmann の最も実りの多いとき。
オーストリア・ Graz 大学の教授、学部長、学長。

1876 年: Henriette と結婚、4 人の子供が生まれる。
Graz 郊外にマイホームを作り、子供達に毎日フレッシュな牛乳を
飲むために自分の牛も飼った。



Boltzmann 家族の自宅



1886 年の
Boltzmann 家族。
子供達 (左から) :
Henriette, Ida, Ludwig, Arthur

しかし、精神・心理の治療もそのときに開始。当時の病状の説明:



→ 神経の疲れ

→ Neurasthenie (医学的な専門用語)

(長男 Ludwig が 11 才でなくなり、その影響もあり得る。)

1877 年： Boltzmann の大論文： 確率計算のルールを設立

Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmeleichgewicht.

Von dem c. M. Ludwig Boltzmann in Graz.

Eine Beziehung des zweiten Hauptsatzes zur Wahrscheinlichkeitsrechnung zeigte sich zuerst, als ich nachwies, dass ein analytischer Beweis desselben auf keiner anderen Grundlage möglich ist, als auf einer solchen, welche der Wahrscheinlichkeitsrechnung entnommen ist. (Vergl. meine Abhandlung „Analytischer Beweis des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie aus den Sätzen über das Gleichgewicht der lebendigen Kraft“.)

「熱力学の第2法則と確率計算、および熱平衡の定理について」

Wien Ber. 76 (1877) 373.

ここで Loschmidt の時間反転批判に反論

Boltzmann は1896 までに、エントロピーの文字として E を使う。
Gibbs は 1873 からギリシア大文字 H (capital eta) を使う。
Boltzmann も 1896 から H を使う。

1884 年： Stefan の経験則 $P = \sigma AT^4$ の理論的な証明。
(Stefan-Boltzmann の法則)

4 ページの短い論文！

1890 年から、Boltzmann が落ち着かず数年毎に転職：

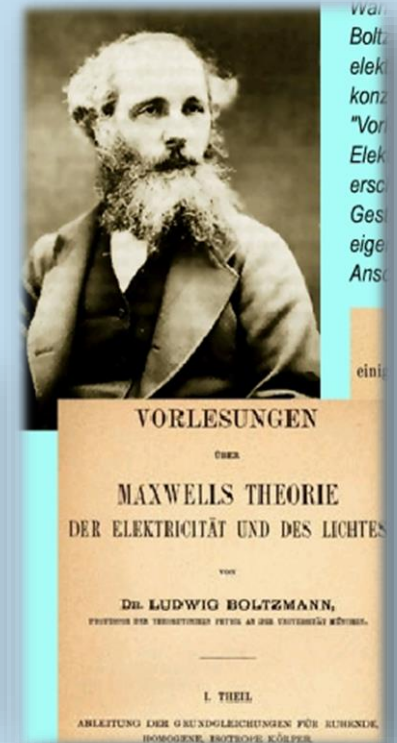
1890 – 1894: München大学
1894 – 1900: Wien大学
(J. Stefan の後任)
1900 – 1902: Leipzig大学
1903 – 1906: Wien大学
(E. Mach の後任)

1879年：A.Einstein生まれた
1895 年：Röntgen による X 線の発見
1896 年：Becquerel によるウラニウム
放射能の発見
1897 年：J.J. Thomson による電子の発見
1900 年：Planck による量子論の発見
1904 年：Curie 夫妻のノーベル章
1905 年：Einstein の「奇跡の年」

Boltzmann がここで
「電気および光について Maxwell の理論」
について講義をした。
講義で「この式を書かれたのは神様でしょうか」と語った。



1890 年頃のMünchen 大学





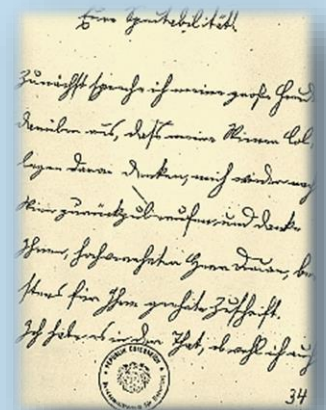
1900年頃の Wien 大学物理学科の建物
(1913年まで使用)

ここで、**Lise Meitner** が Boltzmann の講義を聴いた。彼女は「私にとって最も美しい、最も刺激的な講義でした。ピアノも聞かせて下さって、彼は **Beethoven** を尊敬しました」と語った。



1900年頃の Leipzig 大学。

ここに来てから1年後、Wien 大学学部長宛にこの手紙を書いた：
「Wien を去ったことを後悔しております。オーストリアとのつながりが強く、北ドイツの事情に慣れません。」





Wien での最後の住まい（現在の状態）。

1903-1905 年、「自然の哲学」について講義。
同僚の S. Meyer への手紙：「ぜんそくが強く、
明日の講義はできません…」



Abb. 11.1: Brief Boltzmanns an Stefan Meyer/
Letter from Boltzmann to Stefan Meyer, February 1906

1904年2月：60歳の誕生日のお祝い（ウィーン大学にて）

哲学者として活動：我々の感覚よりも、
脳の働きによる仮説 (Hypothesis) の方が重要。
Darwinの進化論を重視。

1905年後半：アメリカ (Berkeley) へ渡る (3回目)



最後に、Duino の悲劇…

ぜんそく、近眼、心臓病 (Angina Pectoris)、そして神経の疲れを癒すために、1906 年 9 月に家族と一緒にイタリアの Duino へ行った。



イタリア北部の Duino
(Trieste の近く)



9 月 7 日の「時代」誌の記事：
「Boltzmann 教授の自殺。
Trieste からの情報によると、
夏休暇のために Duino に滞在した
Boltzmann 博士が、一昨日ホテル
の部屋で遺体として発見された。」

何故か??

成功、名誉もあったのに。。。

1890 年以前の研究力が戻って来ないと感じた？
計画的な行為ではなく、急なディプレッション。

オーストリアのエリートの自殺の例：
ハブスブルグ皇太子 Rudolf と
Vetsera 嬢の心中 (1889 年)。
Boltzmann の弟子 P. Ehrenfest
(1933 年)。



Rudolf 皇太子と Vetsera 嬢



P. Ehrenfest

ウィーンの中央墓地
Boltzmann の墓 (1933 年完成)

統計力学の最も基本的な関係式

$$S = k \cdot \log W$$

(エントロピー S と確率 W との関係)
が刻まれている。



Boltzmann の学生と後任：
F. Hasenöhrl.
講義で、Boltzmann の考え
と熱意を伝えた。
第一次世界大戦で戦死。



F. Hasenöhrlの学生：
E. Schrödinger
量子力学の発見者。

Boltzmann は「統計物理学」の基礎を創った偉大な研究者でした。

その基礎に基づき、**M. Planck**, **A. Einstein** 達が「量子論」を創った。

M. Planck の温度放射の法則：

1900 年発見、最初の「量子力学」の公式！

Planck が、最小のエネルギー $\varepsilon = h\nu$ をもつ「エネルギー量子」について **Boltzmann** の統計物理学を適応しました。



物理の理論が皆に認められることとは、その反対者が納得するのではなく、反対者が先に死ぬからである。

(**Boltzmann** の理論の成功についての **M. Planck** のコメント, 1948 年 出版)

A. Einstein が：

B. **Boltzmann** の理論を使って、1905 年はブラウン運動、1906 年は固体の比熱を説明した。

「私がブラウン運動を説明した後、**Boltzmann** の考え方に対する批判と疑問の声が急に静かになった。」



(**Boltzmann** の理論の成功についての **A. Einstein** のコメント, 1917 年 出版)

L. Boltzmann の生家 (Wien の3区、Landstrasser Hauptstrasse 62)
へ行って見ましたが。。



どうして Boltzmann 生家の側に
Maxwell の名前??
区役所の大間違い???



Maxwell が確かに
Edinburgh (スコットランド) 生まれ…



ファッションのお店でした！！



熱意のシンボル: Boltzmann

Boltzmann の熱意が
20世紀の物理学を大きく刺激した！

Thank you