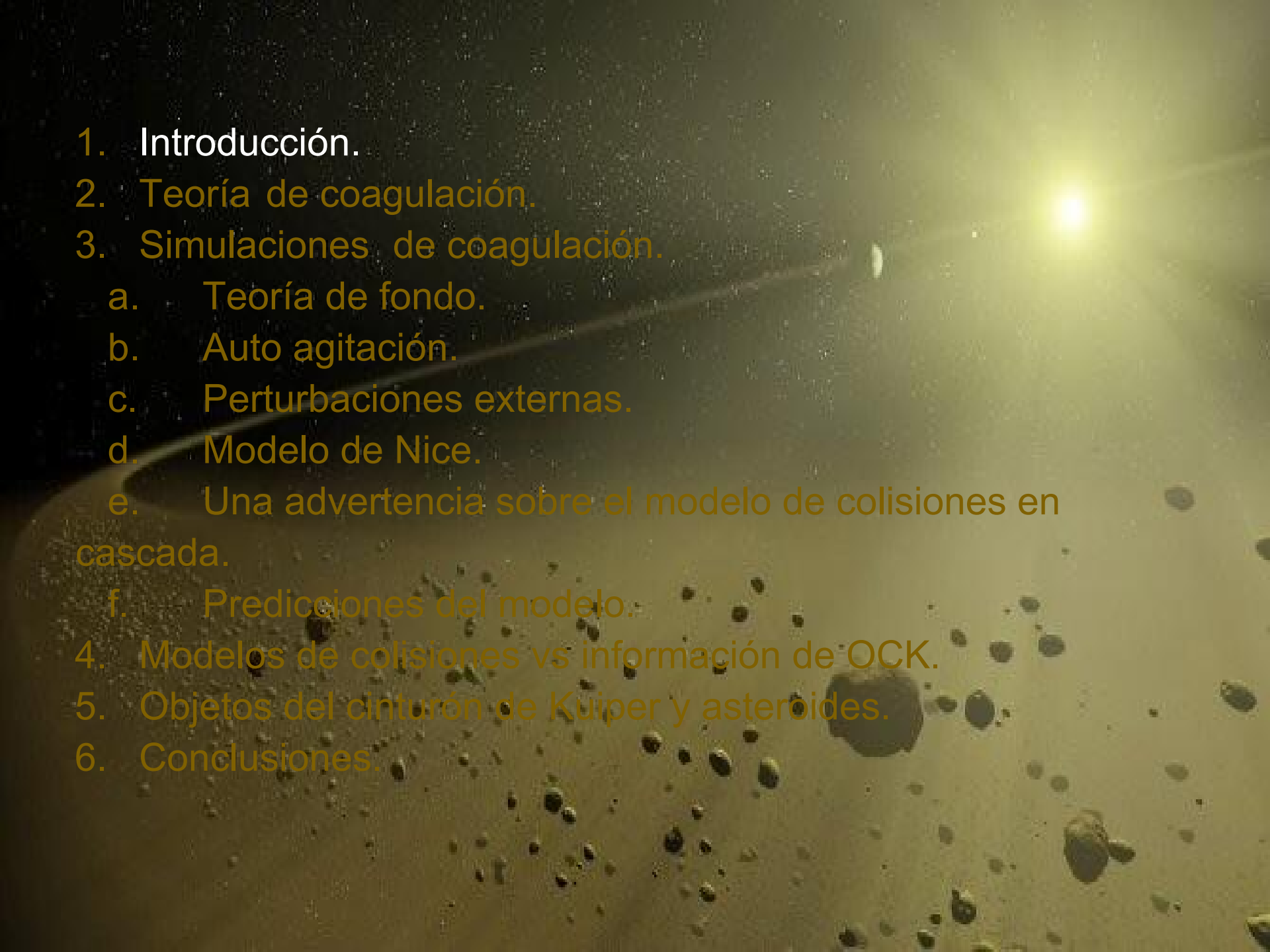


Formación y evolución colisional de Objetos del Cinturón de Kuiper

Kenyon, Bromley O'Brien & Davis

Secciones de la charla:

1. Introducción.
2. Teoría de coagulación.
3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
6. Conclusiones.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

1. Introducción:

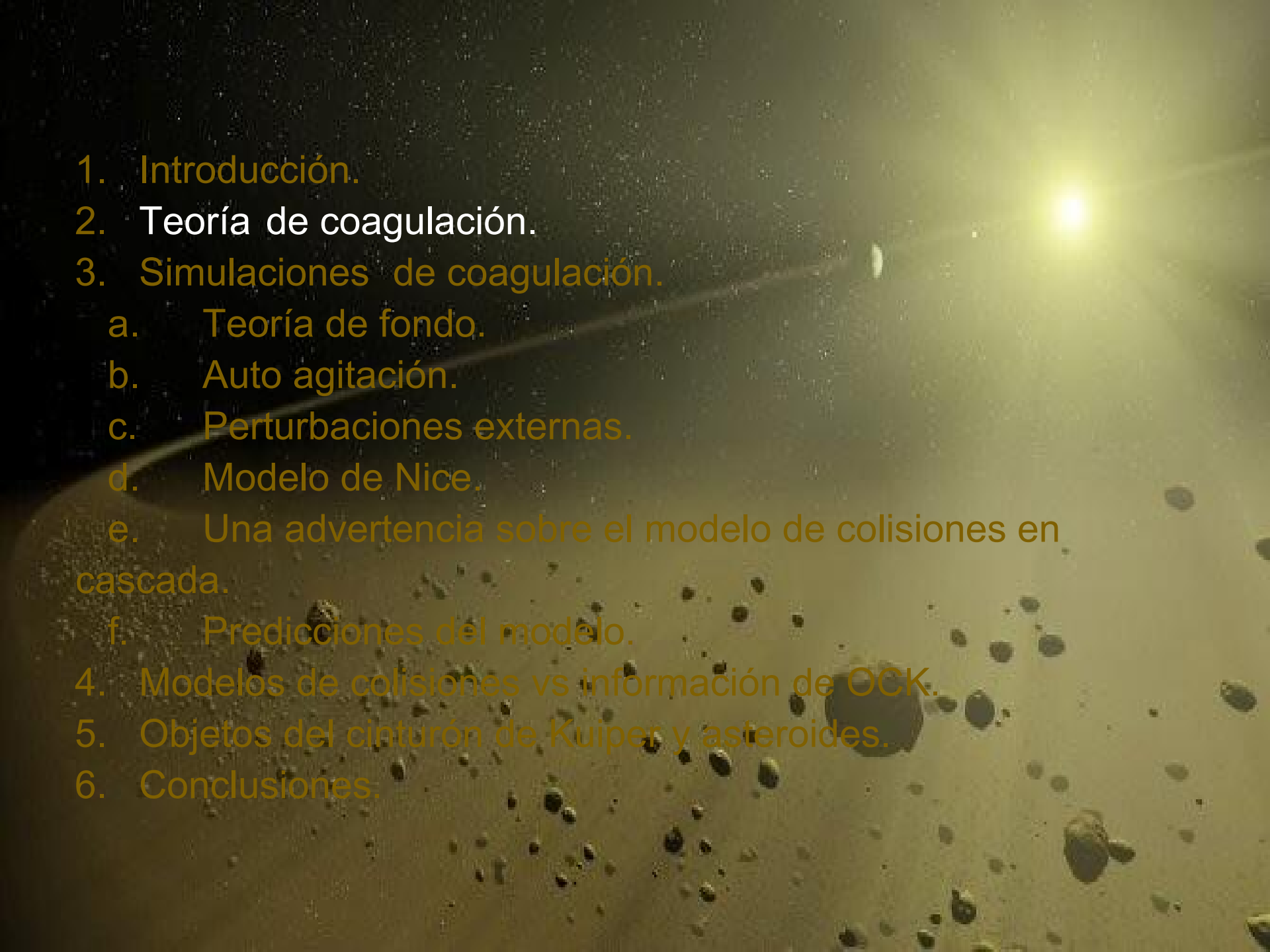
Los planetas se formaron en una transición entre un disco protoestelar ópticamente grueso y un disco delgado de escombros.

Las colisiones a altas velocidades de objetos grandes mantienen la población de granos pequeños.

Con objetos entre 10 y 1000 km la distribución de tamaños de los OCK ofrece una comparación con la teoría de formación planetaria.

Una vez que los OCK alcanzan tamaños de 100-1000 km, las colisiones, perturbaciones dinámicas por planetas gigantes y agitación por pequeños cuerpos producen características de tamaños y elementos dinámicos que las observaciones pueden probar.

Entender la formación planetaria en el CK permite interpretar los procesos de evolución en otros sistemas planetarios.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

2. Teoría de coagulación:

La formación planetaria arranca con granos de polvo suspendidos en un disco circumestelar gaseoso. Los granos evolucionan en planetas en 3 etapas. Las colisiones entre los granos producen agregados de material más grandes que se desacoplan del gas y se depositan en una capa más densa en el plano medio del disco. Mientras los cuerpos siguen creciendo se transforman en planetesimales, objetos gravitacionalmente ligados cuyos movimientos son independientes del gas. Las colisiones y fusiones entre los planetesimales forman los planetas.

Una vez que se forman planetesimales de $r \sim 1$ km la gravedad domina la dinámica del gas. Las interacciones gravitatorias de largo alcance intercambian energía cinética y momento angular, redistribuyendo energía orbital y momento angular entre los planetesimales.

2. Teoría de coagulación:

Para objetos de 1 km a 40 UA, sus velocidades iniciales aleatorias son comparables con las de escape. La energía de ligadura gravitatoria es entonces comparable con la de colisión, que son más chicas que las de ruptura. Así, las colisiones producen fusiones en vez de escombros.

Así los planetesimales crecen lentamente.

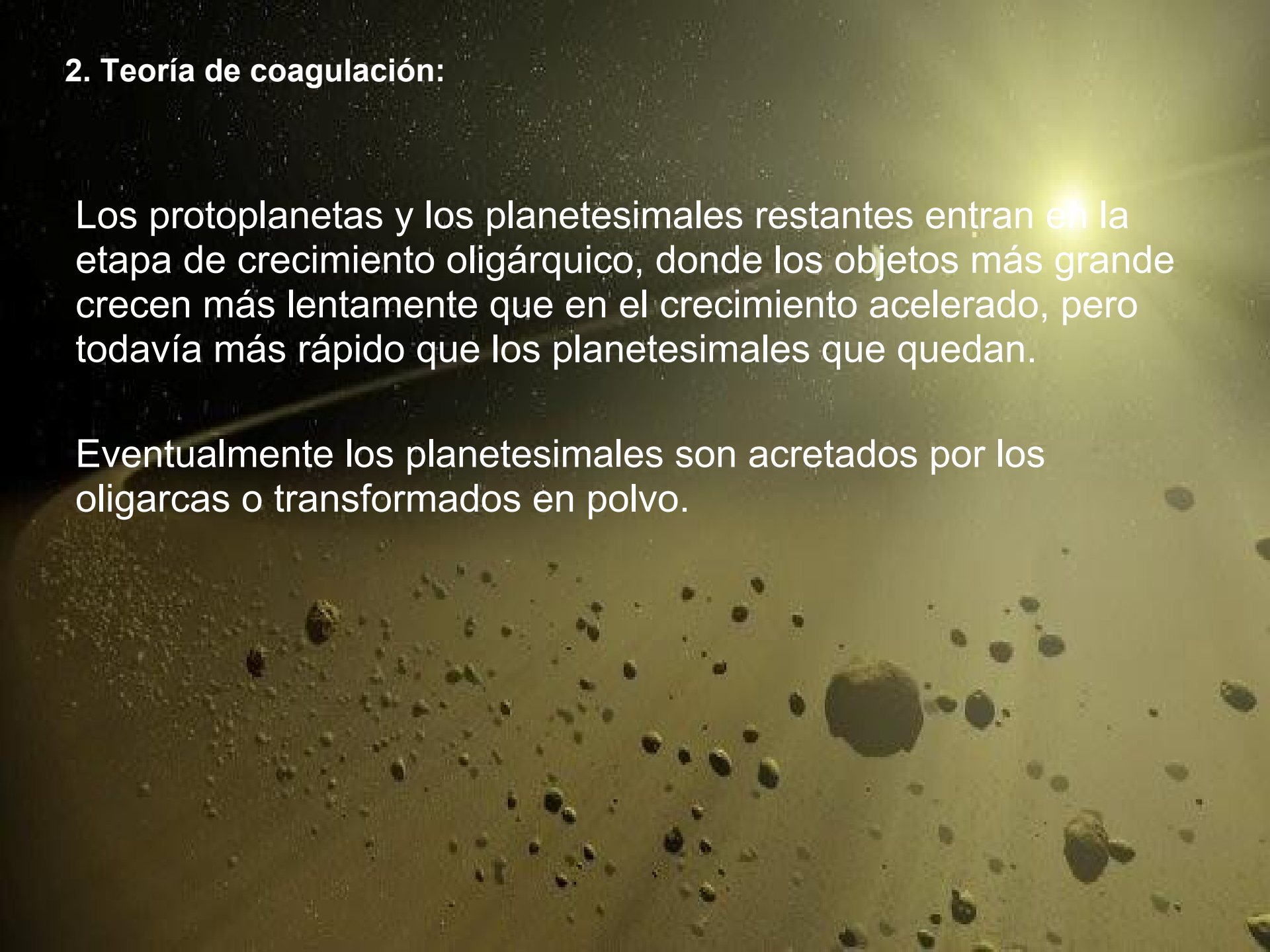
Mientras se van formando objetos más grandes, los procesos disminuyen las velocidades al azar de las partículas y se acelera el crecimiento.

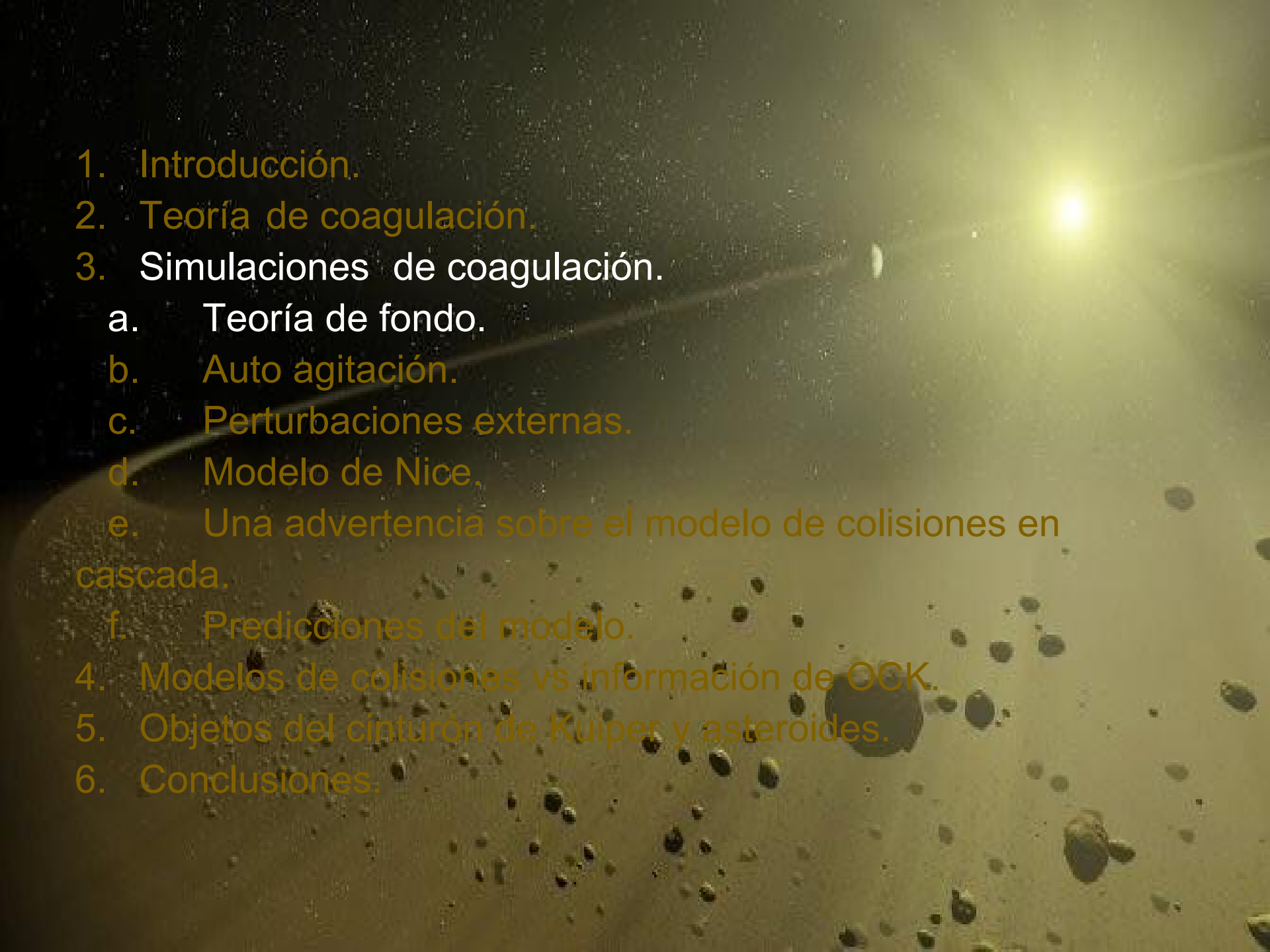
Empieza el crecimiento acelerado.

2. Teoría de coagulación:

Los protoplanetas y los planetesimales restantes entran en la etapa de crecimiento oligárquico, donde los objetos más grande crecen más lentamente que en el crecimiento acelerado, pero todavía más rápido que los planetesimales que quedan.

Eventualmente los planetesimales son acretados por los oligarcas o transformados en polvo.



- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

3.a. Teoría de fondo:

Safranov (1969) inventó una aproximación estadística que provee un método para derivar la evolución de los elementos orbitales para grandes conjuntos de planetesimales.

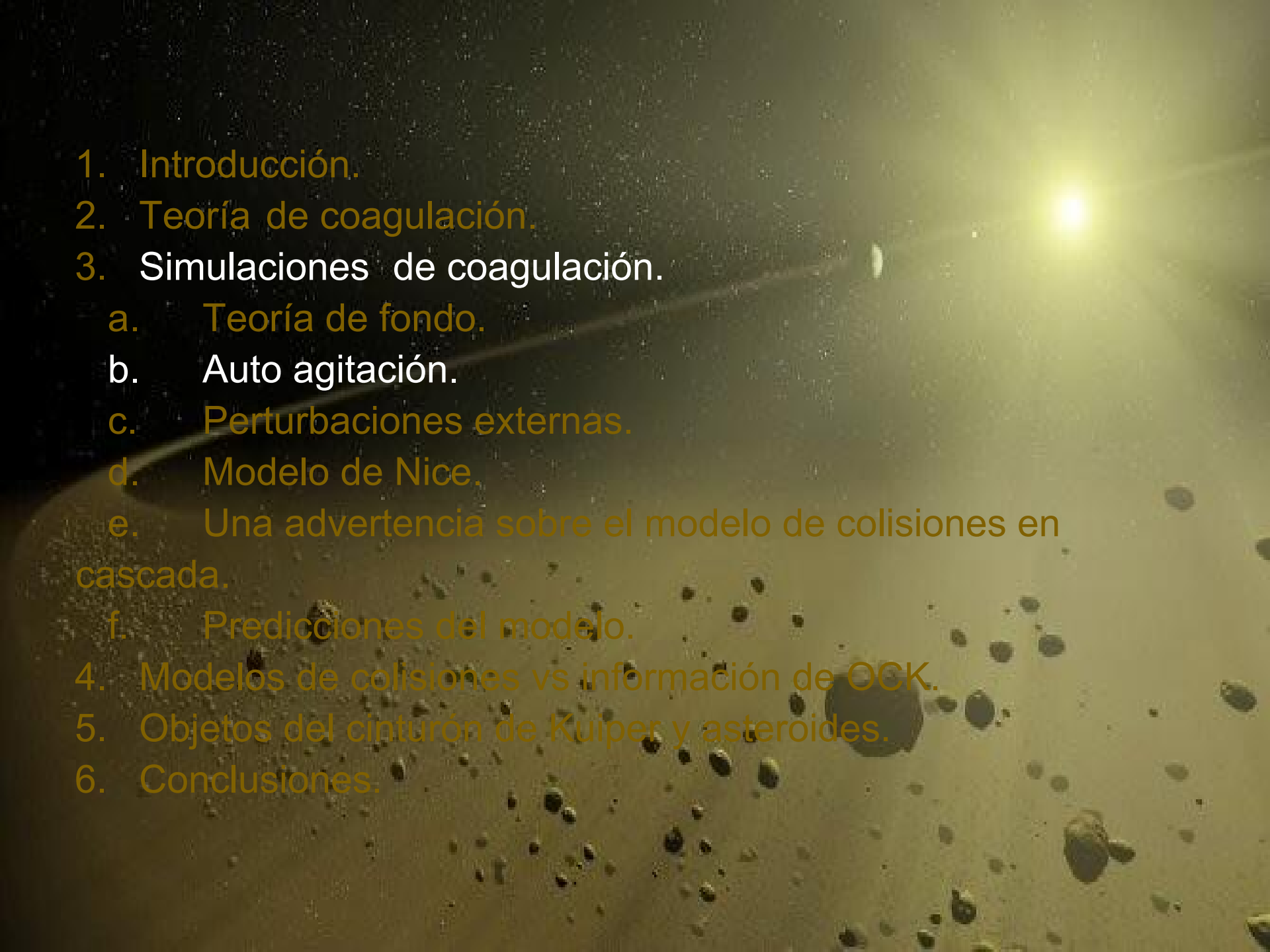
Un tratamiento más detallado sobre la evolución de las velocidades es importante para entender el crecimiento acelerado y lograr buenas estimaciones para los tiempos de crecimiento y distribuciones de velocidades y tamaños para los oligarcas.

El método de Safranov falla porque no puede seguir la evolución de los planetesimales.

3.a. Teoría de fondo:

En 2006 se crea un código híbrido que mezcla los dos anteriores, pero fue aplicado a la formación de planetas terrestres, no a OCK.

Hasta el momento no se han realizado simulaciones que incluyan interacciones dinámicas con planetas gigantes o encuentros estelares, pero algunos cálculos de prueba muestran la importancia de las perturbaciones externas en el tratamiento de las colisiones en cascada.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

3.b. Auto agitación:

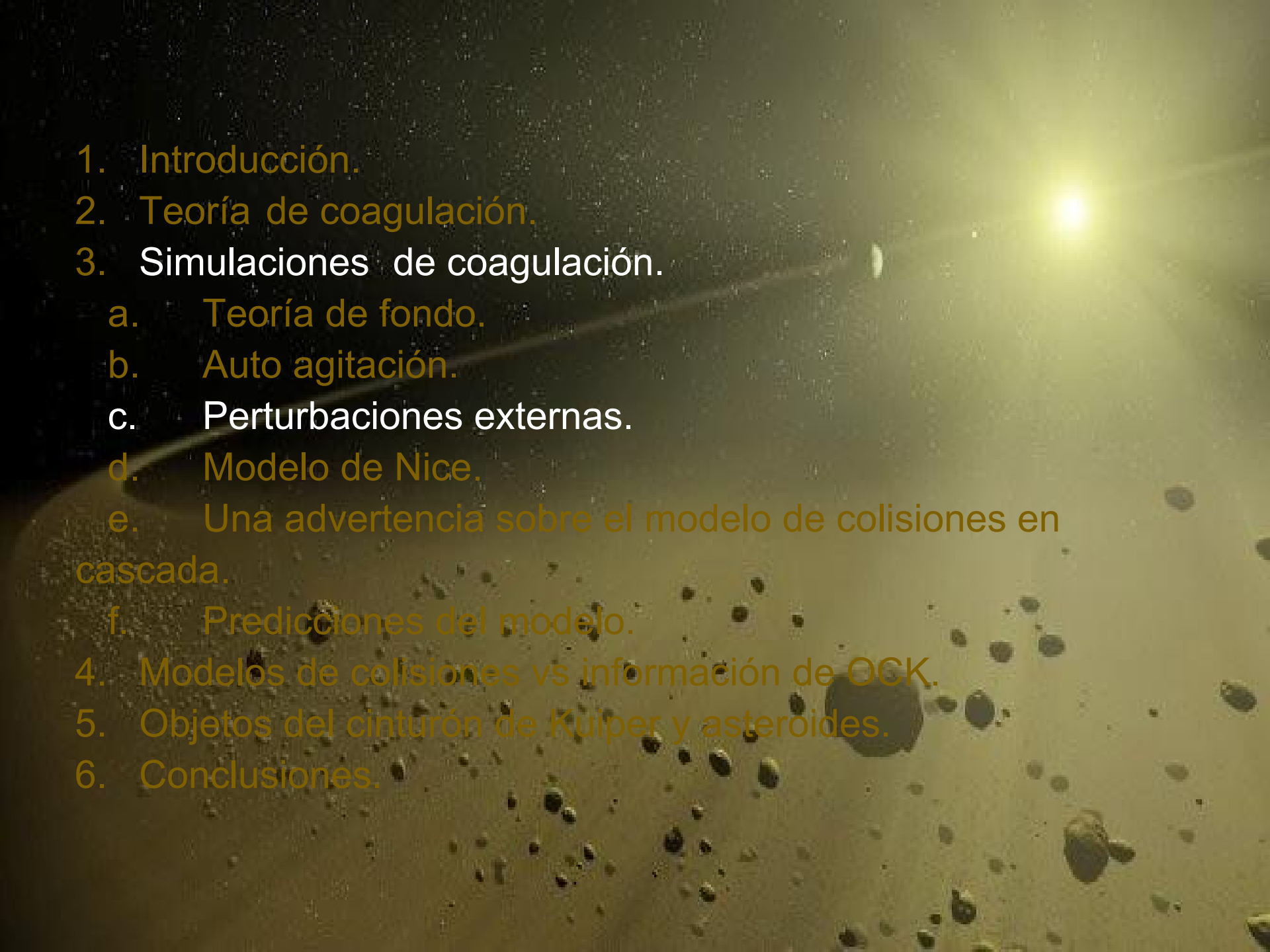
Se hacen evolucionar objetos grandes y se sigue su evolución hasta que termina. Luego se utiliza un código diferente que sigue la evolución de los objetos de baja masa.

Durante los primeros millones de años los cuerpos grandes crecen lentamente. La fricción dinámica disminuye sus órbitas y el arrastre del gas circulariza las órbitas de los objetos más pequeños.

Empieza el crecimiento acelerado.

Mientras crecen los oligarcas, las colisiones entre los planetesimales dan inicio a los choques en cascada, que remueven material del disco más rápido que lo que los oligarcas pueden acretar los escombros.

La masa de polvo disminuye conforme pasa el tiempo.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

3.c. Perturbaciones externas:

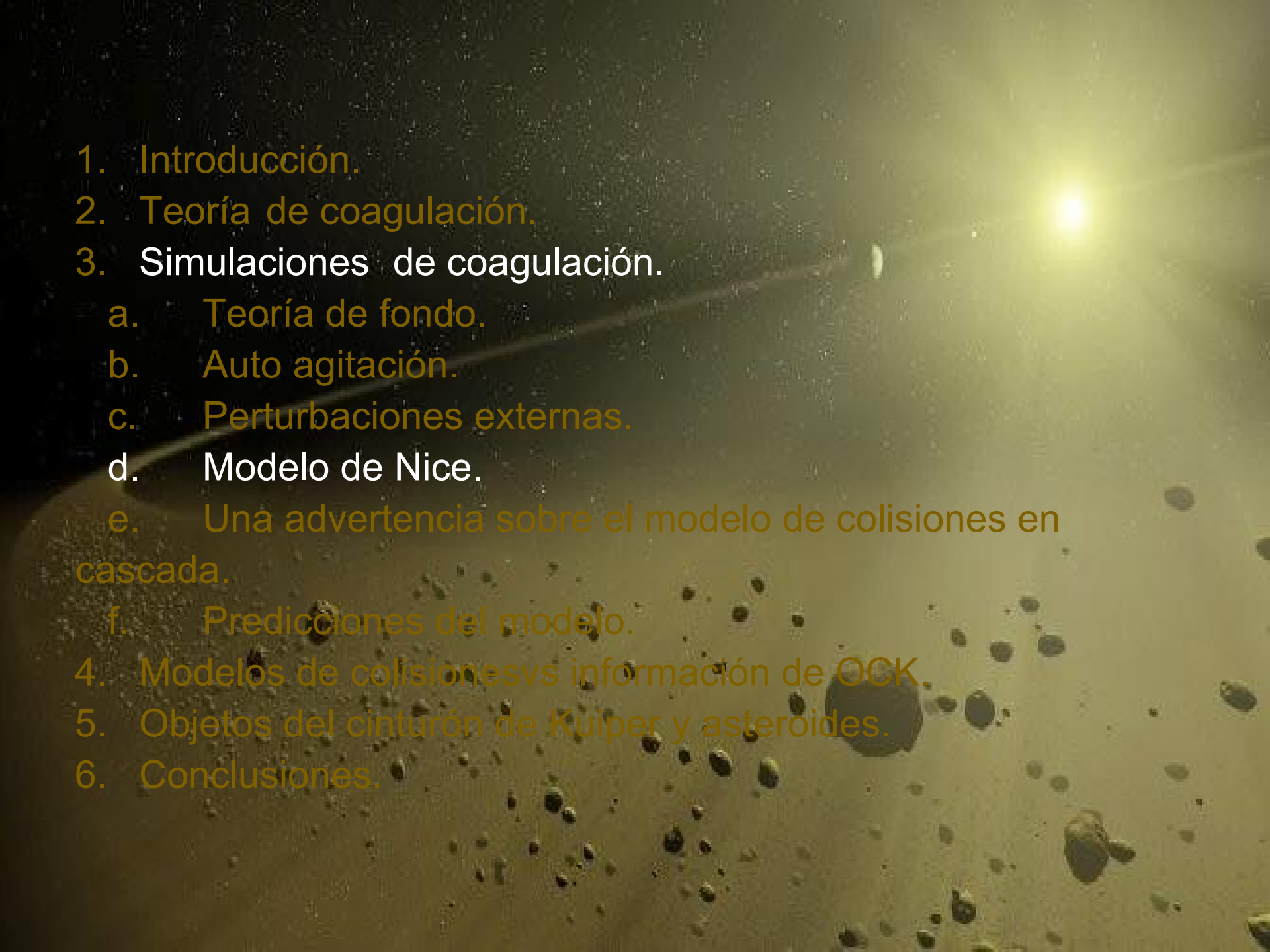
Hay dos posibles fuentes de perturbaciones externas que podrían reducir la masa de los OCK a los límites deseados:

1) La agitación de Neptuno aumenta la efectivización de los choques en cascada, que remueve la masa adicional de la población de OCK de 0.1-10 km e impide el crecimiento de objetos más grandes.

2) El paso de estrellas cercano puede excitar órbitas de OCK y aumentar la colisión en cascada.

Sin evidencia de planetas masivos en $a > 50$ UA el paso de una estrella es la fuente más probable.

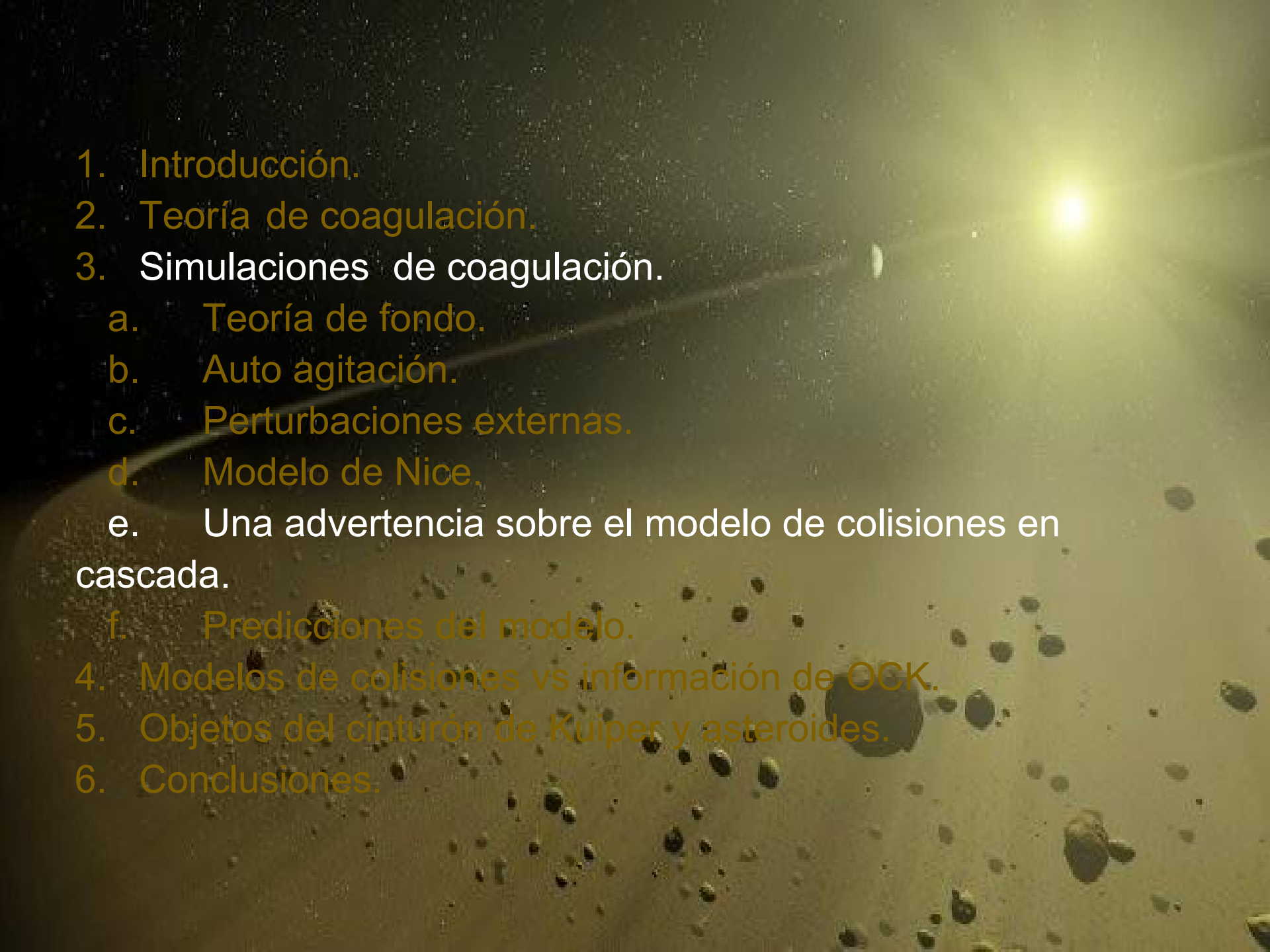
A medida que Neptuno se acerca a su masa actual, su gravedad provoca que objetos entre 40 y 60 UA aumenten sus e en corto tiempo.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

3.d. Modelo de Nice:

Por más que los modelos de formación *in situ* de OCK pueden explicar las masas, no explican las clases dinámicas. En el Observatorio de Nice desarrollaron un modelo de evolución dinámica de planetas gigantes y planetesimales remanentes en el disco: el sistema arranca del equilibrio, con los gigantes gaseosos en configuración compacta y un disco de planetesimales masivo entre 15 y 30 UA. Las interacciones dinámicas entre gigantes y planetesimales produce una inestabilidad cuando Saturno cruza la resonancia 2:1 con Júpiter, que resulta en una migración dramática de los gigantes gaseosos y una eyección de planetesimales al CK, al scattered disk y a la nube de Oort.

Si se aumentara la masa inicial del disco en un factor entre 3-10, permitiría que la coagulación y las colisiones en cascada produjeran el disco de escombros activando los eventos del modelo de Nice.

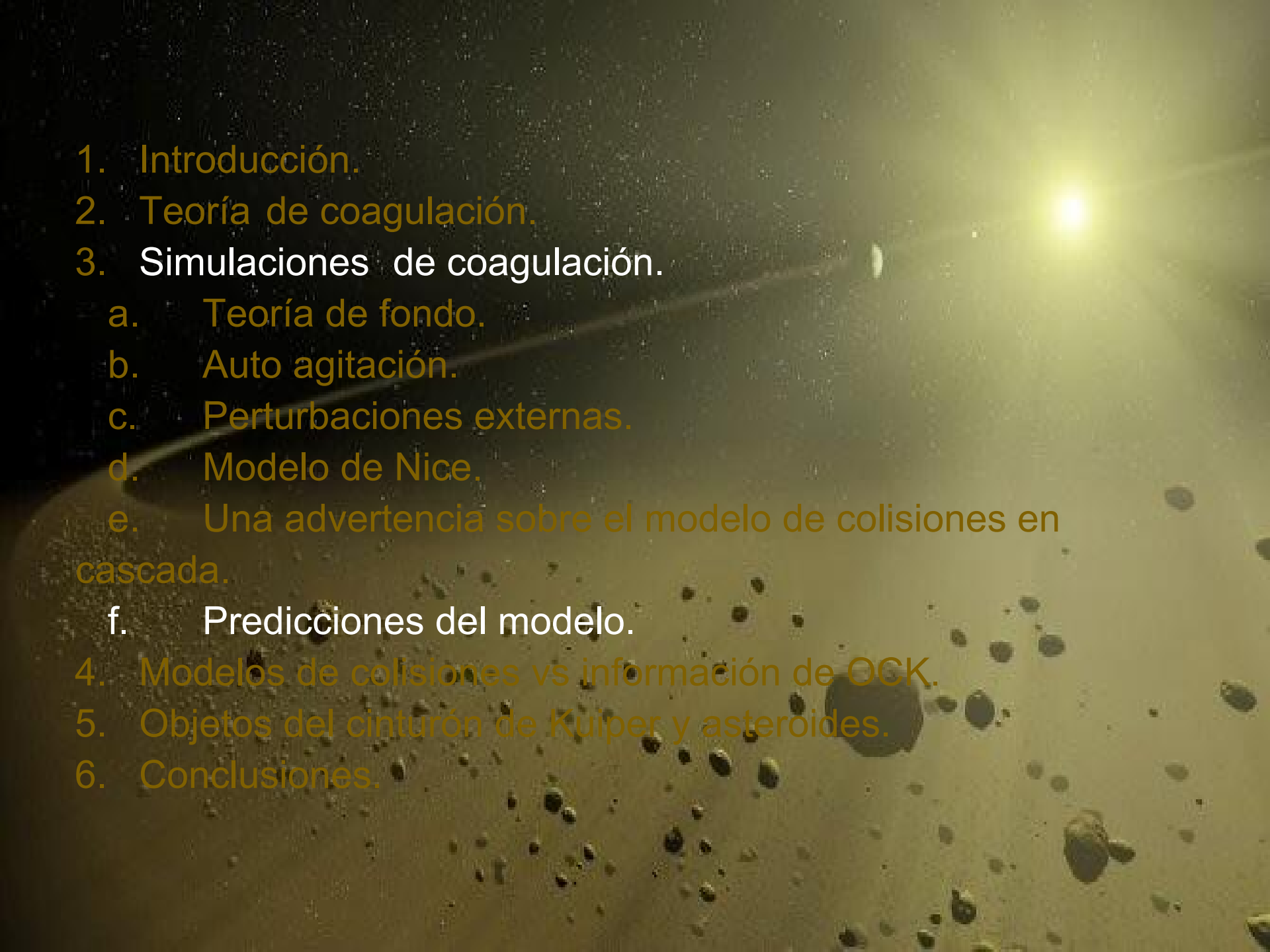
- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

3.e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada:

En las simulaciones, la formación de oligarcas masivos entre 5-15 UA en un disco masivo provoca baja efectividad en las colisiones en cascada. Si las colisiones son lentas los oligarcas pueden acretar más eficientemente material antes que los choques los remuevan. Si las colisiones son eficientes se logra una formación *in situ* de Urano y Neptuno, así como también de los OCK a 40 UA.

Frenar las colisiones en cascada en un factor 2-3 permitiría a los oligarcas acretar planetesimales remanentes y objetos más pequeños antes que las colisiones los remuevan.

La amortiguación por colisiones también puede frenar las cascadas de choques.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

3.f. Predicciones del modelo:

La distribución acumulada consiste de 3 leyes de potencias: una para la población de pequeños tamaños, otra para grandes tamaños y otra para los intermedios.

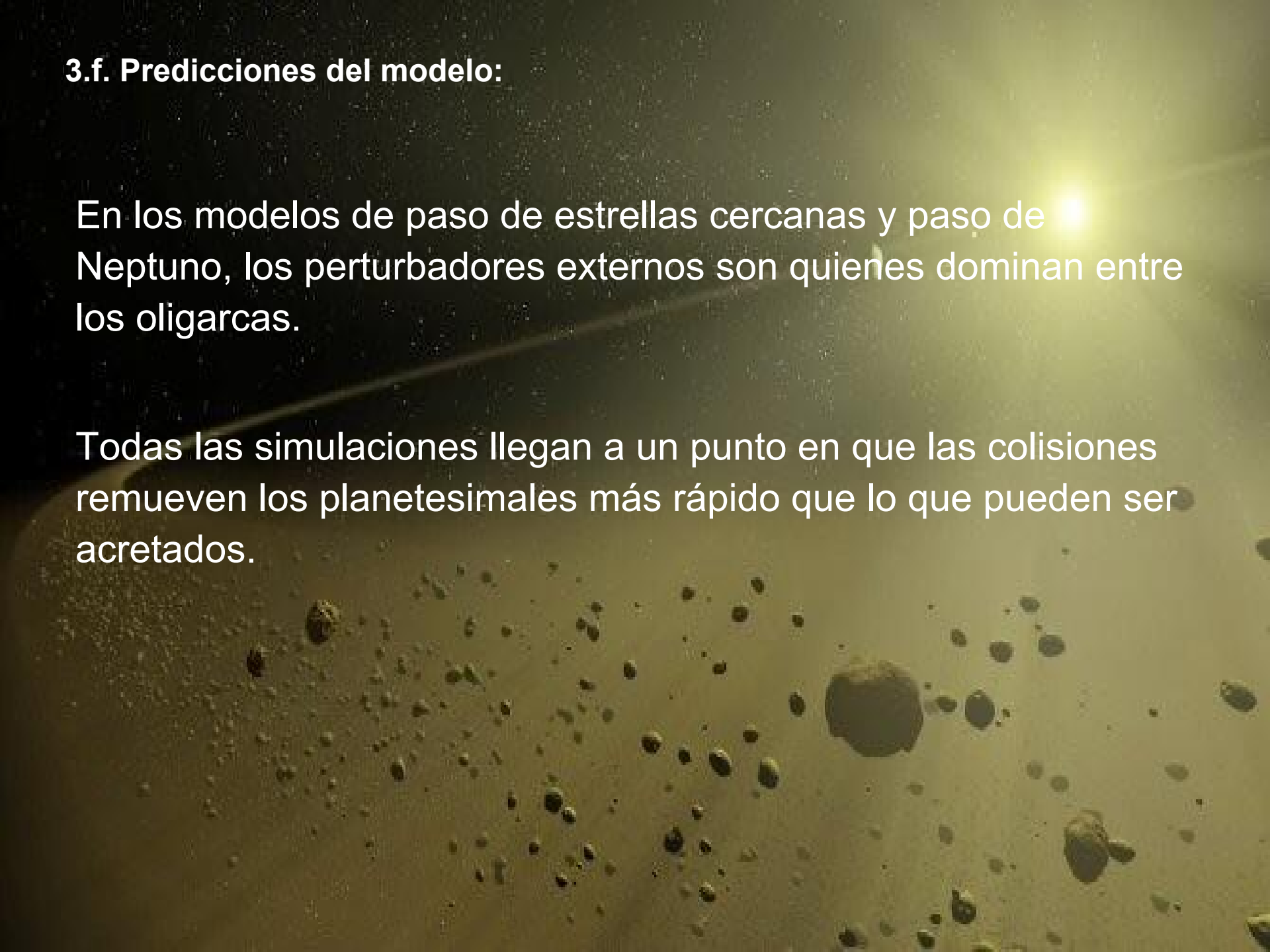
Las distribuciones de i y e dependen únicamente de la masa total que hay en cuerpos grandes, siendo independientes de r .

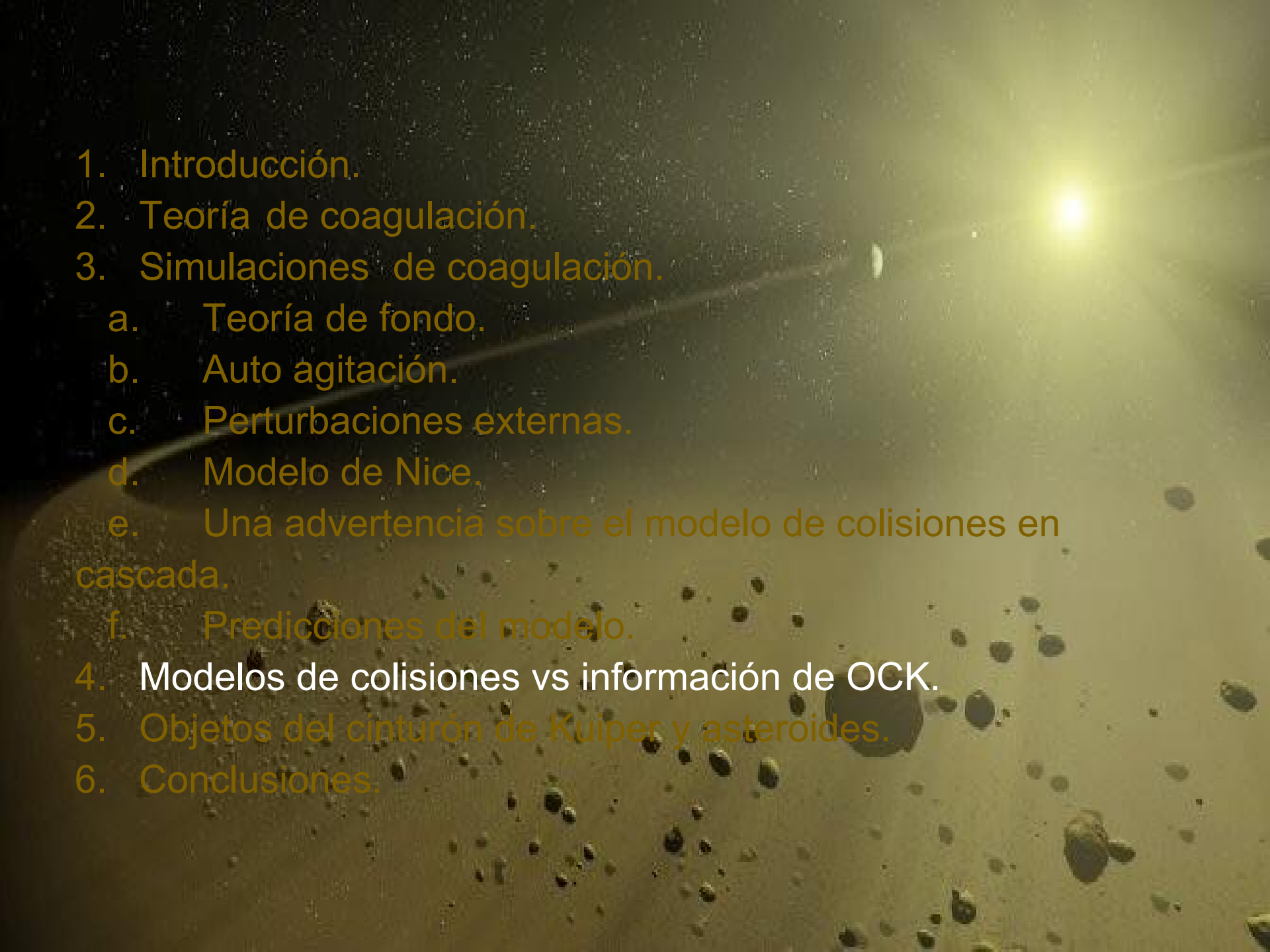
En los modelos de auto agitación, la fricción dinámica y el arrastre viscoso entre oligarcas y planetesimales (durante el crecimiento acelerado) y entre el conjunto de cuerpos masivos (durante el crecimiento oligárquico) establecen una distribución para objetos grandes de e . El arrastre entre los grandes cuerpos domina la fricción dinámica entre oligarcas y planetesimales restantes.

3.f. Predicciones del modelo:

En los modelos de paso de estrellas cercanas y paso de Neptuno, los perturbadores externos son quienes dominan entre los oligarcas.

Todas las simulaciones llegan a un punto en que las colisiones remueven los planetesimales más rápido que lo que pueden ser acretados.



- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

4. Modelos de colisiones vs información de OCK:

Hay información de OCK que proveen dos pruebas generales de los cálculos de coagulación:

En cada clase dinámica hay 4 parámetros que se pueden medir y se puede distinguir si surgen de modelos de auto agitación o de perturbaciones.

Esta información muestra una diferencia física entre las clases dinámicas: para OCK clásicos con $a=42-48$ UA y $q>37$ UA la población fría tiene distribuciones grandes de tamaños. La población caliente, en cambio, tiene distribuciones de tamaños pequeñas. Ambas poblaciones tienen pocos objetos ópticamente brillantes ($m=27-27.5$), lo que implica tamaños de 20-40 km y albedos de $\sim 0.04-0.07$.

4. Modelos de colisiones vs información de OCK:

Esta información es inconsistente con las predicciones del modelo de auto agitación sin perturbadores externos: por más que los modelos alcancen *i* cercanas a las observadas, las poblaciones clásicas sugieren que una perturbación dinámica modifica la evolución. Además, los tamaños que se alcanzan en objetos de las poblaciones clásicas, calientes y resonantes no llegan a los que predice el modelo. Ambas poblaciones parecen tener objetos más grandes, como los que predice el modelo de agitación por Neptuno.

La masa de polvo en el CK provee una prueba final en contra del modelo de auto agitación: queda entre 1 y 3 ordenes de magnitud menor que lo que se observa, siendo más parecido a lo que predice el modelo de agitación de Neptuno.

4. Modelos de colisiones vs información de OCK:

Los resultados sugieren que mecanismos dinámicos dominan las colisiones que remueven material del CK.

Si los planetas se hubieran formado en el contexto del modelo de Nice, hubieran quedado muy pocos objetos helados para poblar el sistema solar exterior. La falta de formación de núcleos de gigantes gaseosos entre 20-30 UA indica que hubo un cambio dramático en las colisiones de cascadas desde 5-15 UA, donde se formaron los planetas gigantes, hasta 20-30 UA.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides:

Ambas son poblaciones de pequeños cuerpos de relativamente baja masa en comparación al resto del Sistema Solar. La estructura y dinámica de ambas poblaciones fueron fuertemente influenciadas por la presencia de los gigantes y ambos grupos son y fueron influenciados por las colisiones entre sus miembros.

El cinturón de asteroides:

El cinturón primordial debe haber tenido cientos de miles de veces más masa que el cinturón actual.

Se propusieron diversos mecanismos para explicar la falta de masa que se observa, como la excitación dinámica: mientras la nebulosa se disipaba, los cambios en el potencial gravitatorio que actuaba en Júpiter, Saturno y los asteroides produjeron cambios en sus tasas de precesión y con eso cambios en las posiciones de las resonancias seculares; pudiendo extenderse hacia el cinturón excitando e e i .

5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides:

Esto junto con la fuerza de arrastre del gas pudo haber producido un movimiento del semieje mayor a y así removerse material del cinturón.

Esta no parece una explicación viable.

Otra explicación es que los embriones planetarios pudieran haber acretrado en el cinturón. Esta posibilidad parece razonable dado que Júpiter fue capaz de acretar ~ 10 masas terrestres en su núcleo más atrás del cinturón.

Así, evidencias observacionales y modelos teóricos sugieren que la dinámica, en vez de las colisiones, domina la falta de masa del cinturón.

Modelos colisionales/dinámicos pueden ser contrastados con observaciones de distribuciones de tamaños, números de familias de asteroides, etc, sugieren que los cuerpos del cinturón de algunos metros tienen vidas de entre 10 y 20 my.

5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides:

Comparación entre cinturón de asteroides y de Kuiper:

1) En términos de la evolución dinámica y colisional:

Algunos modelos más actuales muestran que integrando coagulación, fragmentación por colisiones y efectos dinámicos permiten contrastar las contribuciones de las colisiones y efectos dinámicos de la falta de masa del CK.

2) En términos de la distribución de tamaños:

El CA tiene una distribución colisional de tamaños que no se puede representar bien con una sola ley de potencias.

El CK primordial debió haber sido mucho más masivo que lo que se observa hoy en día. Esto sugiere que la tasa de colisiones en el CK es comparable a la del CA.

5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides:

Actualmente las evidencias observacionales no pueden contrastar este hecho. De todas formas, trabajos observacionales más recientes sugieren que las distribuciones de tamaños son consistentes con las poblaciones de colisiones relajadas de los cinturones.

La forma de las distribuciones de tamaños difiere entre los asteroides y los OCK por las distintas velocidades en las colisiones entre los miembros de cada grupo y por las composiciones: los asteroides constan principalmente de piedras y los OCK de hielo.

3) Las distribuciones de tamaños de los objetos del CK son fósiles como los del CA?

Teniendo en cuenta los distintos casos posibles de pérdida de masa en los cinturones, las distribuciones de tamaños se pueden considerar fósiles de la primera etapa, por más que no se pueda determinar bien cuándo termina cada etapa en cada proceso.

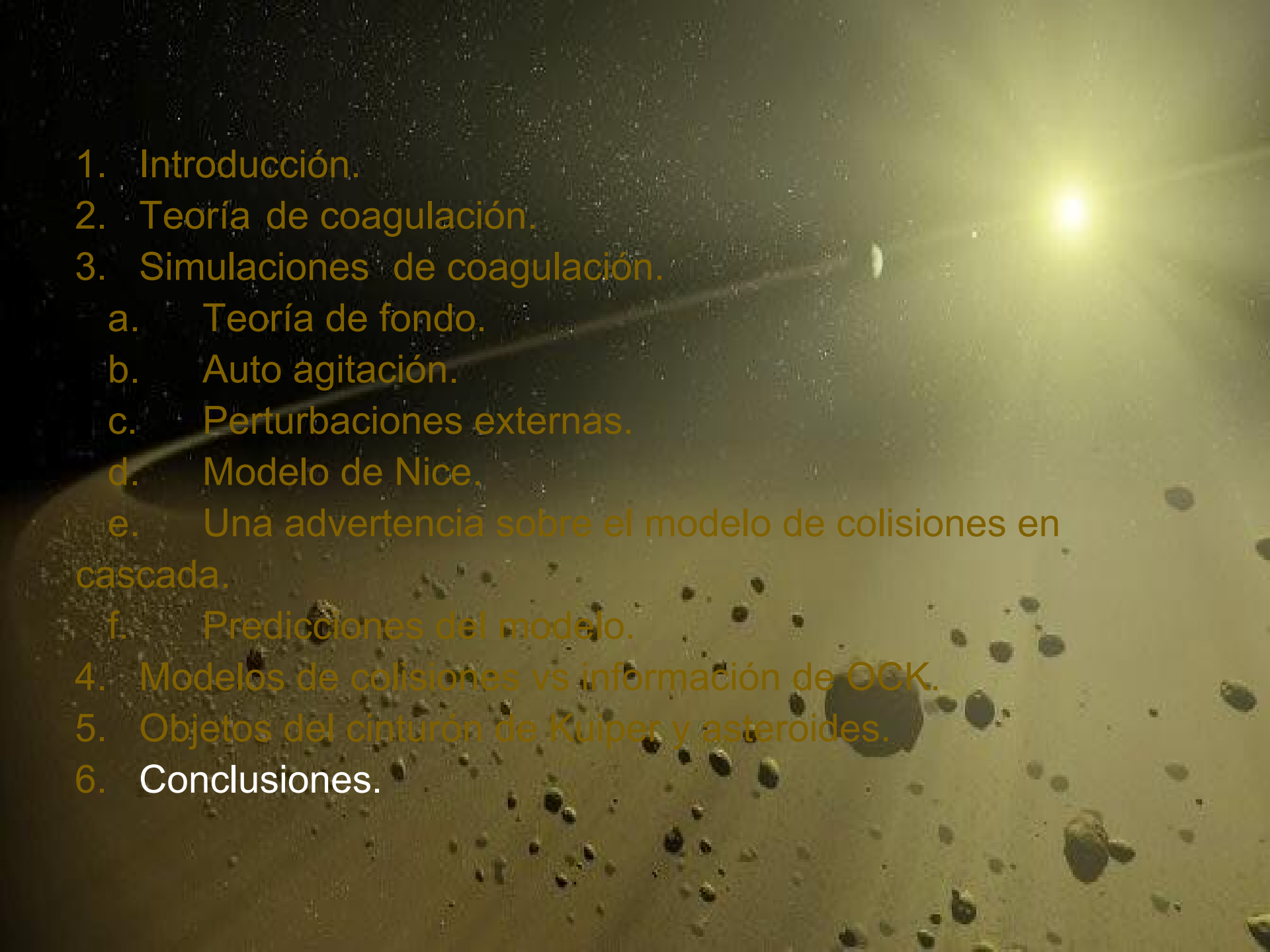
5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides:

4) Respecto de las familias en los cinturones:

Una importante manifestación de la presencia de choque entre los asteroides es la formación de familias: se cree que son fragmentos de una sola roca que se rompió en alguna colisión.

Se cree que en el CK hay familias también pero son más difíciles de encontrar.

En el CA al chocar dos asteroides se modifican las velocidades y resultan fáciles de distinguir. En el CK al chocar dos objetos se modifican los elementos orbitales pero no las velocidades, por lo que resultan más difíciles de observar.

- 
1. Introducción.
 2. Teoría de coagulación.
 3. Simulaciones de coagulación.
 - a. Teoría de fondo.
 - b. Auto agitación.
 - c. Perturbaciones externas.
 - d. Modelo de Nice.
 - e. Una advertencia sobre el modelo de colisiones en cascada.
 - f. Predicciones del modelo.
 4. Modelos de colisiones vs información de OCK.
 5. Objetos del cinturón de Kuiper y asteroides.
 6. Conclusiones.

6. Conclusiones:

La evolución difiere mucho en la formación planetaria en la región interna o externa del Sistema Solar: en pocas UA se forman rápidamente ($\sim 0.1-1$ my) cuerpos muy masivos que contienen la mayor parte de los sólidos en el disco. En cambio, para $a > 40$ UA el crecimiento descontrolado deja la mayor cantidad de masa en objetos pequeños permitiendo que choques a bajas velocidades rompan los cuerpos.

Con un disco de planetesimales entre 20-100 UA el crecimiento colisional produce objetos con $r \sim 10-2000$ km y distribuciones en tamaños parecidos a los que se observan hoy en día para los OCK. Mientras se forman los OCK, la migración de los planetas gigantes dispersan a los objetos en distintas clases dinámicas. Una vez que los planetas gigantes alcanzan sus órbitas actuales, los choques en cascadas reducen la masa de los OCK hasta lo que se observa actualmente y produce el quiebre en las distribuciones de tamaños en $r \sim 20-40$ km. Los planetas continúan con la dispersión dinámica liberando la zona interna del CK pero manteniendo el disco dispersado.

6. Conclusiones:

Se observa finalmente que es necesario combinar coagulación y efectos dinámicos para tener una teoría unificada de formación planetaria para $a > 20$ UA.

Es necesario tratar evoluciones dinámicas y colisionales juntas para lograr explicar la evolución local y el tiempo de formación de los planetas gigantes, la migración de Neptuno y los encuentros cercanos con estrellas. Esto también mostrará cómo los eventos dinámicos dependen de la evolución durante el crecimiento oligárquico y de los choques en cascada. Estos nuevos cálculos y observaciones de OCK y planetas y discos de polvo en otros sistemas planetarios deberían permitir un mejor entendimiento del origen y la evolución de los OCK y otros objetos del Sistema Solar exterior.